

Calorimetri: introduzione

- **Calorimetri: molte definizioni possibili**

Amaldi: “blocks of matter in which the energy of a particle is degraded to the level of detectable atomic ionizations and excitations”

- In Fisica delle alte Energie, Fisica Nucleare e Fisica Sanitaria, non solo misura di E ma anche ricostruzione di posizione, determinazione della direzione, del tempo di volo e della natura della particella entrante.

Due tipologie diverse (per tipo di utilizzo, processi fisici coinvolti e prestazioni):

Calorimetri elettromagnetici

- Rivelatori di γ
 - Rivelatori di elettroni
 - Ricostruzione di π^0
- Sia in esperimenti a bersaglio fisso
che in esperimenti ai collisori

Calorimetri adronici

- Misure di adroni neutri e carichi
- Aiuto nell'individuazione dei μ
- Veto per sciame elettromagnetici
- Ricostruzione dell' “Energia mancante”

Calorimetri: introduzione

Sommario dei processi fisici:

Calorimetri elettromagnetici

- 1 Processi riguardanti fotoni
 - Produzione di coppie e^+/e^- .
 - Interazione Compton
 - Effetto fotoelettrico
 - Interazione coerente (Rayleigh)
- 2 Processi riguardanti e^+/e^- .
 - Bremsstrahlung
 - Ionizzazione
 - Collisioni dure
 - Annichilazione dell' e^+
 - Diffusione multipla

*Conosciuti a livello di ottima
approssimazione analitica*

Conosciuti a livello empirico

Calorimetri adronici

Interazioni adroniche
Decadimenti $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Calorimetri: introduzione

Sommario dei processi fisici:

Calorimetri elettromagnetici

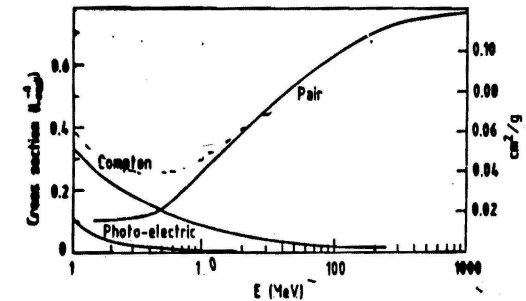
1 Processi riguardanti fotoni

- Produzione di coppie e^+/e^- .
- Interazione Compton
- Effetto fotoelettrico
- Interazione coerente (Rayleigh)

2 Processi riguardanti e^+/e^- .

- Bremsstrahlung
- Ionizzazione
- Collisioni dure
- Annichilazione dell' e^+
- Diffusione multipla

Per energie $> \epsilon$ (En. Critica ~ 10 MeV) sono dominanti produzioni di coppie e Bremsstrahlung

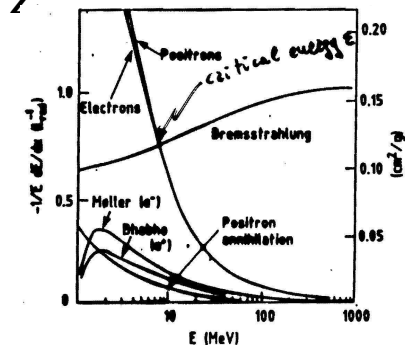


$$-\frac{dN}{dx}\Big|_{\gamma} = \frac{7}{9} \frac{N}{X_0}$$

$$-\frac{dE}{dx}\Big|_{e^{\pm}} = \frac{E}{X_0}$$

NB: stessa scala di lunghezza

$$\frac{1}{X_0} \approx 4\alpha r_0^2 N_A \frac{Z^2}{A} \rho \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$



Calorimetri: introduzione

Caratteristiche sperimentali:

Calorimetri omogenei

- 1 Un unico materiale fa da assorbitore e da rivelatore
- 2 Il segnale può venire da tutta l'Energia depositata.
- 3 Deve essere denso

Calorimetri a campionamento (segmentati)

- 1 Strati di assorbitore (denso) alternati a strati di rivelatore
- 2 Non tutta l' Energia rilasciata può essere rivelata
- 3 Minori costi

Differenti prestazioni in termini di
risoluzione energetica

Calorimetri: introduzione

Cosa (e come) deve misurare un calorimetro e con che caratteristiche:

- Energia (linearità, risoluzione E)
- Posizione di impatto
- Alte molteplicità (granularità)
- Tempo di volo
- Ermeticità
- Separazione e/h

Calorimetri elettromagnetici

Data la buona conoscenza dei fenomeni lo sviluppo di uno sciame elettromagnetico può essere predetto. Approccio analitico: **approssimazione B** di B.Rossi.

- 1 e^+/e^- perdono per collisione con gli ioni
una energia costante per lunghezze di radiazione
- 2 Valgono le formule asintotiche per Bremsstrahlung
e produzione di coppie

Anche se l'approccio più usato, dato che lo sciame è costituito da ripetizioni di pochi tipi di interazione, è quello di simulare il processo col metodo di "MonteCarlo" (EGS, GEANT....)

