

# *Particle Detectors*

*Lecture 11*

*20/04/18*

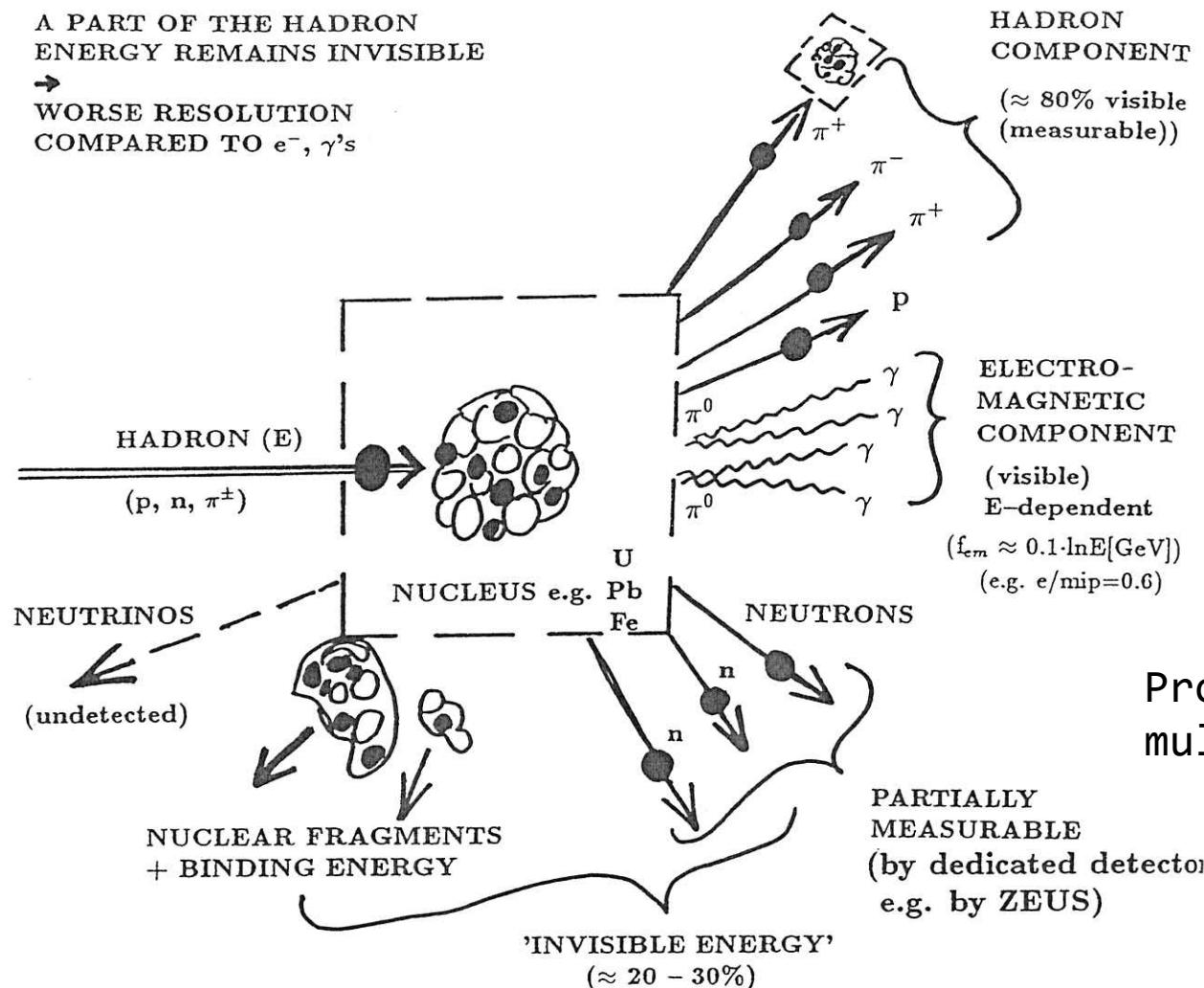
**a.a. 2017-2018**

**Emanuele Fiandrini**

# Hadronic Showers

## 'ELEMENTARY PROCESS' IN A HADRON SHOWER

A PART OF THE HADRON ENERGY REMAINS INVISIBLE  
 → WORSE RESOLUTION COMPARED TO  $e^-$ ,  $\gamma$ 's



La produzione di particelle e' determinata da processi nucleari anelastici.

Produced particle multiplicity  $\propto \ln(E)$

$$p_t \approx 0.35 \text{ GeV/c}$$

Fig. 3.6 'Elementary physical process in a Hadron shower'

# Interazioni nucleari (forti)

Nello sviluppo dello sciame sono presenti due componenti:

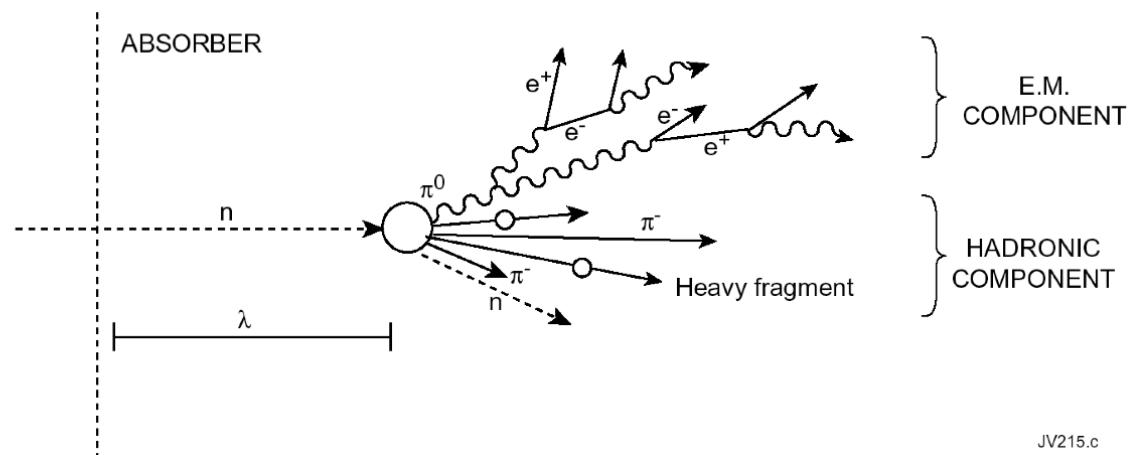
**Adronica**

+

**Componente e.m.**

↓  
charged pions, protons, kaons ....  
Breaking up of nuclei  
(binding energy),  
neutrons, neutrinos, soft  $\gamma$ 's  
muons ....  $\rightarrow$  invisible energy

↓  
neutral pions  $\rightarrow 2\gamma \rightarrow$   
electromagnetic cascade,  $e^-$ ,  $e^+$

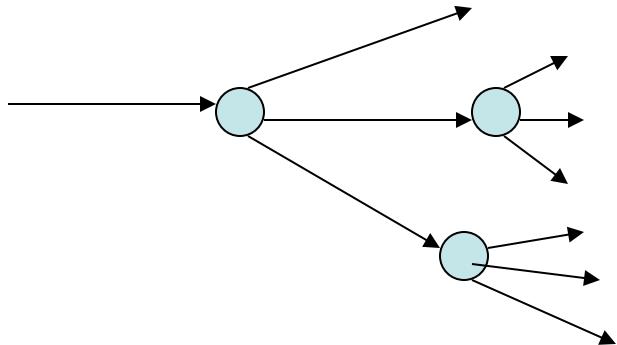


Larghe fluttuazioni dell'energia  $\rightarrow$  risoluzione in energia limitata

# Hadronic Shower

-the electromagnetic component

Simplified model - only  $\pi$  produced



$\pi$ 's are isotriplet  $\pi$ 's are produced democratically in each nuclear interaction

$\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$  electromagnetic component  $f_{em}$   
 $f_{em} = 0.33$  after 1st interaction  
 $f_{em} = 0.33 \times 2/3 + 1/3 = 0.55$  after 2nd ia

After  $b$  generations of interactions

$$f_{\pi^0} = f_{em} = 1 - \left(1 - \frac{1}{3}\right)^b$$

Electromagnetic Component increases with increasing energy of primary particle  $f_{em} \approx 0.1 \ln E [\text{GeV}]$

