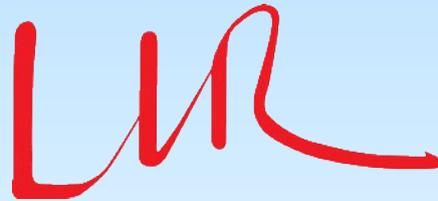


# La calorimétrie

## 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

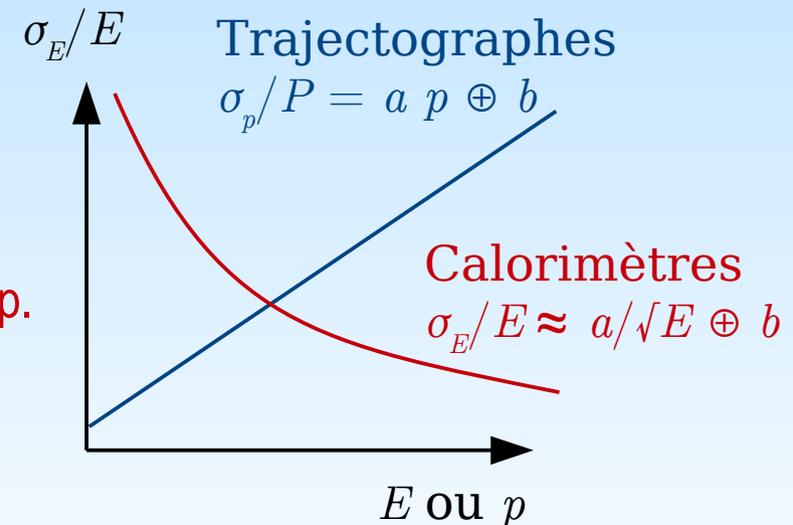
Jeudi

Vendredi

# Introduction

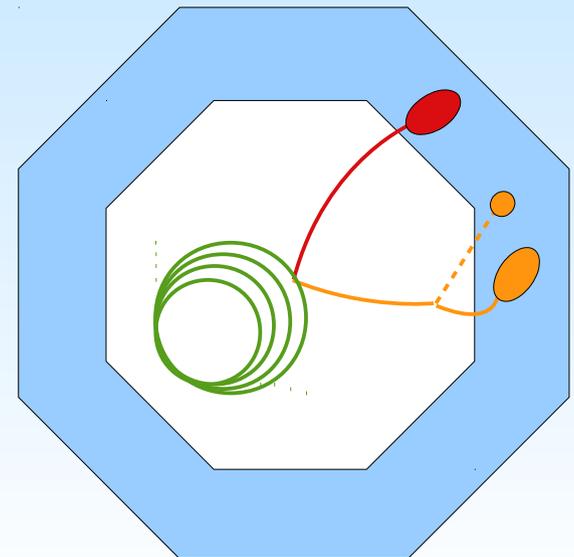
# La calorimétrie

- 1903 : P. Curie & A. Laborde : vrai calorimètre. 1ère mesure : 1930 (e- du  $^{207}\text{Bi}$ )
- 1949 : Cristaux NaI + photo-multiplicateur :
  - ▶ spectroscopie  $\gamma$  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<sup>ers</sup> grand calorimètres dans les années 70
- De + en + gros et plus complexes
  - ▶ LHC : CMS & Atlas



# But de la calorimétrie

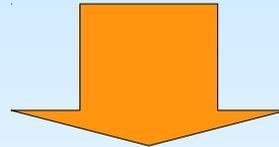
- Mesure de l'énergie de particules par arrêt ( $\perp$  philosophie trajectographes)
    - ▶ «Calorimètre  $\cong$  bloc de matière dense instrumenté»
  - Mesure des neutres :
    - ▶ Electromagnétique :  $\gamma$
    - ▶ Hadronique :  $n$ ,  $K_L^0$
  - Mesurer l'énergie des électrons
  - Mesurer l'énergie des hadrons chargés.
  - Identifier les leptons : électrons,  $\mu$ ,  $\tau$ '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
    - ▶  $K_L^0$
    - ▶  $\pi^\pm$
    - ▶  $\mu$ ,  $p$ ,  $n \gg 100m$
  - 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  $\sim \text{qq MeV}$ 
  - ▶  $\rightarrow \sim \text{domaine des bolomètres (à qq } 0,1\text{K)}$

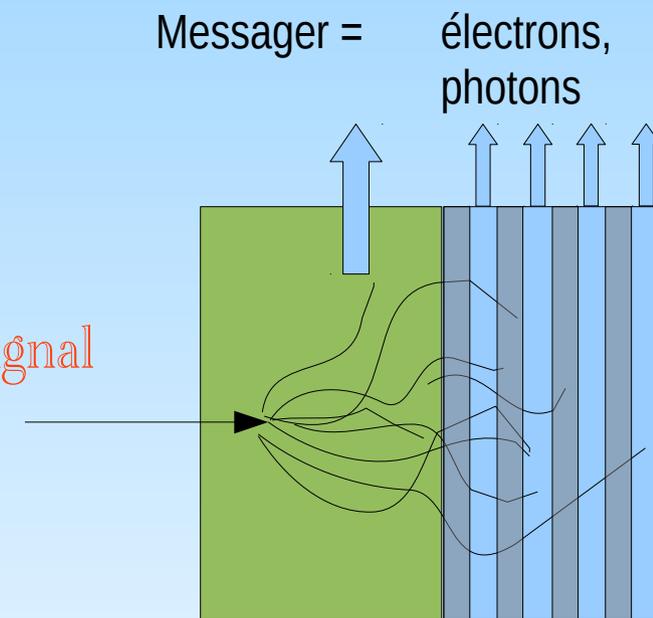
Besoin d'une amplification  
physique du signal d'ionisation



Analyse des processus microscopiques

# Principe de la calorimétrie en PHE

- On fait interagir les particules
  - ▶ (Conversion des neutres en chargés)
    - ◆  $\gamma$  (gamma)  $\rightarrow$  paire  $e^+e^-$  par interaction em
    - ◆  $h^0$  (hadrons neutres) : interaction forte
    - ◆  $\nu$  (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**

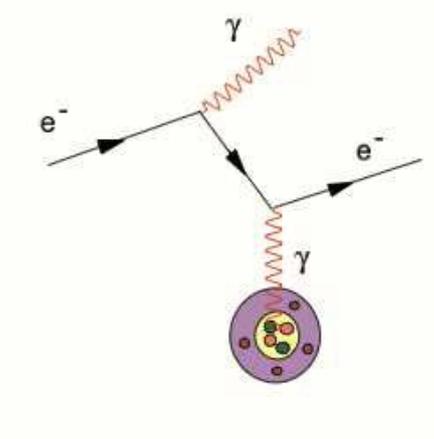
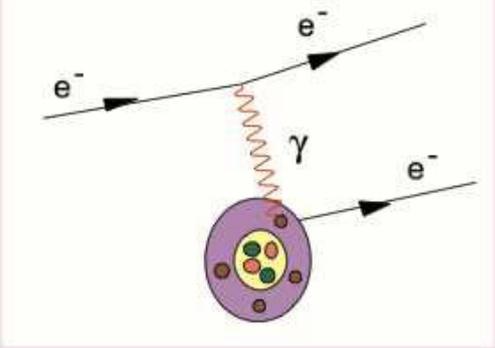
# Glossaire

- 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
- $\lambda_{\text{had}}$ : longueur d'interaction hadronique

# Interactions purement EM

## Chargés

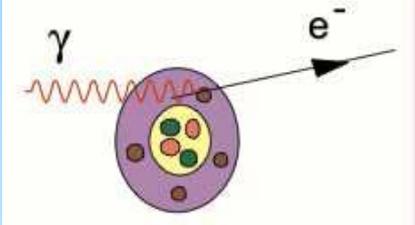
Ionisation



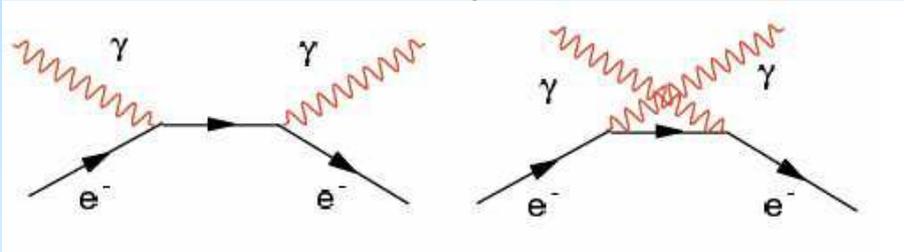
Rayonnement de freinage

## Photons

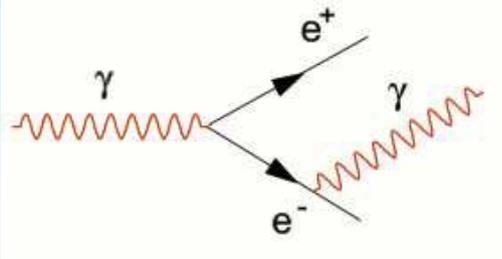
Effet photo électrique



Effet compton

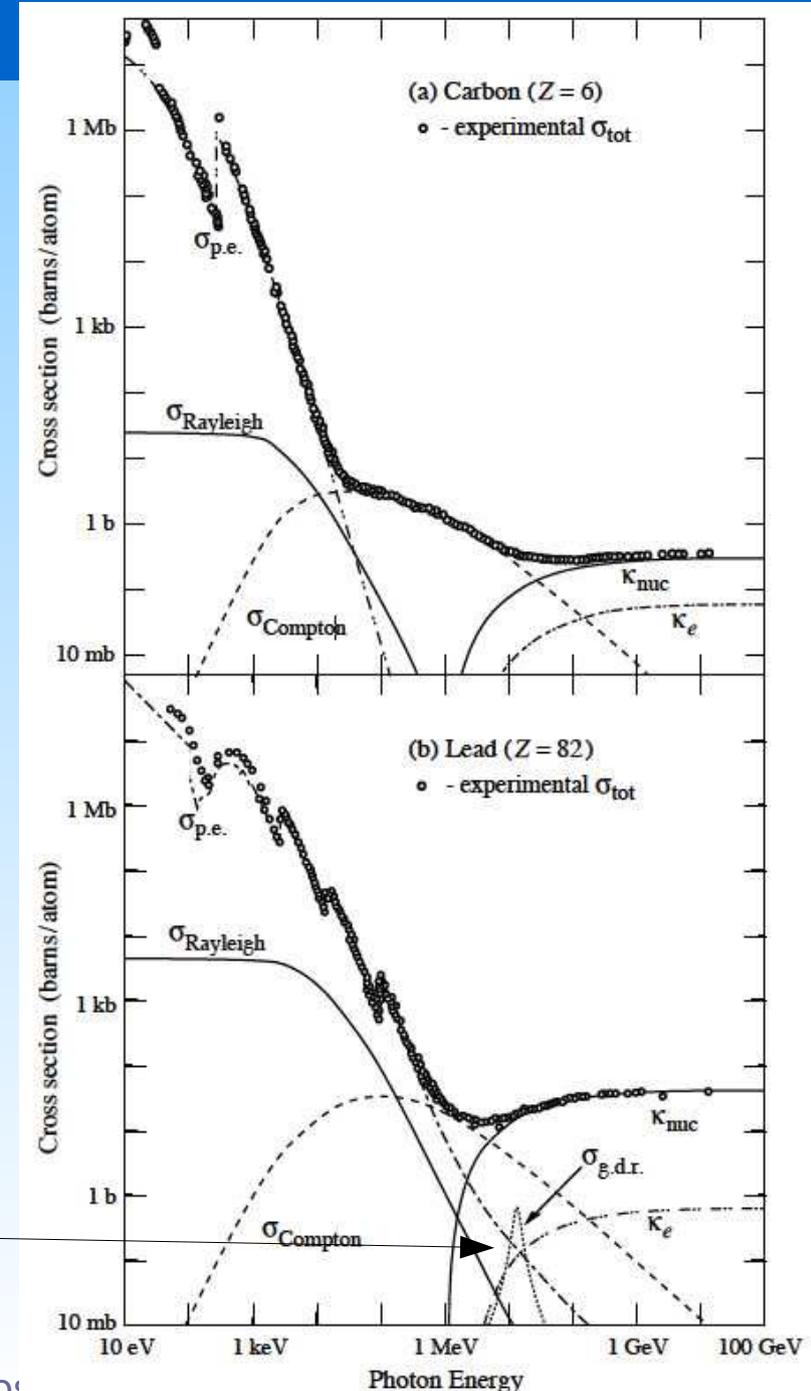


Création de paire



# Les photons dans la matière

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



# Interactions des particules chargées

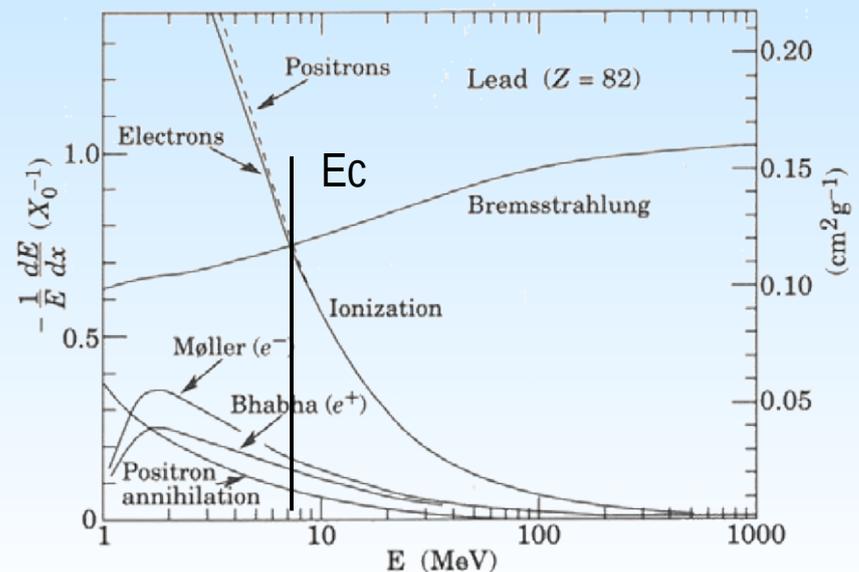
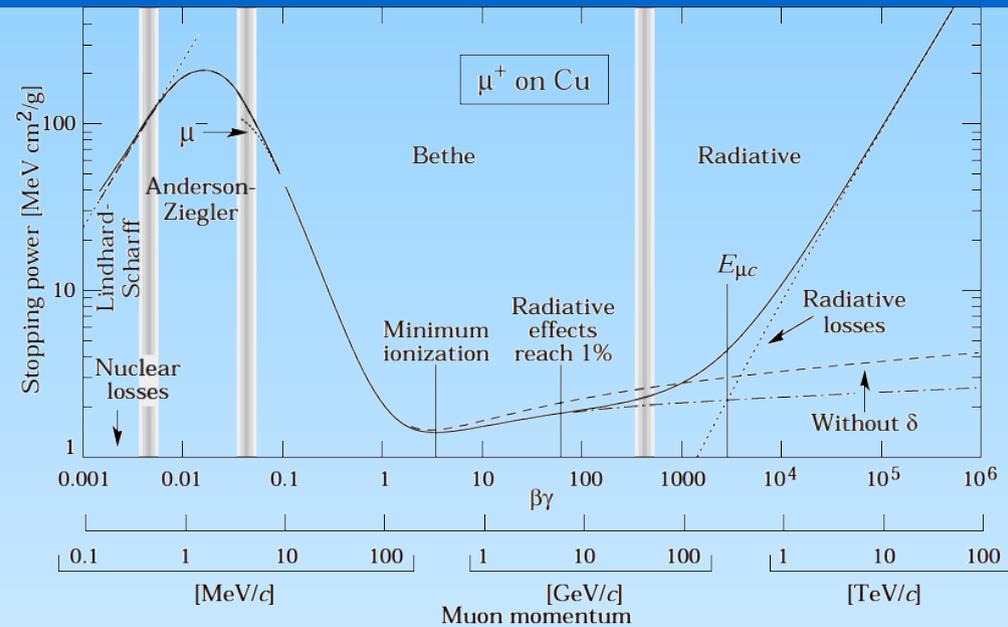
## ■ Particules Chargées

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

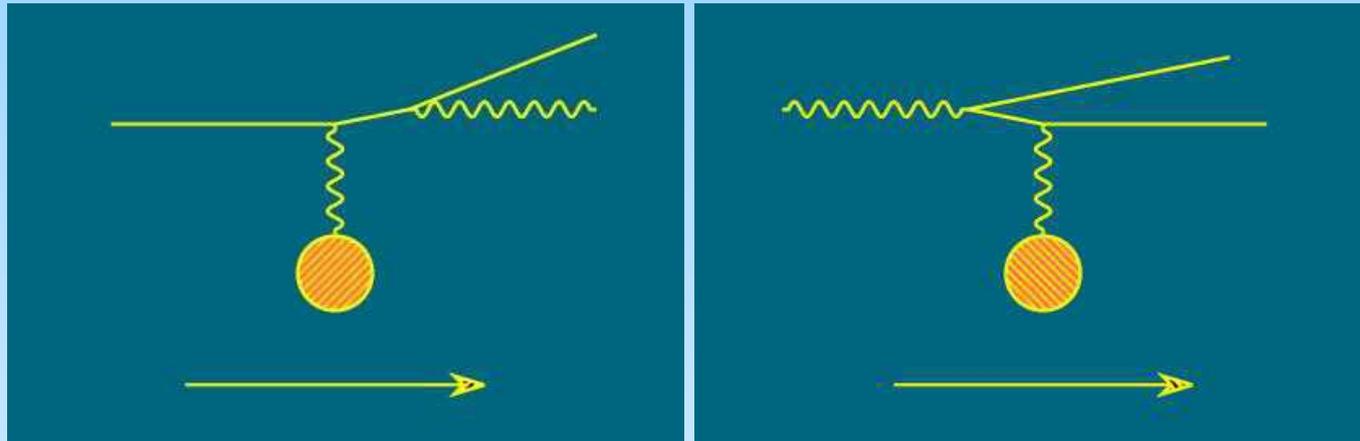
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

## ■ Électrons/Positrons

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



# Principaux processus électromagnétique



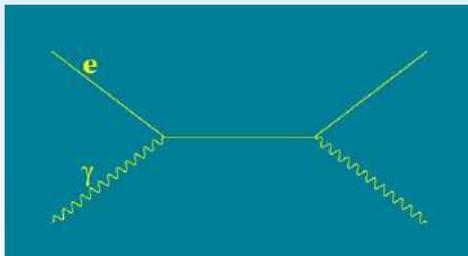
Bremsstrahlung

Création de paires

Mais aussi

A basse énergie ( $< 2 \text{ GeV}$ )