Calorimetri elettromagnetici

Esempio di sviluppo di sciame elettromagnetico

1. Ogni e^+/e^- attraversando una X_0 lascia metà energia a un fotone
2. Ogni fotone in una X_0 produce una coppia e^+/e^- di \sim uguale energia
3. Se l'energia degli $e^+/e^- > \epsilon$ GO TO 1 ; se no fine.

A questo punto risulta chiaro che per $t=x/X_0$:

- A ogni passaggio il numero di particelle raddoppia: $N=2^t$
- A ogni passaggio l'energia delle particelle si dimezza: $E=E_0 2^{-t}$
- Il numero di particelle cresce esponenzialmente da $t=0$ a $t= \lg(E_0 / E) / \lg 2$ diventando:

$$N(E)=E_0/E$$

- \Rightarrow per $E=\epsilon$: $N_{\max}=E_0/\epsilon$

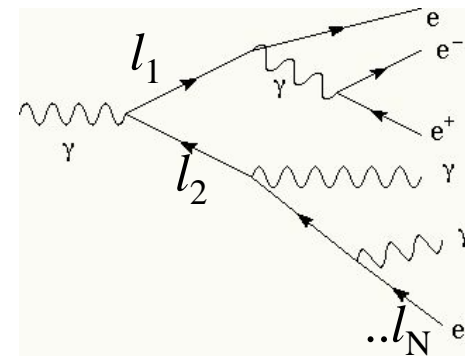
Esempio particolarmente rozzo ma indicativo

Calorimetri Elettromagnetici

Lunghezza di traccia totale **T** ($T = \sum^N l_i$)

Si ha: $T \sim N X_0 \sim X_0 E_0 / \epsilon$ cioè $T/X_0 = E_0 / \epsilon$

Se il vostro rivelatore non riesce a rivelare particelle al disotto di una certa **Energia Critica** E_c la lunghezza di traccia totale visibile sarà minore:



$$T = F(z) E_0 / \epsilon X_0$$

$$\text{con } z \sim 4.58 Z/A E_c / \epsilon$$

Questa eq. ci dice che:

1. L'**Energia** (E) della traccia entrante è **proporzionale** alla **lunghezza di traccia**
2. La calorimetria è possibile (misura T)
3. $T \propto N$ (n^0 di particelle cariche) $\Rightarrow \Delta E \propto \Delta T \propto \Delta N \propto \sqrt{N}$



$$\Delta E / E \propto \sqrt{E} / E = E^{-1/2}$$

Andamento della risoluzione
con l'energia

Calorimetri Elettromagnetici

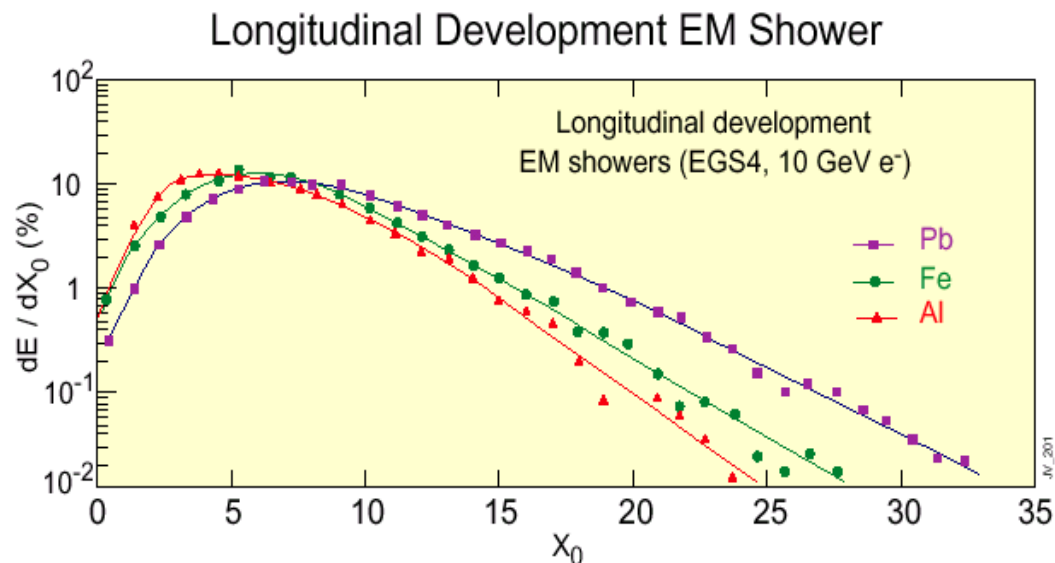
Sviluppo degli sciami: una descrizione piu' realistica

