

# Calorimetri

# Indice

- ✓ Principi di funzionamento
- ✓ Tipi di calorimetri
- ✓ Esempi di calorimetri elettromagnetici
  - ❖ KLOE
  - ❖ ATLAS
  - ❖ CMS

# Principi di base

- Trasformano l'energia della particella in un segnale che può essere misurato, tipicamente per eccitazione o ionizzazione, nella parte attiva del calorimetro
- Nei calorimetri l'energia viene misurata attraverso il totale assorbimento delle particelle nel mezzo assorbitore (metodo distruttivo).
- La risposta del rivelatore è proporzionale all'energia della particella  $S = K E$
- Il principio di base è la formazione di una cascata:
  - Elettromagnetica ( $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$ )
  - Adronica ( $\pi$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $k...$  )
- La risoluzione energetica migliora all'aumentare dell'energia:

$$\sigma/E \propto 1/\sqrt{n} \propto 1/\sqrt{E}$$

# Caratteristiche generali

- Non necessitano di campo magnetico
- I calorimetri possono rivelare: 

{	Particelle cariche
	Particelle neutre
- In caso di copertura ermetica, è possibile misurare l'energia mancante  
→ evidenza di neutrini e altre particelle debolmente interagenti
- La dimensione scala con il  $\ln(E)$
- Possono misurare energia e posizione (facilmente segmentabili).
- PID
- Risposta veloce → trigger

# Perdita di energia per elettroni

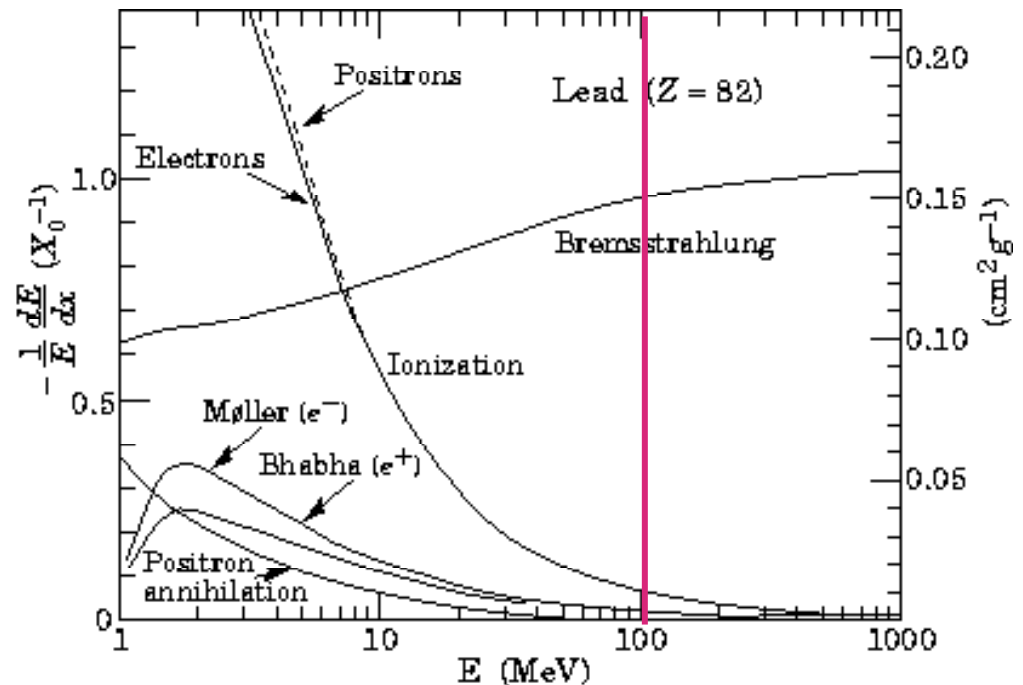
Gli elettroni perdono energia per collisione e per radiazione. Ad energie maggiori di 100 MeV, la perdita di energia per Bremsstrahlung, cioè della radiazione emessa dagli  $e^\pm$  che vengono deviati nel campo coulombiano dei nuclei dell'assorbitore è dominante.

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{irr}} = -E/X_0$$

Lunghezza  
di radiazione

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{tot}} = \left. \frac{dE}{dX} \right|_{\text{coll}} + \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{irr}}$$

