

La calorimétrie

Partie I

Vincent Boudry
LLR, École polytechnique



École du détecteur à la mesure
Roscoff, juin 2015



Mon parcours...

- 20 ans de H1
 - ▶ Thèse : Test des modules du calorimètre Fe-Ar liquide (+ la recherche de lepto-quarks)
 - ▶ Le calorimètre arrière «SpaCal» (+ structure du proton à «petits x »)
 - ▶ Luminomètre à Fibre Cherenkov
- CALICE-ILD → ILC
 - ▶ Construction & tests de prototypes de calorimètre super-granulaire optimisés pour le «Particle Flow»
 - ◆ SiW-ECAL
 - ◆ 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 base de détection

- ▶ Optique : Scintillateurs & Čerenkov
- ▶ Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
- ▶ Détecteurs Gazeux
- ▶ Quelques exemples
- ▶ Effets annexes, et considérations «pour ingénieurs»

■ Techniques avancées, la pratique et le futur...

- ▶ Quelques ruses...
- ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout vs. particle flow.
 - ◆ ILC & CMS-HGCAL

Mercredi

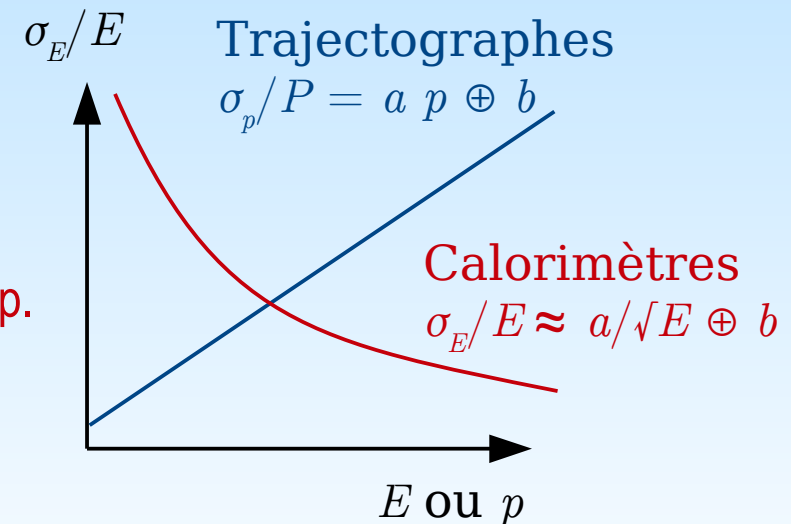
Jeudi

Vendredi

Introduction

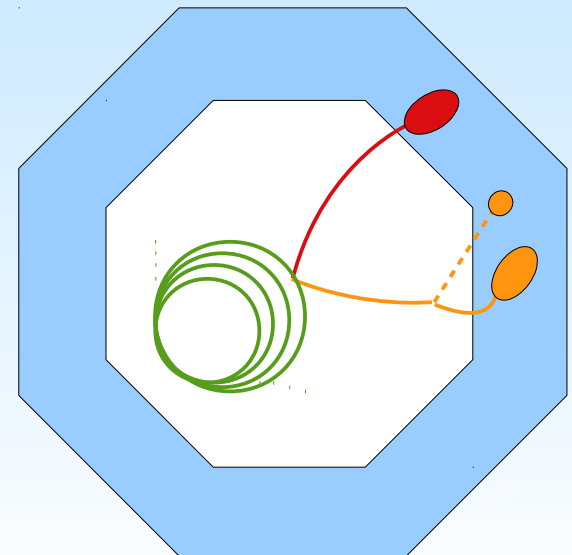
La calorimétrie

- 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

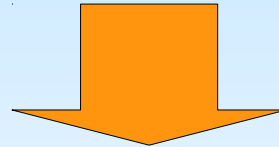
- Mesure de l'énergie de particules par arrêt (\perp philosophie trajectographes)
 - ▶ «Calorimètre \cong bloc de matière dense instrumenté»
 - Mesure des neutres :
 - ▶ Electromagnétique : γ
 - ▶ Hadronique : n , K_L^0
 - Mesurer l'énergie des électrons
 - Mesurer l'énergie des hadrons chargés.
 - Identifier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



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 $\sim \text{qq MeV}$
 - ▶ $\rightarrow \sim \text{domaine des bolomètres (à qq } 0,1\text{K)}$

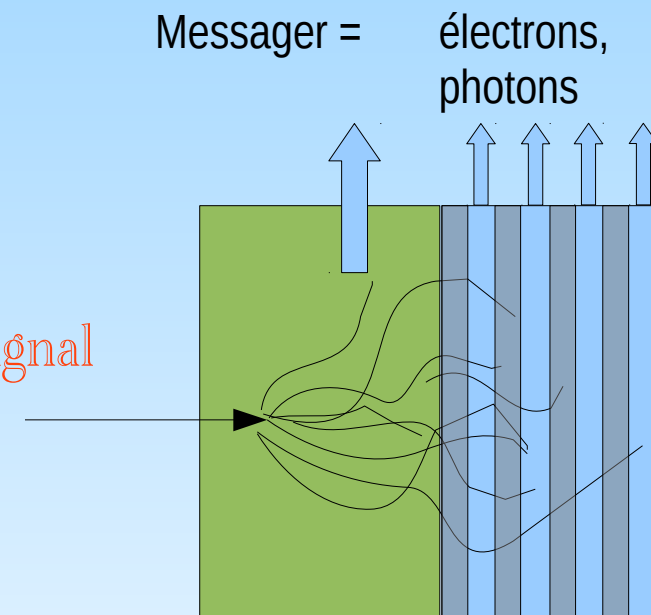
Besoin d'une amplification
physique du signal d'ionisation



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. EM & Hadronique
- Puis mesure des traces chargées \leftarrow les seules laissant un signal
- $E_{\text{total}} \propto \sum \ell_{\text{traces}} \propto$ 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

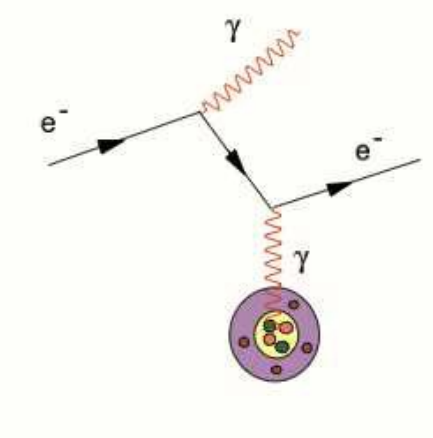
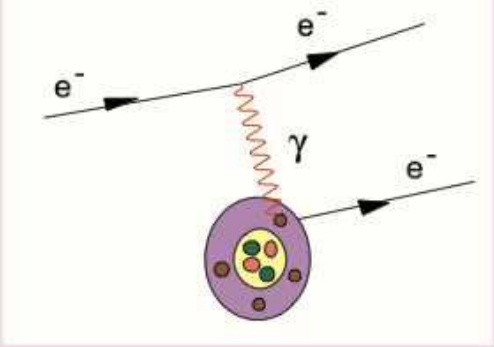
Glossaire

- 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

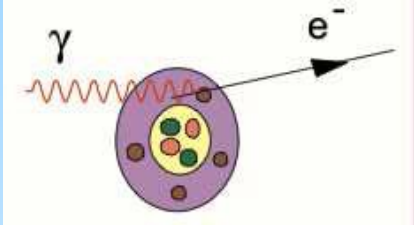
Ionisation



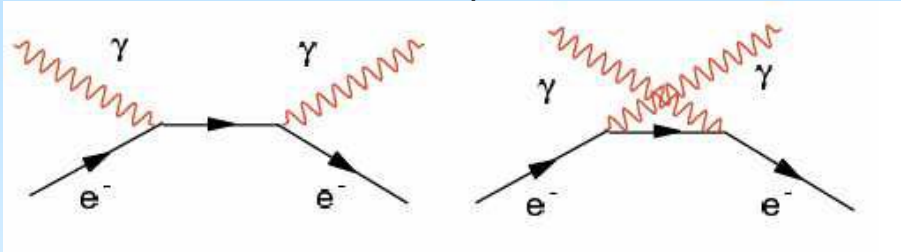
Rayonnement de freinage

Photons

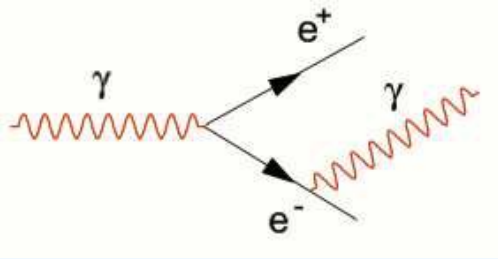
Effet photo électrique



Effet compton

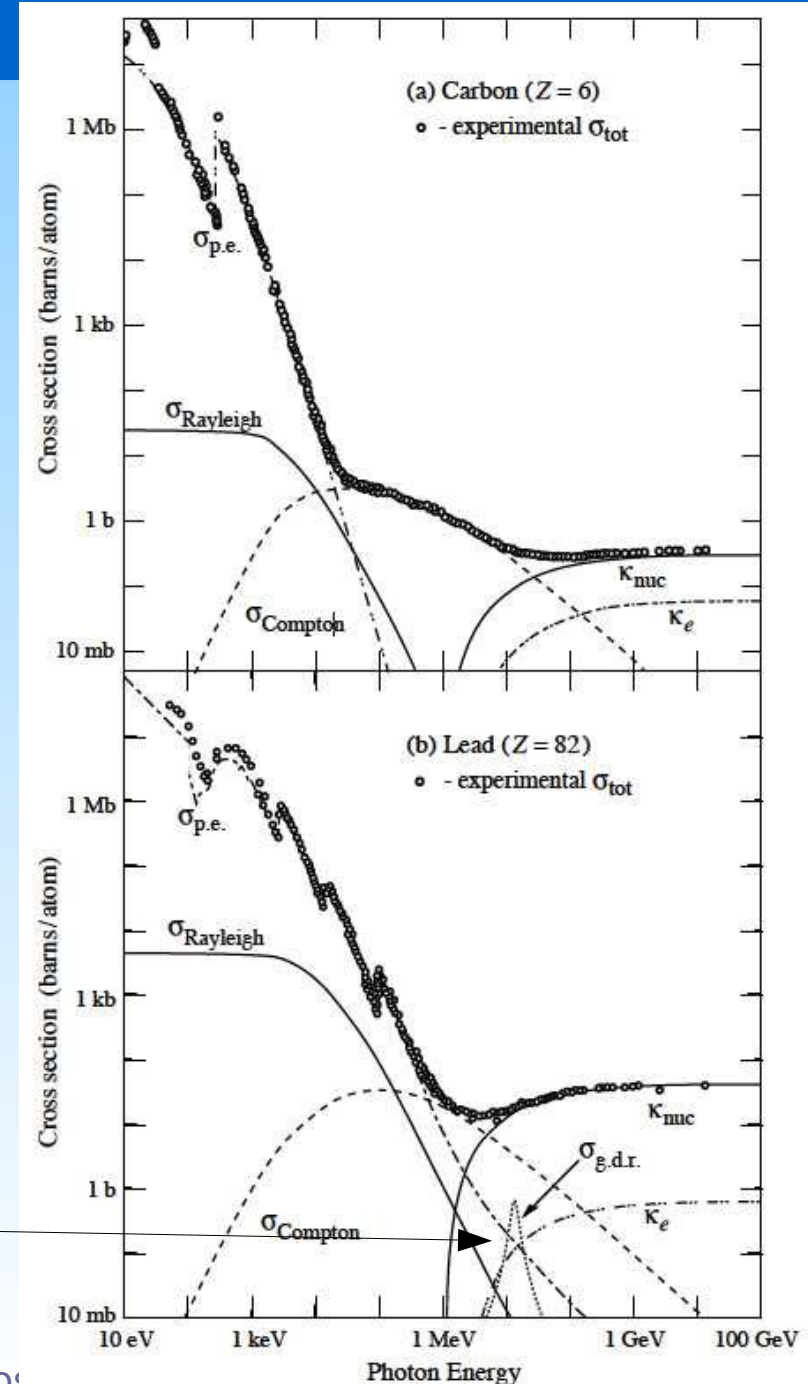


Création de paire



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

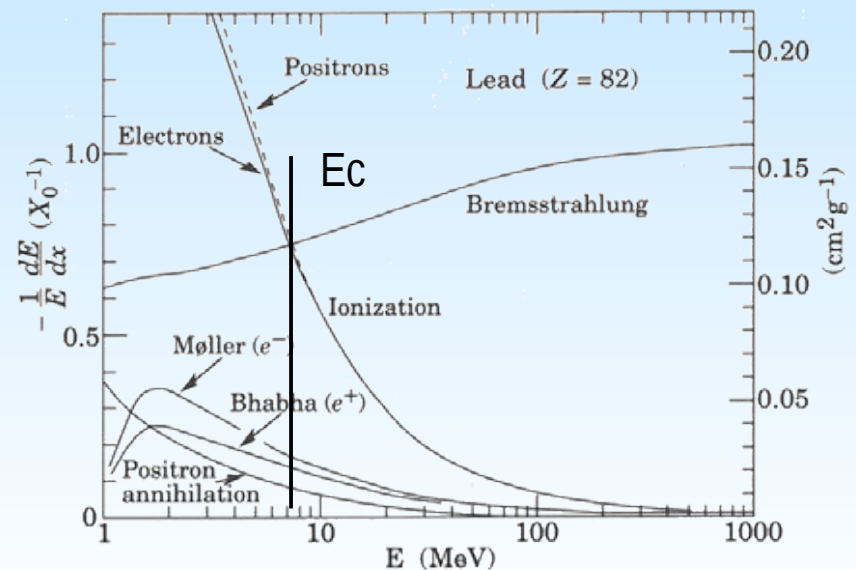
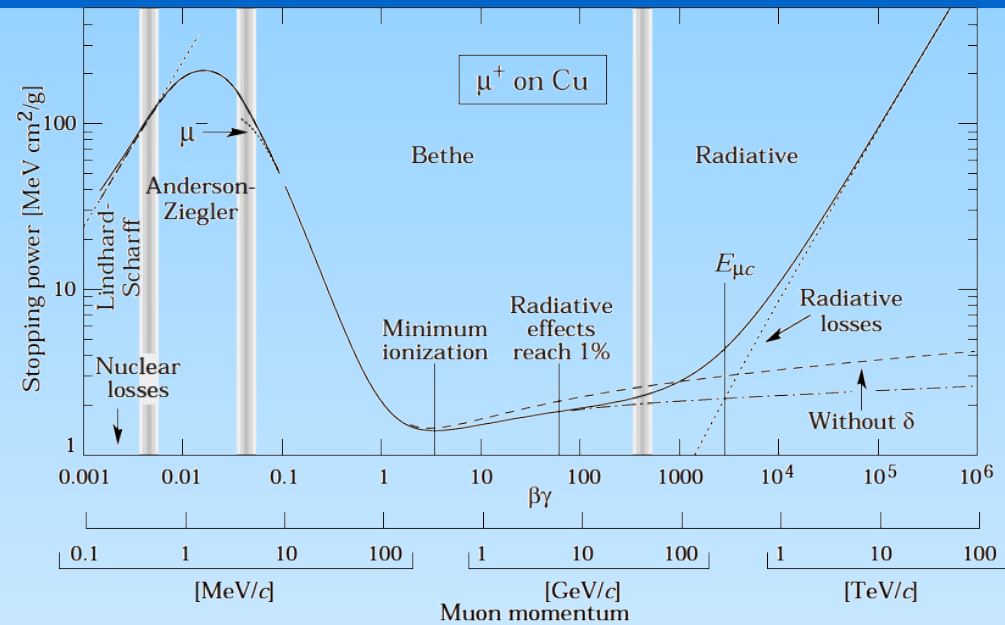
■ Particules Chargées

- ▶ Pertes graduelles par Ionisation
 - ◆ Par bremsstrahlung à haute énergie
- ▶ Pour les particules lourds (*tout sauf e±*)
 - ◆ Équation de Bethe-Bloch qq %

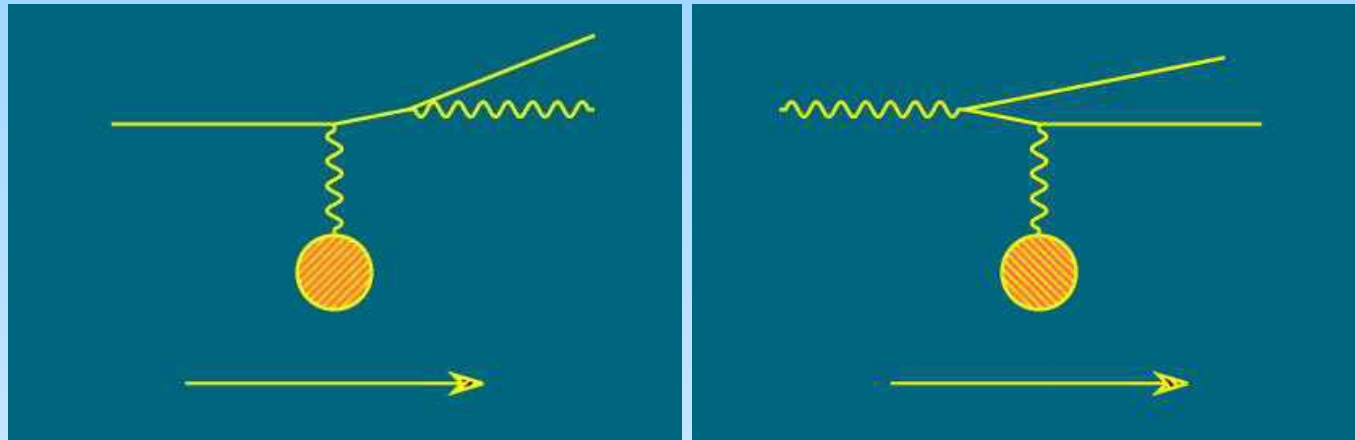
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

■ Électrons/Positrons

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



Principaux processus électromagnétique



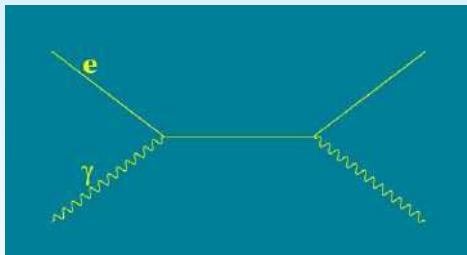
Bremsstrahlung

Création de paires

Mais aussi

A basse énergie ($< 2 \text{ GeV}$)

