

Particle Detectors

Lecture 11

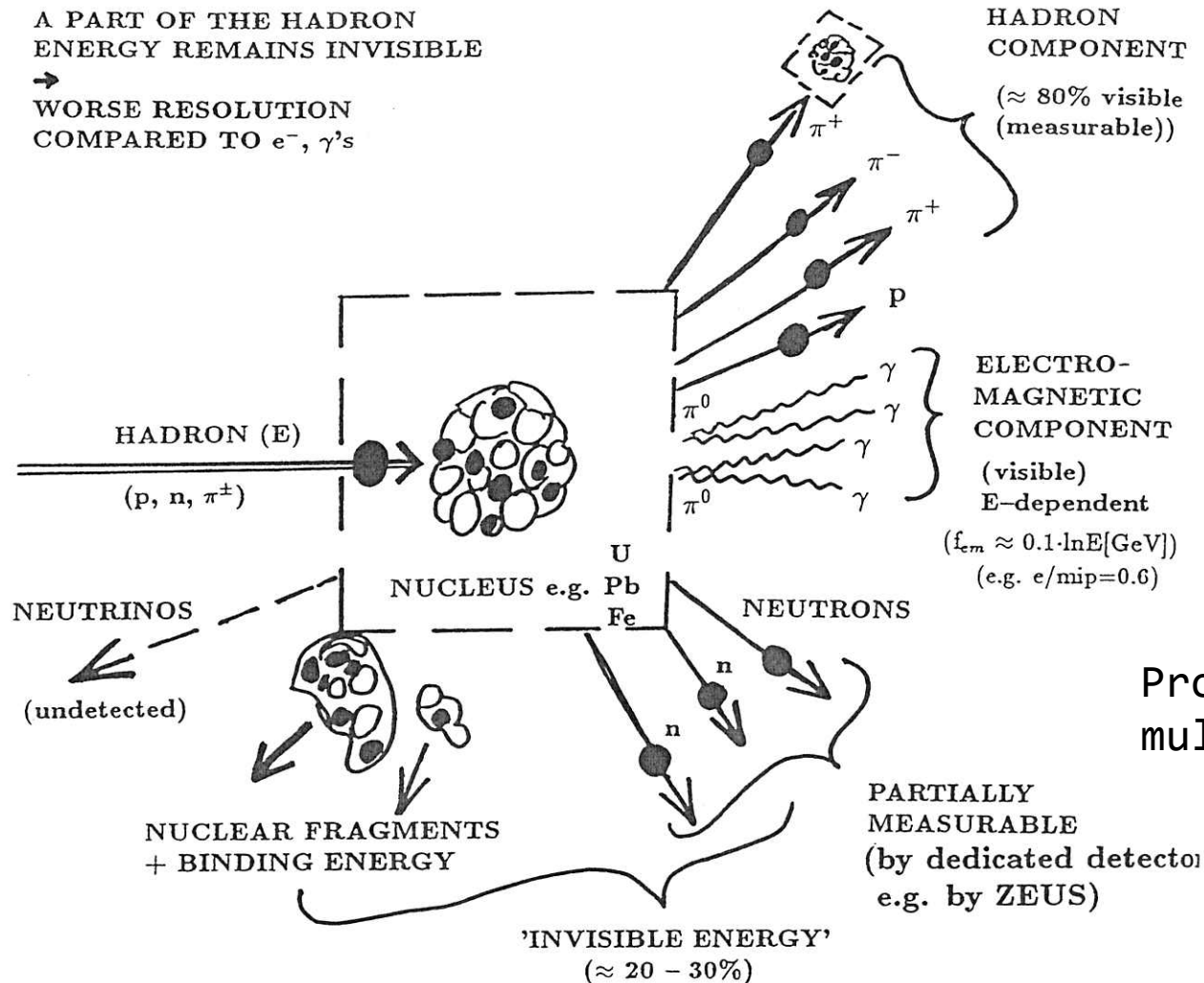
20/04/18

a.a. 2017-2018

Emanuele Fiandrini

Hadronic Showers

'ELEMENTARY PROCESS' IN A HADRON SHOWER



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.

E. Fiandrini Rivelatori di particelle

Interazioni nucleari (forti)

Nello sviluppo dello sciame sono presenti due componenti:

Adronica

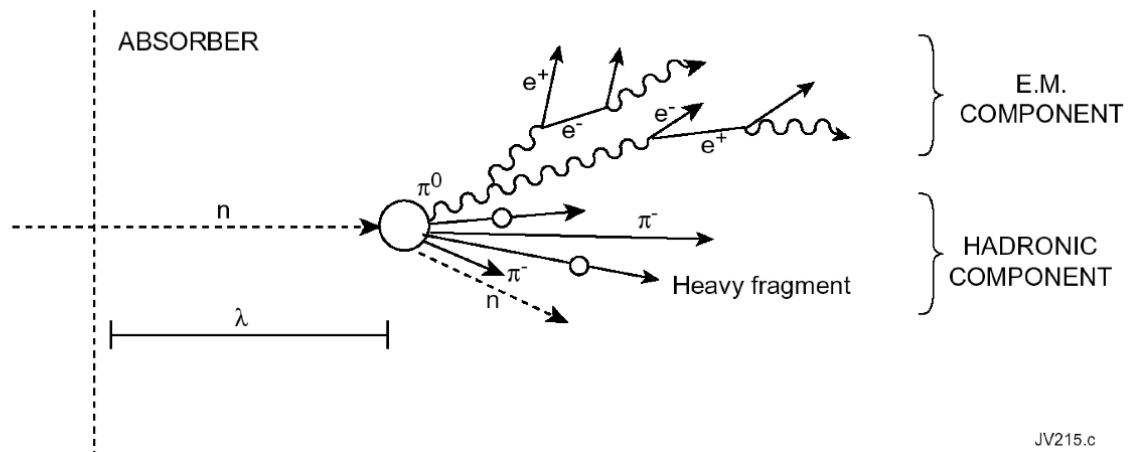
+

Componente e.m.



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

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



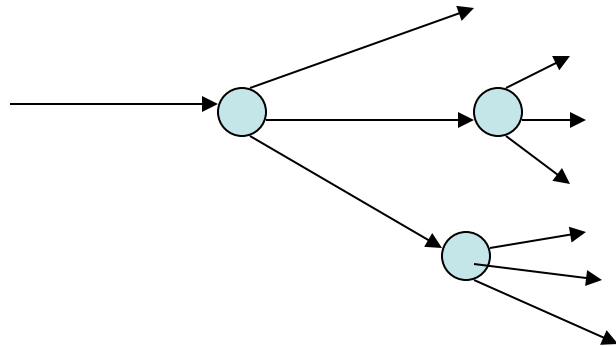
JV215.c

Larghe fluttuazioni dell'energia \rightarrow risoluzione in energia limitata

Hadronic Shower

-the electromagnetic component

Simplified model - only π produced



π 's are isotriplet π '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 interaction