- Lo sviluppo iniziale (con crescita esponenziale) è seguito da un decadimento piu' lungo
- Posizione del **massimo si sposta col Logaritmo di E**
- Esistono effetti che non scalano con X_0
(la lunghezza in termini di X_0 aumenta con Z !)
- Lo **sviluppo laterale** governato dalla diffusione multipla viene parametrizzata dal **raggio di Molière**

$$t_{\max} = \frac{x_{\max}}{X_0} = \ln \frac{E_0}{\varepsilon} \pm 0.5$$

$$\varepsilon \approx \frac{700 \text{ MeV}}{Z + 1.2}$$

$$R_M \approx X_0 \frac{21.2 \text{ MeV}}{\varepsilon}$$



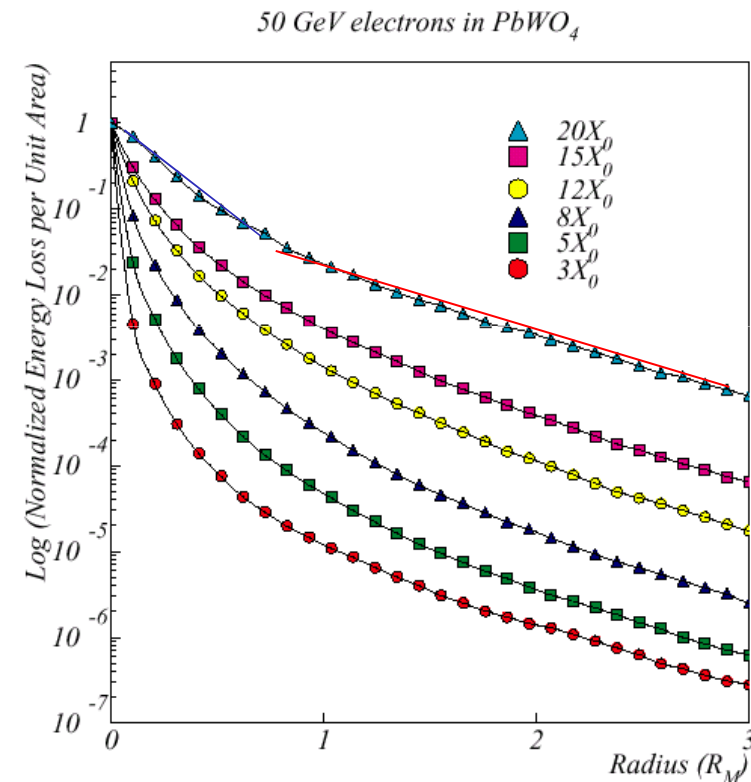
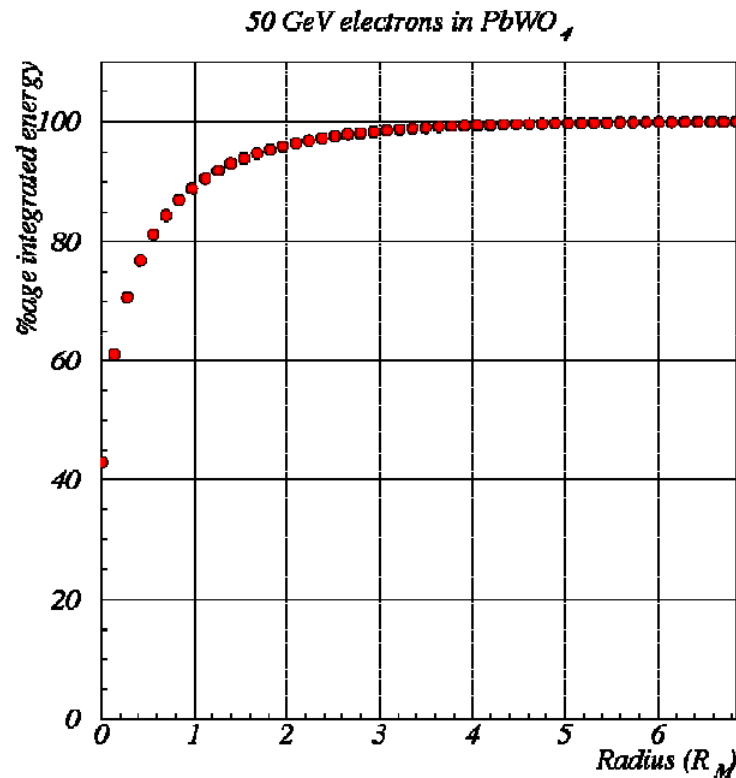
In pratica:

$$t_{95\%} \approx t_{\max} + 0.08Z + 9.6$$

$$R_{95\%} = 2R_M, R_{99\%} = 3R_M$$

Calorimetri Elettromagnetici

Sviluppo laterale degli sciami



Parametrizzabile con somma di 2 esponenziali:
 il più stretto dovuto alla diffusione multipla
 degli e^\pm il più largo ai fotoni

