

La calorimétrie

La calorimétrie

- ◆ Pourquoi un calorimètre?
- ◆ Les propriétés importantes des calorimètres
- ◆ Le développement des gerbes
 - ◆ gerbes électromagnétiques
 - ◆ Interlude: les muons
 - ◆ gerbes hadroniques

Interactions avec
la matière

- ◆ Les paramètres essentiels
 - ◆ mesure de l'énergie: principe de base
 - ◆ résolution
 - ◆ linéarité
 - ◆ position
- ◆ Les techniques expérimentales
 - ◆ calorimètres homogènes
 - ◆ principe
 - ◆ exemples
 - ◆ calorimètres à échantillonnage
 - ◆ principe
 - ◆ exemples
- ◆ Les calorimètres à l'IN2P3
- ◆ Les systèmes de lecture
- ◆ Le déclenchement

Organisation des trois cours de calorimétrie

- ◆ Jeudi 14 juin
 - ◆ La calorimétrie: pourquoi?
 - ◆ Développements des gerbes
 - ◆ Électromagnétiques
 - ◆ Hadroniques

- ◆ Vendredi 15 juin
 - ◆ Principes des mesures
 - ◆ Comment fonctionne un calorimètre

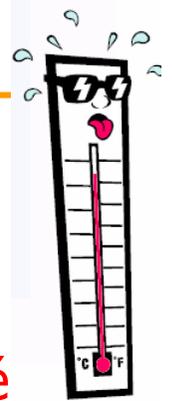
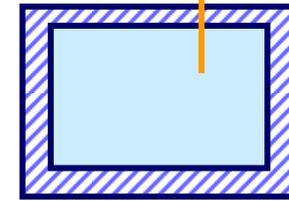
- ◆ Lundi 18 juin
 - ◆ Exemples
 - ◆ Entre conception et mise en œuvre
 - ◆ Les idées actuelles pour le futur

Références – Crédits

- ◆ R. Wigmans *Calorimetry, Energy Measurements in Particle Physics*
– Beaucoup de figures viennent de ce livre + de trois cours donnés à Pise.
- ◆ Beaucoup d'idées viennent de cours de collègues:
 - ◆ C. Roda *Calorimetry at LHC – Italo-Hellenic School of Physics (juin 2005)*
 - ◆ F. Gianotti *Issues in calorimetry – NATO school, Virgin Islands (juin 2000)*
 - ◆ Yves Zolnierowski *Mesures d'énergie avec un calorimètre – Cette école en 2003*
- ◆ Proceedings des conférences *Calorimetry in Particle Physics*
 - ◆ 1991 – Jim Virdee
 - ◆ 2000 – Guillaume Unal
 - ◆ 2004 – J. Fay, L. Serin, C. de la Taille, R. Wigmans
 - ◆ 2006 – nombreuses présentations

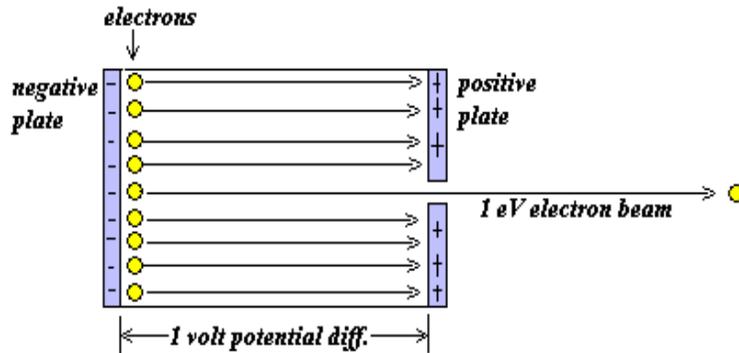
Qu'est qu'un calorimètre?

- ◆ Le concept de calorimètre vient de la thermodynamique:
Une boîte hermétique thermiquement, contenant une substance dont on veut mesurer la température
- ◆ Echelle de température:
1 calorie (4.185J) est l'énergie nécessaire pour élever d'un degré un gramme d'eau à 15°C
- ◆ En physique des particules nous mesurons des GeV (0.1→1000)
1 GeV = 10^9 eV $\approx 10^9 * 10^{-19}$ J = 10^{-10} J = $2.4 * 10^{-9}$ cal
1 TeV = 1000 GeV : énergie cinétique d'un moustique en vol



La sensibilité nécessaire pour nos calorimètres
est ~ mille millions de fois plus grande
que pour mesurer l'augmentation de température de 1 degré d'1 g d'eau

Equivalence entre énergie, impulsion et masse



- ◆ 1 eV est l'énergie cinétique acquise par un électron dans un champ électrique de 1V:

- ◆ $1 \text{ eV} \leftrightarrow 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

1keV=10³ eV
 1MeV=10⁶ eV
 1GeV=10⁹ eV
 1TeV=10¹² eV

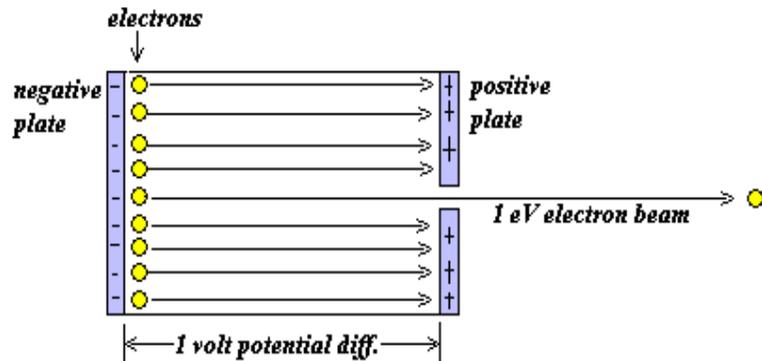
$$E^2 = p^2 + m^2$$

$$\beta = p/E$$

$$\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{-1/2}$$

- ◆ $E = mc^2$
 - ◆ E l'énergie (Joule)
 - ◆ m la masse (des kg)
 - ◆ c la vitesse de la lumière ($c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$)
- ◆ L'énergie a la dimension de $[\text{masse}].[\text{longueur}]^2.[\text{temps}]^{-2}$
- ◆ $E = pc$
 - ◆ p est l'impulsion en kg.m.s^{-1}
- ◆ Si E en eV (or keV, MeV,...)
 - ◆ p en eV/c
 - ◆ m en eV/c²

Equivalence entre énergie, impulsion et masse



- ◆ 1 eV est l'énergie cinétique acquise par un électron dans un champ électrique de 1V:

- ◆ $1 \text{ eV} \leftrightarrow 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

- ◆ $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
- ◆ $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$
- ◆ $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
- ◆ $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

- ◆ $E = mc^2$

- ◆ E l'énergie (Joule)
- ◆ m la masse (des kg)
- ◆ c la vitesse de la lumière ($c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$)

- ◆ L'énergie a la dimension de

- ◆ $[\text{masse}] \cdot [\text{longueur}]^2 \cdot [\text{temp s}]^{-2}$

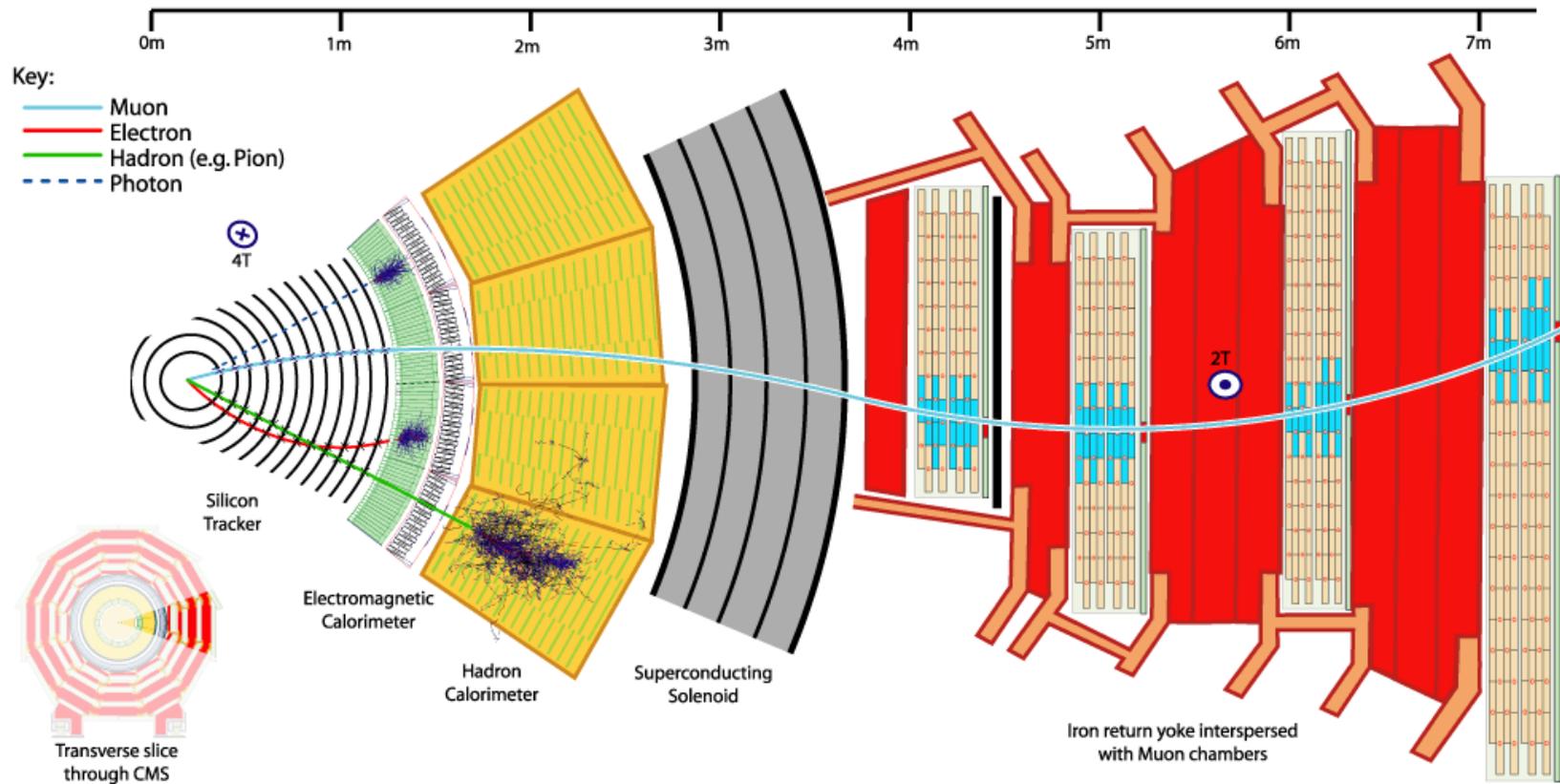
- ◆ $E = pc$

- ◆ p est l'impulsion en kg.m.s^{-1}

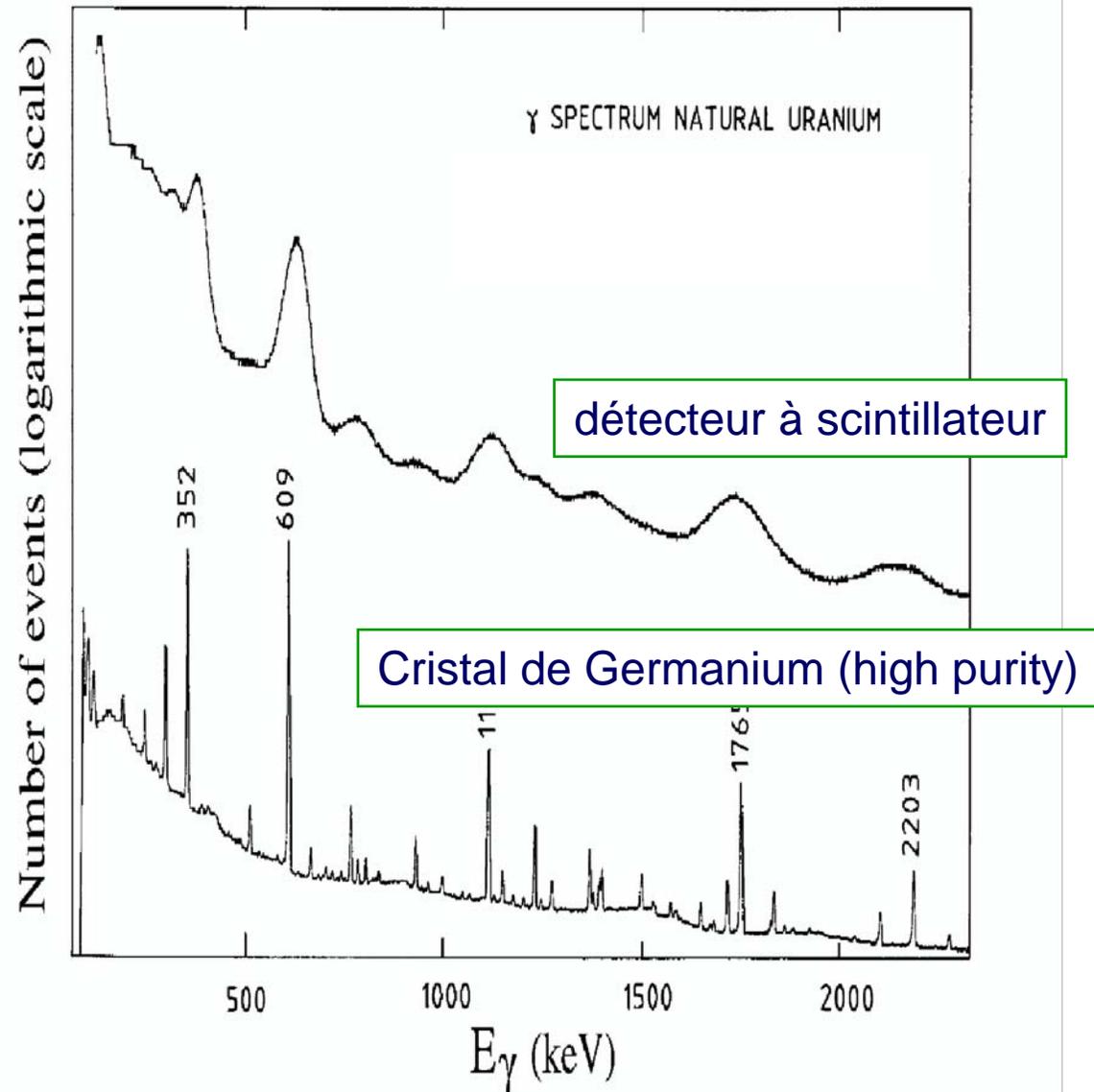
- ◆ Si E en eV (or keV, MeV,..)

- ◆ p en eV/c
- ◆ m en eV/c^2

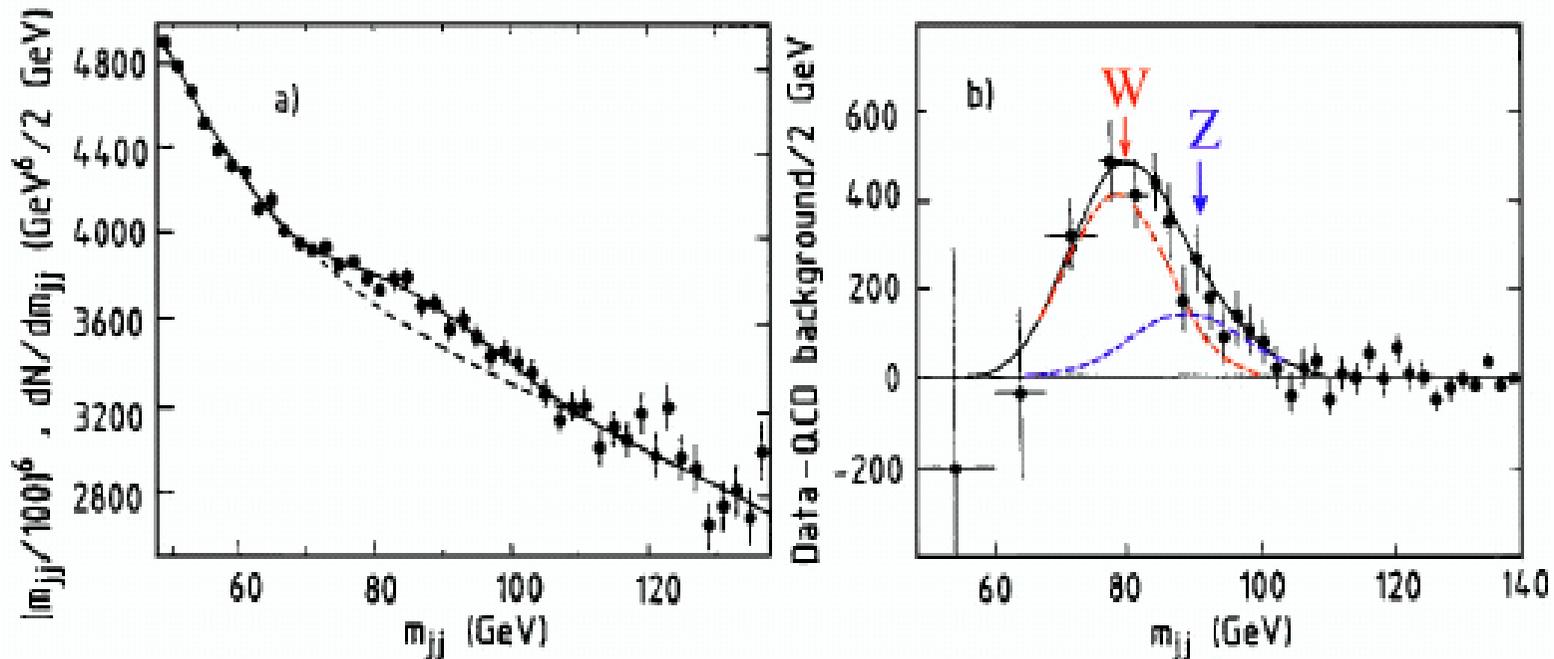
Structure générale d'un détecteur en Physique des Particules



Propriétés importantes: Résolution en énergie



Propriétés importantes: Résolution en énergie

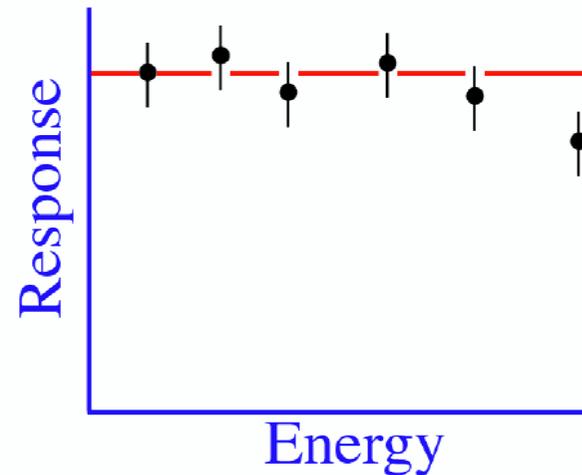
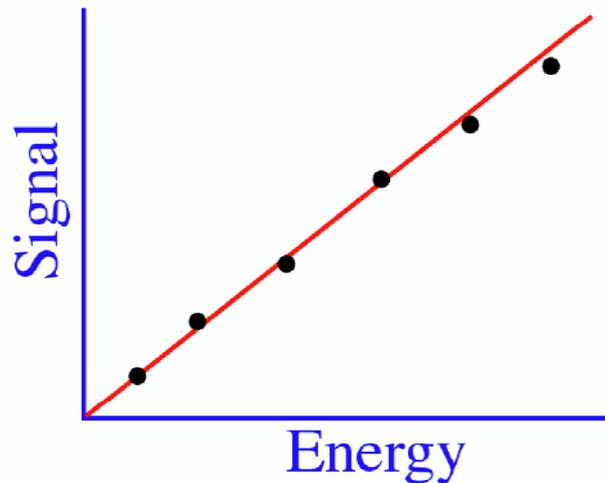


Reconstruction de la masse des W & Z⁰ dans UA2
(années 80-90)

Propriétés importantes: la linéarité

Réponse: signal moyen par unité d'énergie déposée
e.g. # de photons électrons/GeV, pC/MeV,