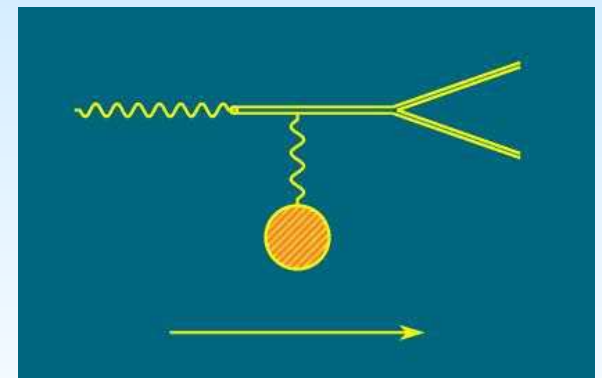
Compton



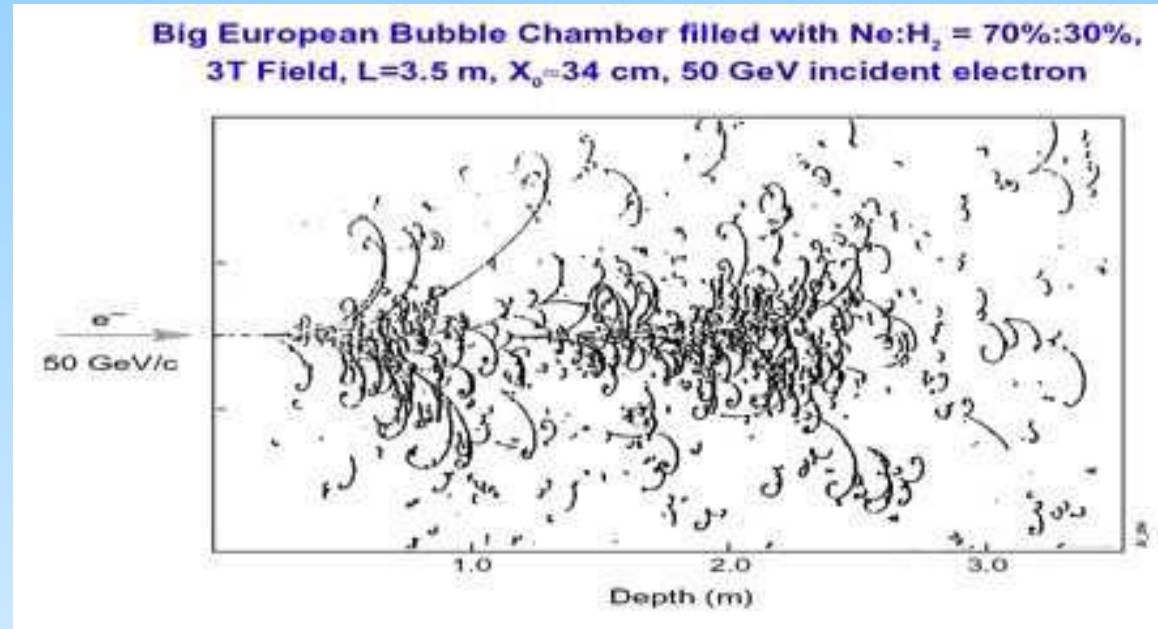
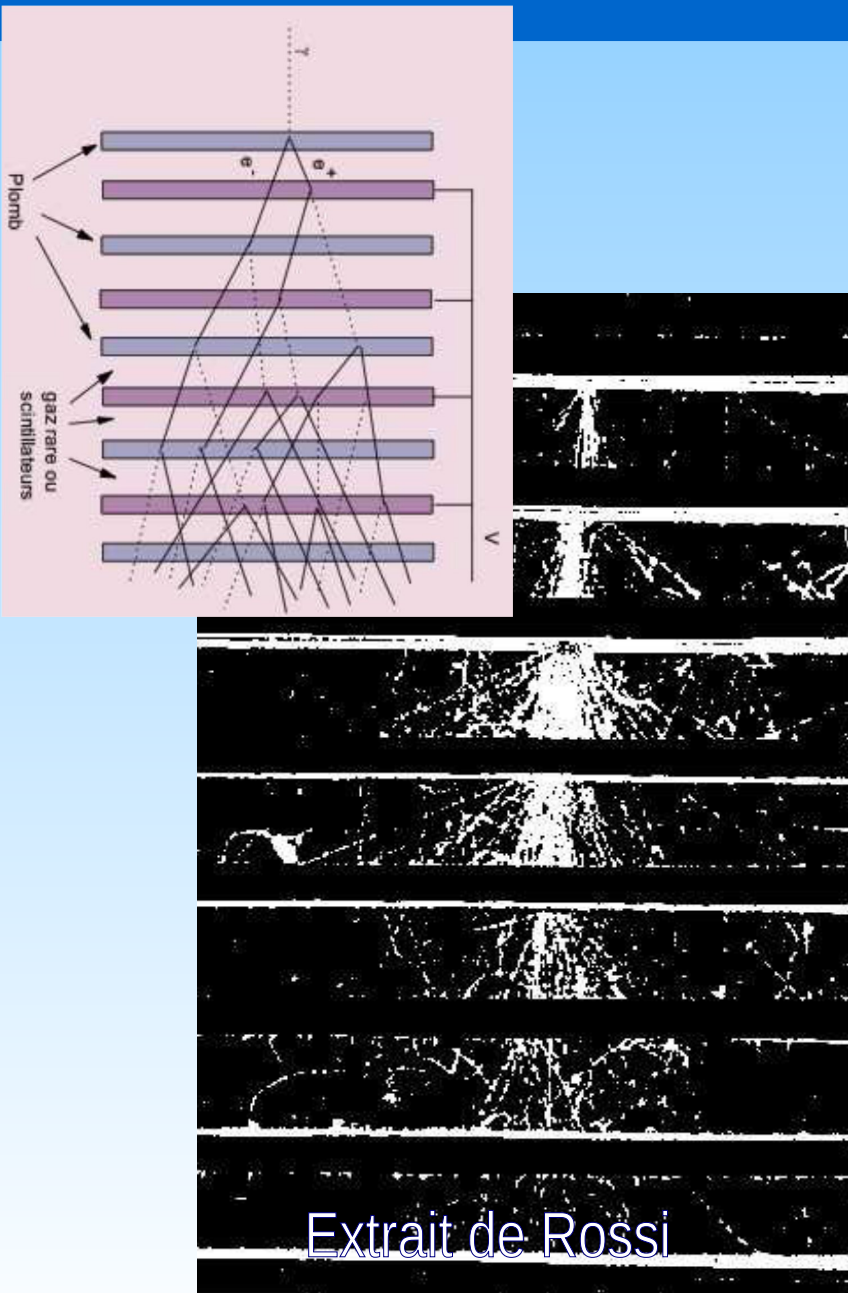
Effet photoélectrique

A haute énergie
au niveau de 10^{-4}

Création
de paires de muons
de paires de pions

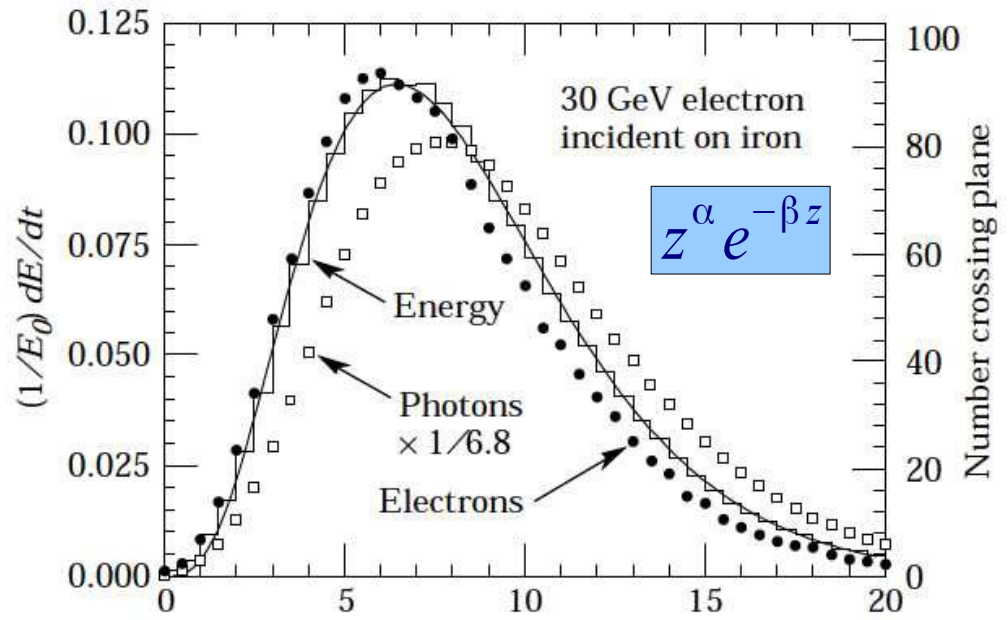


Gerbes électromagnétiques



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

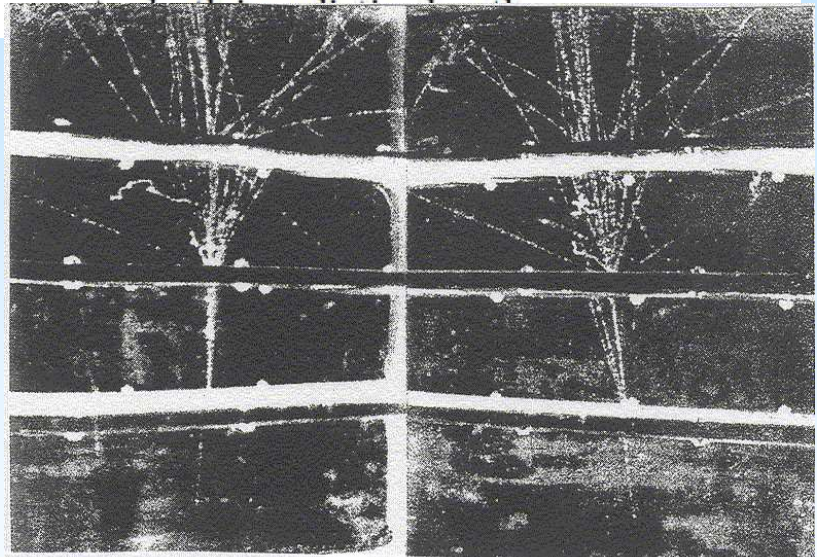
Profils longitudinal ; Longueur de radiation X_0



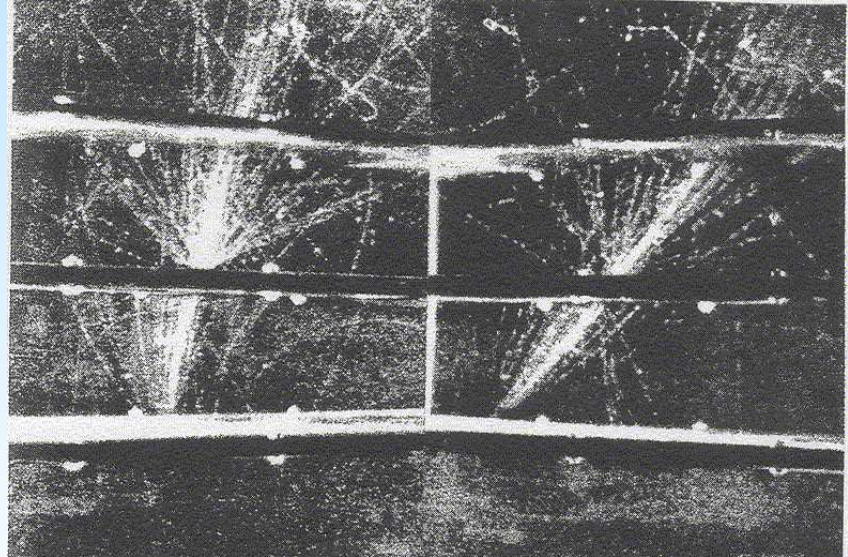
$1 X_0 =$

- 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



Gerbe pour 1 photon

L. Fussel 1939 [from Nessi ICFA 2001]

Caractérisation transverse de la gerbe : rayon de Molière

La structure transverse est indépendante de l'énergie

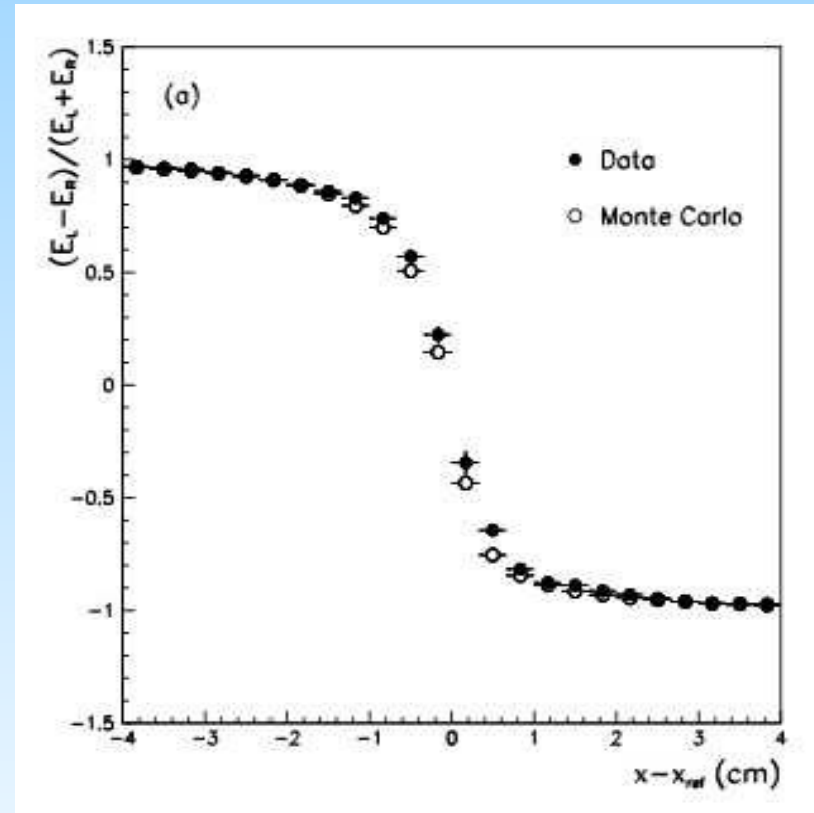
- 1 cœur compact
- 1 halo diffus (Comptons)

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

GEANT shower
(PbWO₄ crystal)



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

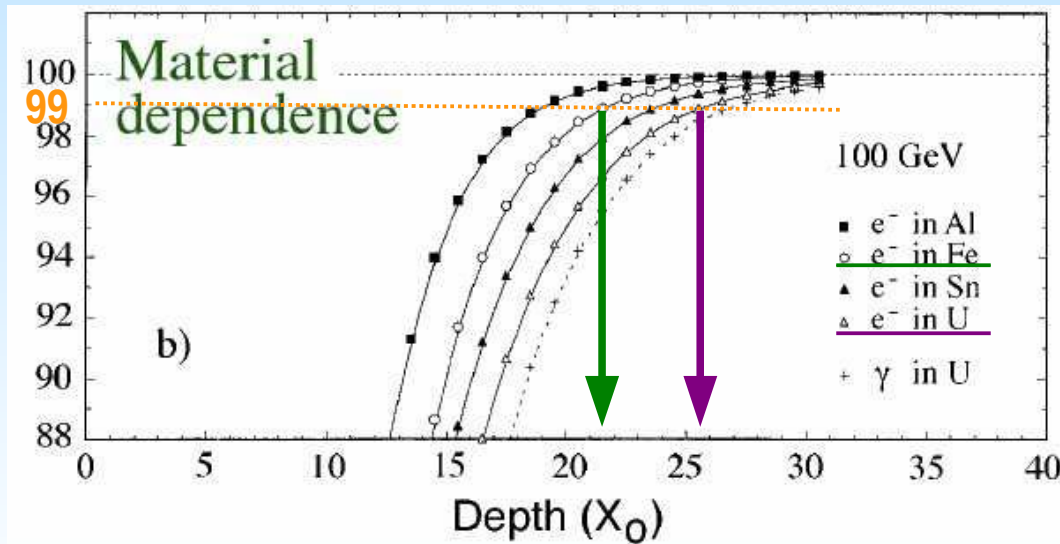
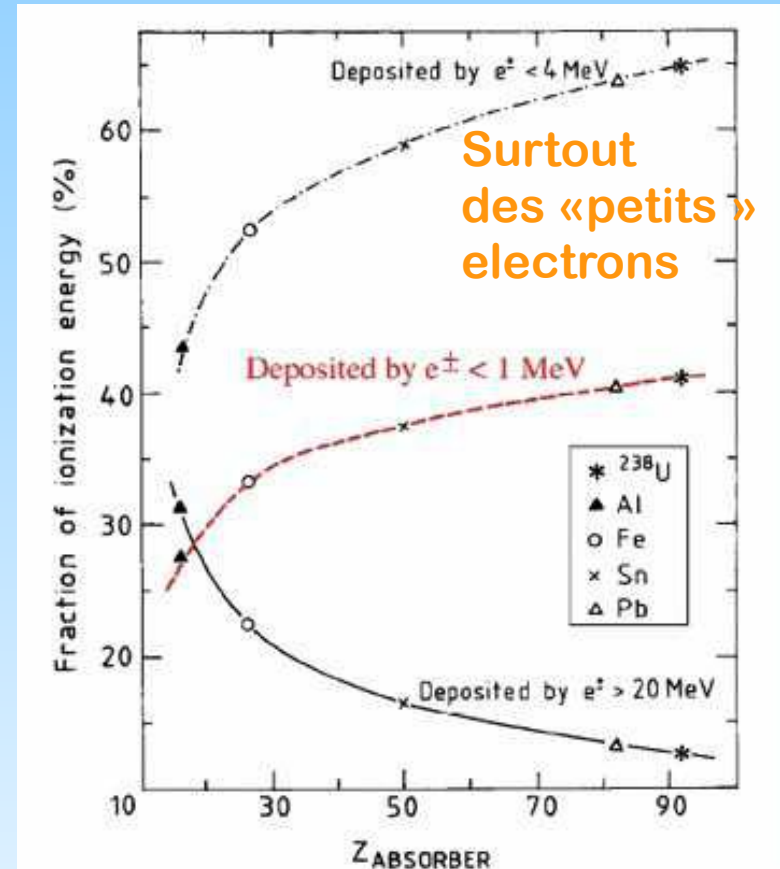
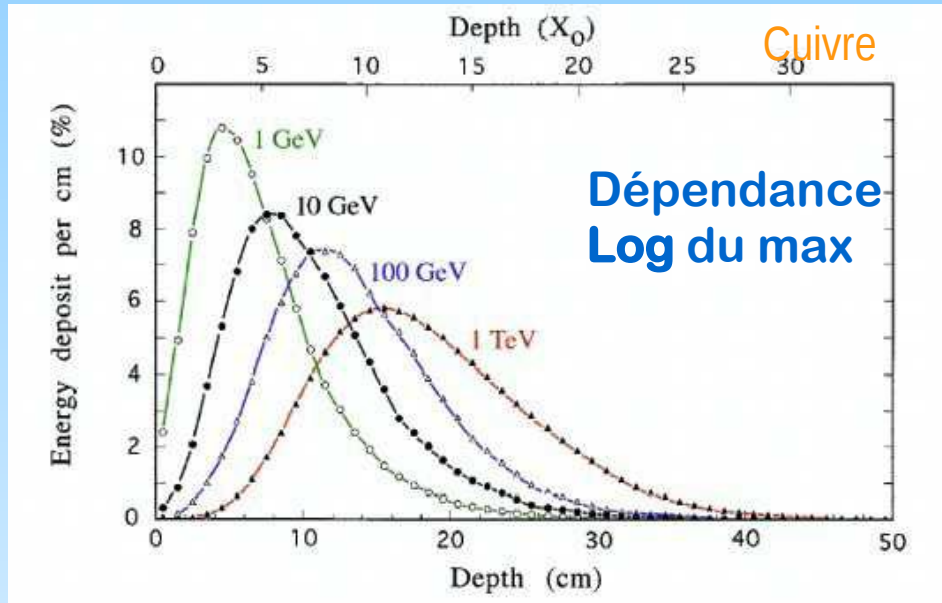


Rayon de Molière (R_M)

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 $\sim 25-30 X_0$

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
NaI			3,67	2,59		
Air			0,001	30420		

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

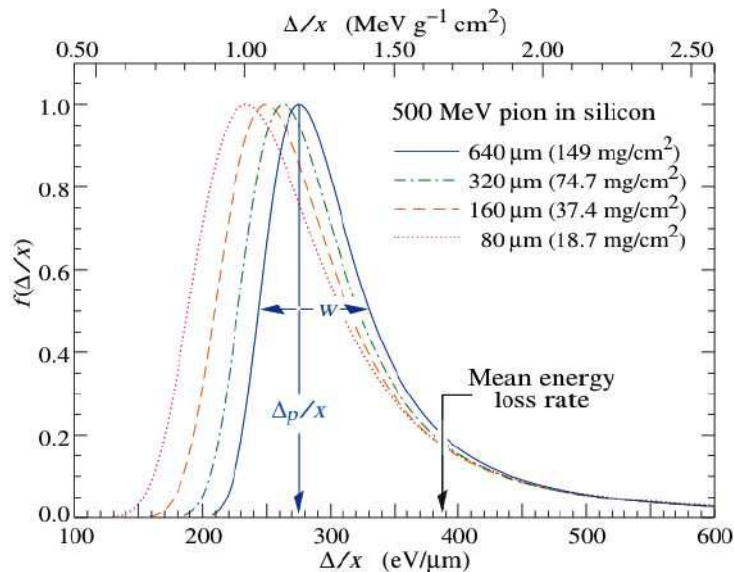
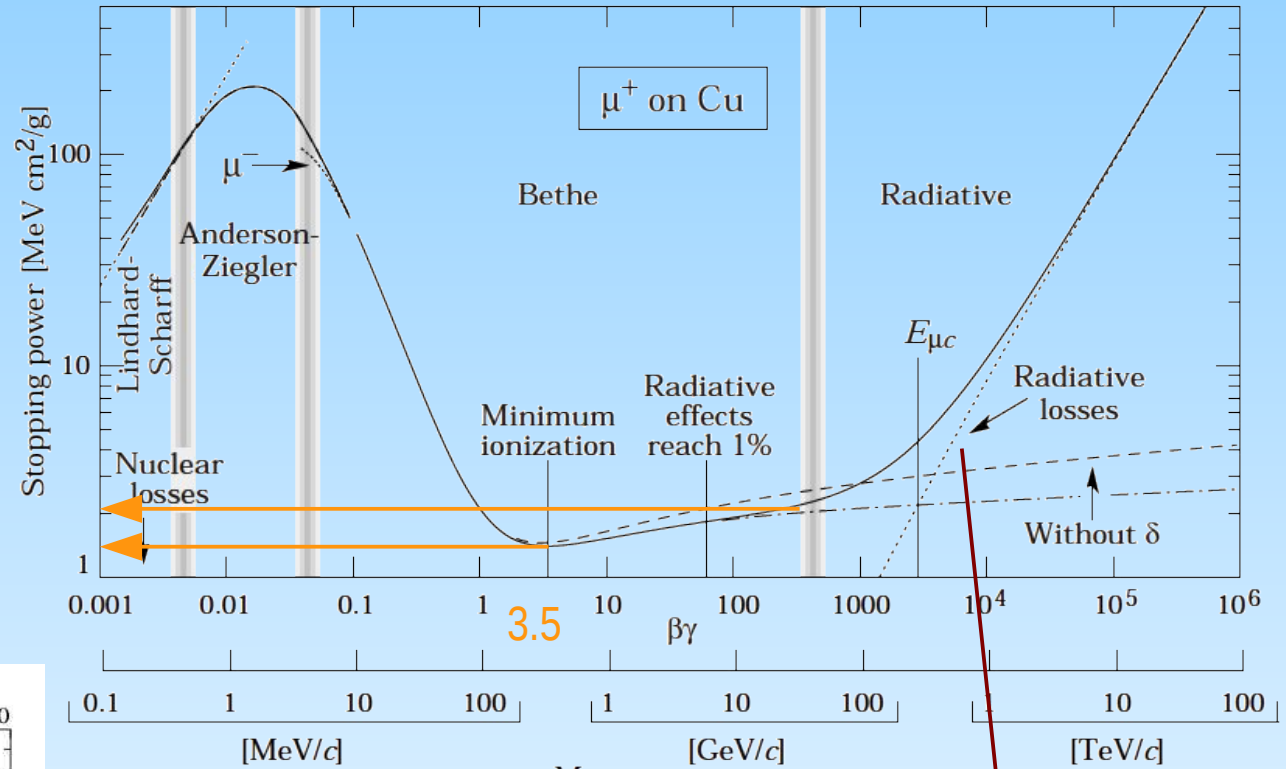
$$\frac{1}{R_M} = \frac{1}{E_s} \sum \frac{w_j E_{cj}}{X_j}$$