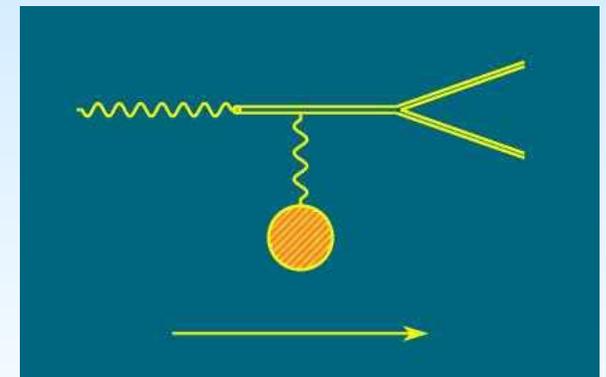
Compton



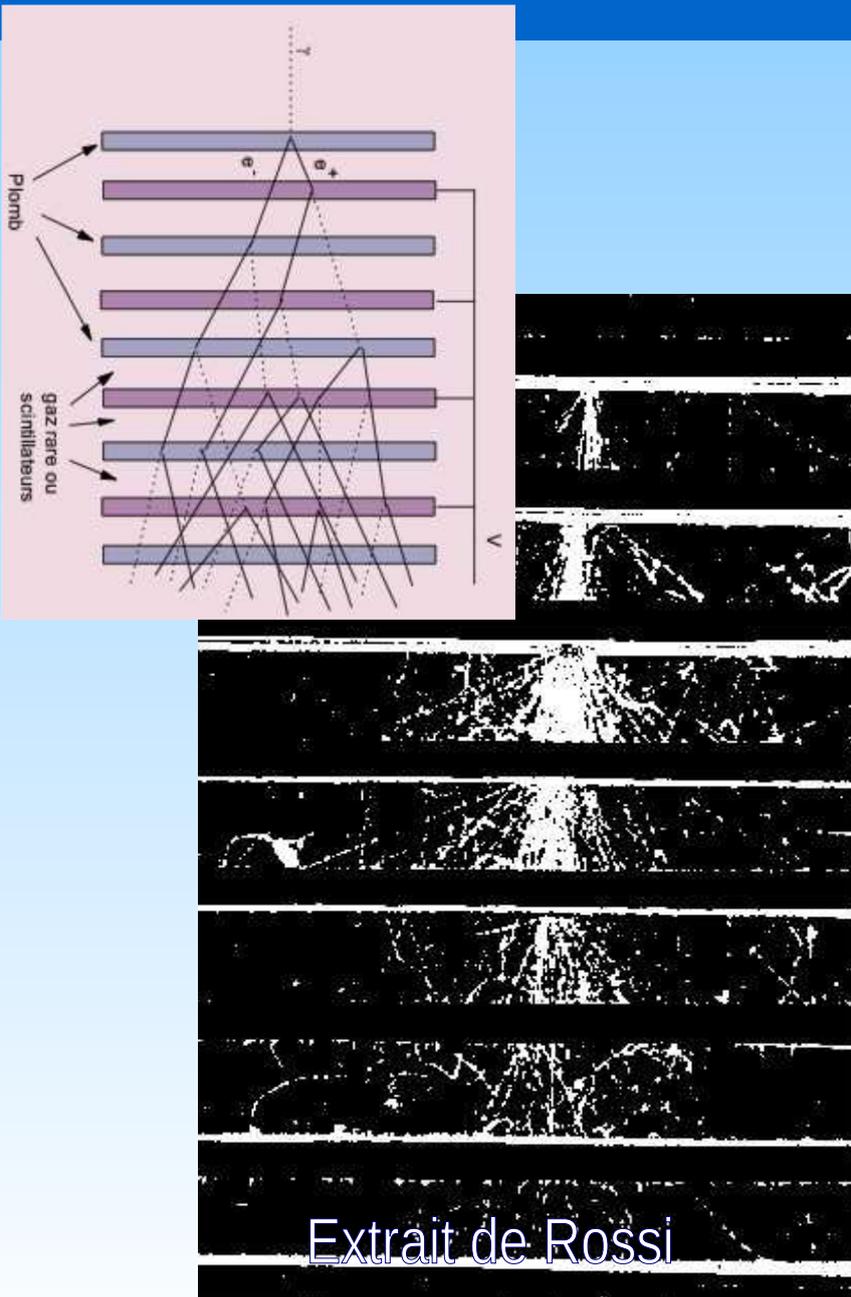
Effet photoélectrique

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

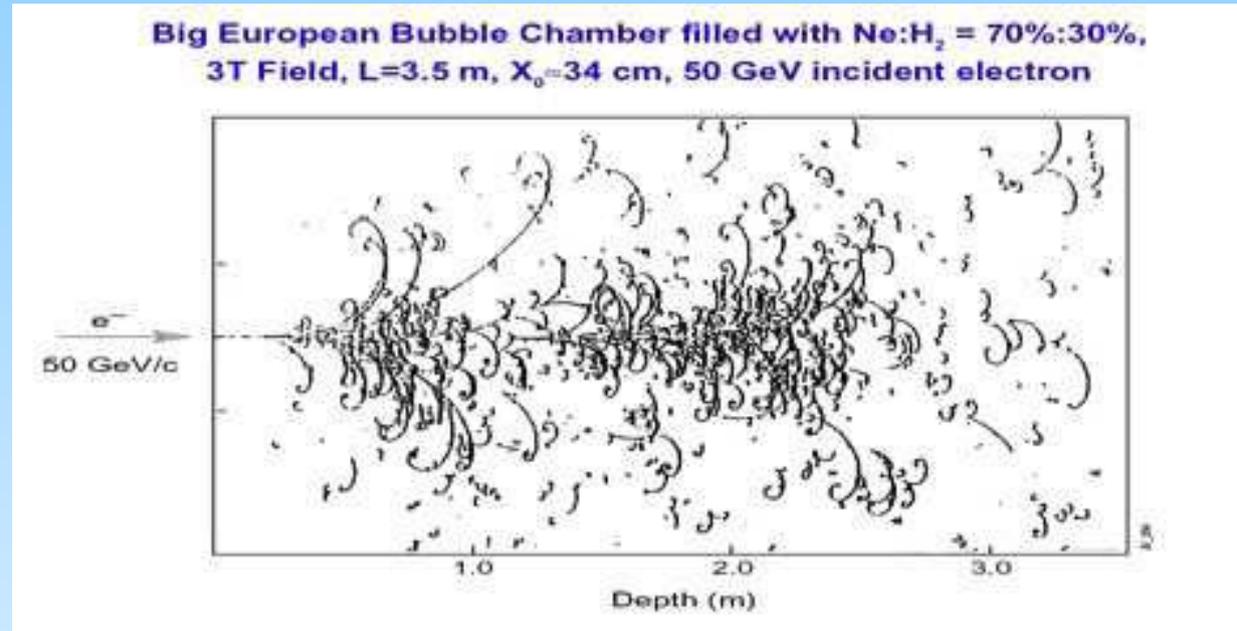
Création  
de paires de muons  
de paires de pions



# Gerbes électromagnétiques

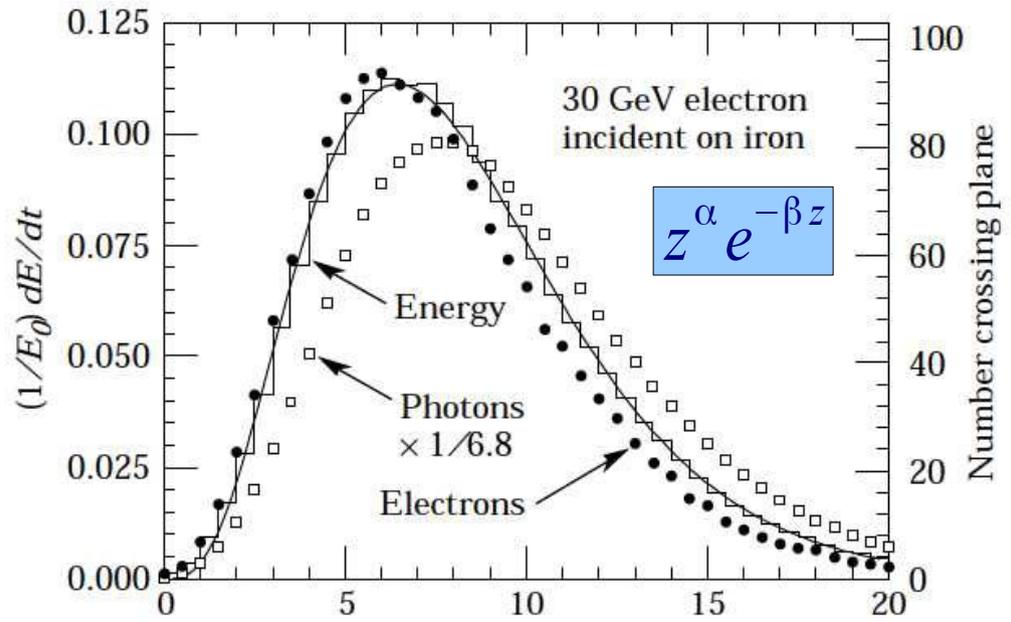


Extrait de Rossi



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

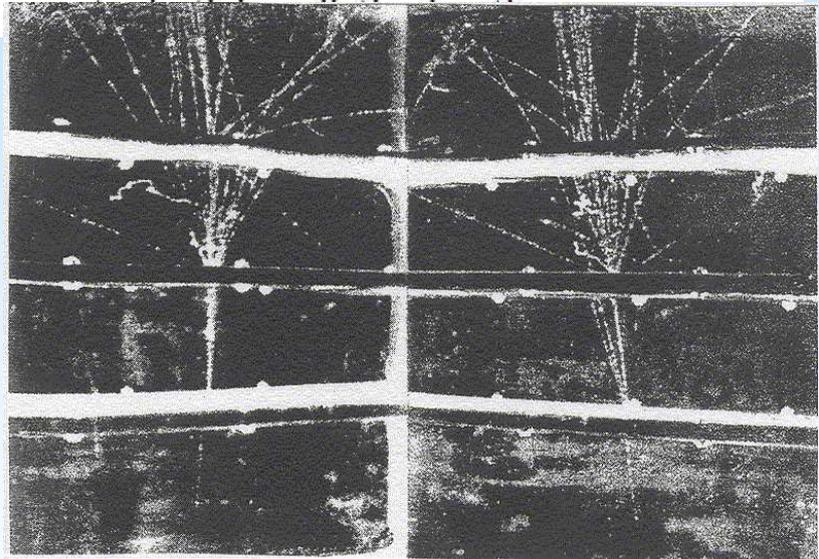
# Profils longitudinal ; Longueur de radiation $X_0$



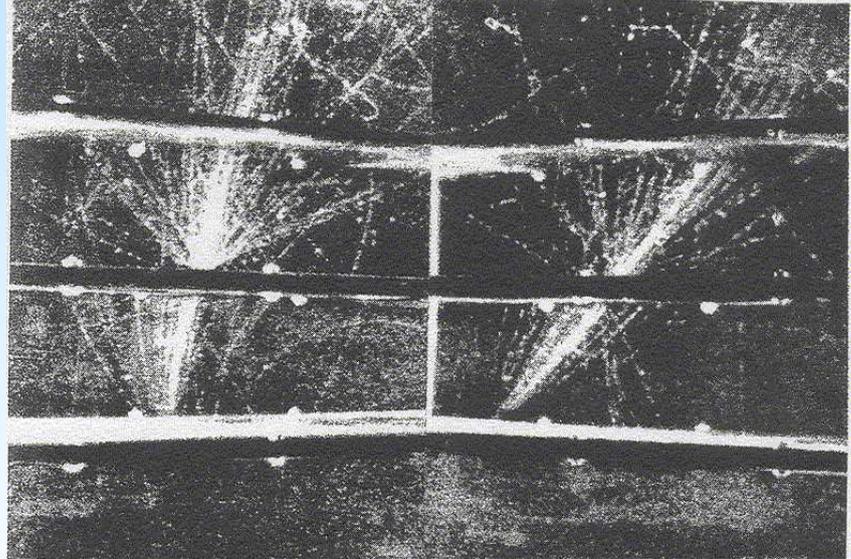
$1 X_0 =$

- 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]

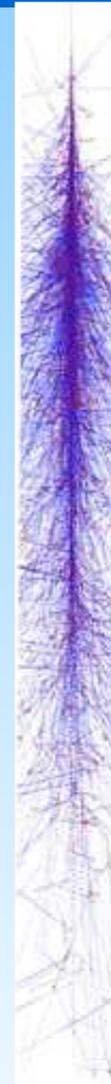
# Caractérisation transverse de la gerbe : rayon de Molière

La structure transverse est indépendante de l'énergie

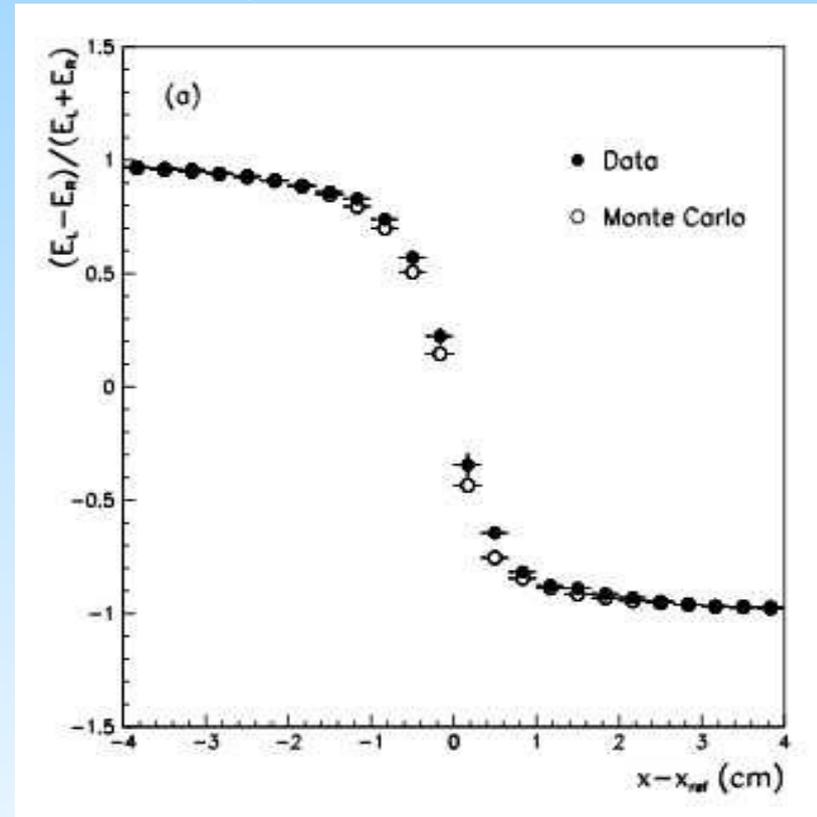
- 1 cœur compact
- 1 halo diffus (Comptons)

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

GEANT shower  
(PbWO<sub>4</sub> crystal)



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

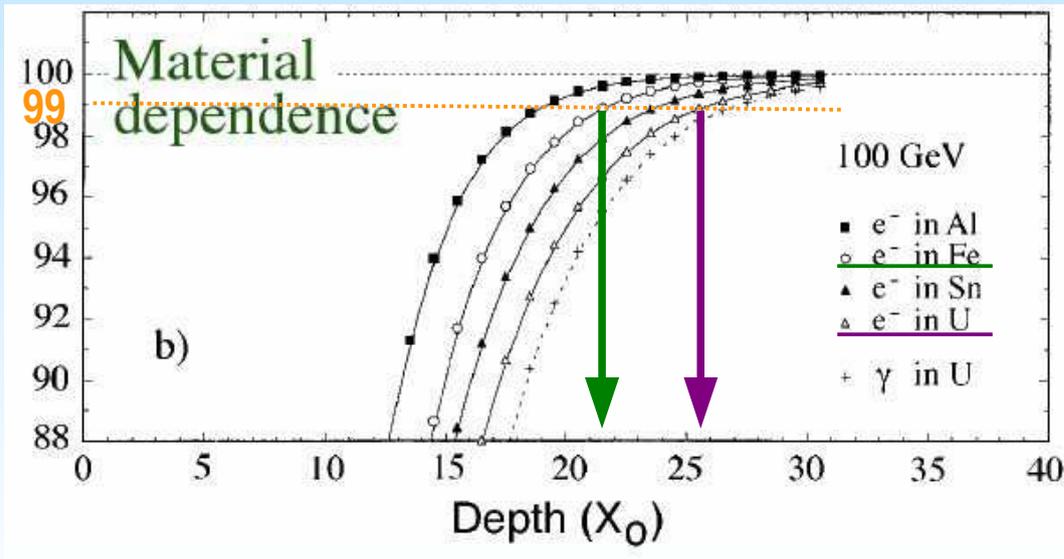
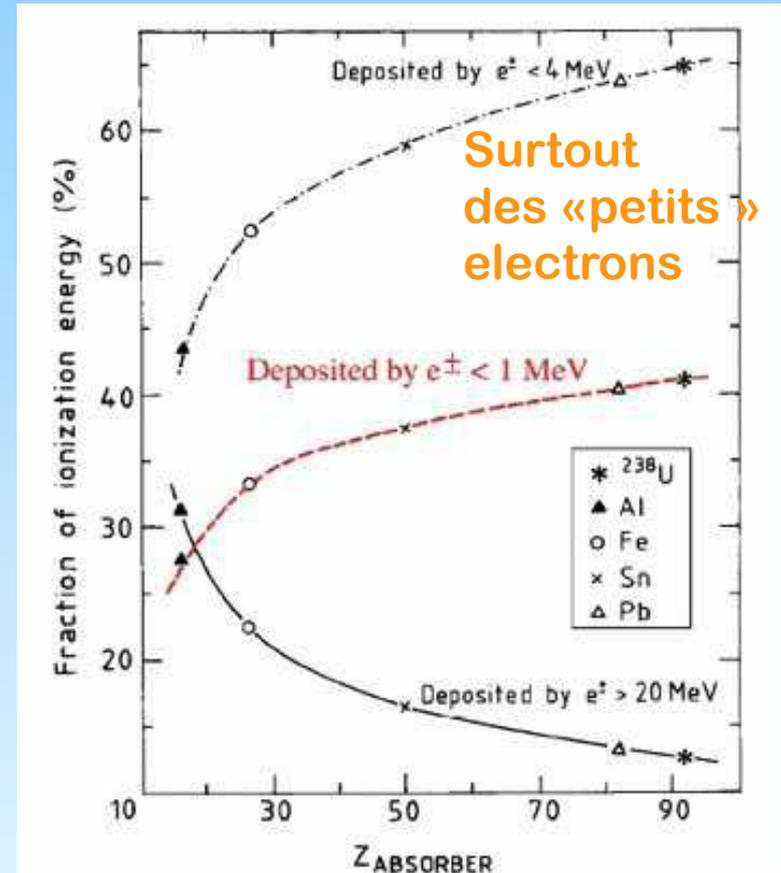
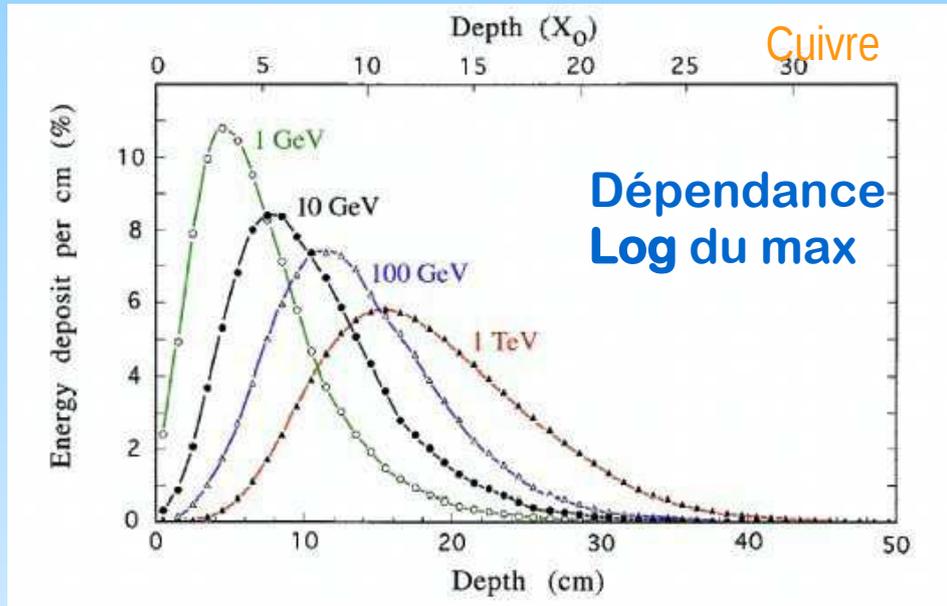


Rayon de Molière ( $R_M$ )

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	$\rho / \text{g cm}^{-3}$	$X_0 / \text{cm}$	$R_M / \text{cm}$	$E_c / \text{MeV}$
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		

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

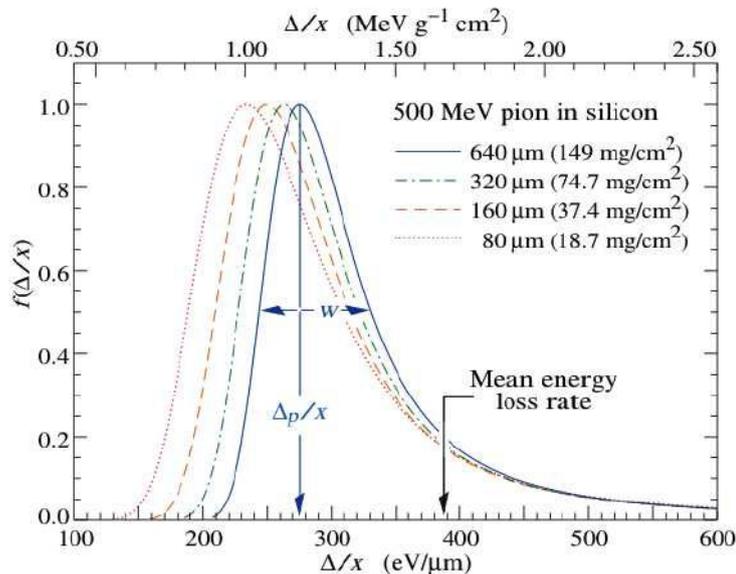
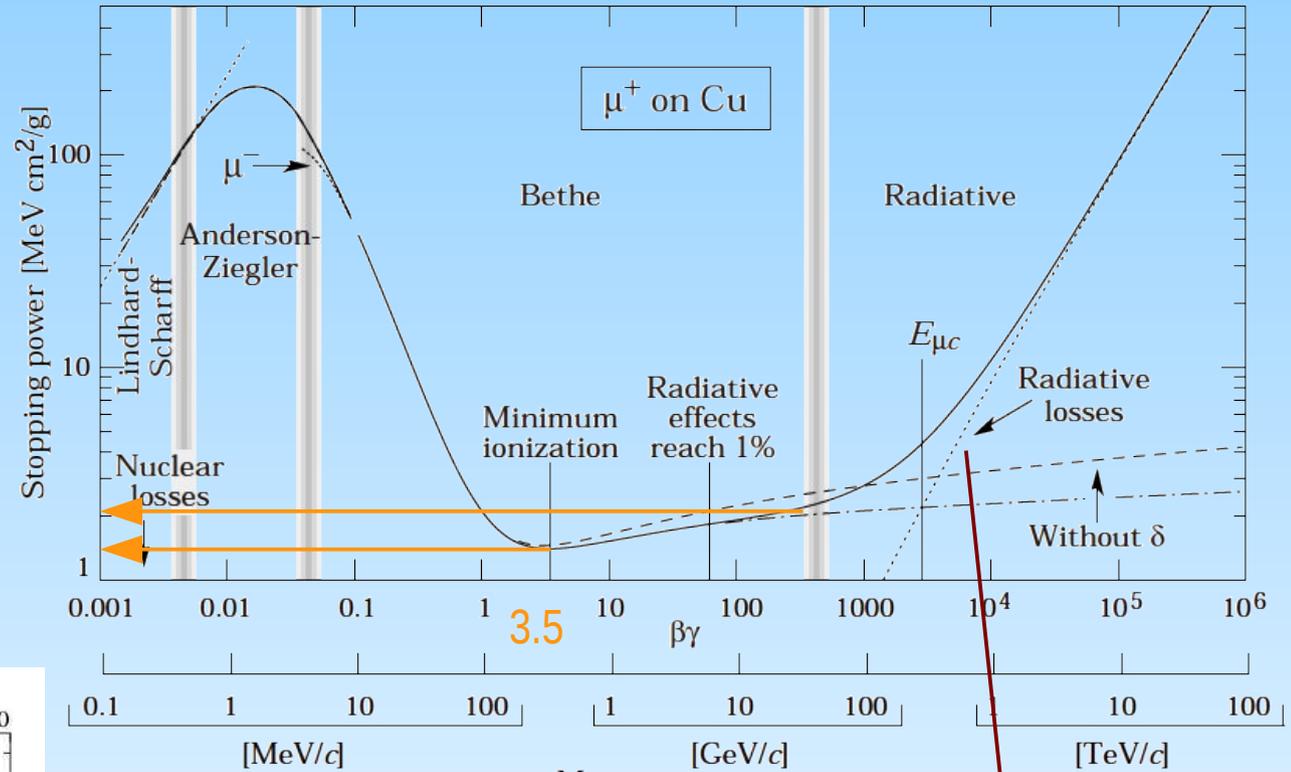
$$\frac{1}{R_M} = \frac{1}{E_s} \sum \frac{w_j E_{cj}}{X_j}$$