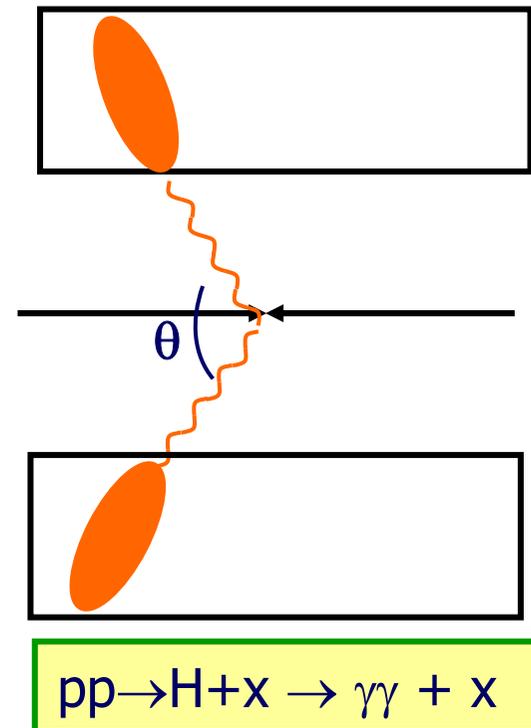
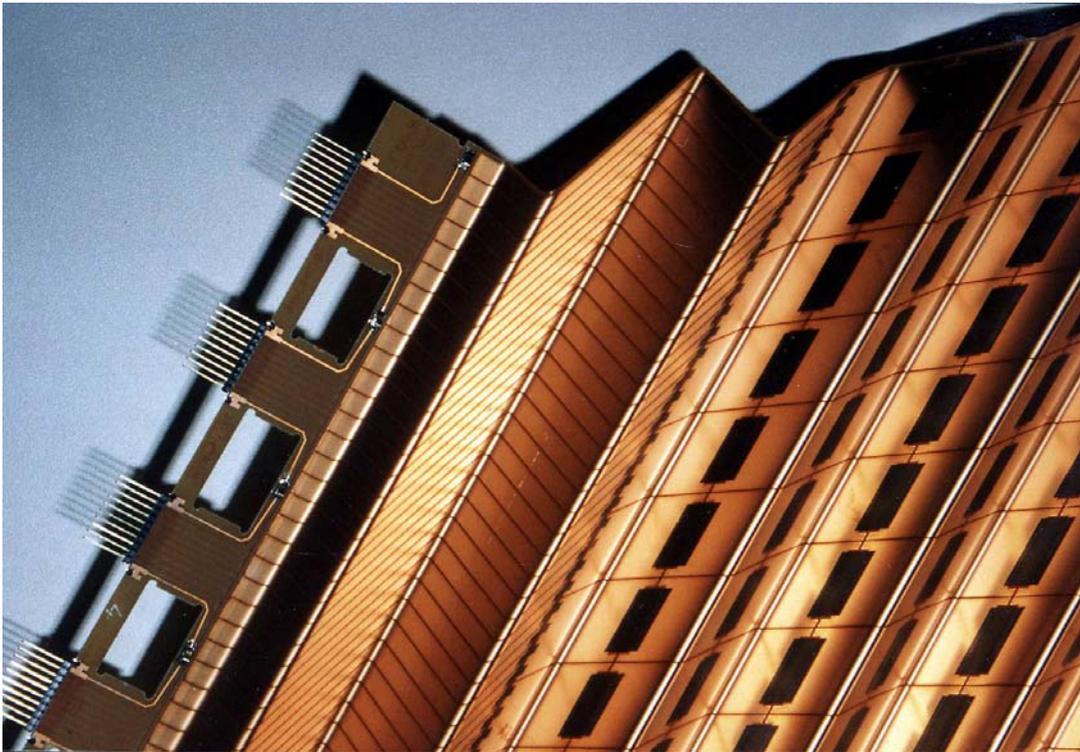
→ un calorimètre **linéaire** a une réponse constante



Les calorimètres **électromagnétiques** sont en général linéaires.
Toute les énergies sont déposées par ionisation/excitation de l'absorbeur

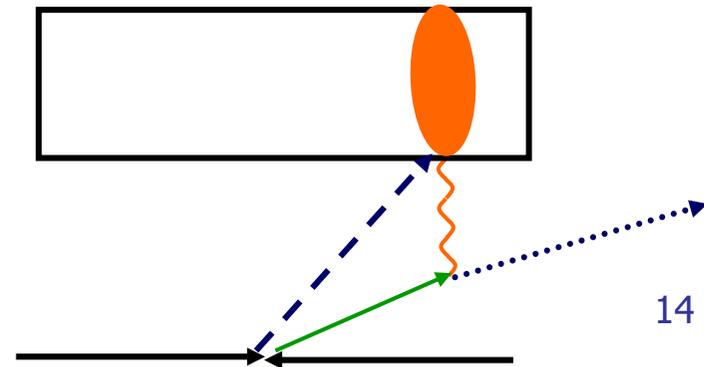
Propriétés importantes: Résolution en position

- ◆ Recherche du boson de Higgs dans ATLAS
 - ◆ si $M_H \sim 120$ GeV il sera cherché dans son mode de désintégration en deux photons: $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - ◆ $\sigma(M_H) / M_H = \frac{1}{2} [\sigma(E_{\gamma_1})/E_{\gamma_1} \oplus \sigma(E_{\gamma_2})/E_{\gamma_2} \oplus \cot(\theta/2) \sigma(\theta)]$



Propriétés importantes: Résolution en temps

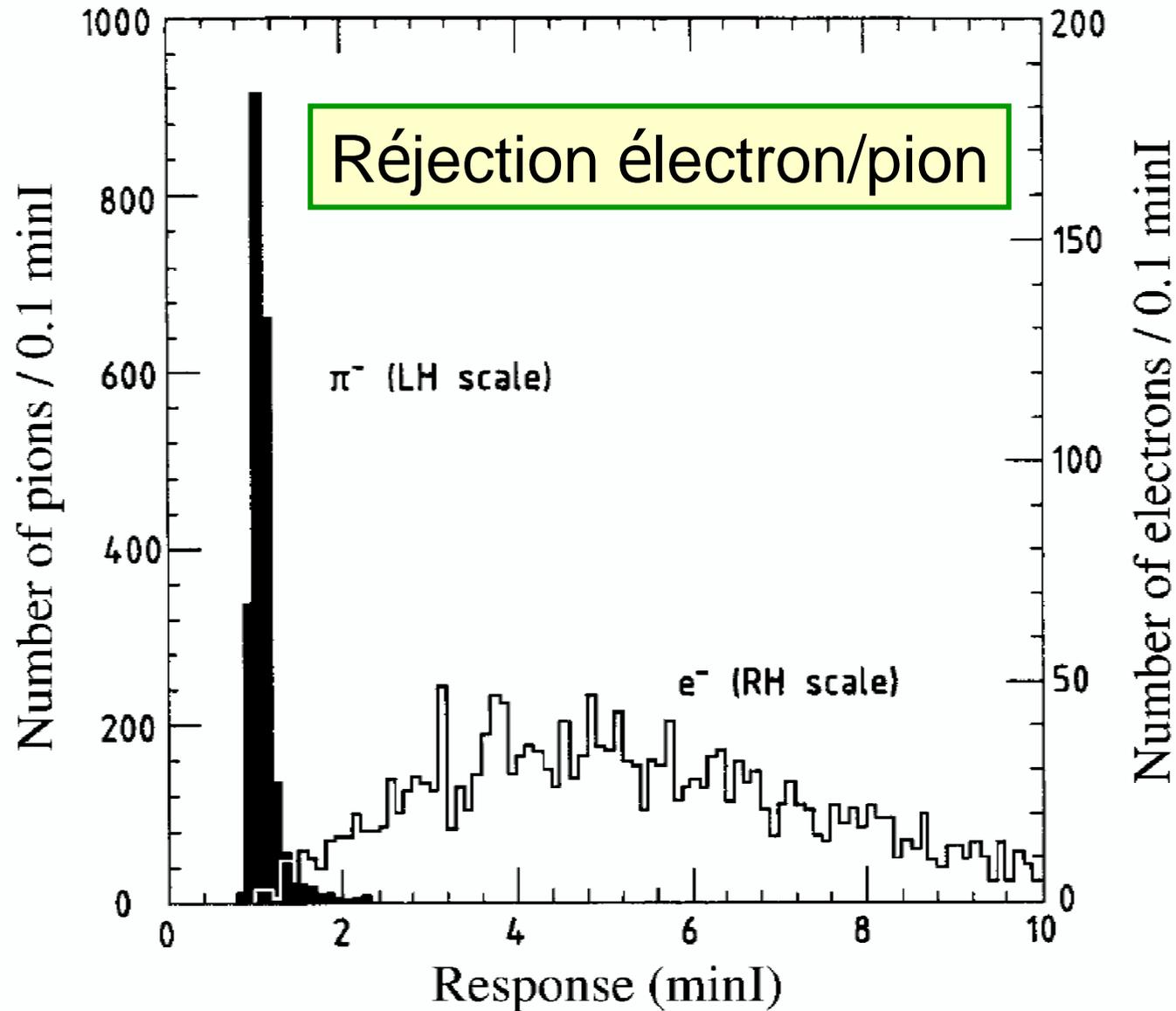
- ◆ Les collisions proton-proton au LHC ont une fréquence de 25ns
- ◆ Plusieurs interactions (~ 20) se superposent à chaque croisement de faisceaux (haute densité de protons dans les paquets pour obtenir une haute luminosité)
- ◆ Certains modèles théoriques prédisent l'existence de particules avec un long temps de vie
- ◆ La mesure du temps
 - ◆ permet de valider le synchronisme des sous détecteurs
 - ◆ d'identifier des événements avec des particules qui se désintègrent loin du vertex



Propriétés importantes: Identification des particules

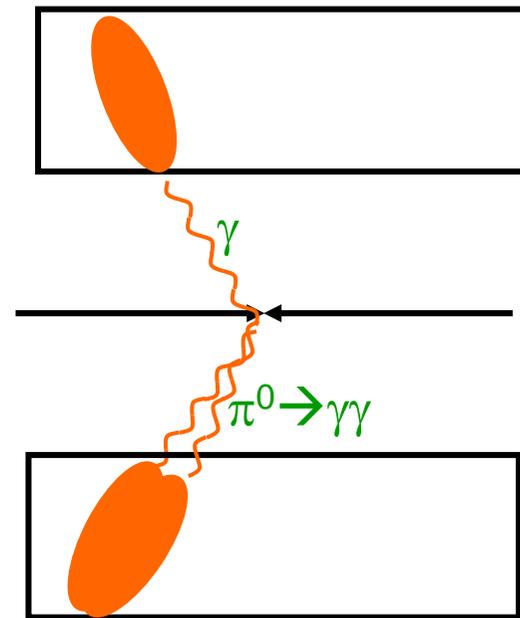
- ◇ Pour mettre en évidence de nouveaux effets et de nouvelles particules, il faut réussir à **séparer** le **signal** du **bruit de fond**.
- ◇ Pour cela, il faut être capable de séparer la nature des particules:
 - ◇ électrons, photons
 - ◇ muons
 - ◇ pions, protons, kaons,....
- ◇ On utilise:
 - ◇ La forme de la gerbe (segmentation **latérale** et **longitudinale**)
 - ◇ L'association d'une trace chargée avec un dépôt d'énergie
 - ◇ Le temps d'arrivée du signal

Propriétés importantes: Identification des particules



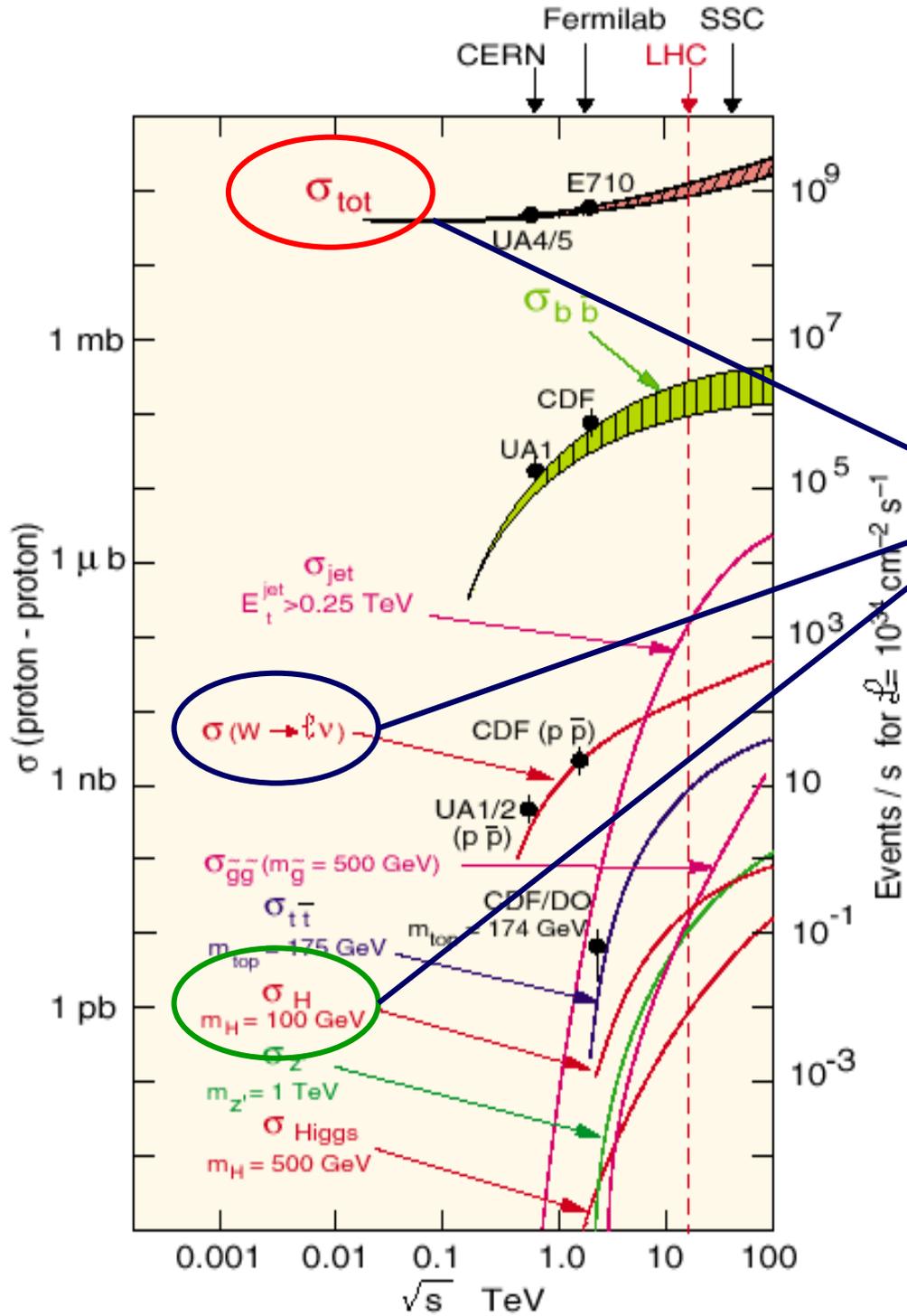
Propriétés importantes: Identification des particules

- ◆ Recherche du boson de Higgs dans ATLAS
 - ◆ si $M_H \sim 120$ GeV il sera cherché dans son mode de désintégration en deux photons: $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - ◆ **Bruit de fond:** π^0 qui ressemble à un photon



$pp \rightarrow \gamma\text{-jet} \rightarrow \gamma + \pi^0 + X$

Propriétés importantes: le déclenchement



Il faut être capable de sélectionner les bons evts

Caractéristiques générales



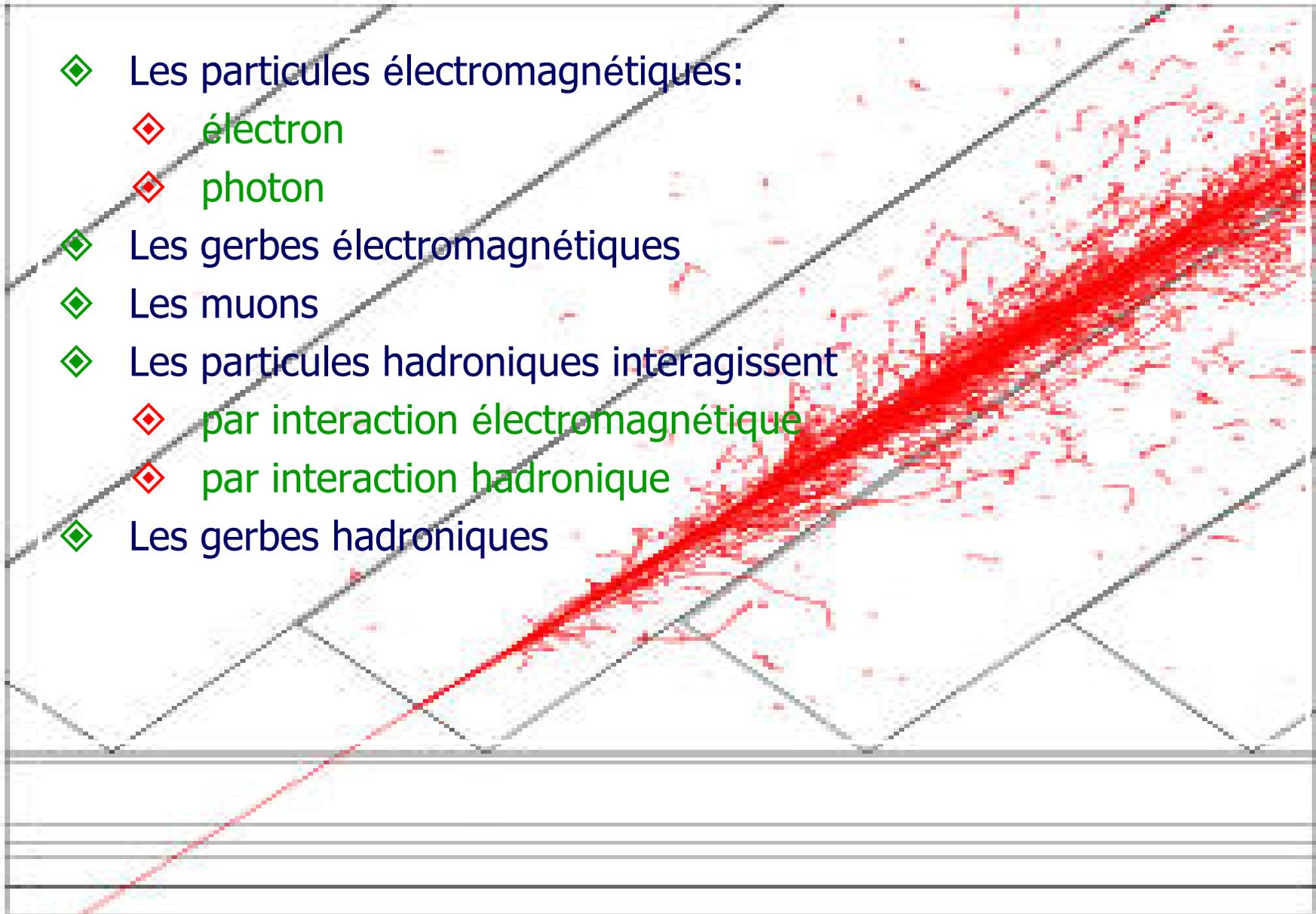
Les calorimètres ont les propriétés suivantes:

- ◇ Sensibles aux particules **neutres** et **chargées**
- ◇ La **précision** sur la mesure de l'énergie **augmente avec l'énergie** (comportement opposé à celui de la mesure de l'impulsion par analyse magnétique)
- ◇ Mesure **sans champ** magnétique
- ◇ La réponse varie comme **$\ln(E)$** : compact (relatif!)
- ◇ Possibilité de **segmenter** pour mesurer la **position**
- ◇ Réponse rapide (\sim ns pour LHC)
- ◇ Capacité de déclenchement