Les muons

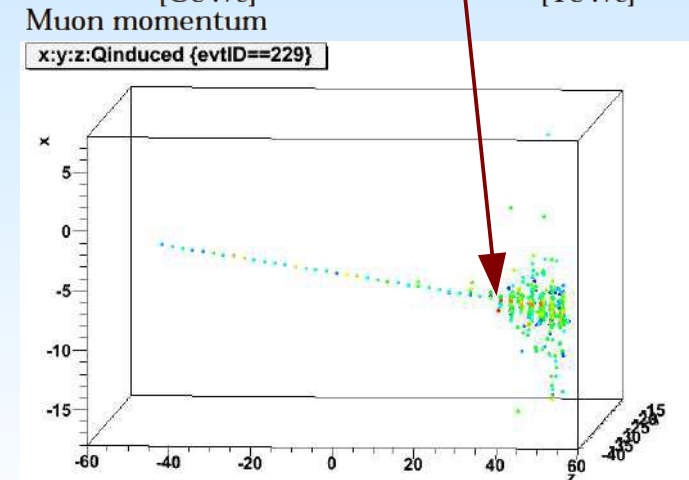
■ Comme dans les trackers

► dE/dx

► Landau



μ de 10 GeV



Les interactions hadroniques

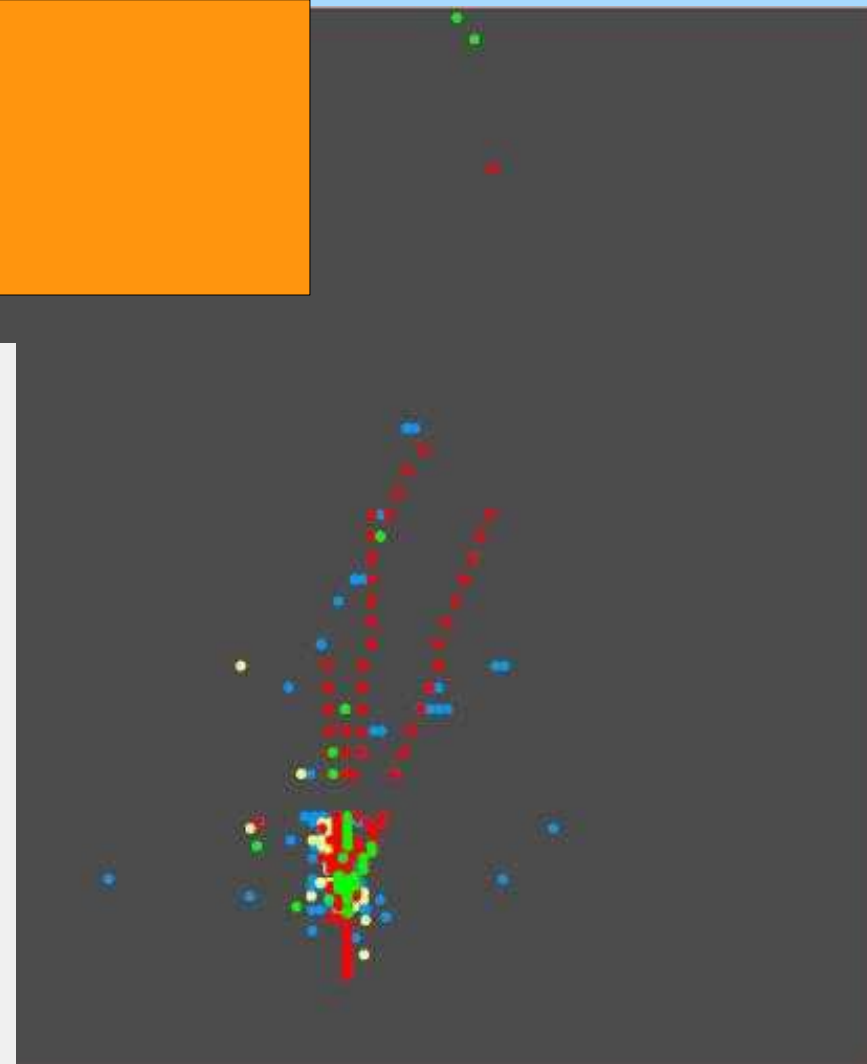
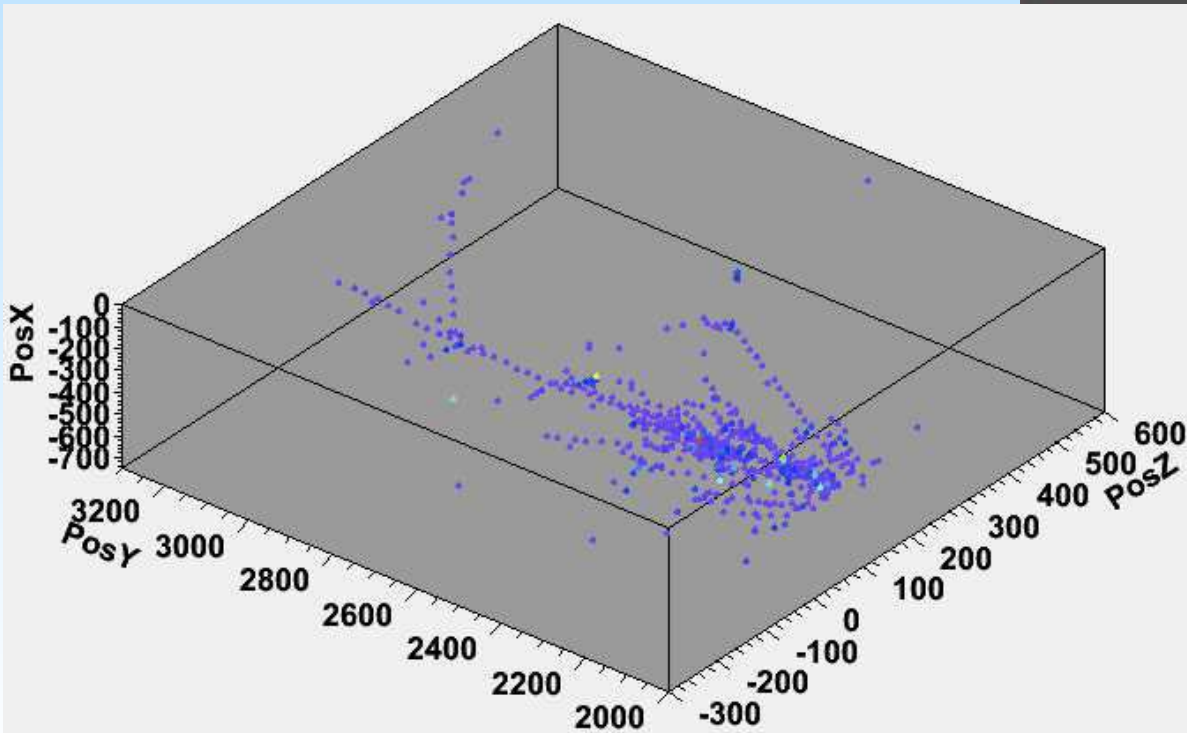
- Matière hadronique (\equiv lourds \leftrightarrow leptons \equiv légers)
 - ▶ Baryons : constitués de 3 quarks
 - ◆ p, n, Δ^{++} , ...
 - ▶ Mésons : constitués de 1 quark–1 anti-quark
 - ◆ $\pi^{\pm,0}$, K^{\pm} , $K_{L,S}^0$
- Chargés / neutres \rightarrow interaction EM et faibles
- + interactions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

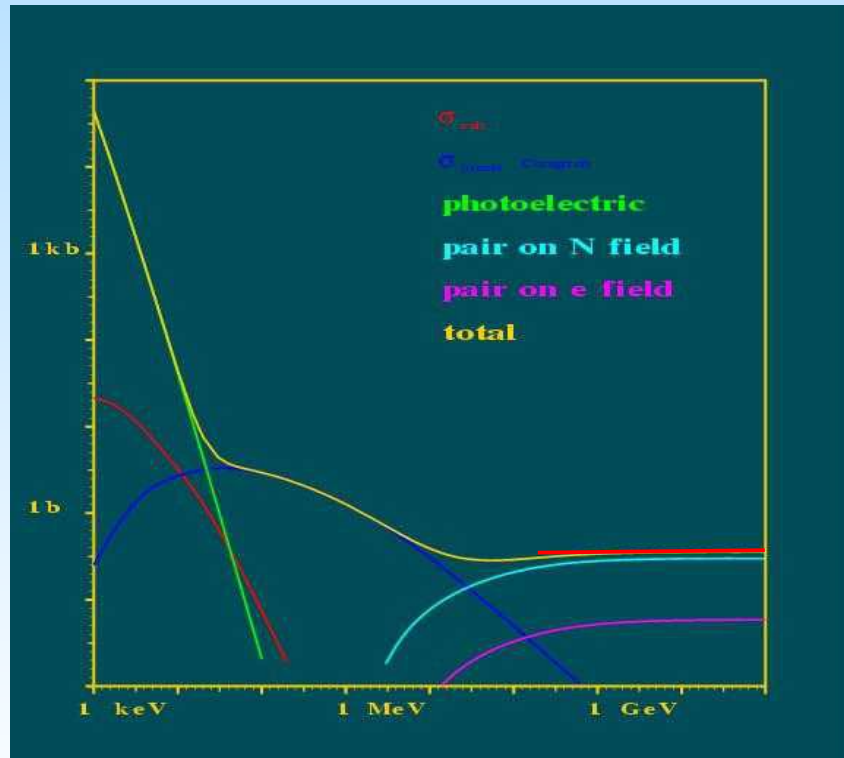


Longueur de radiation λ_0 ,

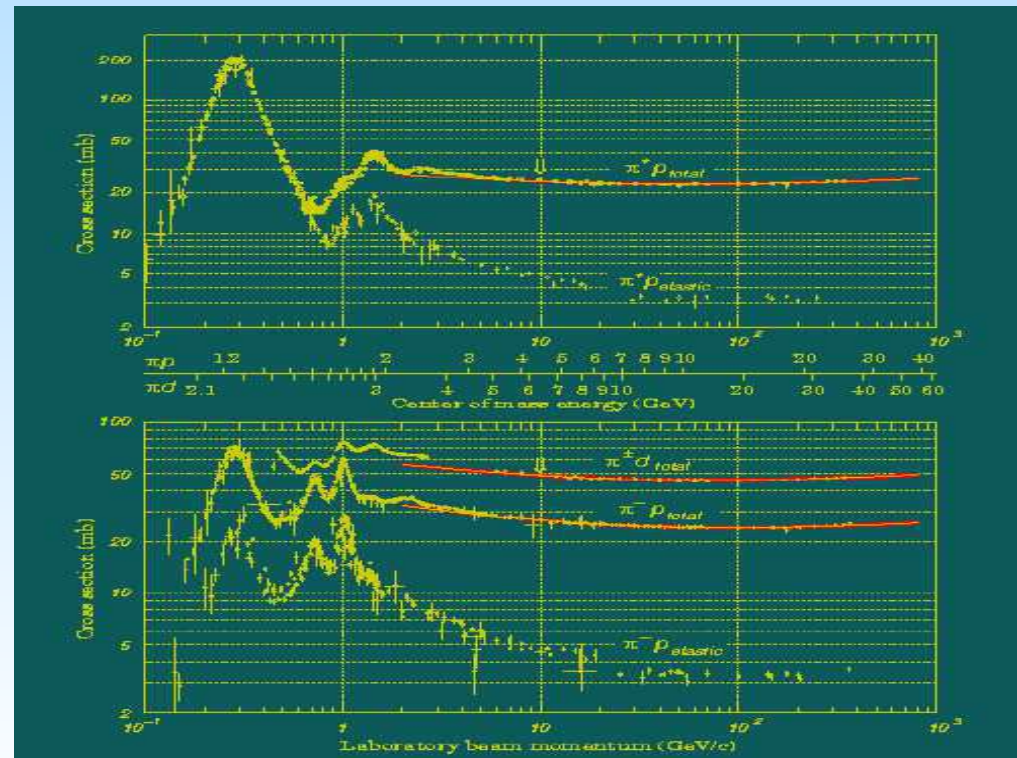
Longueur d'interaction λ_{int} :

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



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



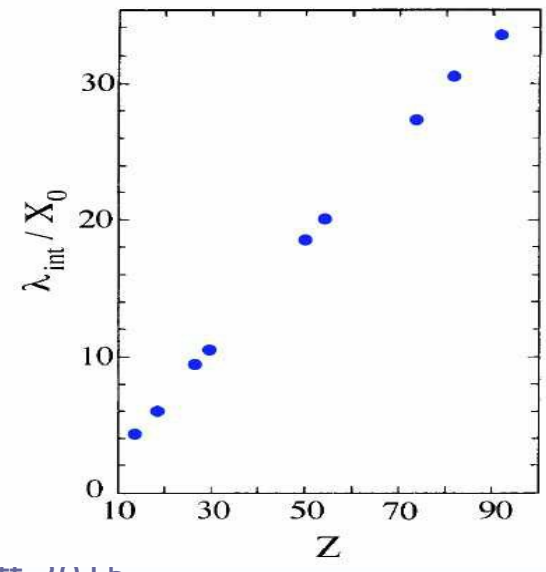
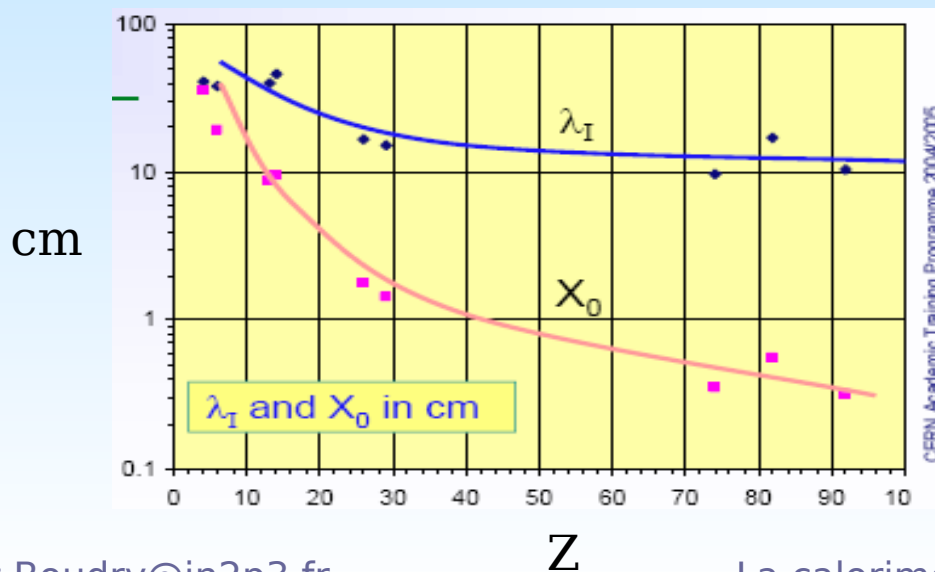
Quelques chiffres

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

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>

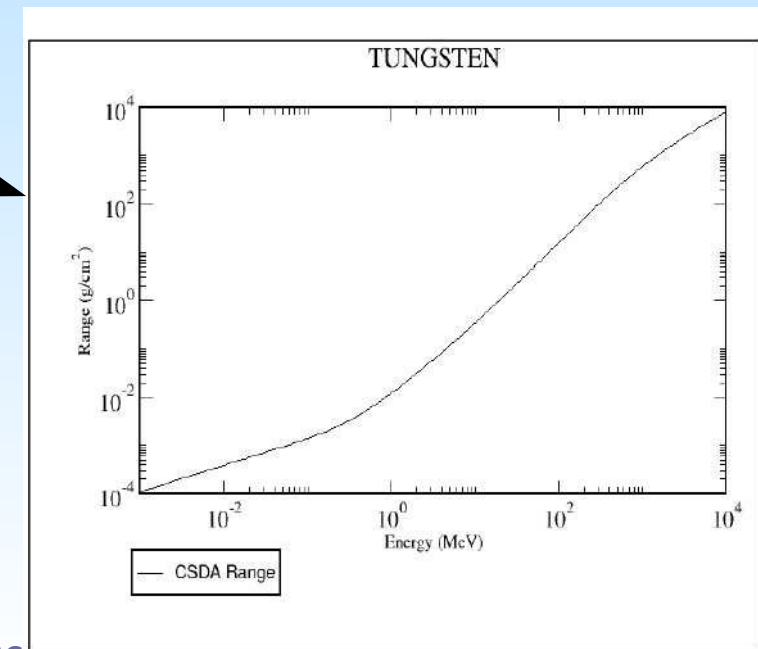
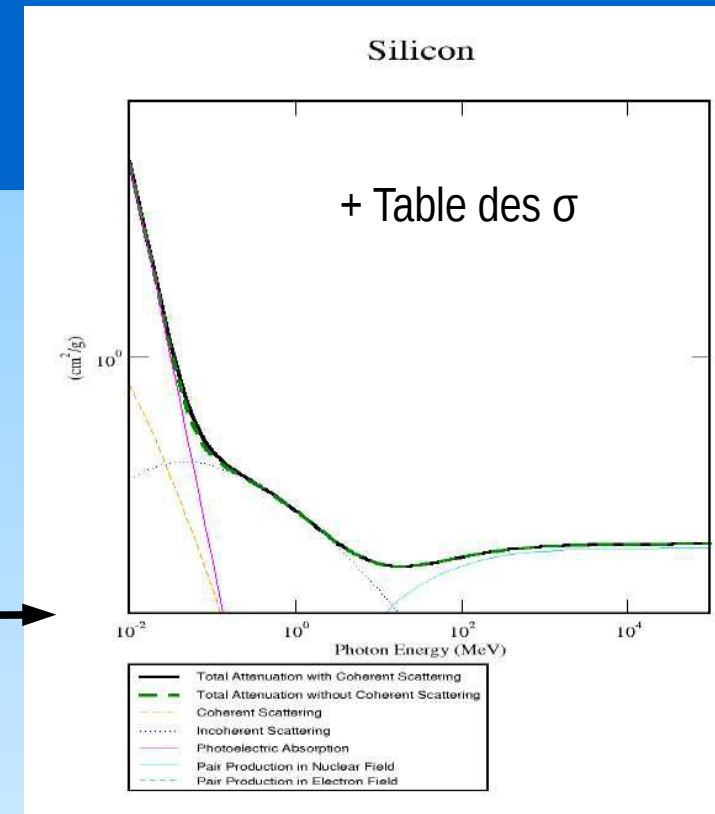
◆ X-COM : $\sigma_{\gamma}(E)$