After b generations of interactions

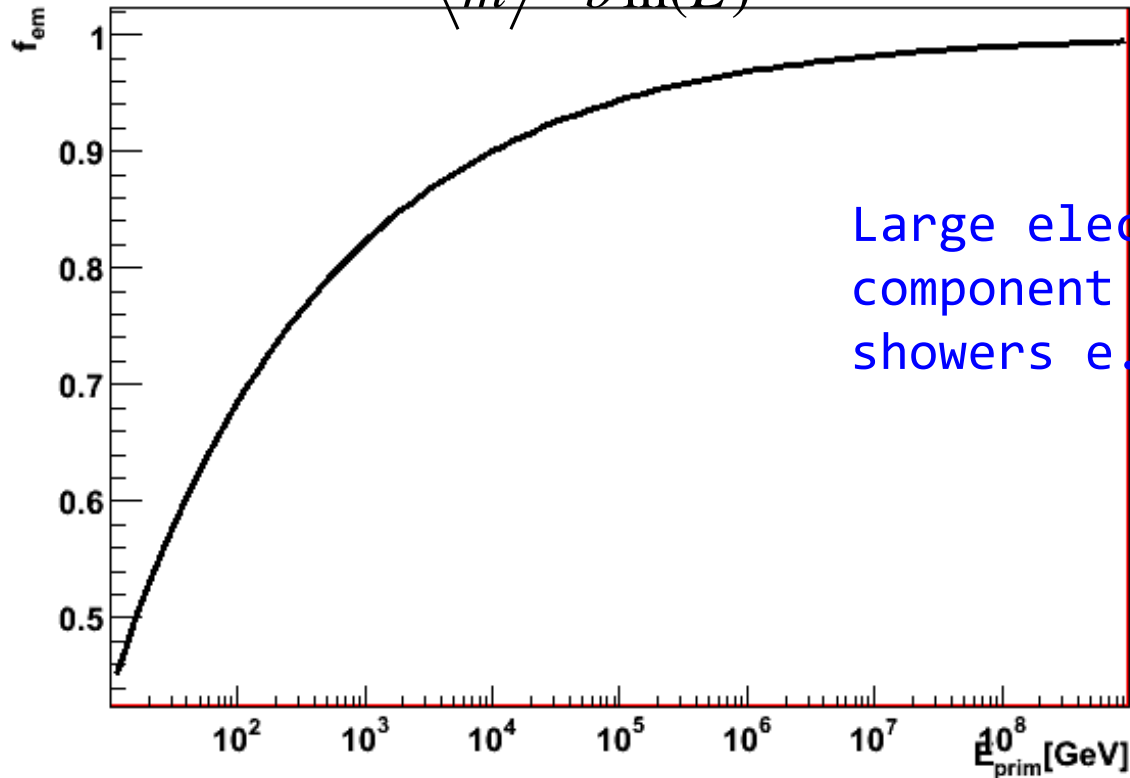
$$f_{\pi^0} = f_{em} = 1 - \left(1 - \frac{1}{3}\right)^b$$

Electromagnetic Component increases with increasing energy of primary particle $f_{em} \approx 0.11 \ln E [\text{GeV}]$

f_{em} as a function of the energy

Reality: $f_{em} = 1 - \langle m \rangle^a$ $\langle m \rangle$ Average multiplicity per interaction
a Slope Parameter

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



Large electromagnetic component in high energy showers e.g. Cosmic Air Showers

Attention - Production of π^0 is a statistical process

At small energies: Small multiplicity

Large statistical fluctuations in production of π 'species'

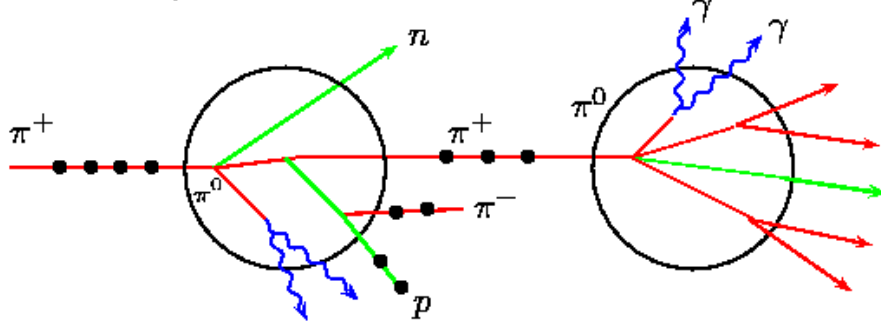
⇒ Large fluctuations of electromagnetic component of shower

Hadronic Showers

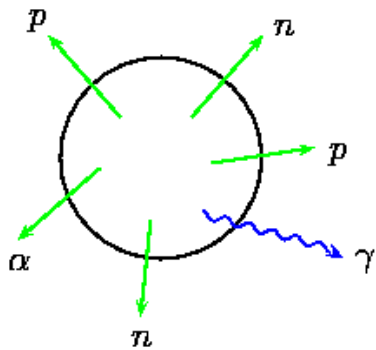
Hadronic Showers are dominated by strong interaction!

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

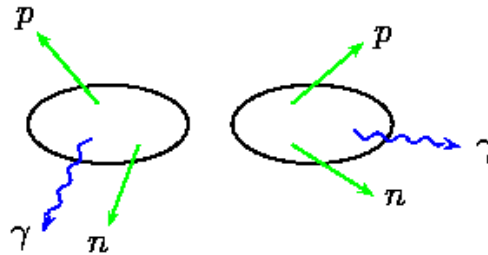
1st Step: Intranuclear Cascade



2nd Step: Highly excited nuclei
Evaporation



Fission followed by
Evaporation



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 |
| - γ 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

Further Reading:

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

R. Wigman NIM A259 (1987) 389

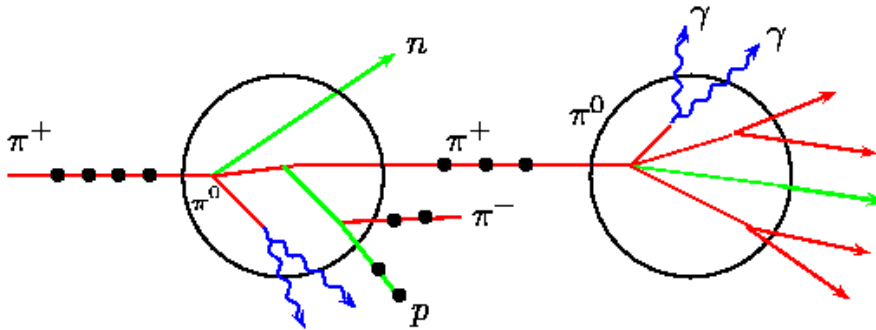
E. Fiandrini Rivelatori di particelle

Hadronic Showers - The Nuclear Sector

Spallation Reaction

- Internuclear Cascade
- Evaporation by excited nucleon

1) Internuclear Cascade



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

Fast Shower Component

Nucleon with less energy remain bound in Nucleus

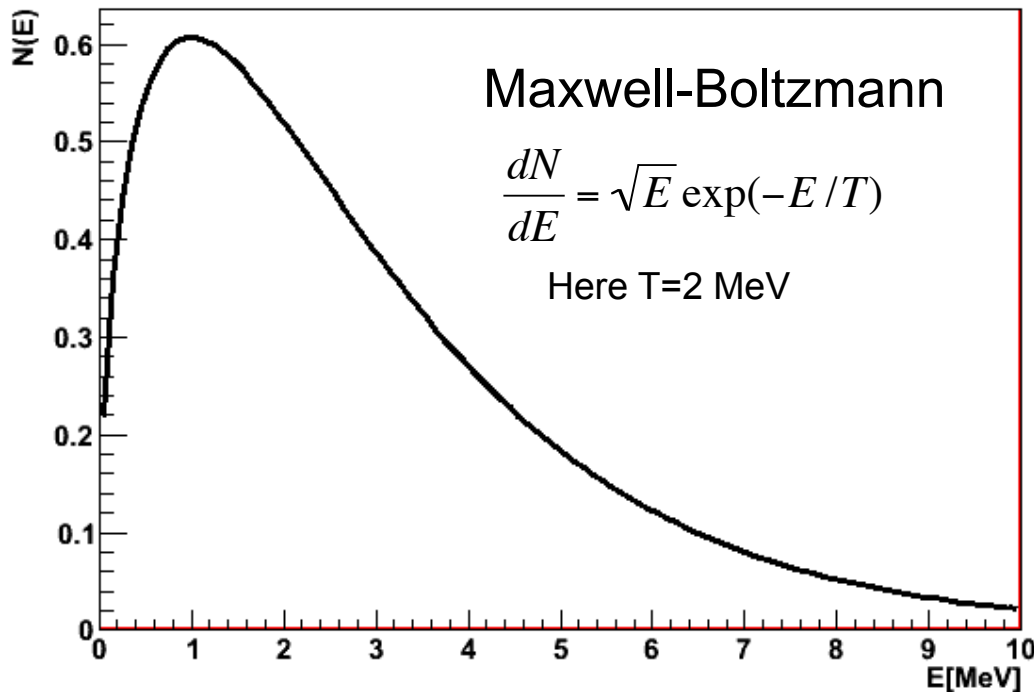
Nucleus is left in excited state

Deexcitation 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

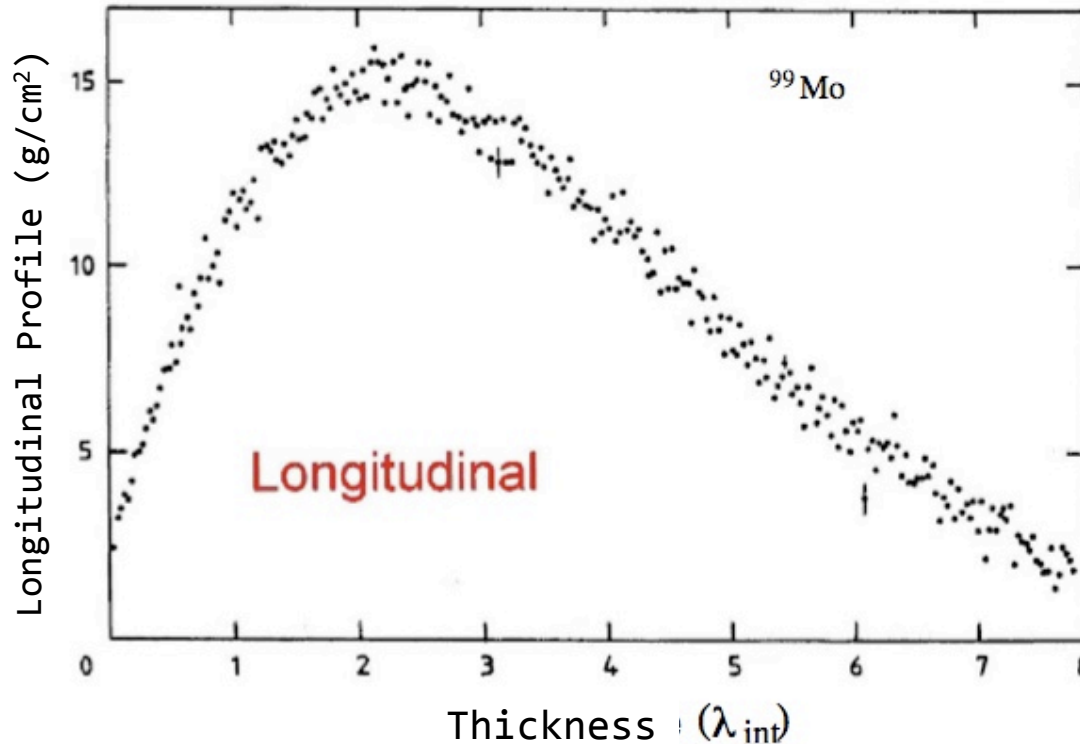
Some numbers: 20 Neutrons/GeV in Pb

60 Neutrons/GeV in ^{238}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 ~ 100 Billion π of 300 GeV

Longitudinal Profile is 'frozen' in U Stack



Typical length
 $6 \lambda_{\text{int}} - 9 \lambda_{\text{int}}$

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

$$x \equiv \beta_E \frac{(S - S_0)}{\chi_0} \quad \text{radiation length}$$

$$y \equiv \beta_H \frac{(S - S_0)}{\lambda} \quad \text{interaction length}$$

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

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

$$\beta_E = 0.22$$

$$C = 0.46$$

$S_0 \neq 0$ - 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

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

- 95% Longitudinal containment

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

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

- 95% Lateral containment

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

- Mixtures in sampling calorimeters
active + passive material

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

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

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}}^{\text{crit}}}{\chi_{\text{eff}}} = \sum_i f_i \frac{\varepsilon_i^{\text{crit}}}{\chi_0^i}$$

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

Interazioni nucleari (forti)