Développement des gerbes

Le développement des gerbes

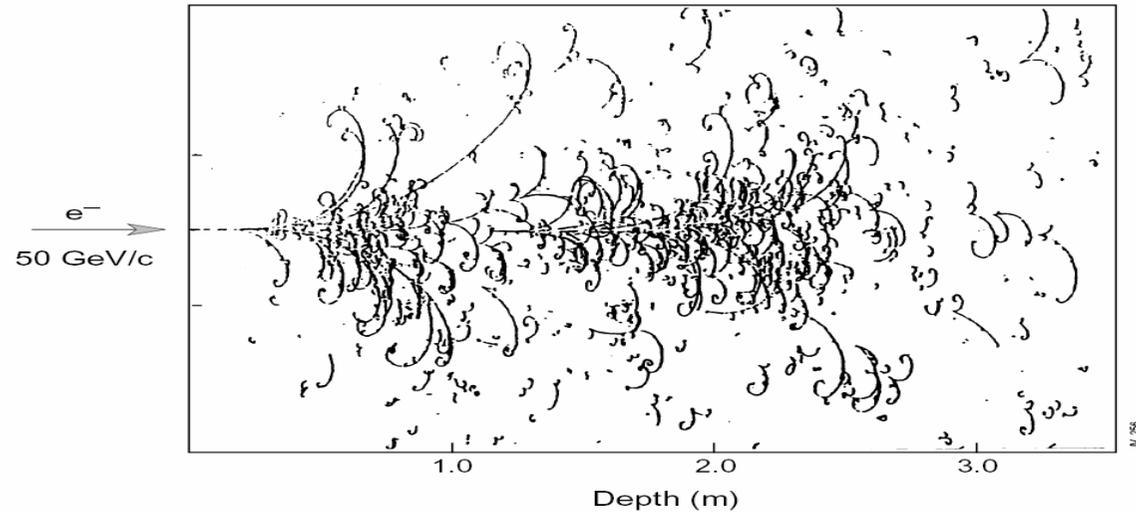
- ◆ Les particules électromagnétiques:
 - ◆ électron
 - ◆ photon
- ◆ Les gerbes électromagnétiques
- ◆ Les muons
- ◆ Les particules hadroniques interagissent
 - ◆ par interaction électromagnétique
 - ◆ par interaction hadronique
- ◆ Les gerbes hadroniques



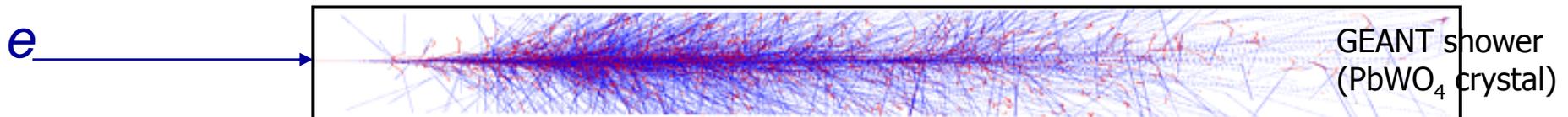
Glossaire

- ◇ em/EM: électromagnétique
- ◇ E: énergie
- ◇ p: impulsion
- ◇ m: masse
- ◇ X_0 : longueur de radiation
- ◇ λ : longueur d'interaction
- ◇ Z: numéro atomique des atomes (nbre d'électrons=nbre de protons)
- ◇ Bremsstrahlung = radiation = freinage
- ◇ Č = Čerenkov (émission de lumière)

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



Les gerbes électromagnétiques



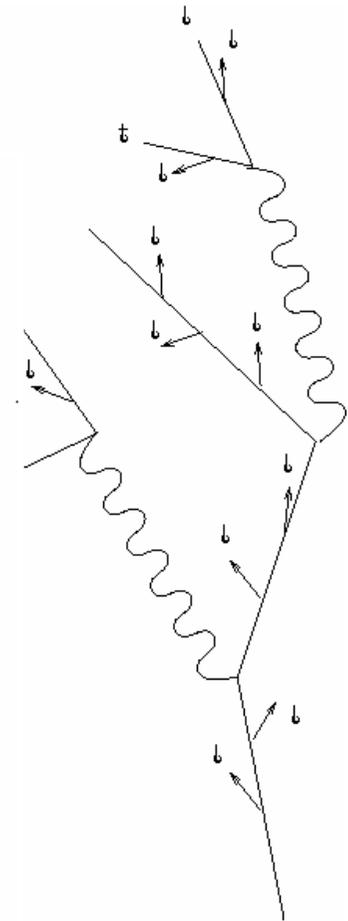
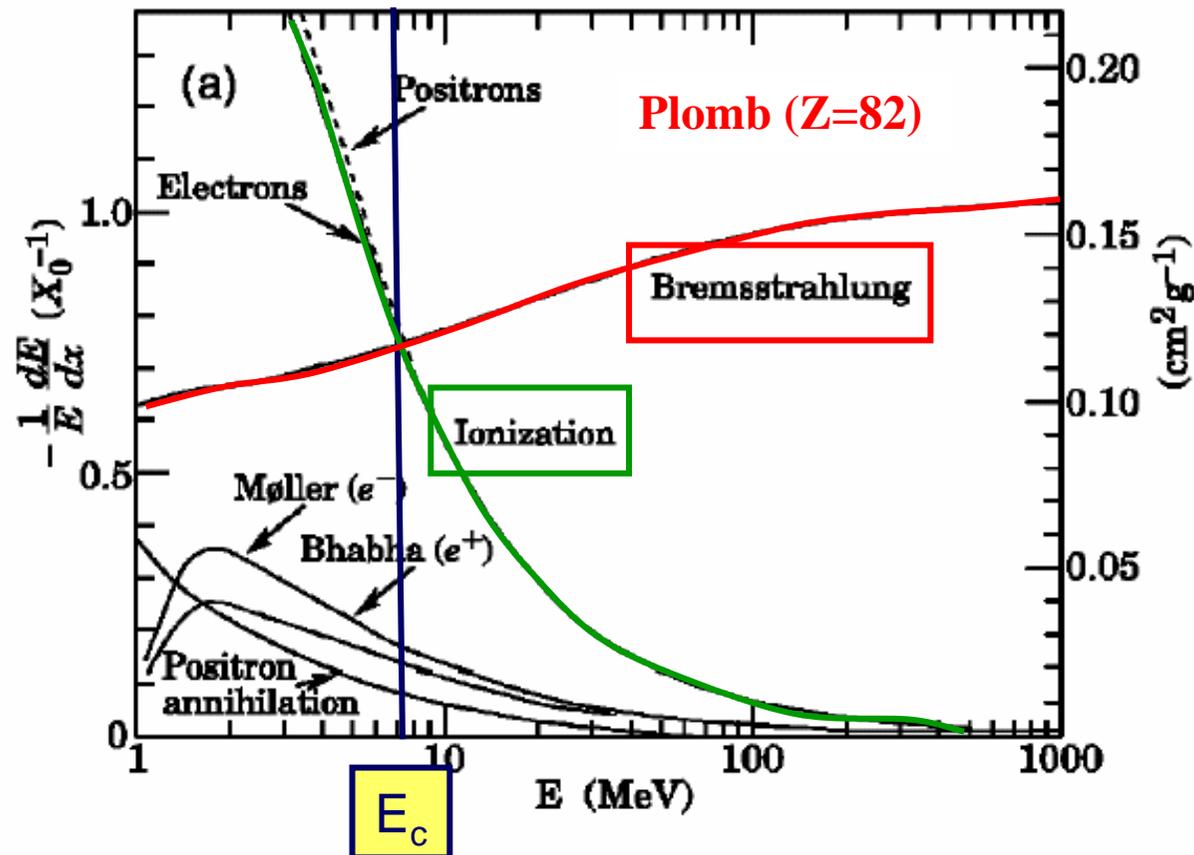
Quels processus entrent en jeu?

- ◆ Les gerbes électromagnétiques sont composées d'électrons et de photons.
 - ◆ les électrons interagissent en perdant de l'énergie (dE) en route (dx)
 - ◆ les photons (qui sont neutres) se transforment (section efficace) en produisant ou en déplaçant des électrons du cortège électronique des atomes
- ◆ On parle donc de
 - ◆ perte d'énergie dE/dx pour les électrons
 - ◆ section efficace $\sigma(E)$ pour les photons
- ◆ Nos calorimètres mesurent l'énergie de particules typiquement $E \sim \text{GeV}-\text{TeV}$; cependant, les processus élémentaires présents dans les gerbes mettent en jeu des énergies de l'ordre du keV ou du MeV.

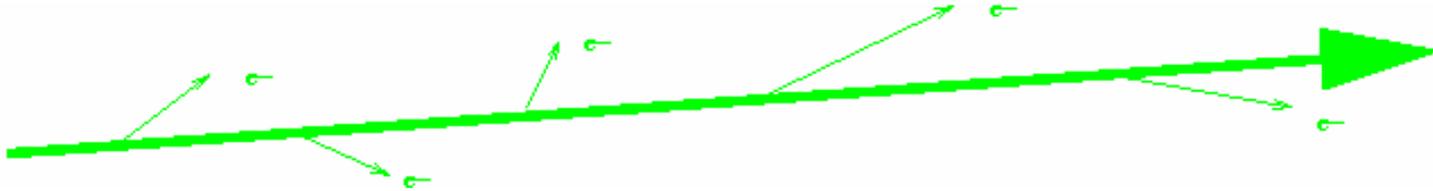
Quels processus entrent en jeu?

Electrons

- ◆ Les électrons perdent leur énergie principalement par **ionisation** et **rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)**
- ◆ L'importance de ces processus varie avec l'énergie



Electrons et Positons: ionisation



l'ionisation : interaction des particules chargées avec les électrons du cortège électronique de l'atome

Ce processus est dominant à *basse* énergie $E < E_c$ (E_c (Pb) = 7.4 MeV)

Toute **l'énergie** de la gerbe électromagnétique est ultimement perdue par **ionisation** (et aussi excitation du milieu)

(cf cours de Philippe Schwemling en 2006)

Processus détectable: ionisation

◆ Energie critique E_c

$$\left. \frac{dE}{dx} (E_c) \right|_{Brem} = \left. \frac{dE}{dx} (E_c) \right|_{ioniz} \Rightarrow E_c$$

Solide

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

Liquide

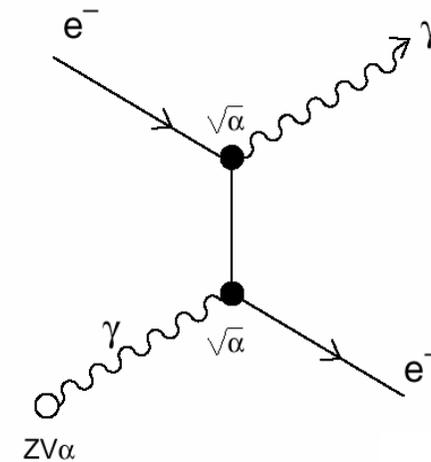
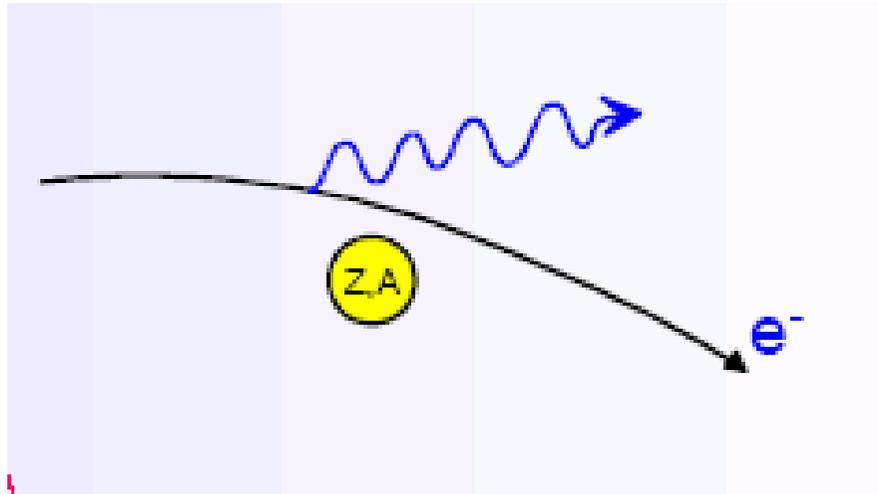
$$E_c = \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92}$$

Matériaux	Z	X_0 (cm)	E_c (MeV)
Argon liquide	18	14	37
Fe	26	1.8	22
Plomb	82	0.56	7.4
Plomb	92	0.32	6.2

◆ **Incidence:** Il y a plus de particules ionisantes dans un milieu dense (grand Z)

Electrons et positons: rayonnement de freinage

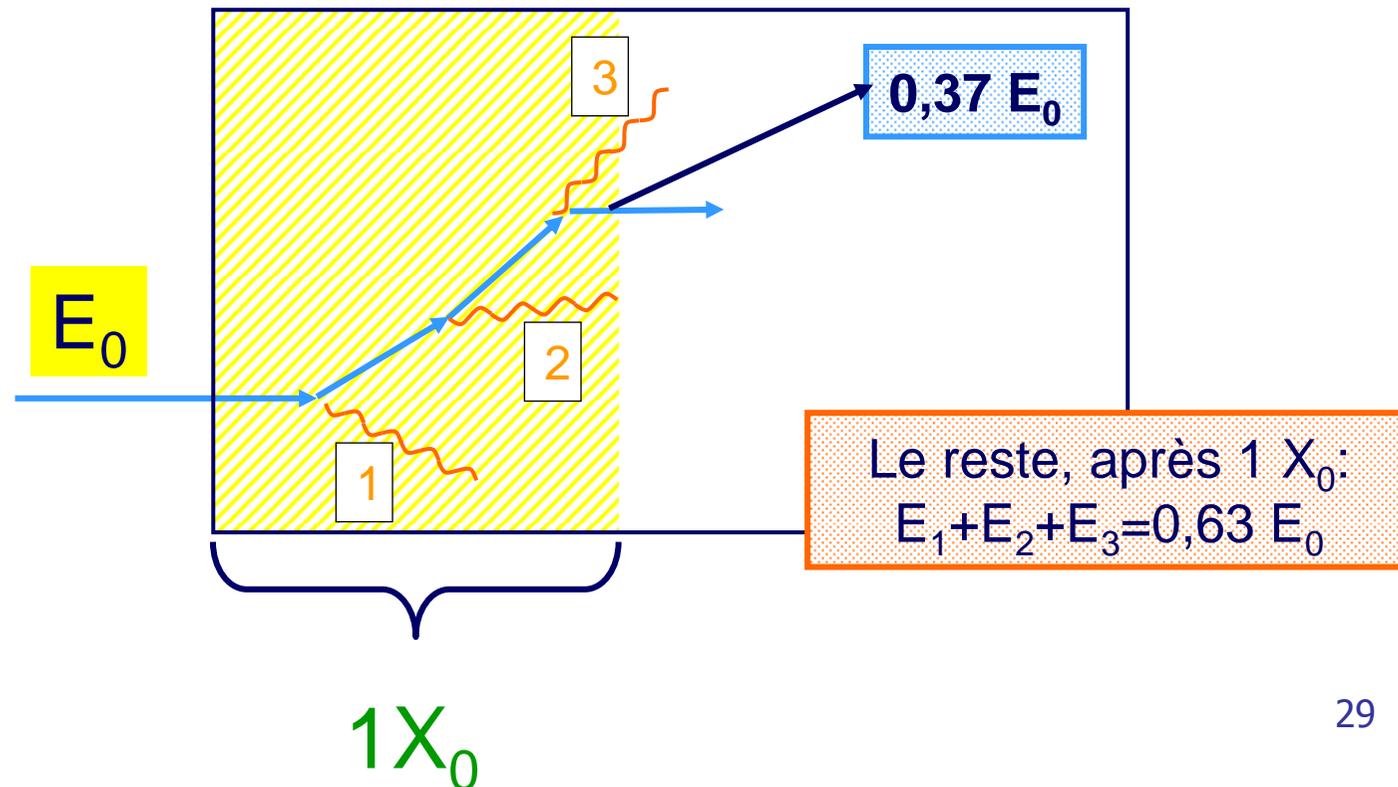
Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung): émission de photons réels dans le champ coulombien du noyau atomique



$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{Brem} = \frac{E}{X_0}$$

Longueur de radiation: X_0

Définition: La longueur de radiation X_0 est définie comme la distance pendant laquelle l'électron ou le positron perd, en moyenne, 63,2% de son énergie par radiation
($0,632=1-1/e$)



Longueur de radiation: X_0

◆ Cette variable est très utilisée en calorimétrie car elle permet de décrire le comportement des gerbes em de façon générique (\sim) pour tous les matériaux

◆ Les électrons de haute énergie perdent la même fraction de leur énergie dans **18cm d'eau** ($0.5X_0$) et dans **2.8mm** de plomb ($0.5X_0$)

	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	PbWO ₄
Z	-	-	13	18	26	82	-
X_0 (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.89

Longueur de radiation: X_0

◆ Approximation:

$$X_0 \approx \frac{(716 \text{ g cm}^{-2}) A}{Z(Z+1) \ln(287\sqrt{Z})}$$

◆ Perte d'énergie des e^\pm par radiation

$$\langle E(x) \rangle = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$$

◆ Absorption des γ par production de paires $e^+ e^-$

$$\langle I(x) \rangle = I_0 e^{-\frac{7}{9} \frac{x}{X_0}}$$

Même échelle d'énergie pour les e^\pm et les γ :

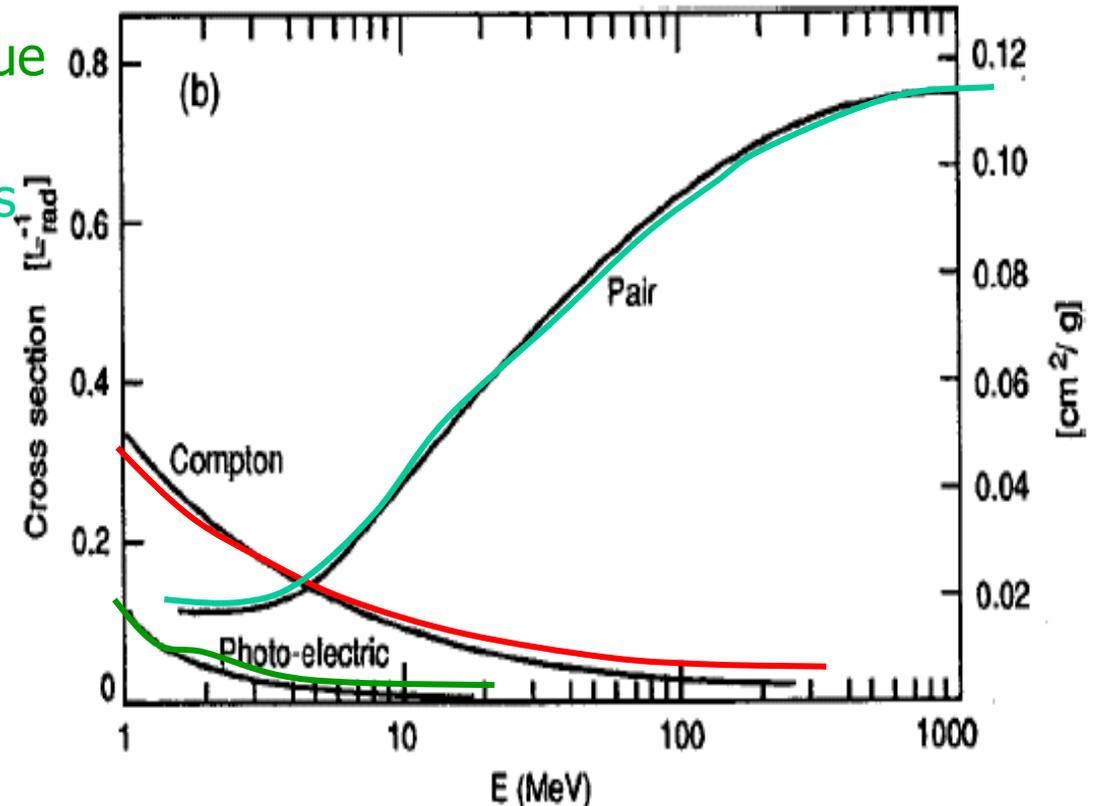
description universelle des gerbes em

Quels processus entrent en jeu?