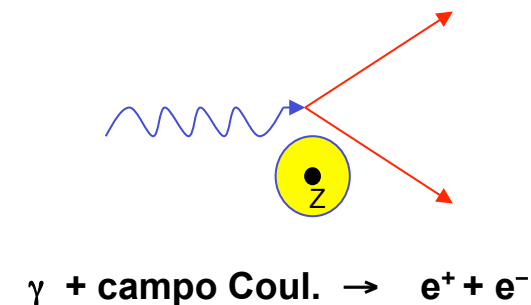
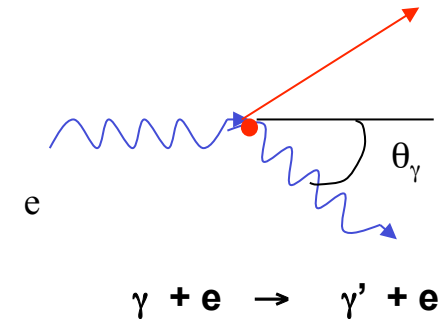
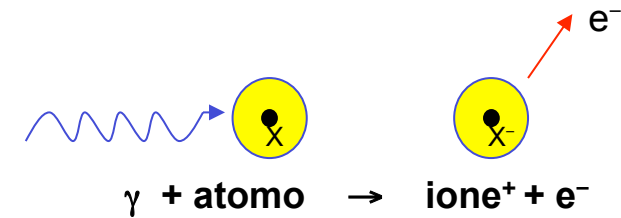
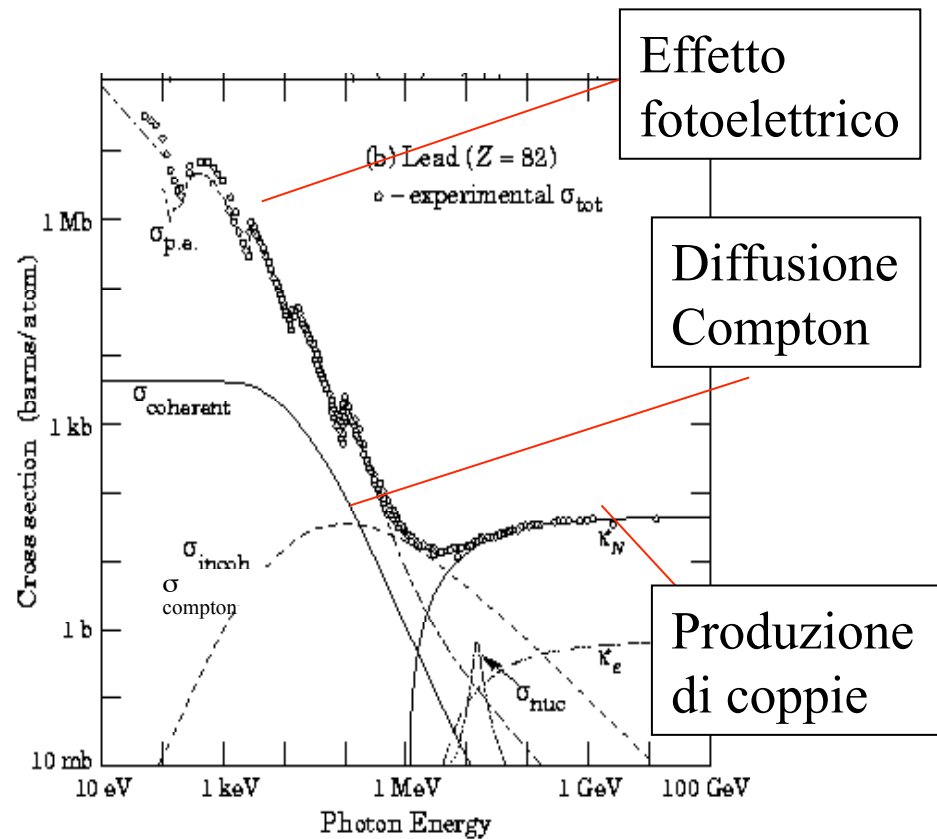


L'energia in cui  $\left. \frac{dE}{dX} \right|_{\text{coll}} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{irr}}$  è chiamata energia critica. Per  $E > E_c$  la Brems. è dominante e l'energia decresce esponenzialmente come

$$E(x) = E_0 e^{(-x/X_0)}$$

# Perdita di energia per fotoni

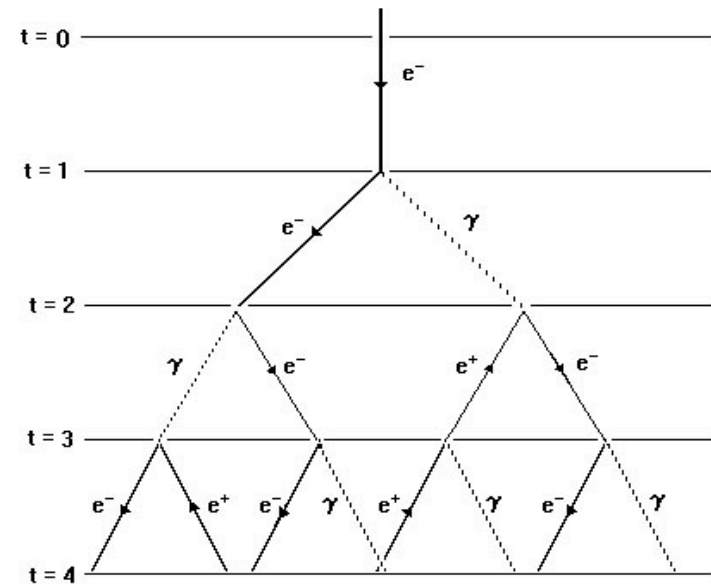
Per poter essere rivelato un **fotone** deve **creare o cedere** energia ad una **particella carica**



**La creazione di coppie avviene solo per energie maggiori di  $2 m_e$  ed è il fenomeno dominante per  $E > 20 \text{ MeV}$ .**

# Cascata elettromagnetica

Per energie abbastanza alte possiamo considerare solo la perdita di energia per radiazione (elettroni) e la produzione di coppie (fotoni). L'insieme dei 2 processi dà luogo alla cascata elettromagnetica.



Sviluppo longitudinale: aumento della cascata ogni  $X_0$ . Ad ogni passo l'energia della particella viene divisa in 2 parti uguali.

Sviluppo trasversale: allargamento laterale della cascata dovuto allo scattering multiplo degli elettroni e ai fotoni di bassa energia.

# Sviluppo longitudinale dello sciame

Dopo  $n=X/X_0$  lunghezze di radiazione:

$$N_{\text{sec}} = 2^n$$

$$E_{\text{sec}} = \frac{E_0}{2^n}$$

La cascata continua fino a quando:

$$E(t) > E_c$$

Il massimo dello sciame si ha per:

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2}$$

Dopo  $t = t_{\text{max}}$  I processi dominanti sono la ionizzazione, l'effetto Compton e l'effetto fotoelettrico  $\rightarrow$  assorbimento.