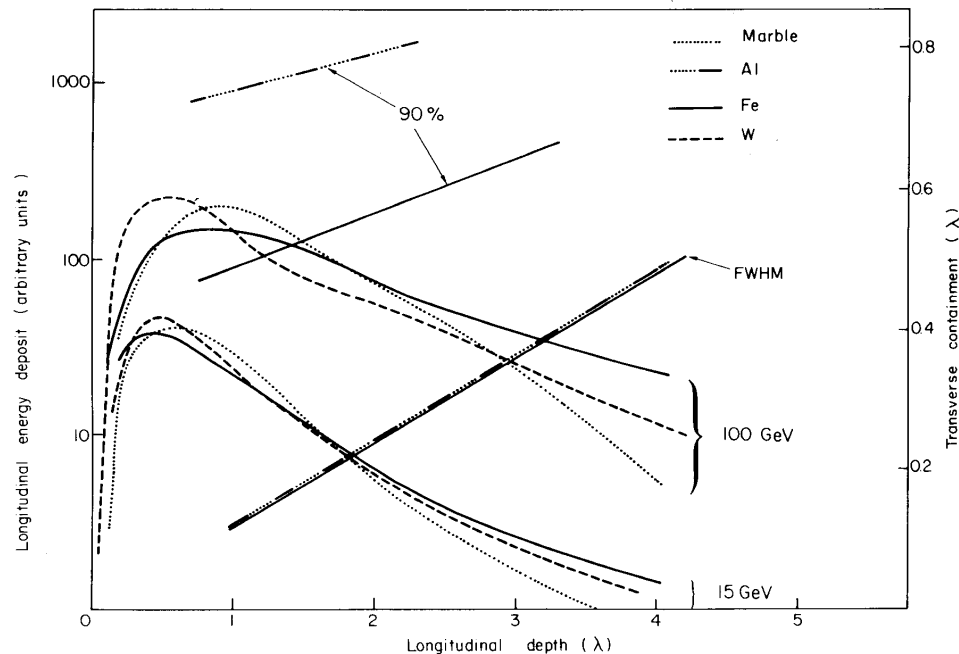
- Sviluppo longitudinale dello sciame

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

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

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

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



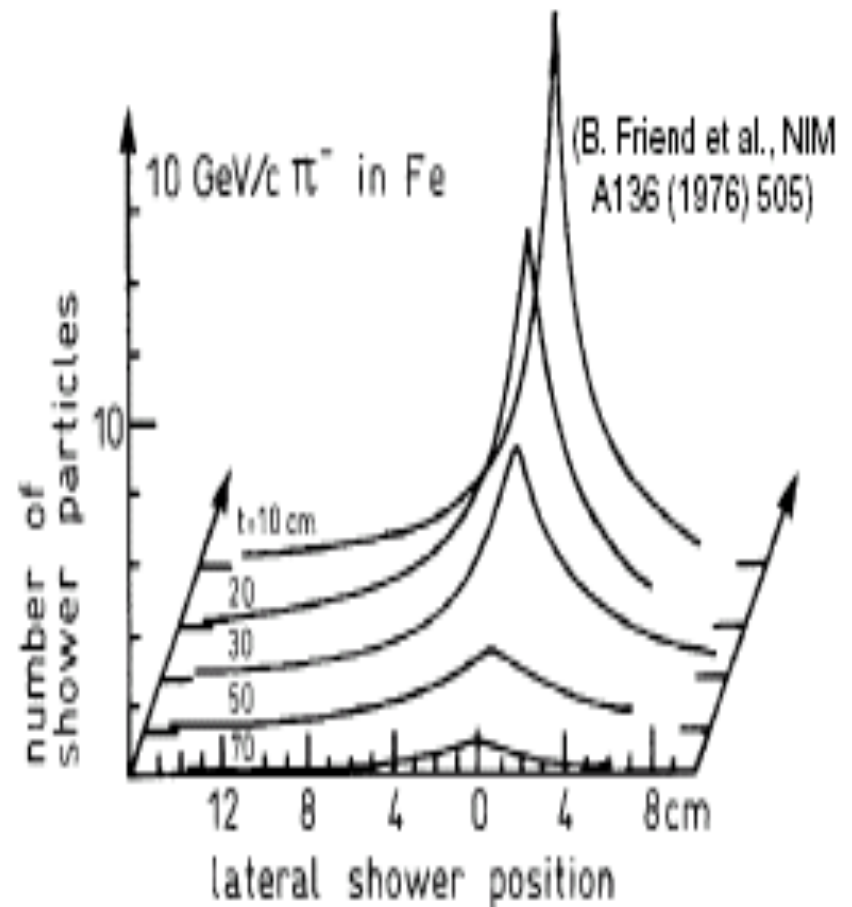
(C. Fabjan, T. Ludlam, CERN-EP/82-37)

Interazioni nucleari (forti)

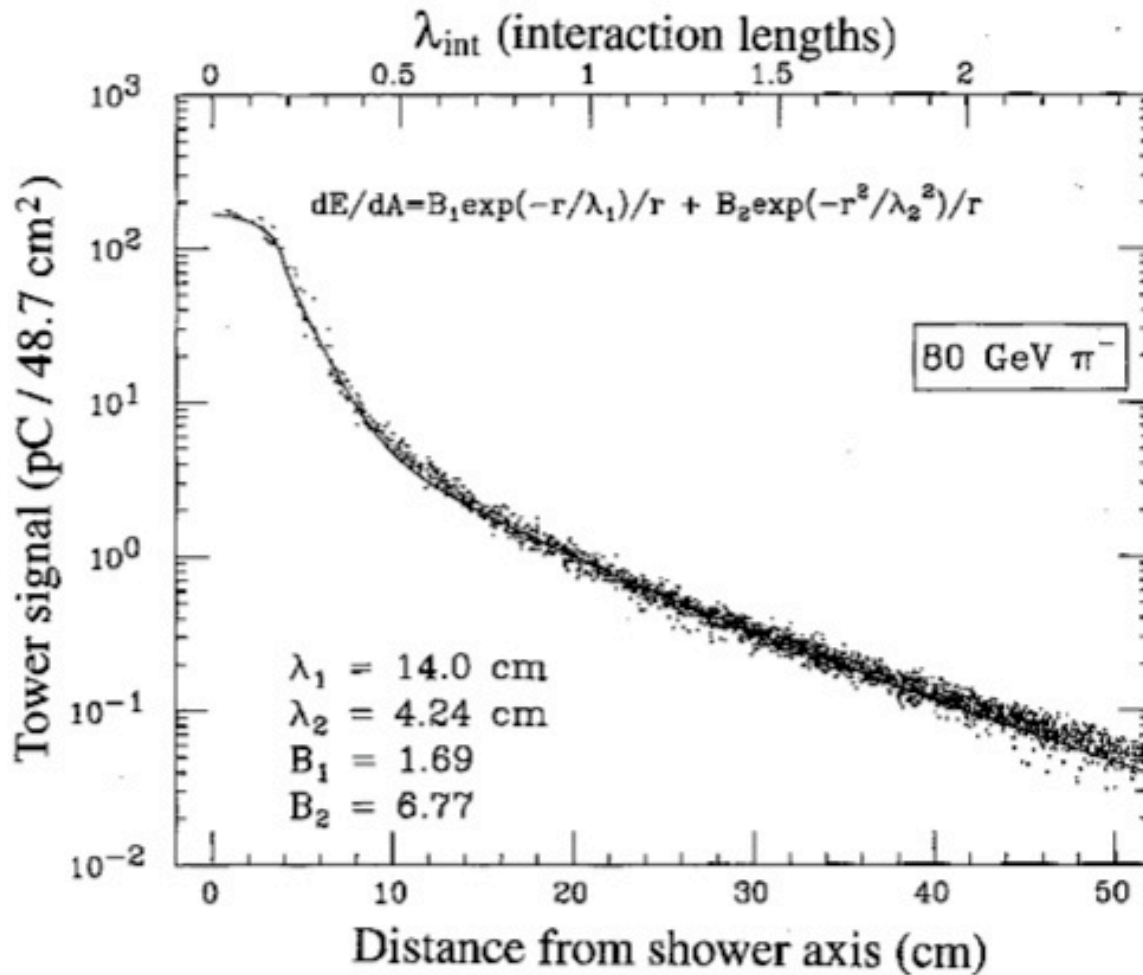
Trasversalmente lo sciame consiste in un nocciolo + un alone.

Il 95% e' contenuto in un cilindro di raggio λ_1 .

