



***La calorimetria
in poche parole***



Cosa è un calorimetro?

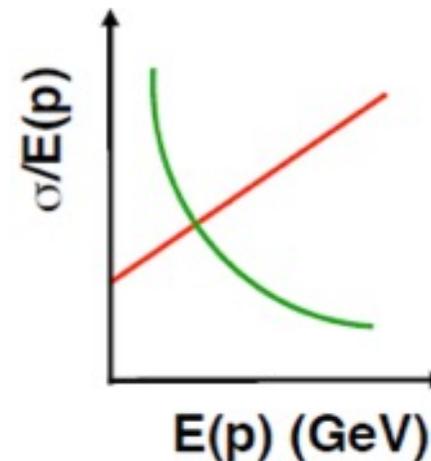
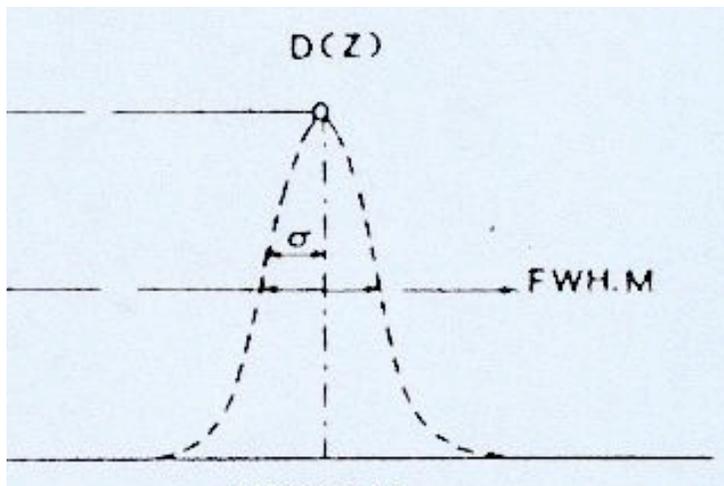
- Apparecchio per la misurazione di quantità di calore prodotto da reazioni (chimiche, fisiche, ...)
- Ma in fisica delle particelle ha un altro significato: misura l'energia delle particelle
 - Si tratta di una **misura distruttiva**: assorbimento totale dell'energia nel mezzo
- **Può rivelare sia particelle cariche che neutre**:
 - Calorimetri elettromagnetici (fotoni, π^0 , elettroni)
 - Calorimetri adronici (n, p, π^\pm , K, jet, ...)
- Risoluzione energetica migliora con l'aumentare dell'energia

$$\frac{\sigma(E)}{E} \sim \frac{a}{\sqrt{E}}$$

- Può misurare anche il tempo di arrivo e, con opportuna granularità di lettura, anche posizione e angolo di impatto.
- Fornisce misure complementari a quelle di un tracciatore

La complementarità dei rivelatori

- In HEP è fondamentale usare più di una tipologia di rivelatori per ottenere informazioni complementari
- La risoluzione energetica di un calorimetro (tracciatore) migliora (peggiora) al crescere dell'energia della particella incidente
- L'insieme di tracciatore e calorimetro è fondamentale per:
 - PID: distinguere diversi tipi di particelle
 - Migliorare la risoluzione in energia utilizzando le informazioni del tracciatore



Tracciatore:

$$\frac{\sigma(p)}{p} = ap \oplus b$$

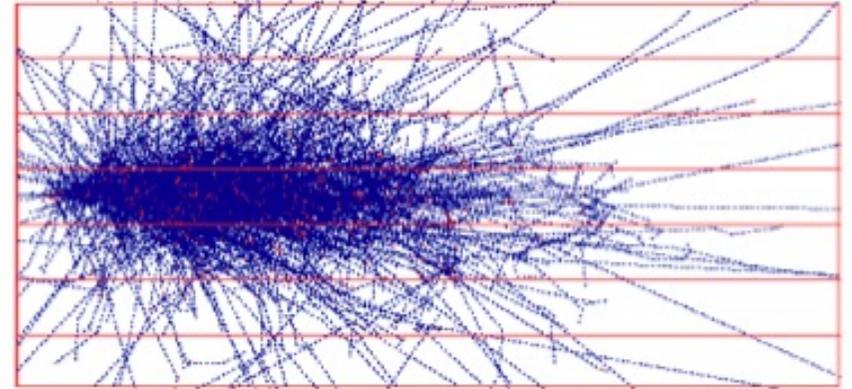
Calorimetro:

$$\frac{\sigma(E)}{E} \sim \frac{a}{\sqrt{E}}$$

Diversi tipi di calorimetro

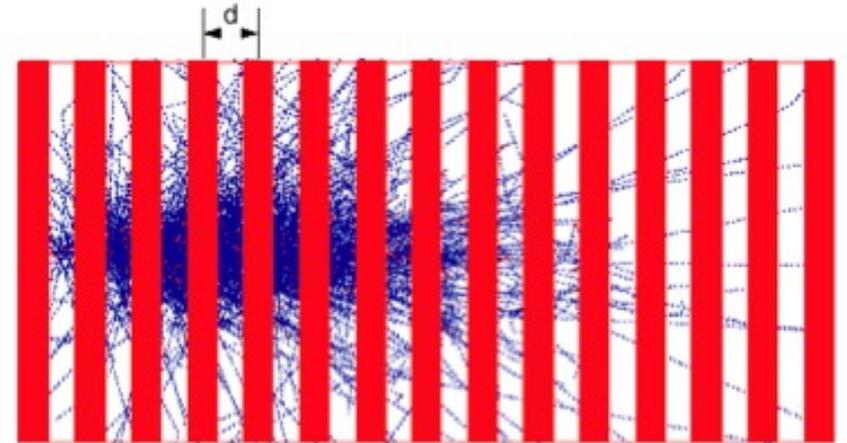
Calorimetri omogenei

- Un unico materiale svolge il ruolo di assorbitore e rivelatore
- Tutta l'energia depositata partecipa alla formazione del segnale



Calorimetri a campionamento

- strati alternati di assorbitore e rivelatore
- maggiore flessibilità di scelta del rivelatore (minori costi)
- non tutta l'energia rilasciata viene rivelata



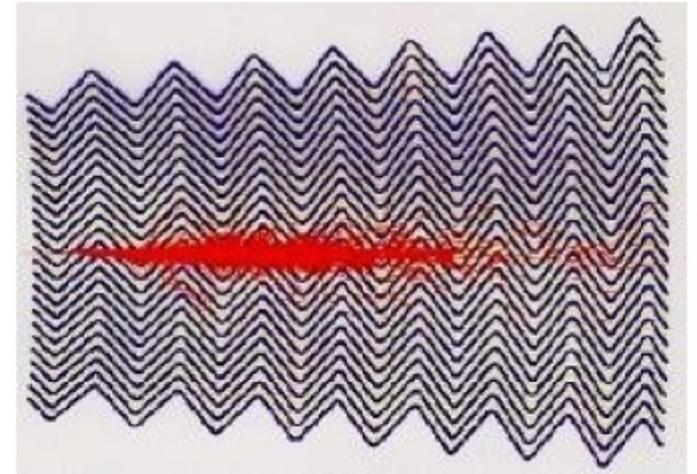
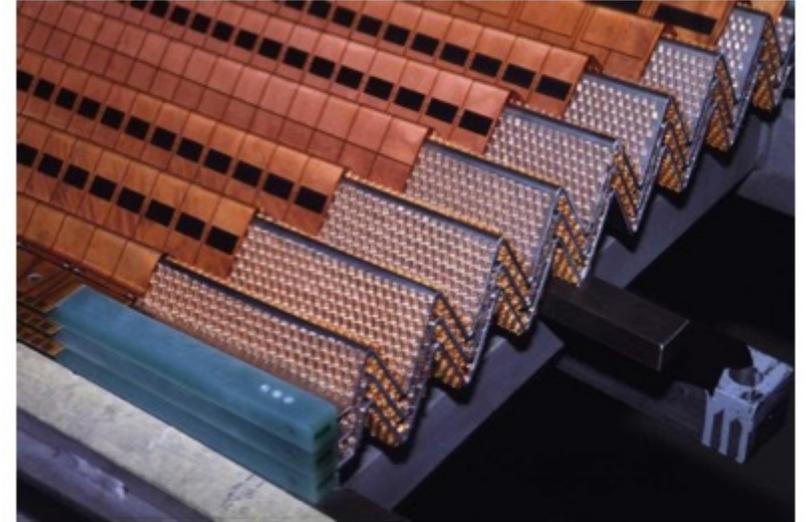
Calorimetri omogenei