Si forma in questo modo la **coda dello sciame**



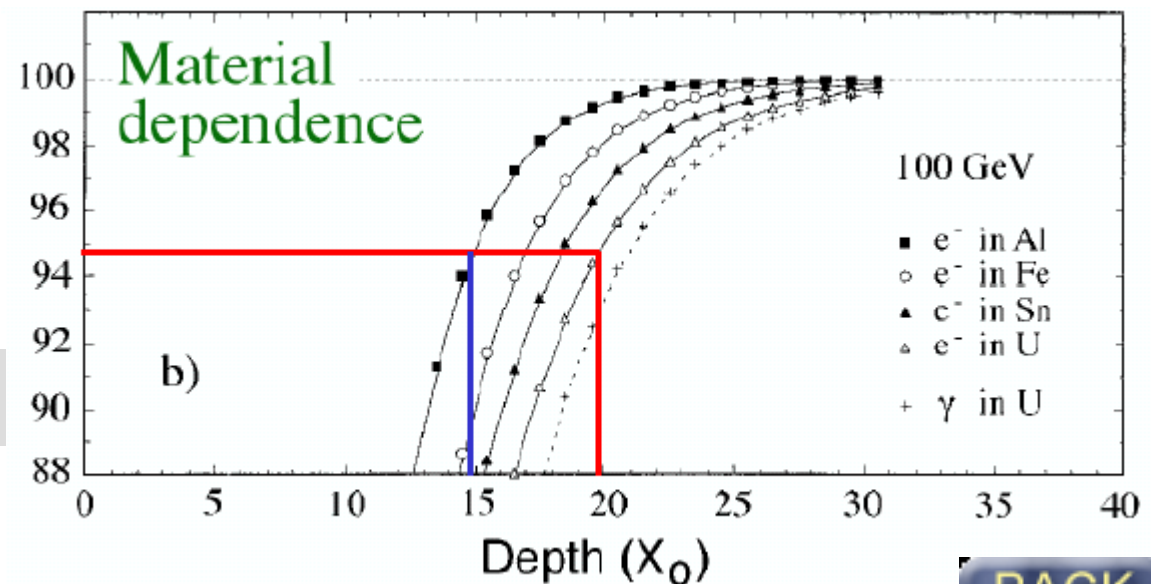
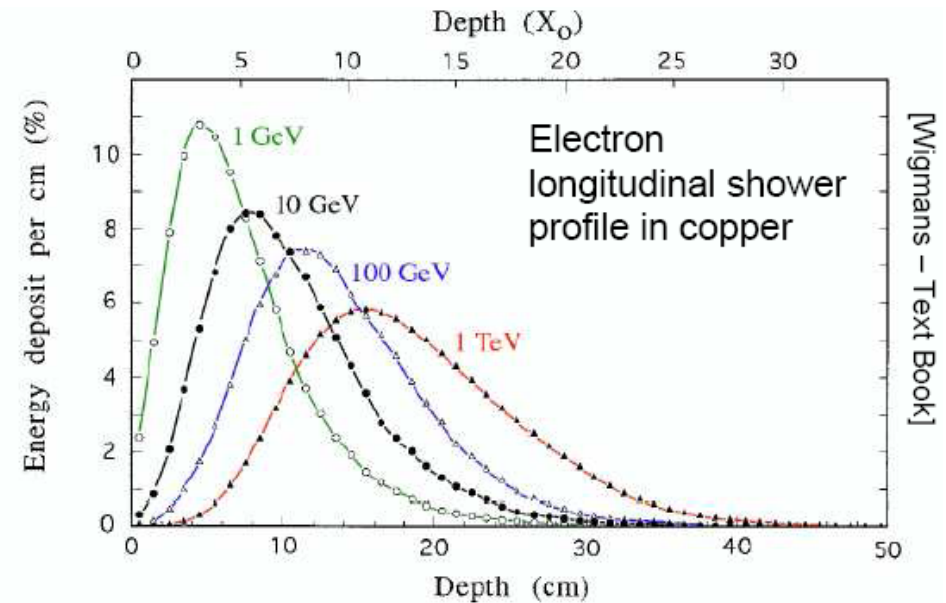
# Sviluppo longitudinale dello sciame

Profilo longitudinale dello sciame  
in funzione dell'energia.

Il massimo dello sciame varia  
come  $\ln(E)$

Per la scelta dell'assorbitore,  
occorre vedere quante  $X_0$  sono  
necessarie per assicurarci il  
contenimento dello sciame.