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

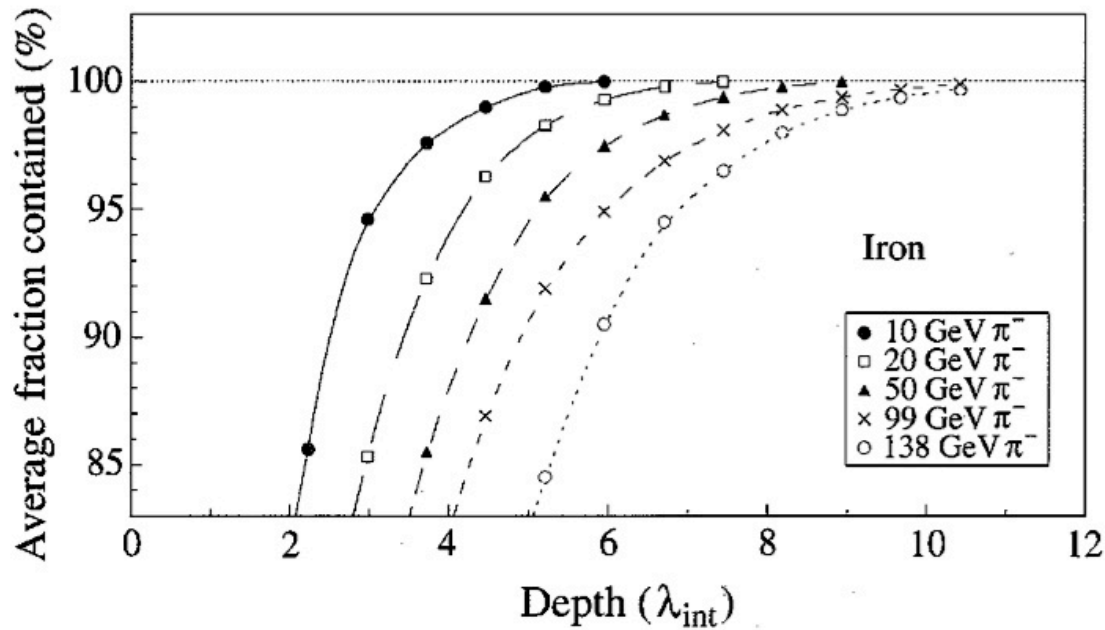


Transversal Shower Profile



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

Shower Containment

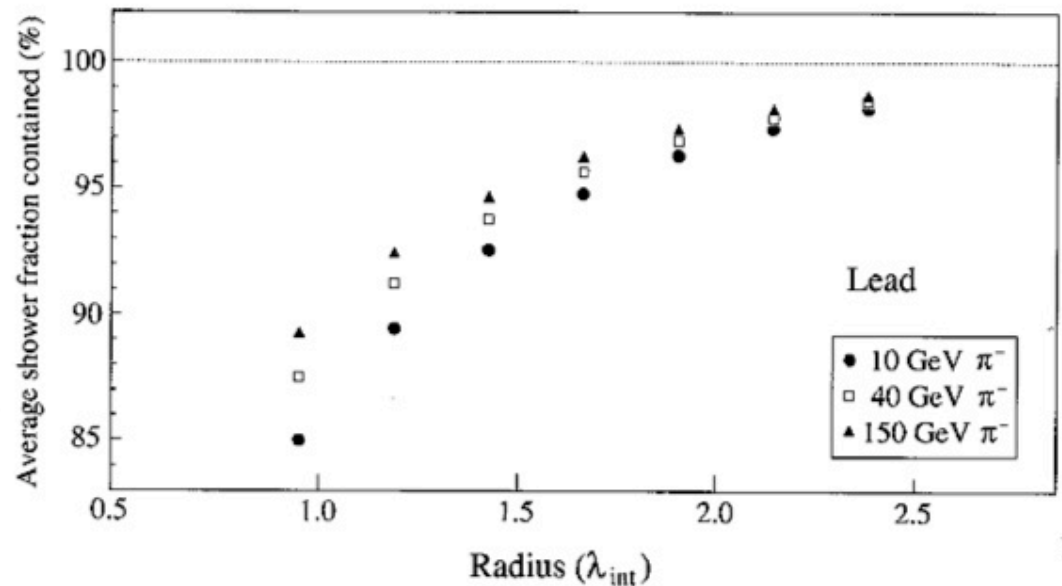


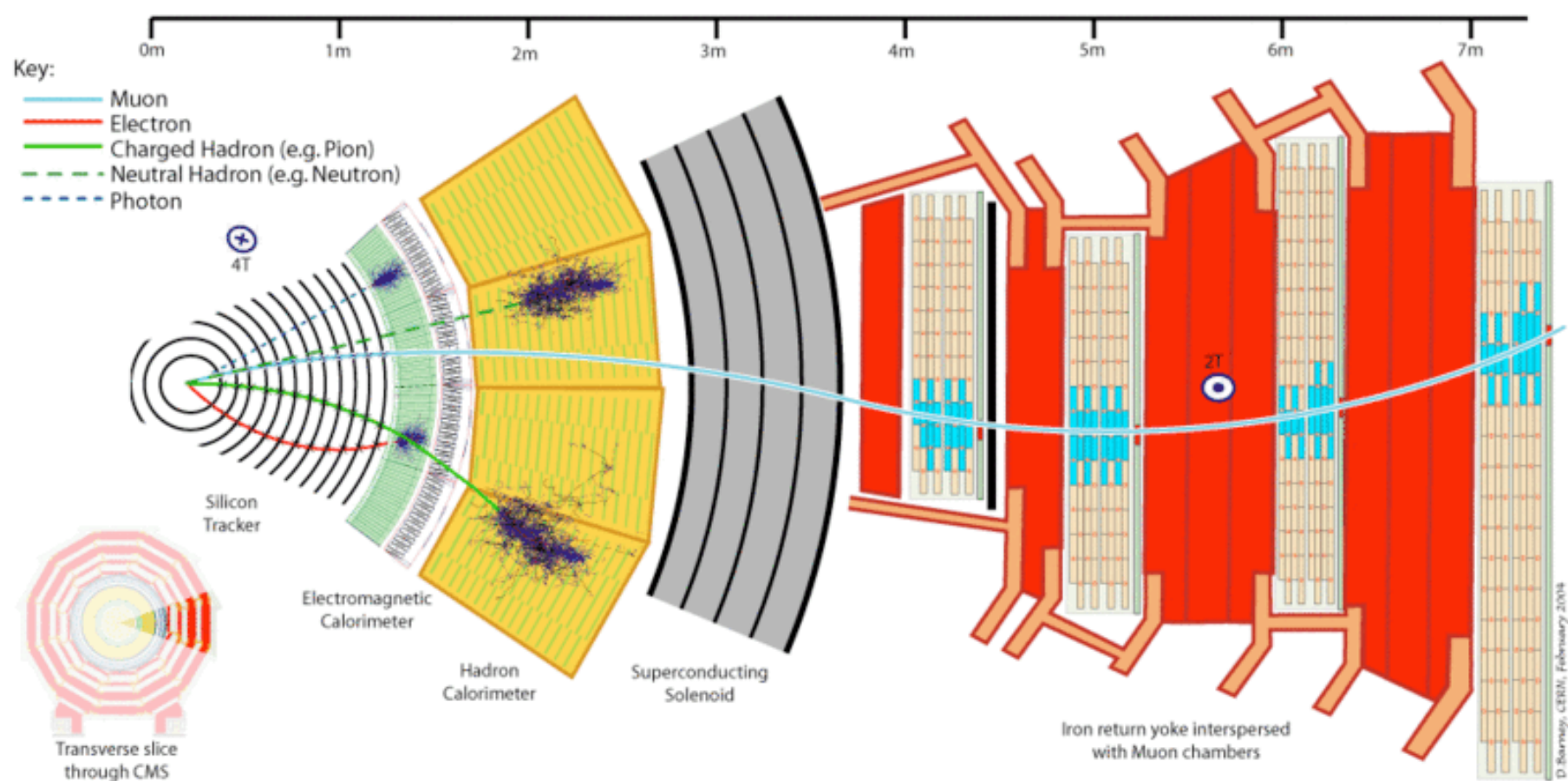
Longitudinal Containment

Shower absorbed
after 9-10 λ_{int}

Lateral Containment

Shower absorbed
after 3 λ_{int}





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

CMS Hadron Calorimeter

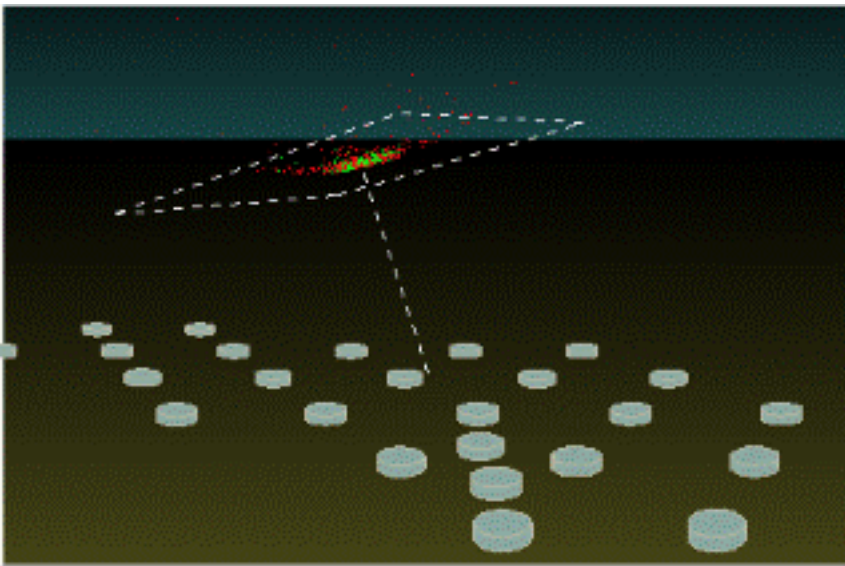


17

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.

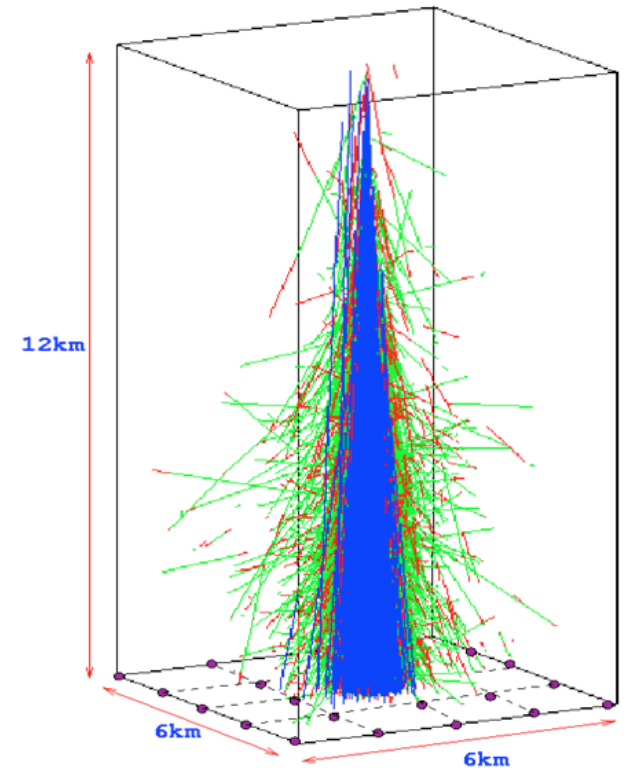