Calorimetri Elettromagnetici

Conclusioni per la descrizione approssimata degli sciame

- Lo sviluppo di uno sciame elettromagnetico è dovuto in modo predominante all'emissione di fotoni di Bremsstrahlung da parte di e^\pm e alla produzione di coppie e^+/e^- da parte di fotoni
- Le **caratteristiche** dello sciame dipendono **poco** dal fatto che la particella madre sia un **fotone o un e^\pm** .
- La descrizione longitudinale dello sciame in termini di lunghezza di radiazione non dipende dal materiale
- La lunghezza di traccia è **proporzionale all' Energia** della particella entrante
- Le fluttuazioni intrinseche dipendono dalle fluttuazioni nel numero di particelle e quindi seguono una legge di tipo statistico: $\sigma(E)=k\sqrt{E}$
- Il massimo longitudinale di uno sciame (1 GeV) è a circa $4.5 X_0$
- Lo sviluppo laterale di uno sciame non scala con X_0 ma con il raggio di Molière ed è quindi più **stretto** (in termini di X_0) nei **materiali pesanti**.

Calorimetri Elettromagnetici

Caratteristiche sperimentali: **risoluzione energetica**

Più buona nei **calorimetri omogenei**

Come visto $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}}$ con $a (>0.01)$ che dipende dalla frazione di T misurabile

Molte fluttuazioni determinano la risoluzione effettiva:

- Fluttuazioni longitudinali (in genere con 20-30 X_0 **non** si contiene qualche % di E)
- Fluttuazioni laterali
- Fluttuazioni del segnale misurabile

+

- Calibrazioni, omogeneità di risposta, stabilità nel tempo ecc.

In genere la **risoluzione energetica** viene parametrizzata con:

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

$a \sim 0.02-0.05$ termine stocastico (es.: statistica fotoelettroni se lettura ottica)

b dipende dal rumore dell' elettronica ed è importante a basse energie

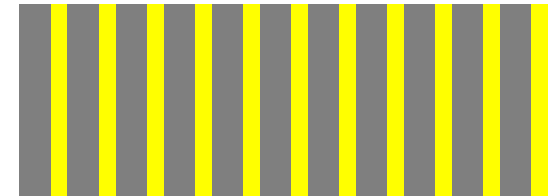
c dipende da fattori dovuti a calibrazione e omogeneità

Calorimetri Elettromagnetici

Caratteristiche sperimentali: **risoluzione energetica**

calorimetri a campionamento (sampling calorimeters)

Alternanza di strati passivi (con X_0 corta) e di strati di rivelatori (es. Pb-scintillatore)



Fluttuazioni dominate da “sampling fluctuations”:

se δE è l’Energia rilasciata da una particella che attraversa uno strato di spessore $x/X_0 = t_{\text{layer}}$ il numero di attraversamenti N_{cross} è (Appr. B) $N_{\text{cross}} = E / \delta E$ con $\delta E = \epsilon t_{\text{layer}}$ per cui: $N_{\text{cross}} = E / (\epsilon t_{\text{layer}})$ e se la distribuzione è normale: $\sigma(E)/E \propto 1/\sqrt{N}$

$$\frac{\sigma(E)}{E} = k \sqrt{\frac{\epsilon}{F(z)} \frac{t_{\text{layer}}}{E}}$$

Nota ancora la dipendenza da $1/\sqrt{E}$ ma anche da $\sqrt{t_{\text{layer}}}$ (peggiora tanto più è spesso il layer di assorbitore)

Calorimetri Elettromagnetici

Caratteristiche sperimentali: **risoluzione posizione**

NB: unico modo per misurare la posizione dei fotoni

La risoluzione intrinseca è molto buona (sciami stretti e posizionati attorno alla particella entrante) , quella reale è determinata dal R_M ,dalla **granularità**, dalla geometria.

Metodo del centroide (divisione dell'energia E_i rilasciata in canali adiacenti) :

$y_0 = \frac{\sum y_i E_i}{\sum E_i}$ (baricentro, da correggere per tener conto della forma dello sciame)

Anche in questo caso **la risoluzione scala con l'Energia**:

$$\sigma(y) = \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \beta \quad \text{con } E \text{ in GeV e } \alpha = \alpha(R_M, d \dots)$$

con una **dalla granularità dell'ordine del raggio di Molière** si ha un' ottima risoluzione ($O(\text{mm})$). Noto il punto di produzione (vertice) delle particelle (fotoni) si ottiene una risoluzione angolare

Calorimetri Elettromagnetici

Esempi di calorimetri omogenei:

- vetri (al Pb: LG) con produzione di luce Cherenkov
- Cristalli inorganici scintillanti
- Gas nobili pesanti (Xe) liquefatti

NB: caratteristiche principali (vetri al piombo)

Cherenkov Radiator	Density	X_0 (cm)	λ (cm)	Index of refraction
SF2 lead glass	3.85	2.76	38	1.65
SF6 lead glass	5.2	1.7	30	1.81
SF57 lead glass	5.5	1.5	28	1.85
PbF ₂ crystal	7.8	0.93	20	1.82
UVT acrylic	1	40	80	1.5

- X_0 ~lunga
- Veloci (~20 ns)
- Scarsa emissione di luce (LY~1 phe/MeV)
- perdono trasparenza (ingialliscono) con radiaz.