◆ Calculs de range

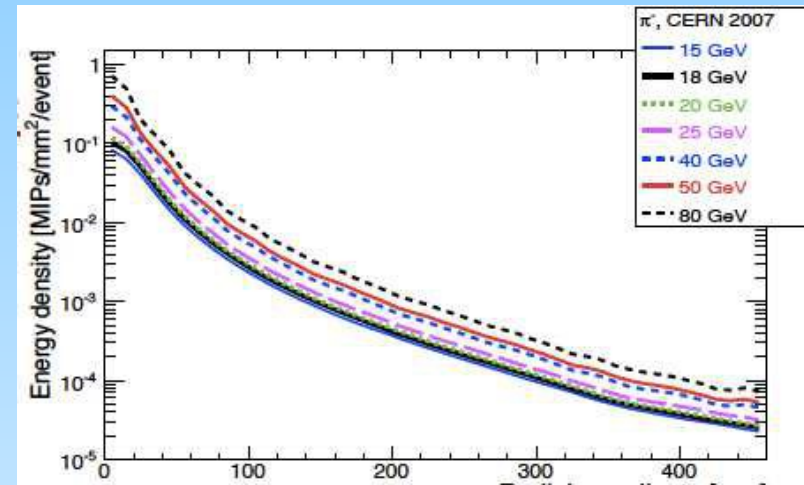
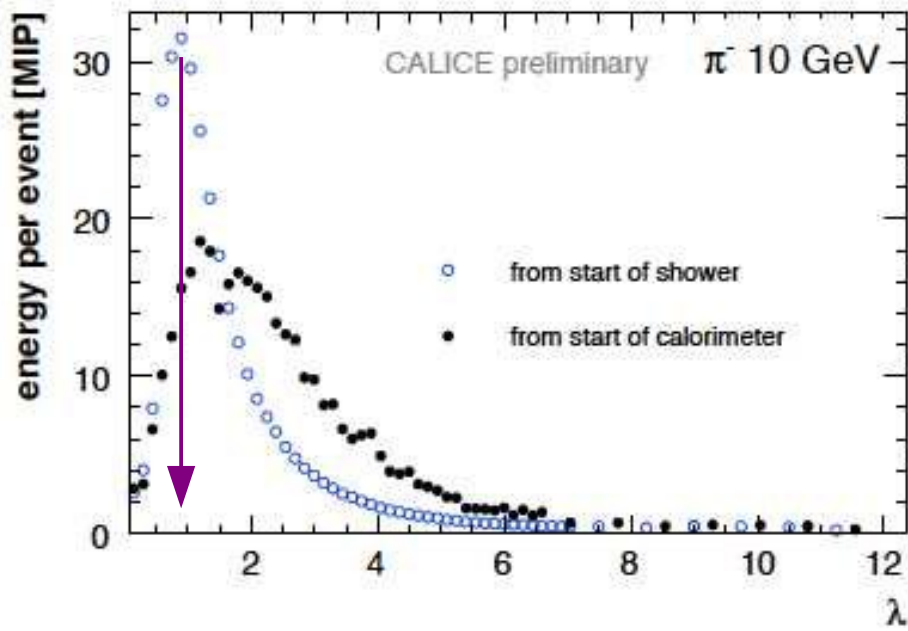
- estar : electrons
- pstar : protons
- astar : α

■ Nuclear properties

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

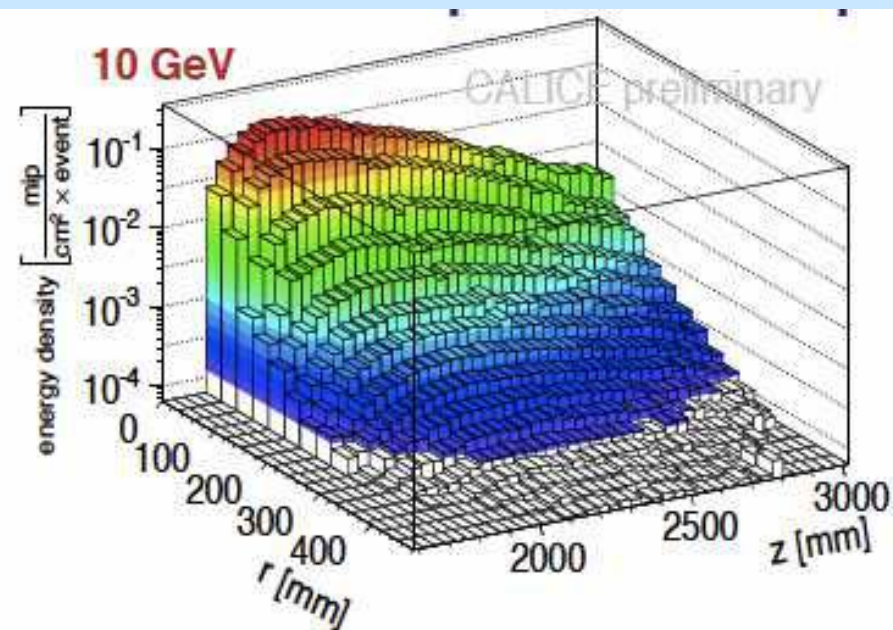


Profil des gerbes hadronique

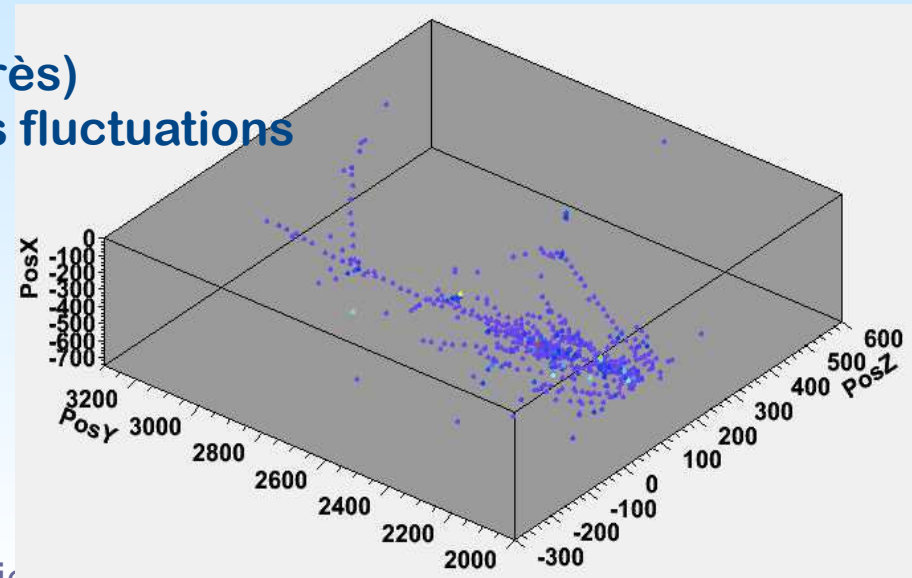


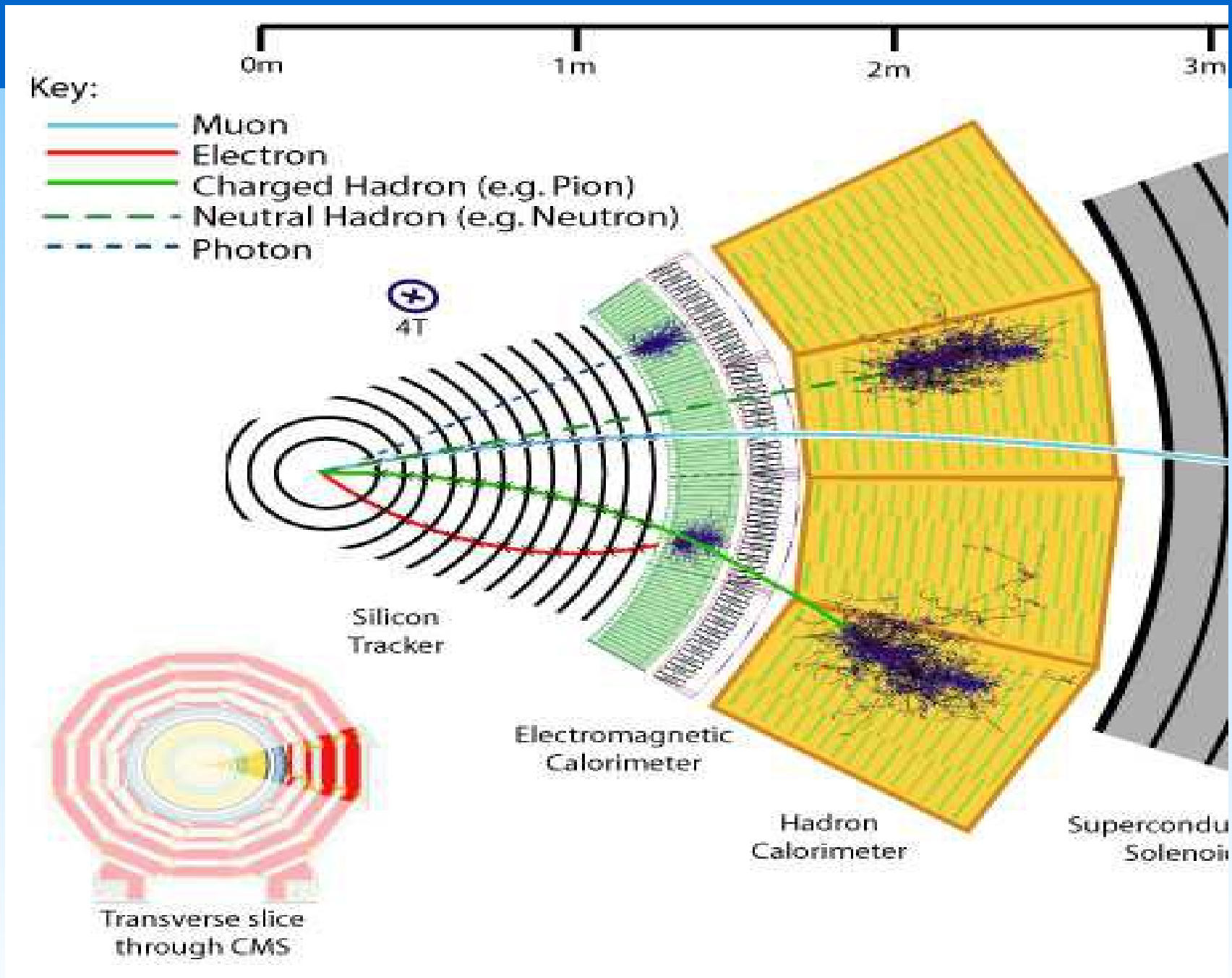
Gerbe Hadronique ~100 GeV à

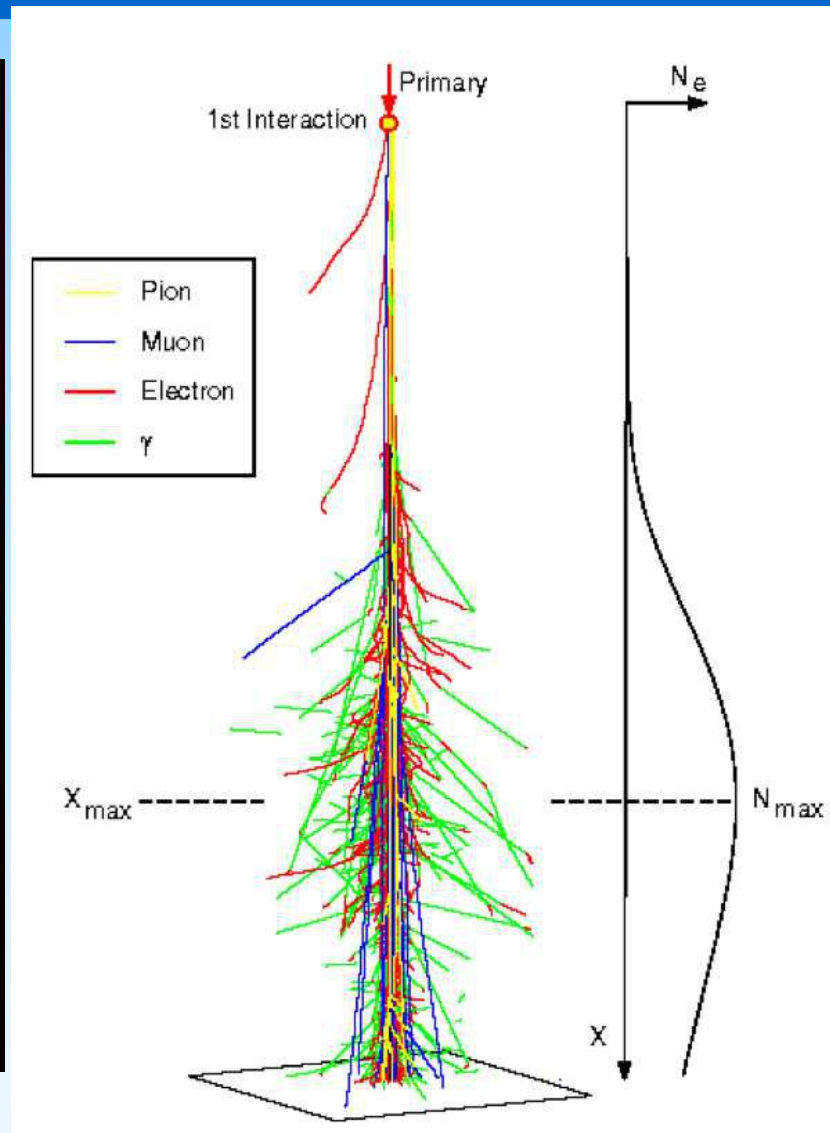
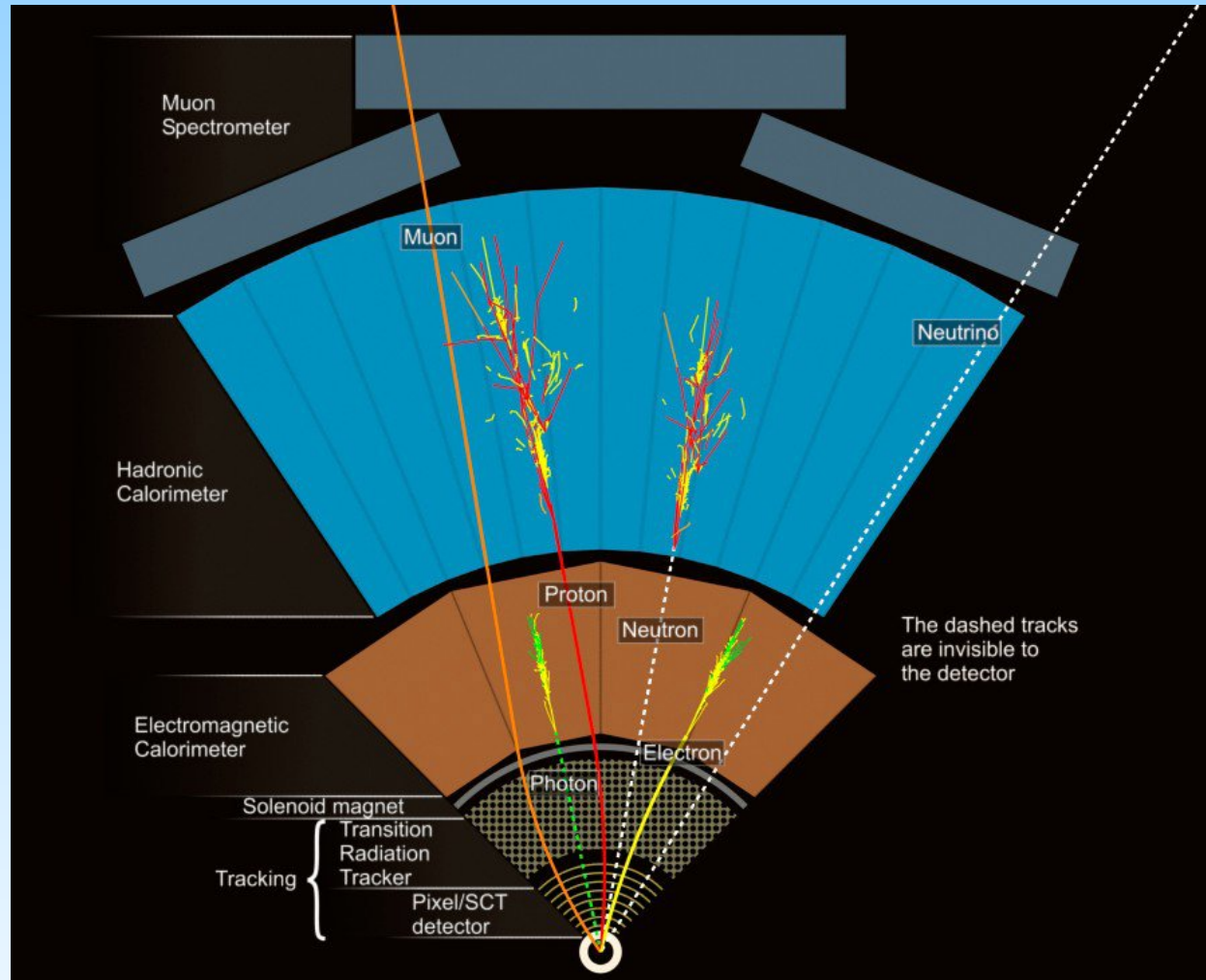
- longitudinalement : 95% dans $8 \lambda_{int}$
- latéralement : 95% dans $R \leq 1,5 \lambda_{int}$