Photons

- ◆ Les photons interagissent principalement selon trois processus élémentaires:

- ◆ Effet photo-électrique
- ◆ Compton
- ◆ Production de paires



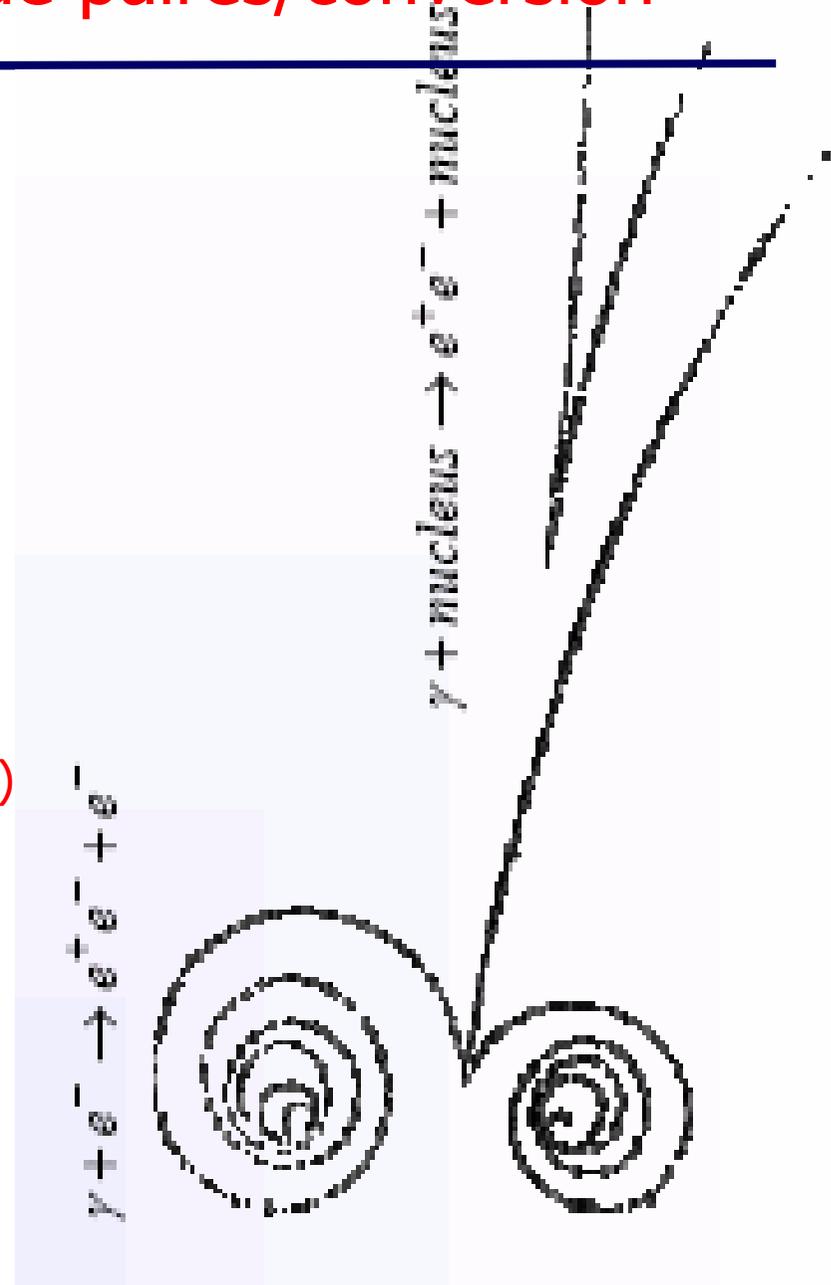
- ◆ Ces processus dépendent de l'énergie du photon

Photons: production de paires/conversion

- ◆ Interaction du photon avec le **champ électrique du noyau** ou les **électrons du cortège**
- ◆ Seuil: $E_\gamma \gg 2m_e$

$$\sigma_{conv} \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A X_0} = \frac{A}{N_A \lambda_{conv}}$$

- ◆ Longueur de conversion
 $\lambda_{conv} = 9/7 X_0$
- ◆ S.E. **indépendante de l'énergie** ($E_\gamma > 1\text{GeV}$)
- ◆ Après λ_{conv} , 1/e (63%) des photons ne sont pas convertis
- ◆ Pouvoir de pénétration des photons > celui des électrons (9/7)
- ◆ Paire émise dans la direction du photon:
 $\theta \sim m_e/E_\gamma$



Photons: effet photoélectrique

◆ Le photon arrache un électron de la couche atomique de l'atome:



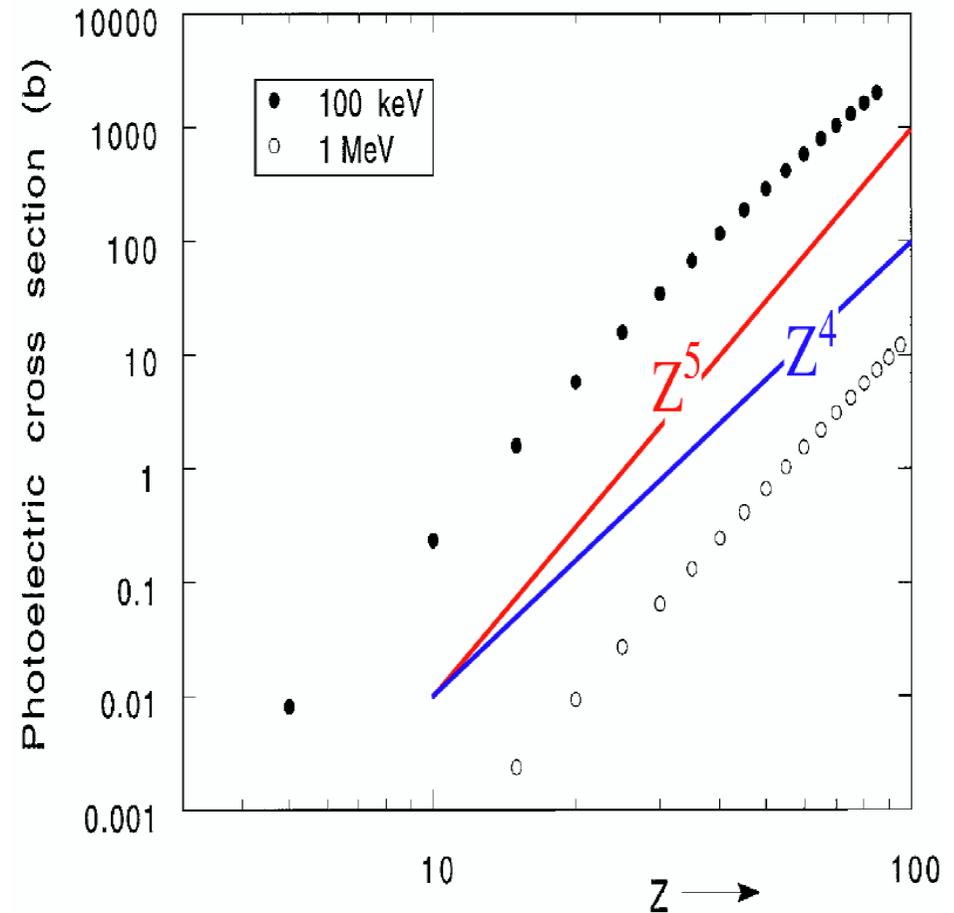
◆ L'atome émet ensuite un photon de désexcitation.

◆ La section efficace de ce processus dépend fortement du nombre d'électrons disponibles donc du Z

$$\sigma \propto \frac{Z^5}{E^3}$$

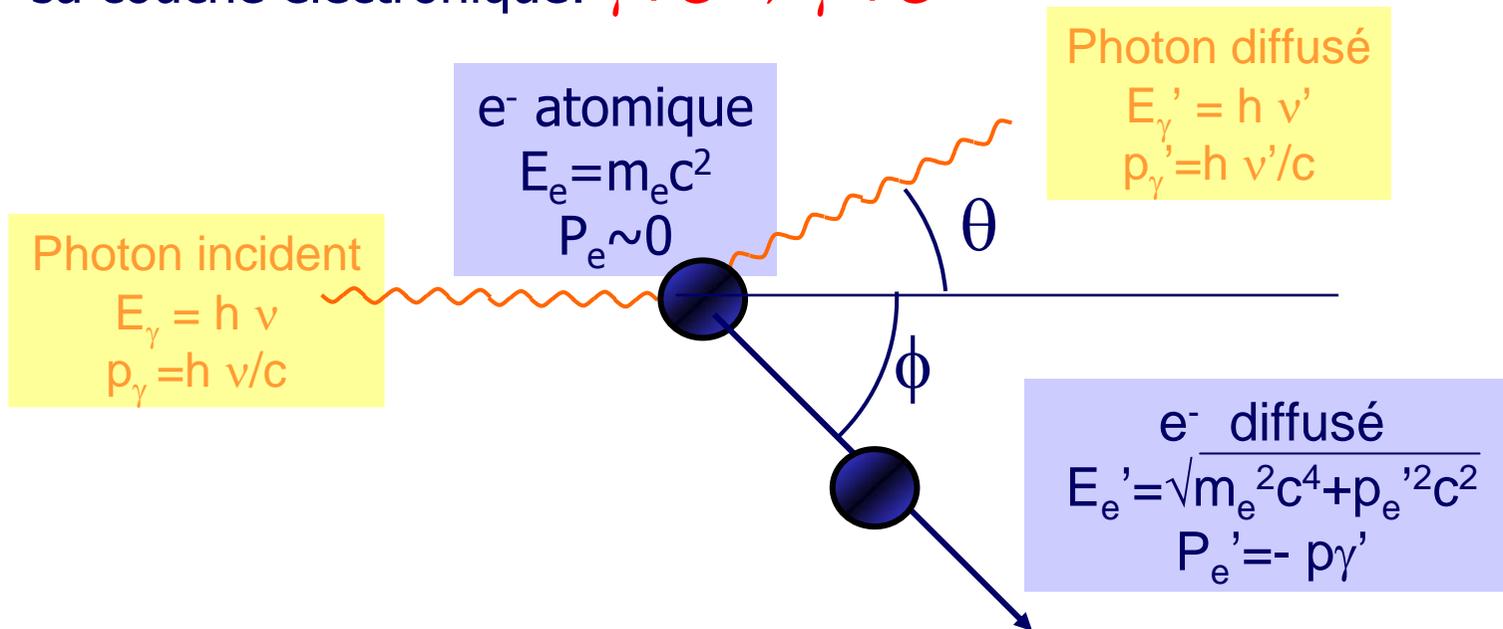
◆ Processus important à basse E

◆ Les e^- sont émis de façon isotrope



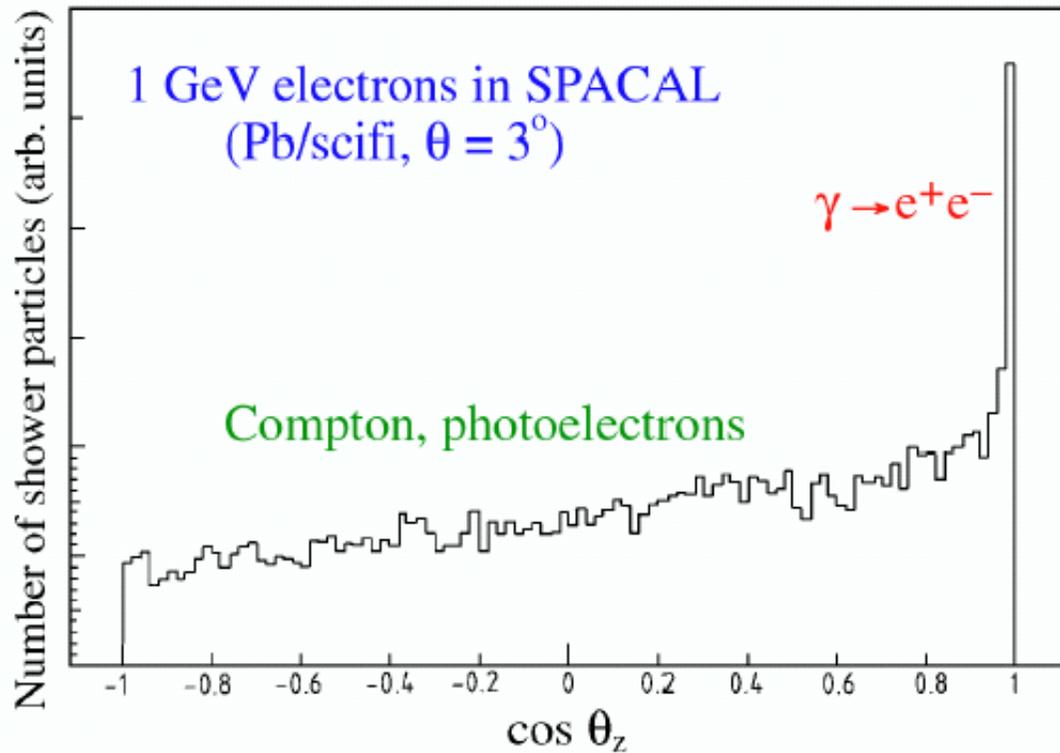
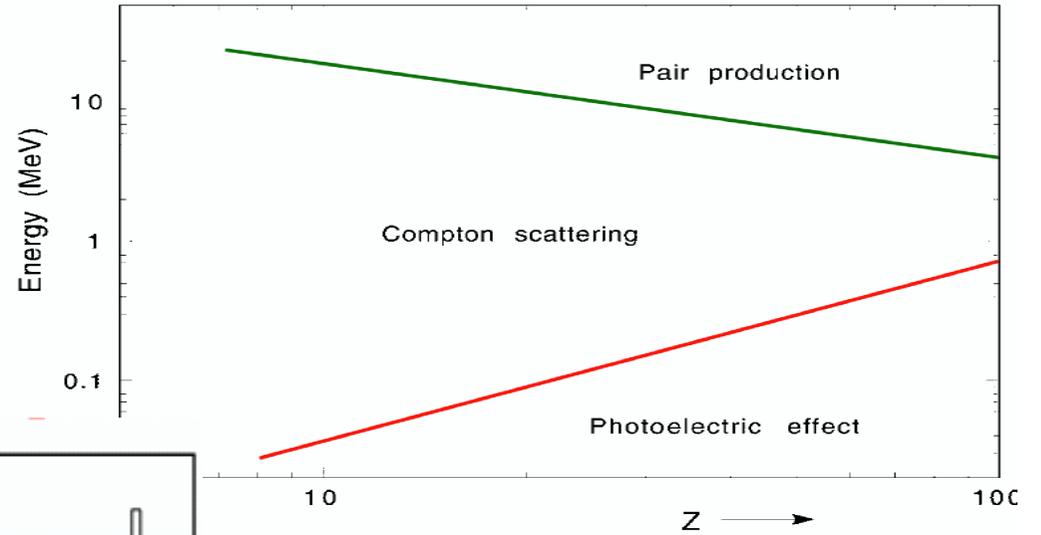
Photons: diffusion Compton

- Le photon est diffusé par un électron atomique; le photon transfère suffisamment d'impulsion et d'énergie à l'électron pour l'arracher de sa couche électronique: $\gamma + e^- \rightarrow \gamma' + e^-$



- La diffusion Compton est de loin le processus dominant pour les énergies de photons entre $\sim 100 \text{keV}$ et $\sim 5 \text{MeV}$.

Bilan: interactions des photons



Contributions to Photon Cross Section in Carbon and Lead

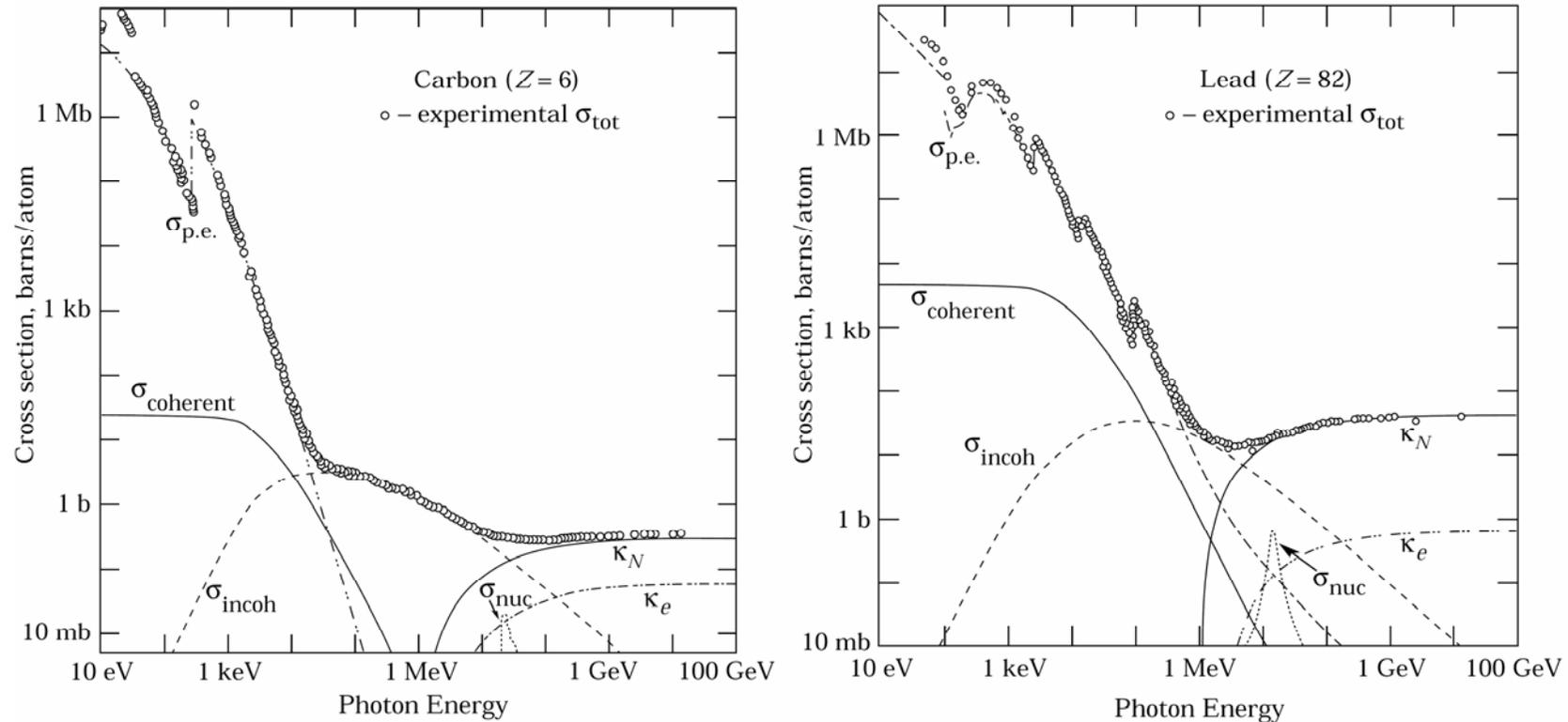


Figure 24.3: Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes:

- $\sigma_{\text{p.e.}}$ = Atomic photo-effect (electron ejection, photon absorption)
- σ_{coherent} = Coherent scattering (Rayleigh scattering—atom neither ionized nor excited)
- $\sigma_{\text{incoherent}}$ = Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)
- κ_n = Pair production, nuclear field
- κ_e = Pair production, electron field
- σ_{nuc} = Photonuclear absorption (nuclear absorption, usually followed by emission of a neutron or other particle)

From Hubbell, Gimm, and Øverbø, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **9**, 1023 (80). Data for these and other elements, compounds, and mixtures may be obtained from <http://physics.nist.gov/PhysRefData>. The photon total cross section is assumed approximately flat for at least two decades beyond the energy range shown. Figures courtesy J.H. Hubbell (NIST).