- Si basano su materiali densi (cristalli con alta densità e alto Z)
Ottima risoluzione energetica e linearità
Possibilità di ottenere un'ottima risoluzione temporali
Scelte limitate dal punto di vista dei materiali
Non utilizzabile per calorimetri adronici
Molto costosi



Calorimetri a campionamento

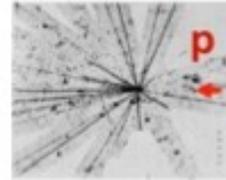
- L'assorbitore deve essere molto denso e alternato con parte attiva
- ✓ Meno costosi dei calorimetri omogeni
- ✓ Possibile avere una grande segmentazione longitudinale
- ✓ Sia per calorimetri adronici che em
- ✗ Solo una parte dello sciame è raccolta
- ✗ Fluttuazioni dell'energia depositata negli strati attivi
- ✗ Risoluzione energetica inferiore



I principi di funzionamento

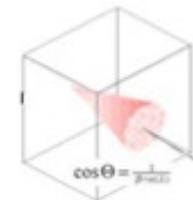
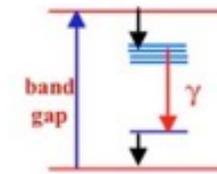
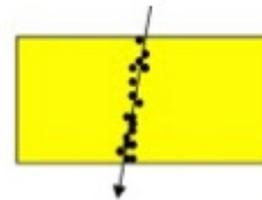
Le particelle interagiscono con la materia

Dipendenza dalla tipo di particella e dal materiale



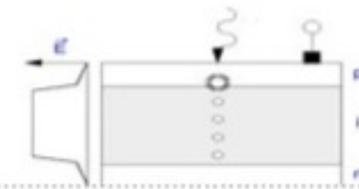
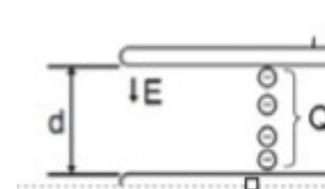
Energia persa → segnale osservabile

(luce, segnale elettrico,...)



Il segnale viene raccolto e acquisito

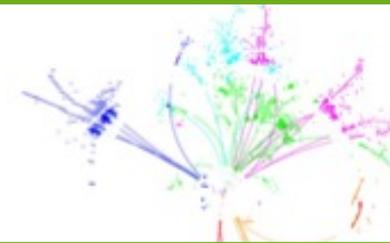
(Creazione del segnale digitale)



Calibrazione e ricostruzione

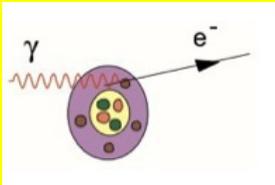
Trasformo il segnale digitale in una grandezza fisica

Energia (MeV), Tempo(ns), Posizione (mm)