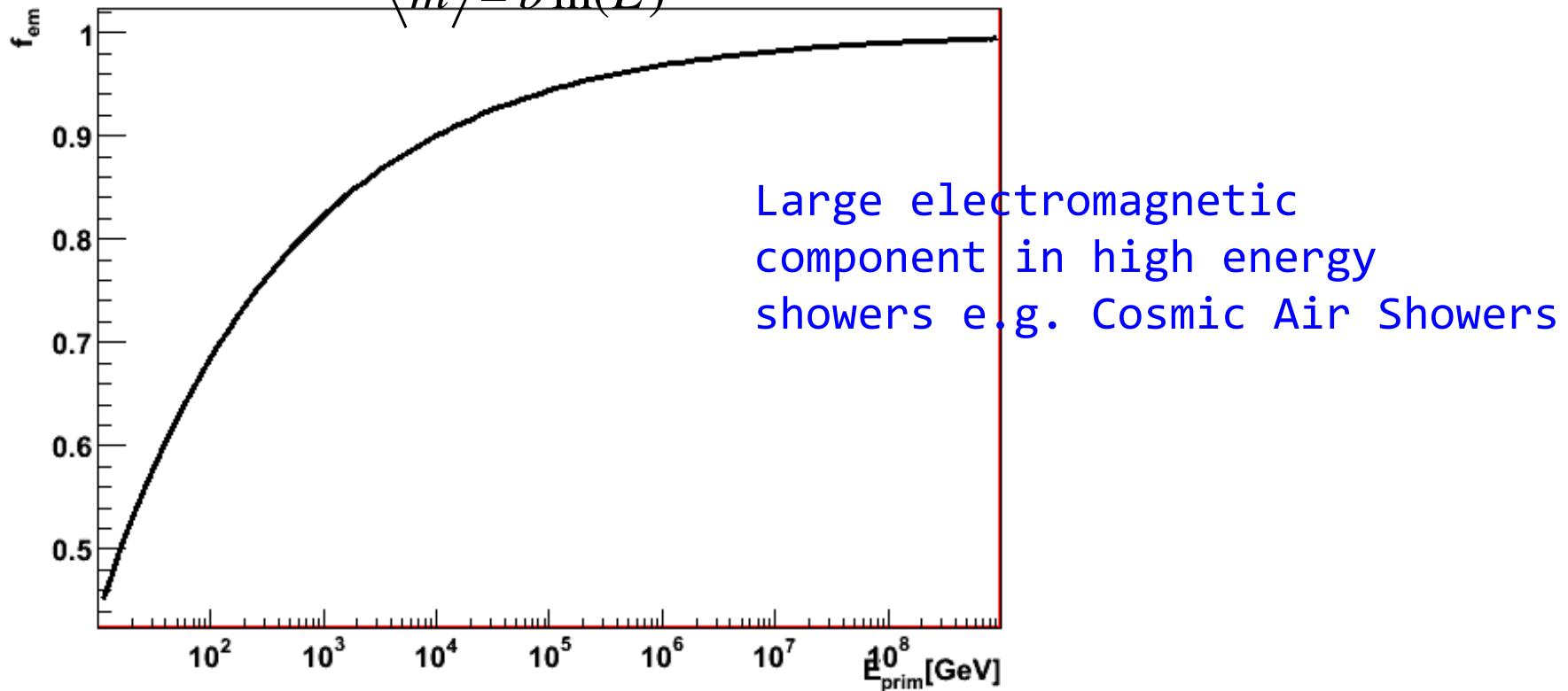
# $f_{em}$ as a function of the energy

Reality:

$$f_{em} = 1 - \langle m \rangle^a$$

$$\langle m \rangle = b \ln(E)$$

$\langle m \rangle$  Average multiplicity per interaction  
 $a$  Slope Parameter



Attention - Production of  $\pi^0$  is a statistical process

At small energies: Small multiplicity

Large statistical fluctuations in production of  $\pi$  'species'

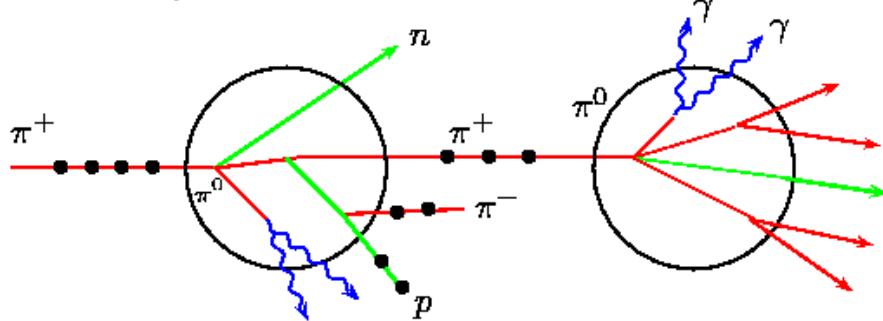
⇒ Large fluctuations of electromagnetic component of shower

# Hadronic Showers

Hadronic Showers are dominated by strong interaction!

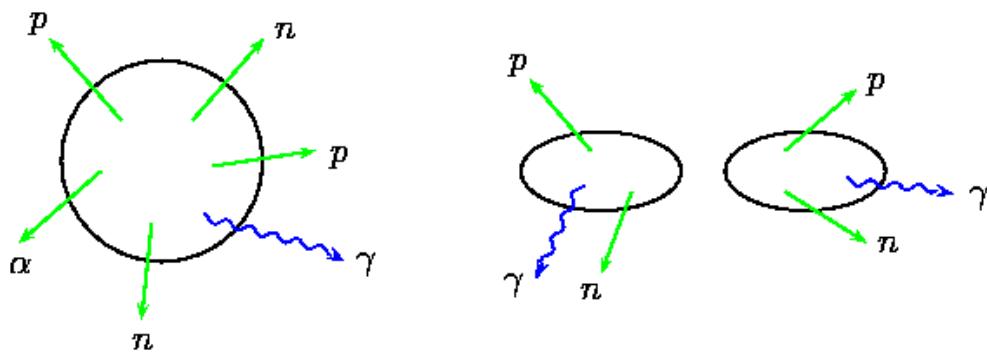
$$p + \text{Nucleus} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \dots + \text{Nucleus}^*$$

1st Step: Intranuclear Cascade



2nd Step: Highly excited nuclei  
Evaporation

Fission followed  
by Evaporation



Further Reading:

R. Wigman et al. NIM A252 (1986) 4

R. Wigman NIM A259 (1987) 389

E. Fiandrini Rivelatori di particelle  
1710

Distribution of Energy

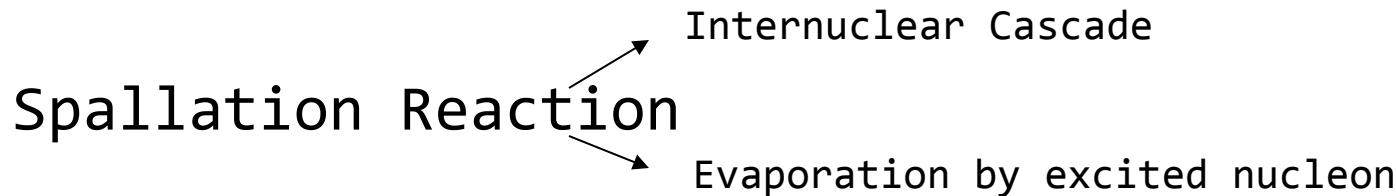
Example 5 GeV primary energy

- Ionization Energy of charged particles	1980 MeV
- Electromagnetic Shower (by $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ )	760 MeV
- Neutron Energy	520 MeV
- $\gamma$ by Excitation of Nuclei	310 MeV
- Not measurable E.g. Binding Energy	1430 MeV 5000 MeV

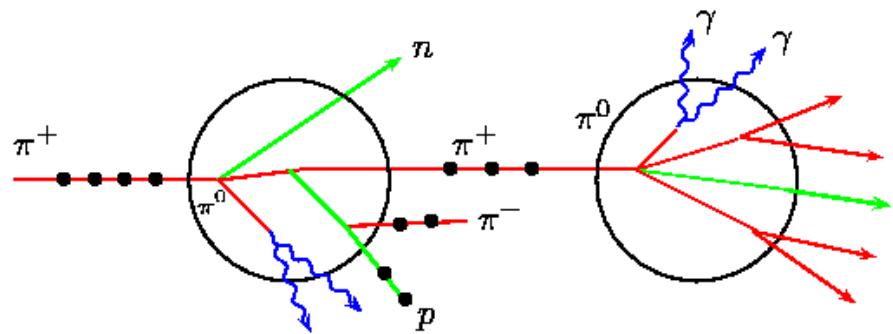
Distribution and local deposition of energy varies strongly.

Difficult to model hadronic showers, e.g. GEANT4 includes 0(10) different Models

# Hadronic Showers - The Nuclear Sector



## 1) Internuclear Cascade



-Interaction of incoming hadron with quasi free nucleons  
Strucked high energetic nucleons can escape the nucleon

**Fast Shower Component**

Nucleon with less energy remain bound in Nucleus

Nucleus is left in excited state

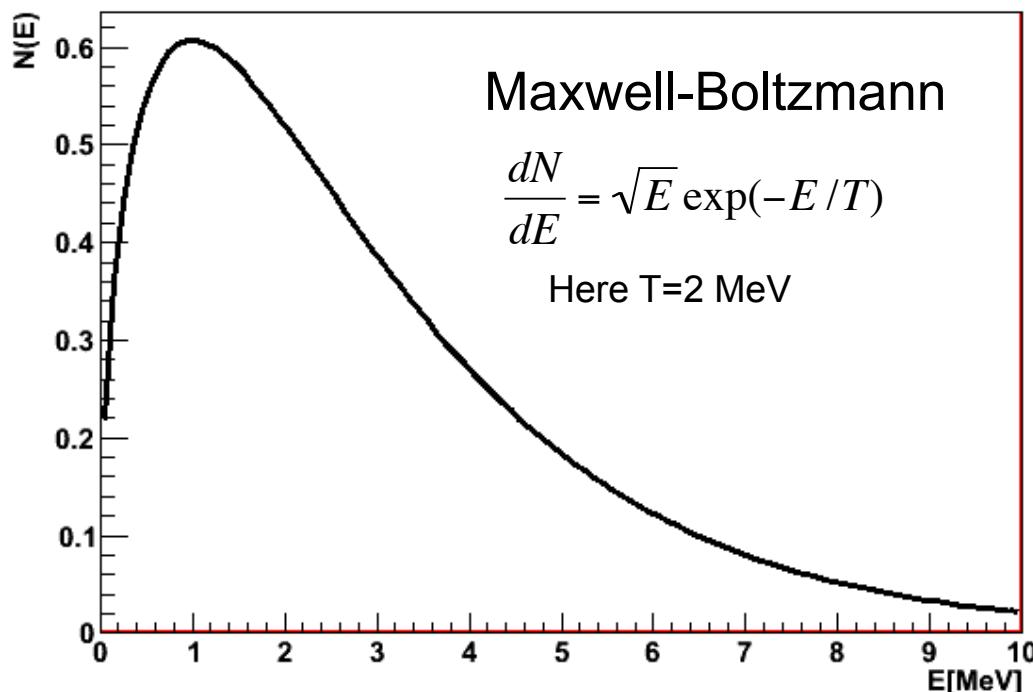
Dexcitation by Radiation of nucleons – Evaporation and/or nuclear fission