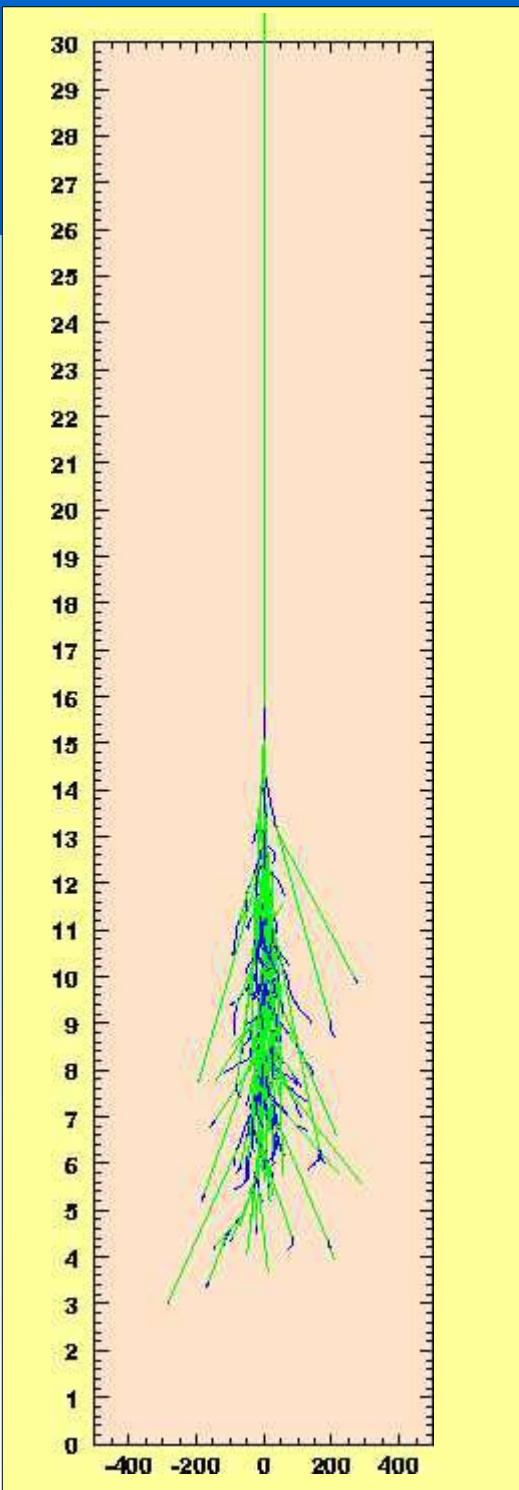
(très très)
Larges fluctuations



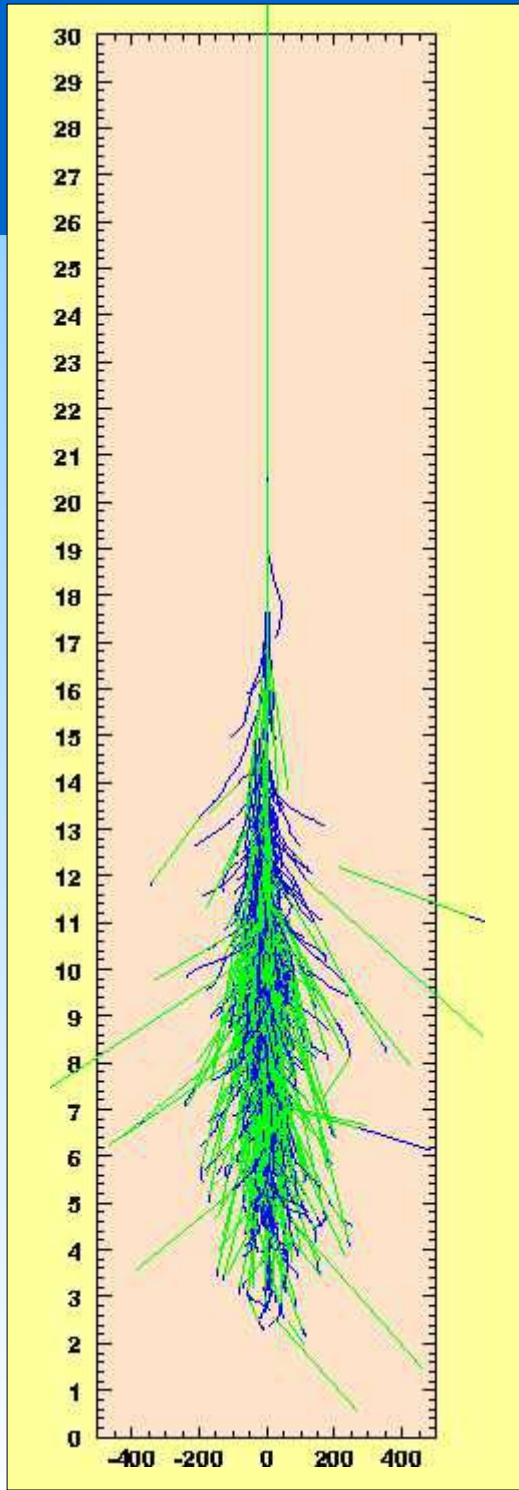




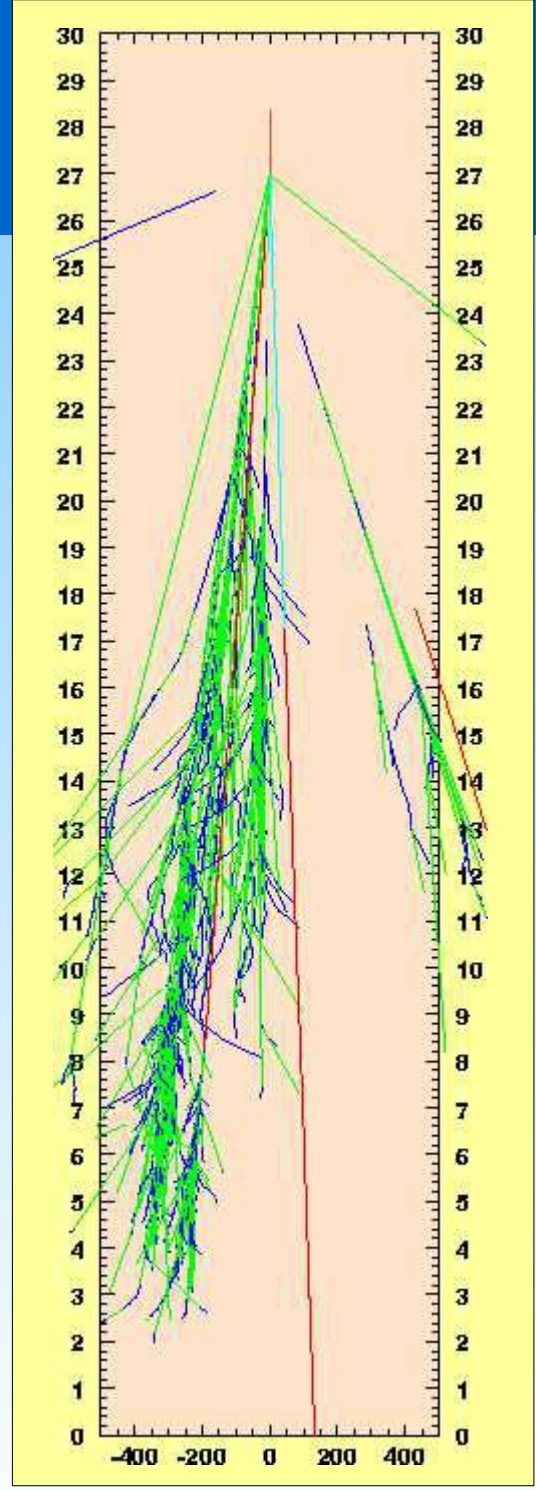
γ 50 GeV



γ 300 GeV



p 300 GeV



By courtesy of Mathieu de Naurois

Autopsie d'une gerbe hadronique

■ Collisions dures

▶ production de secondaires

▶ populations

◆ ~30% π^+

◆ ~30% de π^-

◆ 30% $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

■ + fragments de noyaux

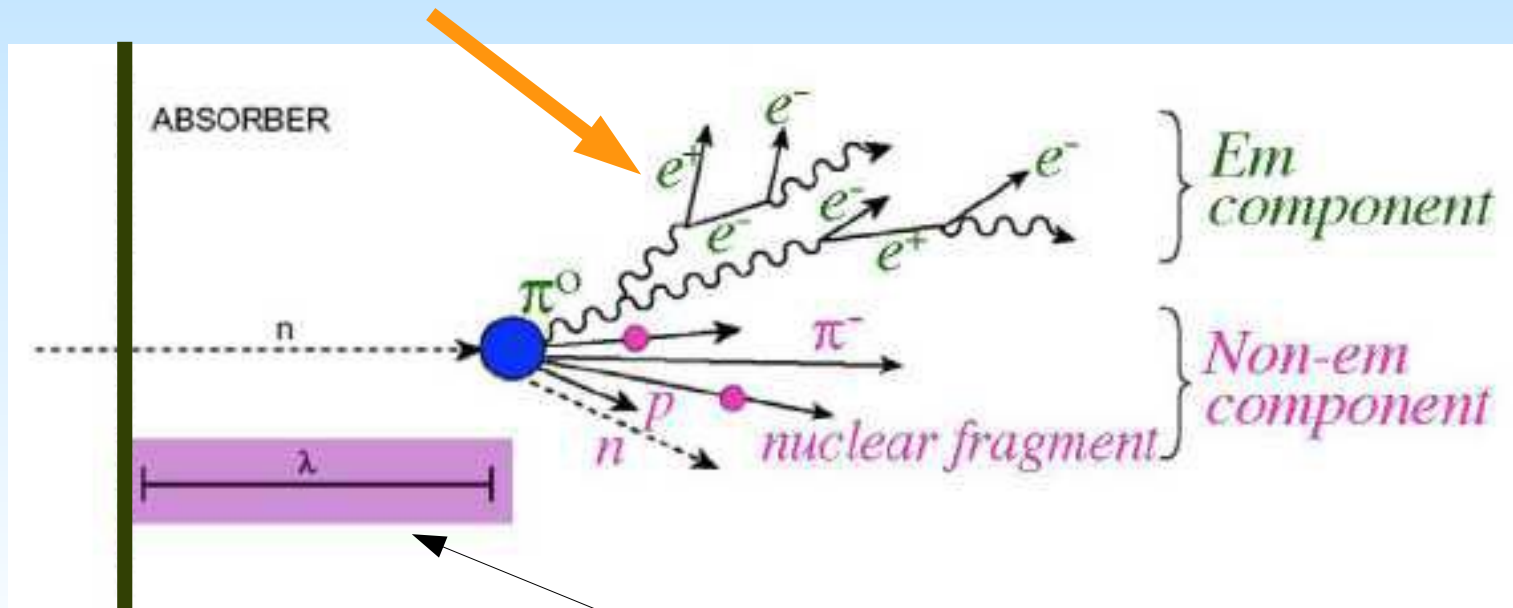
▶ neutrons rapides

▶ dés-excitations

◆ n

◆ γ

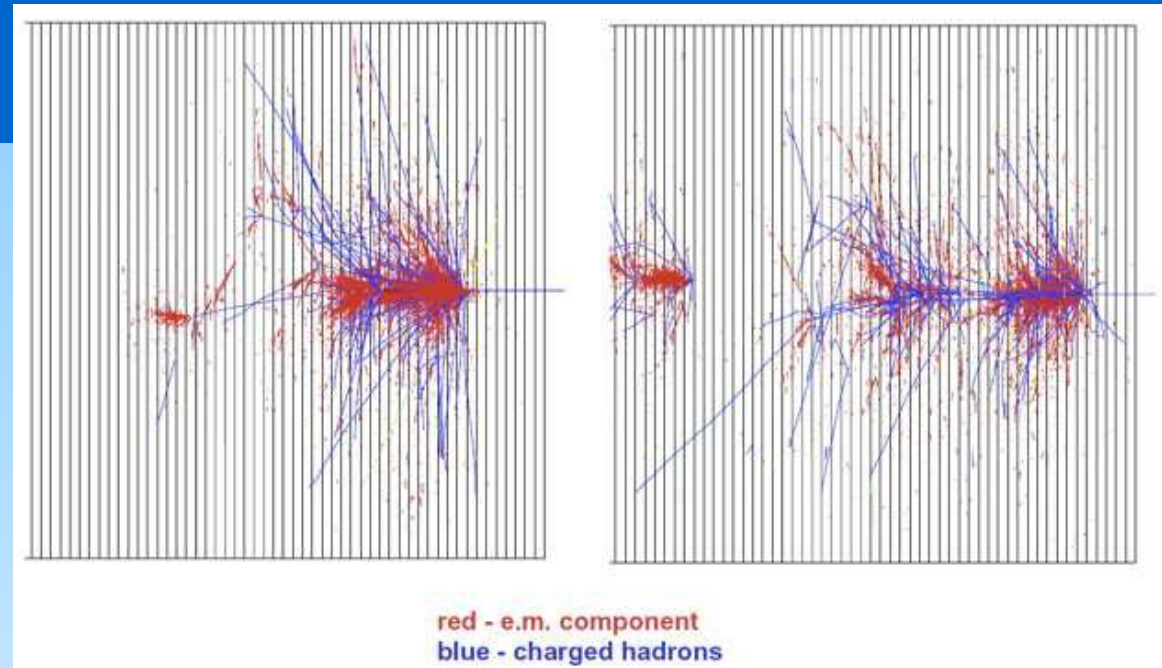
◆ α



Longueur typique d'interaction

La fraction EM

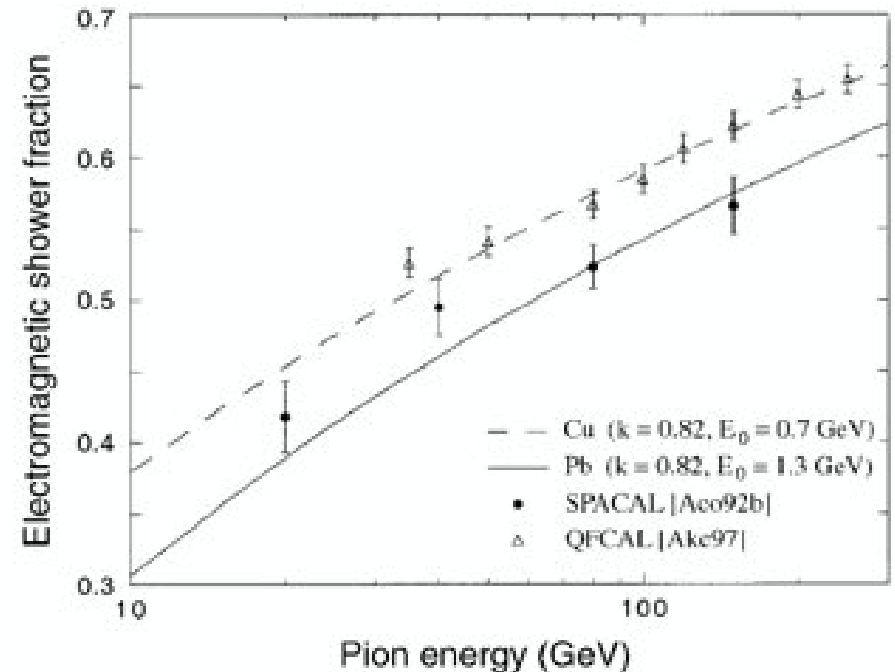
- À chaque collision :
 - ▶ π produits ~ à égalité :
 π^+ , π^- , π^0
 - ◆ $\pi^0 \rightarrow$ gerbe EM « locale »



- 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 :

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

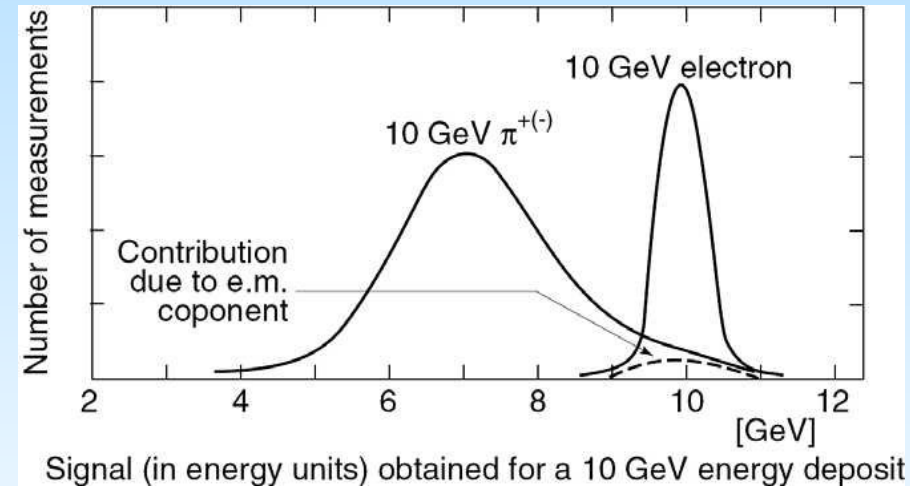
Rapport

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

- ▶ 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)

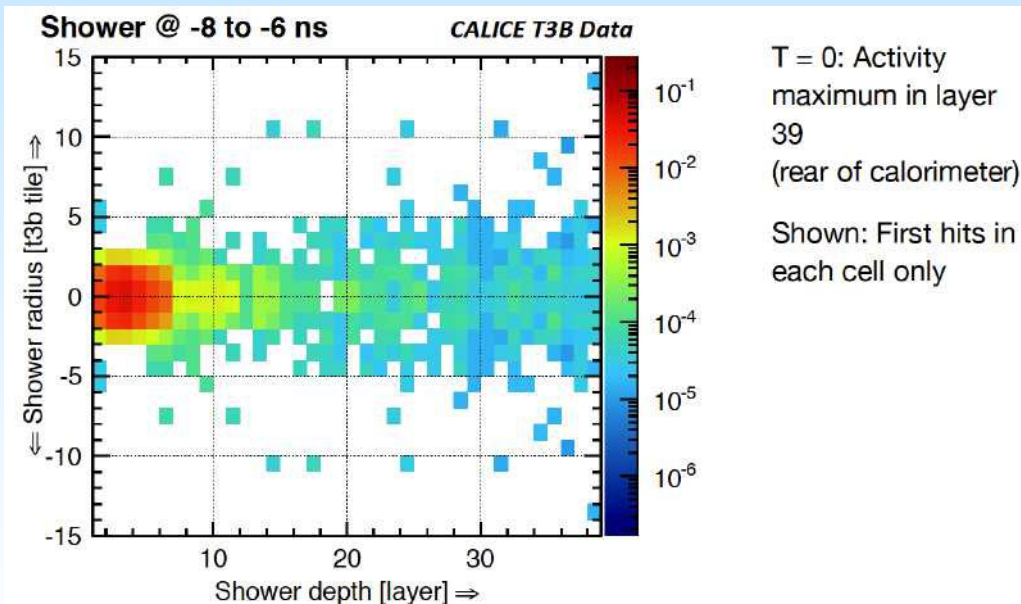
Composante neutronique secondaire

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

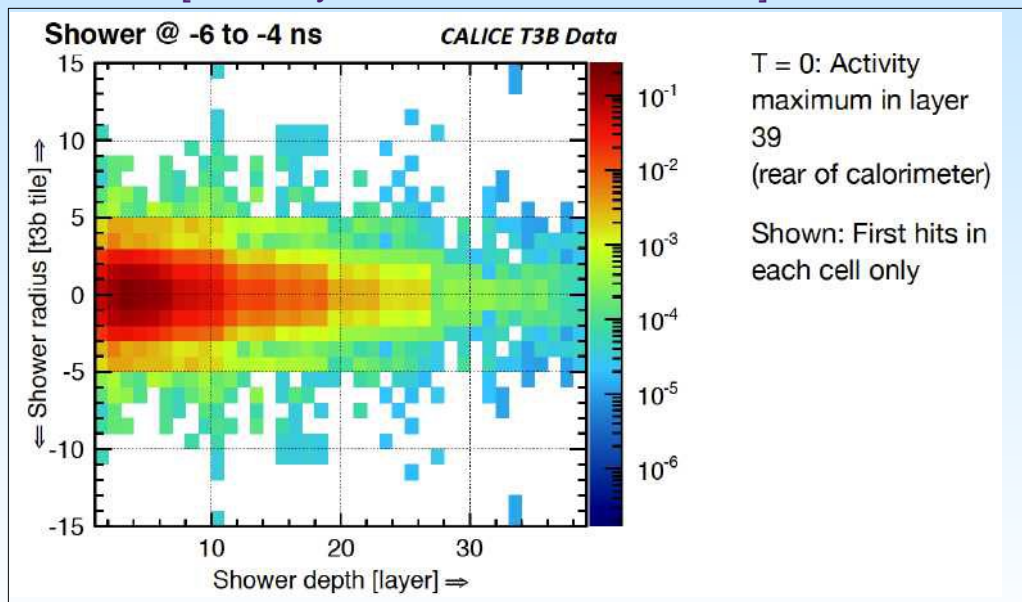
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

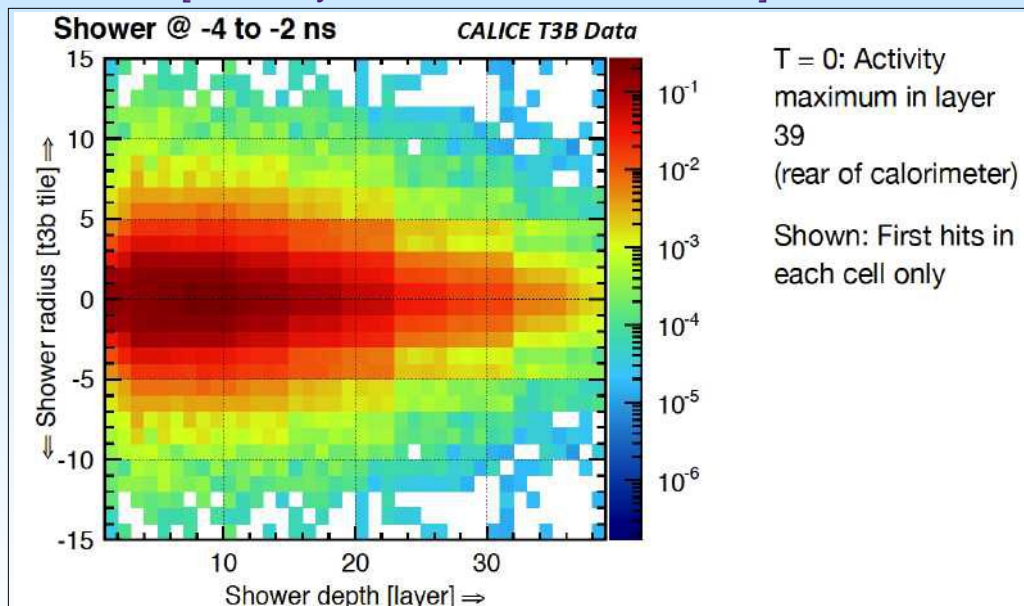
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