Un array di rivelatori a terra la rivela.
Necessarie grandissime superfici

Esperimento AUGER (Argentina)
2000 km²

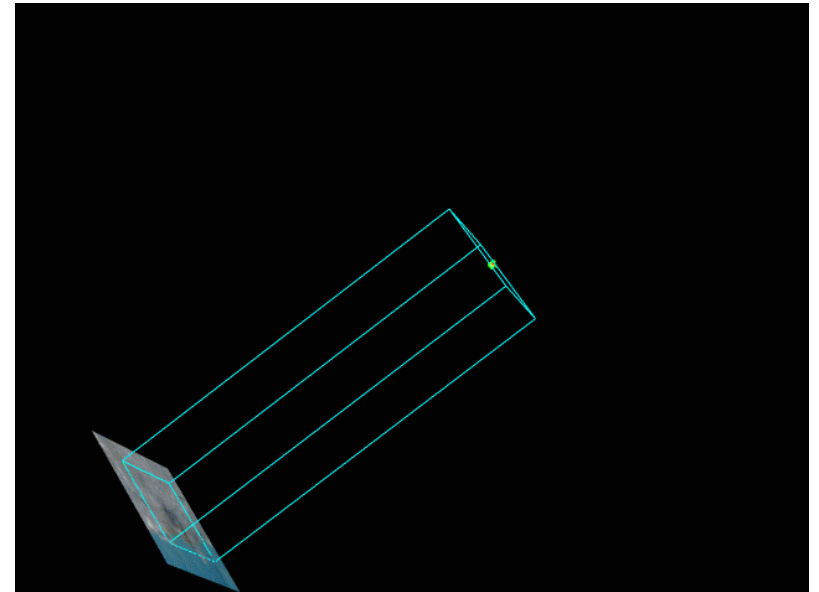


E. Fiandrini Rivelatori di particelle

1710



Nucleo di Fe che colpisce la sommità 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 sciame 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 β o il γ della particella carica).
- o Effetto Čerenkov (misuro il β della particella carica).
- o Radiazione di transizione (misuro il γ 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

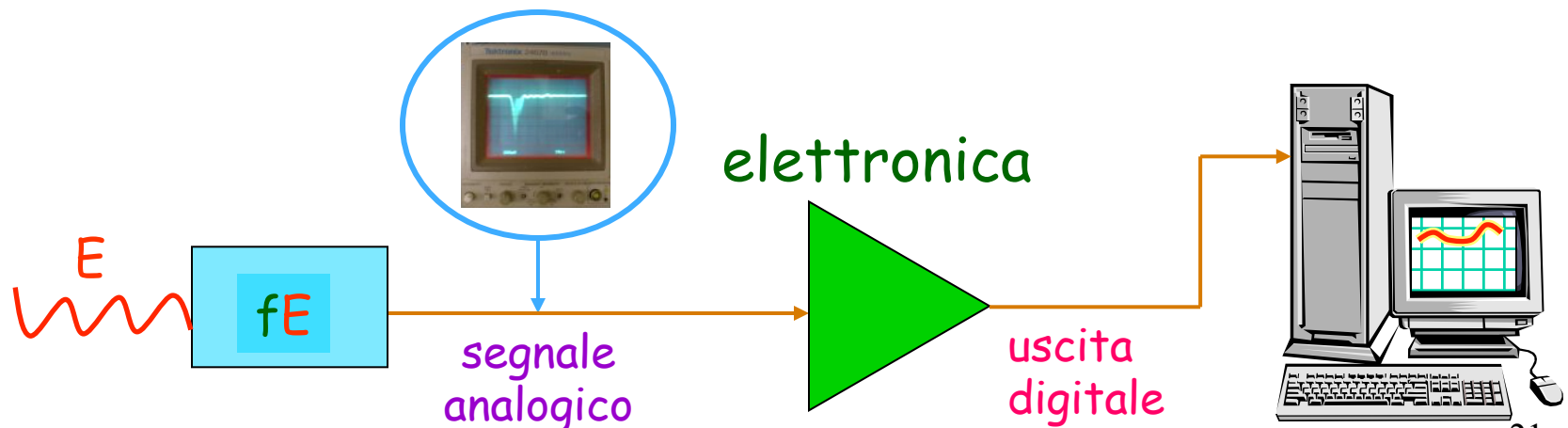
Proprieta' generali dei rivelatori di particelle

