

---

# Calorimetria

---

Marina Cobal

# Calorimetri

- Calorimetri EM
  - Ricostruzione dello sciame
  - Limiti sulla risoluzione in energia
- Calorimetri adronici
  - Ricostruzione dello sciame
- Calorimetri omogenei e a sampling
- Progettazione di un calorimetro
  - Compensazione
  - Dipendenze
- Identificazione di particelle con calorimetri

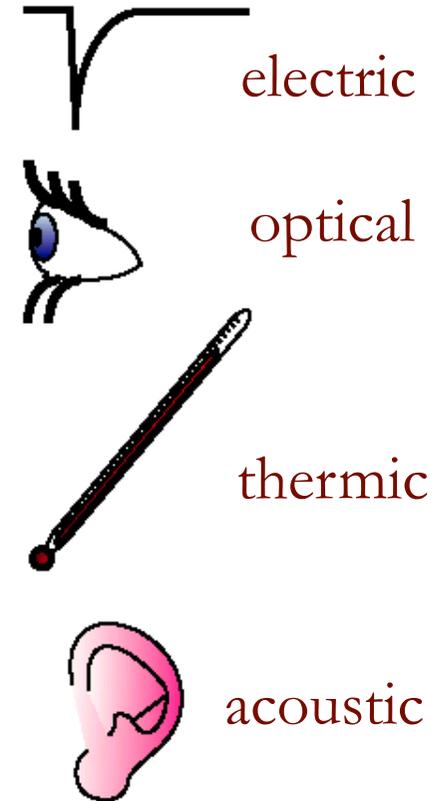
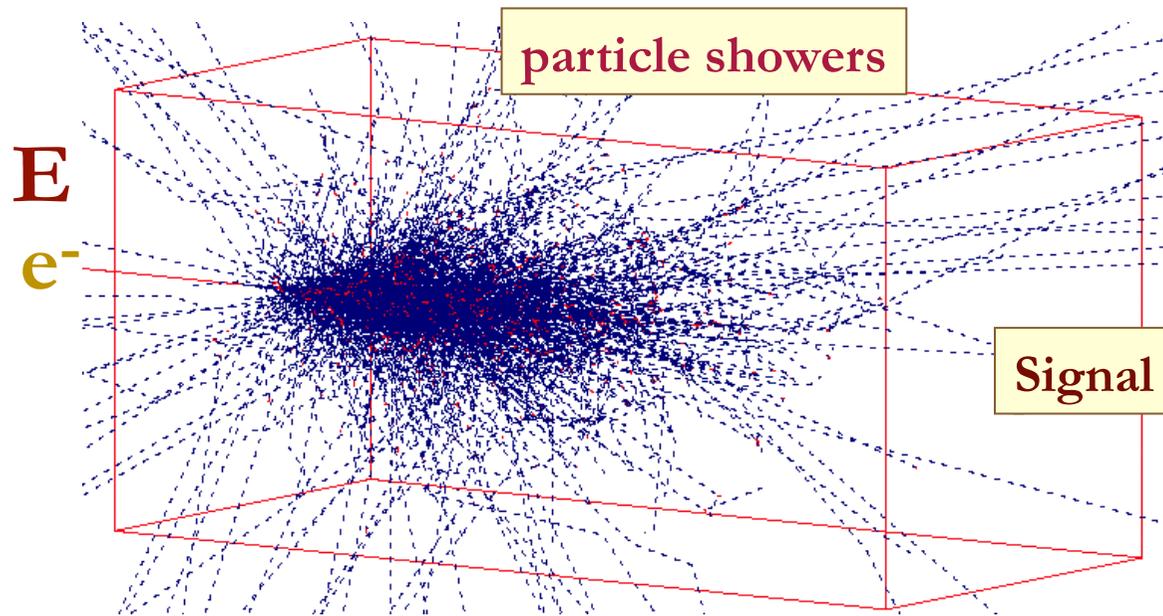
# Calorimetri

Il calorimetro non è altro che un blocco di materiale strumentato che risponde in maniera proporzionale all'energia della particella che lo attraversa. È di conseguenza uno strumento essenzialmente usato per misurare  $E$ , ma, se segmentato e con fine granularità può anche fornire informazioni sul tipo di particella che lo attraversa.

(Elettroni e gamma), adroni,  $\mu$  danno una risposta diversa quando attraversano un calorimetro.

Misurare l'energia di una particella tramite un calorimetro è un metodo distruttivo, poiché la particella viene assorbita dal calorimetro

# Calorimeters: a simple concept



Convert energy  $E$  of incident particles  
to detector response  $S$ :

$$S \propto E$$

# Calorimetri

- Detection based on stochastic processes  
precision increases with E
- Detection of both charged and neutral particles
- Dimensions necessary to containment  $\propto \ln E$   
compactness
- Easy to be segmented  
measure of position and direction &  
particle id on topological basi
- Fast  
high rate capability, trigger

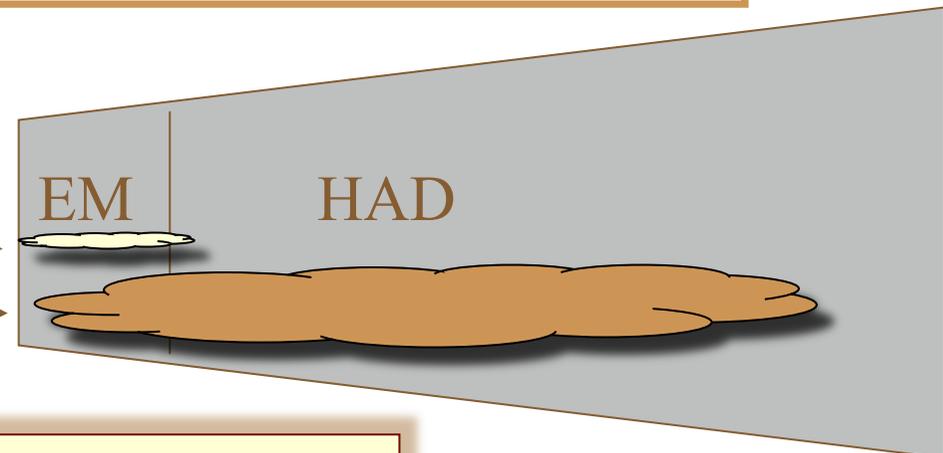
# Calorimetri

I calorimetri assorbono l'energia della particella incidente  $E$  e rilasciano un segnale ad essa proporzionale:

- Svolgono un ruolo rilevante e complementare alla tracciatura per la loro versatilità di uso e per il fatto che la risoluzione migliora all'aumentare dell'energia della particella!
- Si dividono in due categorie:
  - **Omogenei** ( tutto il materiale è sia assorbitore che attivo )
  - **Eterogenei** ( è costituito da strati alternati di assorbitore e attivo )

Si dividono in calorimetri elettromagnetici (EM) o adronici (HAD) in funzione della capacità di rivelare  $\gamma, \pi^0$  o adroni ( $n, p, \pi^\pm, K$ )

$\gamma, \pi^0$   
 $n, p, \pi^\pm, K$



Le dimensioni dei calorimetri HAD sono maggiori di quelli EM in quanto  $\lambda_{\text{int}} > X_0$  !!