$$X_{95\%} = X_{Max} + 0.08Z + 9.6$$



BACK

# Sviluppo trasversale dello sciame

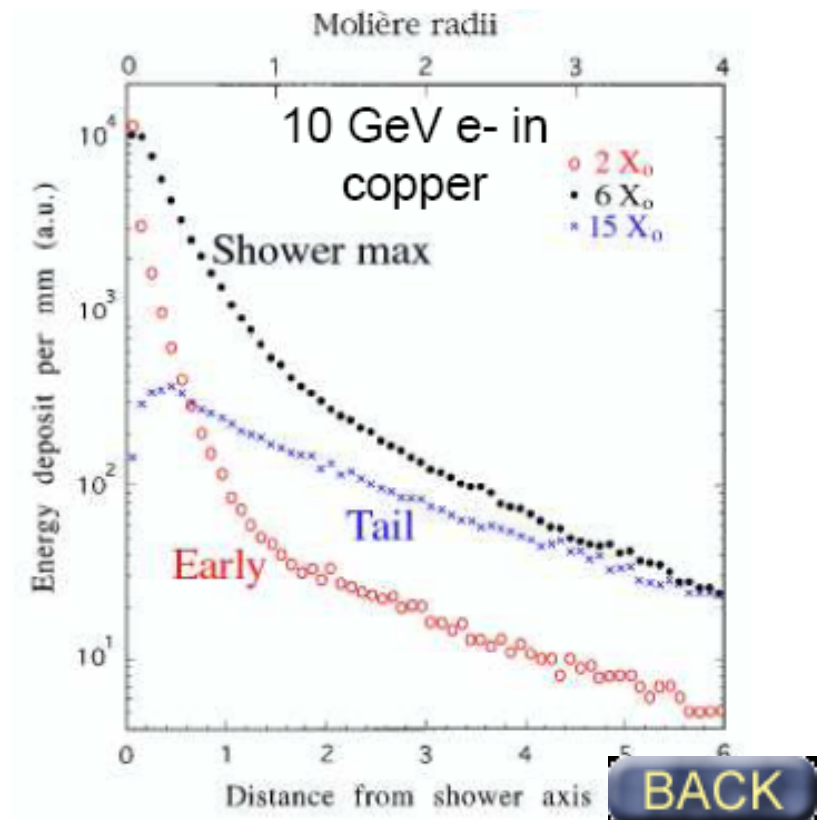
Lo sviluppo dello sciame comporta anche un allargamento laterale della cascata dovuto allo scattering multiplo degli elettroni e ai fotoni di bassa energia nel range Compton.

Per descrivere l'allargamento si definisce:

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

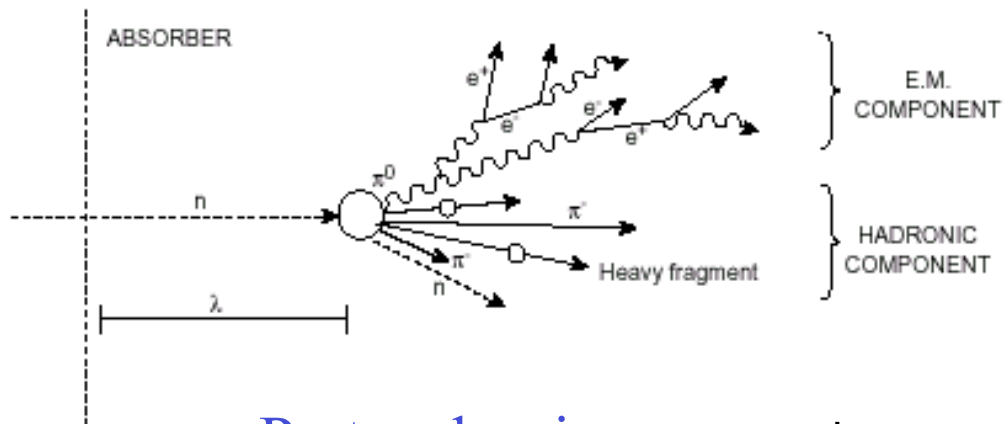
**75%  $E_0$  in  $1R_M$ ;  
95% in  $2R_M$ ;  
99% in  $3.5R_M$**

Material	Z	$X_0/\text{cm}$	$E_c/\text{MeV}$	$R_M/\text{cm}$
LAr	18	14	37	8
Fe	26	1.8	22	1.7
Lead	82	0.56	7.4	1.6



# Rivelazione di adroni

Gli adroni nei materiali, oltre alla perdita di energia se carichi, danno origine ad interazioni nucleari eccitando o frantumando il nucleo.



A parità di energia, le cascate adroniche sono molto più lunghe e ampie di quelle elettromagnetiche.

Parte adronica

+

Parte elettromagnetica

**Pioni carichi, K, neutroni.**

Inoltre, avvengono fenomeni che rilasciano energia invisibile nel rivelatore (rottura di nuclei pesanti, neutrini).

$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \rightarrow \text{cascata EM}$   
 $N(\pi^0) \propto \ln(E)$

**Grosse fluttuazioni energetiche → limitata risoluzione energetica**

# Rivelazione di adroni

In analogia con l'interazione elettromagnetica si definisce il coefficiente di assorbimento adronico:

$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}}$$

Material	Z	A	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$X_0$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$\lambda_a$ [g/cm <sup>2</sup> ]
Hydrogen (gas)	1	1.01	0.0899 (g/l)	63	50.8
Helium (gas)	2	4.00	0.1786 (g/l)	94	65.1
Beryllium	4	9.01	1.848	65.19	75.2
Carbon	6	12.01	2.265	43	86.3
Nitrogen (gas)	7	14.01	1.25 (g/l)	38	87.8
Oxygen (gas)	8	16.00	1.428 (g/l)	34	91.0
Aluminium	13	26.98	2.7	24	106.4
Silicon	14	28.09	2.33	22	106.0
Iron	26	55.85	7.87	13.9	131.9
Copper	29	63.55	8.96	12.9	134.9
Tungsten	74	183.85	19.3	6.8	185.0
Lead	82	207.19	11.35	6.4	194.0
Uranium	92	238.03	18.95	6.0	199.0

**Sviluppo longitudinale dello sciame:** il 95% della cascata è contenuta in una lunghezza:

$$t_{95\%} = a \ln E + b$$

E = energia della radiazione incidente

a, b= costanti dipendenti dall'assorbitore

**Sviluppo laterale dello sciame:** lo sciame consiste di core centrale + un alone. Il 95% dello sciame è contenuto in un cilindro di raggio  $\lambda_a$ .

