



***La calorimetria  
in poche parole***



# Cosa è un calorimetro?

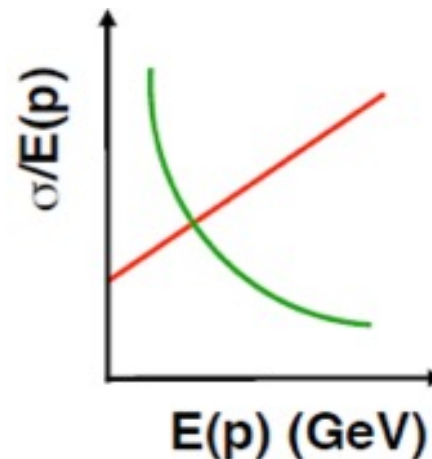
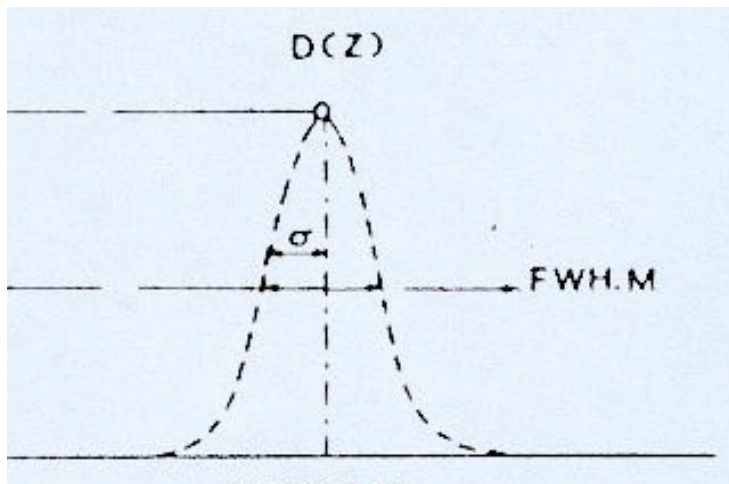
- Apparecchio per la misurazione di quantità di calore prodotto da reazioni (chimiche, fisiche, ...)
- Ma in fisica delle particelle ha un altro significato: misura l'energia delle particelle
  - Si tratta di una **misura distruttiva**: assorbimento totale dell'energia nel mezzo
- **Può rivelare sia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

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

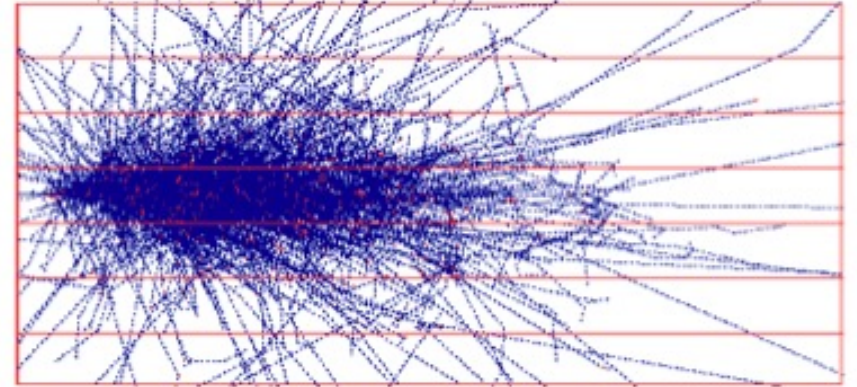
Calorimetro:

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

# Diversi tipi di calorimetro

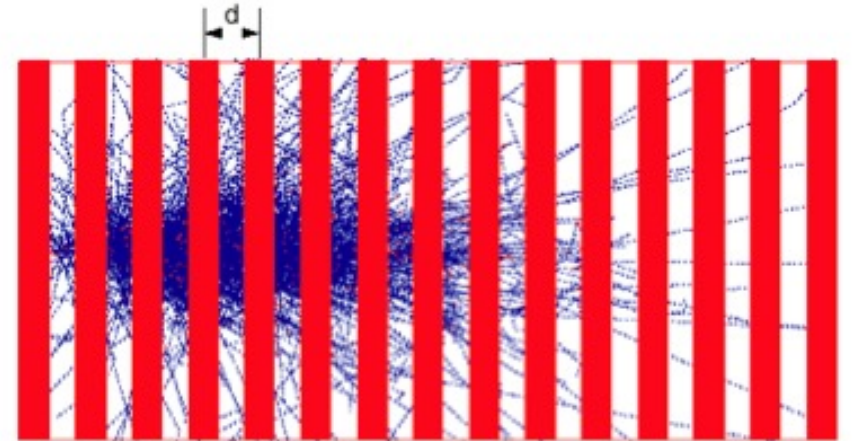
## Calorimetri omogenei

- 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





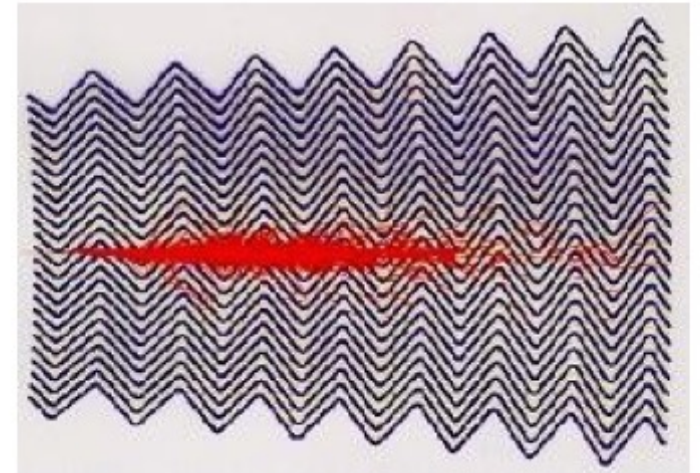
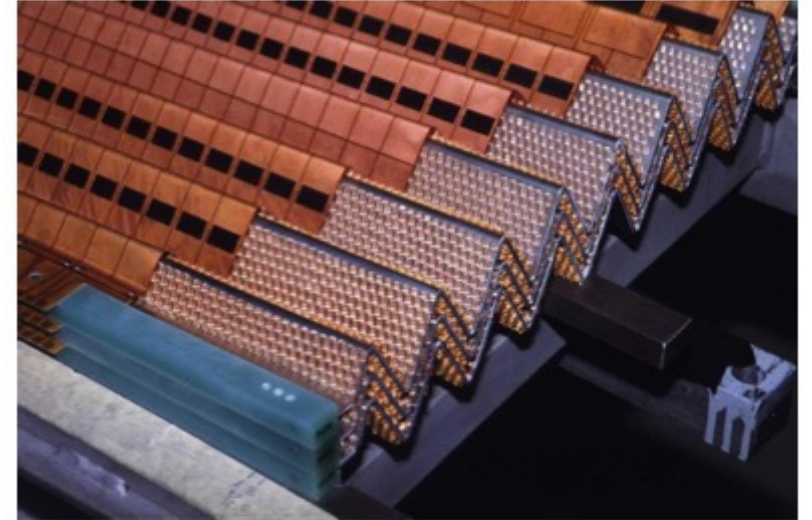
# Calorimetri omogenei

- 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

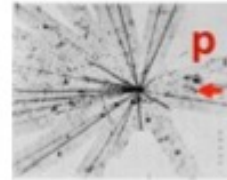
- L'assorbitore deve essere molto denso e alternato con parte attiva
- ✓ Meno costosi dei calorimetri omogeni
- ✓ Possibile avere una grande segmentazione longitudinale
- ✓ Sia per calorimetri adronici che em
- ✗ Solo una parte dello sciame è raccolta
- ✗ Fluttuazioni dell'energia depositata negli strati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



# I principi di funzionamento

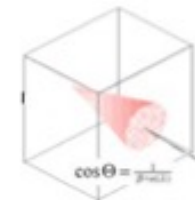
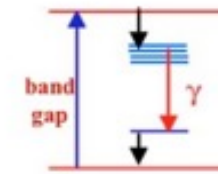
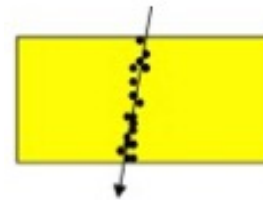
## Le particelle interagiscono con la materia