# Calorimetri

I calorimetri sono spesso classificati tramite il processo fisico che devono osservare:

Sciame elettromagnetici → calorimetri elettromagnetici

Sciame adronici → calorimetri adronici

Le interazioni e.m. iniziate da  $e^\pm$  e  $\gamma$  sono molto diverse da quelle iniziate da adroni

Entrambe le interazioni producono particelle secondarie che perdono energia sciameando, ma i parametri dello sciame sono molto diversi

→ pur usando materiali ed elettronica simili, le granularità, dimensioni, risoluzioni in energia e fluttuazioni sono diverse.

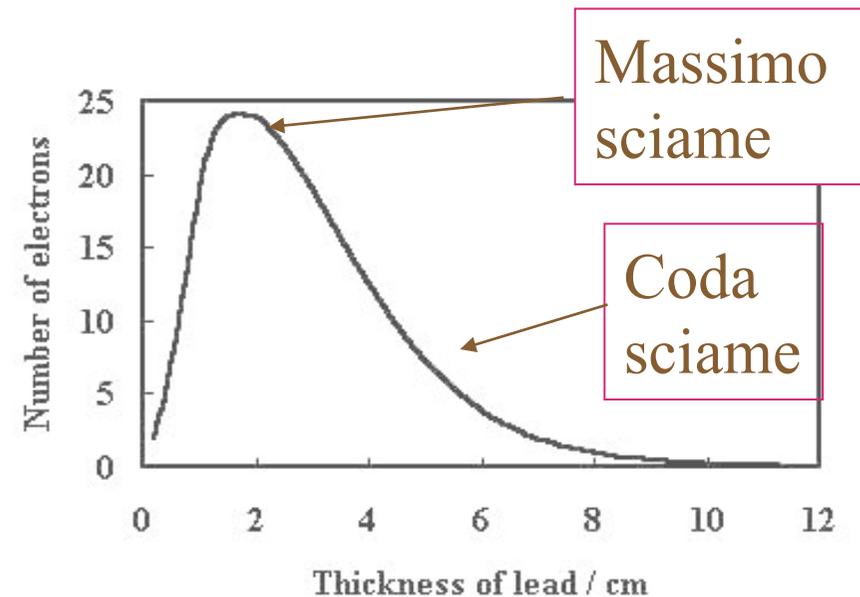
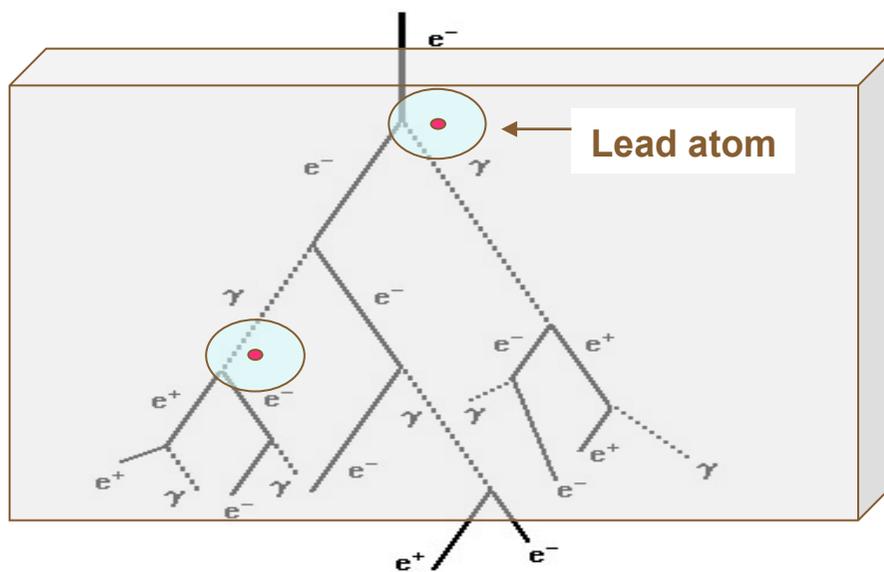
Mentre calorimetri e.m. possono raggiungere risoluzioni relative in energia (termine stocastico)  $\sim 1\div 2\%$ , quelli adronici non avranno mai una risoluzione migliore del  $\sim 35\%$  (per  $E=1\text{ GeV}$ ).

	$X_0(\text{cm})$	$\lambda_{\text{hadr}}(\text{cm})$
■ Scintillatore Plastico	40	80
■ BGO	1.1	22
■ NaI	2.6	41
■ Lead glass	4	
■ (Piombo)	0.6	18

Tipicamente  $\lambda > X_0$  quindi i calorimetri adronici sono più spessi di quelli em

# Calorimetri Elettromagnetici (I): sciame

I calorimetri elettromagnetici sono i più semplici da comprendere in quanto il fotone e l'elettrone che incidono creano degli sciame nel materiale il cui comportamento è oggi completamente descritto da simulazioni dettagliate al computer (EGS4).



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

$$t = X/X_0$$

# Calorimetri EM (II): modello semplice di sciame

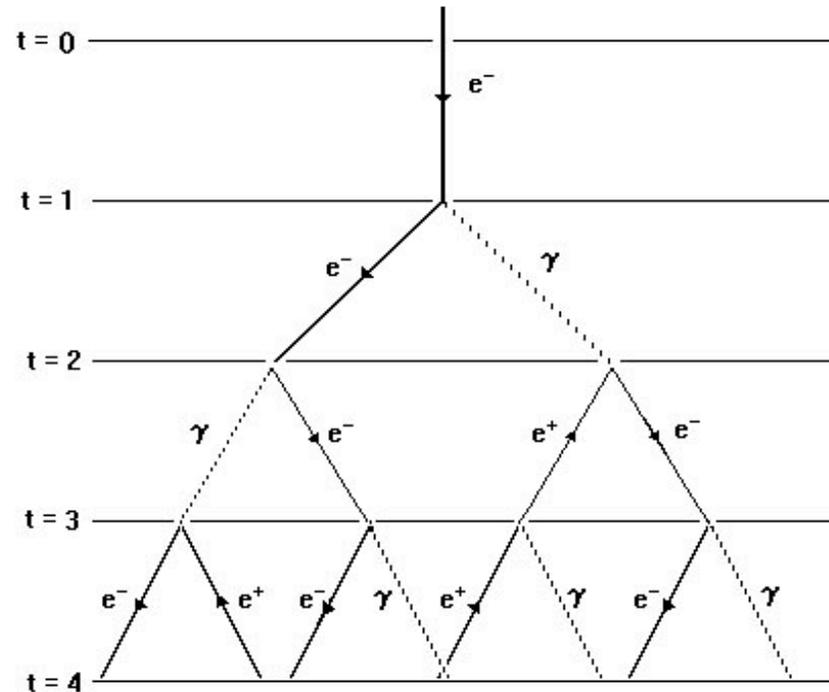
Lo sciame è creato da  $e^+$ ,  $e^-$  che emettono  $\gamma$  per BREMS e  $\gamma$  che creano coppie  $e^+$ ,  $e^-$