# Les muons

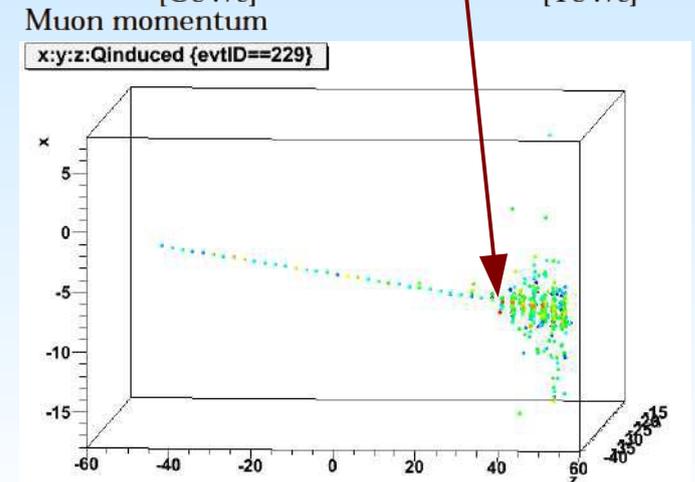
■ Comme dans les trackers

►  $dE/dx$

► Landau



μ de 10 GeV



# Les interactions hadroniques

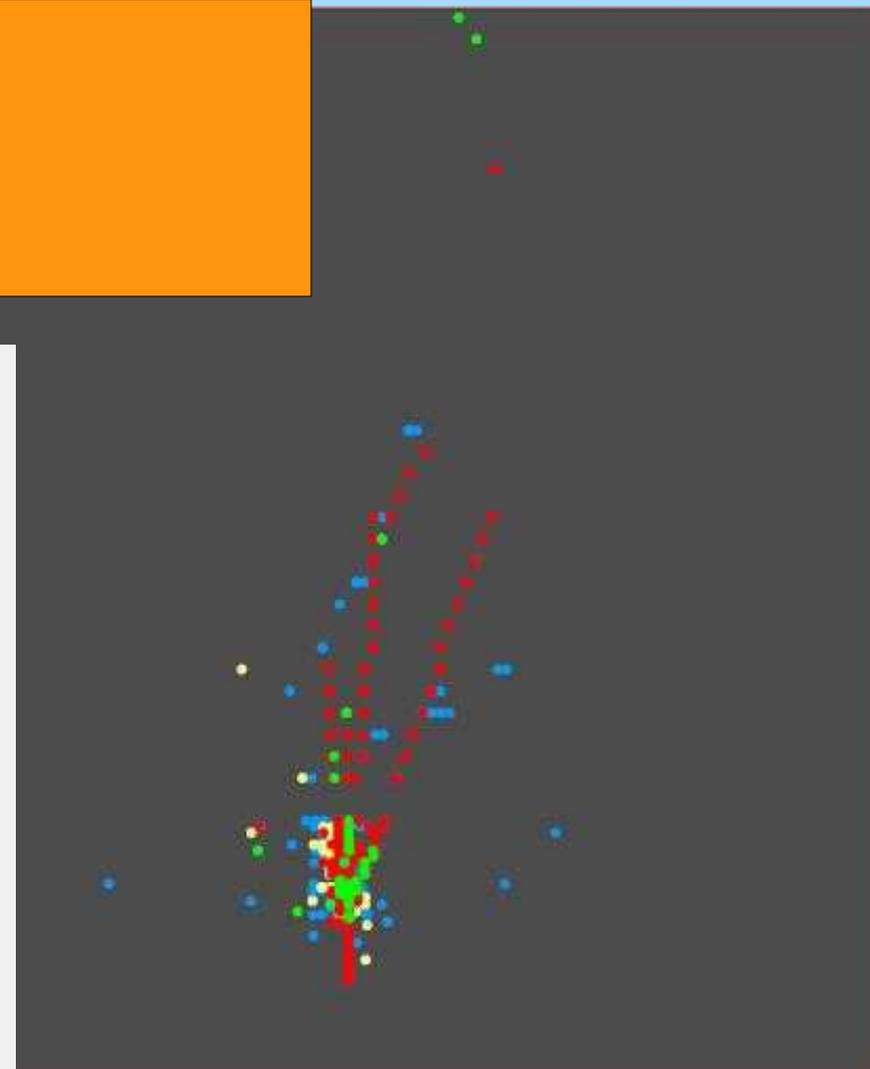
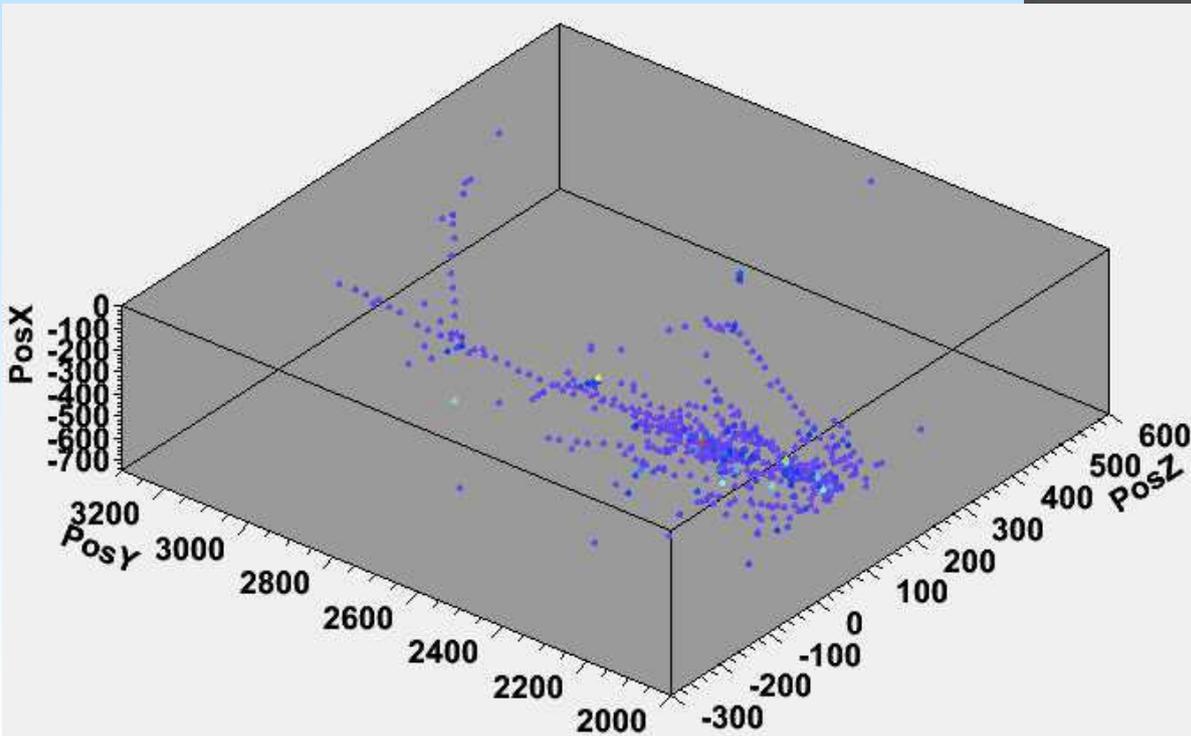
- Matière hadronique ( $\equiv$  lourds  $\leftrightarrow$  leptons  $\equiv$  légers)
  - ▶ Baryons : constitués de 3 quarks
    - ◆ p, n,  $\Delta^{++}$ , ...
  - ▶ Mésons : constitués de 1 quark–1 anti-quark
    - ◆  $\pi^{\pm,0}$ ,  $K^{\pm}$ ,  $K_{L,S}^0$
- Chargés / neutres  $\rightarrow$  interaction 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,  $\gamma$ ,  $e$
  - et aux particules hadroniques,  $p$ ,  $K$ ,  $\pi$
- fraction de  $\pi^0$  (e/h)

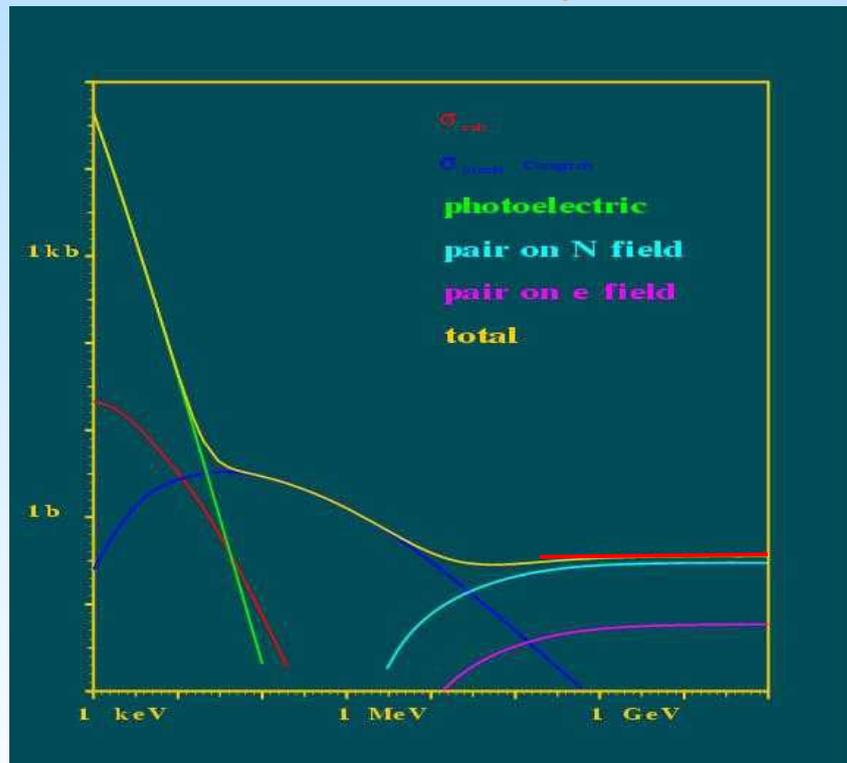


# Longueur de radiation $\lambda_0$ ,

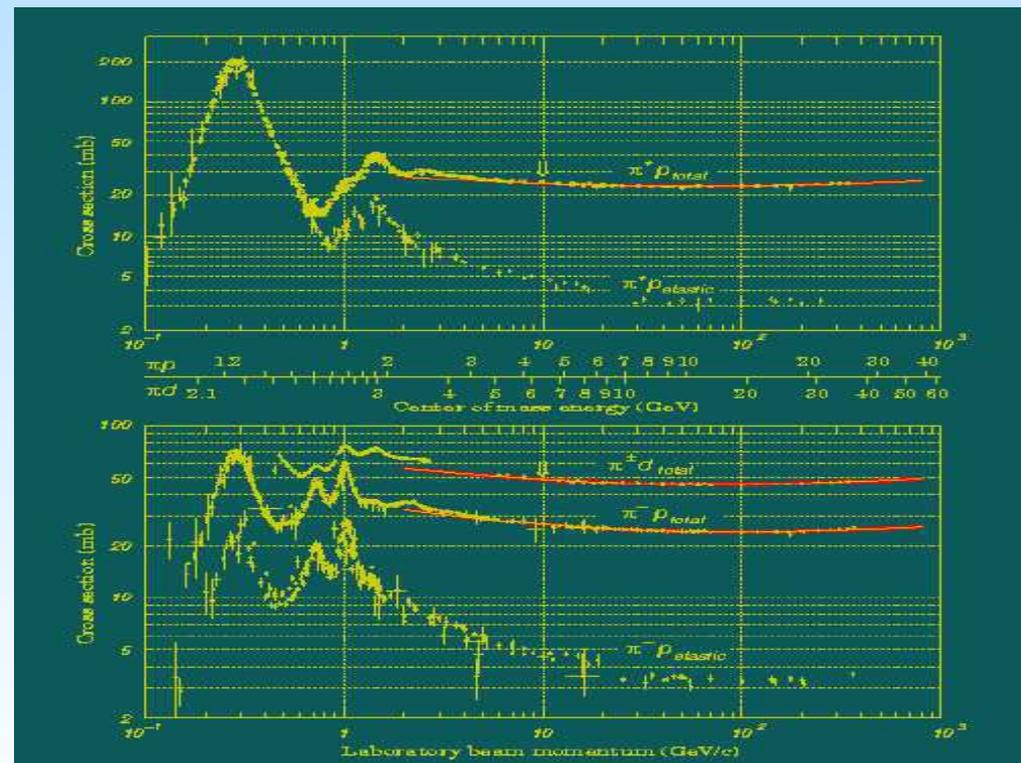
# Longueur d'interaction $\lambda_{int}$ :

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  $\gamma$  Carbon in barns/atom



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



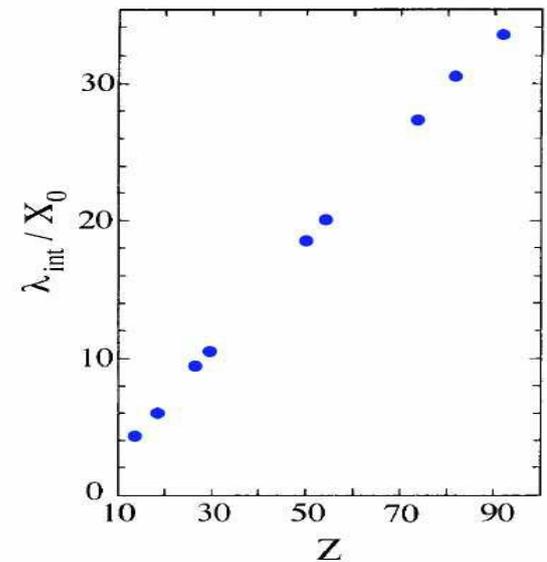
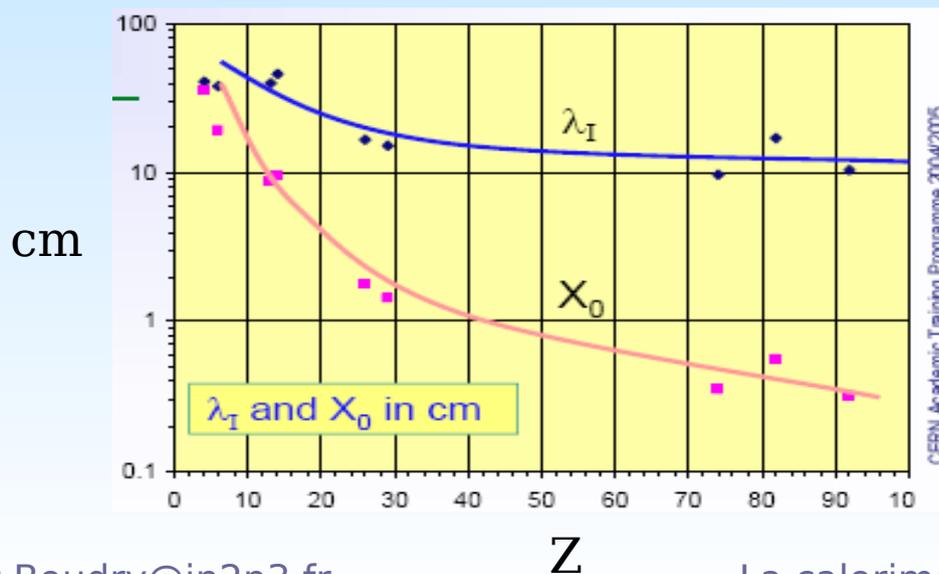
# Quelques chiffres

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

Matériau	Z	A	$\rho$ {g cm <sup>-3</sup> }	X <sub>0</sub> {cm}	$\lambda_{\text{int}}$ {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<sub>0</sub>) ~ 1 λ<sub>int</sub>

Petit λ<sub>int</sub> &  
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>

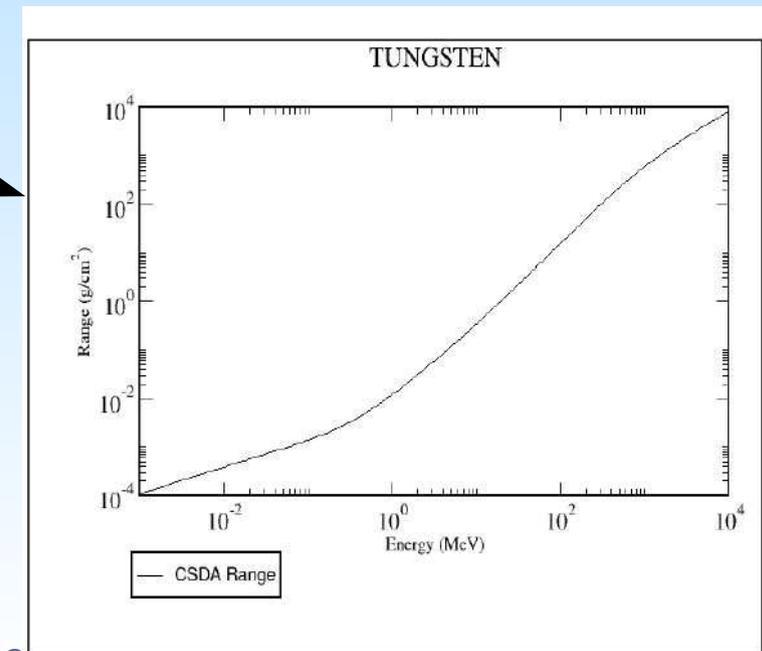
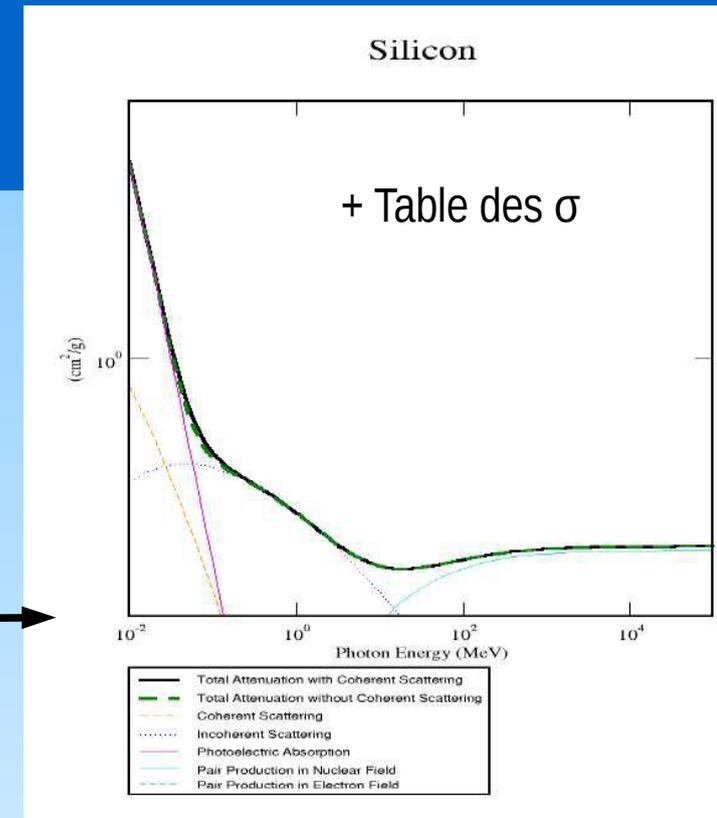
◆ X-COM :  $\sigma_{\gamma}(E)$