# Tipi di calorimetri

# Tipi di calorimetri

Dai depositi energetici si deve generare il “segnale”.

**Calorimetri omogenei:** singolo materiale che agisce contemporaneamente da assorbitore e mezzo attivo che trasforma tutta l'energia depositata in segnale.

**Calorimetri eterogenei:** assorbitore e mezzo attivo costituiti di materiale differente. Il segnale è generato da una parte dell'energia depositata nel mezzo attivo.

I calorimetri EM sono più piccoli di quelli HAD in virtù della differenza di dimensione delle cascate ( $\lambda_a > X_0$ )

I calorimetri elettromagnetici sono i più semplici da comprendere in quanto il fotone e l'elettrone che incidono creano degli sciami nel materiale il cui comportamento è oggi completamente descritto da simulazioni dettagliate al computer.

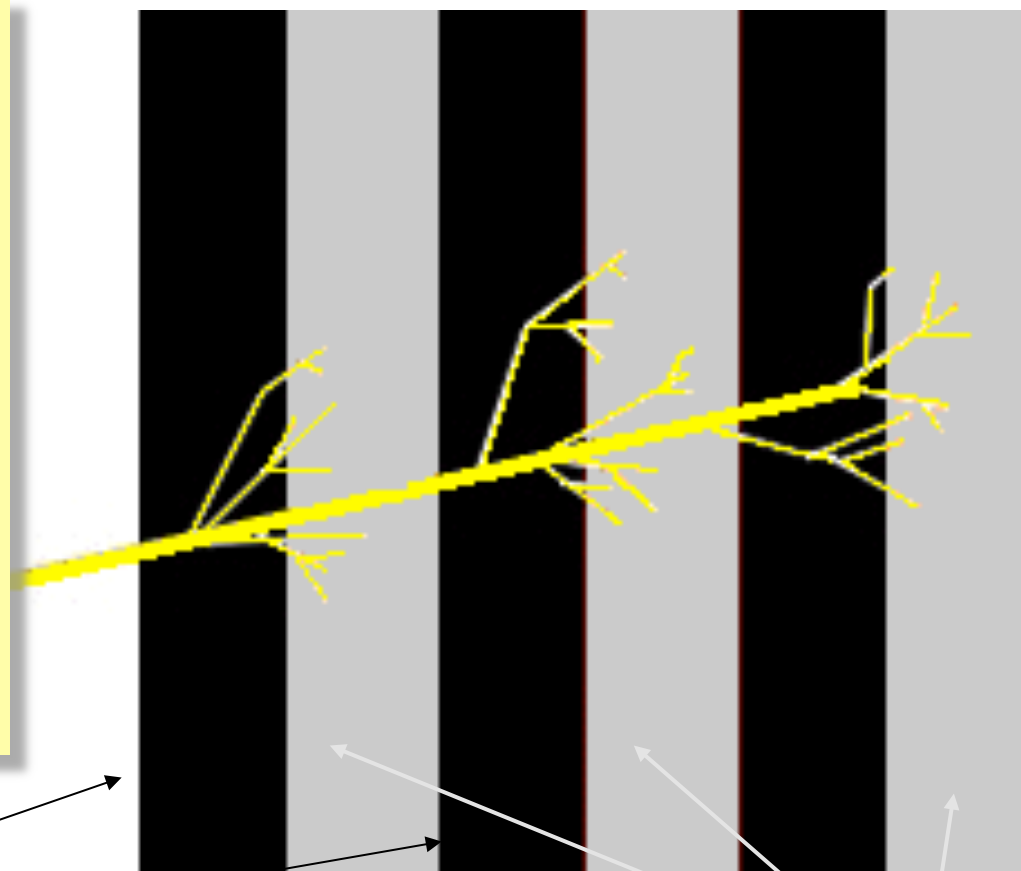
# Calorimetri eterogenei

## Struttura a sandwich!!

Strati di assorbitore e materiale attivo intervallati:

- ❑ Facilità di montaggio
- ❑ Costi ridotti
- ❑ Alta versatilità in
  - granularità di lettura
  - componente attiva

Materiali assorbenti  
Densi ad alto Z:  
PB, W ...



Rivelatori di particelle cariche,  
scintillatori, camere proporzionali,  
camere a ionizzazione (Kr, Xe),  
fibre scintillanti

# Calorimetri omogenei

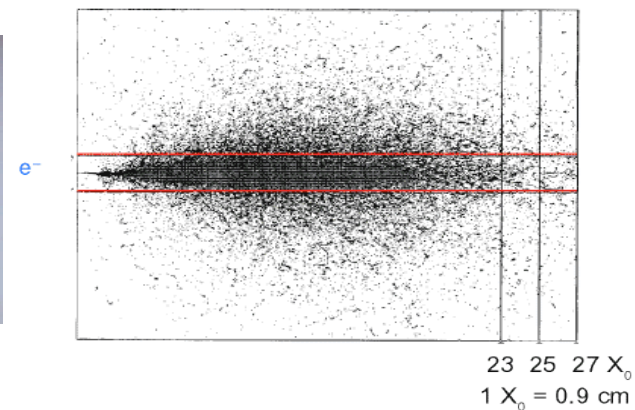
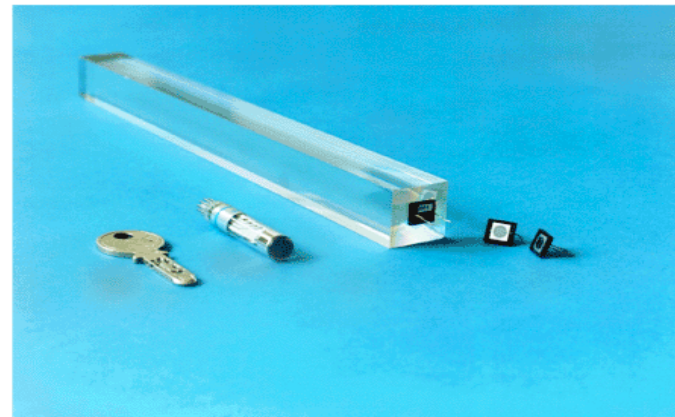
**Calorimetri composti solo di componente attiva**