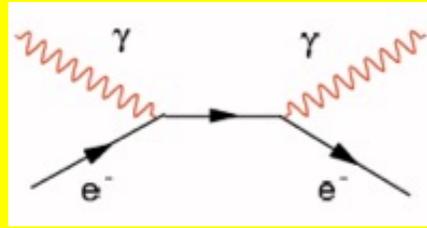


Interazioni em con la materia

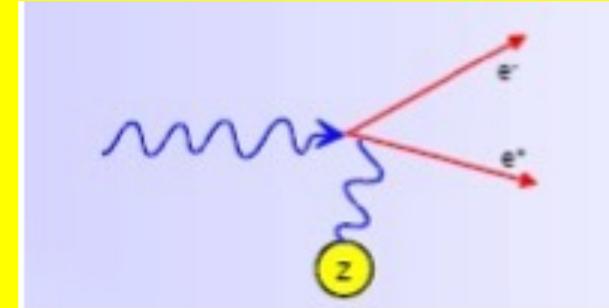
Fotoni



Effetto fotoelettrico

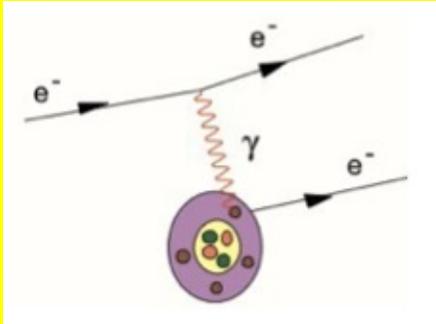


Scattering Compton

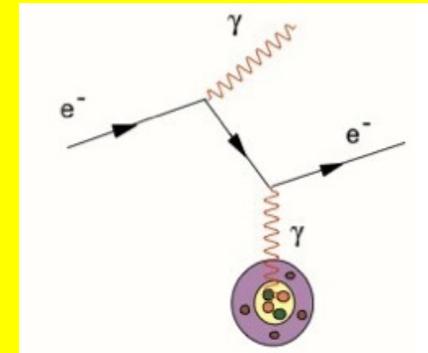


Produzione di coppie

Elettroni



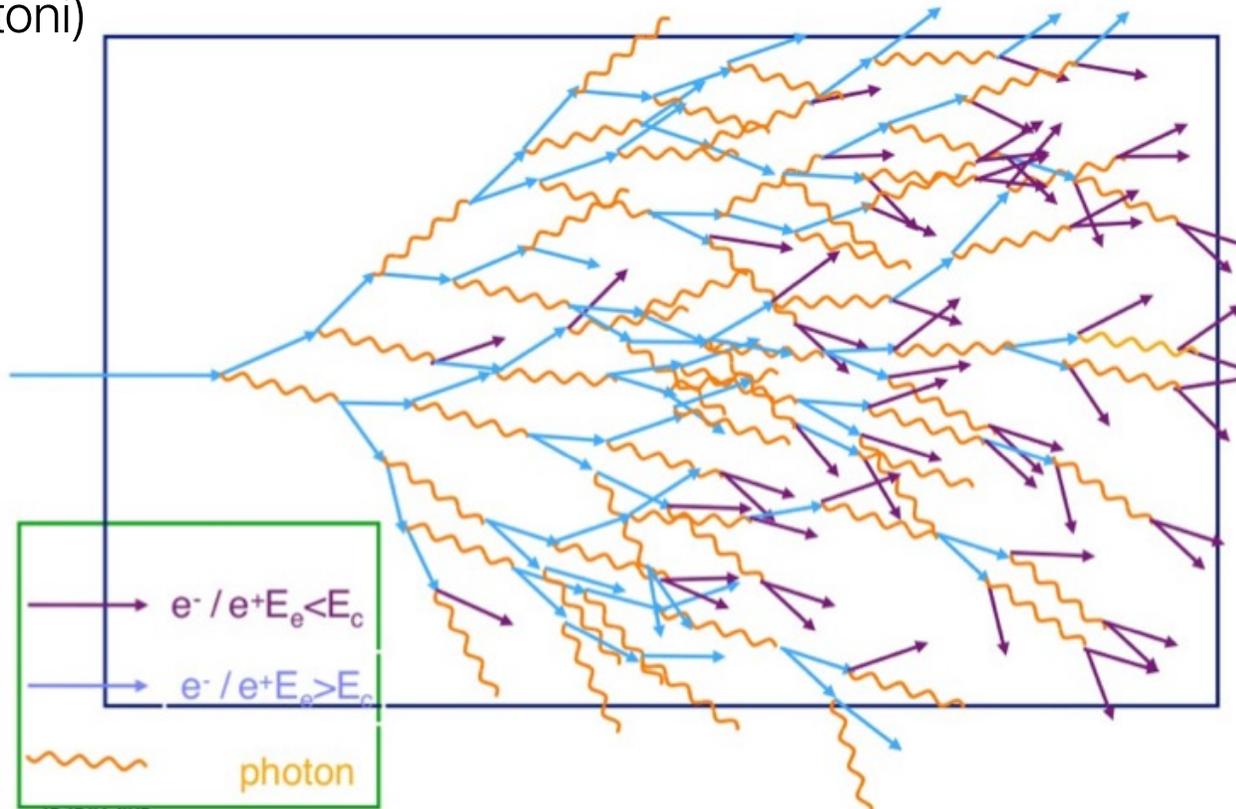
Ionizzazione



Bremsstrahlung

Lo sviluppo di uno sciame

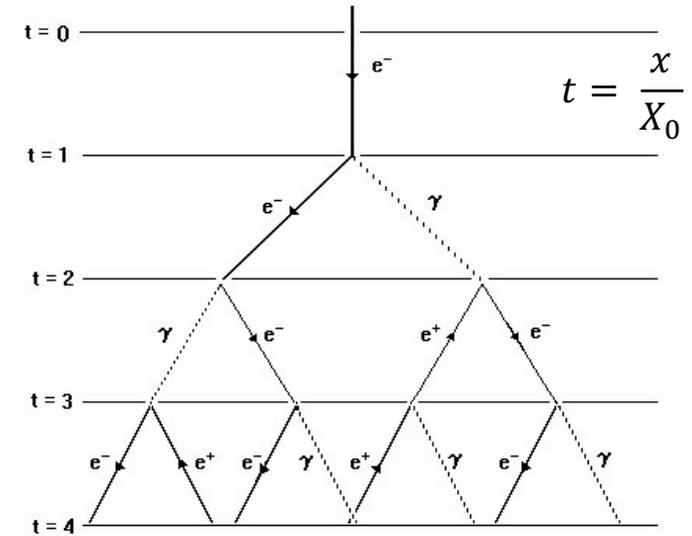
- Particelle di alta energia creano una cascata di particelle (elettroni e fotoni) di energia più bassa
- Quando si raggiunge l'energia critica, le particelle secondarie vengono fermate (elettroni) o assorbite (fotoni)