*Dipendenza dalla tipo di particella e dal materiale*



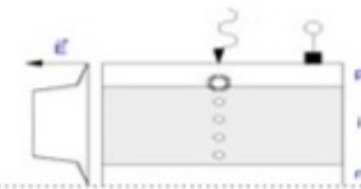
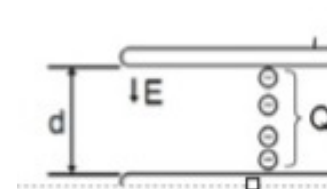
## Energia persa → segnale osservabile

*(luce, segnale elettrico,...)*



## Il segnale viene raccolto e acquisito

*(Creazione del segnale digitale)*



## Calibrazione e ricostruzione

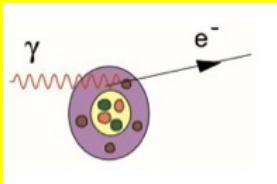
*Trasformo il segnale digitale in una grandezza fisica*

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

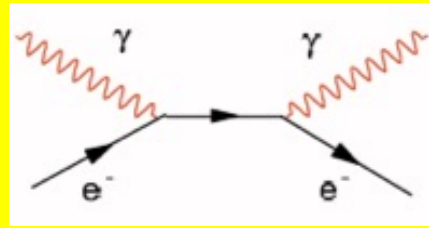


# Interazioni em con la materia

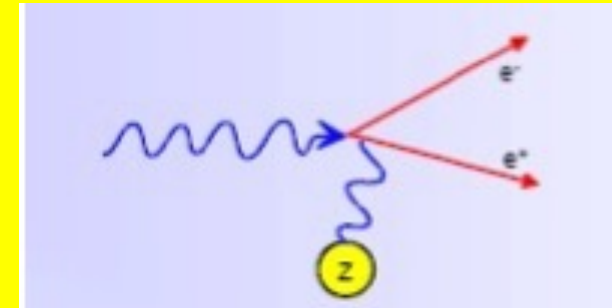
**Fotoni**



**Effetto fotoelettrico**

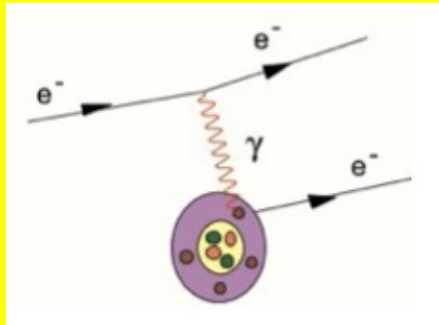