# Evaporation Neutrons

Nearly all evaporated nucleons are soft neutrons

De-excitation happens ~ns after nuclear interaction

Soft or Slow component of hadronic shower



Kinetic Energy  
Evaporated  
Neutrons have  
On average  
1/3 of nuclear binding  
energy

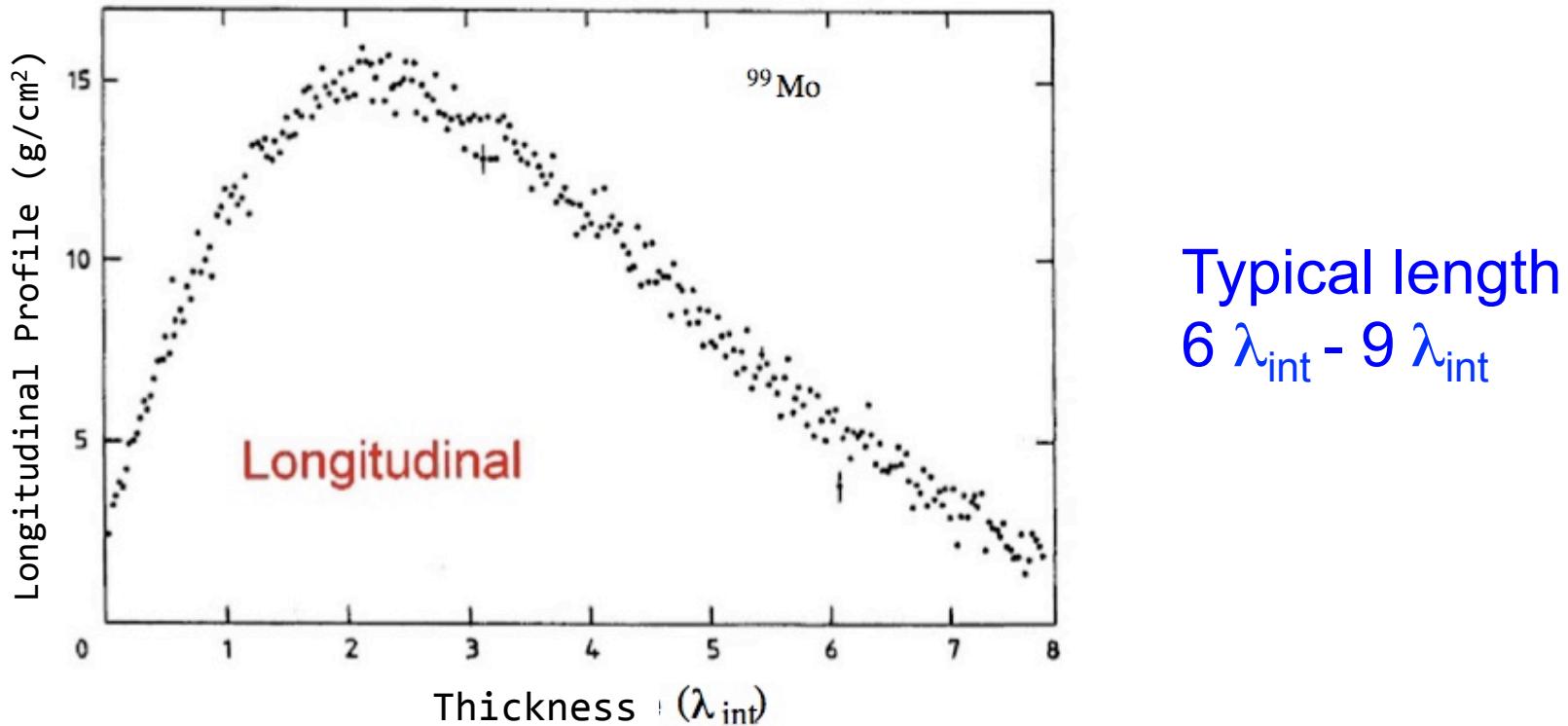
Number of neutrons produced in nuclear cascades are large

Some numbers: 20 Neutrons/GeV in Pb

60 Neutrons/GeV in  $^{238}\text{U}$ , slow or thermalized neutrons  
induce nuclear fission by neutron capture

# Longitudinal Shower Profiles

Signals from radioactive nuclei after 1 week exposure  
Of U stack to  $\sim 100$  Billion  $\pi$  of 300 GeV  
Longitudinal Profile is 'frozen' in U Stack



1)

Shape similar to electromagnetic showers

Shower extension much larger

Strong impact on design of calorimeters built for hadron  
Measurements - Hadron Calorimeters

# Semi-empirical model of hadron shower development

$$\frac{dE}{dS} = E_{INC} \left\{ \frac{Cx^{(\alpha_E-1)}e^{-x}}{\Gamma(\alpha_E)} \right\} + E_{INC} (1-C) \left\{ \frac{y^{(\alpha_H-1)}e^{-y}}{\Gamma(\alpha_H)} \right\}$$

electromagnetic  
part

hadronic part

$$x \equiv \beta_E \frac{(S - S_0)}{\chi_0}$$

radiation length

$$y \equiv \beta_H \frac{(S - S_0)}{\lambda}$$

interaction length

$$\alpha_H = \alpha_E = 0.62 + 0.32 \ln E$$

$$\beta_H = 0.91 - 0.02 \ln E$$

$$\beta_E = 0.22$$

$$C = 0.46$$

$S_0 \neq 0$  - significant amount of material in front of calorimeter  
(magnet coil etc.)

The processes are complex and a simple calculation is not possible.  
Monte Carlo based simulations yield empirical relation for the longitudinal and  
transverse shower development

# More Rules of Thumb for the Hobbyist

- Shower maximum

$$t_{\max}(\lambda) \sim 0.2 \ln E(GeV) + 0.7$$

- 95% Longitudinal containment

$$L_{95\%}(\lambda) \sim t_{\max} + 2.5 \lambda_{ATT}$$

$$\lambda_{ATT} \approx \lambda [E(GeV)]^{0.13}$$

- 95% Lateral containment

$$R_{95\%} \sim 1\lambda$$

- Mixtures in sampling calorimeters  
active + passive material

$$\frac{1}{\chi_{eff}} = \sum_i \frac{f_i}{\chi_0^i}$$

$$f_{act} = \frac{m_{act}}{m_{act} + m_{pass}}$$

$$\frac{\epsilon_{eff}^{crit}}{\chi_{eff}} = \sum_i f_i \frac{\epsilon_i^{crit}}{\chi_0^i}$$

$$\frac{E_{vis}}{E_{inc}} = f_{act} \frac{\epsilon_{act}^{crit} / \chi_0^{act}}{\epsilon_{eff}^{crit} / \chi_{eff}}$$