Calorimetri Elettromagnetici

Esempi di calorimetri omogenei:

NB: caratteristiche principali (cristalli)

	Nal(Tl)	BaF ₂	CsI(Tl)	CsI	CeF ₃	BGO	PWO	
ρ	3.67	4.88	4.53	4.53	6.16	7.13	8.26	g/cm ³
X_0	2.59	2.05	1.85	1.85	1.68	1.12	0.89	cm
RM	4.5	3.4	3.8	3.8	2.6	2.4	2.2	cm
τ	250	0.8/620	1000	20	30	300	15	ns
λ_p	410	220/310	565	310	310/340	480	420	nm
$n(\lambda_p)$	1.85	1.56	1.80	1.80	1.68	2.15	2.29	
LY	100%	15%	85%	7%	5%	10%	0.2%	%Nal

tipicamente $40 \times 10^3 \gamma/\text{MeV}$

Calorimetri Elettromagnetici

Esempi di calorimetri omogenei:

BGO (germanato di bismuto, $\text{Bi}_4\text{Ge}_4\text{O}_{12}$)

cristallo molto denso con buon light yield

4000 γ/MeV , non al livello di CsI o NaI che sono però meno densi

tempo di risposta lungo (300ns)

si ottengono ottime risoluzioni ($a \approx 2.5\%$)

PbWO_4 tungstanato di piombo (CMS)

cristallo estremamente denso $X_0 = 0.89$

scintillatore con light yield limitato

$\approx 100 \gamma/\text{MeV}$

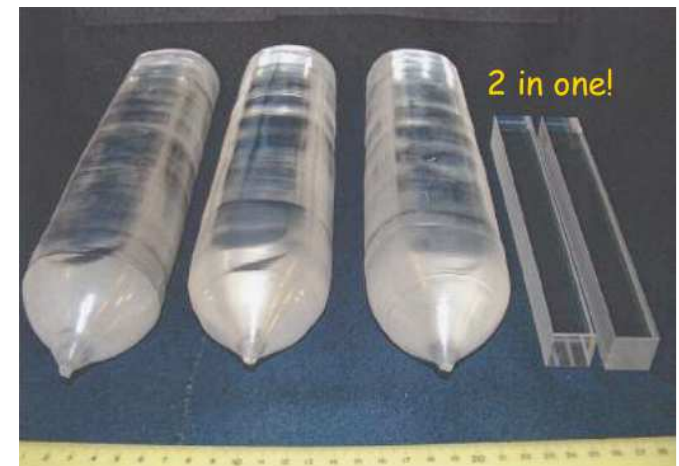
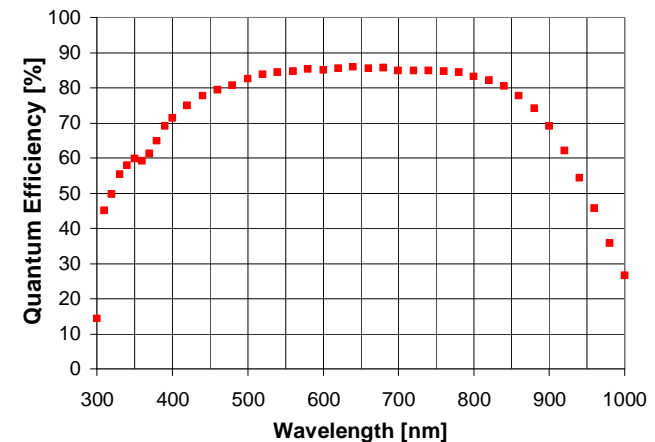
a 480nm, buon matching con i detectors

tempo di risposta breve $\approx 20\text{ns}$

relativamente facile da produrre in massa

buona resistenza alla radiazione

molto sensibile alla temperatura



Calorimetri Elettromagnetici

Esempi di calorimetri omogenei:

- PbWO_4 in CMS
 - lettura con APD
 - calorimetro all'interno del magnete per non avere materiale inerte davanti
 - campo magnetico molto intenso (4T) rende impossibile l'uso di photodetectors a vuoto
 - controllo della temperatura entro $\pm 0.1^\circ\text{C}$
 - dimensioni dei cristalli $2.2 \times 2.2 \times 23\text{cm}$ ($26X_0$)
 - 80×10^3 cristalli ciascuno letto da 2 APD