**Scattering Compton**

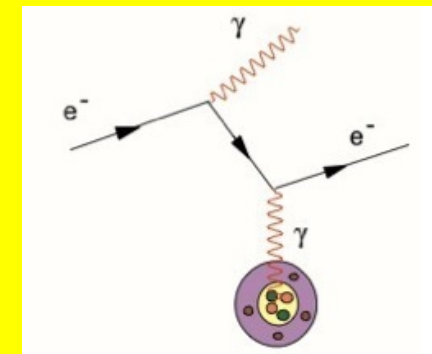


**Produzione di coppie**

**Elettroni**



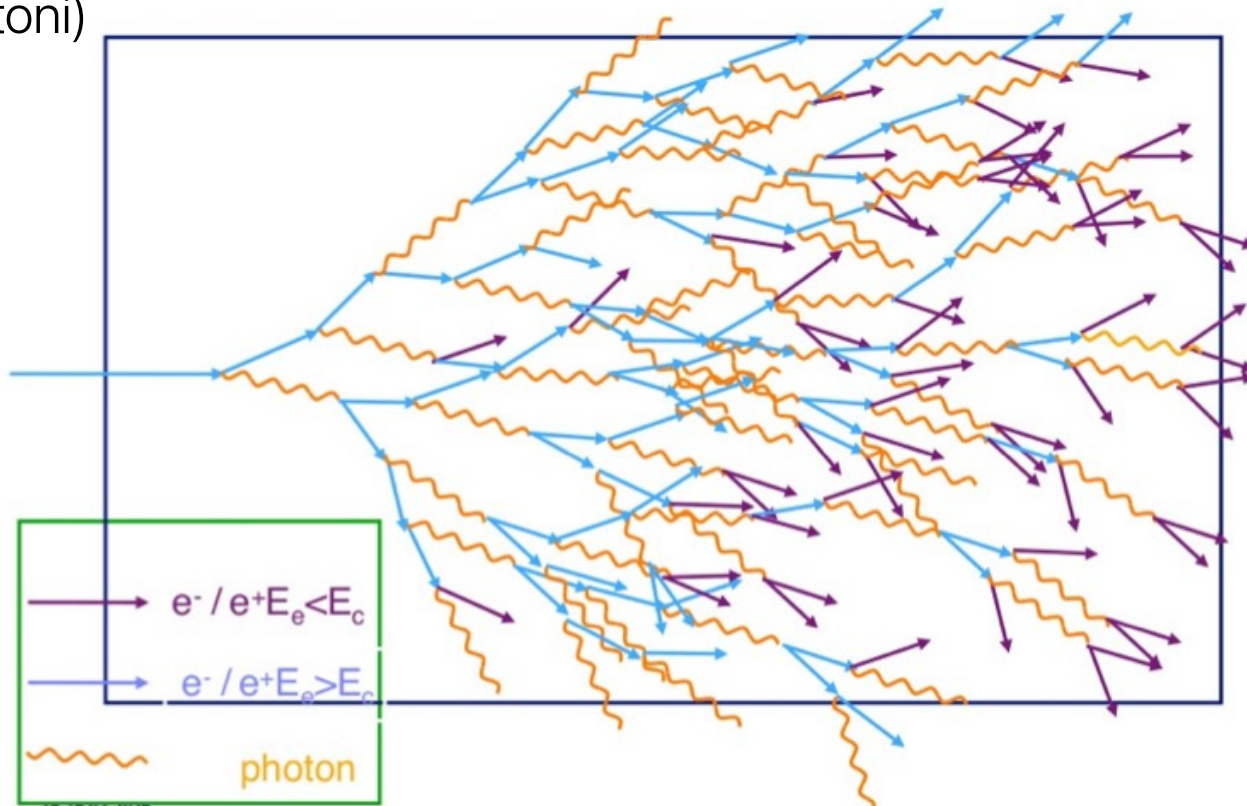
**Ionizzazione**



**Bremsstrahlung**

# Lo sviluppo di uno sciame

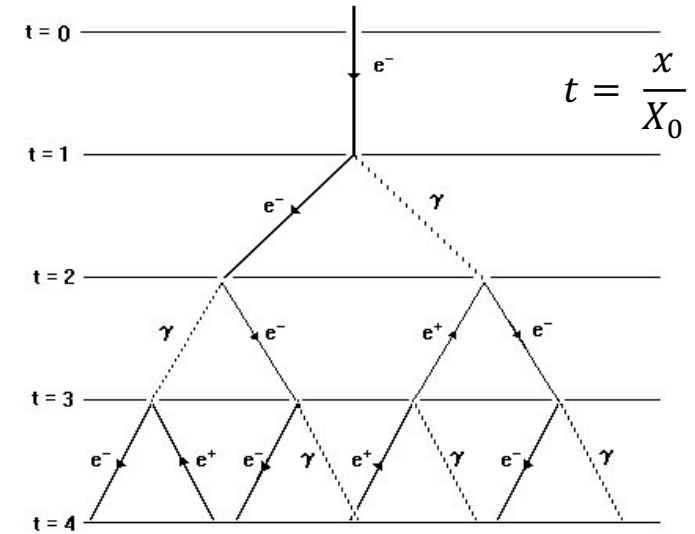
- Particelle di alta energia creano una cascata di particelle (elettroni e fotoni) di energia più bassa
- Quando si raggiunge l'energia critica, le particelle secondarie vengono fermate (elettroni) o assorbite (fotoni)



# 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  $E_c$



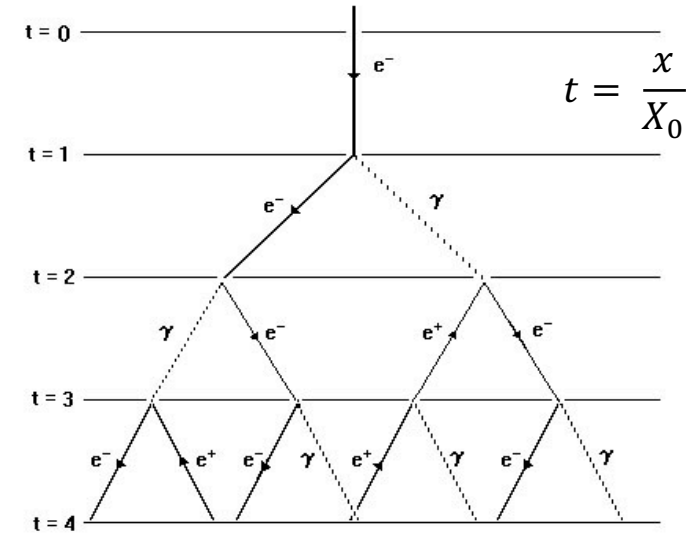
$$\text{per } E_c(e^\pm) = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad N_{max} = 2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_c}$$