# Interazioni nucleari (forti)

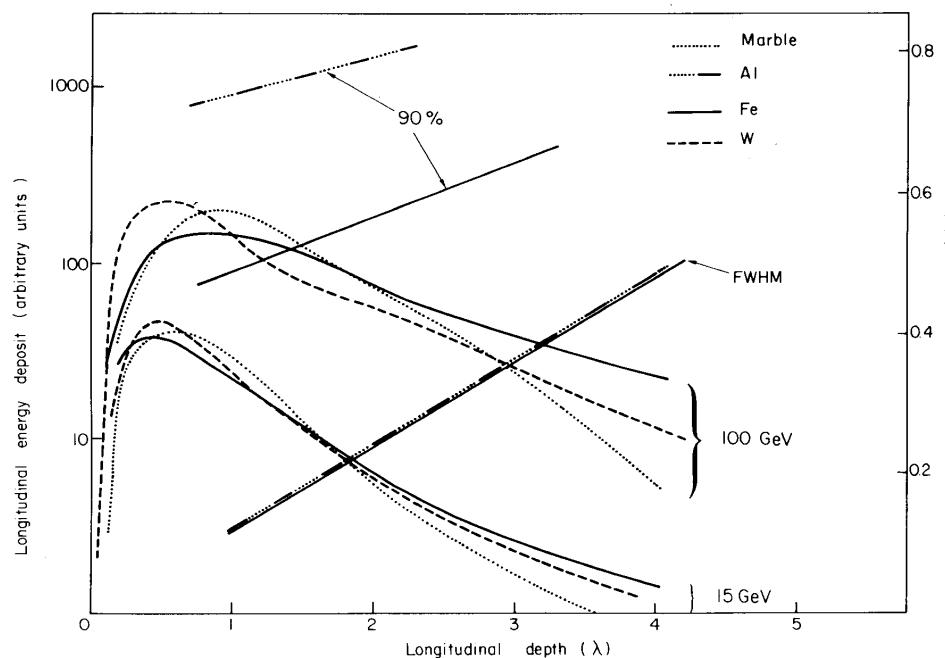
- Sviluppo longitudinale dello sciame

$$t_{\max}(\lambda_I) \approx 0.2 \ln E[GeV] + 0.7$$

Ferro:  $a = 9.4$ ,  $b=39$   
 $\lambda_a = 16.7$  cm

$$t_{95\%}(cm) \approx a \ln E + b$$

$E = 100$  GeV  
 $\rightarrow t_{95\%} \approx 80$  cm



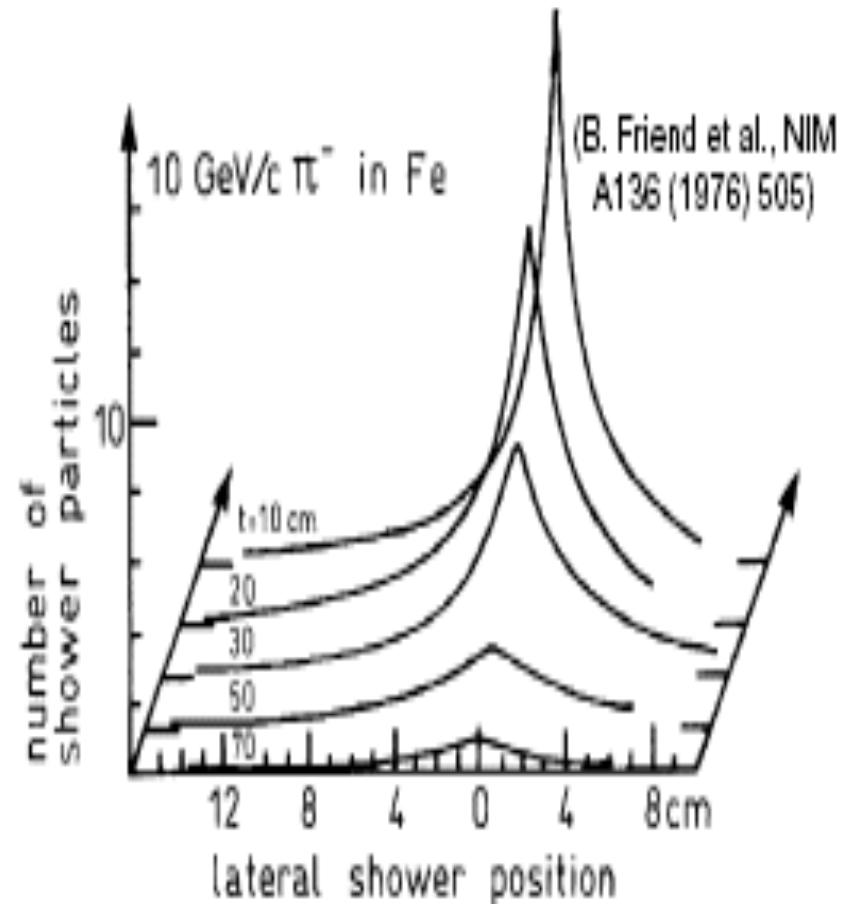
(C. Fabjan, T. Ludlam, CERN-EP/82-37)

## Interazioni nucleari (forti)

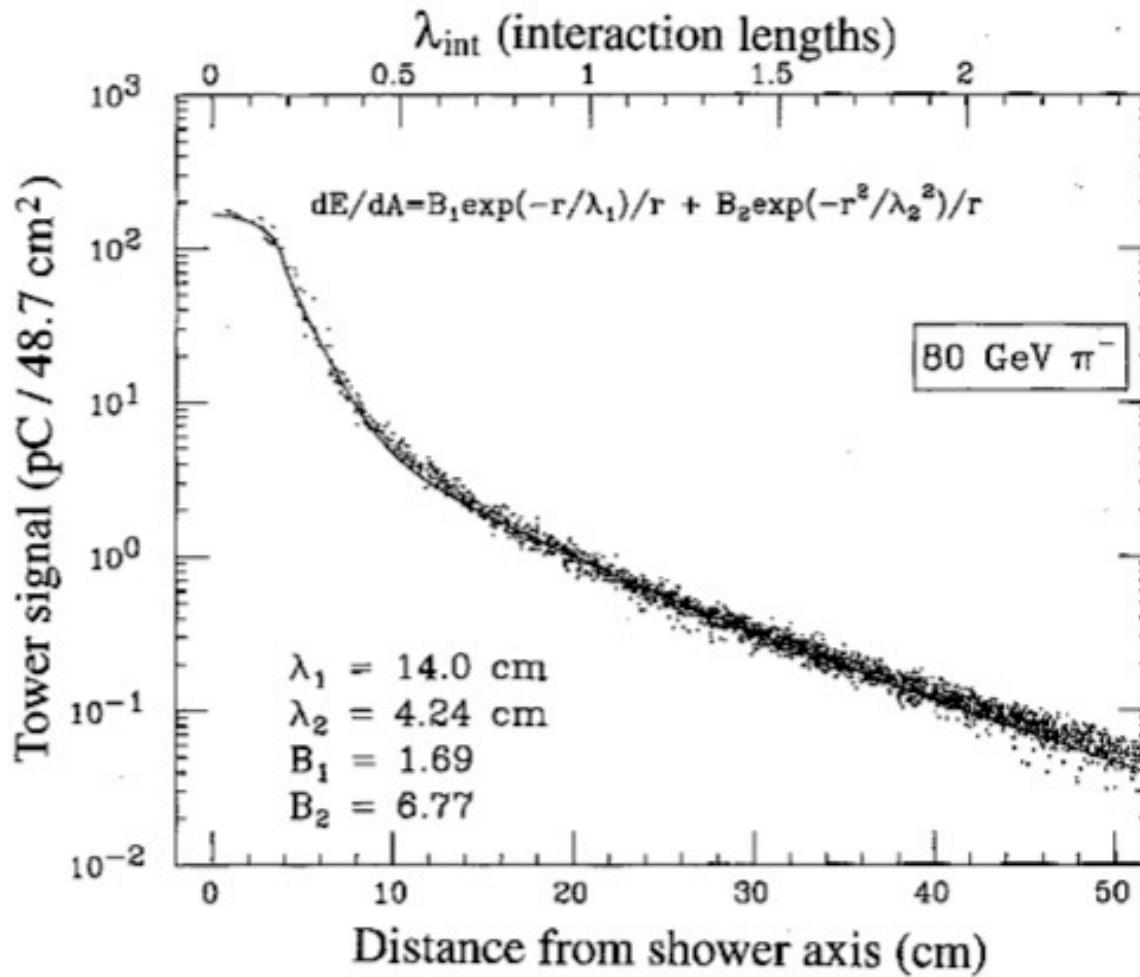
Trasversalmente lo sciame consiste in un nocciole + un alone.

Il 95% e' contenuto in un cilindro di raggio  $\lambda_1$ .

Gli sciami adronici sono molto più lunghi e più larghi di quelli elettromagnetici

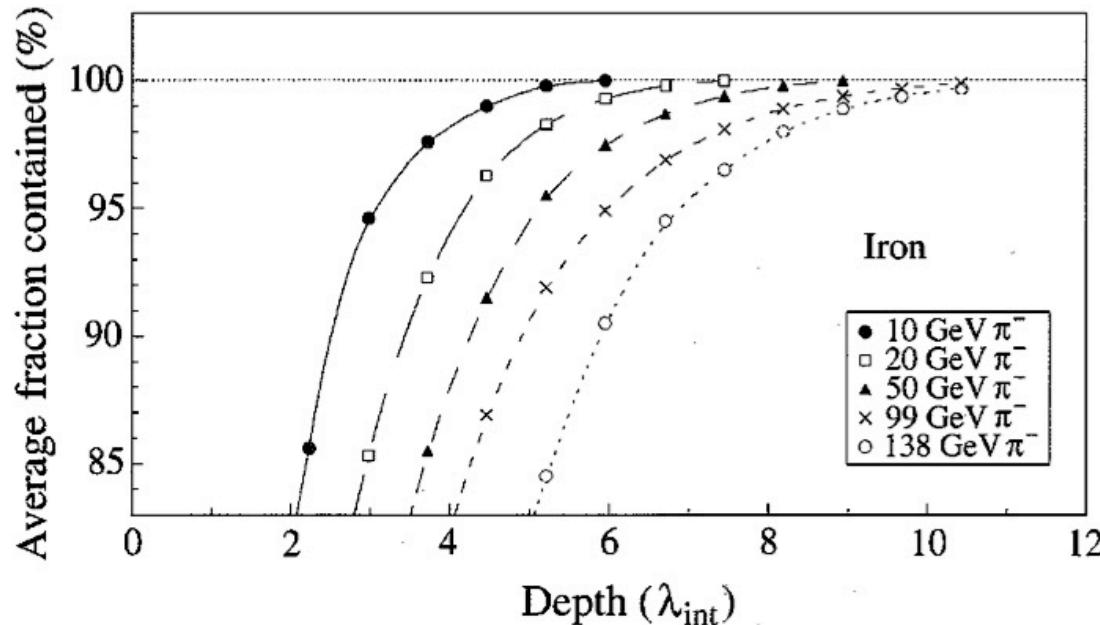


# Transversal Shower Profile



- Narrow core due to electromagnetic component
- Exponentially decreasing halo from non-elm. component