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{2.75\% [GeV^{1/2}]}{\sqrt{E}} \oplus \frac{150\text{MeV}}{E} \oplus 0.5\%$$

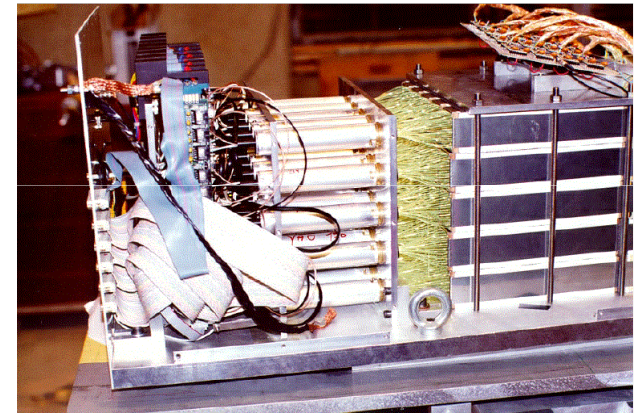
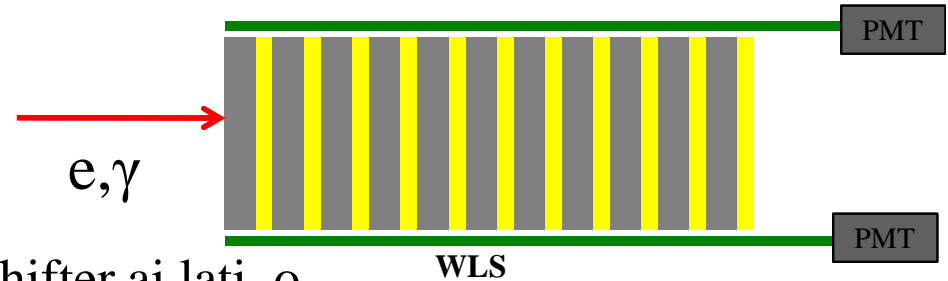
(E in GeV)



Calorimetri Elettromagnetici

Esempi di calorimetri segmentati:

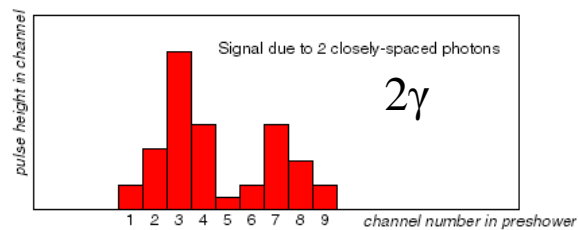
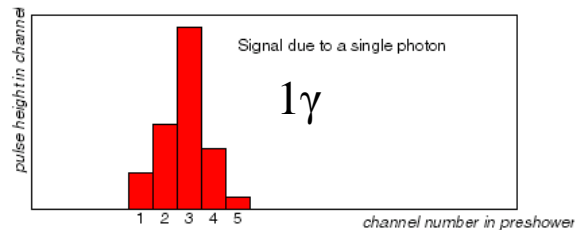
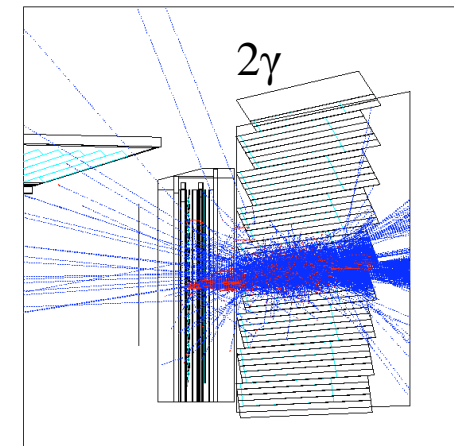
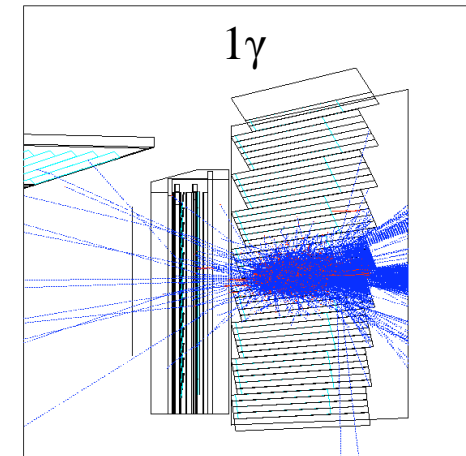
- Tipiche tecnologie
 - piombo/scintillatore
 - lettura con lastre di wave length shifter ai lati, o con fibre di WLS inserite longitudinalmente (“spaghetti calorimeter”)
 - piombo/Lar
 - argon liquido letto come camera a ionizzazione
 - a volte calorimetro EM ed adronico in cascata, costruiti con la stessa tecnologia



Calorimetri Elettromagnetici

Preshowers:

- Spesso davanti ad un calorimetro EM viene posto un rivelatore più preciso di posizione
 - “preshower”
 - distinzione di γ singoli energetici da $\pi_0 \rightarrow 2\gamma$
- rivelatore ad alta granularità (silicio) posto dopo una o due X_0



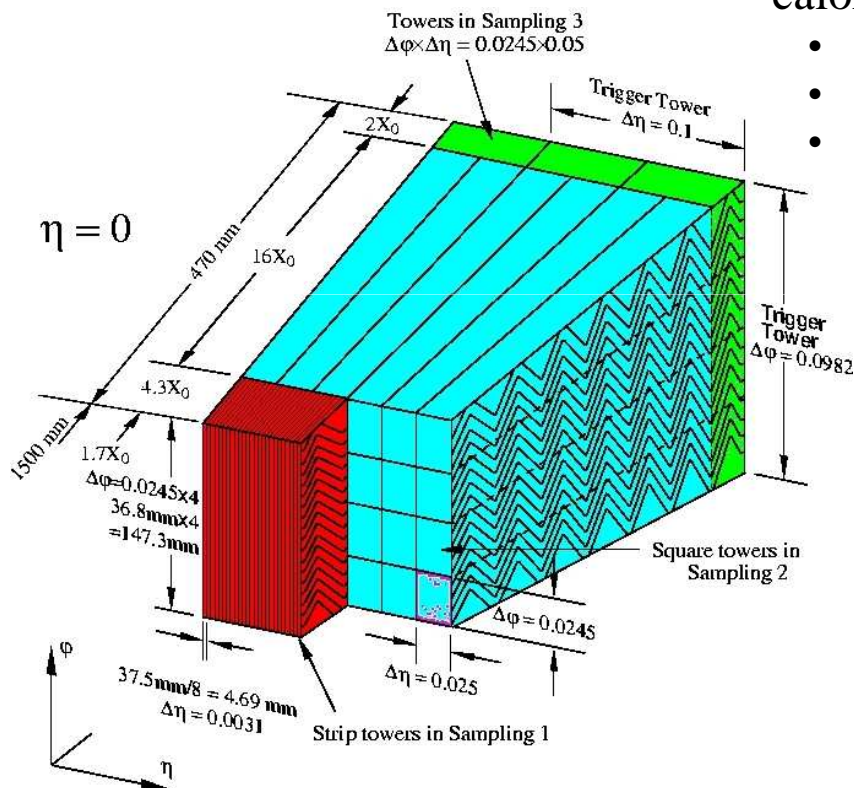
Calorimetri Elettromagnetici

Esempi di calorimetri:

- Atlas

- calorimetro sampling Pb/Lar

- Parte 1: misura di posizione/angolo
- Parte 2: misura di energia principale
- parte 3: “tail catcher” identificazione degli sciami lunghi



$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{10\% [GeV^{1/2}]}{\sqrt{E}} \oplus \frac{300 \text{ MeV}}{E} \oplus 0.7\%$$

(E in GeV)

Calorimetri Elettromagnetici

Technology (Exp.)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16-18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO_4 (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20-30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	$20-30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996

Calorimetri Adronici

Sviluppo di uno sciame adronico:

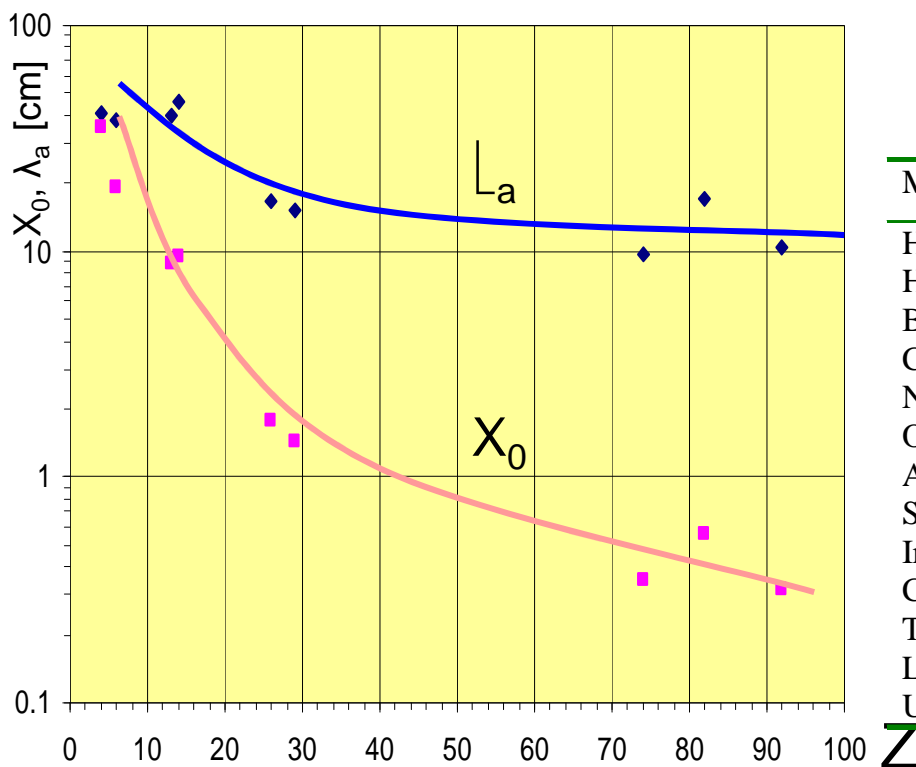
- Gli sciami adronici sono prodotti dalle **interazioni delle particelle adroniche** con i nuclei
- Il loro sviluppo è così complicato da rendere impossibile una semplice descrizione analitica
- Scala longitudinale: **Lunghezza di assorbimento** $\lambda \gg X_0$
- Frazione di $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$ elevata ($\sim 1/3$) produce una parte di sciame a sviluppo elettromagnetico (vedi dopo)
- Le **fluttazioni di questa frazione** costituiscono la componente fondamentale della **risoluzione in Energia**
- Interazioni ad **angolo non nullo** danno origine ad uno **sviluppo laterale maggiore** di quello degli sciami elettromagnetici
- Descrizioni da MonteCarlo abbastanza affidabili (FLUKA, GHEISHA, GEANT4 ecc)
- Una frazione dell' **Energia non è visibile** (rottura del nucleo o n lenti)