Bilan: électrons vs photon



Reminder: basic electromagnetic interactions

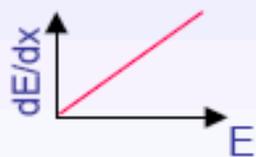
4. Calorimetry

e^+ / e^-

■ Ionisation



■ Bremsstrahlung



γ

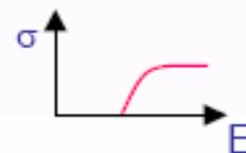
■ Photoelectric effect



■ Compton effect

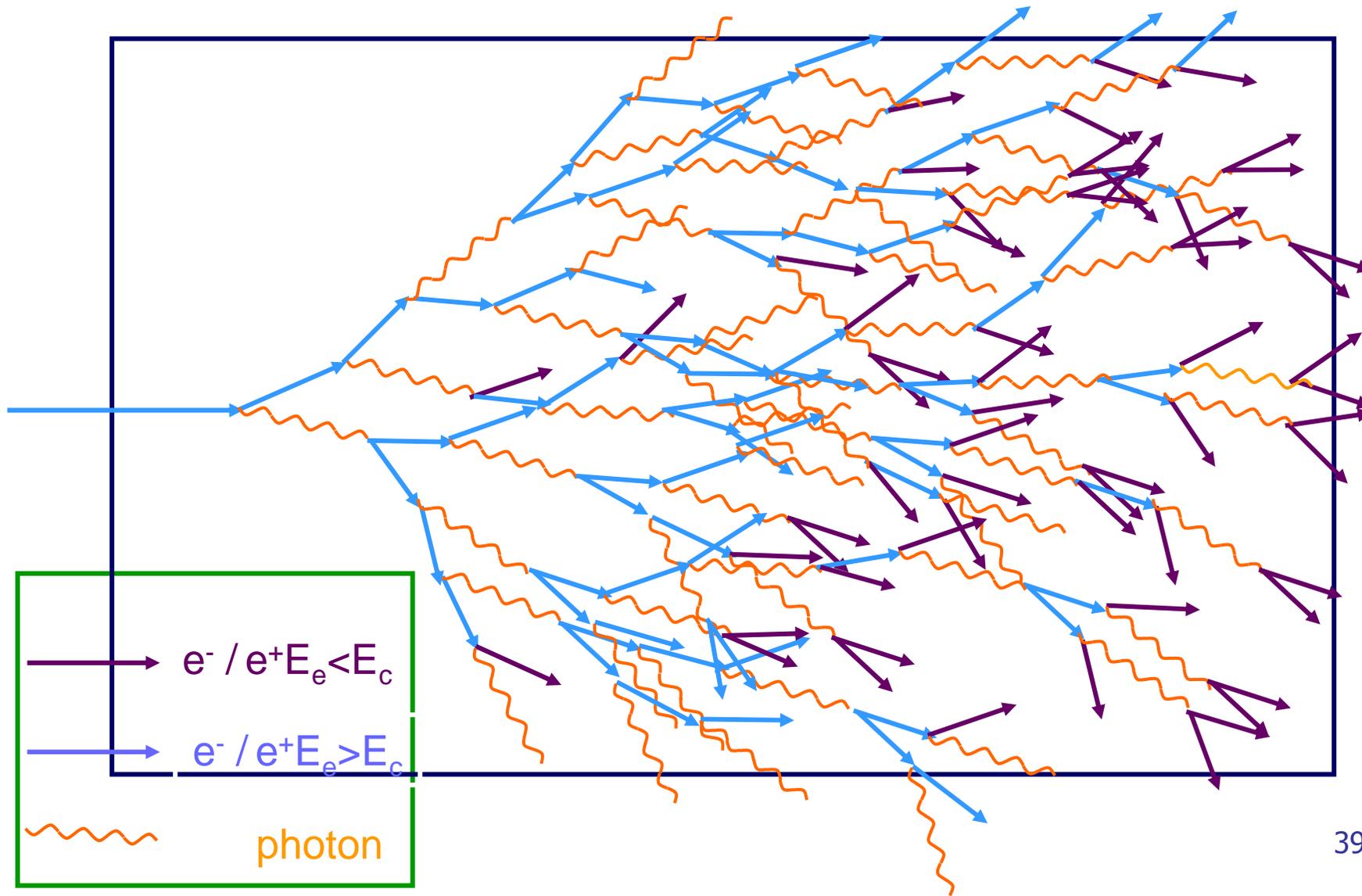


■ Pair production



CERN Academic Training Programme 2004/2005

Comment se forment les gerbes électromagnétiques?



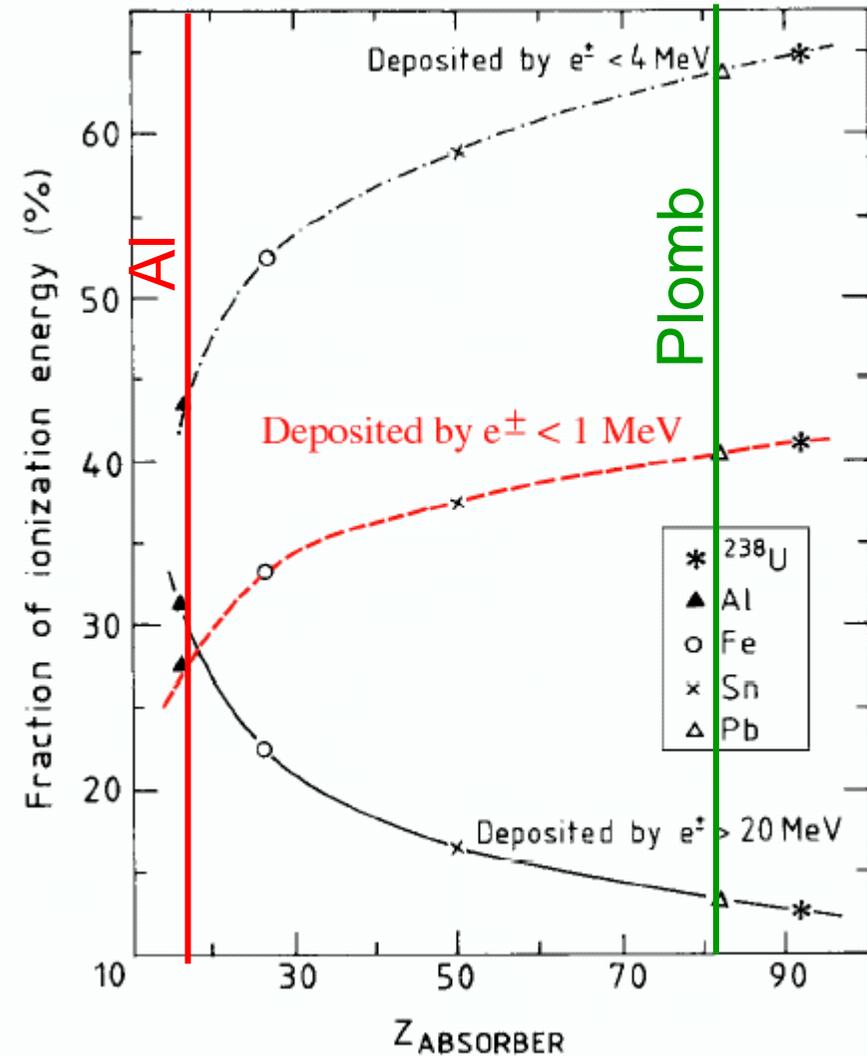
Résumé: formation des gerbes électromagnétiques

- ◆ La gerbe se forme par **transfert de l'énergie** de la particule incidente à une **multitudes des particules** (e^\pm et γ), par **cascade**.
- ◆ Le **nombre des particules** est **proportionnel** à l'énergie déposée par la particule incidente
- ◆ Le rôle du calorimètre est de **compter** ces particules
- ◆ Le poids relatif des différents processus décrits dépend de la nature du matériau (Z)
- ◆ La longueur de radiation permet de décrire les gerbes de façon universelle

La composition des gerbes électromagnétiques

◆ La contribution des particules de **basse énergie (MeV) domine:**

- ◆ 60% $E < 4$ MeV
- ◆ 15% $E > 20$ MeV

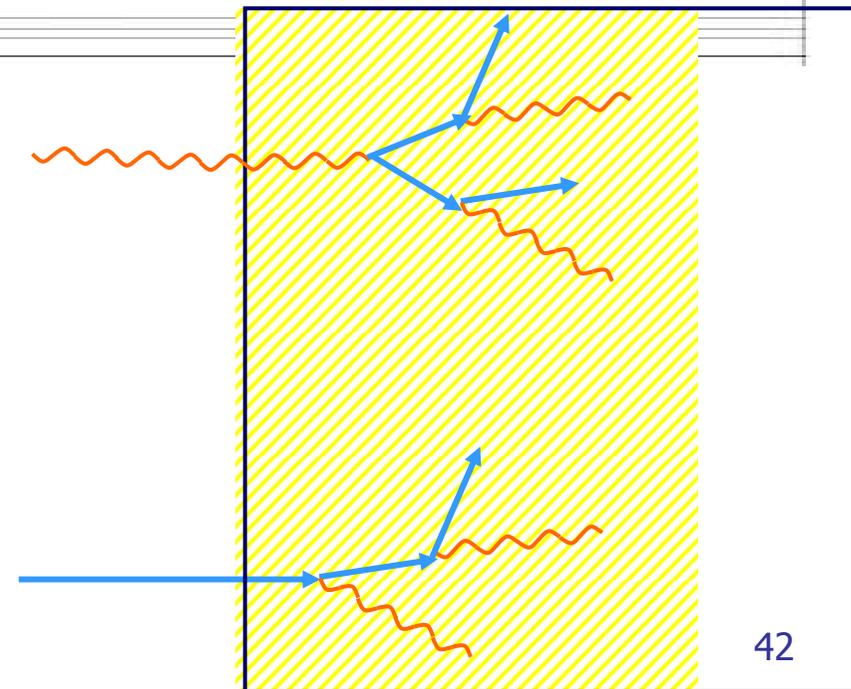
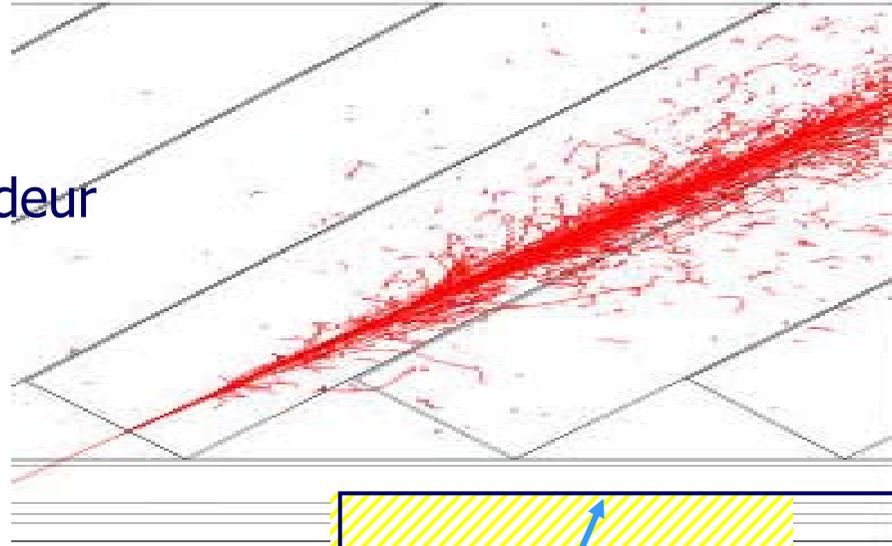


Le comportement des gerbes électromagnétiques

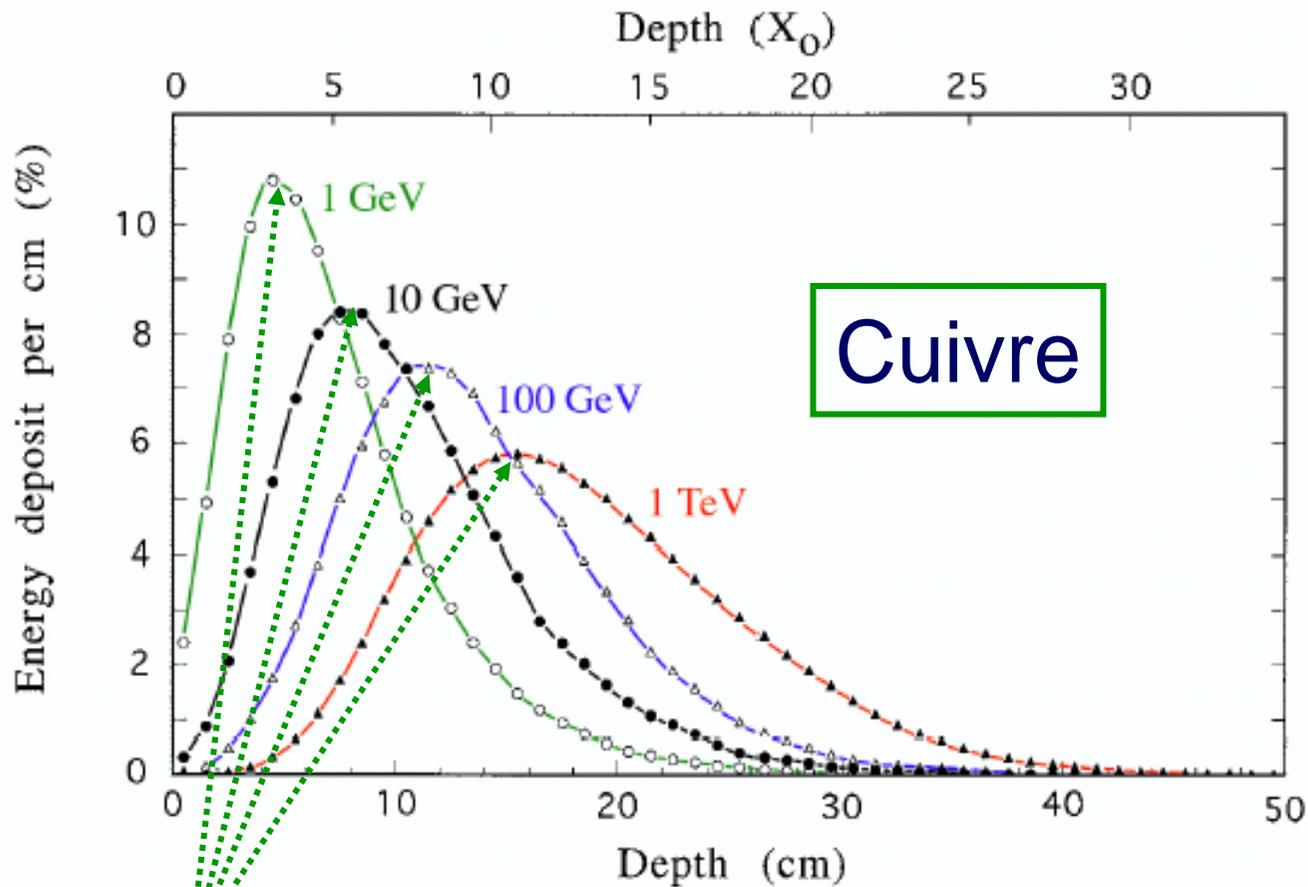
◆ Développement en profondeur

◆ Développement latéral

◆ Différence électron-photon



Développement longitudinal des gerbes

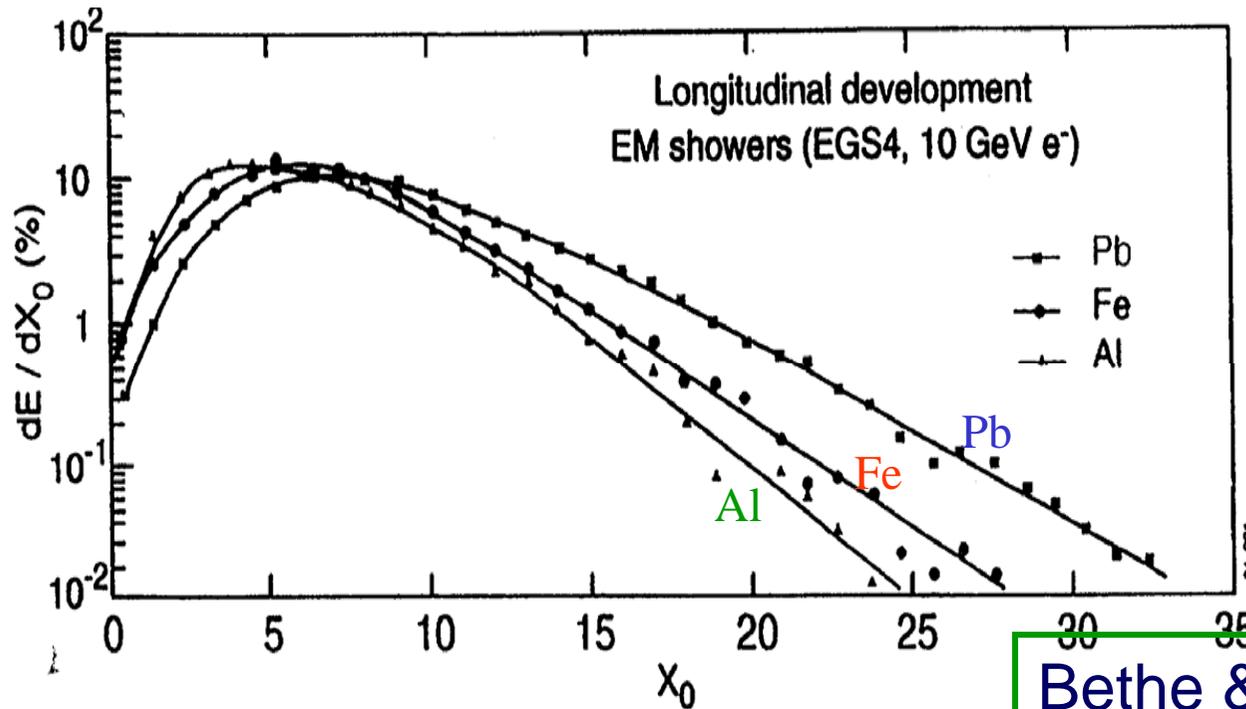


Cuivre

$$X_{\max} = X_0 \ln\left(\frac{E}{E_c} + t_0\right)$$

$t_0 = -0.5$ électrons
 $+0.5$ photons

Développement longitudinal des gerbes



Energie perdue pour 1X₀

Bethe & Bloch

p31

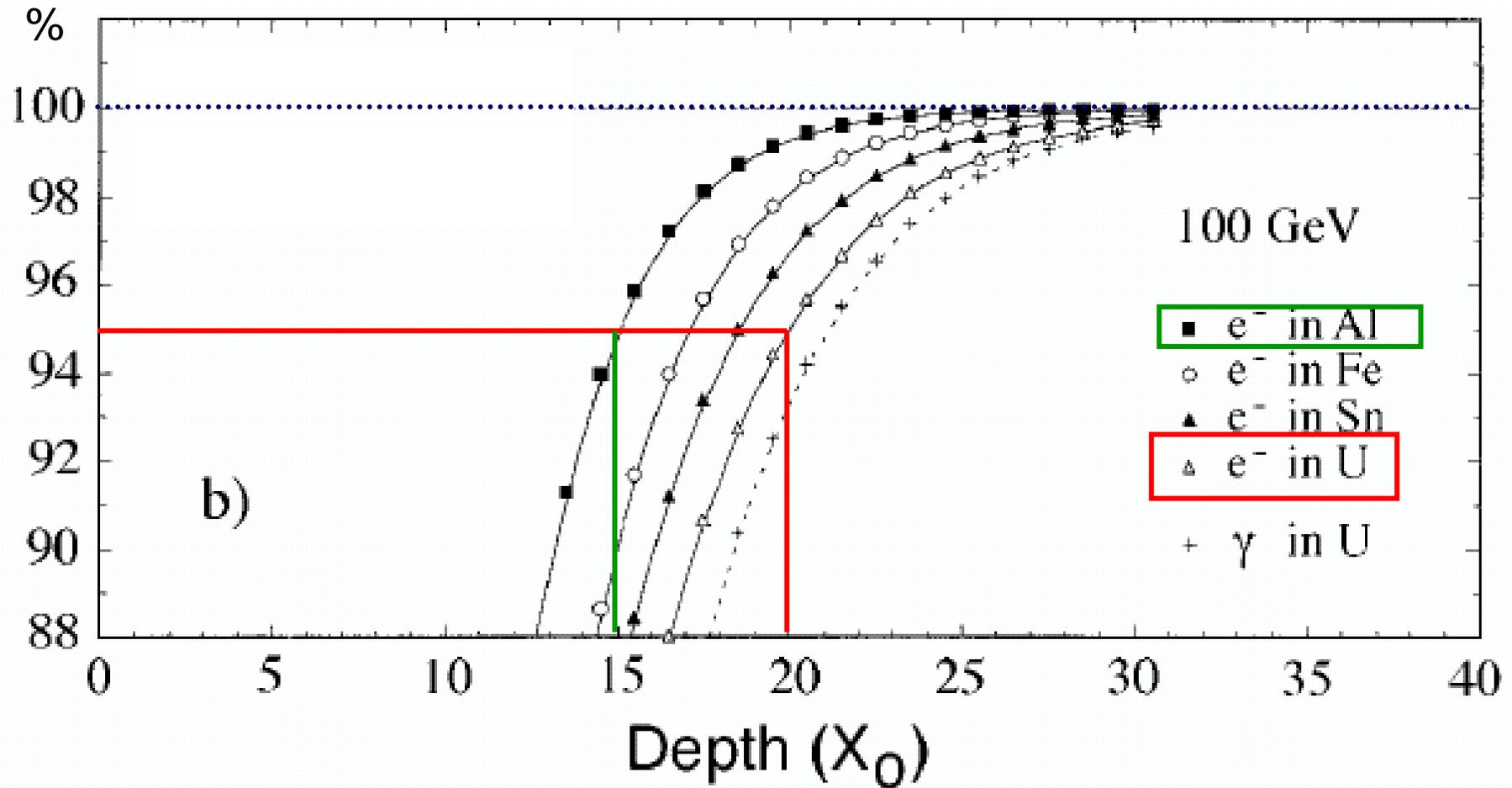
$$\frac{dE}{dx} X_0 \sim Z \frac{1}{Z^2} \sim \frac{1}{Z}$$

Tout n'est pas si simple: loi en X₀ est une approximation.