# Shower Containment

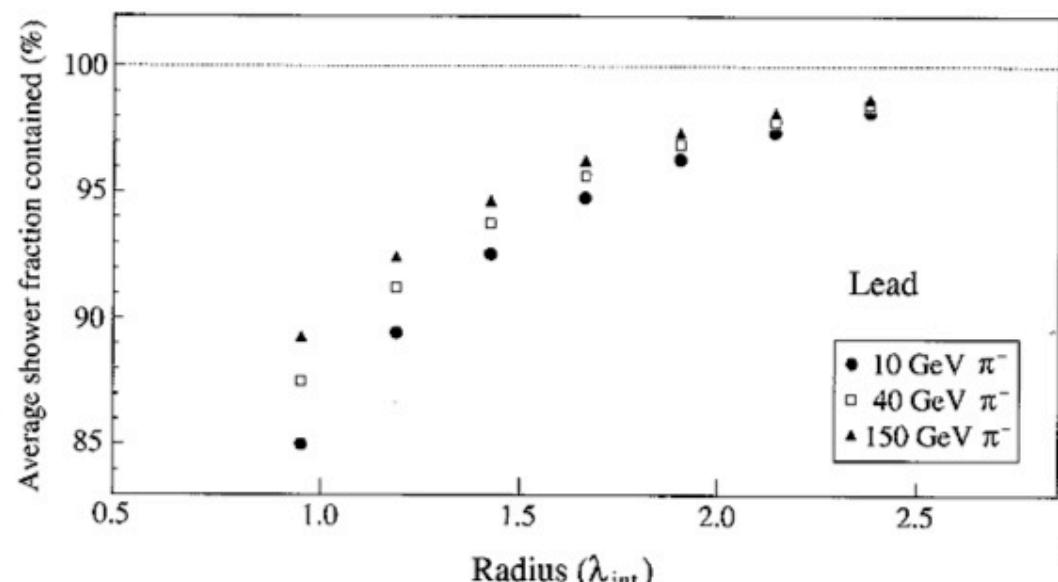


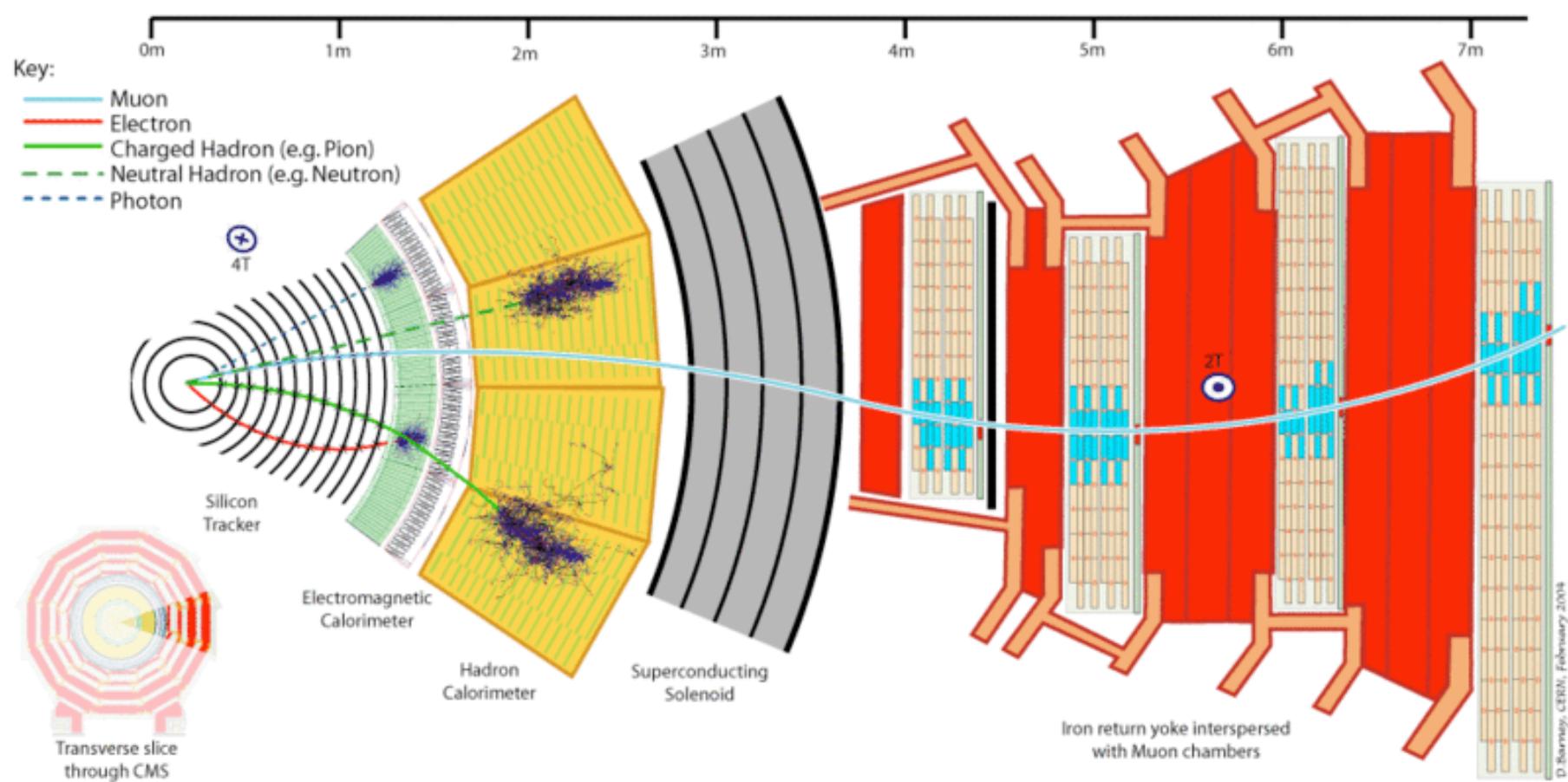
Longitudinal Containment

Shower absorbed  
after 9-10  $\lambda_{\text{int}}$

Lateral Containment

Shower absorbed  
after 3  $\lambda_{\text{int}}$





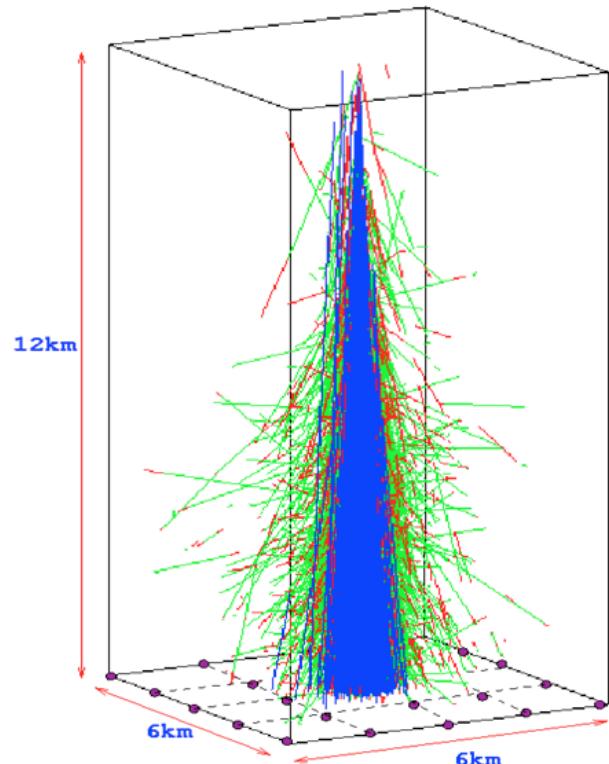
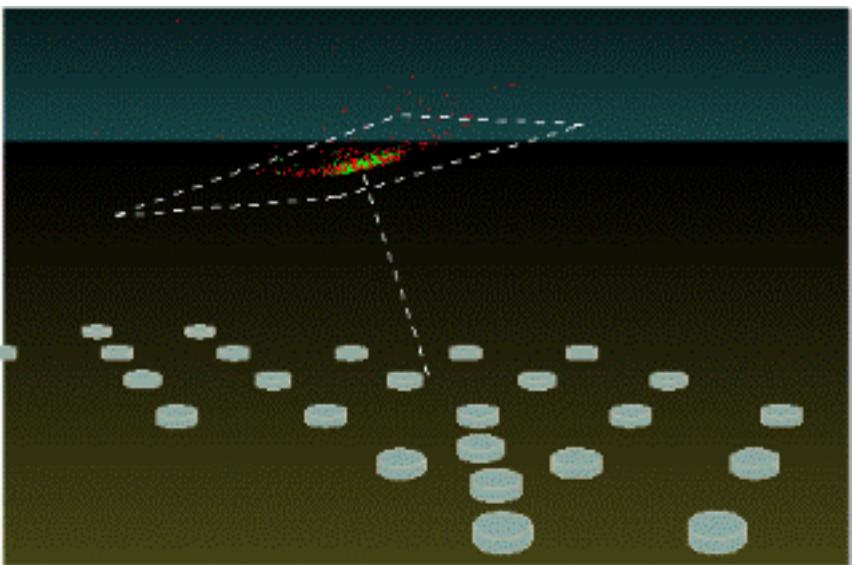
Le dimensioni del calorimetro adronico di CMS sono molto maggiori di quelle del calorimetro elettromagnetico

# CMS Hadron Calorimeter

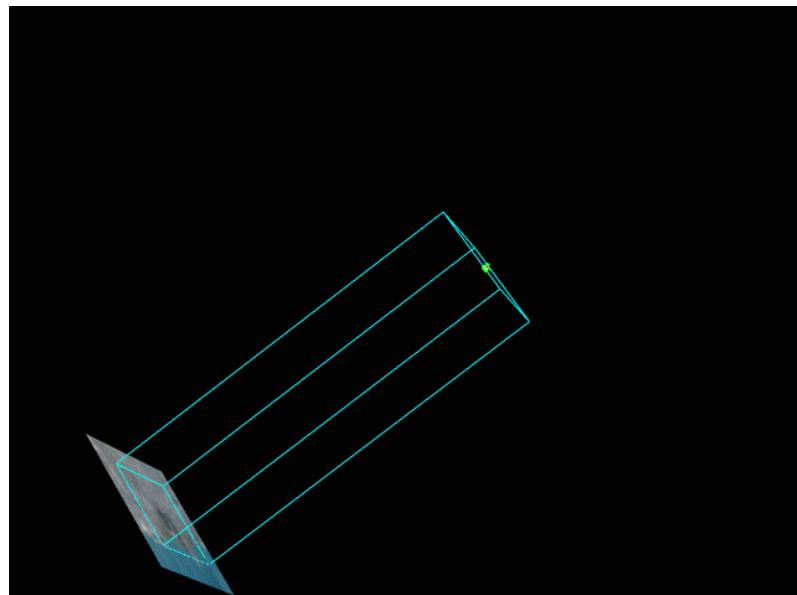


I raggi cosmici di altissima energia ( $10^{19}$  eV) vengono rivelati a terra usando l'atmosfera come convertitore: i raggi cosmici danno luogo a uno sciame adronico, in cui le particelle emettono luce cherenkov. Un array di rivelatori a terra la rivela. Necessarie grandissime superfici

Esperimento AUGER (Argentina)  
2000 km<sup>2</sup>



Nucleo di Fe che colpisce la sommita' dell'atmosfera



# Conclusioni

Abbiamo accennato a tutti i processi **e.m.** o **forti** che avvengono quando una particella carica (o no) attraversa la materia (**escludendo il neutrino**), tutti processi **utili** per costruire i rivelatori.