◆ Calculs de range

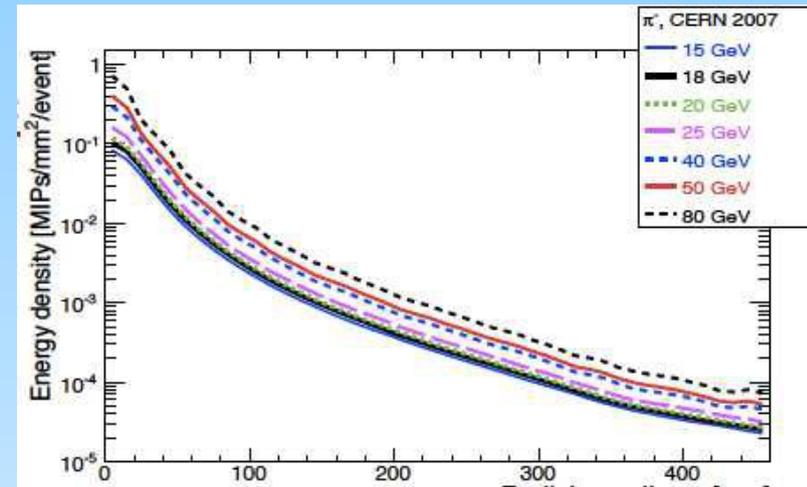
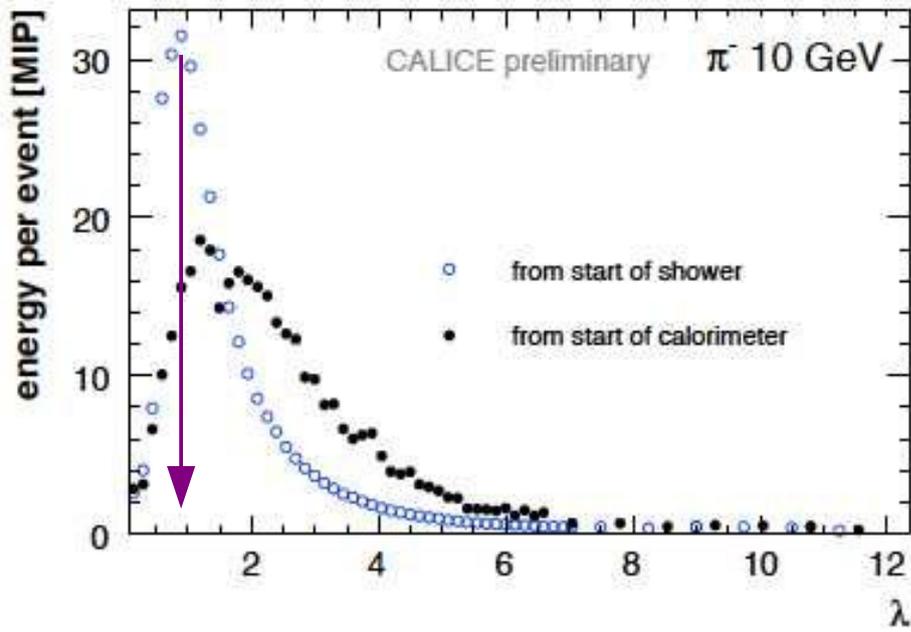
- estar : electrons
- pstar : protons
- astar :  $\alpha$

## ■ Nuclear properties

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

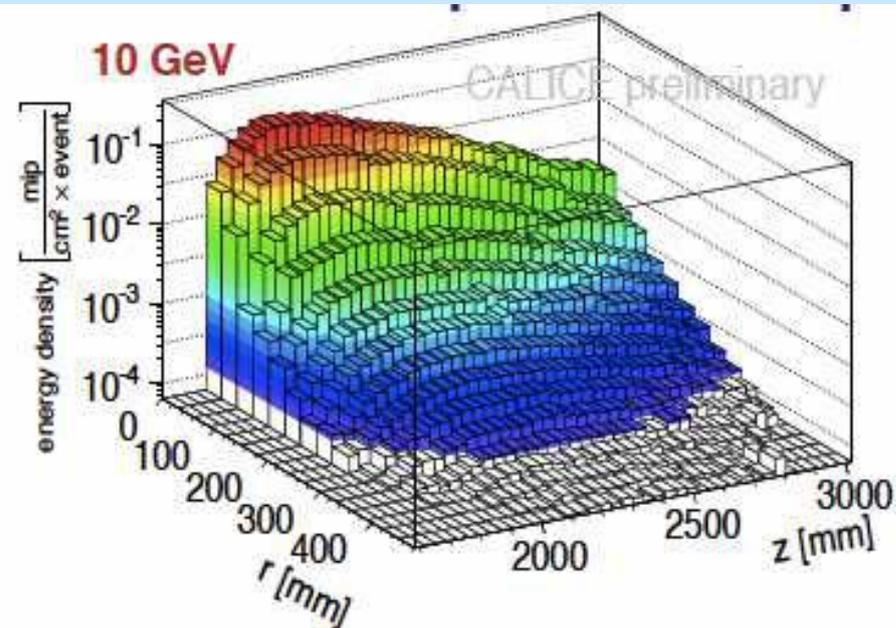


# Profil des gerbes hadronique

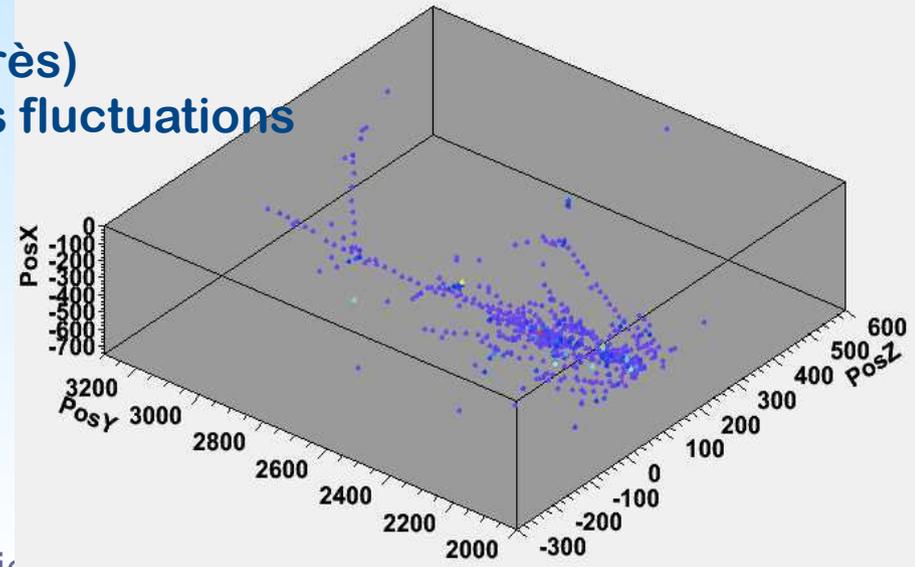


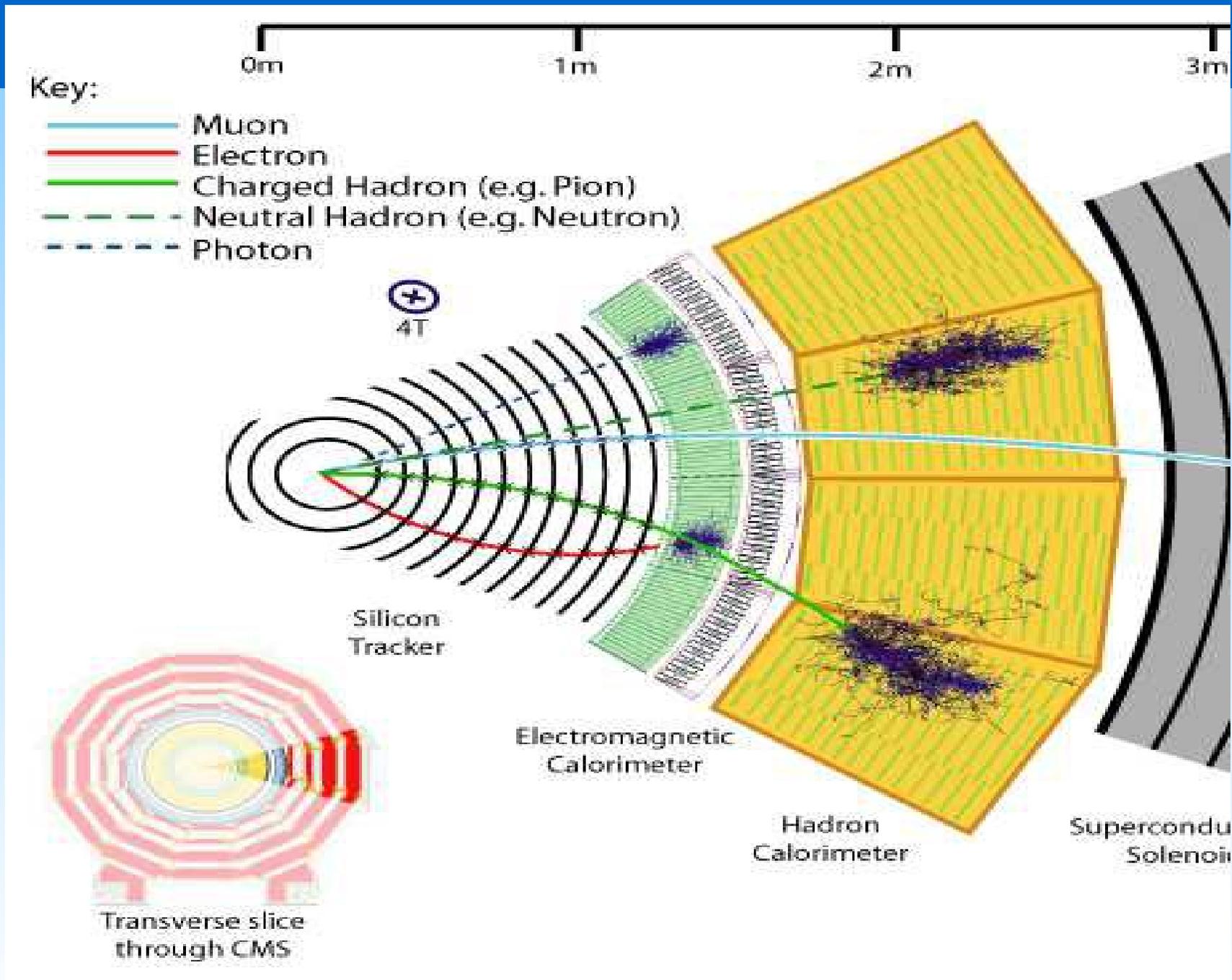
**Gerbe Hadronique ~100 GeV à**

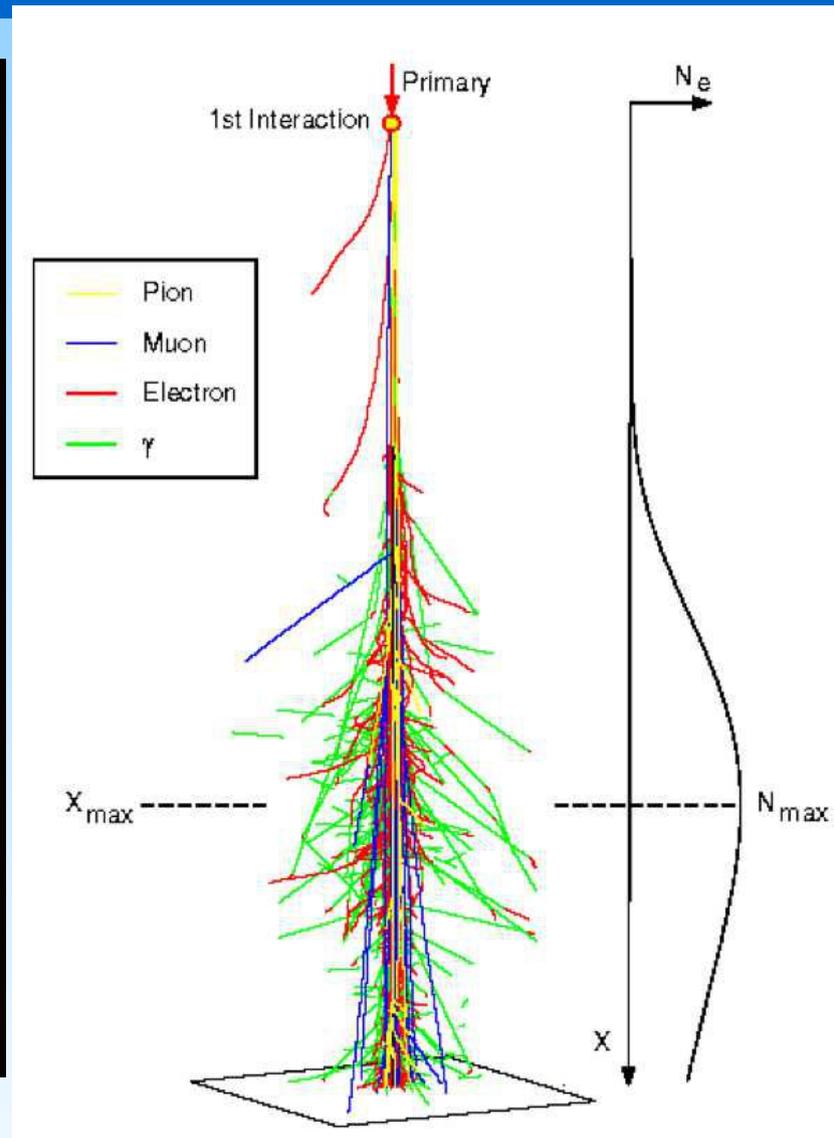
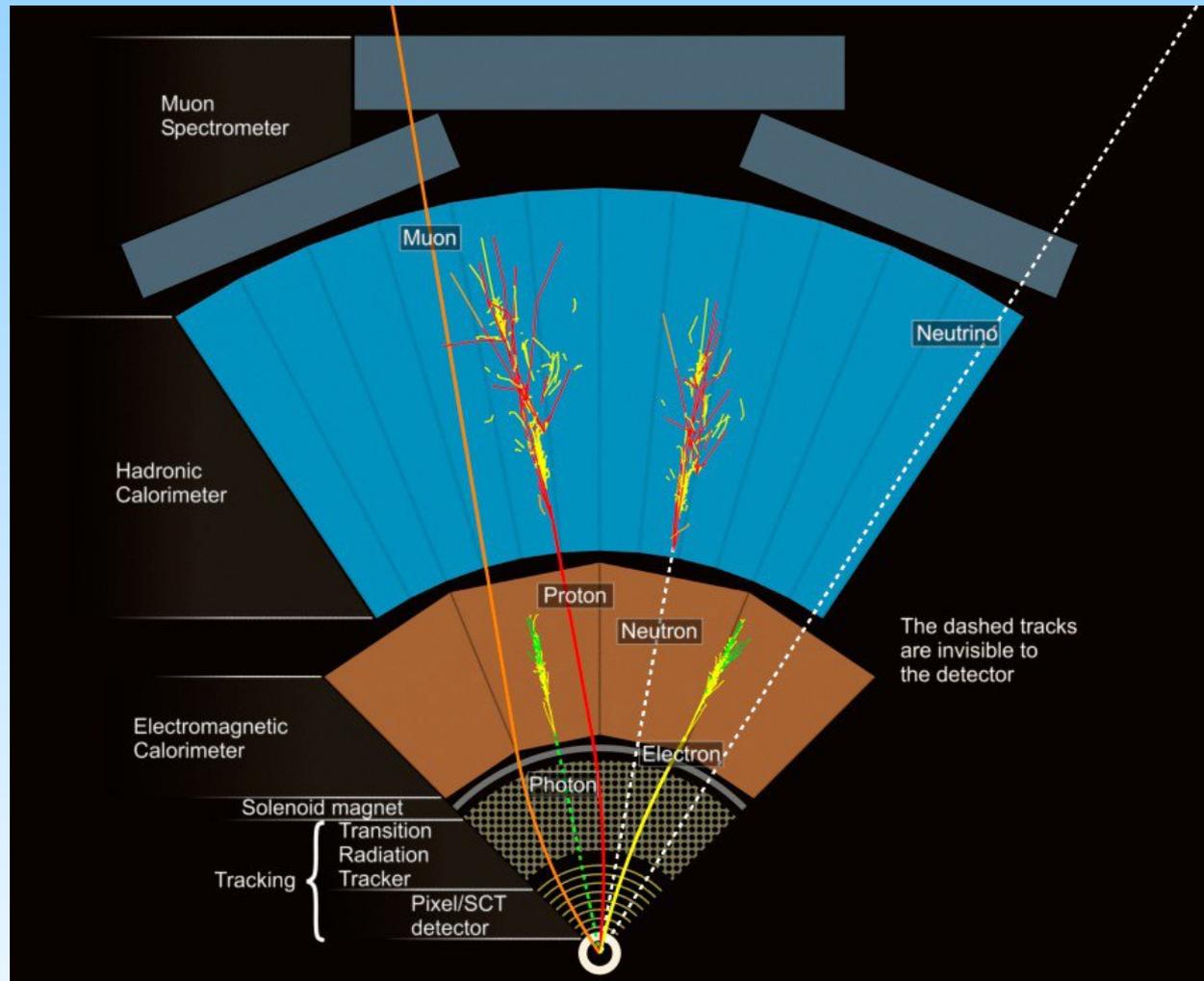
- longitudinalement : 95% dans  $8 \lambda_{int}$
- latéralement : 95% dans  $R \leq 1,5 \lambda_{int}$