- Questi processi avvengono a distanza di  $1 X_0$
- In ogni processo  $E = E_i / 2$

Alla distanza  $X$  abbiamo  $n$  processi avvenuti con:

- $n = X/X_0$
- $E_s = E_0/2^n$
- $N_s = 2^n$

La valanga si ferma ad  $E_s = E_c$



Il massimo dello sciame si ottiene ad  $L_{\max} = \ln(E_0/E_c) / \ln 2$

Lo sciame procede poi con processi dissipativi tipo ionizzazione, effetto Compton o fotoelettrico. Si forma così la coda dello sciame

# Calorimetri Adronici

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

Difatti in uno sciame adronico troviamo:

- complicata produzione di secondari
- presenza di componente elettromagnetica per creazione di  $\pi^0$

$$f_{em}(E) \approx 0.11 \ln(E)$$

- neutrini e muoni da decadimenti deboli di  $\pi$ , K
- 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. Inoltre se c'è diversità nella risposta tra elettroni e adroni ( $e/h > 1$ ) si crea una non-linearità nella risposta ed un deterioramento della risoluzione.

I calorimetri adronici con migliore risoluzione e linearità sono quelli con  **$e/h = 1$**  (compensazione) in cui  **$\sigma/E = 44 \% \sqrt{E(\text{GeV})}$**

# Calorimetri Adronici

La lunghezza dello sciame adronico aumenta con l'energia della particella incidente

Per assorbire adroni di alcune centinaia di GeV sono necessari approssimativamente 2 m di ferro con un'estensione laterale di  $60 \times 60 \text{ cm}^2$

Ad alte energie, più della metà dell'energia è rilasciata in un cilindro di raggio

$$R \sim 0.2 \lambda_{\text{int}}$$

$$t_{\text{max}} \approx 0.2 \ln(E/1 \text{ GeV}) + 0.7$$

$$L ( 95\% ) \propto t_{\text{max}} + 2.5 \lambda_{\text{I}}$$

Parametrizzazione:

$$L ( 95\% ) = ( 9.4 \ln E + 39 ) (\text{cm})$$

In Fe, E in GeV

# Calorimetri - Note

- Il numero di particelle dove lo sciame e' massimo e' proporzionale all'energia incidente

$$N_{\max} \propto E_0$$

- La somma delle lunghezze delle tracce delle particelle nel calorimetro e' proporzionale all'energia incidente

$$L \propto E_0$$

- Il segnale del calorimetro e' proporzionale alla somma della lunghezza delle tracce delle particelle

$$E_{\text{visibile}} \propto L$$

# Calorimetri compensati

La gran parte delle secondarie in uno sciame adronico sono  $\pi$  tra i quali  $1/3$  sono  $\pi_0$  e quindi  $\gamma$  (sciame e.m)

Parte dell'energia è convertita in eccitazione o rottura del nucleo (non rivelabile)

Gli adroni sono più penetranti e quindi è maggiore la frazione di energia persa e le sue fluttuazioni

- Contributi alla risoluzione energetica

- Fluttuazione statistica nella propagazione della cascata

- Leakage (perdita di parte dello sciame)

- Fluttuazioni statistiche del sampling (tipicamente il doppio di quello em)

Si può migliorare inserendo materiali ( $^{238}\text{U}$ ) che fissionando, emettono  $\gamma$  osservabili (cal compensati)

# Compensazione di un calorimetro

## Il concetto di compensazione:

Un calorimetro adronico ha in generale diverse efficienze di rivelazione delle componenti adroniche ( $E_h$ ) ed elettromagnetiche ( $E_e$ ).

$$R_h = \varepsilon_h E_h + \varepsilon_e E_e$$

risposta allo sciame adronico

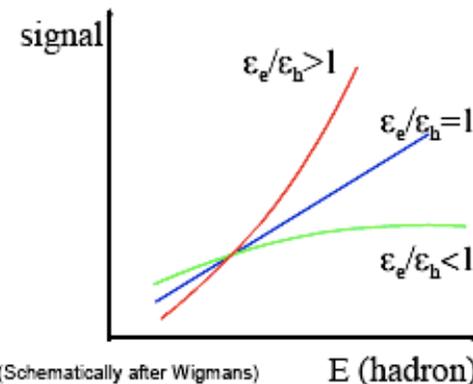
$\varepsilon_h$ : efficienza per adroni

$\varepsilon_e$ : efficienza per elettroni

La frazione di energia depositata adronicamente dipende dall'energia:

$$\frac{E_h}{E} = 1 - f_{\pi^0} = 1 - k \ln E \quad (GeV) \quad k \approx 0.1$$

La risposta del calorimetro agli sciami adronici diventa non lineare.



(Schematically after Wigmans)

Energy resolution degraded !

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b \cdot \left| \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_h} - 1 \right|$$

(R. Wigmans NIM A 259 (1987) 389)

# Compensazione di un calorimetro

**Come si può ottenere la compensazione?** migliorare la risposta del calorimetro alla componente neutra e di bassa energia dello sciame adronico

Usare assorbitori di Uranio  $\rightarrow$  tramite fissione si amplifica la componente di neutroni e  $\gamma$  di bassa energia + usare rivelatori con idrogeno  $\rightarrow$  **alta efficienza per rivelare n**