Lo sviluppo di un fascio di elettroni in un modello semplificato

X_0 è la **lunghezza di radiazione**:
 spessore del mezzo che riduce
 l'energia media di un fascio di
 elettroni di un fattore $1/e$ per sole
 perdite radiative

- Lo sviluppo dello sciamone
 - Gli elettroni perdono energia
 - I fotoni fanno produrre nuove particelle
- Il numero di particelle raddoppia in ogni X_0
- Energia si dimezza in ogni interazione
- Lo sciame si espande fino a che l'energia delle particelle è pari a E_c

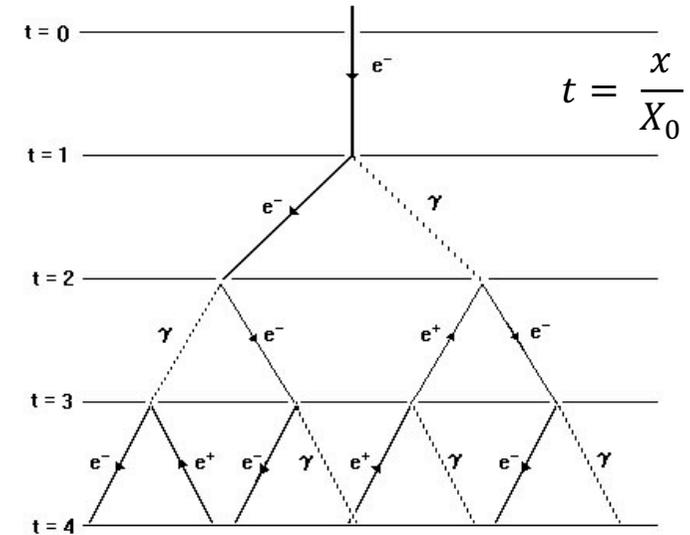


$$\text{per } E_c(e^\pm) = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad N_{max} = 2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_c}$$