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

Caratteristiche degli apparati

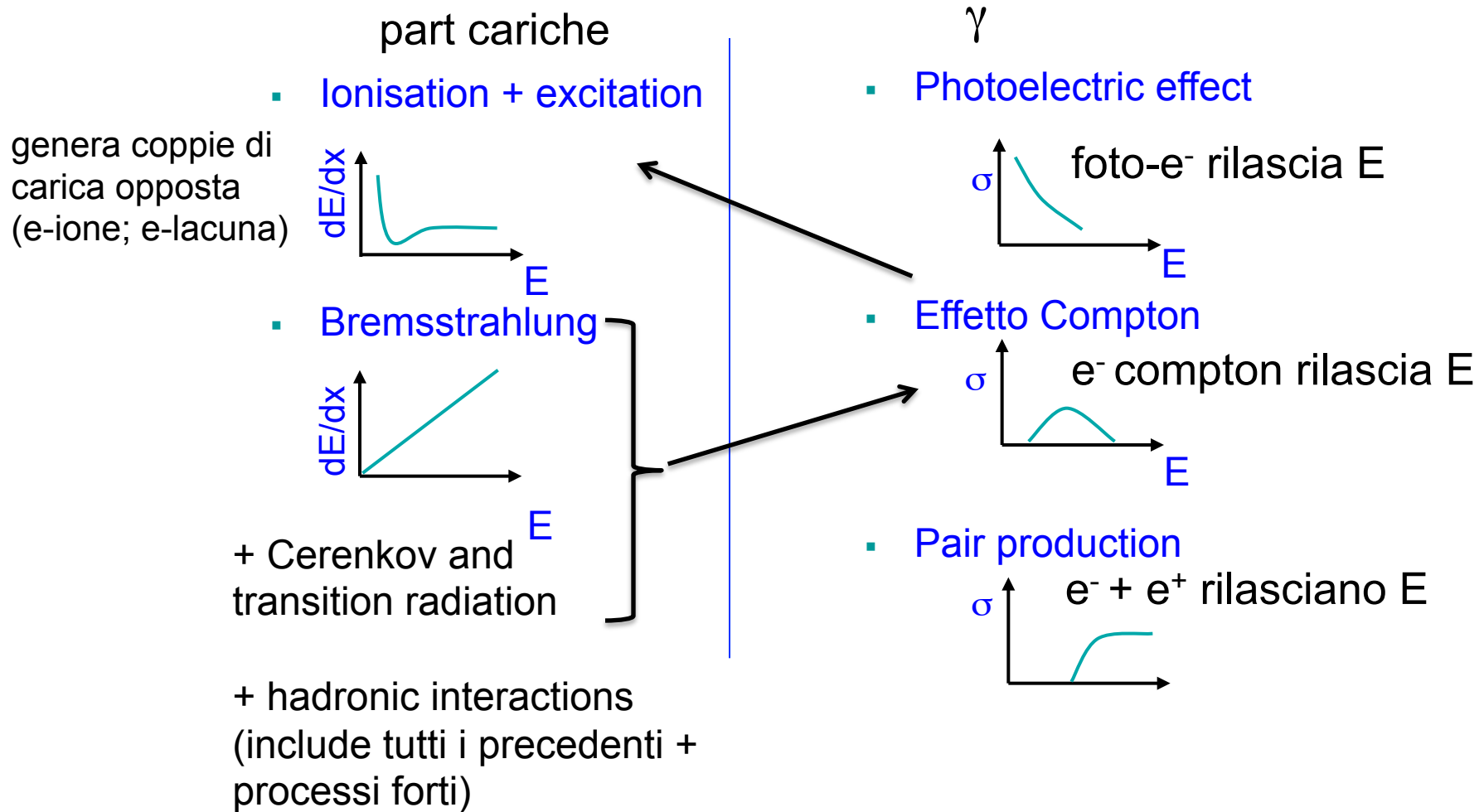
Principio di funzionamento generale di un rivelatore
particella di energia $E \rightarrow$ trasferimento di energia fE
($f \leq 1$) al rivelatore \rightarrow conversione in forma di
energia accessibile

Rivelatori moderni sono essenzialmente elettrici: fE
convertita in impulsi elettrici \rightarrow 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, accettazione geometrica
- v. Tempi caratteristici

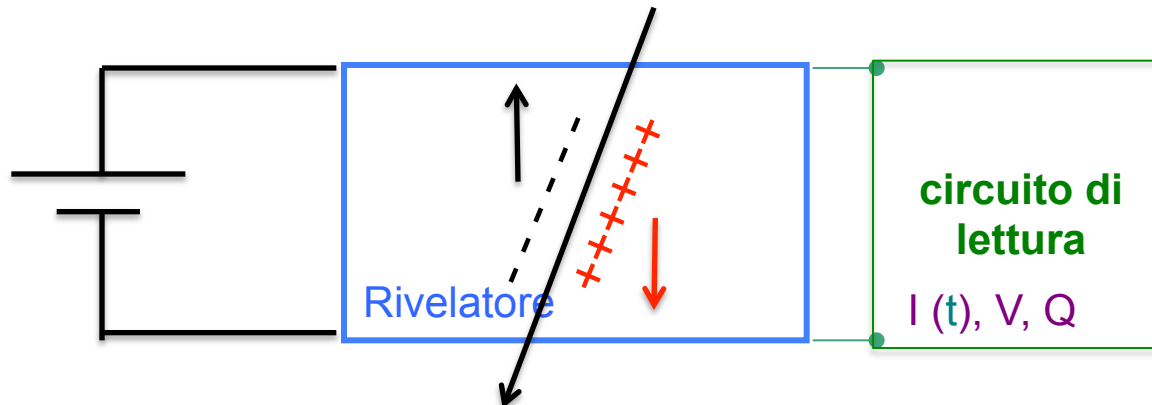
Caratteristiche degli apparati

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

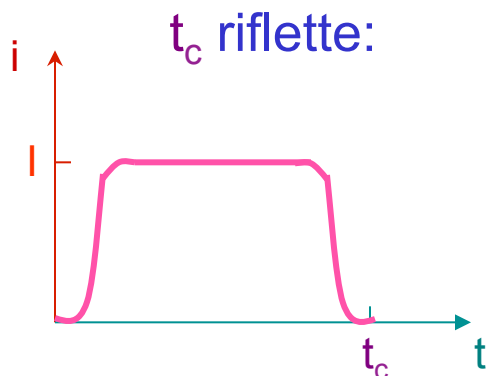
Risposta dell'apparato.

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_c di raccolta della carica può variare dai **ns** (fotomoltiplicatori) ai **ms** (camere ad ionizzazione) ed e' intrinseco del rivelatore.

Si avrà un segnale di corrente $i(t)$ dal tempo $t=0$ fino al tempo $t=t_c$ e l'integrale di questa corrente e' la carica totale generata Q_s .