Développement longitudinal des gerbes

- ◆ **Explication:** La multiplication des particules continue plus pour les matériaux denses car l'énergie critique E_c est d'autant plus petite que Z est grand (page 27)
- ◆ **Incidence:** Pour contenir 99% de la gerbe il faut plus de X_0 d'Uranium ($Z=92$) que d'Aluminium ($Z=13$) (mais en cm, moins d'Uranium que d'Aluminium)

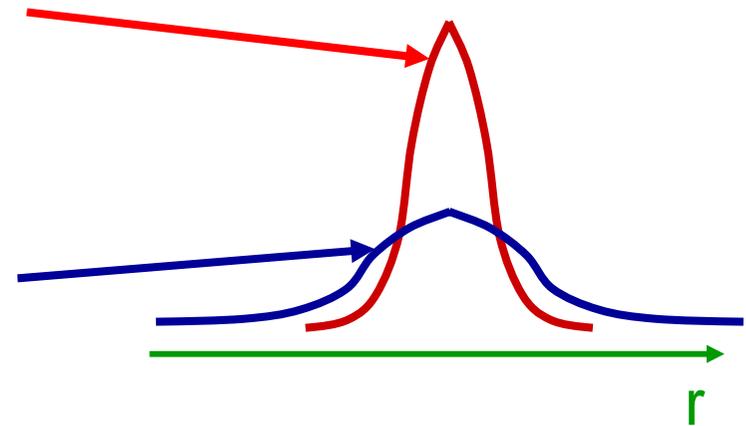
Contenir une gerbe



Profil transverse

◆ Le développement transverse est dominé par deux effets:

- ◆ création de paires + diffusion multiple des électrons et positons au démarrage de la gerbe.
- ◆ photons et électrons produits par des processus isotropes (diffusion Compton, effet photo-électrique) vers la fin de la gerbe



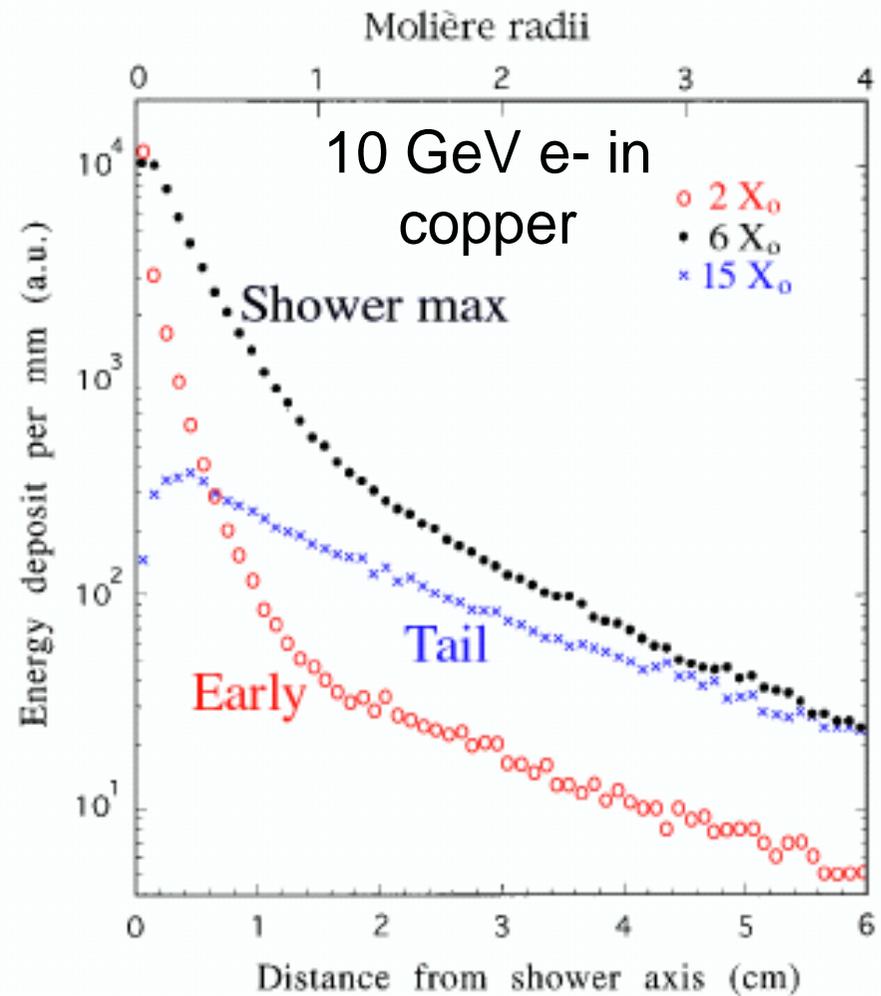
◆ On définit le rayon de Molière R_M

$$R_M \text{ (g/cm}^2\text{)} \sim 21 \text{ MeV} \frac{X_0}{E_c}$$

◆ 90% (95%) de la gerbe est contenu dans 1(2) R_M

Profil transverse

Material	Z	X_0/cm	E_c/MeV	R_M/cm
LAr	18	14	37	8
Fe	26	1.8	22	1.7
PbWO ₄	-	0,89	-	2.2
Lead	82	0.56	7.4	1.6



Les lois d'échelle

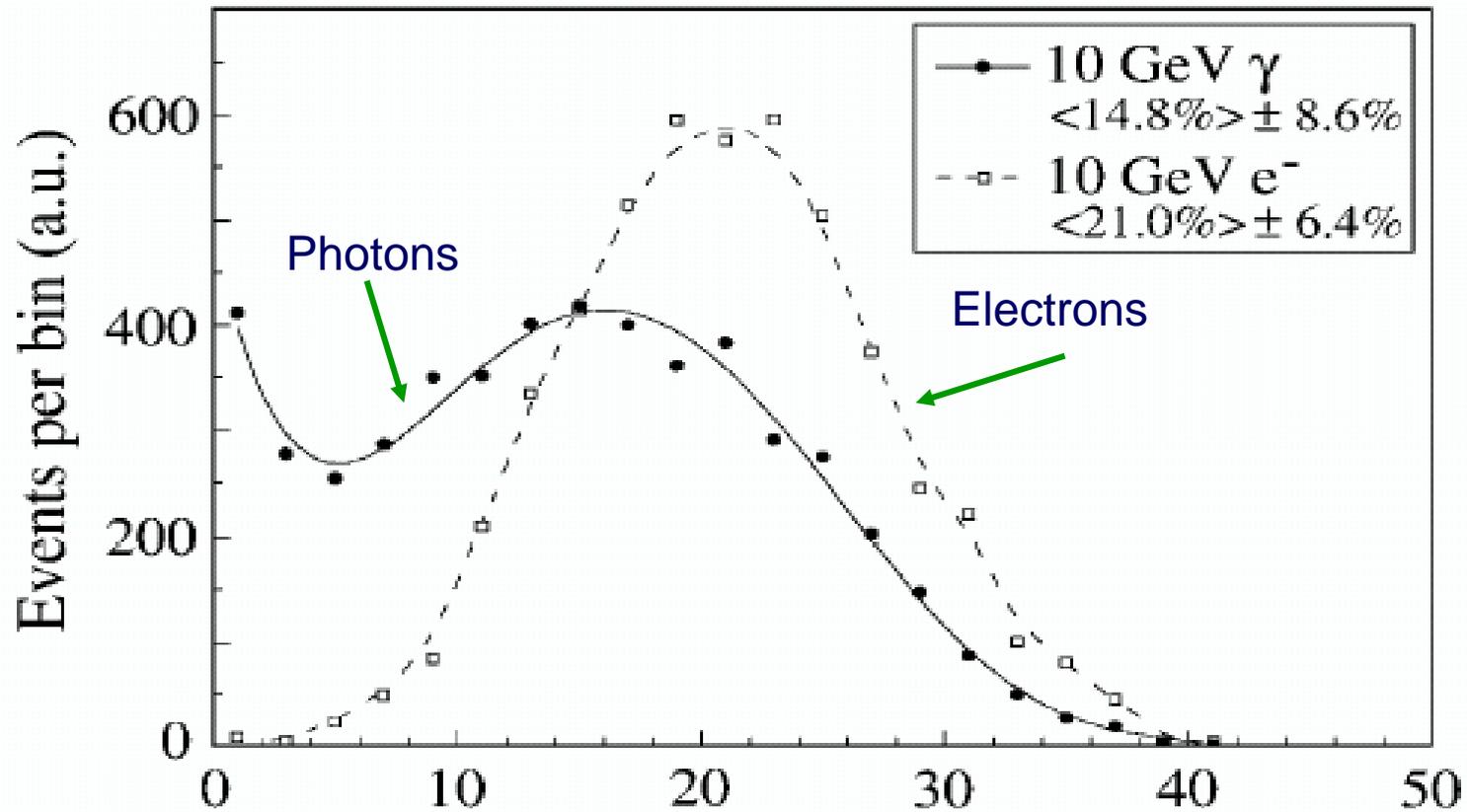
◆ $X_0 \propto A/Z^2 \sim 1/Z$

◆ $E_c \propto 1/Z$

◆ $R_M \propto E_s X_0/E_c$ indépendant de Z

$$R_M \text{ (g/cm}^2\text{)} \sim 21 \text{ MeV} \frac{X_0}{\varepsilon}$$

Différence électron-photon



Fraction d'énergie déposée dans les 5 premiers X0 (%)

Bilan: gerbes électromagnétiques et milieux absorbants

- ◆ Dans une gerbe em, l'énergie déposée est proportionnelle au nombre de particules d'énergie inférieure à l'énergie critique
- ◆ Les gerbes sont contenues (99%) dans une trentaine de X_0
- ◆ Les gerbes sont étroites et contenues à 95% dans $2R_M$
- ◆ Les gerbes s'étendent plus loin dans les matériaux denses

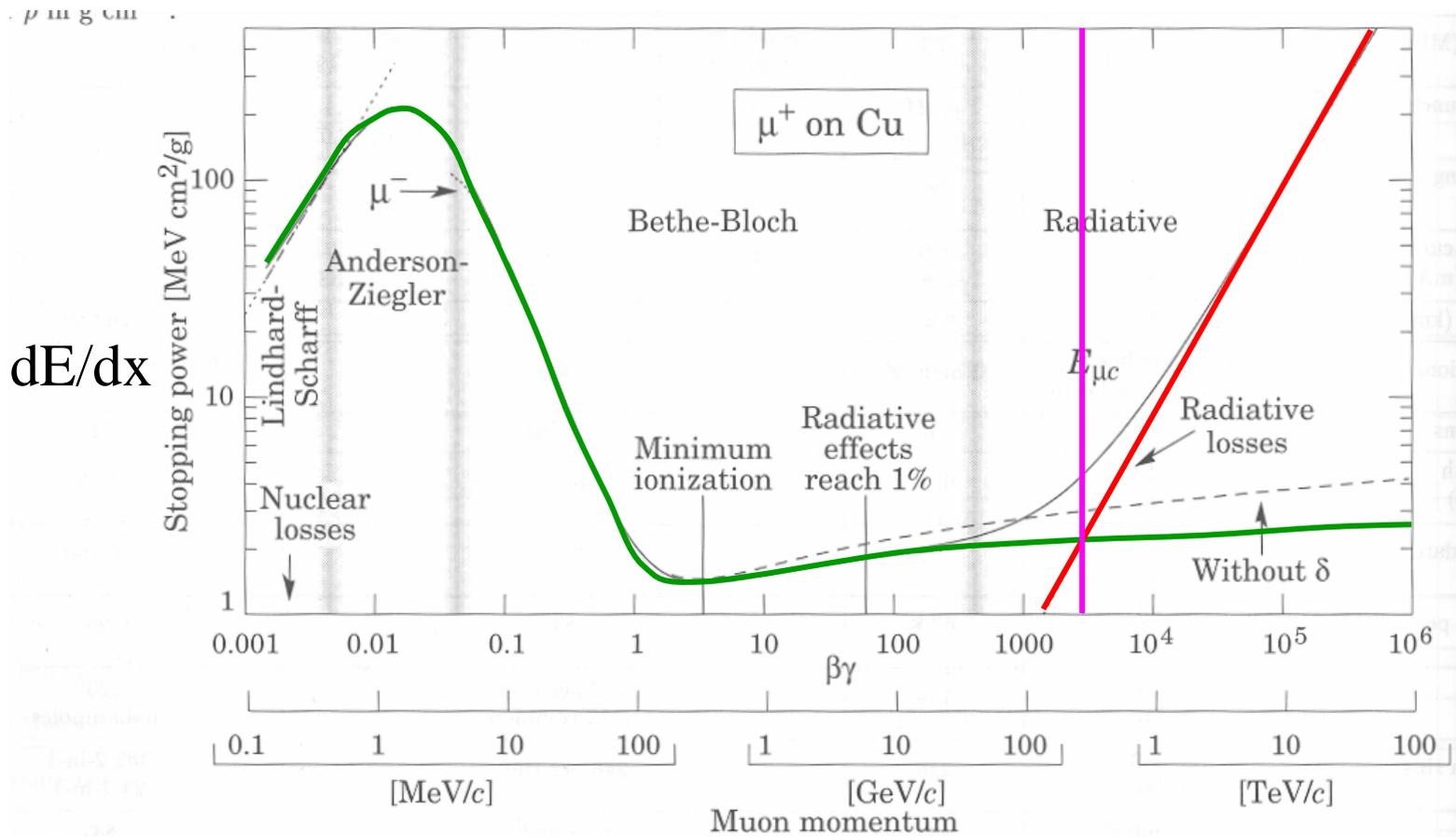
Forts de notre connaissance des gerbes électromagnétiques
nous pourrions construire un calorimètre
mais avant il faut comprendre les
gerbes hadroniques

Interlude: les muons

Les muons dans la matière

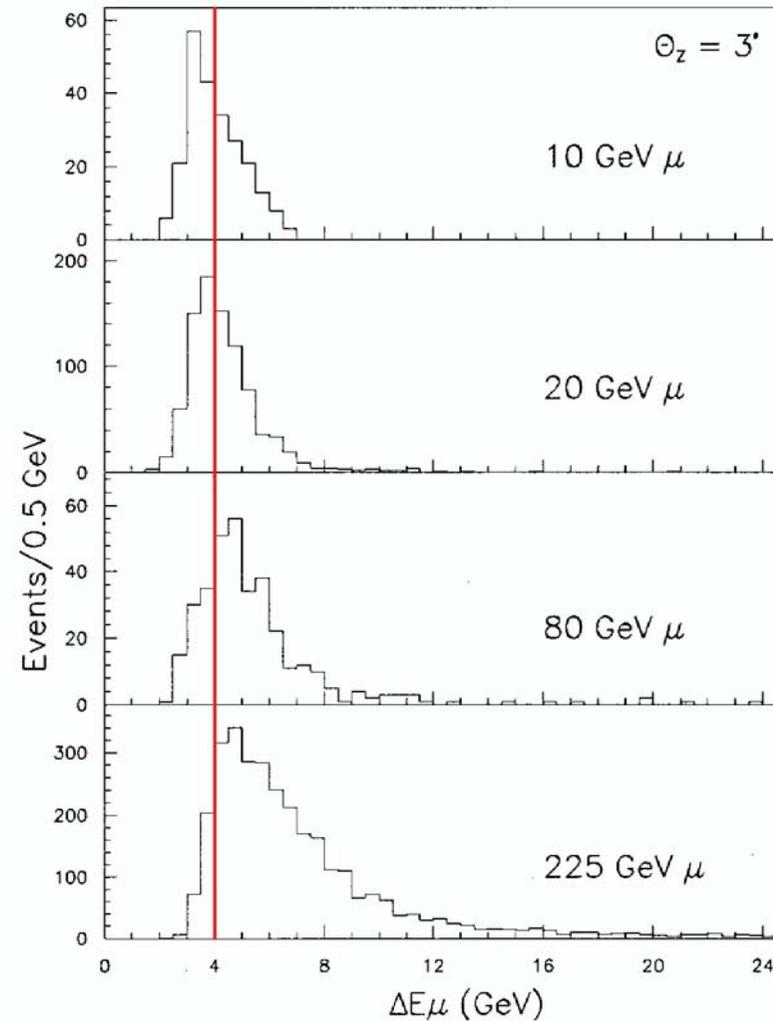
- ◆ Les muons, qui sont des particules qui ressemblent aux électrons (leptons), n'interagissent pas dans la matière de la même façon que les électrons.
- ◆ En effet, le processus de Bremsstrahlung a une dépendance en $1/m^2$
 - ◆ $m_e = 0.519 \text{ MeV}/c^2$
 - ◆ $m_\mu = 105,66 \text{ MeV}/c^2$
$$m_\mu / m_e \sim 200 \rightarrow (m_\mu / m_e)^2 \sim 40000$$
- ◆ A la différence des électrons, les muons ($E < 100 \text{ GeV}$) perdent de l'énergie principalement par ionisation avec
 - ◆ $E_c(\mu) = (m_\mu / m_e)^2 \times E_c(e)$
 - ◆ $E_c(\mu) \approx 200 \text{ GeV}$ dans le Pb

Les muons dans la matière



Les muons dans la matière

Le dépôt d'énergie des muons dans la matière n'est pas simplement proportionnel à leur énergie



Fin de
l'interlude

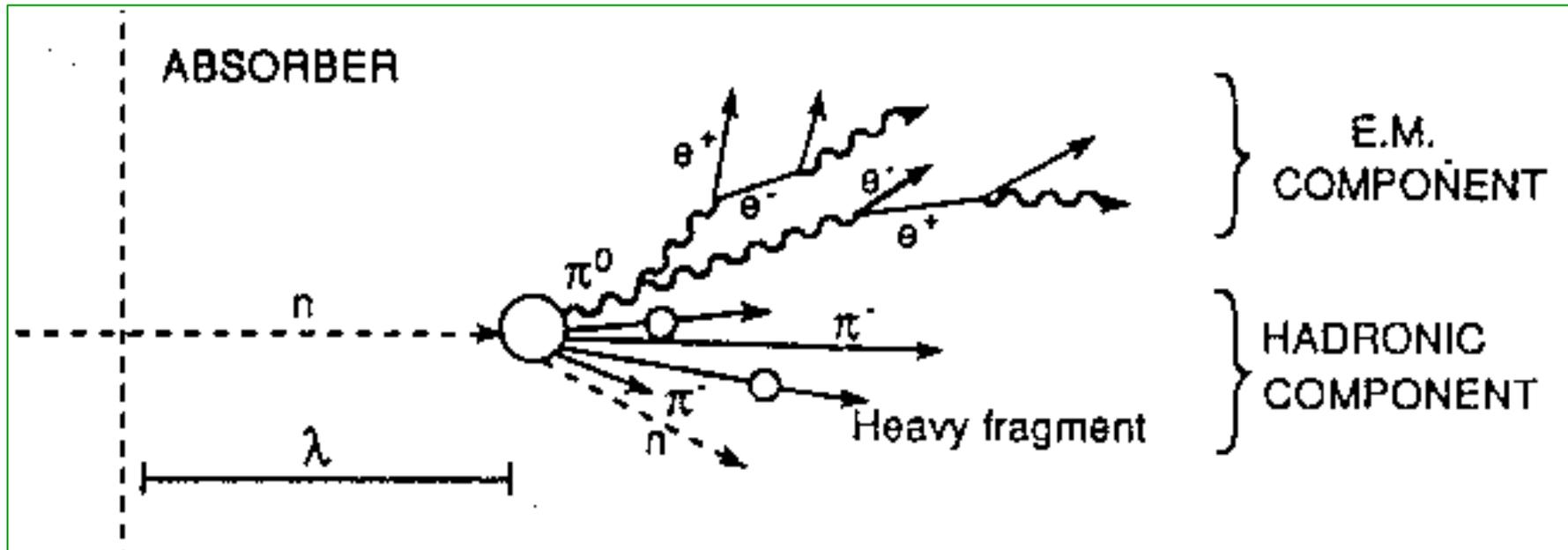
Les gerbes hadroniques

Les gerbes hadroniques

- ◆ La nature est faite de leptons et de quarks
 - ◆ Les leptons interagissent par interactions **électromagnétique** et **faible** (en fait les deux sont unifiées: interaction **électrofaible**)
 - ◆ Les quarks interagissent par interactions **forte**, **électromagnétique** et **faible**
- ◆ Les quarks se combinent pour former les **hadrons** qui interagissent avec la matière en développant des **gerbes hadroniques** régies par les interactions **fortes** et **électromagnétiques**

Gerbes hadroniques

- ◆ Le hadron incident (ici un neutron n) produit une cascade de particules secondaires par interactions forte et em.