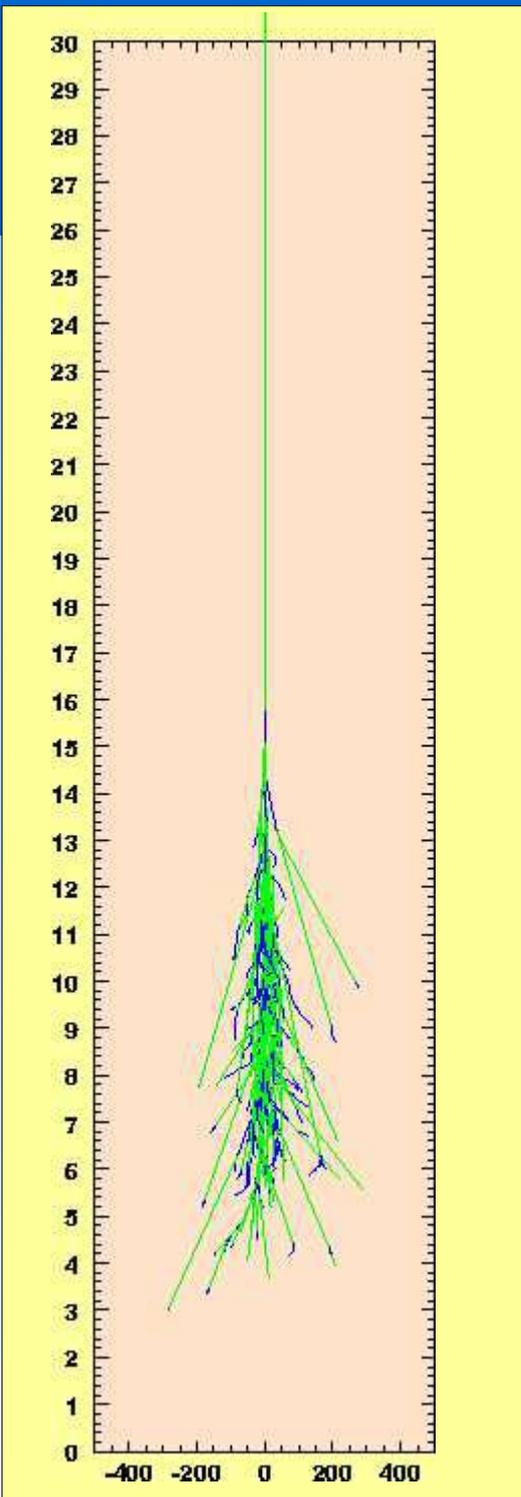
(très très)  
Larges fluctuations



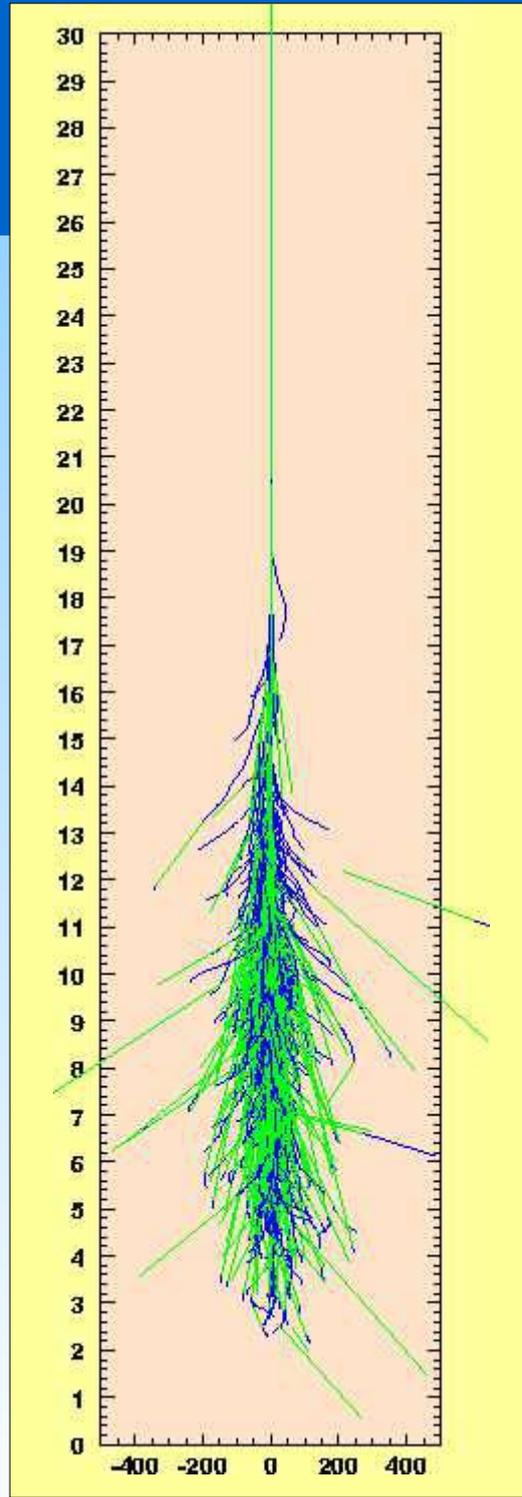




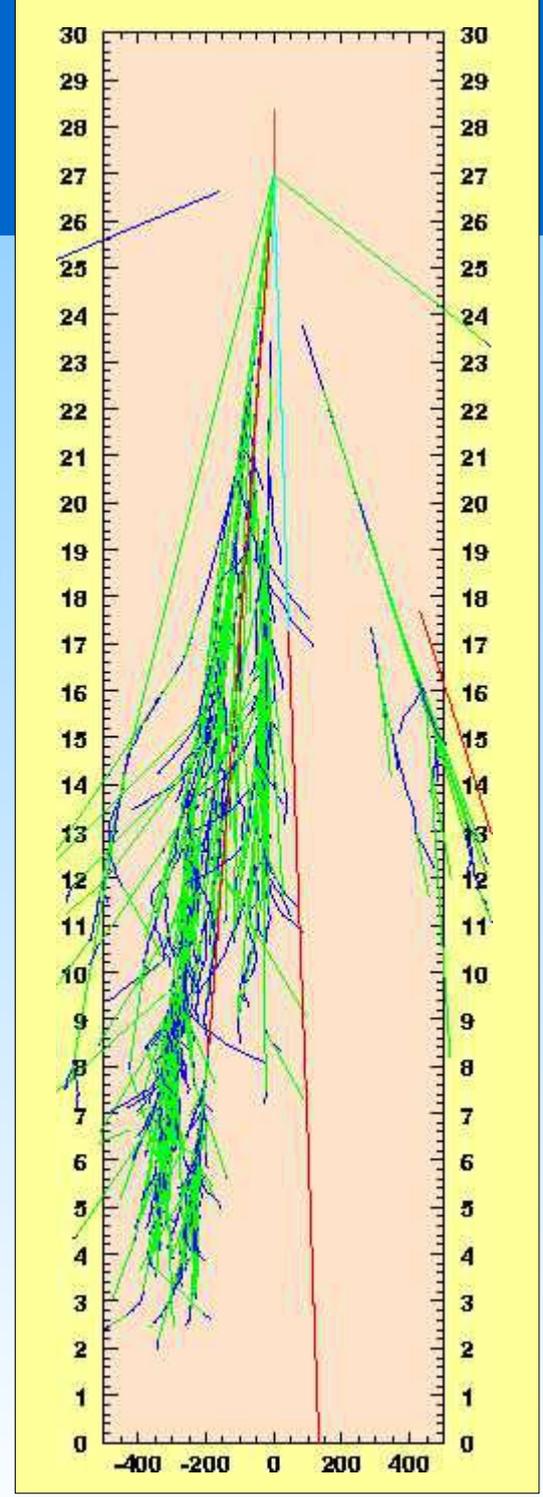
$\gamma$  50 GeV



$\gamma$  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  $\pi^-$

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

## ■ + fragments de noyaux

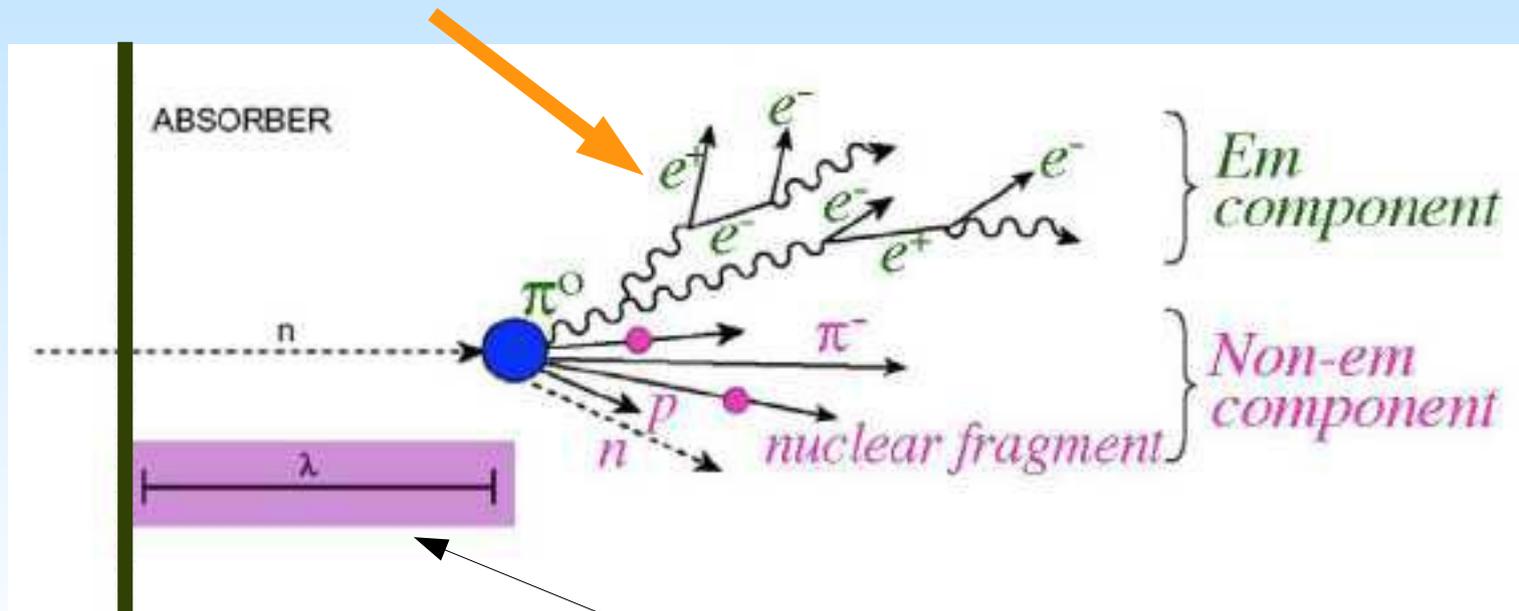
▶ neutrons rapides

▶ dés-excitations

◆ n

◆  $\gamma$

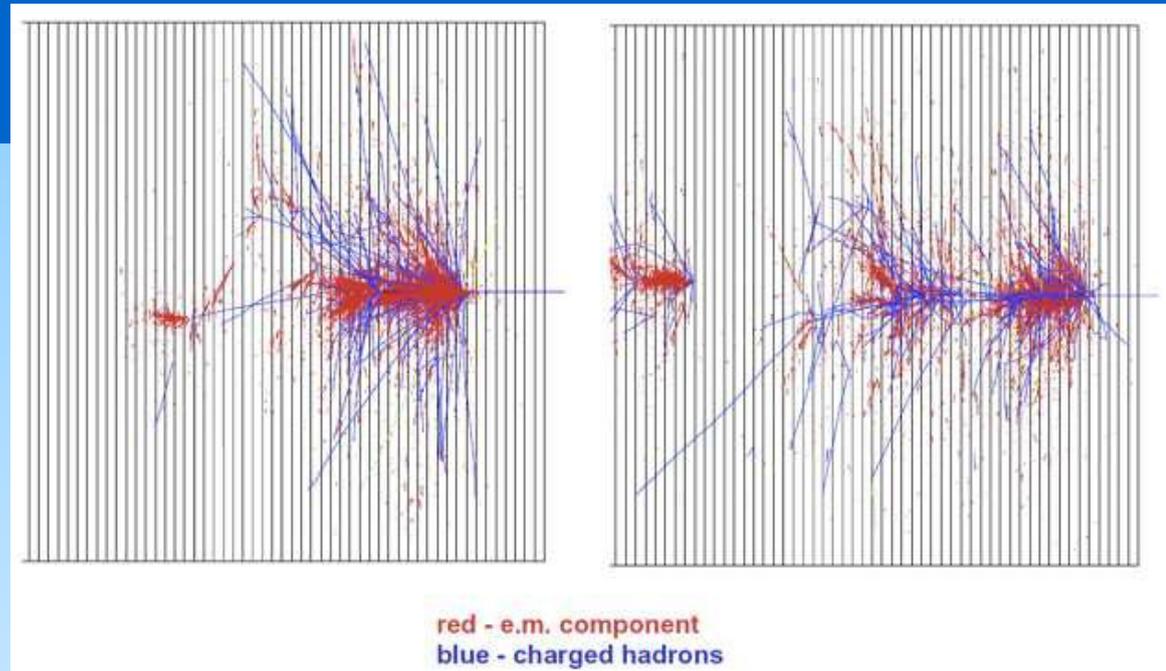
◆  $\alpha$



Longueur typique d'interaction

# La fraction EM

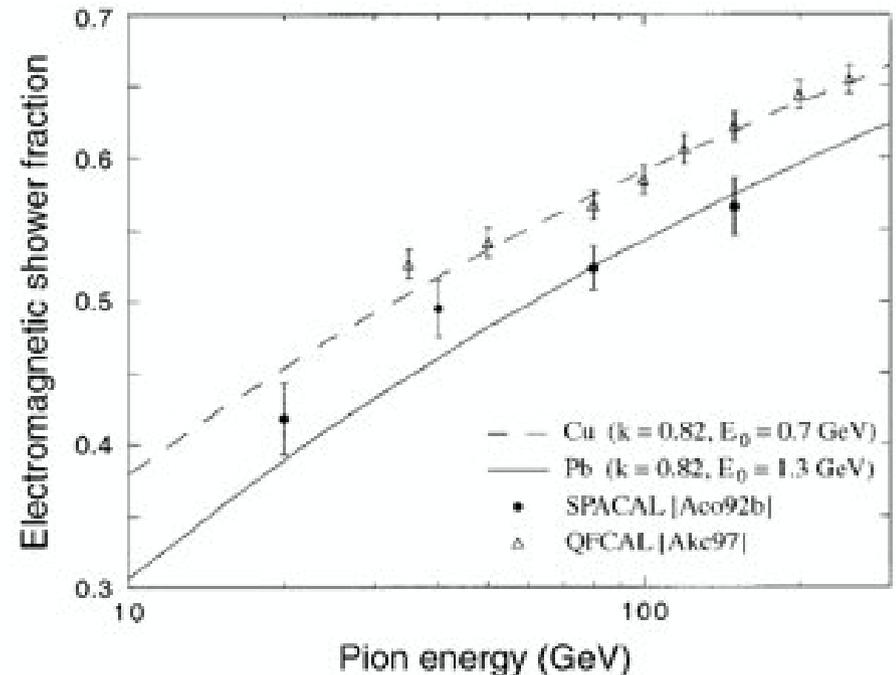
- À chaque collision :
  - ▶  $\pi$  produits ~ à égalité :  
 $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$
  - ◆  $\pi^0 \rightarrow$  gerbe EM « locale »



- Fraction  $f_0$  de  $\pi^0$  dans chaque interaction

*Avec les mains :*

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



# La non-linéarité → facteur e/h

## Calorimètres compensants

- Réponse d'un calorimètre aux hadrons :

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

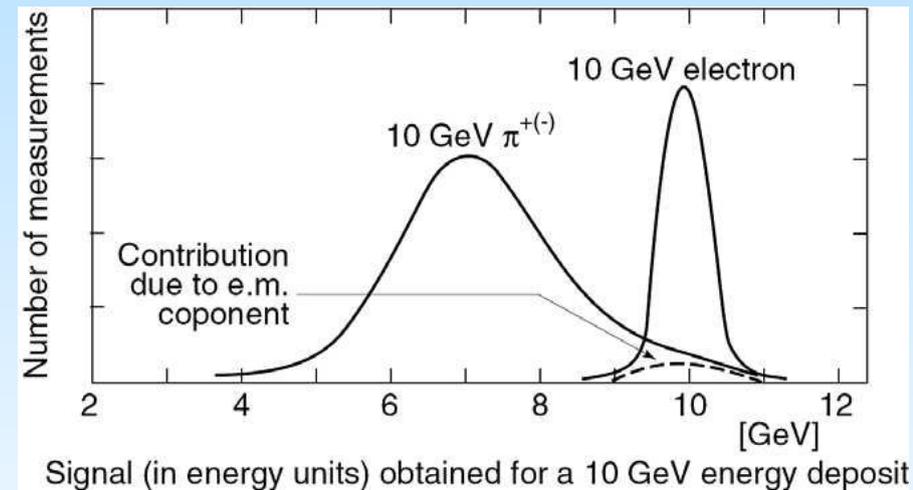
Rapport

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

- ▶  $E_e$  = Energie EM
- ▶  $E_h$  = énergie hadronique
- ▶  $\varepsilon_e$  = fraction d'énergie EM détectée
- ▶  $\varepsilon_h$  = fraction d'énergie Hadronique détecté

- $e/h =$

- ▶  $\sim 1$  → calorimètre à compensation
- ▶  $\neq 1$  → calorimètre non-compensant



# Bilan énergétique

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

▶ basé sur des mesures de  $\sigma_{\text{eff}}$  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 :
  - ▶  $\sigma$  pas toujours bien connues
  - ▶ Effets des senseurs (présence d'Hydrogène)

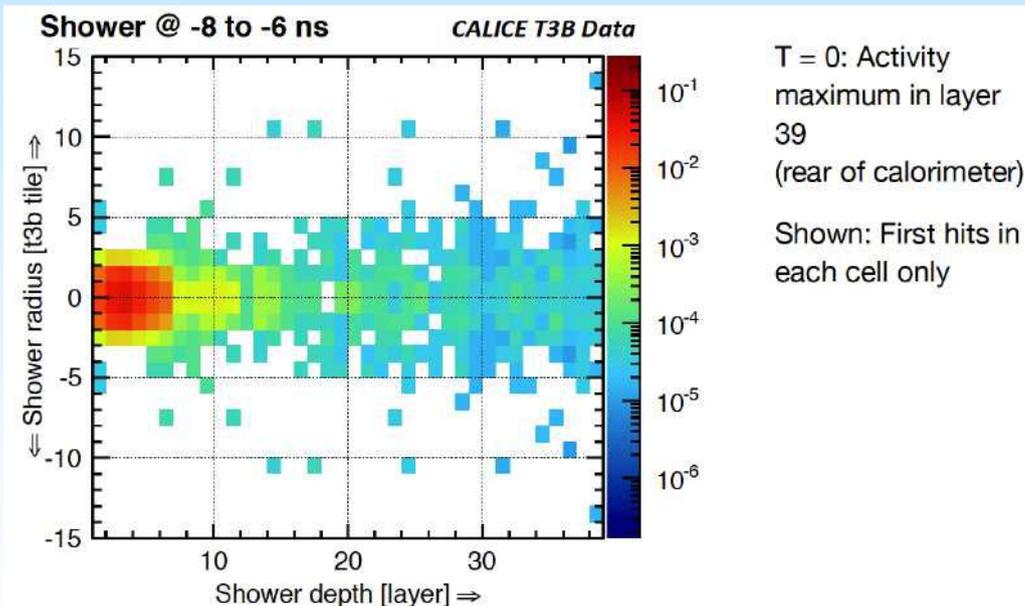
# Composante neutronique secondaire

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

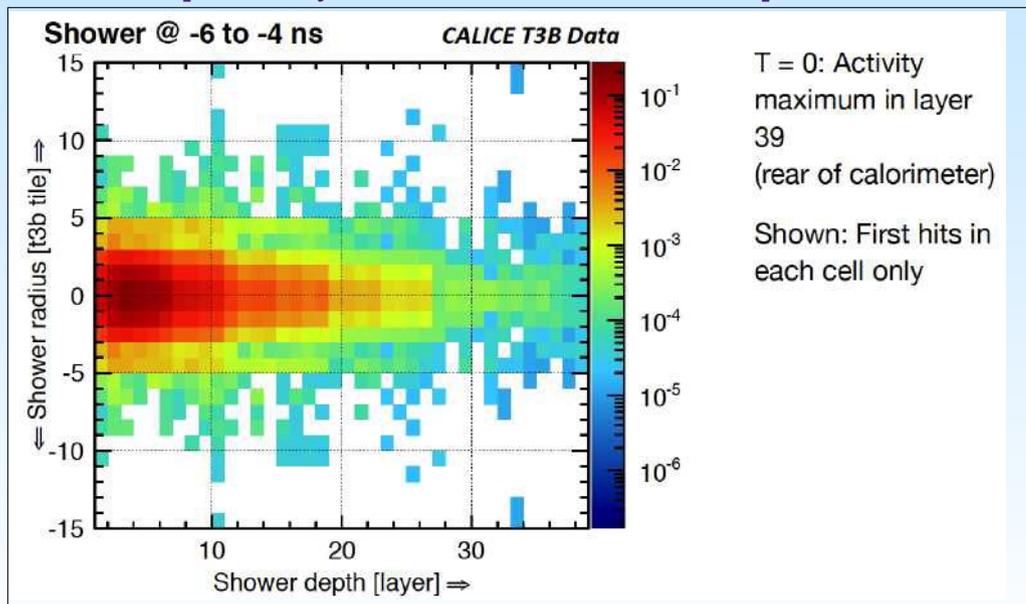
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

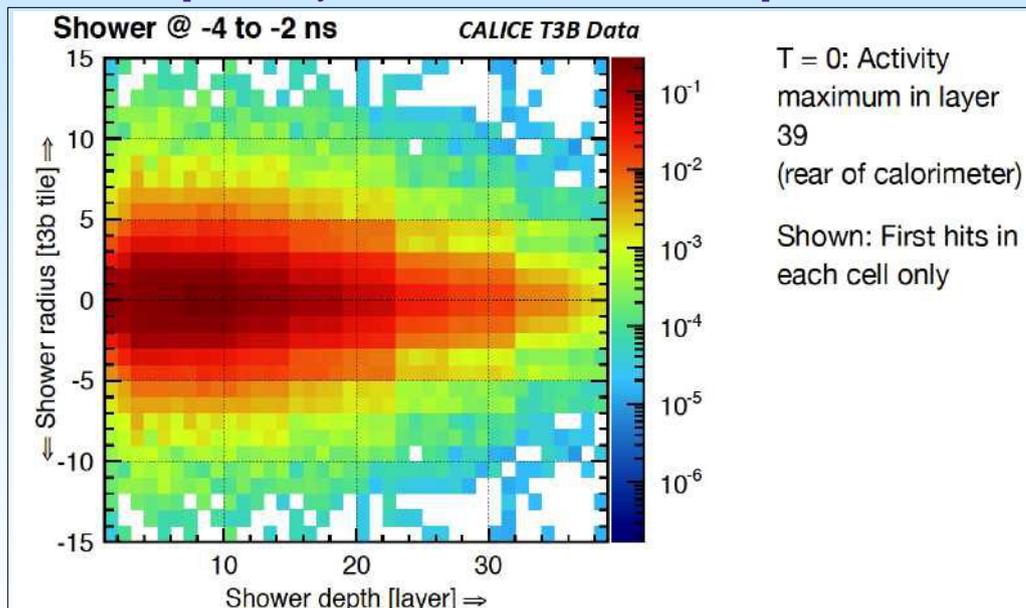
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