- 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  $E_c$

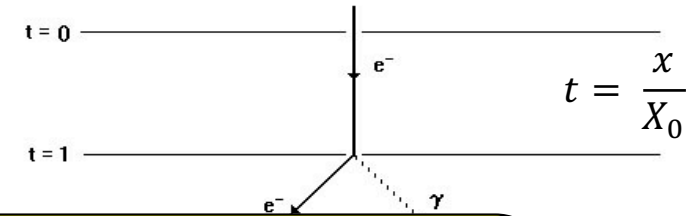


$$\text{per } E_c(e^\pm) = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad N_{max} = 2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_c}$$

- 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

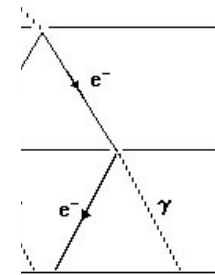
**Material**

$X_0$  [g/cm<sup>2</sup>]

$E_c$  [MeV]

$$t = \frac{x}{X_0}$$

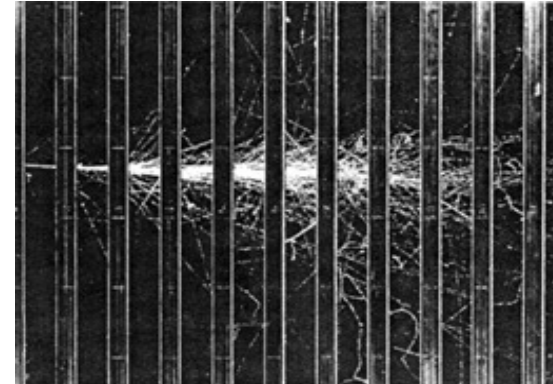
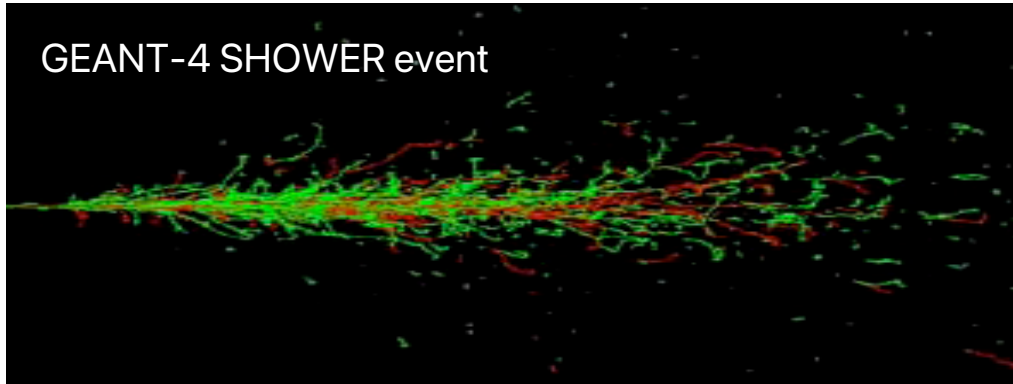
Material	$X_0$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$E_c$ [MeV]
H <sub>2</sub>	63	340
Al	24	47
Ar	20	35
Fe	13.8	24
Pb	6.3	6.9
Leadglass SF 5	9.6	~11.8
Plexiglass	40.5	80
H <sub>2</sub> O	36	93
NaJ (Tl)	9.5	12.5
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	8.0	~ 7