➤ **Diminuire  $\epsilon_e$**

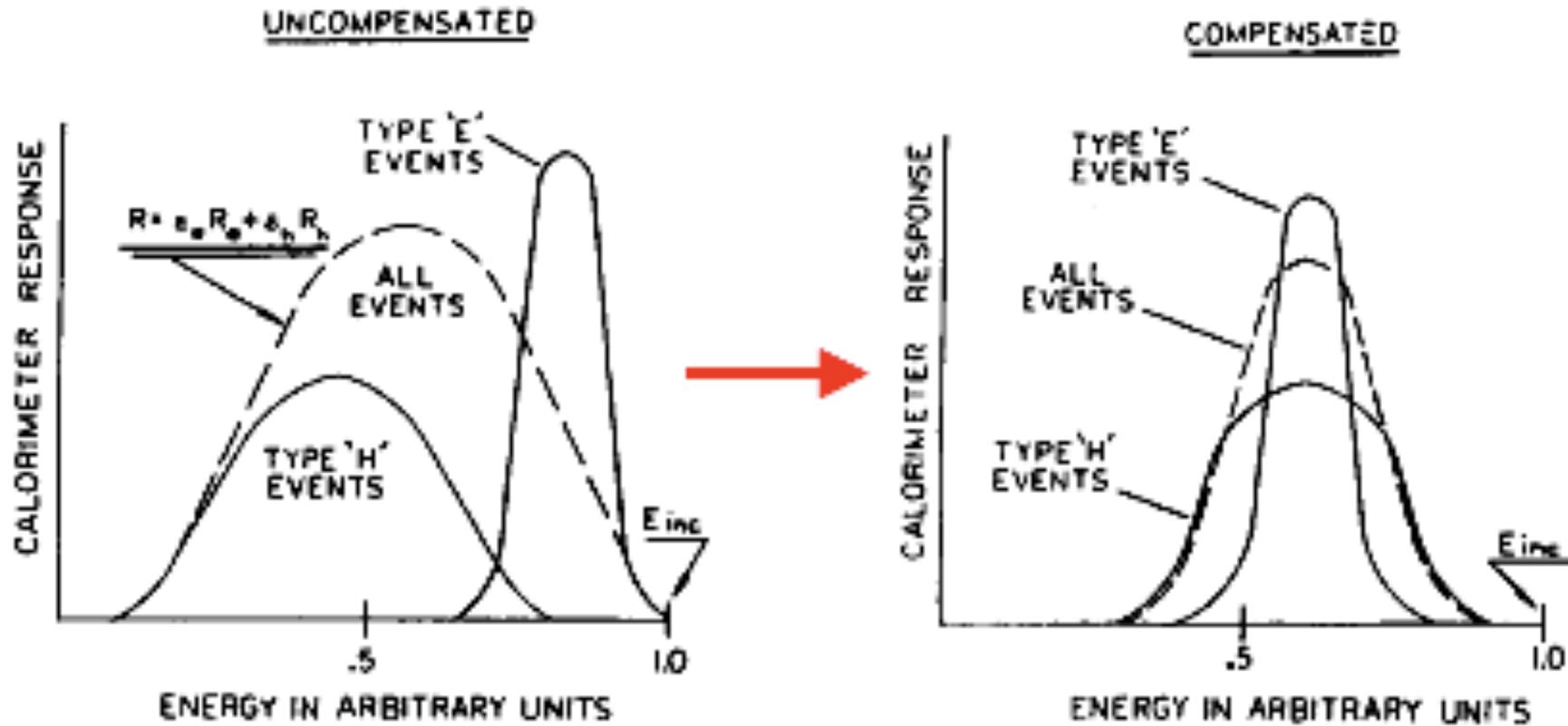
Combinare assorbitori ad alto Z con rivelatori a basso Z. Si sopprime la rivelazione di  $\gamma$  di bassa energia.

➤ **Compensazione offline**

Richiede la conoscenza dettagliata dello sviluppo dello sciame  $\rightarrow$  correzione evento per evento

➤ **Aumentare  $\epsilon_h$**

# Compensazione di un calorimetro



(Cushman, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific, 1992)

# Calorimetri

I calorimetri si suddividono ulteriormente in:

- **Calorimetri omogenei:**

- Rivelatore = assorbitore
- Buona risoluzione in energia ( $\sim 1-2\%$ )
- Risoluzione spaziale limitata nella direzione longitudinale
- Usati solo per calorimetria e.m.
- alto costo e danneggiabili dalle radiazioni

- **Calorimetri a campionamento:**

- Rivelatore ed assorbitore separati → solo parte dell'energia viene misurata
- Risoluzione in energia limitata
- Buona risoluzione spaziale nella direzione longitudinale
- Usati sia per calorimetria adronica che e.m.

# Calorimetri omogenei

Rivelano fotoni che possono essere prodotti diversamente a seconda del tipo di elemento rivelatore:

possono essere **fotoni Cherenkov** o **fotoni prodotti dal diseccitamento degli atomi ionizzati** lungo la traccia.

fotomoltiplicatori, trasformano i fotoni in elettroni e forniscono un segnale proporzionale alla luce prodotta.

Sia il fenomeno di produzione di fotoni sia il fenomeno di produzione di fotoelettroni sono fenomeni statistici, ed entrambi questi fenomeni contribuiscono alla risoluzione totale dell'apparato.

Anche le camere a deriva possono essere considerate calorimetri omogenei, in questo caso viene rivelata la carica prodotta per ionizzazione.

Questo tipo di calorimetri non è preferenzialmente usato per sciami adronici perchè le fluttuazioni intrinseche degli sciami ne riducono la risoluzione mentre non è possibile 'compensarli'

# Calorimetri omogenei

## Rivelatori a semiconduttore

Le particelle cariche producono una coppia elettrone-buca ( $E=3.6$  eV in Si)  
Ottima risoluzione (fattore di Fano)  
Es. cristalli di silicio e germanio  
Costosi.  
Raramente usati in fisica delle alte energie (date le dimensioni)

## Rivelatori Cerenkov

Gli  $e^+$ ,  $e^-$  ultrarelativistici producono luce Cerenkov nel mezzo  
Vengono rivelati i fotoni (convertiti in (foto)elettroni).  
Basso numero di fotoni. Risoluzione limitata  
Es. Lead glass ( $PbO$ )

## Scintillatori

Le particelle cariche producono luce di scintillazione  
Vengono rivelati i fotoni (convertiti in (foto)elettroni).  
Es:  $NaI(Tl)$ ,  $BGO$ ,  $PbWO_4$ ,...  
Calorimetri ad Argon liquido (o altri elementi nobili)  
Ar, Xe, Ne a temperatura criogenica  
Si misura la carica di ionizzazione o la luce di scintillazione  
Risoluzione eccellente (fattore di Fano)

# Calorimetri Omogenei

## Scintillatori in calorimetri

Nei calorimetri omogenei sono quasi sempre usati scintillatori inorganici (cristalli e gas nobili liquidi) per i seguenti motivi:

a. Inorganici

- ☺ buona emissione di luce
- ☺ linearità con l'energia
- ☹ meno luce di quelli organici

b. Organici

- ☹ minore linearità (Birk)
- ☺ sono veloci

# Crystal calorimeters

Among different types of calorimeters those with **scintillating crystals** are the **most precise in energy measurements**

- ❑ Excellent energy resolution (over a wide range)
- ❑ High detection efficiency for low energy  $e$  and  $\gamma$
- ❑ Structural compactness:
  - ❑ simple building blocks allowing easy mechanical assembly
  - ❑ hermetic coverage
  - ❑ fine transverse granularity
- ❑ Tower structure facilitates event reconstruction
  - ❑ straightforward cluster algorithms for energy and position
  - ❑ electron/photon identification