Fotodiodo

Segnale elettrico

Fotoni dello sciame e.m.

Crystal (BGO,  $\text{PbWO}_4$ ,...)



**Questi cristalli sono usati anche in altri campi, in particolare in campo medico perchè permettono alte risoluzioni per fotoni di bassa energia (PET)**



# Risoluzioni energetiche

La risoluzione energetica di un calorimetro può essere parametrizzata come:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

-a → termine statistico o di campionamento:

- fluttuazioni intrinseche dello sciame
- fluttuazioni di campionamento

-b → **termine di rumore**

- rumore elettronico
- pileup – fluttuazioni energetiche dovute ad altre sorgenti

-c → termine costante

- non uniformità nella produzione e raccolta del segnale
- errori di calibrazione
- fluttuazioni della componente em dello sciame adronico

# HCAL

I calorimetri adronici sono molto più complicati di quelli EM perchè gli sciame creati dagli adroni nel materiale non sono perfettamente descrivibili.

In uno sciame adronico troviamo:

- 1) complicata produzione di secondari
- 2) presenza di componente elettromagnetica per creazione di  $\pi^0$  [ $f_{em}(E) \approx 0.11 \ln(E)$ ]
- 3) neutrini e muoni da decadimenti deboli di  $\pi$ ,  $K$
- 4) processi nucleari

Oltre ai fenomeni di campionamento e raccolta segnale questi calorimetri mostrano **un limite intrinseco nella risoluzione** causato dalle fluttuazioni in energia non rivelata (3)+(4).

Inoltre se c'è diversità nella risposta tra elettroni e adroni ( $e/h > 1$ ) si crea a causa di (2) una non-linearità nella risposta ed un deterioramento della risoluzione.

Si chiamano compensati i calorimetri adronici per i quali si impone  $e/h = 1$ .  
Per questi calorimetri si ottengono risoluzioni:

$$\sigma/E = 44 \% \sqrt{E(\text{GeV})} \text{ vs } 80\text{-}100 \% \text{ per quelli non compensati}$$

# Il calorimetro elettromagnetico di KLOE

# Es. calorimetro EM: KLOE

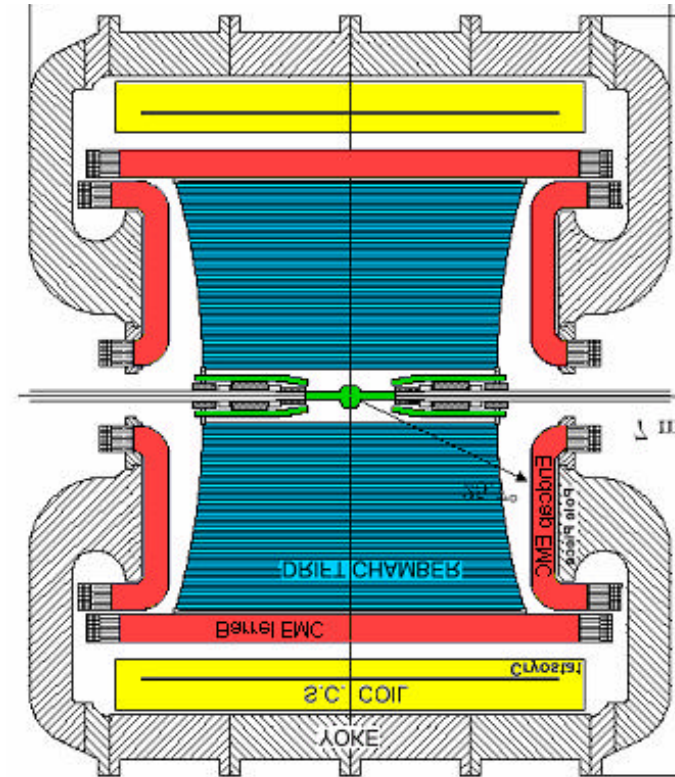
In questo caso il calorimetro deve:

- distinguere tra  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  e  $K_L \rightarrow 2\pi^0$
- ricostruire il vertice fotonico di decadimento con risoluzioni del cm
- distinguere tra  $\pi$  e  $\mu$

Calorimetro a campionamento:

## Piombo-fibre scintillanti

- struttura cilindrica compatta.
- spessore dei moduli 23 cm  $\rightarrow 15 X_0$
- copertura 98% dell'angolo solido
  - barrel 24 moduli
  - endcap 32 moduli ciascuno
- 4880 PM
- granularità  $4.4 \times 4.4 \text{ cm}^2$



$$\sigma_t = \frac{57 \text{ ps}}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{5.7\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$$

# I calorimetri EM di ATLAS e CMS

# Es. di calorimetro EM: ATLAS

Il calorimetro EM è studiato per rivelare i fotoni e le coppie  $e^+e^-$  del decadimento del H