- Massimo dello sciame in $T_{max} = \ln(E_0/E_c)/\ln(2)$
- Dopo questo punto entrano in gioco ionizzazione, scattering Compton e effetto fotoelettrico

Lo sviluppo di uno sciame – modello semplificato

- Lo sviluppo dello sciame è governato da X_0
 - Gli elettroni perdono energia via Bremsstrahlung
 - I fotoni fanno produzione di coppie
- Il numero di particelle raddoppia in ogni X_0
- Energia si dimezza in ogni interazione
- Lo sciame si espande fino a che l'energia delle particelle è pari a E_c

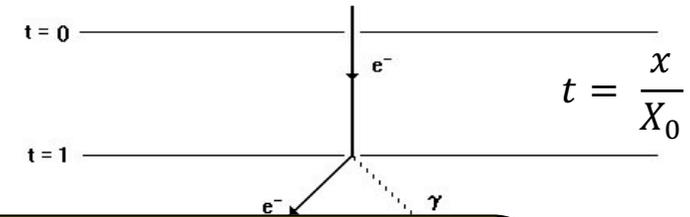


$$\text{per } E_c(e^\pm) = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad N_{max} = 2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_c}$$

- Massimo dello sciame in $T_{max} = \ln(E_0/E_c)/\ln(2)$
- Dopo questo punto entrano in gioco ionizzazione, scattering Compton e effetto fotoelettrico

Lo sviluppo di uno sciame – modello semplificato

- Lo sviluppo dello sciame è governato da X_0
 - Gli elettroni perdono energia via Bremsstrahlung
 - I fotoni fanno produzione di coppie
- Il numero di particelle raddoppia in ogni X_0
- Energia si dimezza in ogni interazione
- Lo sciame si espande fino a che l'energia delle particelle è pari a E_c



L'energia critica è quel valore di energia alla quale le perdite per ionizzazione e bremsstrahlung sono uguali.

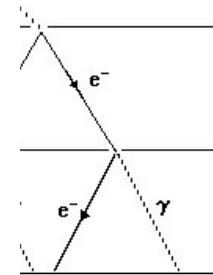
$$\text{per } E_c(e^\pm) = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad N_{max} = 2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_c}$$

- Massimo dello sciame in $T_{max} = \ln(E_0/E_c)/\ln(2)$
- Dopo questo punto entrano in gioco ionizzazione, scattering Compton e effetto fotoelettrico

Lo sviluppo di uno sciame – modello semplificato

- Lo sviluppo di uno sciame
 - Gli elettroni
 - I fotoni

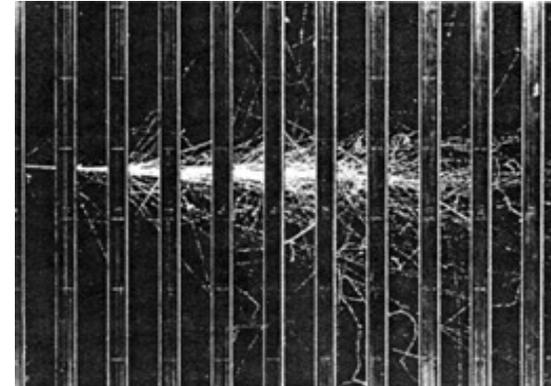
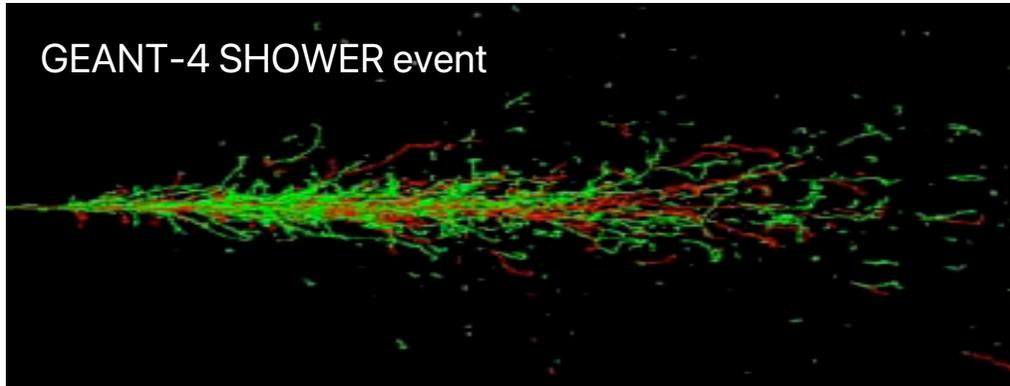
| Material | X_0 [g/cm ²] | E_c [MeV] | $t = \frac{x}{X_0}$ |
|---|----------------------------|-------------|---------------------|
| H₂ | 63 | 340 | |
| Al | 24 | 47 | |
| Ar | 20 | 35 | |
| Fe | 13.8 | 24 | |
| Pb | 6.3 | 6.9 | |
| Leadglass SF 5 | 9.6 | ~11.8 | |
| Plexiglass | 40.5 | 80 | |
| H₂O | 36 | 93 | |
| NaJ (Tl) | 9.5 | 12.5 | |
| Bi₄Ge₃O₁₂ | 8.0 | ~ 7 | |