# Calorimetri Omogenei

## Scintillatori (cristalli inorganici)

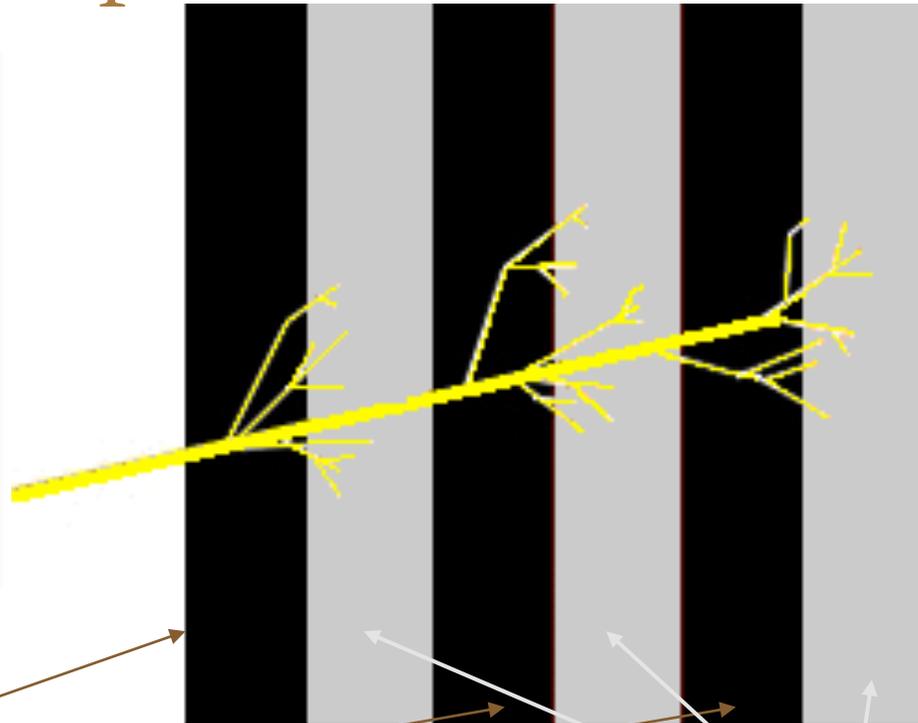
Scintillator	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	X <sub>0</sub> [cm]	Light Yield $\gamma$ /MeV (rel. yield)	$\tau_1$ [ns]	$\lambda_1$ [nm]	Rad. Dam. [Gy]	Comments
NaI (Tl)	3.67	2.59	4×10 <sup>4</sup>	230	415	≥10	hygroscopic, fragile
CsI (Tl)	4.51	1.86	5×10 <sup>4</sup> (0.49)	1005	565	≥10	Slightly hygroscopic
CSI pure	4.51	1.86	4×10 <sup>4</sup> (0.04)	10 36	310 310	10 <sup>3</sup>	Slightly hygroscopic
BaF <sub>2</sub>	4.87	2.03	10 <sup>4</sup> (0.13)	0.6 620	220 310	10 <sup>5</sup>	
BGO	7.13	1.13	8×10 <sup>3</sup>	300	480	10	
PbWO <sub>4</sub>	8.28	0.89	≈100	10 10	≈440 ≈530	10 <sup>4</sup>	light yield =f(T)

Relative light yield: rel. to NaI(Tl) readout with PM (biakali PC)

# Calorimetri a Campionamento

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 a Campionamento

Sono i più usati sia come e.m. che adronici.

Costituiti da assorbitore + rivelatore

- **Assorbitore:** in generale Pb (e.m) Fe, Uranio (Adronici)
- **Rivelatore:** MWPC, tubi streamer, Scintillatori, fibre scintillanti, rivelatori al silicio, liquidi caldi (TMP, TMS), Liquidi nobili (LAr,LKr,LXe)

**Assorbitore e rivelatore separati**

→ ulteriori fluttuazioni (fluttuazione di campionamento)

# Calorimetri a Campionamento

## Scintillatori

Scintillatori organici disposti in piani o fibre  
Economici, segmentabili, veloci, con un guadagno accettabile  
Il readout ottico è sensibile a invecchiamento e danni da radiazione

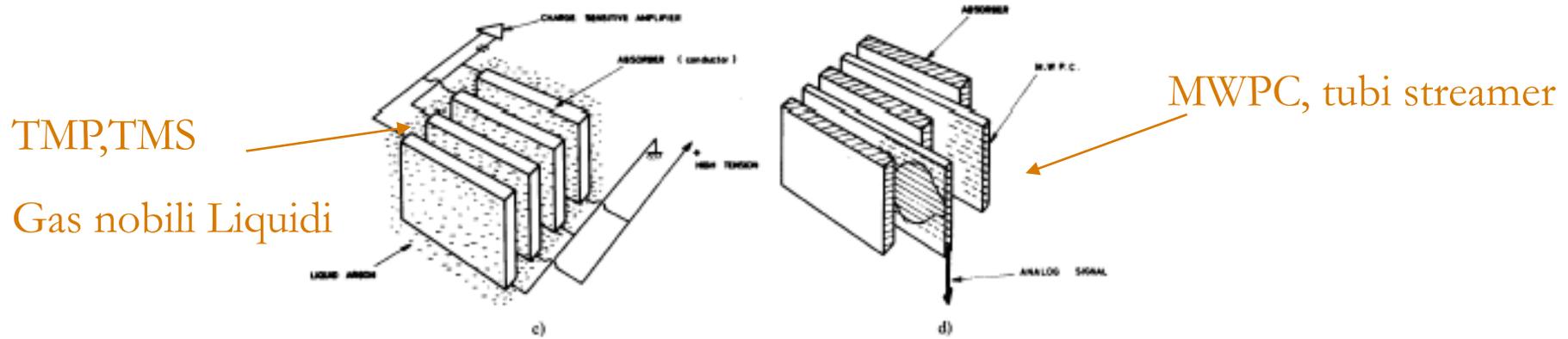
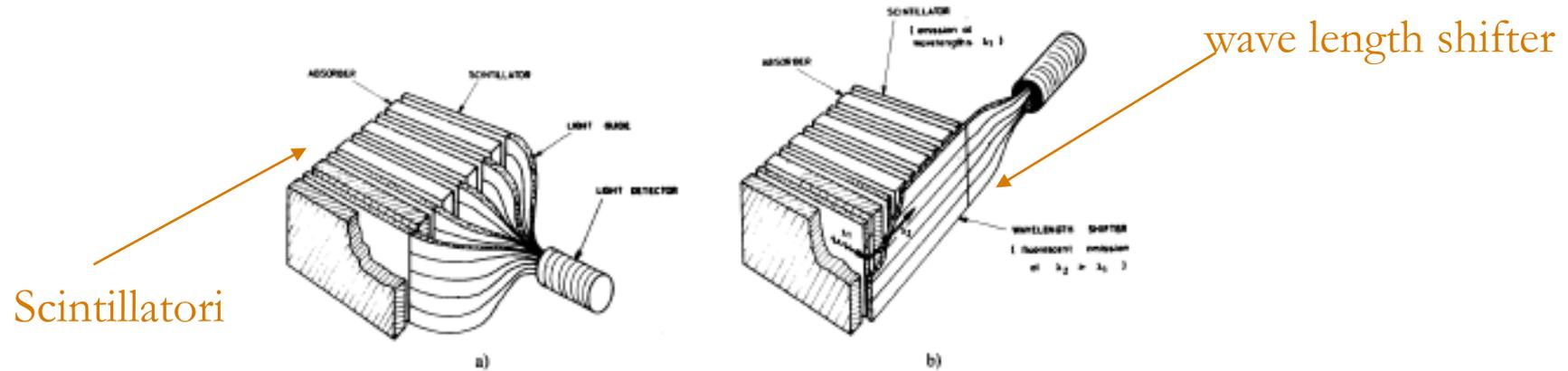
## Rivelatori a ionizzazione in gas