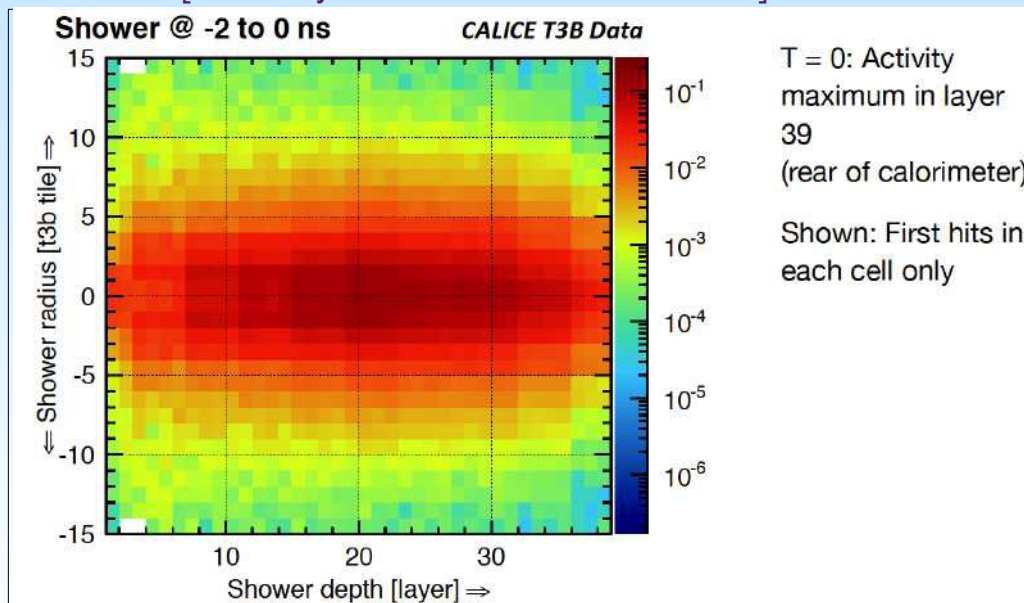
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

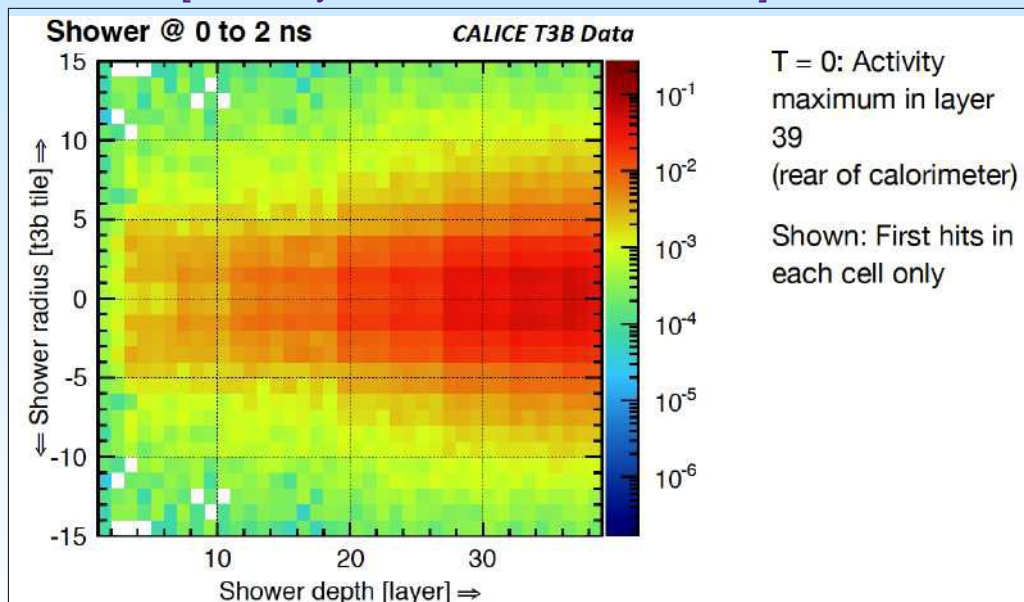
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

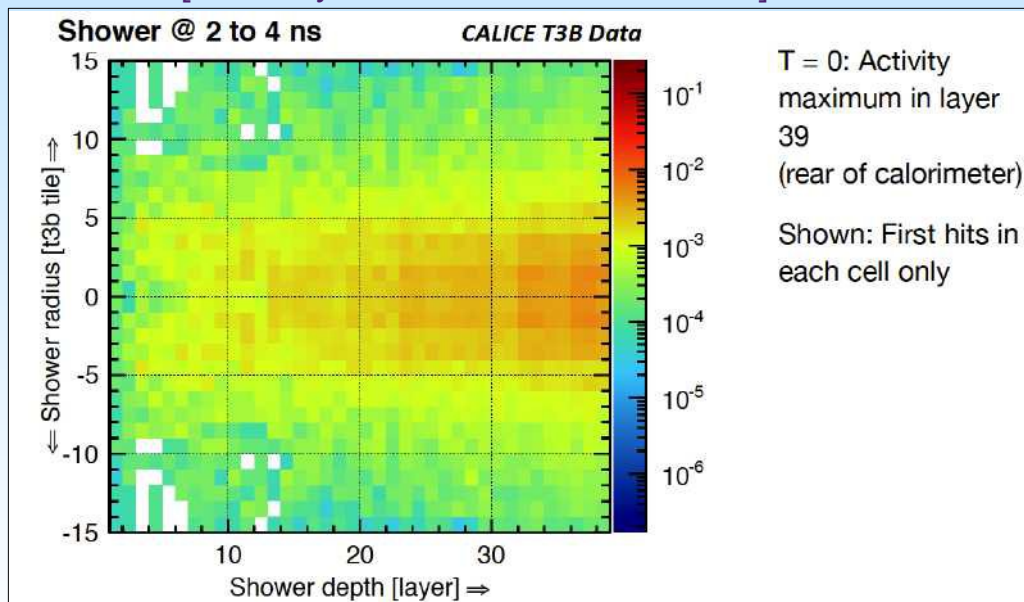
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

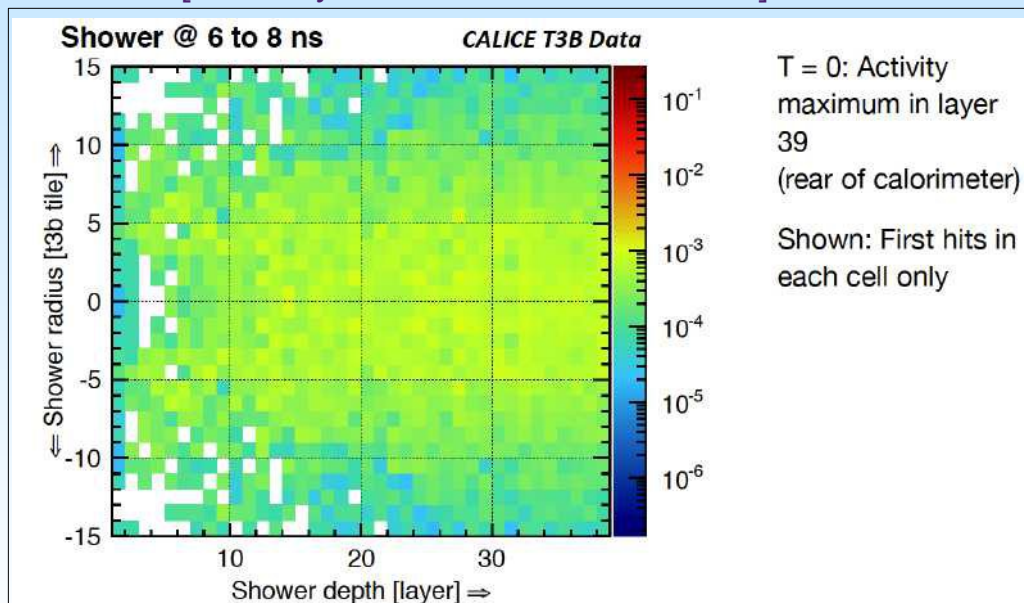
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

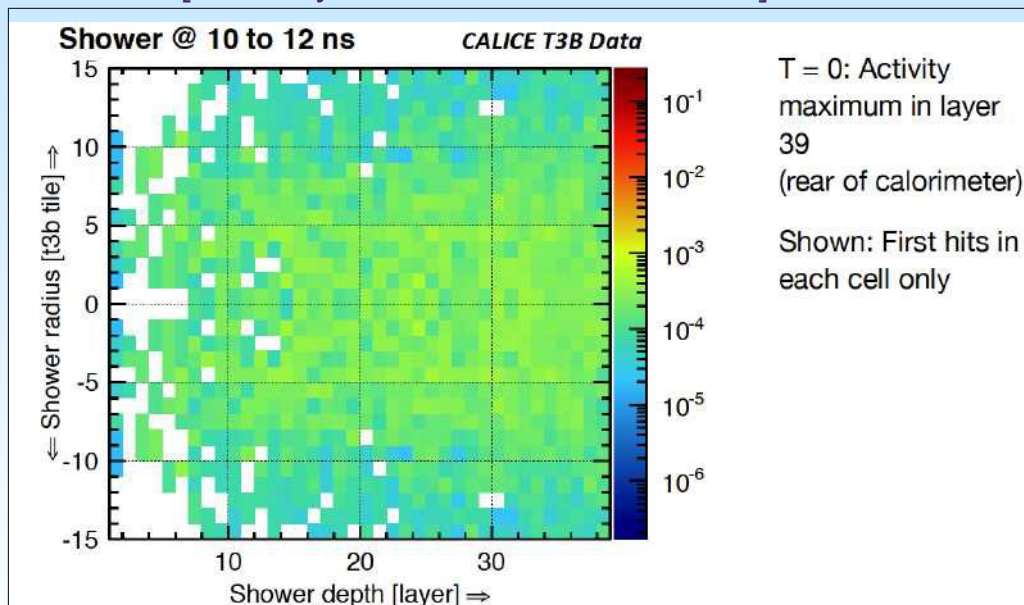
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

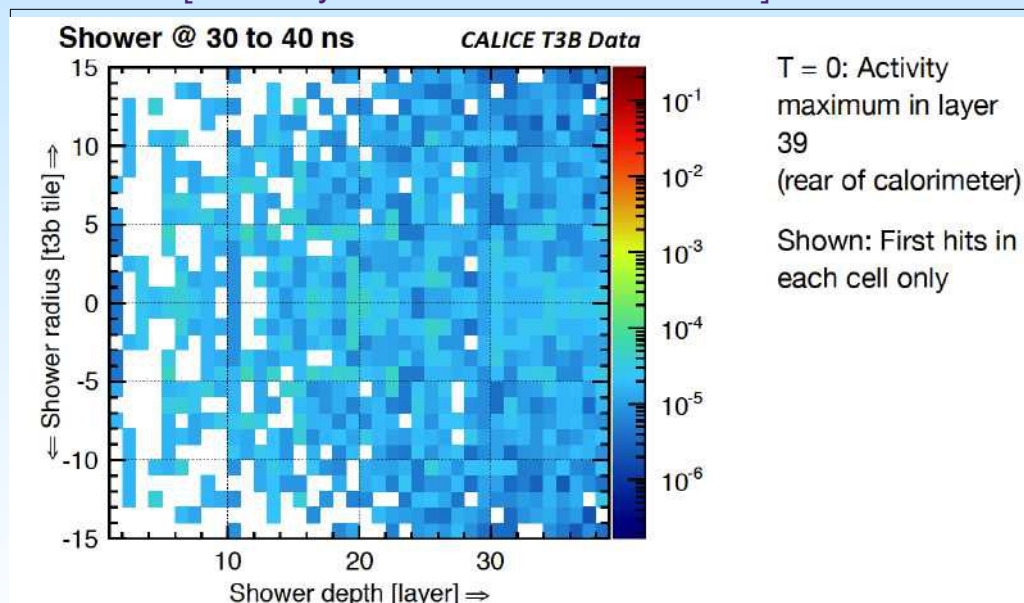
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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 ↗
à basse énergie
 - ◆ → temps de thermalisation

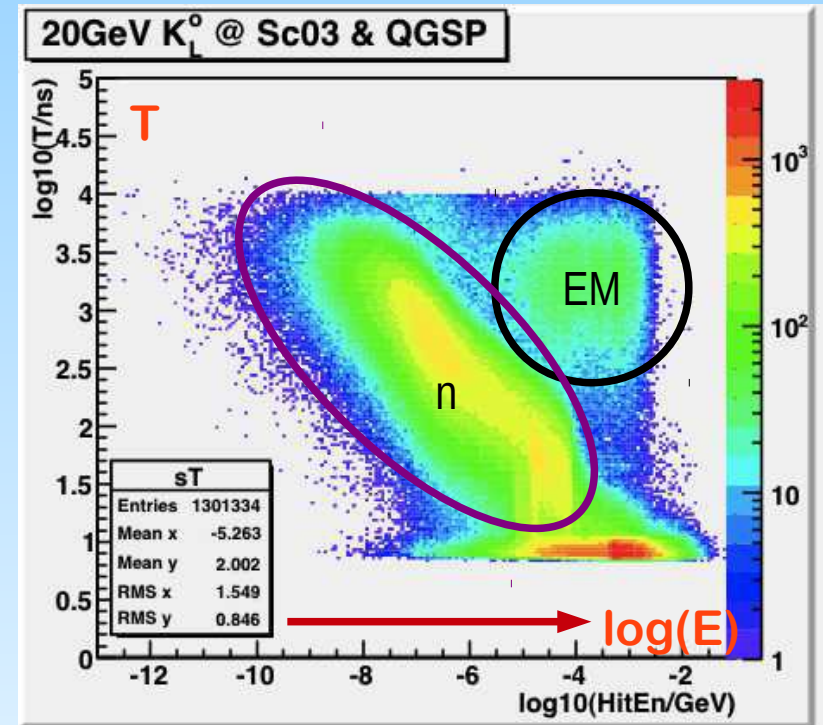
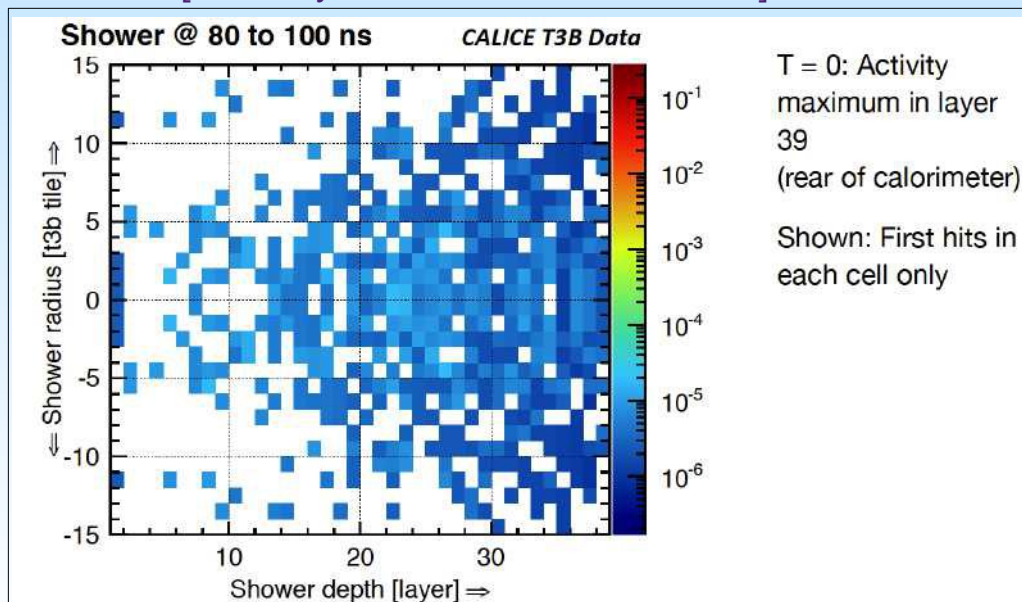
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



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

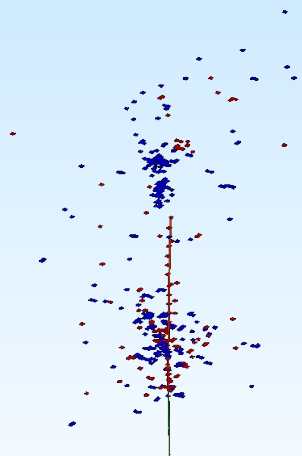
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



Composante neutronique secondaire

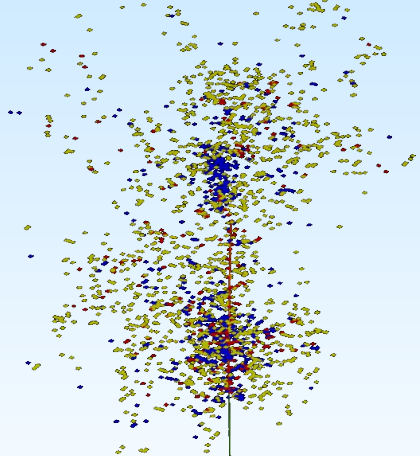
- En général temps caractéristiques \sim qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
 - ▶ les des-excitations nucléaires
 - ▶ les n
 - ◆ σ_{eff} de capture \nearrow à basse énergie
 - ◆ \rightarrow temps de thermalisation

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1

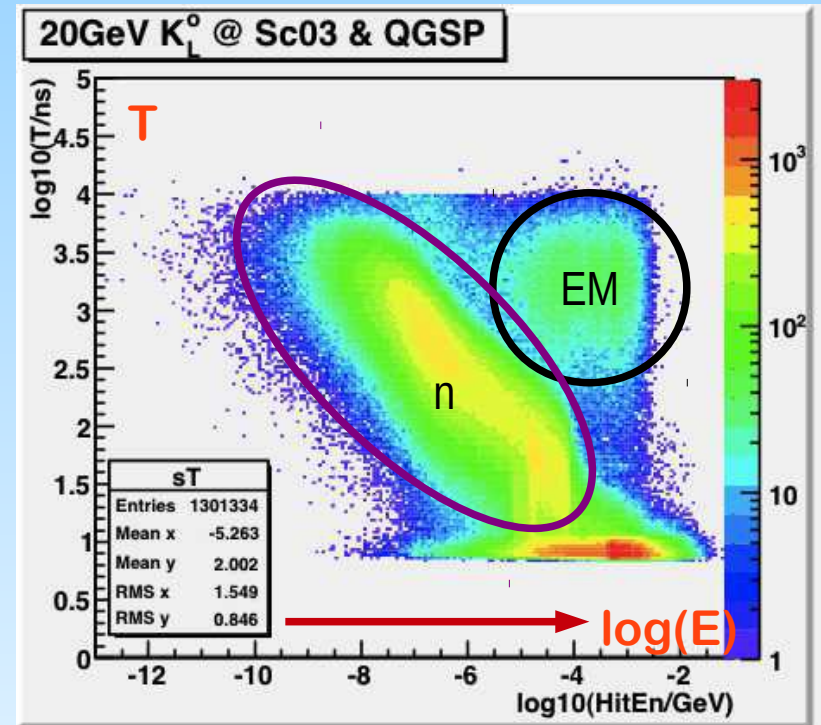


sans neutrons

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1

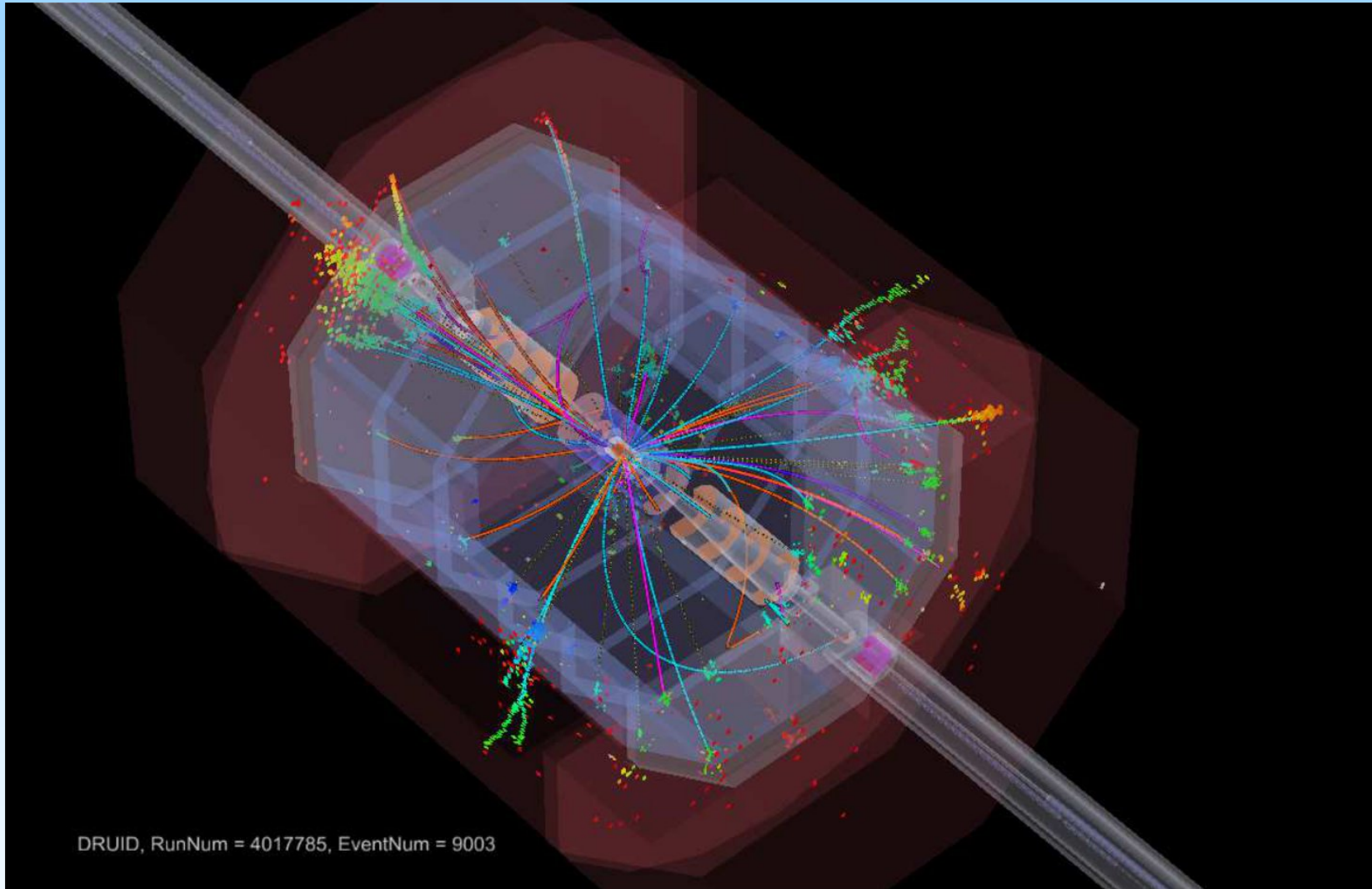


avec neutrons



[courtesy of M. Ruan, LLR]