$$2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_c}$$

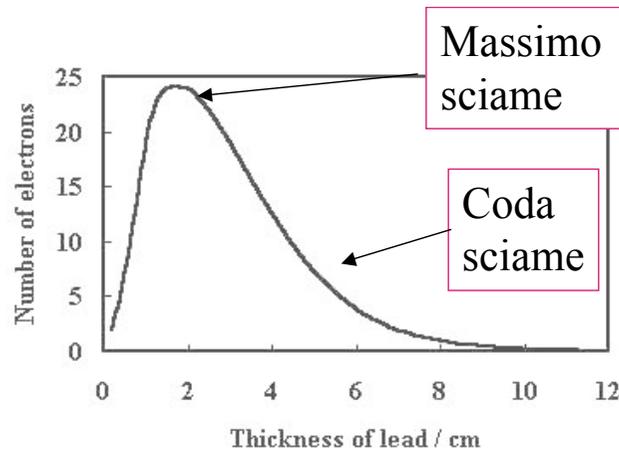
- Dopo questo punto entrano in gioco ionizzazione, scattering Compton e effetto fotoelettrico

Lo sciame EM



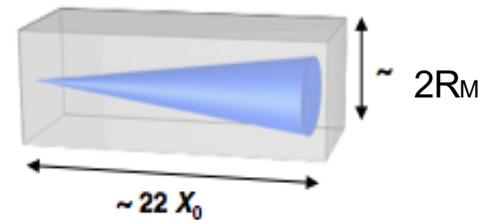
Sciame EM visto da una camera a nebbia con lastre di piombo equispaziate

Sviluppo Longitudinale



$$dE/dt = E_0 ct^\alpha \exp(-\beta t)$$

Sviluppo Trasversale



$$R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c (\text{MeV})} X_0 \quad [\text{g/cm}^2]$$

- 75% dello sciame in $1R_M$
- 95% dello sciame in $2R_M$
- 99% dello sciame in $3.5R_M$

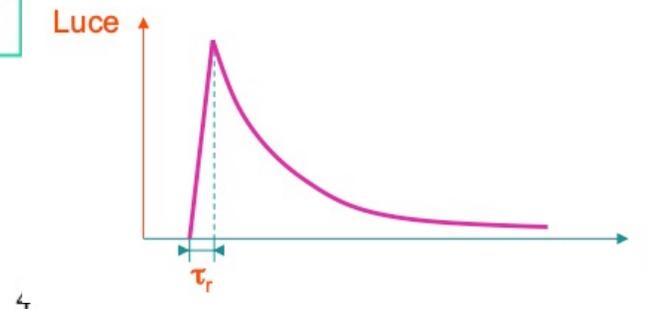
Il processo di scintillazione

- Una particella carica che attraversa uno scintillatore perde energia e eccita gli atomi (o le molecole) del materiale a cui segue emissione di luce visibile
- L'emissione può essere:
 - Istantanea ($< 10^{-8}s$) e si parla di **fluorescenza**
 - Successiva al passaggio (\sim ms fino a ore) e si parla di **fosforescenza**
- Andamento temporale della riemissione

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d}$$

n. totale di fotoni emessi

costante di decadimento



N.B. – tempo di salita $\tau_r \ll \tau_d$

Uno scintillatore è buono se...