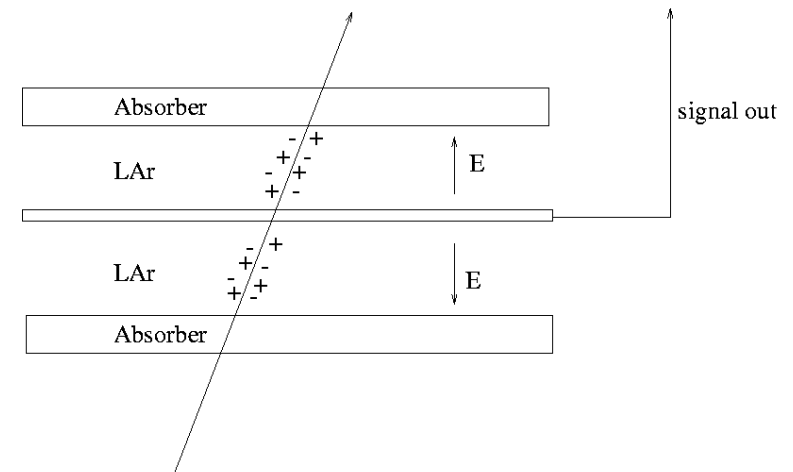
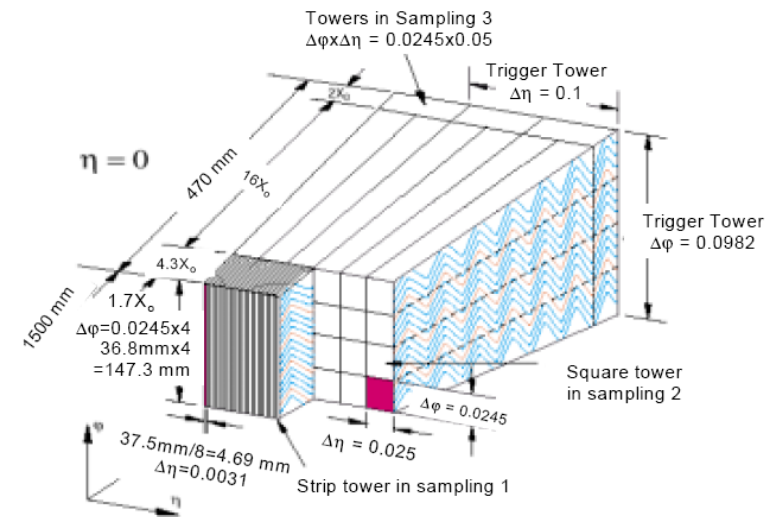
Calorimetro a sampling: **Piombo-liqAr**

- Buona resistenza alla radiazione
- Buona ermiticità
- Spessore:
  - barrel  $>24X_0$
  - endcap  $>26X_0$

~200000 canali

Il passaggio di una particella carica nell'Argon crea coppie elettrone-ione che si muovono grazie al campo elettrico applicato. Questa tecnica si basa sulla rivelazione della corrente prodotta da questo movimento.

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.25}{E(\text{GeV})} \oplus 0.7\%$$



# Es. calorimetro EM: CMS

Le condizioni “al contorno” sono le stesse di ATLAS (alta radiazione, detector veloce, alta granularità)

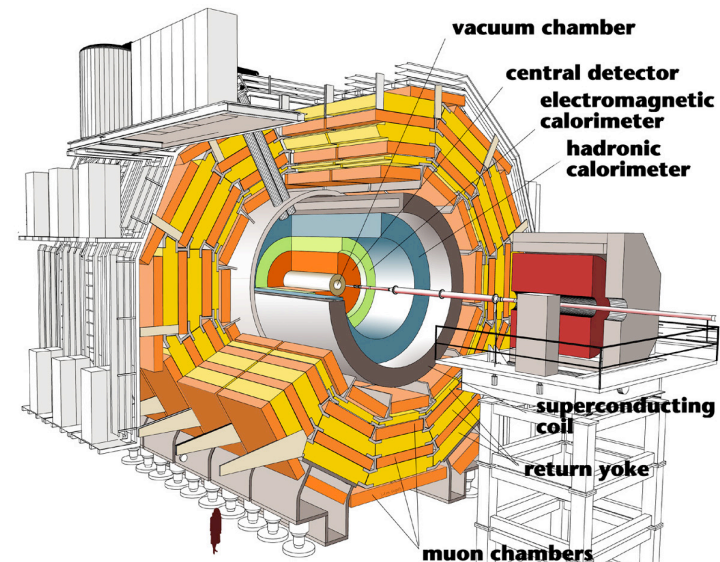
Calorimetro omogeneo formato da cristalli di  $\text{PbWO}_4$

- ottima risoluzione energetica
- calorimetro compatto
- basso LY  $\rightarrow$  scelta rivelatori fotoni