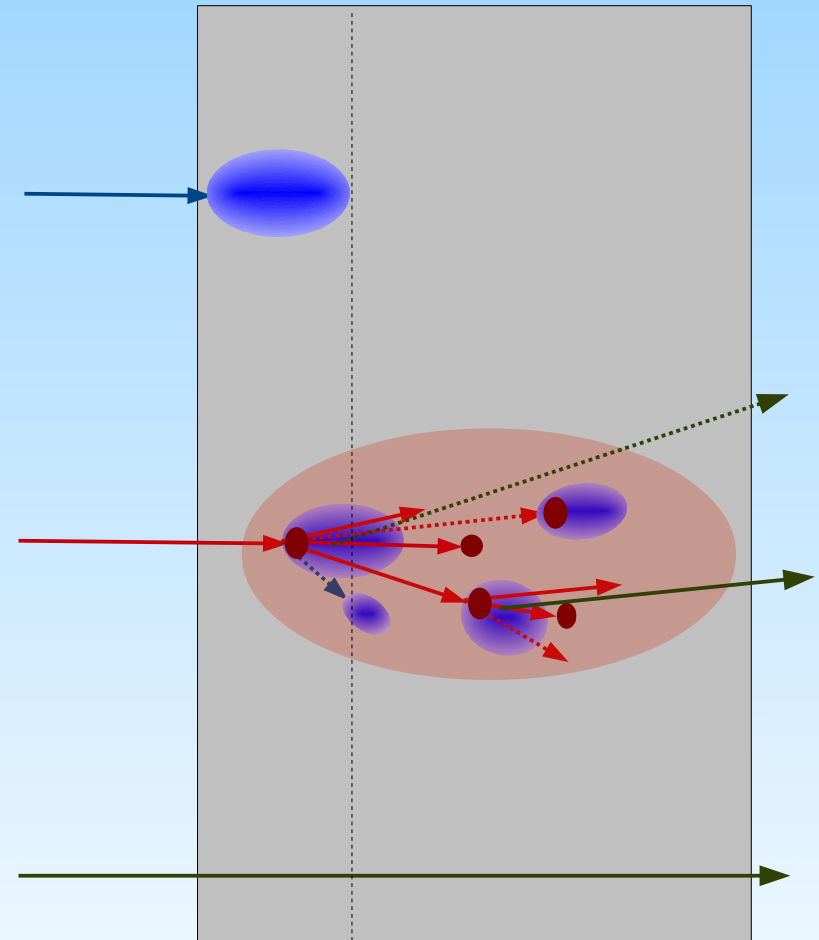
Information en temps



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

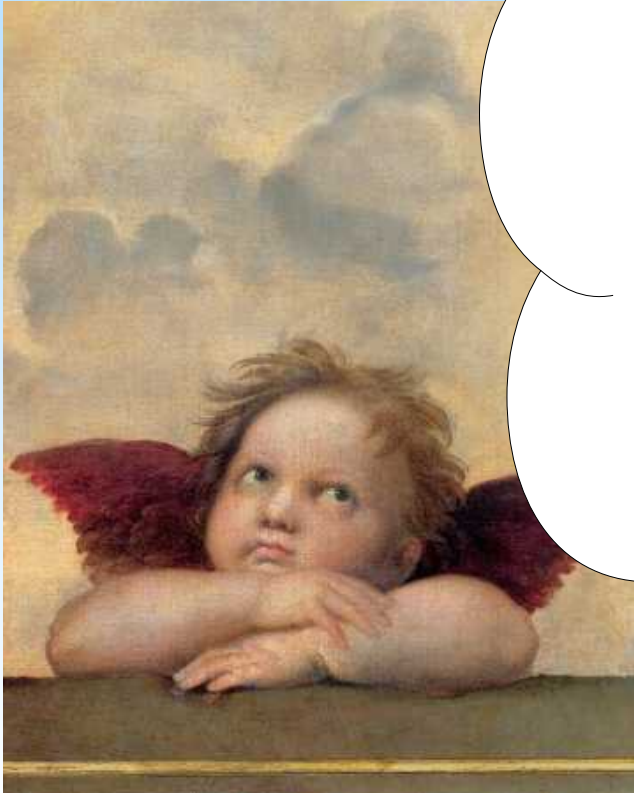
Rappel

- Calorimétrie = mesure de l'énergie des particules (passant le trajectographe) par arrêt
- e^\pm et γ \rightarrow gerbes dans le calorimètre EM (ECAL)
 - ▶ $\sim 30 X_0 \sim 20$ cm de mat dense
 - ▶ $r \sim 2 R_M \sim qq$ cm ; ($R_M = R_{90\%}$)
- Hadrons \rightarrow 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



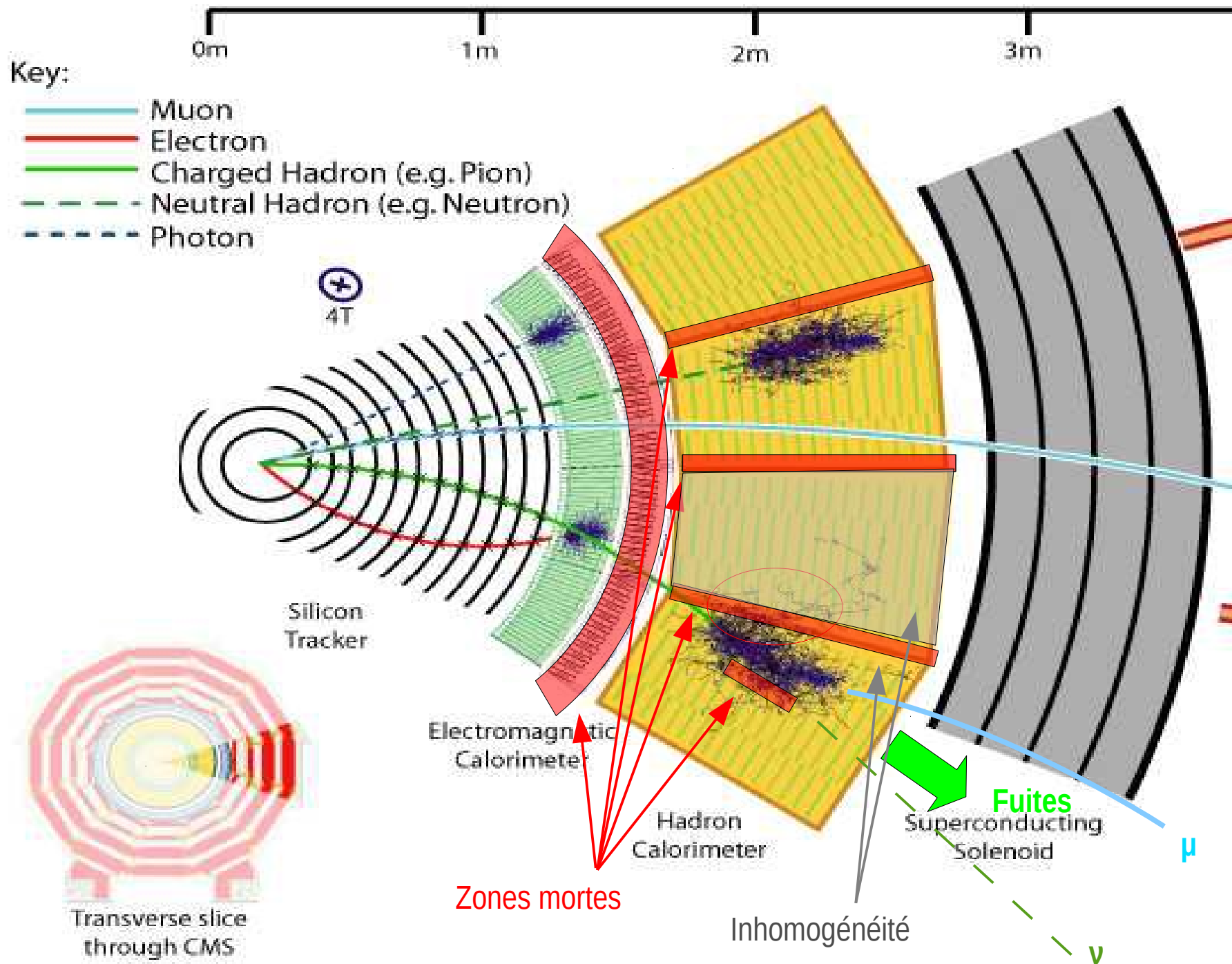
L'élaboration d'un calorimètre : les critères

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...



Les détecteurs réels



Un expérimentateur...

- infinie (sans pertes)
- Sans bruit
- Infiniment précise
- Linéaire
- Rapide
- Stable
- Homogène
- Identification
- Position & angle
- Séparation
- % de pertes de fuite
- Résolution
- Non Linéarité
- Vitesse + empilement + Taux d'occupation
- Variations (\supset 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

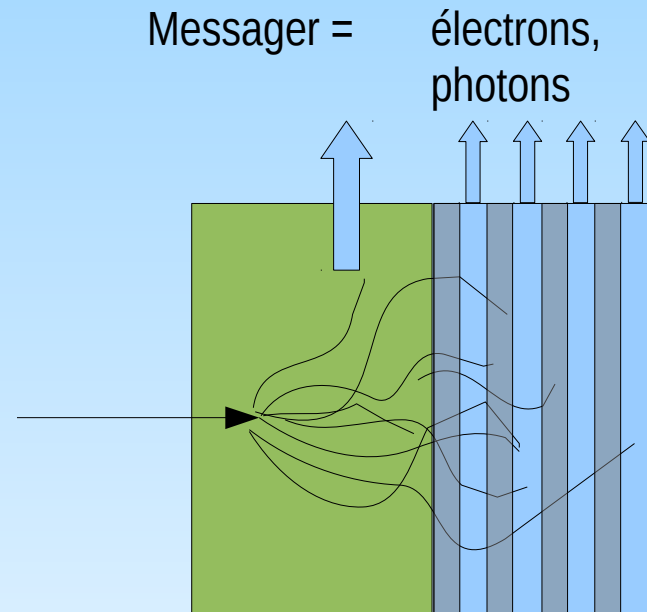
la Mesure c'est du Comptage

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:

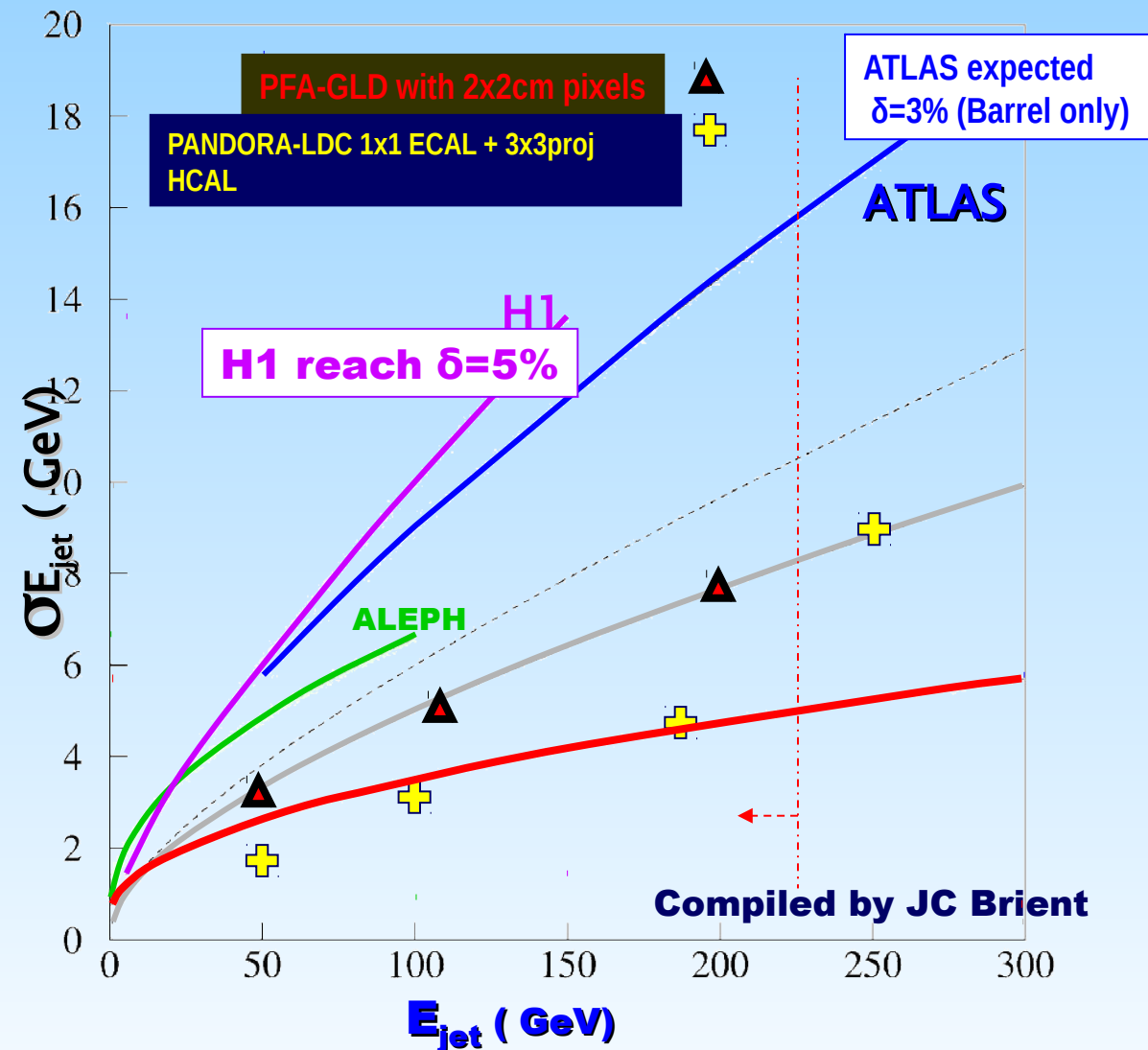
$$\frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \frac{\beta}{E} \oplus \gamma$$

α stochastique
 β bruit
 γ intercalibration (inhomogénéité)

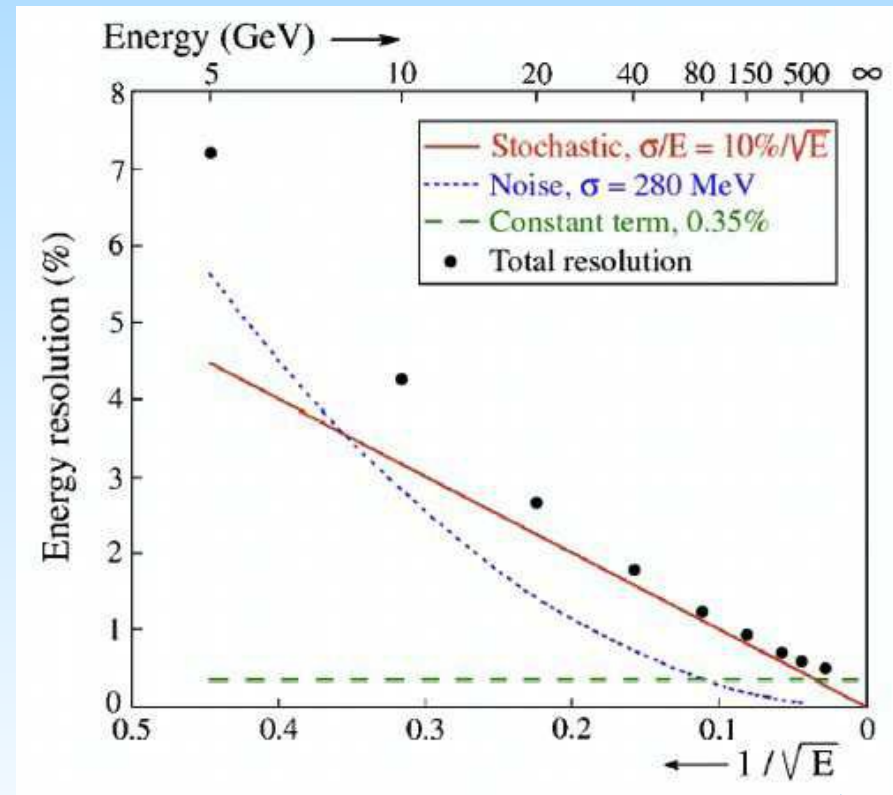
- Fuite : $\oplus \sigma_{\text{fuite}} \sim 4 f_{\text{fuite}}$
(corrigé mais pas les fluctuations)
- Fluctuations additionnelles due à la technologie
 - ▶ saturations, effet de charge d'espace...