- ◆ Gerbes hadroniques sont plus compliquées que les gerbes em:
 - ◆ Composante électromagnétique: 30%
 - ◆ Composante hadronique: gde variété de processus compliqués

Les hadrons: hadroniques et électromagnétiques

- ◆ Il existe une multitude de hadrons (on en découvre encore dans BaBar par exemple) de deux familles: mésons et baryons
- ◆ Les plus abondants sont les plus légers, les pions: π^+ , π^- , π^0
 $\Rightarrow \sim 30\%$ de l'énergie dans les π^0
- ◆ Le π^0 joue le rôle d'une particule électromagnétique car il se désintègre immédiatement en $\gamma\gamma$

 \Rightarrow mesure de l'énergie électromagnétique
- ◆ Les hadrons produisent de l'énergie sous une forme pas toujours détectable

Gerbes hadroniques: interaction forte

- ◆ Les phénomènes nucléaires (interactions entre les noyaux des atomes) sont multiples:
 - ◆ excitation nucléaire
 - ◆ fission
 - ◆
- ◆ Plusieurs types de particules sont alors produites
 - ◆ ionisantes (p , α , frag. nucléaires): **détectées**
 - ◆ neutrons: souvent invisibles et peuvent voyager $\sim 1\mu s$
 - ◆ énergie invisible (énergie de liaison utilisée pour casser les noyaux)

Seulement une fraction de l'énergie libérée est détectable puis détectée

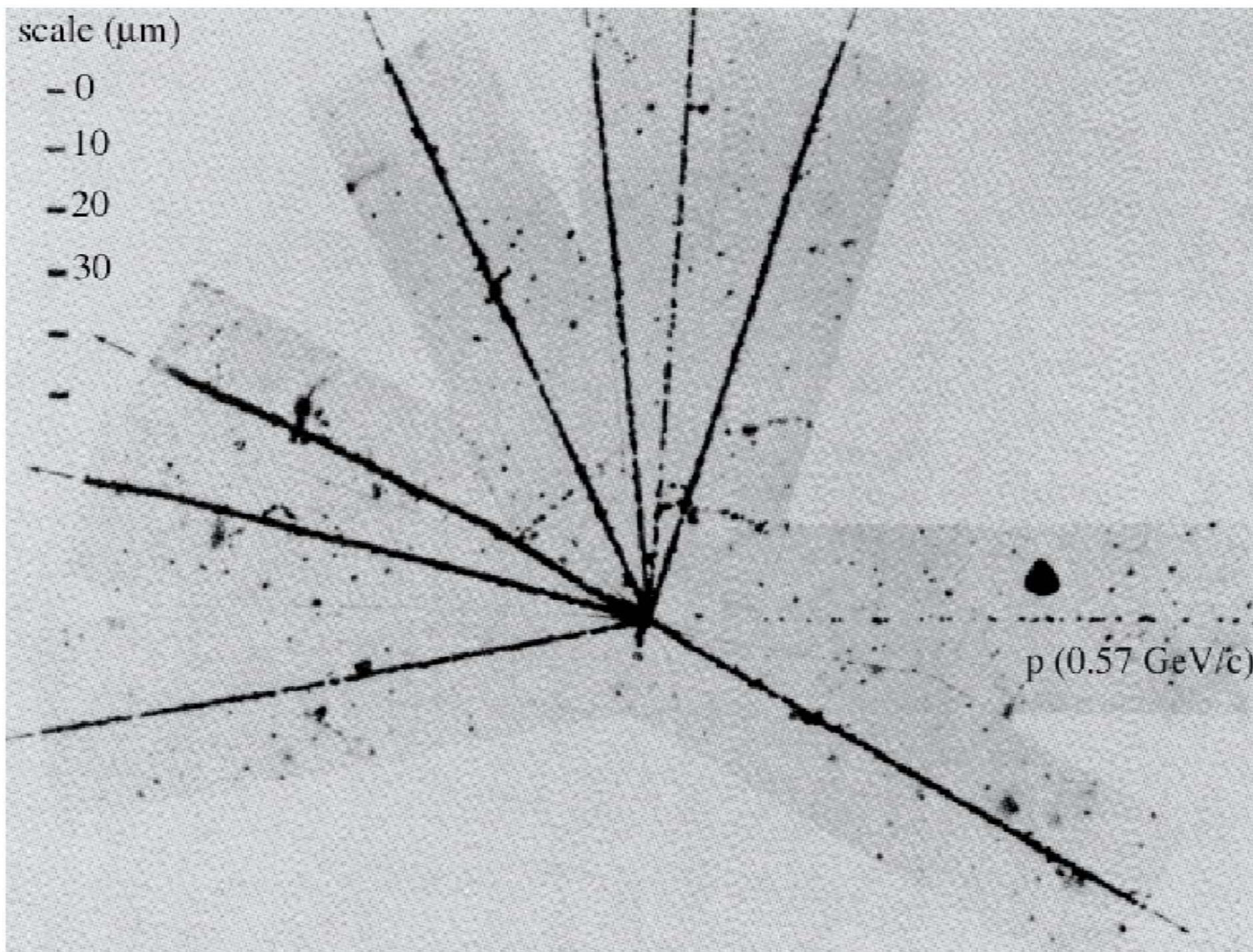
scale (μm)

- 0

- 10

- 20

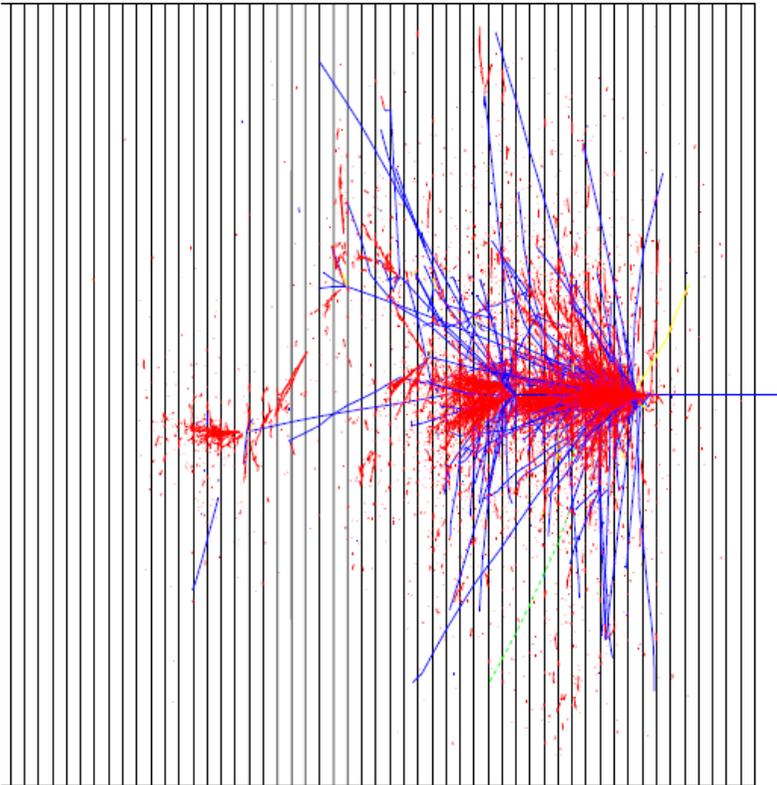
- 30



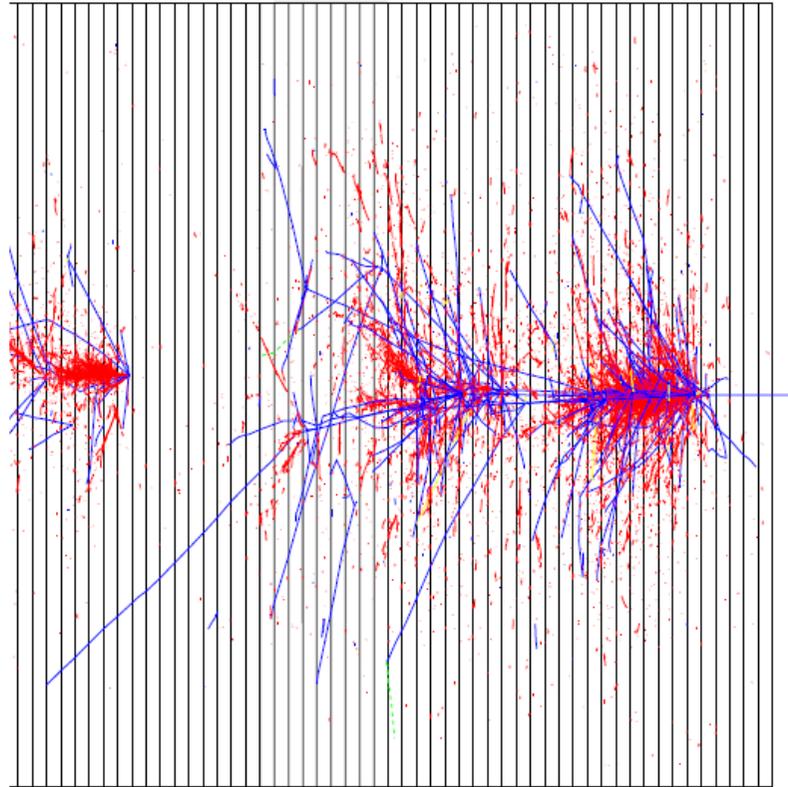
p (0.57 GeV/c)

Two hadronic events in a calorimeter

1.



2.



red - e.m. component
blue - charged hadrons

Gerbes hadroniques: où va l'énergie?

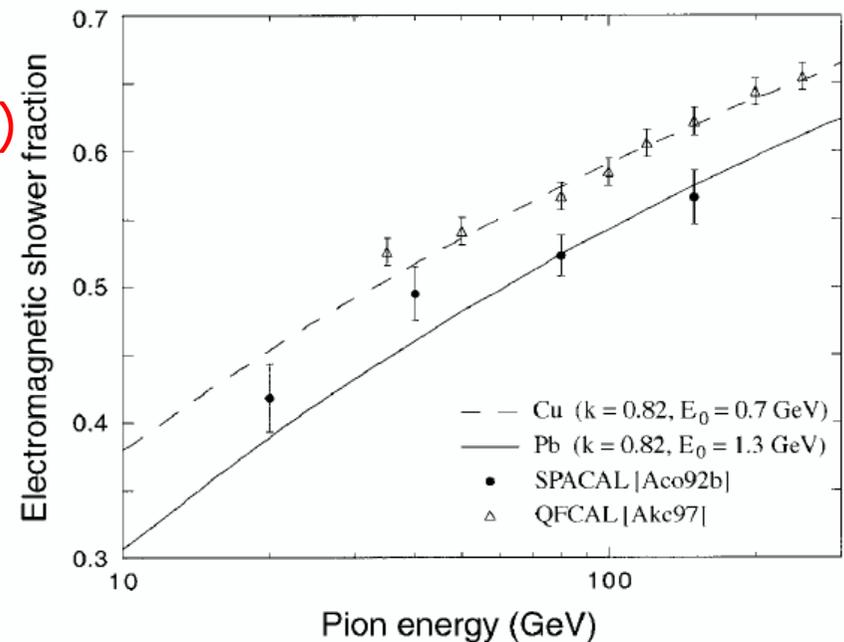
	Plomb	Fer
Ionization by pions	19%	21%
Ionization by protons	37%	53%
<i>Total ionization</i>	56%	74%
Nuclear binding energy loss	32%	16%
Target recoil	2%	5%
<i>Total invisible energy</i>	34%	21%
Kinetic energy evaporation neutrons	10%	5%
Number of charged pions	0.77	1.4
Number of protons	3.5	8
Number of cascade neutrons	5.4	5
Number of evaporation neutrons	31.5	5
Total number of neutrons	36.9	10
Neutrons/protons	10.5/1	1.3/1

Gerbes hadroniques: composante électromagnétique

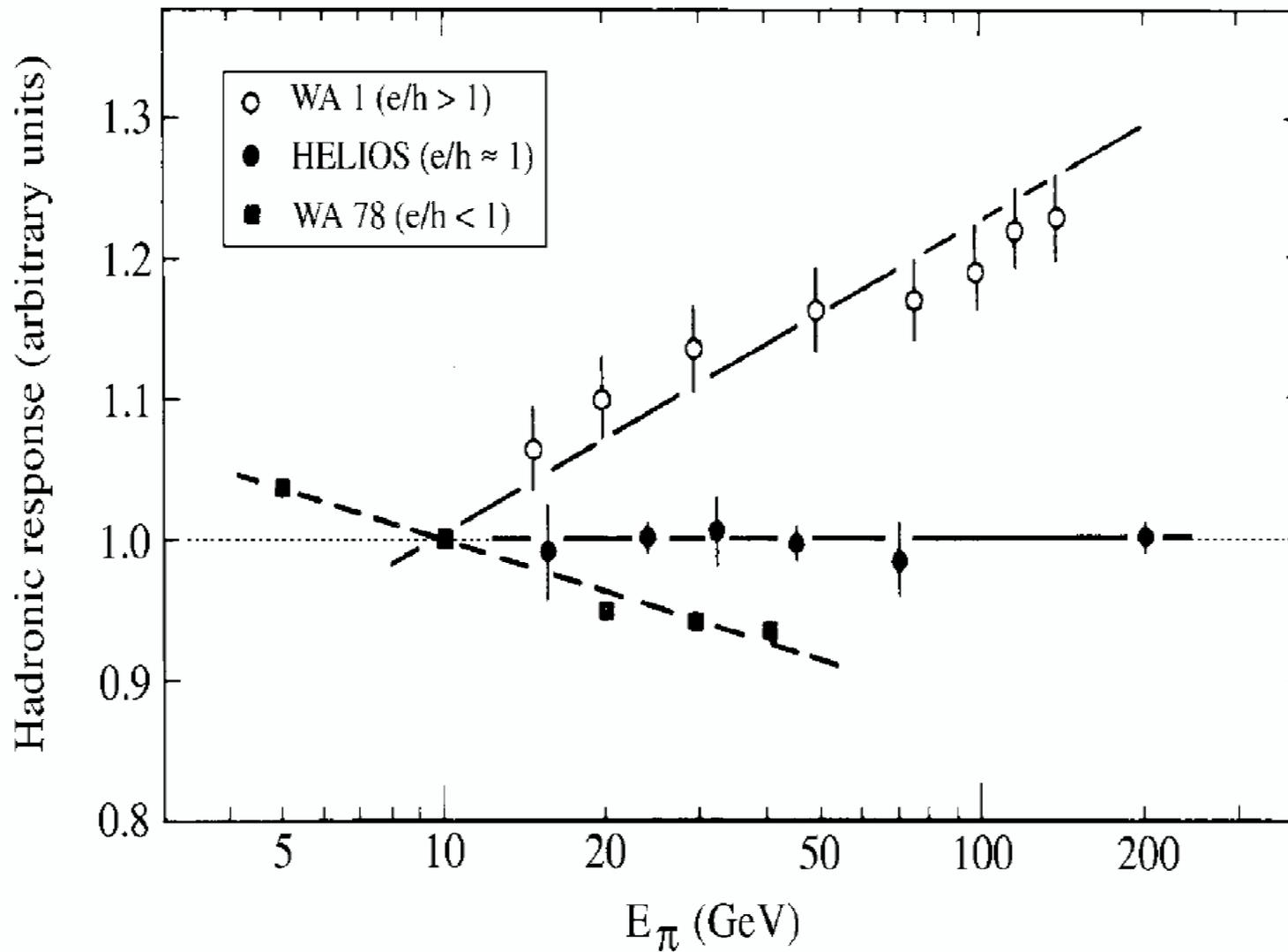
- ◆ En moyenne, pour chaque interaction, 1/3 des mésons produits sont des π^0 s (π^+ , π^0 et π^- sont produits démocratiquement)
 - ◆ Et ainsi de suite pour chaque génération.....

- ◆ Hypothèse: une fraction, f_0 , d'énergie e.m. est produite à chaque interaction:
 - ◆ 1^{ère} génération: f_0
 - ◆ 2nd génération: $f_0 + f_0(1 - f_0)$
 - ◆ $F_0 = f_0 \Sigma(1 - f_0)^{n-1}$
après n générations
 - ◆ $F_0 = 1 - (1 - f_0)^n$

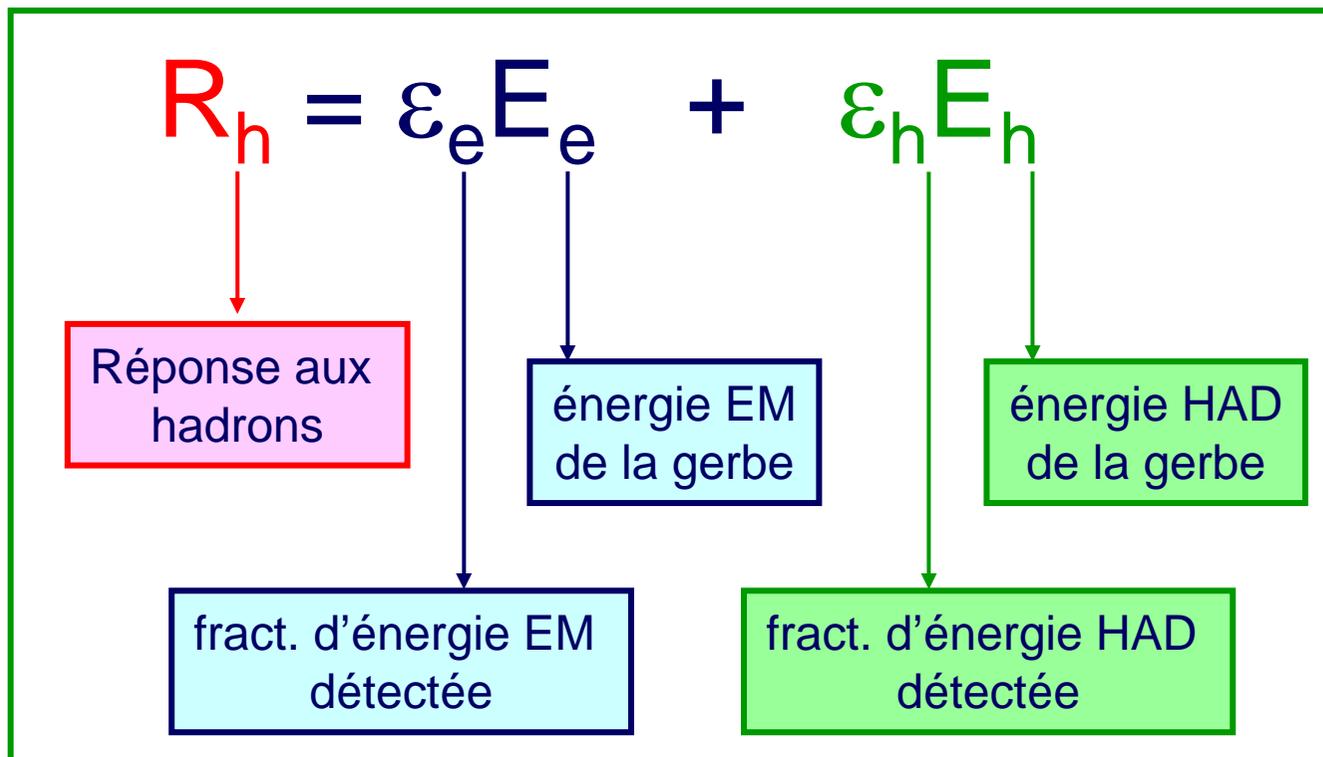
- ◆ Ainsi:
 - ◆ à basse énergie $F_0 \approx f_0$
 - ◆ à très haute énergie $F_0 \rightarrow 1$