Usati fino agli esperimenti del LEP  
Economici, segmentabili  
Risoluzione e.m. modesta ( $\sim 20\%/\sqrt{E}$ )  
Basso guadagno ( $E_{ion} \sim 30$  eV)  
Limiti nella stabilità e uniformità del segnale

## Rivelatori a stato solido

Alta densità del materiale attivo: alto rapporto S/N  
Alto costo, modesta resistenza alla radiazione  
Rivelatori liquidi a temperatura criogenica (Ar,...)  
Buon guadagno  
uniformità, facilità di calibrazione (il mezzo attivo è distribuito omogeneamente)  
Buona risoluzione ( $< \sim 10\%/\sqrt{E}$ ) e stabilità della risposta  
Svantaggi:  
. complicazioni dovute al sistema criogenico  
. sistema di purificazione (molecole elettronegative possono catturare gli e di ionizzazione)  
. lentezza della risposta  $\sim 400$  ns (raccolta di carica lenta in liquido)

# Calorimetri a Campionamento



# Calorimetri a Campionamento

L'ampiezza laterale necessaria per il contenimento aumenta se si considerano calorimetri a campionamento piuttosto che calorimetri omogenei

Se come rivelatori attivi nel calorimetro a sampling sono utilizzati rivelatori di spessore  $y_i$ ,  $y = \sum y_i$  è la somma degli spessori dei rivelatori; se  $x = \sum x_i$  è la somma degli spessori di materiale assorbitore in cui per lo più si sviluppa lo sciame, l'ampiezza laterale si sviluppa in una distanza dipendente dal fattore  $(x+y)/x$ , per cui:

$$R(95\%) = 2R_m \frac{x + y}{x}$$

Calorimetri a sampling

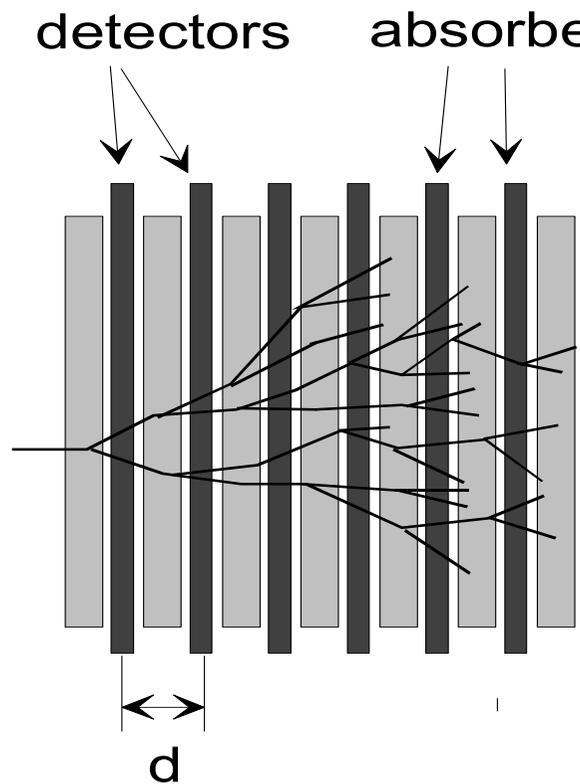
$$R(95\%) = 2R_m$$

Calorimetri a campionamento

**In un calorimetro a campionamento solo la parte dell'energia campionata nei rivelatori attivi è registrata; l'energia persa nell'assorbitore e nei rivelatori attivi varia da evento ad evento e porta alle fluttuazioni di campionamento**

# Calorimetri a Campionamento

## Fluttuazioni di sampling



$$N = \frac{T_{\text{det}}}{d} \quad \text{Detectable track segments}$$

$$= F(\xi) \frac{E}{E_c} X_0 \frac{1}{d}$$

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{\sqrt{N}}{N} \propto \sqrt{\frac{1}{E}} \cdot \sqrt{\frac{d}{X_0}}$$

La risoluzione in energia di un calorimetro a campionamento migliora con  $\sqrt{(d/E)}$

Le fluttuazioni di sampling nei calorimetri sono circa 2 volte maggiori che negli sciami em

le particelle subiscono *multiple scattering* nel materiale assorbitore quindi lo spazio percorso nel volume attivo sarà maggiore del suo spessore; introduciamo lo 'spessore effettivo'



$t$  = spessore dello strato di materiale sensibile in unità di lunghezze di radiazione  
 $\theta$  = angolo di scattering.

$$t_{\text{eff}} = \frac{t}{\langle \cos \vartheta \rangle}$$

numero di particelle prodotte : 
$$N_e = \frac{T}{t_{\text{eff}}} = \frac{\alpha E_{\text{inc}} \langle \cos \vartheta \rangle}{c_e t}$$

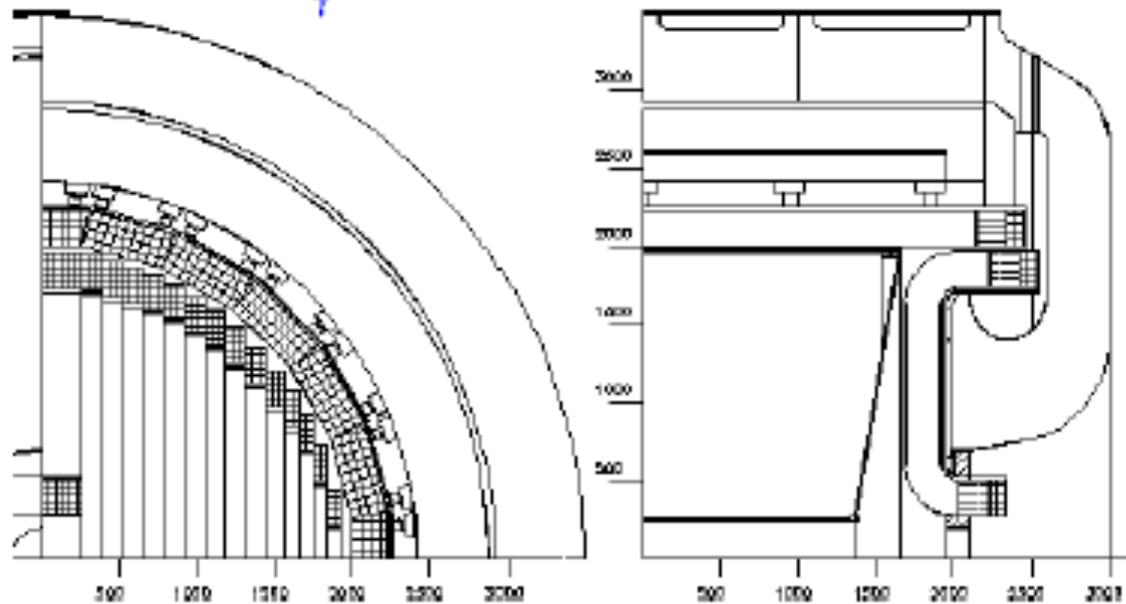
# Calorimetri a Campionamento

KLOE

Spaghetti Calorimeter

$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rightarrow 4 \gamma$   
 $20 \text{ MeV} < E_\gamma < 280 \text{ MeV}$