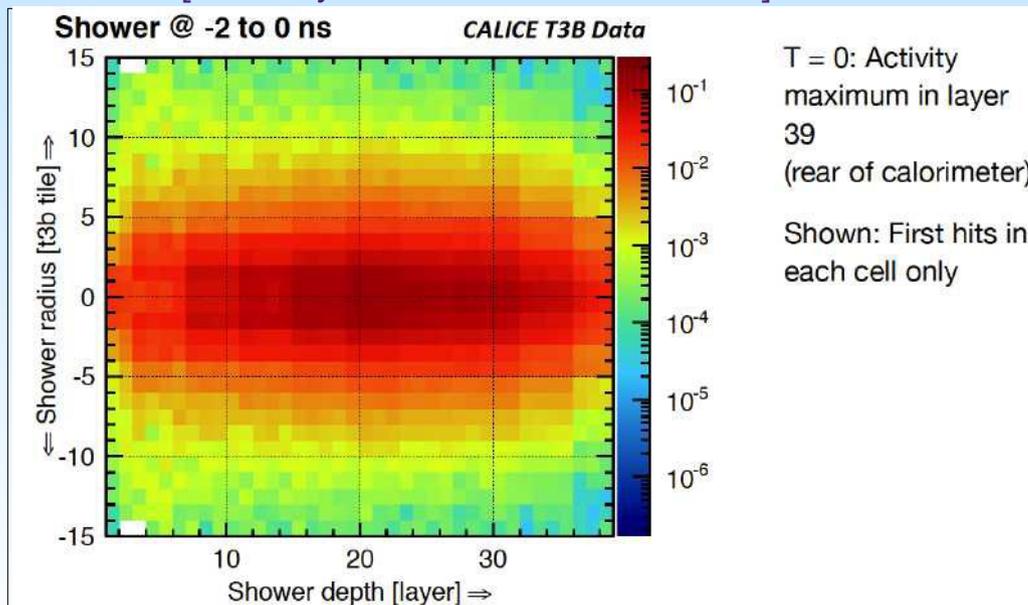
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

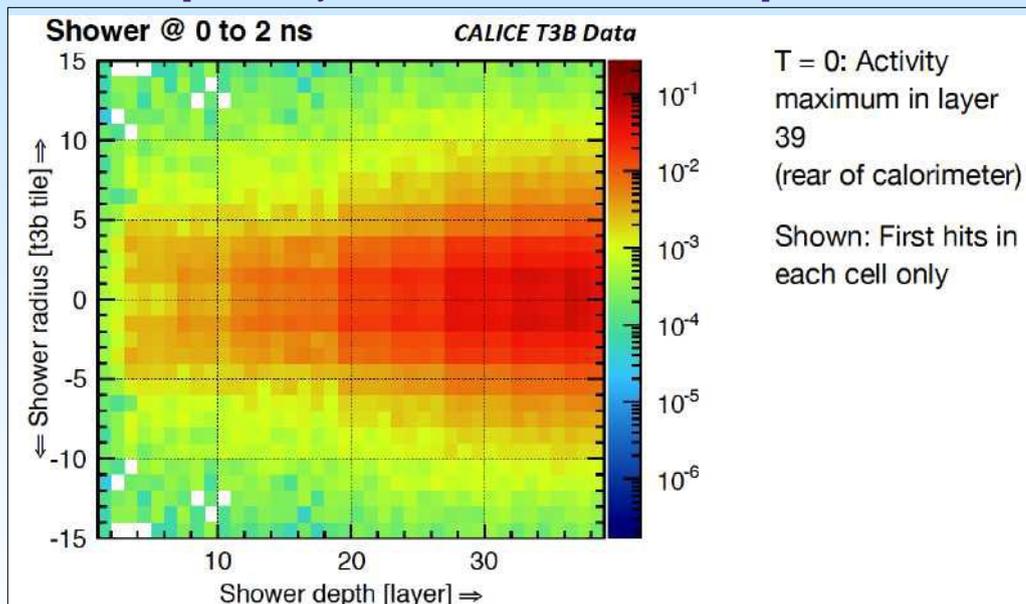
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

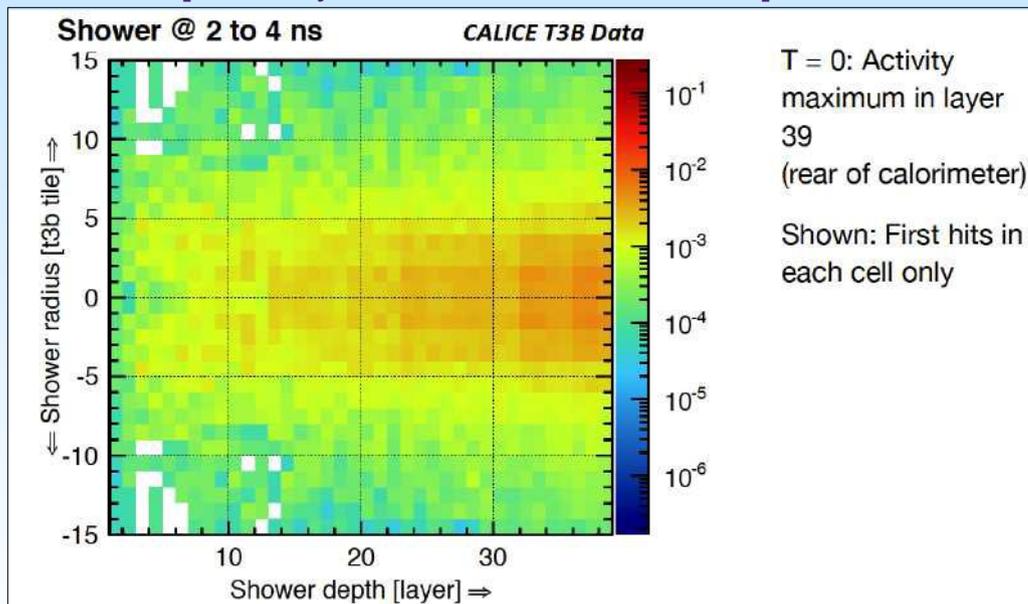
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

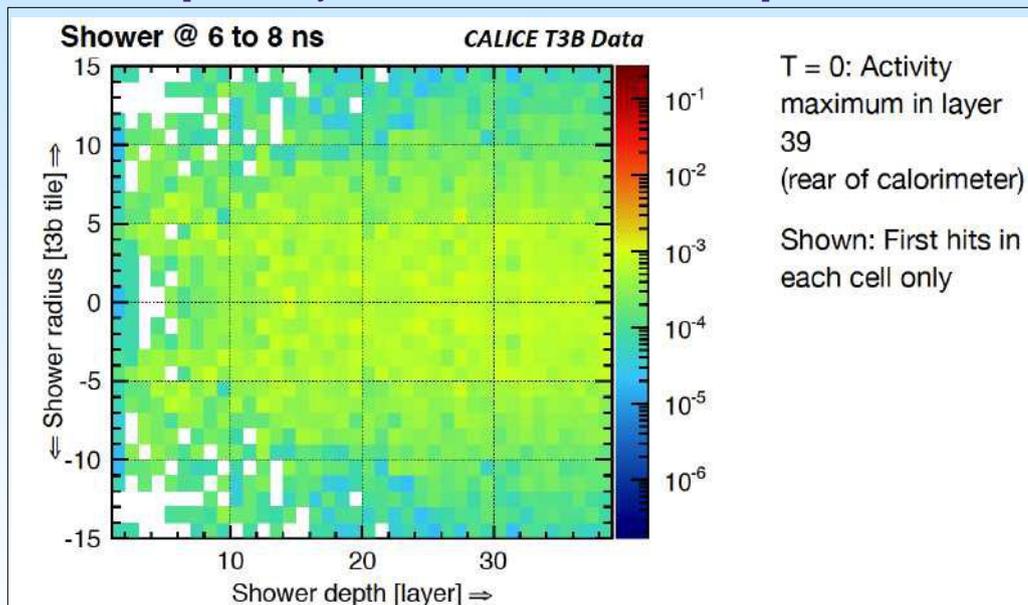
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

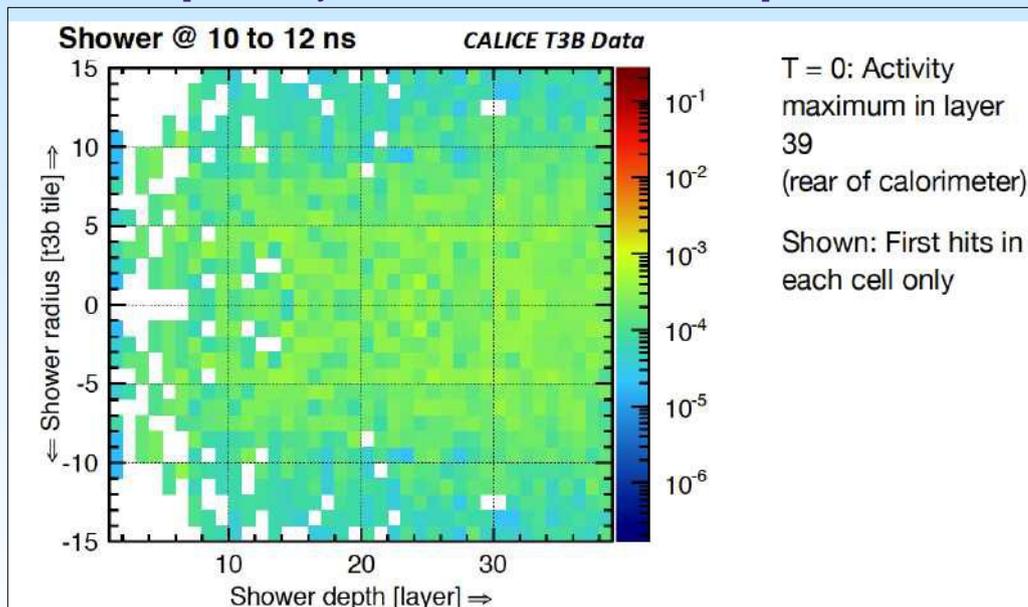
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

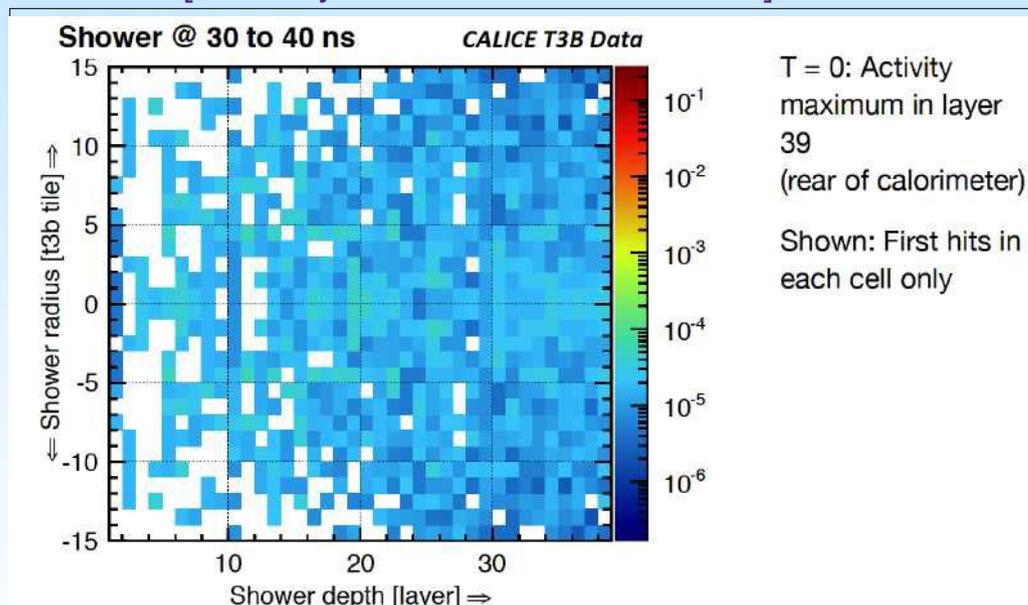
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

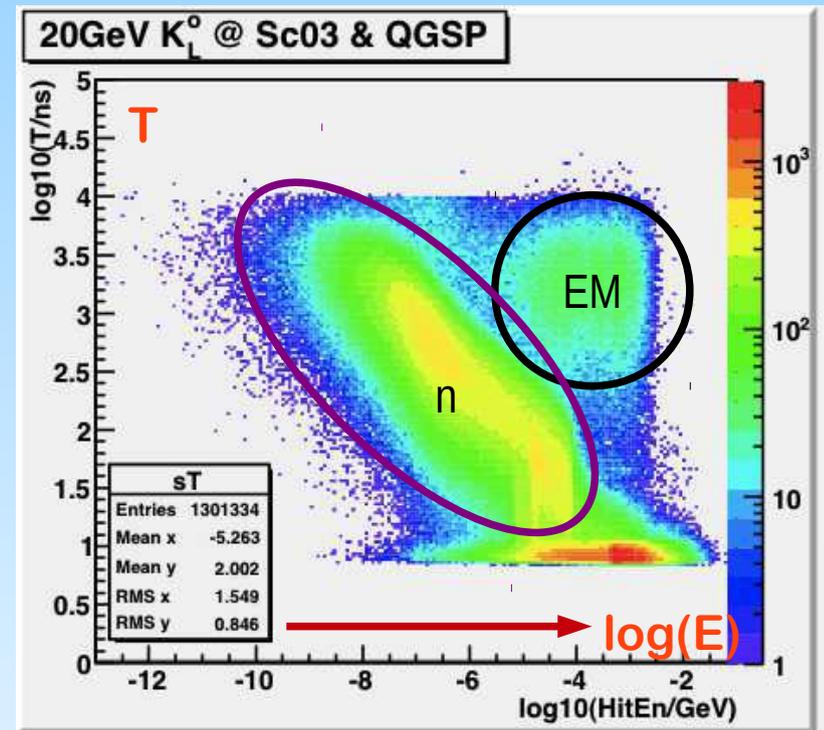
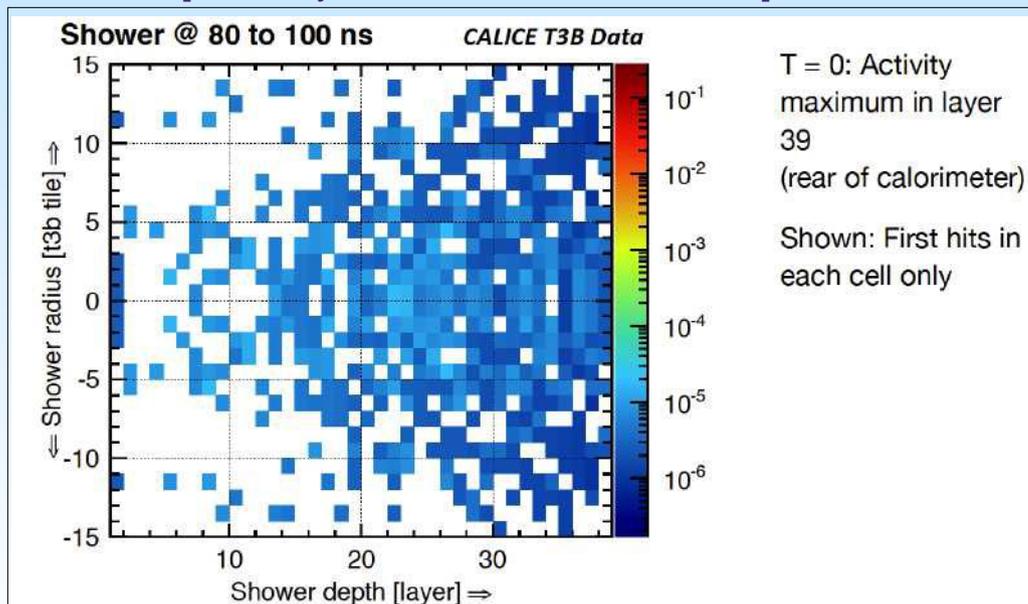
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

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

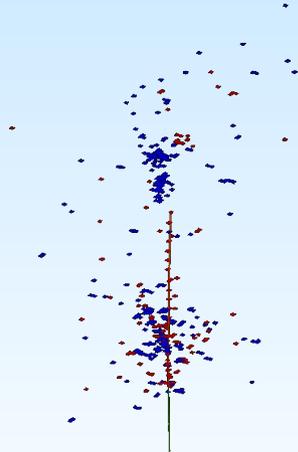
[courtesy of F. Simon, MPI Munchen]



# Composante neutronique secondaire

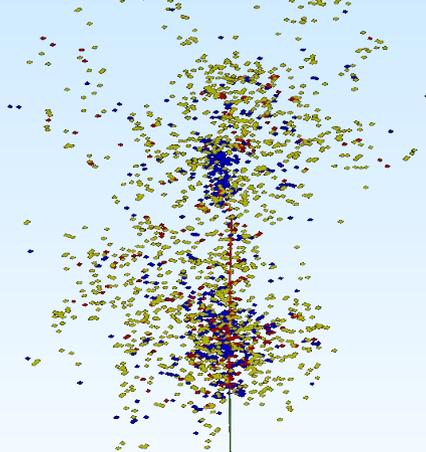
- En général temps caractéristiques  $\sim$  qq ns (30 cm / ns)
- Sauf pour
  - ▶ les des-excitations nucléaires
  - ▶ les n
    - ◆  $\sigma_{\text{eff}}$  de capture ↗ à basse énergie
    - ◆  $\rightarrow$  temps de thermalisation

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1

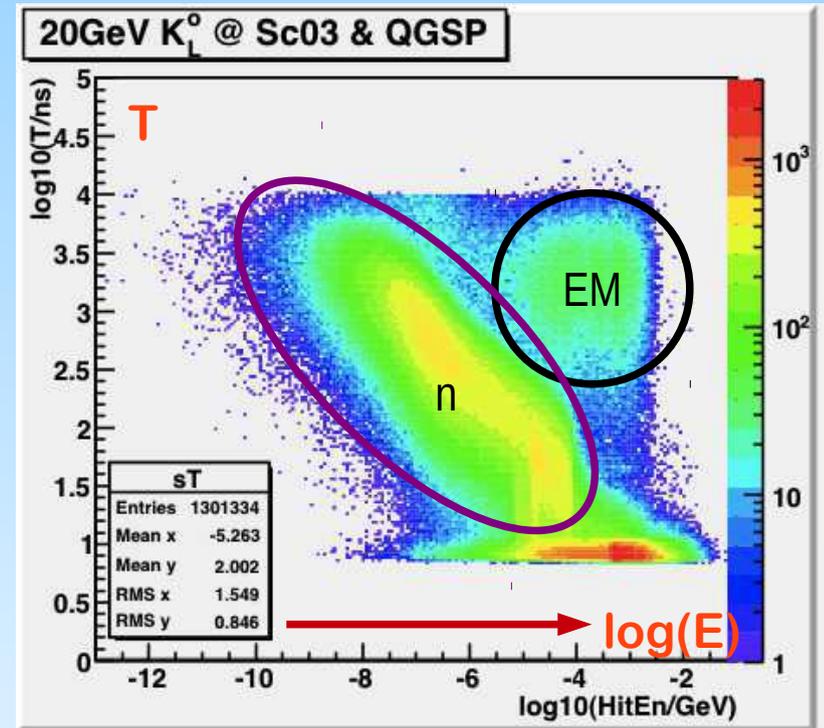


sans neutrons

DRUID, RunNum = 0, EventNum = 1

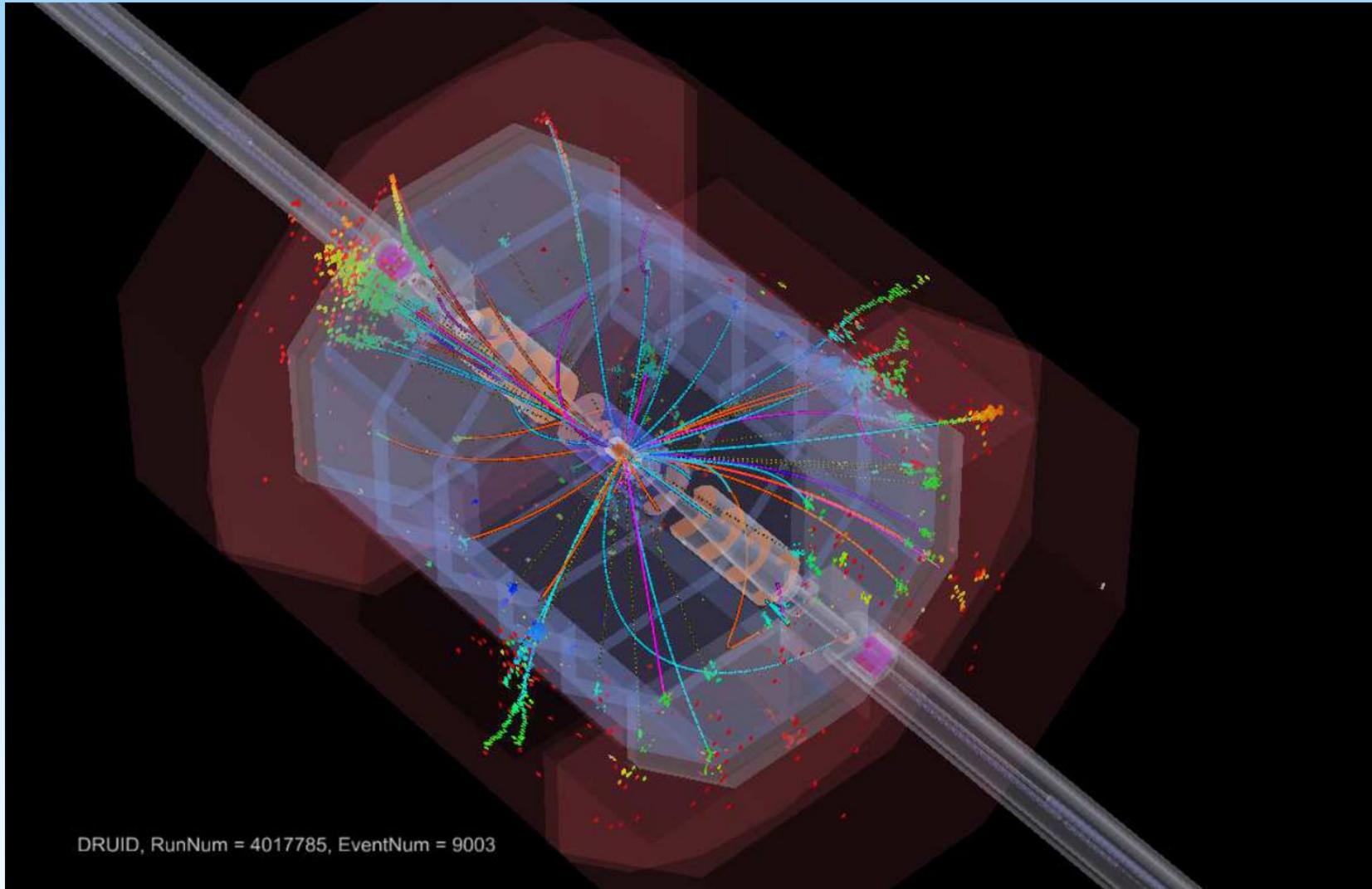


avec neutrons



[courtesy of M. Ruan, LLR]