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

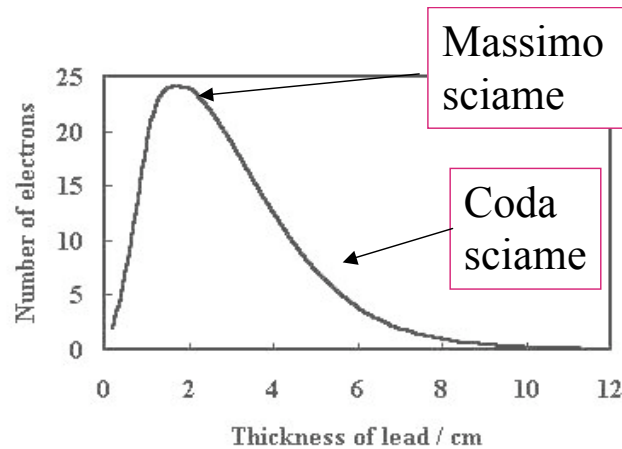
- Dopo questo punto entrano in gioco ionizzazione, scattering Compton e effetto fotoelettrico

# Lo sciame EM



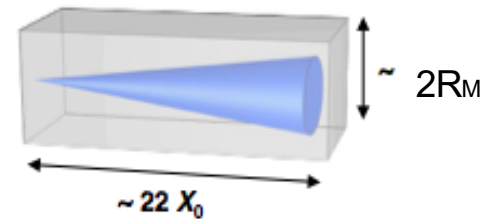
Sciame EM visto da una camera a nebbia con lastre di piombo equispaziate

## 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  $3.5R_M$

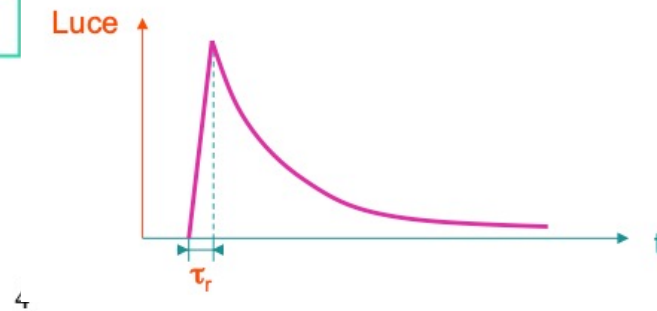
# Il processo di scintillazione

- 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

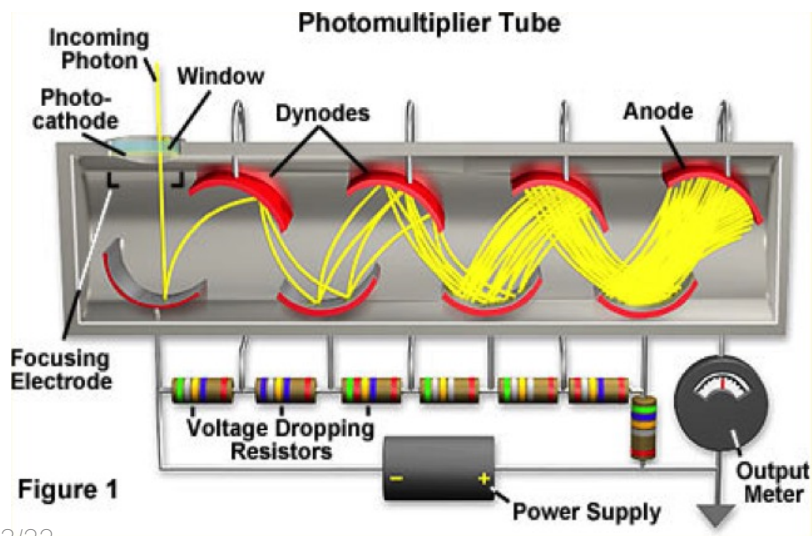


# Scintillatori organici vs Scintillatori inorganici

- Ottima risposta temporale ( $\tau < 10$  ns)
  - Scarsa  $\sigma_E$  e efficienza di scintillazione (2000 npe/MeV)
  - Bassa densità (1 g/cm<sup>3</sup>)
  - 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 -  $\mu$ s)
  - Migliore  $\sigma_E$  e efficienza di scintillazione (> 10000 npe/MeV)
  - Alta densità (>4 g/cm<sup>3</sup>) →Ha una buona efficienza per l'assorbimento totale di radiazione  $\gamma$  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
- $\delta$  è il coefficiente di emissione secondaria  $\frac{N_{e \text{ prodotti}}}{N_{\gamma \text{ incidenti}}}$

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