Da un punto di vista puramente strumentale possiamo suddividere i processi in **non distruttivi** e **distruttivi**:

- **Distruttivi:**
  - **produzione di sciami elettromagnetici e adronici.** Questi processi sono utili per misurare l'energia della particella ( $e^\pm, \gamma \rightarrow$  **calorimetri elettromagnetici**); (**adroni e  $\mu \rightarrow$  calorimetri adronici**). È ovvio che la parte distruttiva dell'apparato sperimentale deve stare dopo i rivelatori non distruttivi
  - Assorbimento di fotoni (fotoelettrico, compton, prod di coppie)
- **Non distruttivi:**
  - o Perdita di energia per collisione (**Bethe-Block**) (**misuro il  $\beta$  o il  $\gamma$  della particella carica**).
  - o Effetto Čerenkov (**misuro il  $\beta$  della particella carica**).
  - o Radiazione di transizione (**misuro il  $\gamma$  della particella carica**).

Tutti e tre i processi non distruttivi possono essere usati per identificare la particella, ed il primo (perdita di energia per collisione) è più spesso usato per misurare la posizione della particella carica

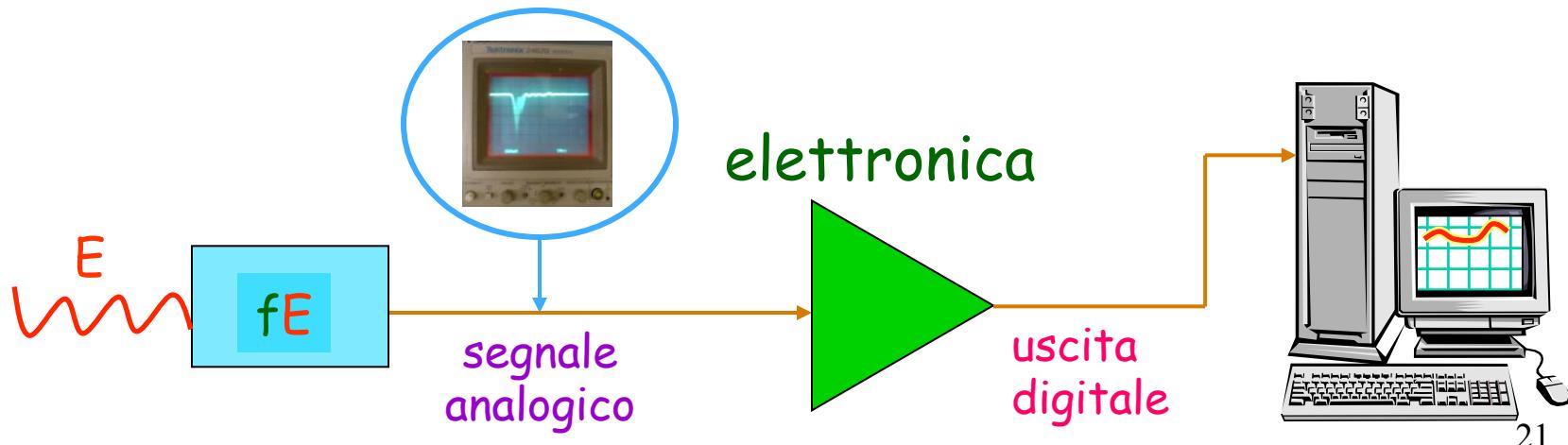
# Proprieta' generali dei rivelatori di particelle

*A prescindere dalle differenti caratteristiche operative di ciascun tipo di rivelatore, ci sono proprieta' generali che tutti i tipi condividono.*

# Caratteristiche degli apparati

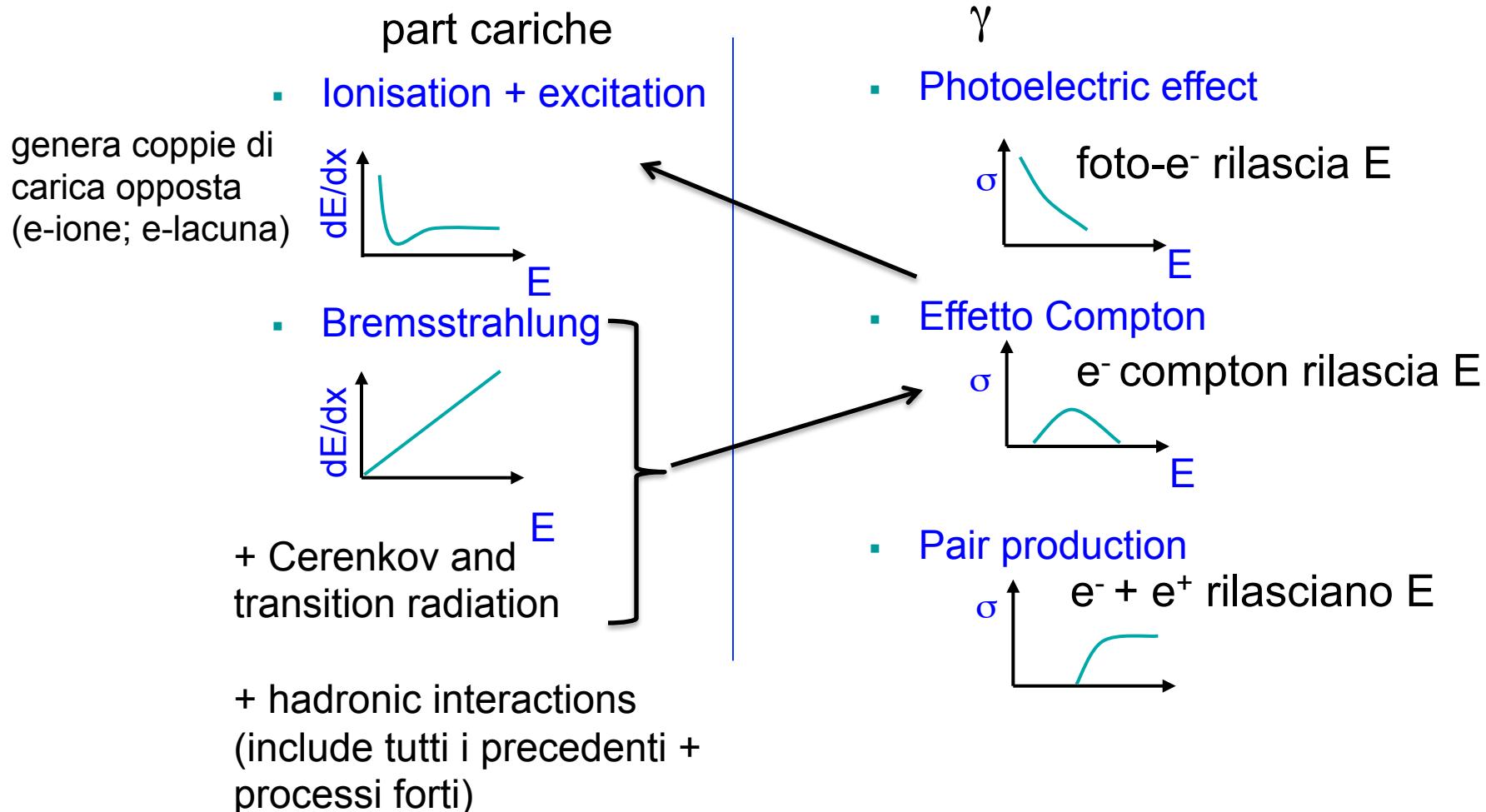
Principio di funzionamento generale di un rivelatore  
particella di **energia E** → trasferimento di energia **fE**  
( $f \leq 1$ ) al rivelatore → conversione in **form**a di  
**energia accessibile**

Rivelatori moderni sono essenzialmente elettrici: **f E** convertita in **impulsi elettrici** → necessaria **elettronica** per il trattamento dell'info



# Caratteristiche degli apparati

Il trasferimento di energia avviene tramite uno dei processi fisici rilevanti



**Alla fine, qualunque sia il processo, si finisce con particelle cariche che ionizzano o eccitano il mezzo attivo del rivelatore**

# **Caratteristiche degli apparati**

**Particelle cariche** → collisioni con gli **e** atomici → ionizzazione, eccitazione degli atomi, emissione di fotoni.

**Particelle neutre** → interazioni nel materiale → produzione di particelle cariche → ionizzazione od eccitazione degli atomi.

Alla fine per poter essere misurata l'energia depositata nel rivelatore deve essere convertita in un segnale elettrico: corrente, carica, tensione.

Il modo in cui l'energia convertita viene rivelata dipende dall'apparato e dalla misura che si vuole fare.

# **Caratteristiche degli apparati**

- **Rivelatori a ionizzazione** → si raccoglie direttamente la carica rilasciata sotto forma di un segnale di corrente.
- **Scintillatori** → sia l'eccitazione che la ionizzazione degli atomi contribuiscono a produrre eccitazioni molecolari che danno come risultato l'emissione di luce.
- **Emulsioni fotografiche** → la ionizzazione induce processi chimici che permettono di formare un' immagine.

Quasi tutti gli apparati del giorno d'oggi danno una risposta di natura elettrica, ovvero ad un certo punto l'informazione viene trasformata in un impulso elettrico che puo' essere trattato elettronicamente.