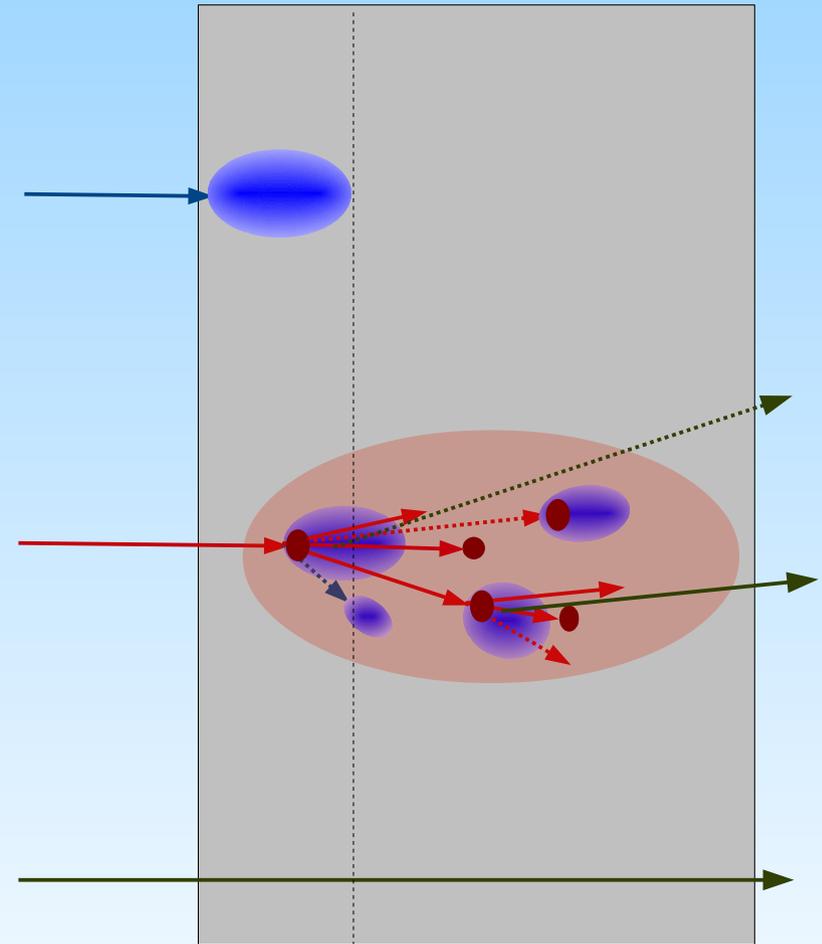
# Information en temps



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

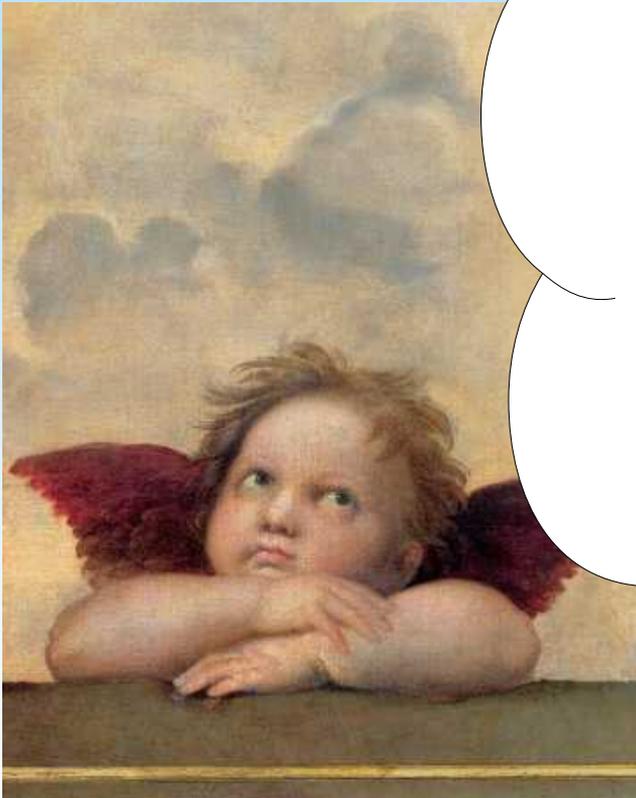
# Rappel

- Calorimétrie = mesure de l'énergie des particules (passant le trajectographe) par arrêt
- $e^\pm$  et  $\gamma \rightarrow$  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



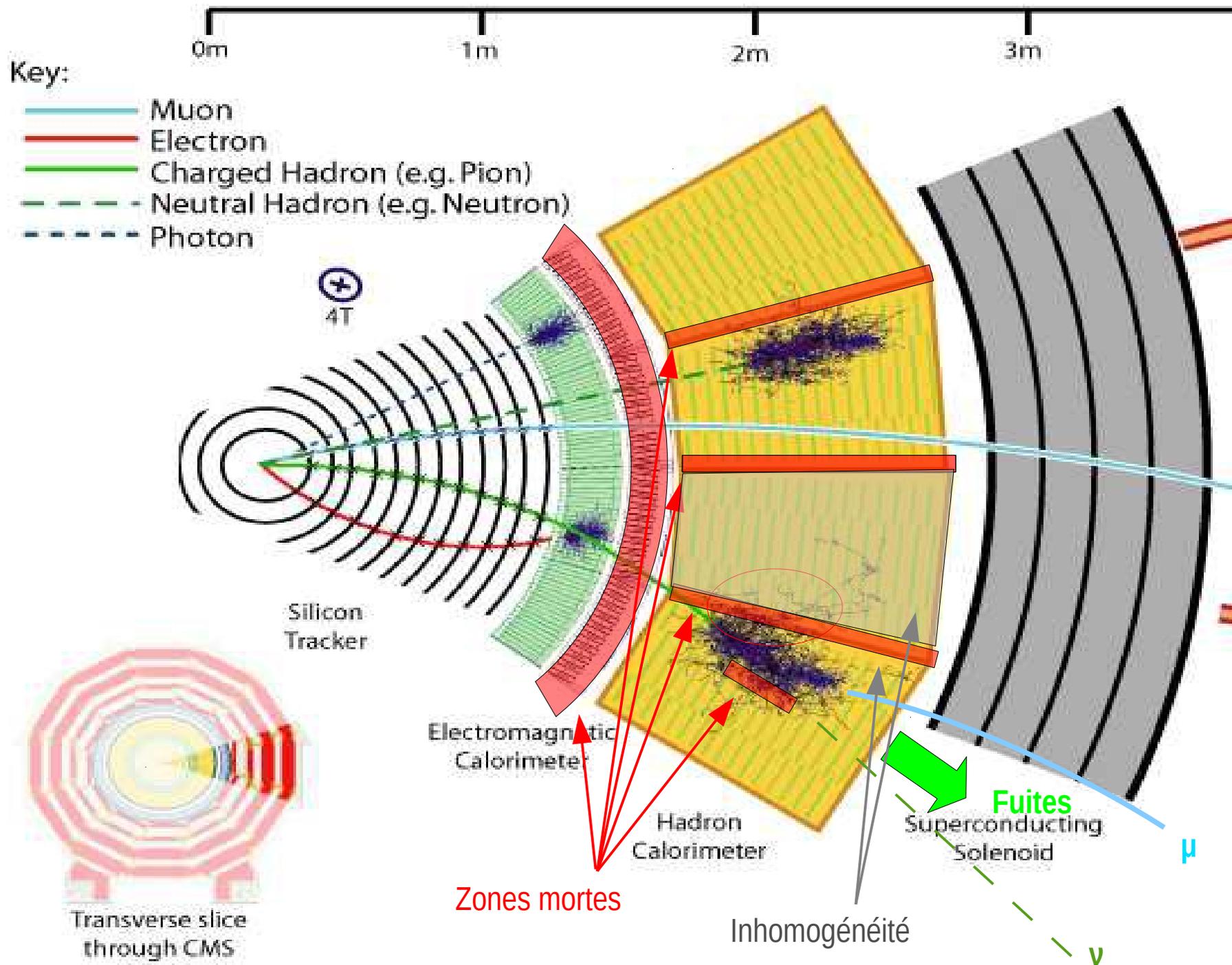
# **L'élaboration d'un calorimètre : les critères**

# Le détecteur parfait



- infini (pas de pertes)
- Sans bruit
- Infiniment précis
- Linéaire
- Précis spatiale<sup>t</sup>  
& angulaire<sup>t</sup>
- 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 (▷ radiations)
- Inhomogénéité  $\delta$
- Efficacité & Pureté
- Précision position & Angle
- % Confusion ( $e/\pi$ , 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  
( $e^\pm$ ,  $p$ ,  $\pi$ , fragments)  
produits

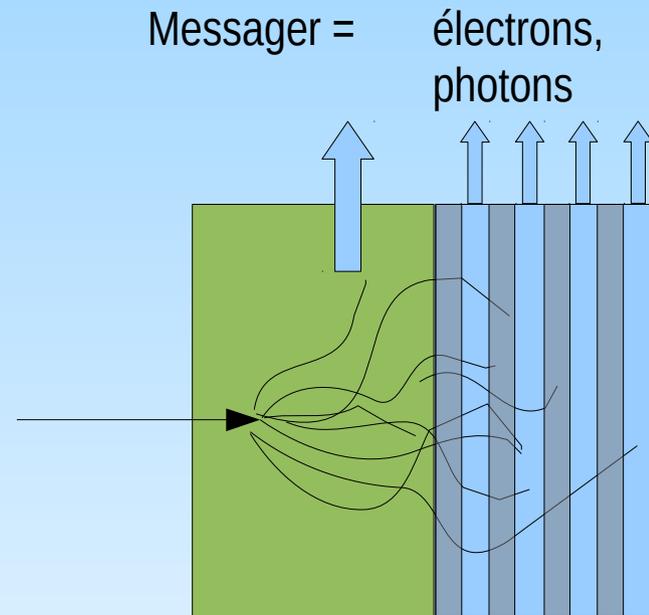
la Mesure c'est du Comptage

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:

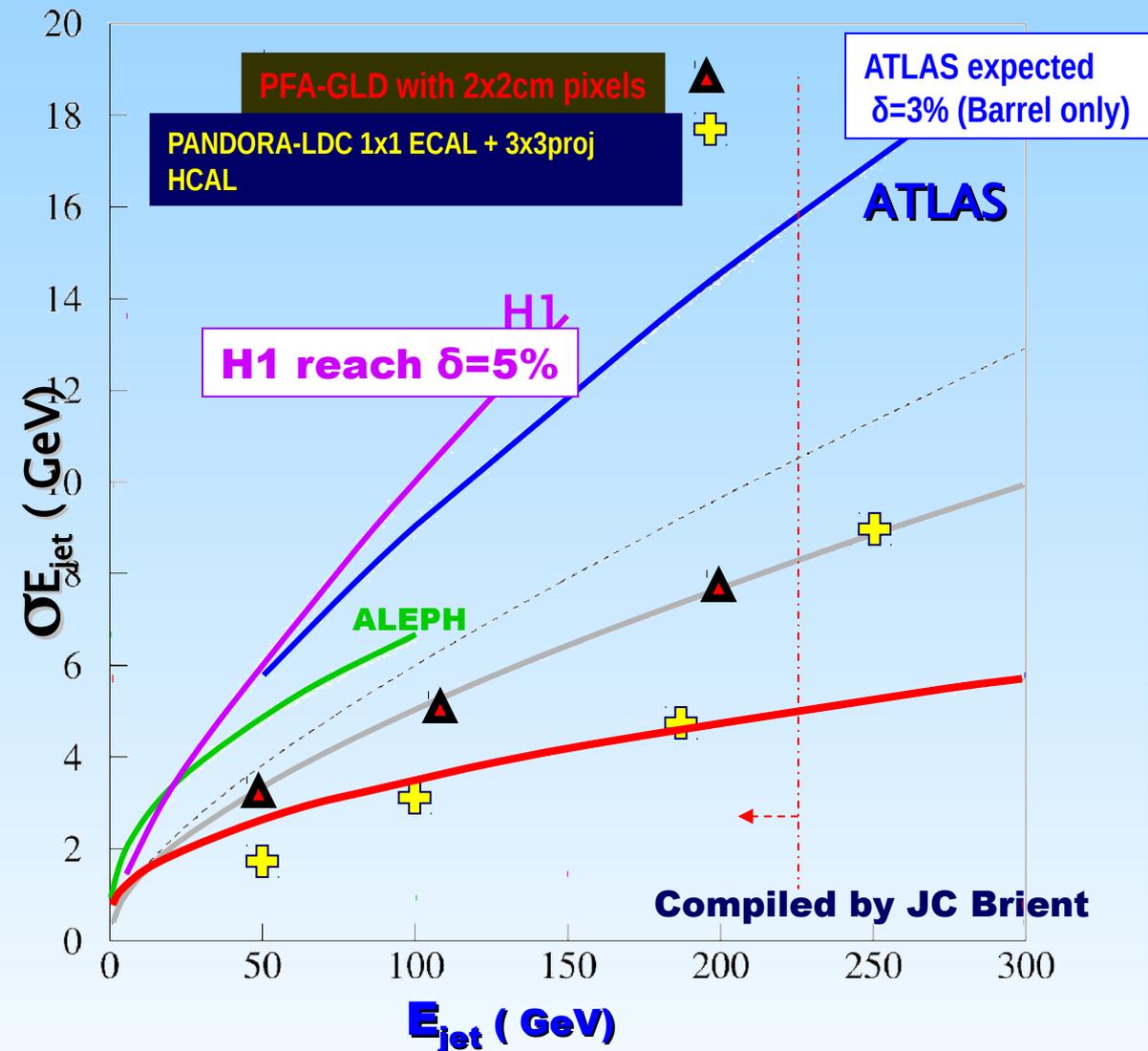
$$\frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \frac{\beta}{E} \oplus \gamma$$

$\alpha$  stochastique  
 $\beta$  bruit  
 $\gamma$  intercalibration (inhomogénéité)

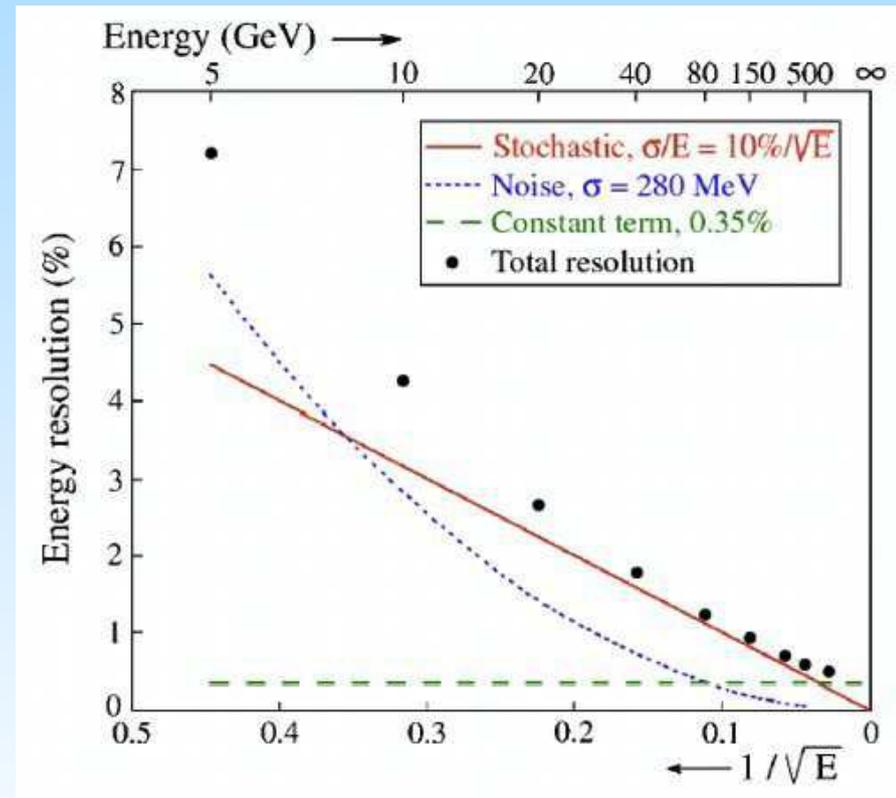
- Fuite :  $\oplus \sigma_{\text{fuite}} \sim 4 f_{\text{fuite}}$   
(corrigé mais pas les fluctuations)
- Fluctuations additionnelles due à la technologie
  - ▶ saturations, effet de charge d'espace...

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

# Résolution : performance

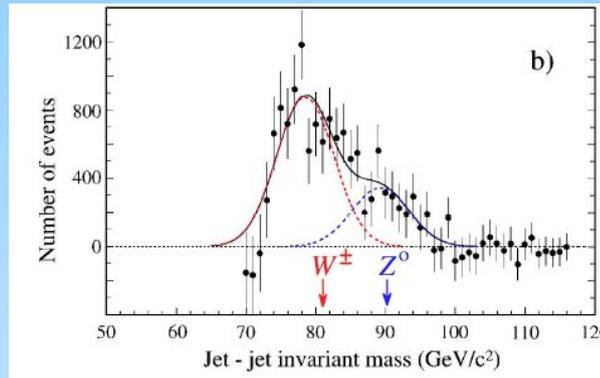
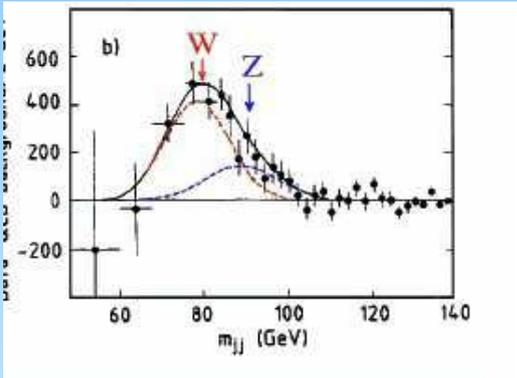


**$\alpha$  :**  
**EM :  $\sim 3-20\% / \sqrt{E}$  (GeV)**  
**Had :  $\sim 50\% / \sqrt{E}$  (GeV)**  
 **$\delta \sim 5\%$  (mauvais) —**  
 **$0.5\%$  (bon)**