(J. Lee-Franzini et al. NIM A 360 (1995) 201)



Scintillating fibers in grooved lead plates. PM ( $\varnothing 5\text{cm}$ ) readout.  
(lead: fiber: glue 48:42:10 %)

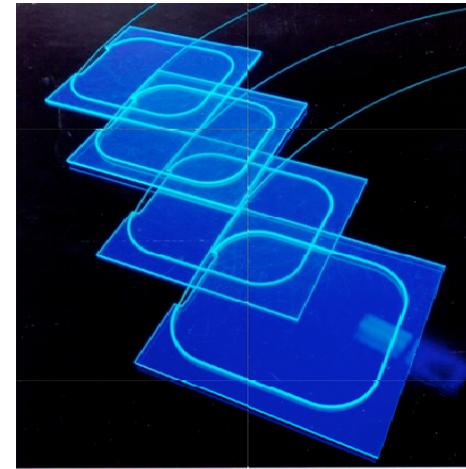
$$\sigma(E)/E \approx 0.05/\sqrt{E} \quad \sigma(t)/E \approx 35 \text{ ps}/\sqrt{E} \quad \sigma(z)/E \approx 0.6 \text{ cm}/\sqrt{E}$$

Test beam data !

# Calorimetro adronico di CMS



Assorbitore di Cu + scintillatore  
1500 T di assorbitore

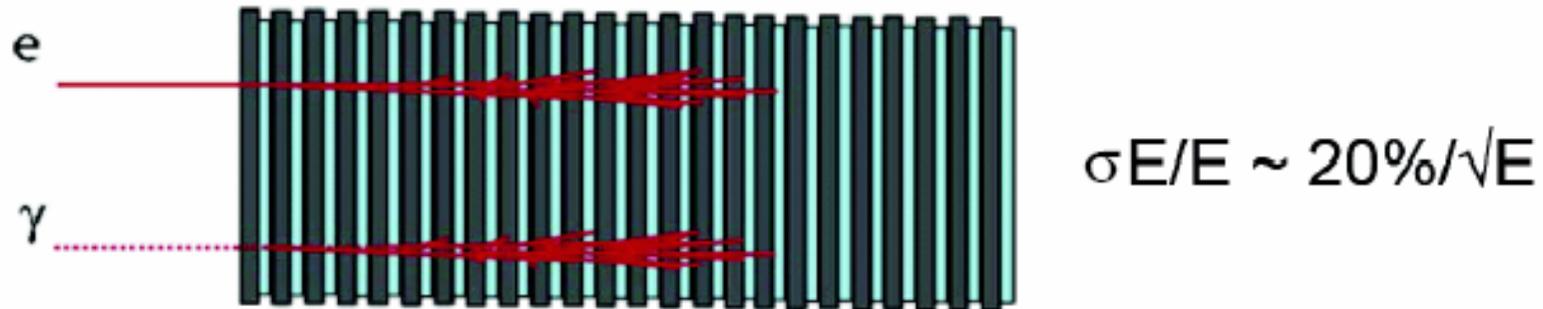


Scintillatori fill slots and are read out  
via fibres by HPDs

Test beam  
resolution for  
single hadrons  $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{65\%}{\sqrt{E}} \oplus 5\%$

# cal. omogenei vs cal. a campionamento

## Calorimetro a 'sandwich' scintillatore/piombo



## Calorimetro a cristalli omogenei



la misura di energia è un processo **distruttivo**:  
dopo la misura calorimetrica la particella iniziale non esiste più

# Risoluzione energetica

Per sciame adronici la risoluzione dipende dalla risposta relativa del calorimetro agli adroni e agli elettroni.

Un calorimetro standard darà una misura diversa dell'energia totale dello sciame adronico a seconda dell'ampiezza dello sciame elettromagnetico prodotto nel suo sviluppo

l'ampiezza dello sciame elettromagnetico secondario varia da evento a evento



si ottiene una notevole fluttuazione nella risposta

# La Risoluzione in energia

I fattori che determinano la risoluzione in energia dei calorimetri possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:

Fluttuazioni nell'energia depositata nel calorimetro (fluttuazioni di campionamento)

Effetti sistematici o di calibrazione

Perdita di energia al di fuori del calorimetro

Rumore dell'elettronica

La parametrizzazione più generale per la risoluzione in energia è'

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2 + (d \log E)^2$$

La risoluzione in energia migliora all'aumentare dell'energia

# La Risoluzione in energia

- Le caratteristiche (vantaggi) principali di un calorimetro sono:
- La precisione della misura aumenta al crescere di E

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

The diagram illustrates the components of the energy resolution formula. Three arrows point from the terms in the equation to boxes: a red arrow from  $\frac{a}{\sqrt{E}}$  to a box labeled "termine stocastico", a red arrow from  $b$  to a box labeled "termine costante", and a brown arrow from  $\frac{c}{E}$  to a box labeled "rumore".

- Le dimensioni di un calorimetro necessarie a contenere lo sciamme scala logaritmicamente con l'energia → riduzione del prezzo e dimensioni.
- Se segmentato finemente è in grado di produrre misure di posizione ed angolo di incidenza.
- Specialmente ai Collider i calorimetri sono in grado di misurare proprietà globali dell'evento (e.g. energia dei jet)

# La Risoluzione in energia

**Nei calorimetri omogenei** le fluttuazioni intrinseche sono piccole perchè l'energia depositata nel materiale attivo dalle particelle di un fascio monocromatico non fluttua evento per evento.

In termini statistici ciò significa che i valori di energia delle singole particelle dello sciame non sono delle variabili indipendenti.

Si può mostrare che:

$$\sigma = F J$$

J: ionizzazione media

F: fattore di Fano.

F è difficilmente calcolabile

$F \sim 1$  per scintillatori

$F < 1$  per rivelatori a semiconduttore e a ionizzazione in gas

# La Risoluzione in energia

Nei **calorimetri a campionamento** l'energia depositata nel mezzo attivo fluttua evento per evento a causa della presenza del materiale passivo (fluttuazioni di campionamento).

Il numero  $N_{ch}$  di particelle cariche che attraversano il materiale attivo è **inversamente proporzionale allo spessore  $t$  del materiale passivo** (espresso in lunghezze di radiazione)

Diminuendo lo spessore di assorbitore la risoluzione migliora

Per avere prestazioni simili a quelle dei calorimetri omogenei, si dovrebbe avere  $t$  dell'ordine di qualche % di  $X_0$  (non fattibile)

Un altro parametro caratteristico è la **frazione di campionamento**

$$f_s = \frac{E_{mip}(active)}{E_{mip}(active) + E_{mip}(absorber)}$$

$$N_{ch} \propto \frac{E_0}{t}$$

$$\frac{\sigma_{stochastic}}{E} \propto \sqrt{\frac{t}{E_0}}$$

Tipicamente:

$$\frac{\sigma_{stochastic}}{E} = \frac{5-20\%}{\sqrt{E}}$$

# Risoluzione per calorimetri e.m.

## Contenimento dello sciame

Se il calorimetro non è abbastanza spesso, parte dello sciame viene perso in direzione longitudinale.