Gerbes hadroniques: non-linéarité



Gerbes hadroniques: non compensation

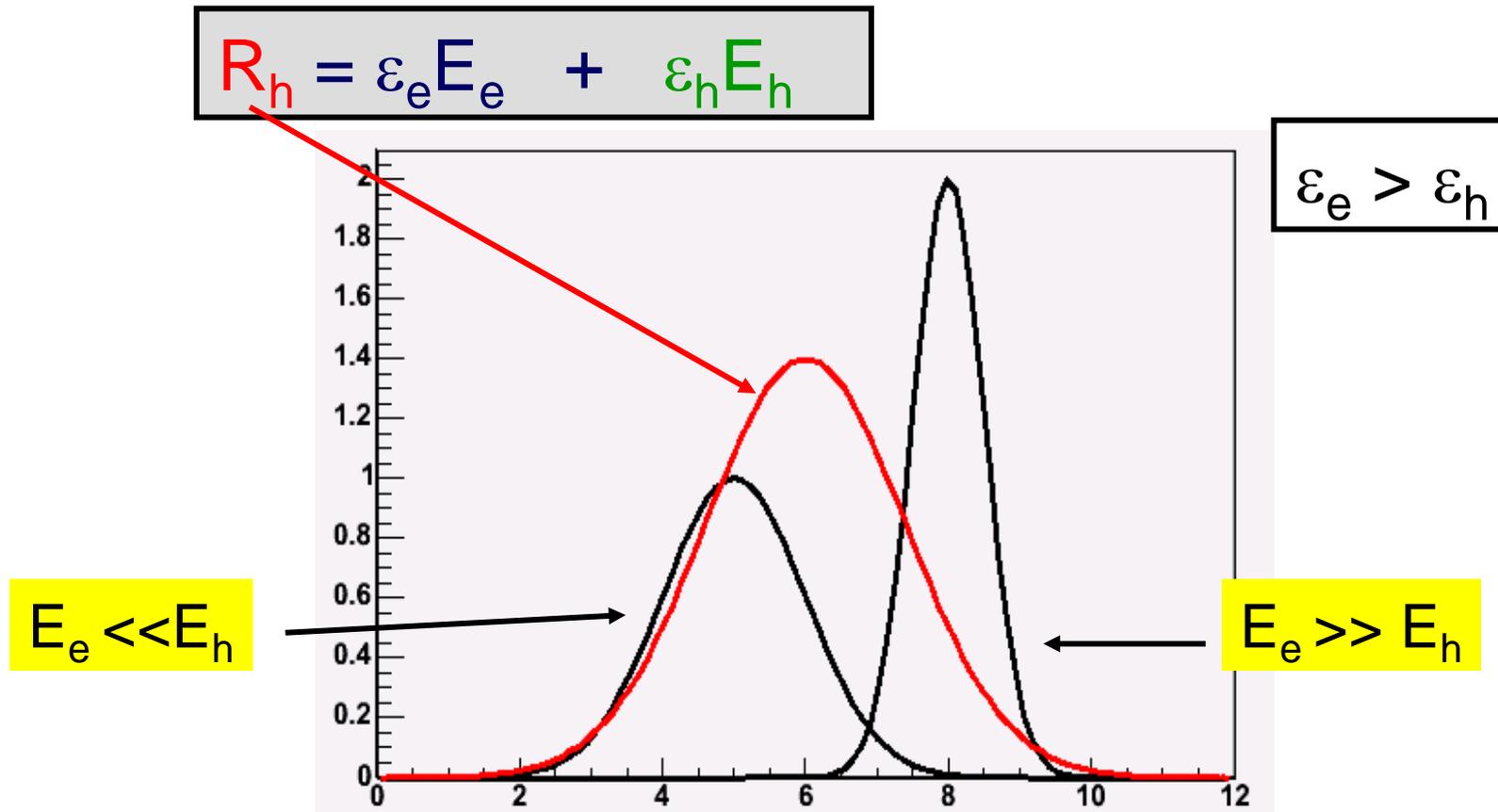


$$\frac{e}{h} = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_h}$$

≈ 1 : calorimètre compensant

> 1 : calorimètre non-compensant

Gerbes hadroniques: non compensation



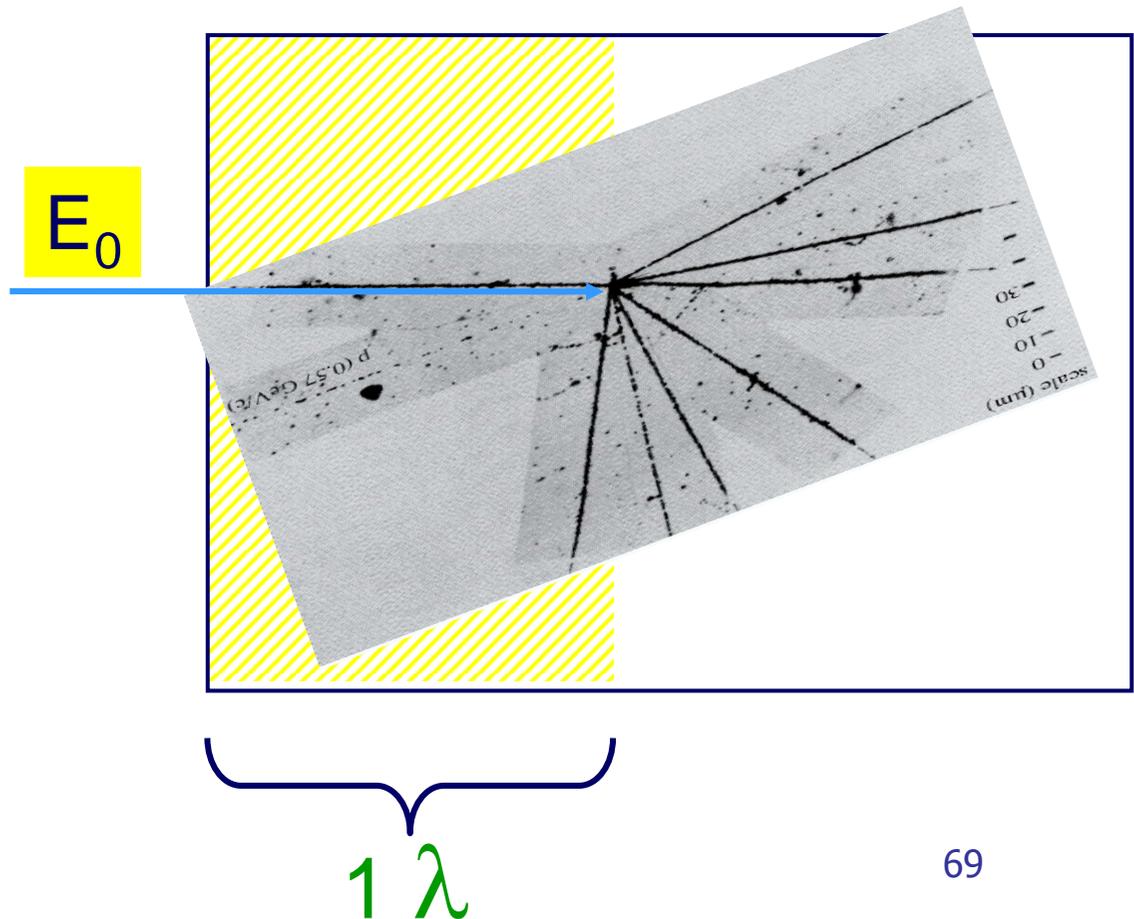
Longueur d'interaction nucléaire: λ_{int}

Définition: La longueur d'interaction nucléaire λ_{int} est définie comme la distance moyenne qu'un hadron de hte énergie parcourt dans un milieu donné avant de subir une interaction nucléaire.

La probabilité pour qu'une particule traverse la distance z dans ce milieu sans créer une interaction nucléaire est:

$$P = e^{-z/\lambda_{\text{int}}}$$

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{A}{N_A \lambda_{\text{int}}}$$



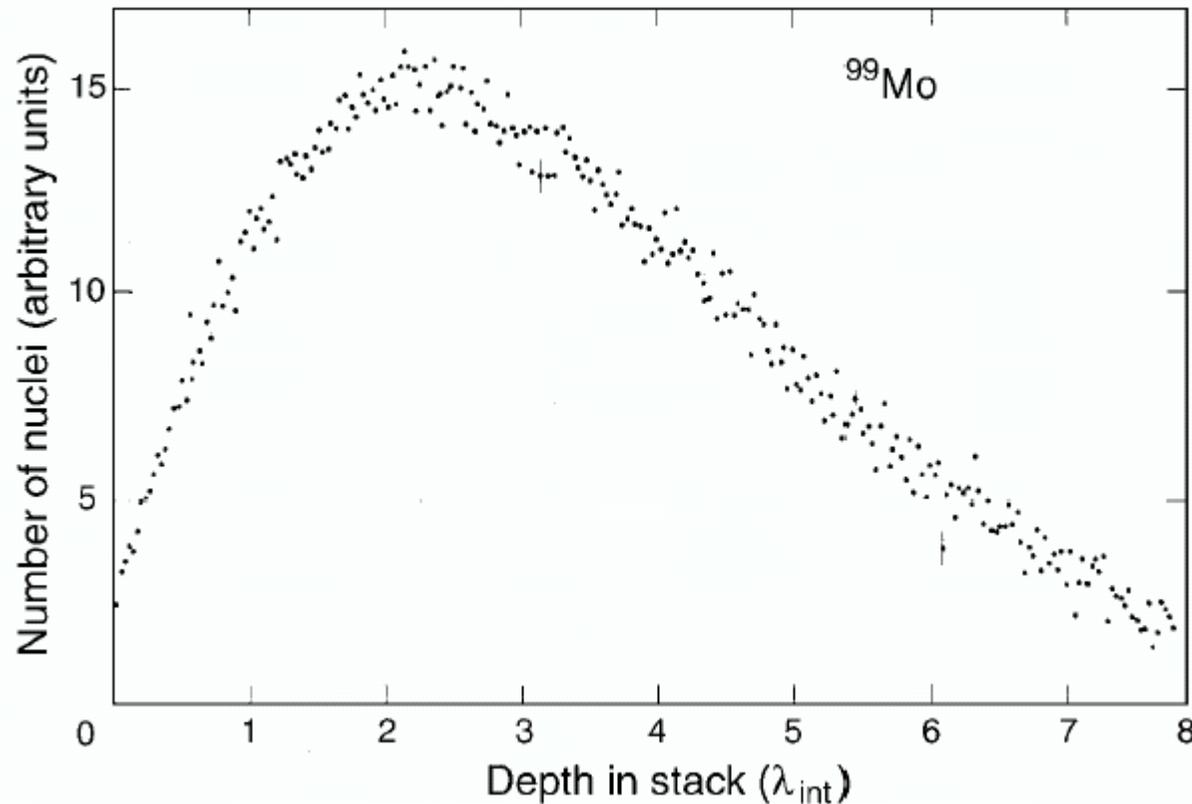
Longueur d'interaction nucléaire: λ_{int}

◆ Cette variable est très utilisée en calorimétrie car elle permet de décrire le comportement des gerbes hadroniques de façon générique (\sim) pour tous les matériaux

$$\lambda_{\text{int}} \approx 35 A^{1/3} \text{ gcm}^{-2}$$

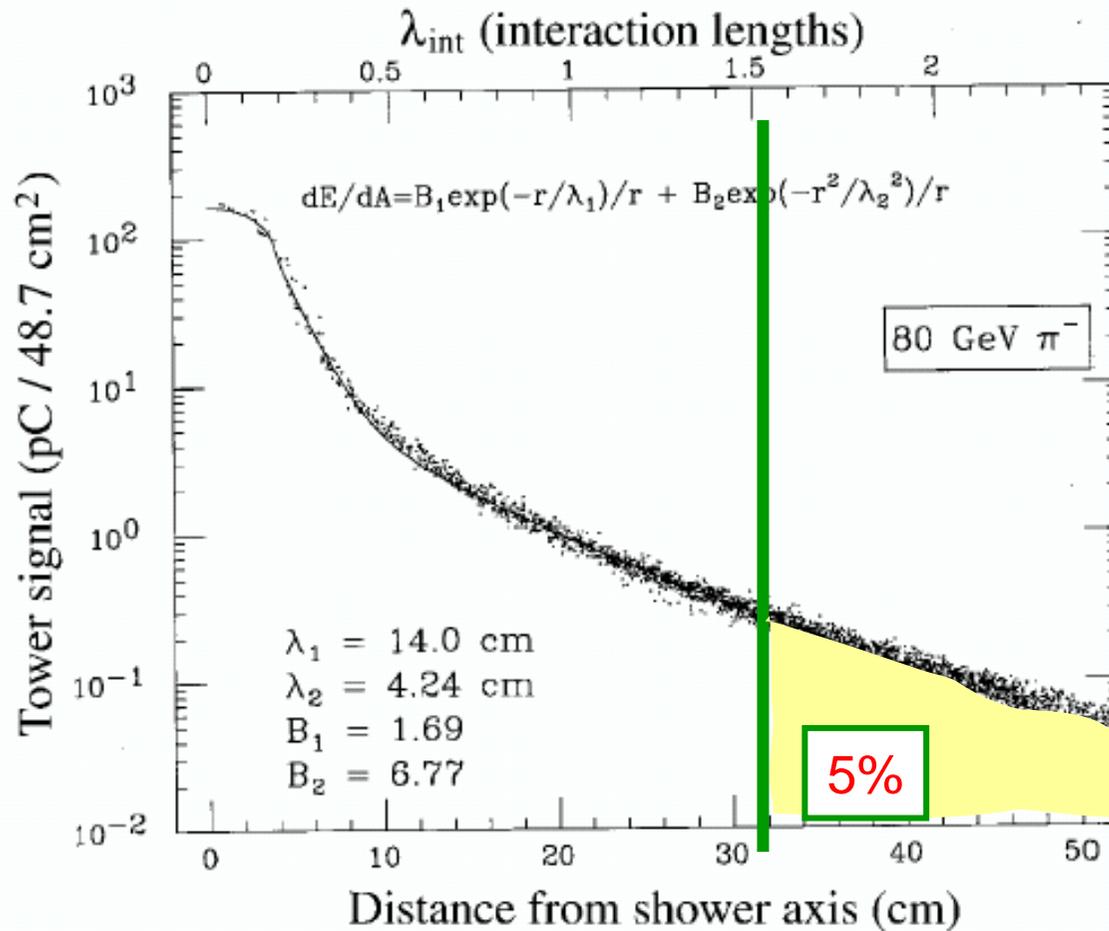
	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	PbWO ₄
Z/A	-	-	13/27	18/40	26/56	82/207	-
λ_{int} (cm) (g.cm ⁻² /ρ)	~70000	84	39	84	16.8	17	22.4
X ₀ (cm) (g.cm ⁻² /ρ)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.89

Gerbes hadroniques: développement longitudinal



Un pion de 300 GeV est contenu à 95% dans $8 \lambda_{\text{int}}$ (85 cm d'U)
Un électron de 300 GeV, dans $30 X_0$ (9cm)

Gerbes hadroniques: développement transverse



Un π de 80 GeV est contenu à 95% dans $\approx 1.5 \lambda_{\text{int}} / 32 \text{ cm}$
Un électron de même énergie est contenu à 95% dans 3.5 cm
Un facteur 9 radialement et longitudinalement

Gerbes hadroniques

complication: les jets & QCD

- ◆ Dans les expériences de haute énergie (depuis les années 1970), on ne produit pas des hadrons mais des quarks qui s'hadronisent en formant des jets.
- ◆ Lors de tests en faisceau, on dispose de *single particles* et non de *jets*
- ◆ La théorie des interactions fortes à hte énergie, QCD (Quantum Chromo Dynamique) ne peut pas décrire précisément le développement des jets car les énergies échangées sont trop faibles
- ◆ Il y a de grandes fluctuations dans la composition des jets
- ◆ La simulation aide à passer de l'un à l'autre mais la description des processus hadroniques est compliquée.

Gerbes hadroniques: conclusions

- ◆ Les gerbes **hadroniques** sont:
 - ◆ plus erratiques
 - ◆ plus pénétrantes
 - ◆ plus larges
 - ◆ plus fluctuantesque les gerbes électromagnétiques
- ◆ La mesure des gerbes hadroniques sera donc
 - ◆ plus difficile et
 - ◆ moins précise
- ◆ Les demandes sur les calorimètres hadroniques sont par conséquence, plus grossières

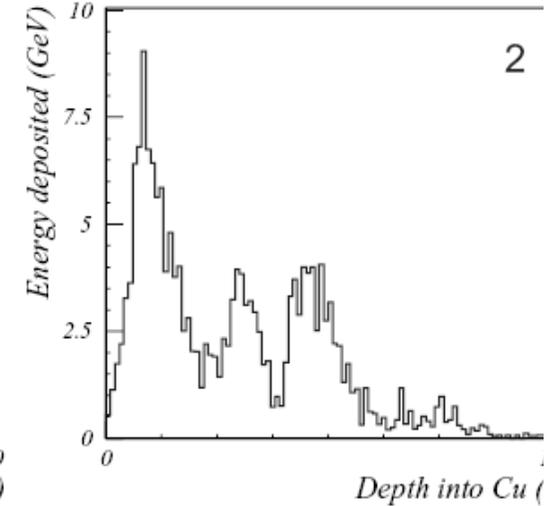
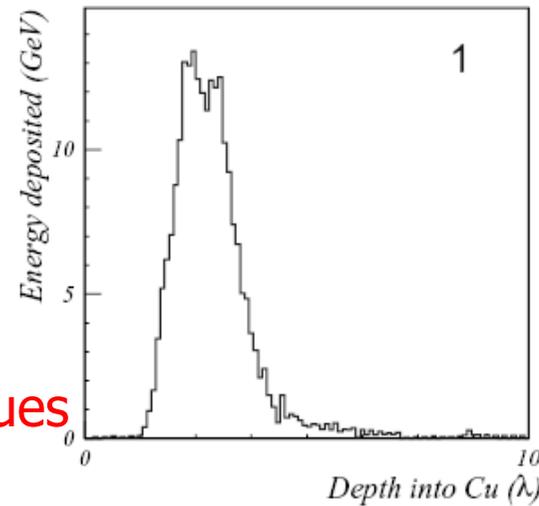
Nous sommes maintenant prêts à construire un calorimètre
ou
deux calorimètres: un électromagnétique et un hadronique.

Grandes variations d'un evt à l'autre

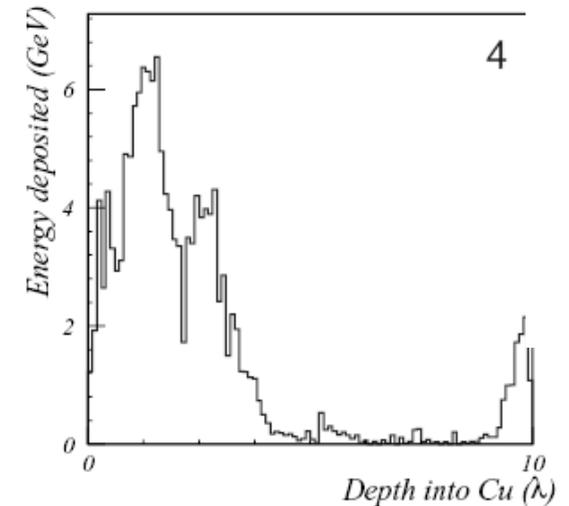
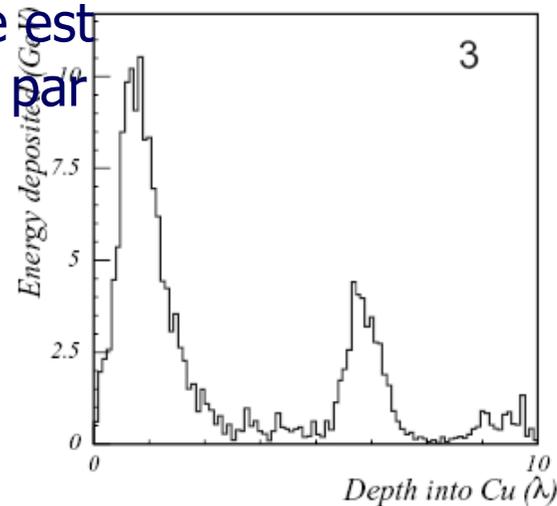
4 événements différents:

270 GeV Incident Pions in Copper

- ◆ Fluctuations entre les composantes électromagnétiques et hadroniques
 - ◆ et aussi entre les processus hadroniques



- ◆ Fraction électromagnétique est déterminée principalement par la première interaction



Fin du 1^{er} cours