- $\sigma(E)/E$**
- **Electromagnétique**
 - e, γ isolés
 - **Hadronique**
 - h isolés
 - **Jets**
 - Mélange : γ , h, e

Résolution : performance

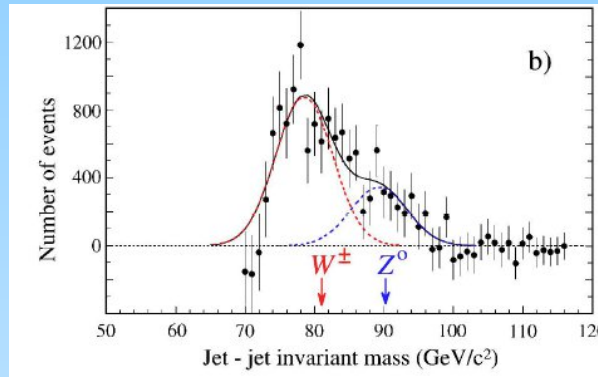
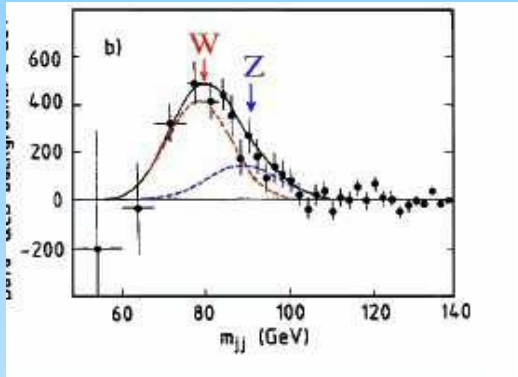


α :
EM : $\sim 3\text{--}20\% / \sqrt{E}$ (GeV)
Had : $\sim 50\% / \sqrt{E}$ (GeV)
 $\delta \sim 5\%$ (mauvais) —
 0.5% (bon)

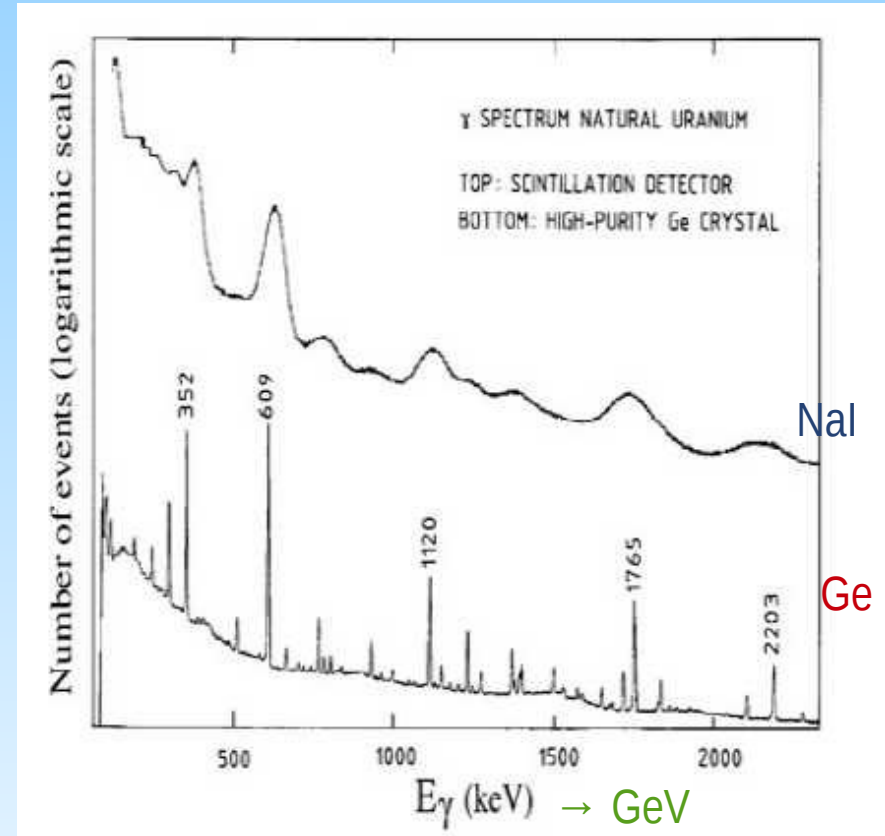


Hautes énergies

La résolution



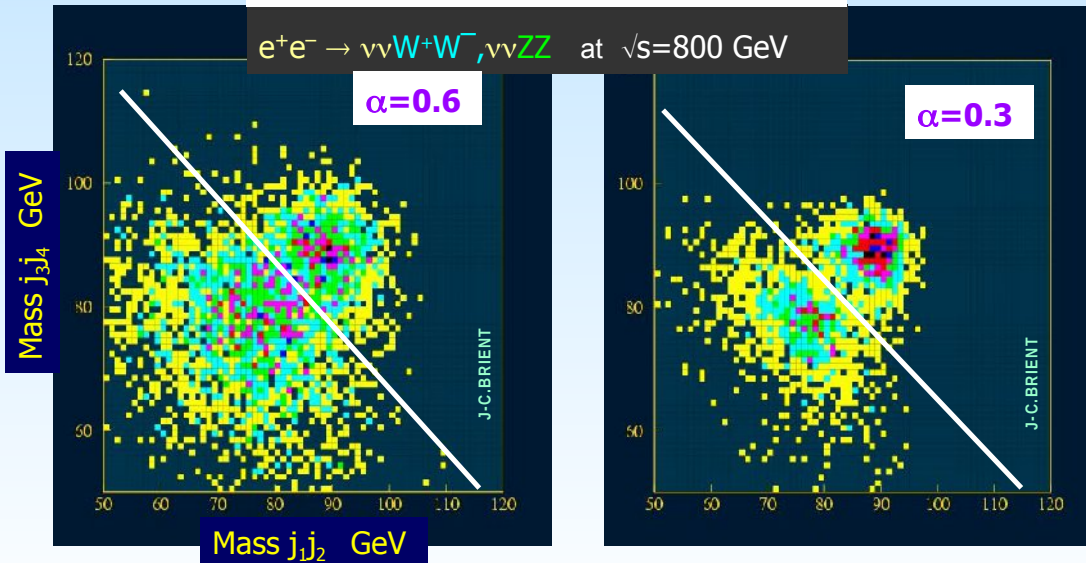
CDF



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

WW versus ZZ separation

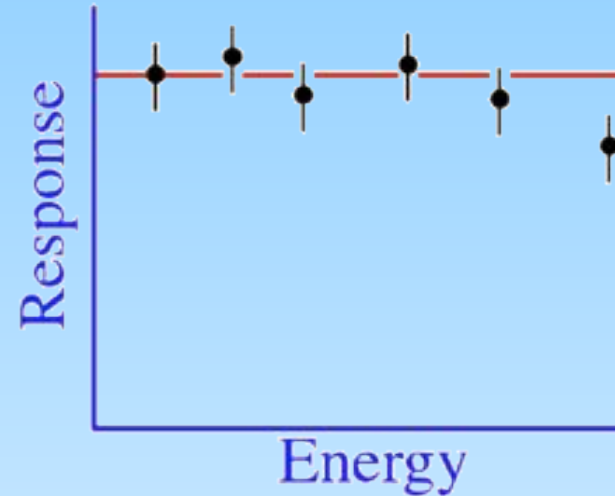
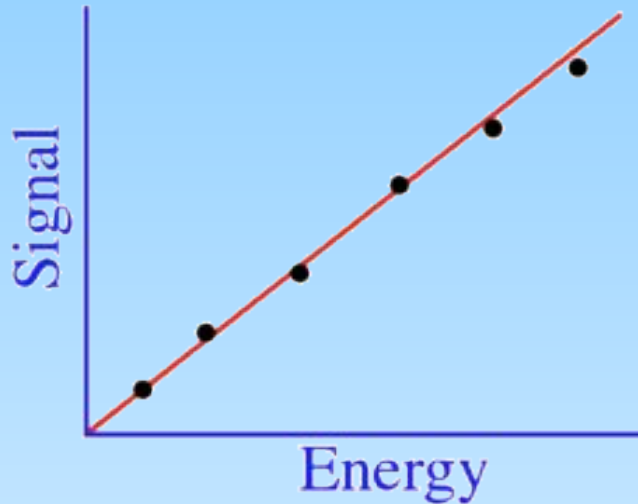
$e^+e^- \rightarrow \nu\nu W^+W^-, \nu\nu ZZ$ at $\sqrt{s}=800$ GeV



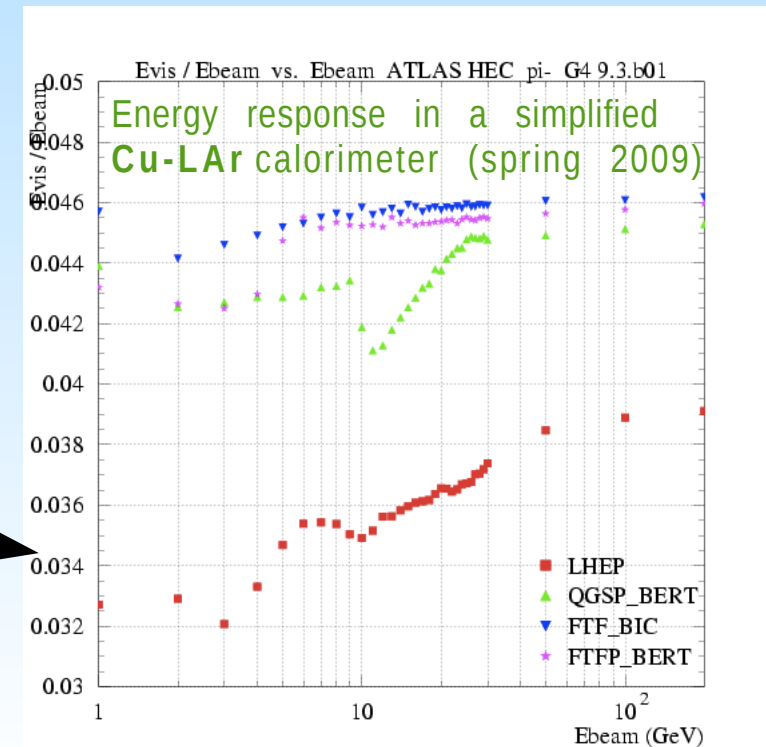
Spectre SUSY dans 5-20 ans ???

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

La linéarité $E \propto N$

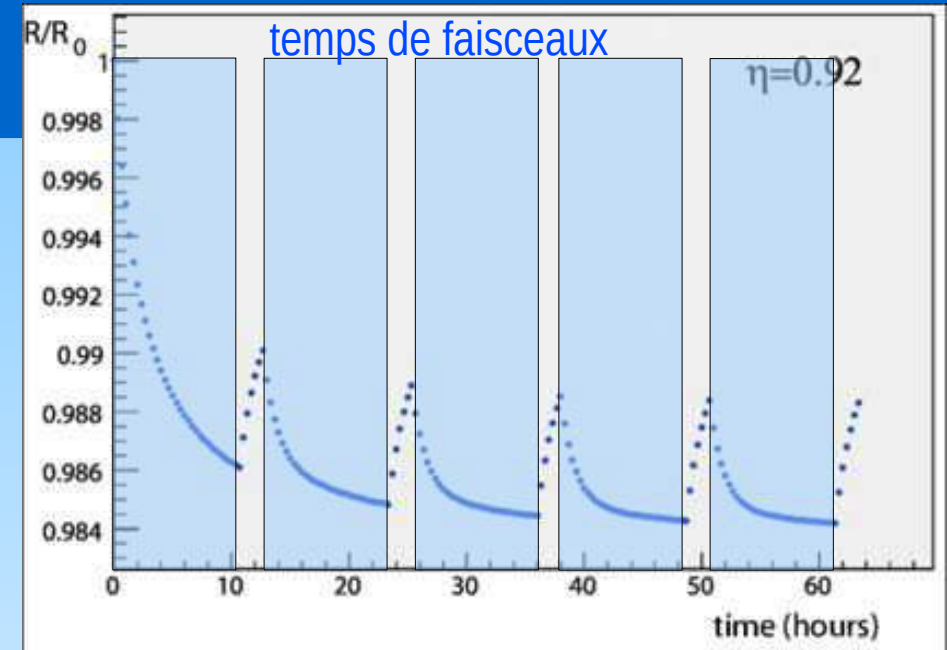


- En général OK pour EM
- Plus difficile pour l'Hadronique
 - ▶ facteur $e/h = f(f_{\pi 0}) = f(E)$
 - ▶ Leakage
 - ◆ Correction par les Monte-Carlo
 - Validités des modèles MC ?
 - ◆ Calibration par des tests
 - Pas des jets...



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

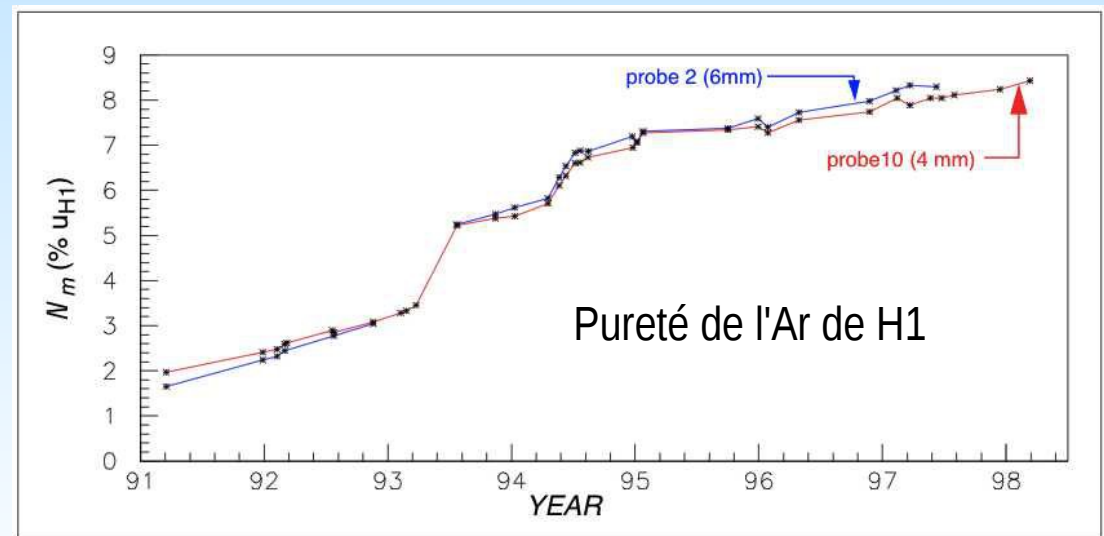
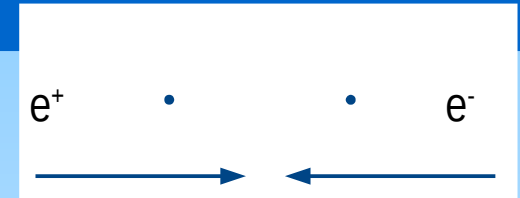
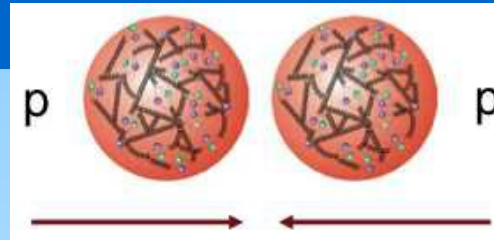


Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

Lecture des données



■ Acquisition

▶ Déclenchement

- ◆ lecture de 1er niveau
 - Sommes partielles
- ◆ lecture complète
 - Calculs de niveau 2...n → rejet
- ◆ Écriture

▶ Sans trigger

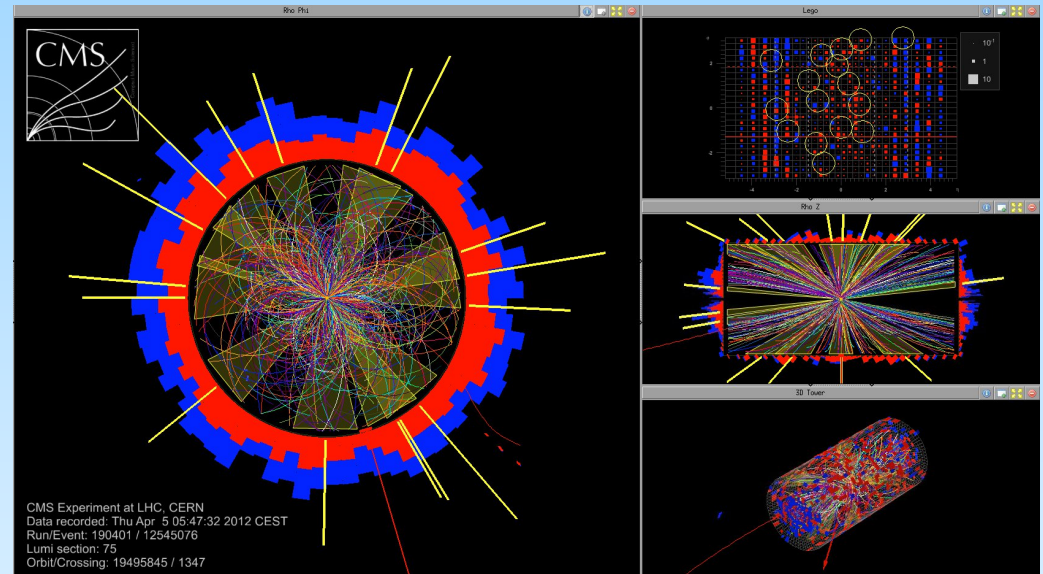
■ Taux d'occupation

▶ Physique

▶ Technologie machine

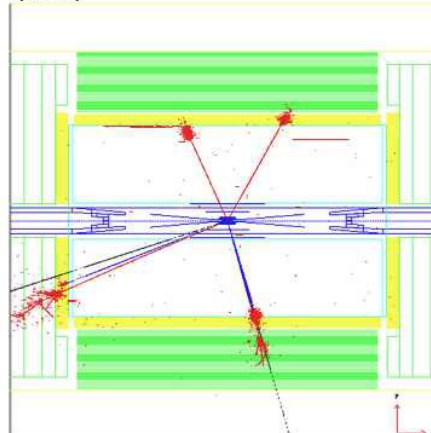
- ◆ LHC : pp @ 25 ns
- ◆ ILC : ee @ 400 ns & 5Hz
- ◆ CLIC : ee @ 2.5 ns & 50 Hz...

■ Temps de lecture...

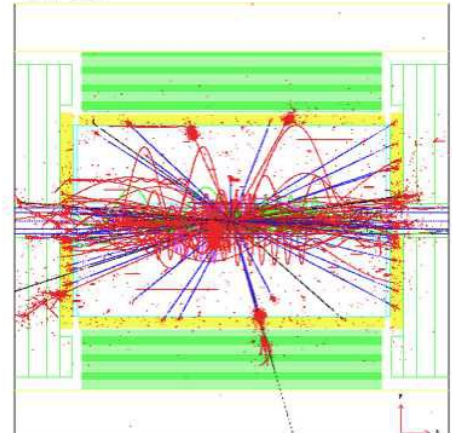


HZ → $\tau\tau ee$ event

Without soft hadronic events overlaid (=ILC)



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



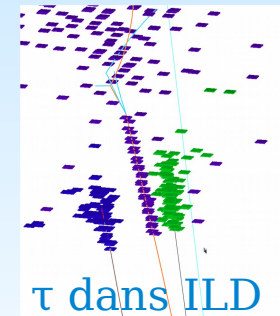
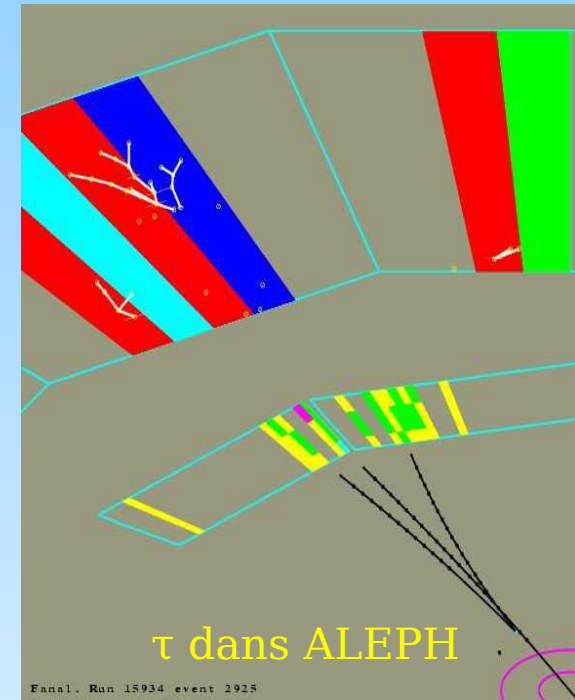
Autres éléments critiques

- 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

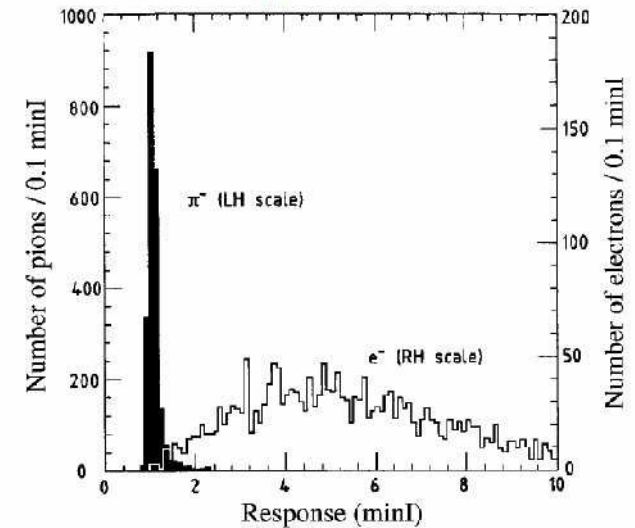


FIG. 7.35. Signal distributions for 75 GeV pions and electrons in a preshower detector used in beam tests of CDF calorimeters.

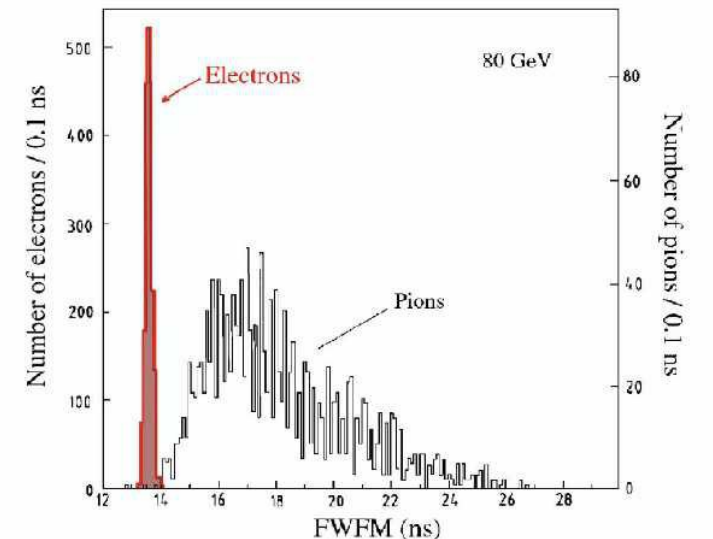


FIG. 7.33. The distribution of the full width at one-fifth maximum (FWFM) for 80 GeV electron and pion signals in SPACAL [Aco 91a].