Barrel: 612000 cristalli letti da 2 APD  
Endcap: 14488 cristalli letti da 1 PM

APD: funzionamento in alto B, buona risoluzione e amplificazione x25

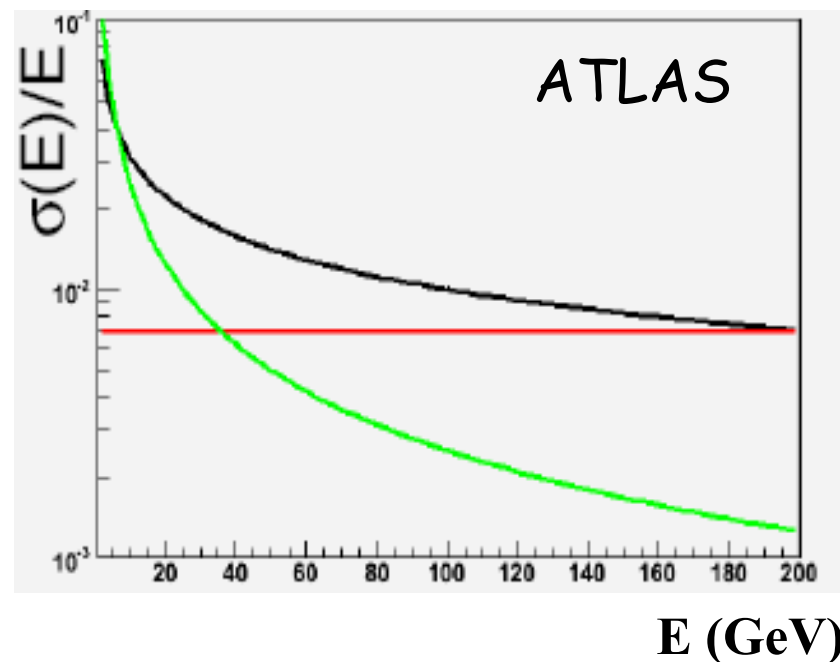
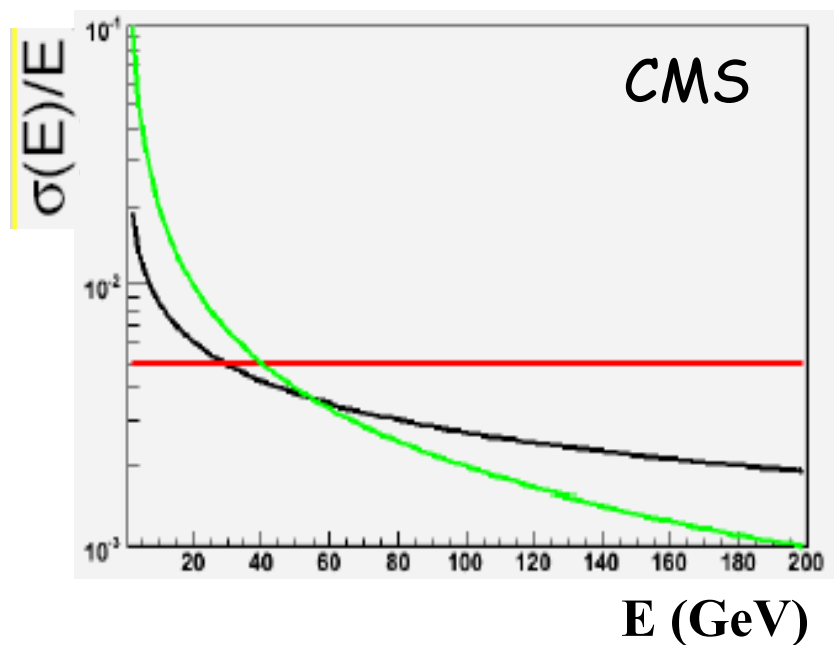
$$\frac{\sigma}{E} = \frac{2.7\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 0.55\% \oplus \frac{0.2}{E}$$



Parameter			Value
Radiation length	cm		0.89
Moliere radius	cm		2.2
Hardness	Moh		4
Refractive index			2.3
Peak emission	nm		440
% of light in 25 ns			80%
Light yield (23 cm)	$\gamma/\text{MeV}$		100

# Confronto EMC ATLAS-CMS

Confronto tra le risoluzioni dei prototipi:



CMS, ad alta energia, ha una migliore risoluzione energetica



# Confronto EMC ATLAS-CMS

## Confronto nella rivelazioni del decadimento $H \rightarrow \gamma\gamma$

Larghezza sperimentale di  $m_{\gamma\gamma} = 2E_1E_2(1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})$ :

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \left( \frac{\sigma_1}{E_1} \right) \oplus \left( \frac{\sigma_2}{E_2} \right) \oplus \left( \frac{\sigma_\vartheta}{\text{tg}(\vartheta_{\gamma\gamma}/2)} \right) \right]$$

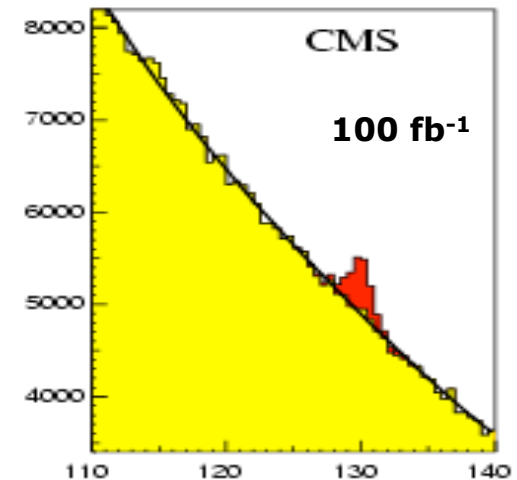
Risoluzioni energetiche

ATLAS=1.2 GeV

CMS=0.7 GeV

$$\sigma_\vartheta = \frac{50 \text{ mrad}}{\sqrt{E}}$$

Uguale per  
ATLAS e  
CMS



**CMS** punta ad una migliore risoluzione energetica con un termine costante basso

**ATLAS** utilizza un calorimetro segmentato e questo consente di fare misure ridondanti dell'angolo dei fotoni → migliore misura della direzione di arrivo dei fotoni