L'energia persa è proporzionale a  $\log(E_0)$

L'energia persa è soggetta a fluttuazioni, e contribuisce alla risoluzione del calorimetro.

Lo sciame può non essere contenuto completamente anche nella direzione trasversale

Particolarmente importante nei calorimetri segmentati, quando si considera solo il segnale di alcune celle, trascurando quelle con basso segnale per evitare di introdurre il loro rumore nella misura

# EM calorimeters: energy resolution

Energy resolution of a calorimeter can be parametrised as:

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

- **a** the **stochastic term** accounts for any kind of Poisson-like fluctuations
  - natural merit of homogeneous calorimeters
  - several contributions add to the “intrinsic one”
- **b** the **noise term** responsible for degradation of low energy resolution
  - mainly the energy equivalent of the electronic noise
  - contribution from pileup: the fluctuation of energy entering the measurement area from sources other than the primary particle
- **c** the **constant term** dominates at high energy
  - its relevance is strictly connected to the small value of a
  - it is mostly dominated by the stability of calibration
  - contributions from energy leakage, non uniformity of signal generation and/or collection, loss of energy in dead materials,...

# Calorimetri Elettromagnetici: risoluzioni

Le risoluzioni energetiche sono dominate da 3 fattori

- **Fluttuazioni del segnale** raccolto (es: N di fotoelettroni =  $N_{p.e.}$ ) dipendono dalla statistica di Poisson:  $1/N_{p.e.}$
- **Fluttuazioni di campionamento** dipendono dalla fluttuazione del numero di secondari prodotti nell'assorbitore e sono proporzionali a  $d / N_{p.e.}$  (d=spessore)
- **Perdite dello sciame** per non completo contenimento (leakage laterale o longitudinale)

■ Per calorimetri eterogenei:  
 $(\sigma_E/E)^2 = 1 / N_{p.e.} + K_S / N_{p.e.}$



$(4 - 20 \%) / \sqrt{E(\text{GeV})}$

■ Per calorimetri a cristalli:  
 $(\sigma_E/E) = K / E^{1/4}$



$2 - 4 \% / E^{1/4}$

NaI (Tl)

14 % a 6 keV

2% ad 1 MeV

1% ad 1 GeV

Assumendo completo contenimento

$$N_{pe} = (\gamma) \cdot (\text{light collection eff.}) \cdot (\text{geometrical eff.}) \cdot (\text{photocathode eff.})$$

# EM calorimeters: energy resolution

Homogeneous calorimeters: all the energy is deposited in an active medium.  
Absorber  $\equiv$  active medium  $\longrightarrow$  All  $e^+e^-$  over threshold produce a signal  
**Excellent energy resolution**

Compare processes with different energy threshold

Scintillating crystals

$$E_s \sim \text{eV}$$

$$\approx 10^2 \div 10^4 \gamma / \text{MeV}$$

$$\sigma / E \sim (1 \div 3)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

Cherenkov radiators

$$\beta > \frac{1}{n} \rightarrow E_s \sim 0.7 \text{MeV}$$

$$\approx 10 \div 30 \gamma / \text{MeV}$$

$$\sigma / E \sim (10 \div 5)\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$



Lowest possible limit

# EM calorimeters: energy resolution

## Intrinsic limit

Detectable signal is proportional to the total track length of  $e^+$  and  $e^-$  in the active material, intrinsic limit on energy resolution is given by the fluctuations in fraction of initial energy that generates detectable signal

$$N_{\text{tot}} \propto \frac{E_0}{E_c} \quad \xrightarrow{\text{Total track length}} \quad T_0 = N_{\text{tot}} X_0 \approx \frac{E_0}{E_c} X_0$$

Detectable track length  $T_r = f_s T_0$

$f_s$  fraction of  $N_{\text{tot}}$  with  $E > E_c$

Fluctuations in track length:

Poisson process

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{\sigma(T_r)}{T_r} \propto \frac{1}{\sqrt{T_r}} \propto \frac{1}{\sqrt{E_0}}$$

Fix  $E_0$

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{f_s}} \sqrt{\frac{E_c}{X_0}} \propto \frac{1}{\sqrt{f_s}} \sqrt{\frac{Z}{A}}$$

- maximize  $f_s$
- minimize  $Z/A$

# Caratteristiche dei Calorimetri

**Risoluzione energetica  $\sim 1/\sqrt{N} = 1/\sqrt{E}$  (tipicamente  $\sigma(E)/E \sim 2-10\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$ )**

Carica misurata  $\propto$  Energia depositata

Fluttuazione statistica nella propagazione della cascata e.m.

Leakage (perdita di parte dello sciame, longitudinale e trasversale)

Fluttuazioni statistiche del sampling (per i calorimetri a sampling)

Fluttuazione nel rilascio dell'energia per ionizzazione

Omogenei:  $2\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$  (temperatura, disuniformità longitudinale, raccolta di luce)

Sampling:  $8\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$  (sampling fraction, raccolta di luce, leakage)

Lead glass:  $1\% + 5\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$  (raccolta di luce)

**Risoluzione angolare (tipicamente  $\sigma_x \sim 10\text{mm} / \sqrt{E(\text{GeV})}$ )**

Dipende dal numero delle celle coinvolte e dalle dimensioni della singola cella  
migliora all'aumentare dell'energia rilasciata

Con tecniche di baricentrazione (media pesata con l'energia rilasciata) si raggiungono  
risoluzioni inferiori alla dimensione della semi-cella

## Particle Identification

e-/adroni: profilo della cascata

$\mu$  e MIP: solo energia per ionizzazione (non sciame e.m.)

gamma/elettroni: non distinguibili

La separazione  $\mu-\pi$  è praticamente impossibile sulla base di misure di energia persa  $\rightarrow m_\mu \sim m_\pi$

# Calorimetri - Progettazione

Importante sviluppo laterale e longitudinale dello sciame

Il 98% dell'energia dello sciame è contenuta in

$$L ( 98\% ) = 2.5 t_{\max}$$

Per energie

$$E = 10 - 1000 \text{ GeV}$$

$$t_{\max}^e = \ln ( E_0 / E_c ) - 0.5$$

$$t_{\max}^\gamma = \ln ( E_0 / E_c ) + 0.5$$

$$L ( 98\% ) \propto 2.5 \ln ( E_0 / E_c )$$

$$R ( 95\% ) = 2 R_M = ( 42 \text{ MeV} / E_c ) X_0$$

Calorimetri omogenei

$$R ( 95\% ) = ( 42 \text{ MeV} / E_c ) X_0 (x + y)/x$$

Calorimetri a campionamento