# **Caratteristiche degli apparati**

Qualunque sia la misura che si vuole effettuare con un "rivelatore" le proprietà fondamentali sono:

- i. Funzione di Risposta**
- ii. Sensibilità**
- iii. Risoluzione**
- iv. Efficienza, accettanza geometrica**
- v. Tempi caratteristici**

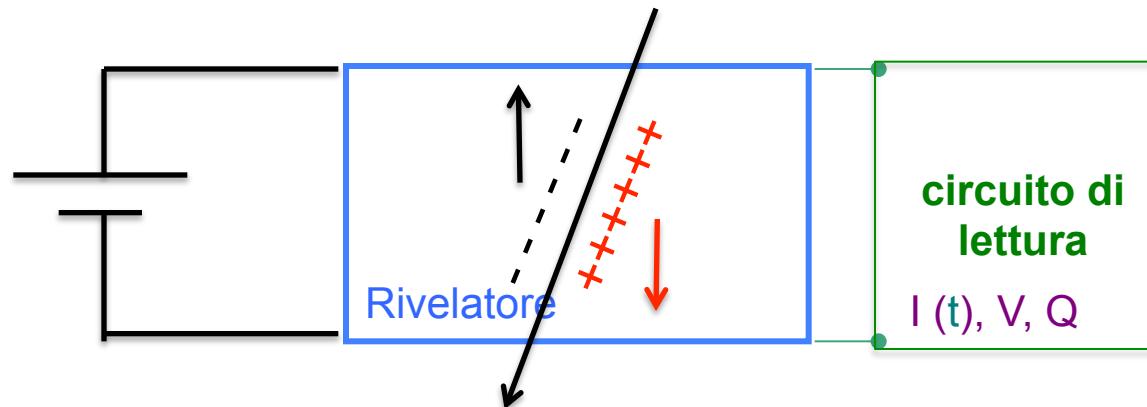
# Caratteristiche degli apparati

L'interazione di una particella nel rivelatore causa il rilascio (quasi istantaneo\*\*) di energia nel volume sensibile del rivelatore.

Il risultato netto dell'interazione e' l'apparizione di una carica elettrica  $Q$  e/o luce –che deve essere trasformata in carica- all'istante  $t=0$ .

La carica  $Q$  deve essere raccolta per formare il segnale elettrico da un circuito di lettura/raccolta (strettamente vero solo per rivelatori in cui la carica e' creata direttamente, ma applicabile anche a rivelatori in cui la carica e' formata indirettamente, come nel caso dei fotoni).

Tipicamente la raccolta e' effettuata tramite un campo elettrico nel volume attivo del rivelatore, che fa migrare le cariche positive e negative, create dalla ionizzazione, in direzioni opposte verso i terminali di raccolta.



The time required to stop a charged particle in an absorber can be deduced from its range and average velocity. For nonrelativistic particles of mass  $m$  and kinetic energy  $E$ , the velocity is

\*\*

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = c \sqrt{\frac{2E}{mc^2}} = \left(3.00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \sqrt{\frac{2E}{(931 \text{ MeV/amu})m_A}}$$

where  $m_A$  is the particle mass in atomic mass units and  $E$  is the particle energy in MeV. If we assume that the average particle velocity as it slows down is  $\langle v \rangle = Kv$ , where  $v$  is evaluated at the initial energy, then the stopping time  $T$  can be calculated from the range  $R$  as

$$T = \frac{R}{\langle v \rangle} = \frac{R}{Kc} \sqrt{\frac{mc^2}{2E}} = \frac{R}{K(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})} \sqrt{\frac{931 \text{ MeV/amu}}{2}} \sqrt{\frac{m_A}{E}}$$

If the particle were uniformly decelerated, then  $\langle v \rangle$  would be given by  $v/2$  and  $K$  would be 0.5. However, charged particles generally lose energy at a greater rate near the end of their range, and  $K$  should be a somewhat higher fraction. By assuming  $K = 0.60$ , the stopping time can be estimated as

$$T \approx 1.2 \times 10^{-7} R \sqrt{\frac{m_A}{E}} \quad (2.3)$$

expected to be reasonably accurate for light charged particles (protons, alpha particles, etc.) over much of the energy range of interest here. It is not, however, to be used for relativistic particles such as fast electrons.

Using typical range values, stopping times calculated from Eq. (2.3) for charged particles are a few picoseconds in solids or liquids and a few nanoseconds in gases. These times are generally small enough to be neglected for all but the fastest-responding radiation detectors.

# Caratteristiche degli apparati

## *Risposta del rivelatore*

Il segnale dell'apparato è trasformato in genere in un segnale in tensione tramite l'uso di un amplificatore o di un circuito elettrico di lettura.

***In generale è chiamata risposta dell'apparato la relazione fra l'energia rilasciata e la carica totale od altezza d'impulso del segnale di uscita.***

**Idealmente** : risposta lineare con l'energia.

**In pratica** : la risposta dipende dal tipo di particella, dall'interazione, da fenomeni di saturazione, cattura e assorbimento dei portatori, distorsioni del campo,...

Ad esempio uno scintillatore organico dà una risposta lineare fino a basse energie per elettroni, mentre non è lineare per protoni. O ancora, se la densità di carica di ionizzazione è sufficientemente elevata, il campo elettrico esterno può essere distorto, si possono avere effetti di plasma e così via.

# Caratteristiche degli apparati

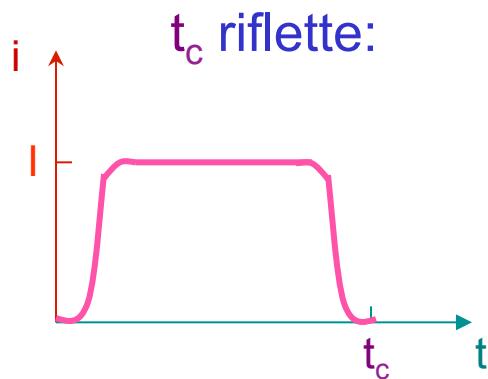
## Risposta dell'apparato.

In generale una particella viene rivelata misurando la carica **Q** liberata al passaggio della particella (**t=0**).

Questa carica viene guidata verso un elettrodo di raccolta da un campo elettrico. Il tempo **t<sub>c</sub>** di raccolta della carica può variare dai **ns** (fotomoltiplicatori) ai **ms** (camere ad ionizzazione) ed è intrinseco del rivelatore.

Si avrà un segnale di corrente **i(t)** dal tempo **t=0** fino al tempo **t=t<sub>c</sub>** e l'integrale di questa corrente è la carica totale generata **Q<sub>s</sub>**.

$$Q_s = \int_0^{t_c} dt \ i(t)$$



- ✓ diversa **mobilità** dei portatori di carica
- ✓ diverso **cammino** percorso per arrivare all' elettrodo di raccolta

**risposta del rivelatore: impulso di corrente, eventualmente integrato per avere Q**

Ionization cylinder

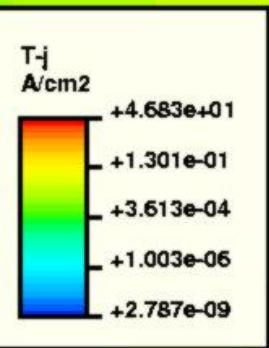
Ground

Intrinsic collection time  
is  $O(\text{tens of ns})$

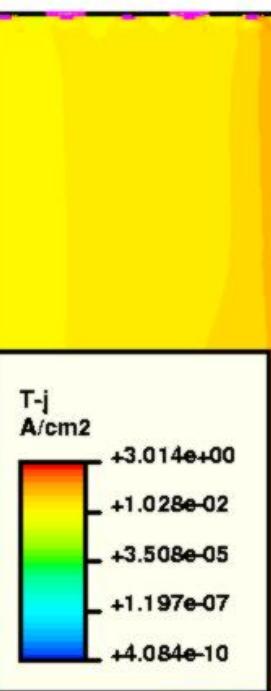
$t=5 \text{ ns}$

Time evolution of  
current

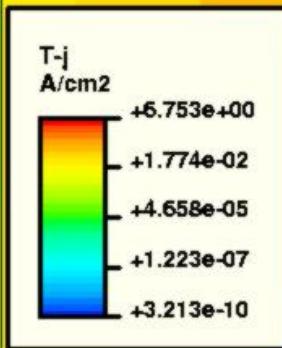
300  $\mu\text{m}$  Silicon layer



$t=0$



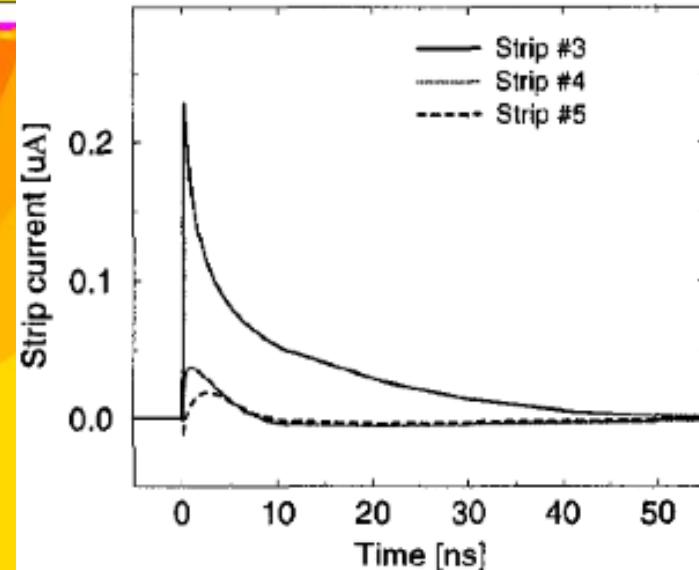
$t=12 \text{ ns}$



$V_{\text{bias}}$

$t=30 \text{ ns}$

Nei casi reali, l'impulso di corrente  
ha un andamento piu' complesso,  
con uno sviluppo temporale  
caratteristico che dipende dal  
materiale, campo E, ...