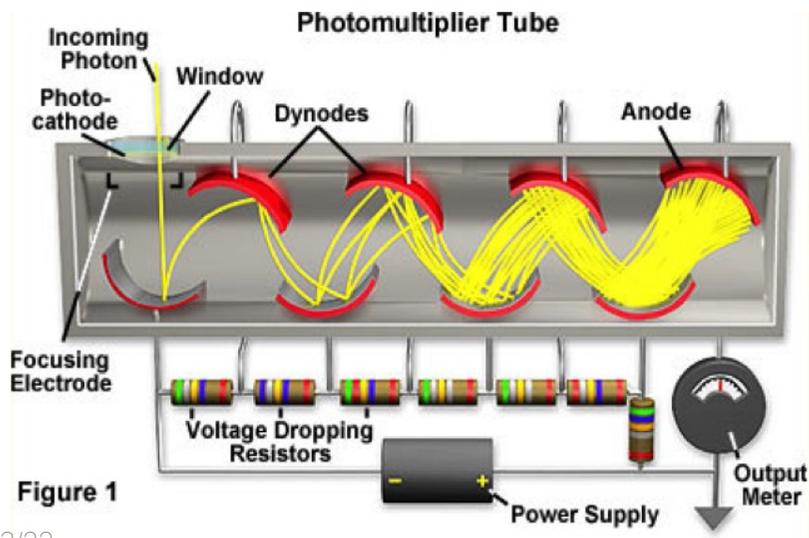
- Ha alta efficienza per conversione Energia → Luce (Light Yield: numeri di fotoni prodotti data una certa energia)
- È trasparente alla radiazione emessa
- Emette in una regione di frequenze sovrapposte a quelle di funzionamento ottimale del detector che raccoglie la luce
- Risposta lineare
- Risposta veloce → adatto per ottenere informazioni di timing
 - piccolo tempo morto → adatto per alte rate

Scintillatori organici vs Scintillatori inorganici

- Ottima risposta temporale ($\tau < 10$ ns)
 - Scarsa σ_E e efficienza di scintillazione (2000 npe/MeV)
 - Bassa densità (1 g/cm³)
 - Emissione di luce che dipende dalla particella incidente →PID
 - Facilmente sagomabili
 - resistenti all'acqua pura e a colle al silicio
 - Basso costo
 - Facilmente attaccati da solventi organici
- Risposta temporale più lenta (~da decine di ns - μ s)
 - Migliore σ_E e efficienza di scintillazione (> 10000 npe/MeV)
 - Alta densità (>4 g/cm³) →Ha una buona efficienza per l'assorbimento totale di radiazione γ o particelle cariche energetiche
 - Emissione di luce che dipende dalla particella incidente →PID
 - Igroscopici
 - Costo più elevato

Dalla scintillazione al segnale elettrico...

- Per “vedere” la scintillazione e quantificare dE/dx della particella incidente, bisogna “registrare” i fotoni di scintillazione
- Si accoppia lo scintillatore ad un rivelatore che
 - raccolgono i fotoni che si propagano ai limiti del volume di scintillatore
 - Estraggono elettroni per effetto foto-elettrico
 - Li guidano verso stati di accelerazione (dinodi) che ne amplificano il numero
 - Creano così un segnale elettrico **proporzionale** al numero di fotoni incidenti



- Gli elettroni sono accelerati verso i dinodi → si producono altri elettroni → creazione di una valanga
- δ è il coefficiente di emissione secondaria $\frac{N_{e \text{ prodotti}}}{N_{\gamma \text{ incidenti}}}$

$$\left. \begin{array}{l} \delta = 2 - 10 \\ n = 8 - 15 \end{array} \right] \rightarrow G = \delta^n = 10^6 - 10^8$$