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



- ✓ 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(tens of ns)

t=5 ns

Time evolution of
current

300 μm Silicon layer

t=0

V_{bias}

T-j
A/cm²

| |
|------------|
| +4.683e+01 |
| +1.301e-01 |
| +3.613e-04 |
| +1.003e-06 |
| +2.787e-09 |

T-j
A/cm²

| |
|------------|
| +6.753e+00 |
| +1.774e-02 |
| +4.658e-05 |
| +1.223e-07 |
| +3.213e-10 |

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

t=12 ns

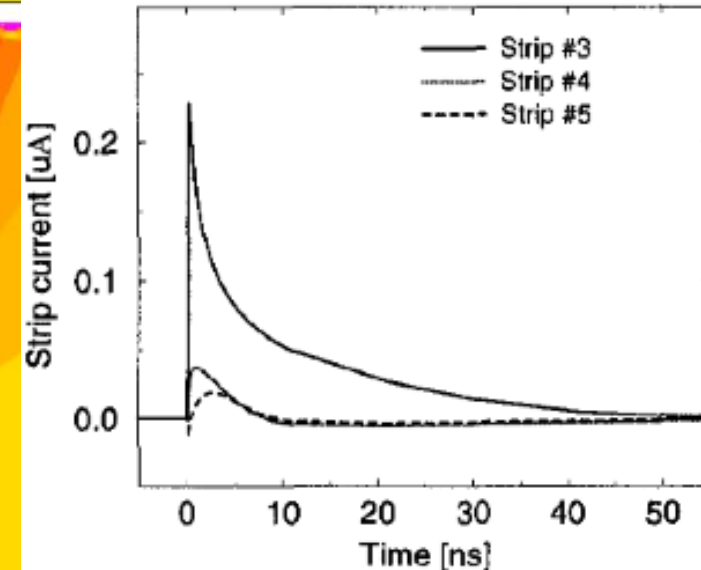
t=30 ns

T-j
A/cm²

| |
|------------|
| +3.014e+00 |
| +1.028e-02 |
| +3.508e-05 |
| +1.197e-07 |
| +4.084e-10 |

T-j
A/cm²

| |
|------------|
| +6.233e-01 |
| +1.677e-03 |
| +4.510e-06 |
| +1.213e-08 |
| +3.263e-11 |



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

$$\frac{dE}{d\ell} = \begin{cases} 1.664 & \text{Si MeV/g cm}^{-2} \\ 1.255 & \text{LXe} \end{cases} \quad \ell = \rho x \Rightarrow \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{cm}} = \rho \frac{dE}{d\ell} = \begin{cases} 3.88 & \text{Si MeV/cm} \\ 3.70 & \text{LXe} \end{cases}$$

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

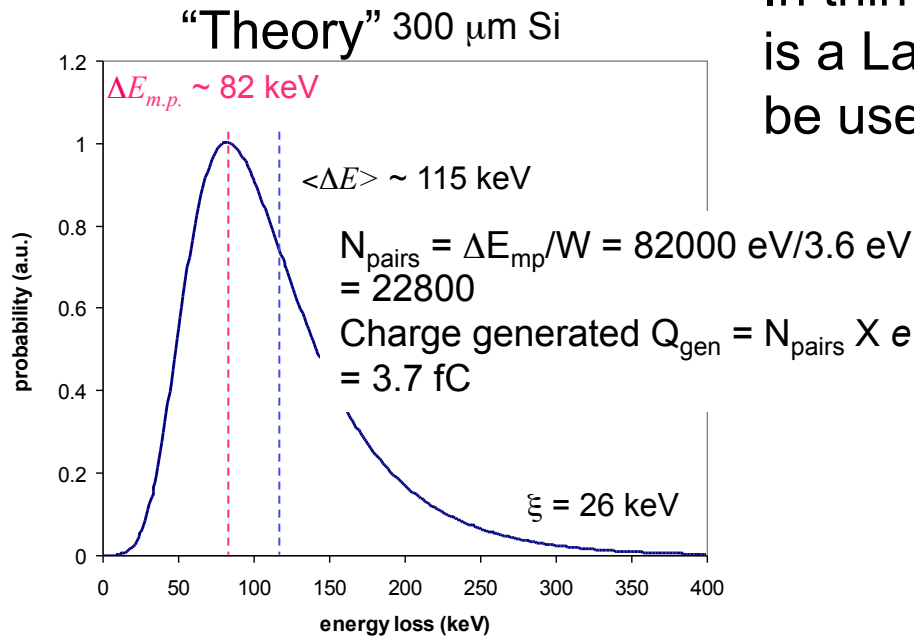
Tipicamente $\Delta x = \begin{cases} 300 \mu\text{m} & \text{Si} \\ 1 \text{cm} & \text{LXe} \end{cases} \Rightarrow Q \approx \frac{dQ}{dx} \Delta x = \begin{cases} 5.3 \times 10^{-15} & \text{Si Coulomb} \\ 2 \times 10^{-14} & \text{LXe} \end{cases}$

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

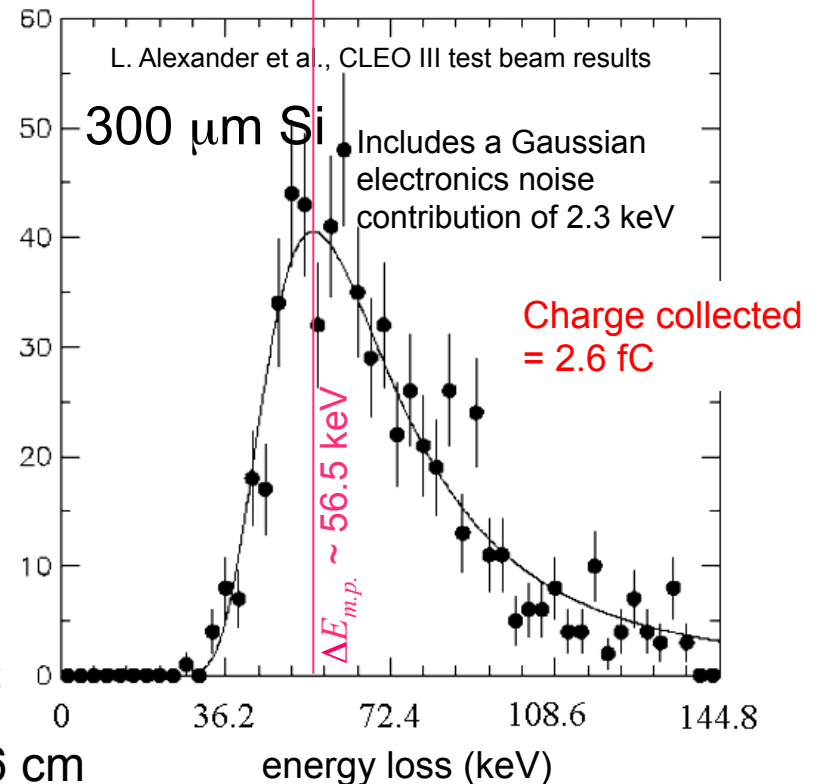
Necessaria in genere un'amplificazione del segnale!

For thin layers, Landau fluctuations make things even harder

In thin layers, where the energy distribution is a Landau, the most probable ΔE_{mp} is to be used in place of ΔE_{ave}



BUT charge collection is not 100%



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

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

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

$$\xi = \frac{2\pi N e^4 Z}{m_e v^2} \frac{Z}{A} x \quad x(300 \mu\text{m Si}) = 69 \text{ mg/cm}^2$$

Cfr. $X_0 = 21.82 \text{ g/cm}^2$ o 9.36 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' $dn/dt = n_p n_b \sigma v \text{ (m}^{-3}\text{s}^{-1}\text{)}$

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

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

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, cioè la sez. d'urto è grande (barn) → basta apparato di bassa densità e/o "piccola" massa .

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

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