# Caratteristiche degli apparati

Il segnale di corrente e la carica totale sono in genere PICCOLI.

Per esempio prendiamo una MIP che attraversa uno spessore  $x$  di Si e di Xe.

Per una MIP

$$\frac{dE}{d\ell} = \begin{cases} 1.664 & \text{Si MeV/g cm}^{-2} \\ 1.255 & \text{LXe} \end{cases}$$

$$E = \rho x \Rightarrow \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{cm}} = \rho \frac{dE}{d\ell} = \begin{cases} 3.88 & \text{Si MeV/cm} \\ 3.70 & \text{LXe} \end{cases}$$

Effective ionisation energy

$$W = \begin{cases} 3.6 & \text{Si eV} \\ 25 & \text{LXe} \end{cases} \Rightarrow \frac{dN}{dx} = \frac{(dE/dx)}{W} = \begin{cases} 1.1 \times 10^6 & \text{Si \# coppie/cm} \\ 0.15 \times 10^6 & \text{LXe} \end{cases}$$

Quindi

$$Q = eN \Rightarrow \frac{dQ}{dx} = e \frac{dN}{dx} = \begin{cases} 1.76 \times 10^{-13} & \text{Si c/cm} \\ 2 \times 10^{-14} & \text{LXe} \end{cases}$$

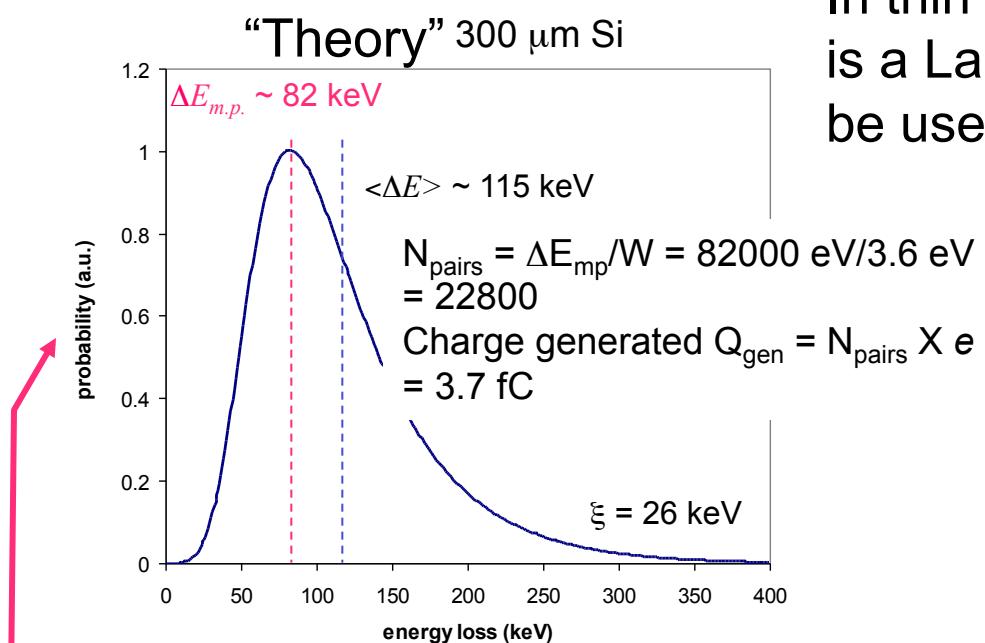
$$\text{Tipicamente } \Delta x = \begin{cases} 300 \mu\text{m Si} \\ 1 \text{ cm LXe} \end{cases} \Rightarrow Q \approx \frac{dQ}{dx} \Delta x = \begin{cases} 5.3 \times 10^{-15} & \text{Si Coulomb} \\ 2 \times 10^{-14} & \text{Xe} \end{cases}$$

$$\text{Tempo di raccolta } t_c \sim \begin{cases} 10 \text{ ms Si} \\ > 1 \mu\text{s Xe} \end{cases} \Rightarrow I \sim \frac{Q}{t_c} = \begin{cases} 5 \times 10^{-7} & \text{Si A} \\ 2 \times 10^{-8} & \text{LXe A} \end{cases}$$

per  $t < t_c = 10 \text{ ms}$   
per  $t < t_c \sim 1 \mu\text{s}$

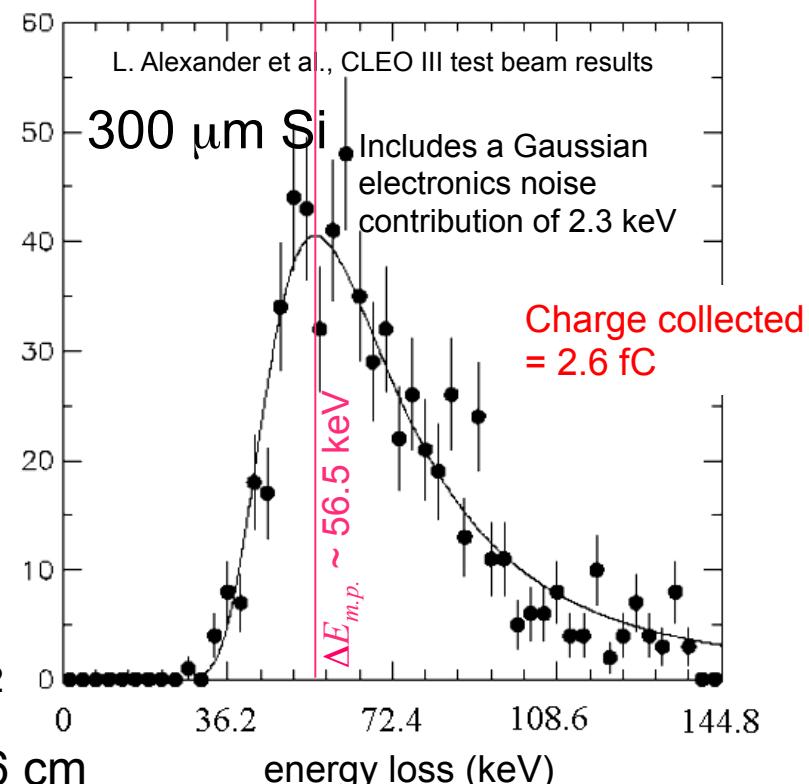
Necessaria in genere un'amplificazione del segnale!

# For thin layers, Landau fluctuations make things even harder



In thin layers, where the energy distribution is a Landau, the most probable  $\Delta E_{\text{mp}}$  is to be used in place of  $\Delta E_{\text{ave}}$

**BUT charge collection is not 100%**



Landau's theory J. Phys (USSR) 8, 201 (1944)

$$f(x, \Delta E) = \frac{1}{\xi} \Omega(\lambda) \quad \Omega(\lambda) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\lambda + e^{-\lambda})\right\}$$

$$\lambda = \frac{\Delta E - \Delta E_{\text{m.p.}}}{\xi}$$

$$x \text{ (300 } \mu\text{m Si)} = 69 \text{ mg/cm}^2$$

$$\xi = \frac{2\pi Ne^4}{m_e v^2} \frac{Z}{A} x \quad \text{Cfr. } X_0 = 21.82 \text{ g/cm}^2 \text{ o } 9.36 \text{ cm}$$

Charge generated is small, charge collected is even smaller

# *Caratteristiche degli apparati*

**Sensibilità** = capacità di produrre un segnale utilizzabile per un dato tipo di particella in un certo intervallo di energia.

Nessun apparato è sensibile a tutte le particelle a tutte le energie. Ciascuno è disegnato per essere sensibile a certi tipi di particelle in un intervallo di energia definito fra  $E_{\min} < E < E_{\max}$ .

La **sensibilità** di un rivelatore (studiato per una certa misura) dipende da:

- Sezione d'urto per la reazione (e.g. ionizzazione)
- Massa del rivelatore
- Rumore e fondo del rivelatore
- Materiale (passivo) intorno al rivelatore

# Caratteristiche degli apparati

La sezione d'urto e la massa dell'apparato determinano la probabilità che la particella incidente converta parte ( o tutta ) della sua energia in segnale utile (p.es. ionizzazione). Per vederlo, calcoliamo la relazione fra conteggi (cioe' # di interazioni nel rivelatore) al secondo e massa e sezione d'urto

Il rate di interazione per unita' di volume e'  $dn/dt = n_p n_b \sigma v (m^{-3}s^{-1})$

Quindi il rate totale e'  $dN/dt = \int dV (dn/dt) = (n_p v) (V n_b) \sigma = j_p (V \rho_b / m_b) \sigma$

dove  $j_p = n_p v$  e' il flusso incidente,  $n_b = \rho_b / m_b$  e' la densita' numerica dei bersagli e  $V$  e' volume del rivelatore (NB:  $m_b = A / N_A$ )

Poiche'  $V \rho_b = M_b$  massa totale del materiale "bersaglio", si ha

$dN/dt = j_p (M_b / m_b) \sigma$  ovvero  $R = (1/j_p)(dN/dt) = (M_b / m_b) \sigma$

Se  $R \ll 1$ , il rivelatore e' essenzialmente trasparente alle particelle, cioe' solo poche rilasciano energia  $\rightarrow$  scarsa sensibilita'

Per avere buona sensibilita' e' necessario (ma non sempre sufficiente) avere

$R \approx 1$

# **Caratteristiche degli apparati**

$$dN/dt = j_p (M_b/m_b) \sigma$$

**Particelle cariche** sono fortemente ionizzanti, cioe' la sez. d'urto e' grande (barn) → basta apparato di bassa densità densità e/o "piccola" massa .

**Particelle neutre** devono interagire e convertire in particelle cariche, le sez. d'urto sono piu' piccole (~mb) → serve più massa altrimenti l'apparato è trasparente alla particella.

**Neutrini o neutrino-like** interagiscono pochissimo (~pb) → apparato di tonnellate