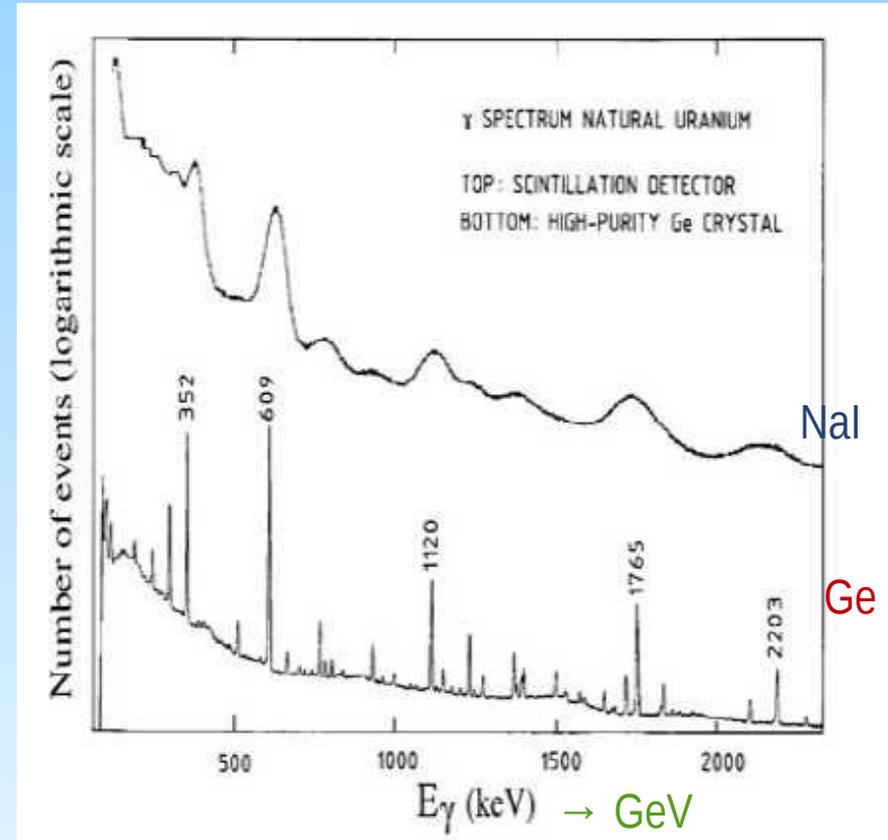


Hautes énergies  $\rightarrow$

# La résolution



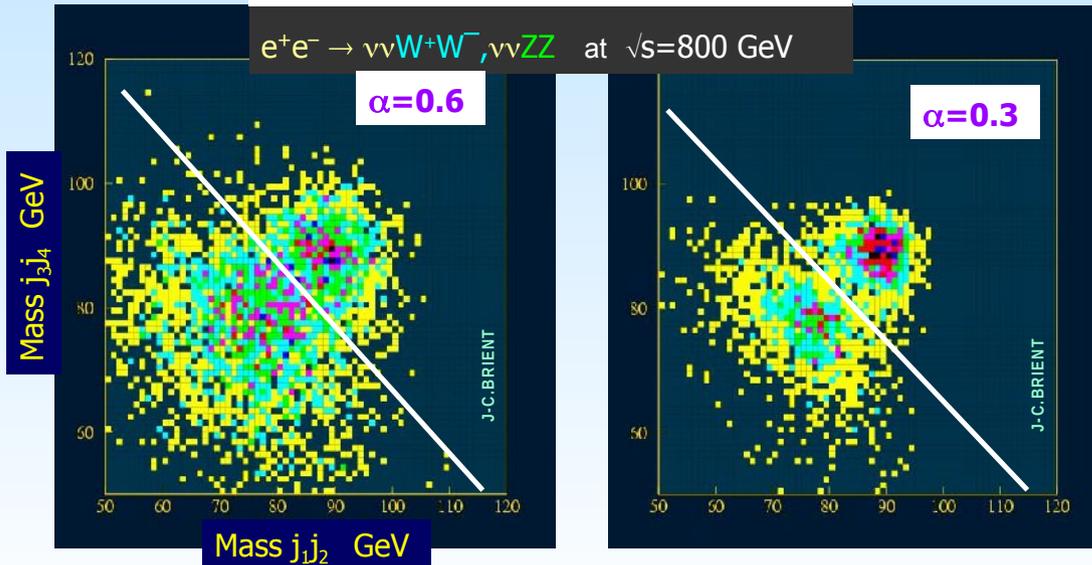
CDF



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

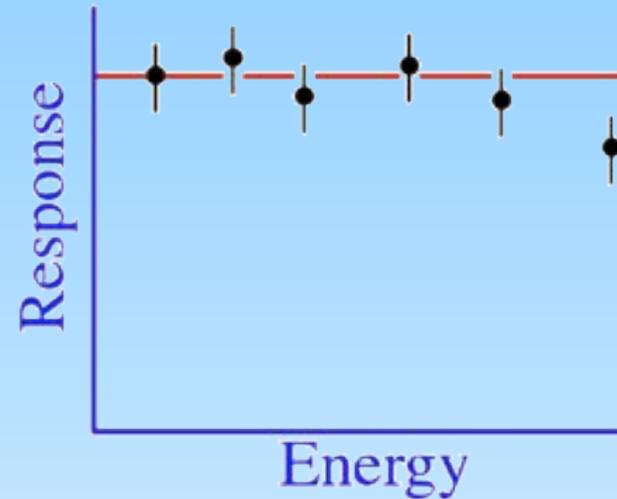
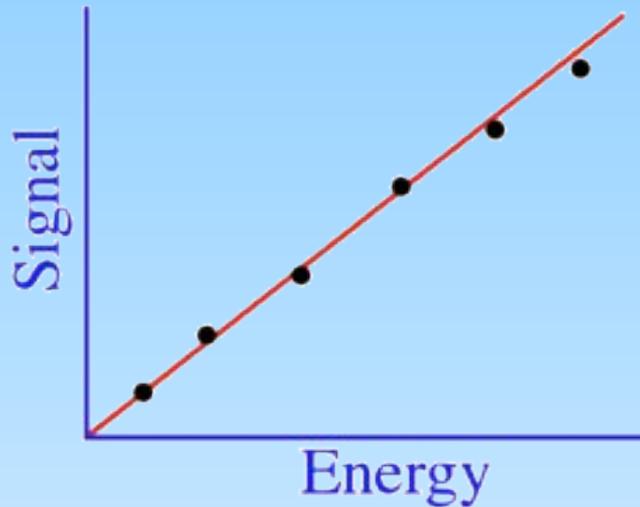
$e^+e^- \rightarrow \nu\nu W^+W^-, \nu\nu ZZ$  at  $\sqrt{s}=800$  GeV



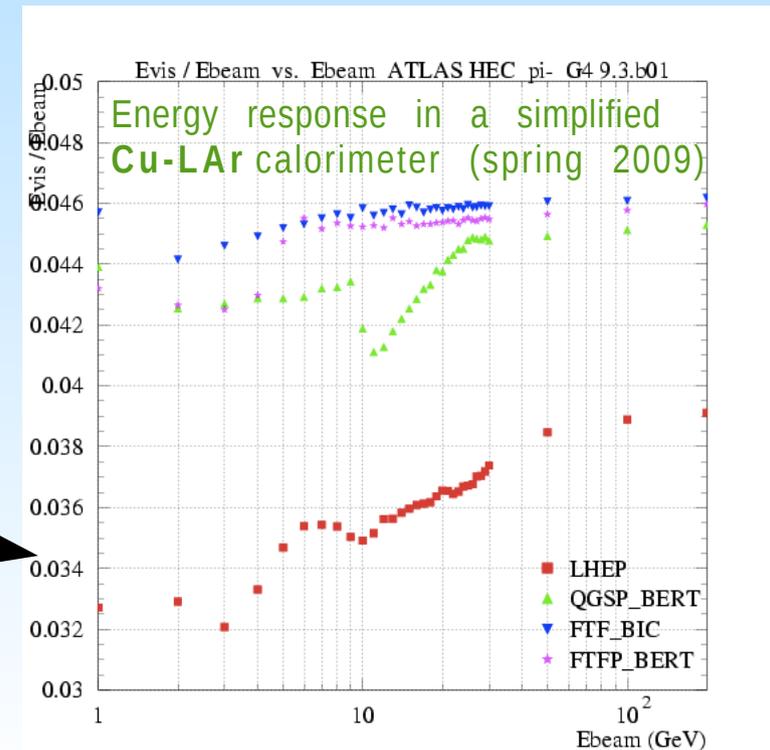
Spectre SUSY dans 5-20 ans ???

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

# La linéarité $E \propto N$

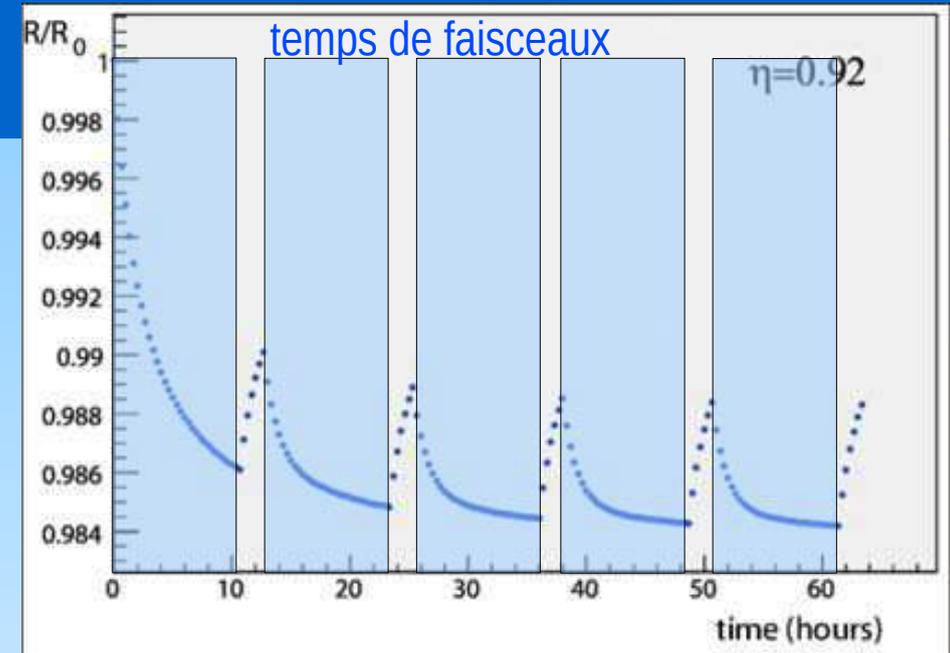


- En général OK pour EM
- Plus difficile pour l'Hadronique
  - ▶ facteur  $e/h = f(f_{\pi 0}) = f(E)$
  - ▶ Leakage
    - ◆ Correction par les Monte-Carlo
      - Validités des modèles MC ?
    - ◆ Calibration par des tests
      - Pas des jets...



# 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  $\mu$  du faisceau
  - ▶ Par les processus physiques
    - ◆ Balance en E
    - ◆  $Z \rightarrow ee, \mu\mu, \tau\tau$



Réponse des cristaux de PbWO4 à la radiation

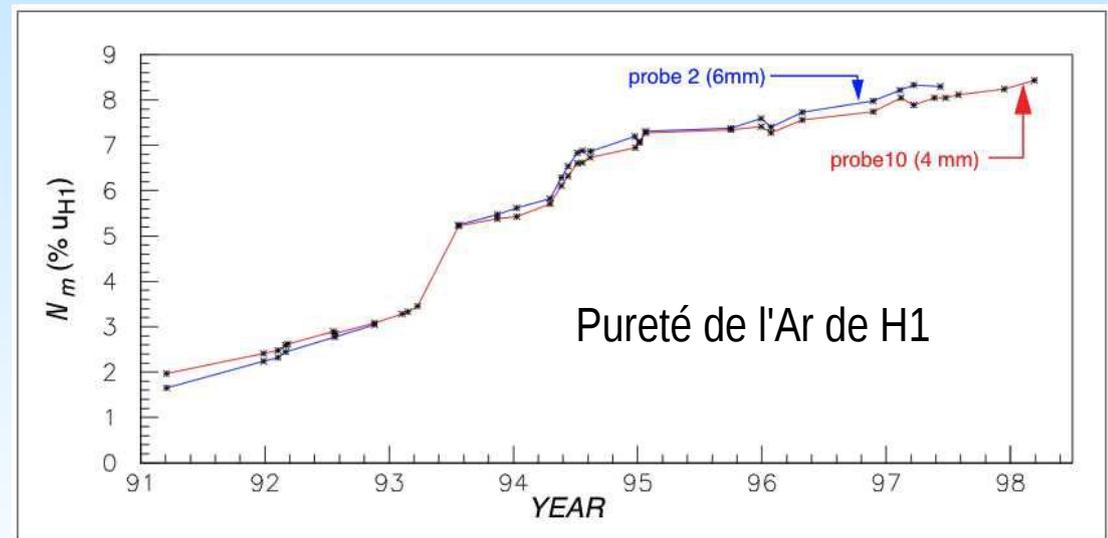
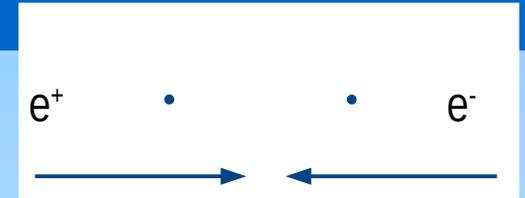
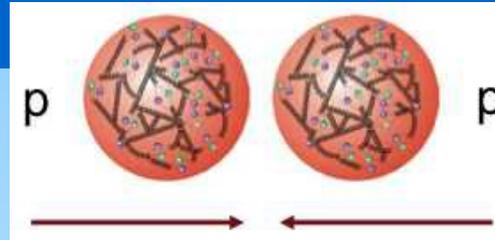


Figure 13: Impurity concentration increase in H1 from 91 to 98 seen by 4 and 6 mm probes.

# Lecture des données



## ■ Acquisition

### ▶ Déclenchement

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

### ▶ Sans trigger

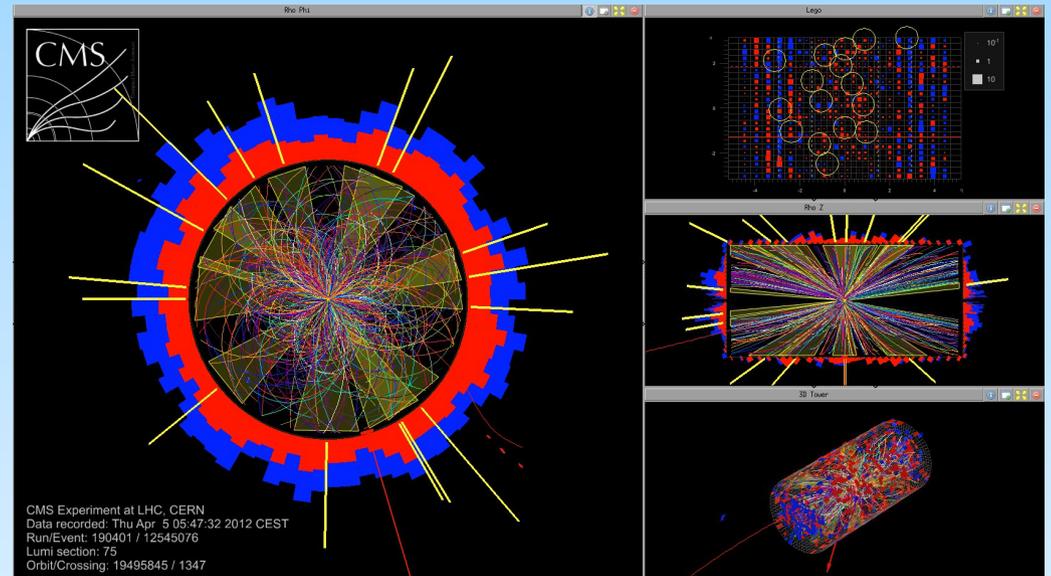
## ■ Taux d'occupation

### ▶ Physique

### ▶ Technologie machine

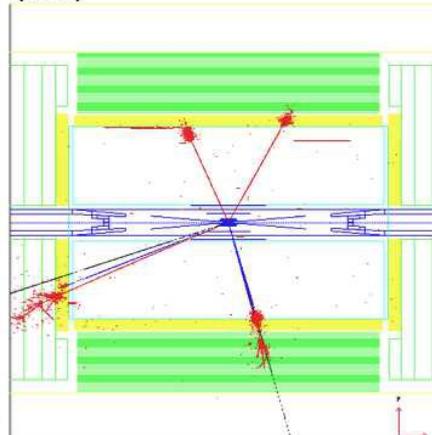
- ◆ LHC : pp @ 25 ns
- ◆ ILC : ee @ 400 ns & 5Hz
- ◆ CLIC : ee @ 2.5 ns & 50 Hz...

## ■ Temps de lecture...

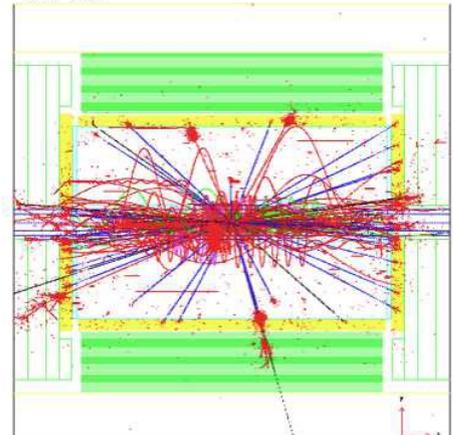


HZ →  $\tau\tau ee$  event

Without soft hadronic events overlaid (=ILC)



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



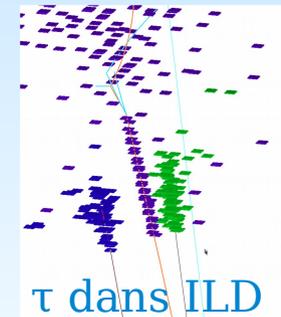
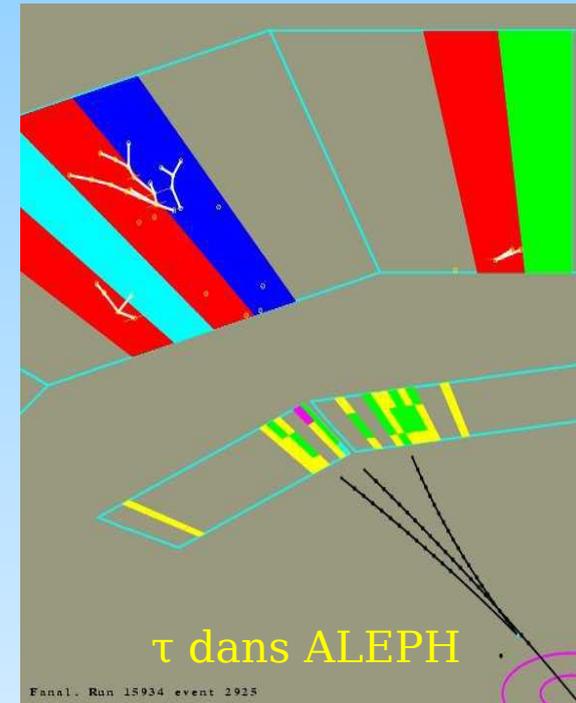
# Autres éléments critiques

- En position
  - ▶ Liens traces  $\leftrightarrow$  dépôts calorimétrique
    - ◆  $\triangle$  Energy Flow & Particle Flow
- Angulaire
  - ▶  $\gamma$  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

- $\gamma \rightarrow \mu\mu, \pi\pi$
- $\pi^+ + n \rightarrow \pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma) + p$

- ▶  $\gamma$  simple vs  $\pi^0$

- ◆ 2 gerbes EM très proches...

- ▶  $\mu$  vs  $\pi$  / hadrons

- ▶ Jets vs  $\tau$

## Particle ID with a very simple Preshower Detector

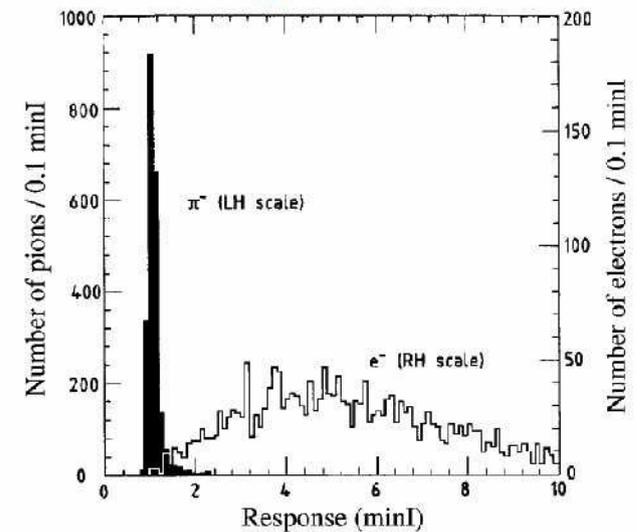


FIG. 7.35. Signal distributions for 75 GeV pions and electrons in a preshower detector used in beam tests of CDF calorimeters.

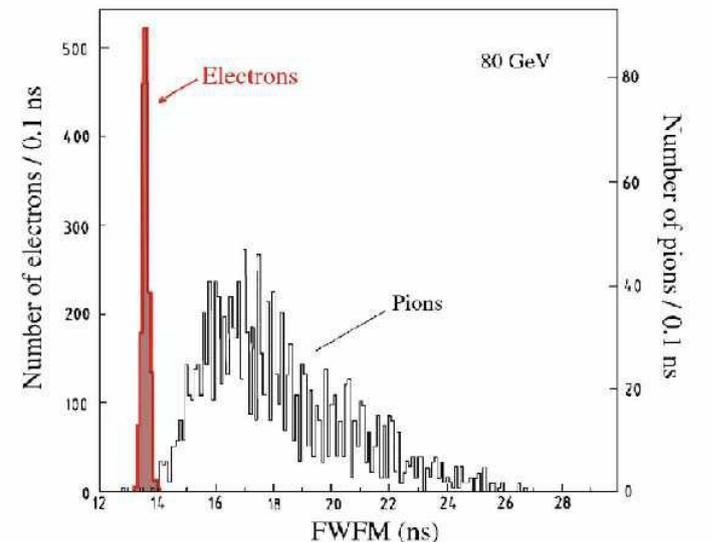


FIG. 7.33. The distribution of the full width at one-fifth maximum (FWFM) for 80 GeV electron and pion signals in SPACAL [Aco 91a].