$$\lambda_i = \frac{A}{\sigma_i \rho N_{AV}} \quad i=\text{totale, anelastica}$$

$$\sigma(A) \propto A^{2/3} \Rightarrow \lambda \sim 35 A^{1/3} \text{ g cm}^{-2}.$$

Calorimetri Adronici

Sviluppo di uno sciame adronico:



λ dipende poco da Z (ad alto Z)

Material	Z	A	ρ [g/cm ³]	X_0 [g/cm ²]	λ_a [g/cm ²]
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

Calorimetri Adronici

Sviluppo di uno sciame adronico:

Sciami molto **più lunghi e larghi** (varie parametrizzazioni)

$$x_{\max} = (.2 \lg E + .7)\lambda, \quad x_{\text{med}} = (.54 \lg E + .4)\lambda, \quad L_{95\%} \sim 2.5 x_{\text{med}} \text{ (75 cm in Fe a 100 GeV),}$$
$$R_{95\%} \sim \lambda \text{ (35 cm in Fe)}$$

A causa della lunghezza degli sciami

(e delle fluttuazioni dovute alla componente E.M.)

non ha senso un calorimetro omogeneo: **solo calorimetri a campionamento**

Calorimetri Adronici

- frazione di energia elettromagnetica

supponiamo che $1/3$ delle particelle prodotte siano π_0

$$f_{em} = \frac{1}{3} \text{ dopo la prima collisione}$$

$$f_{em} = \frac{1}{3} + \left(1 - \frac{1}{3}\right) \cdot \frac{1}{3} \text{ dopo la seconda}$$

$$f_{em} = 1 - \left(1 - \frac{1}{3}\right)^n \text{ dopo } n$$

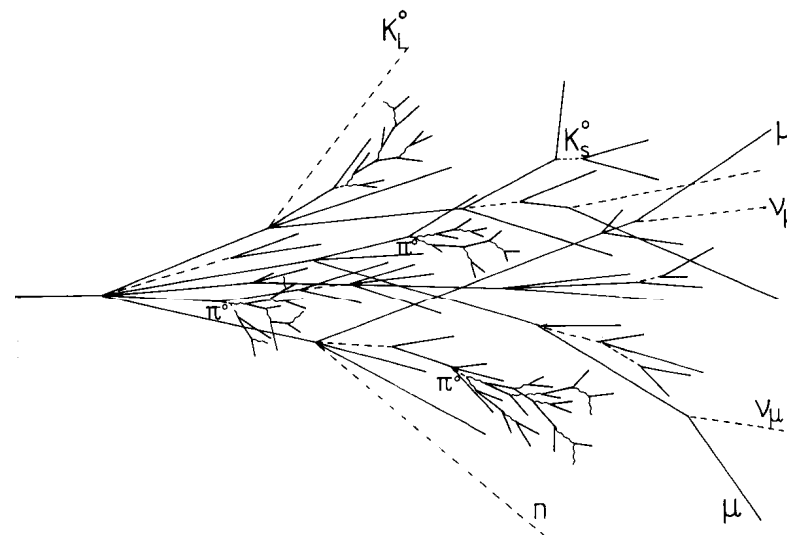
- un'analisi più completa porta a:

$$f_{em} = 1 - \left(\frac{E}{E_0}\right)^{k-1}$$

$$k = 0.8 \div 0.85$$

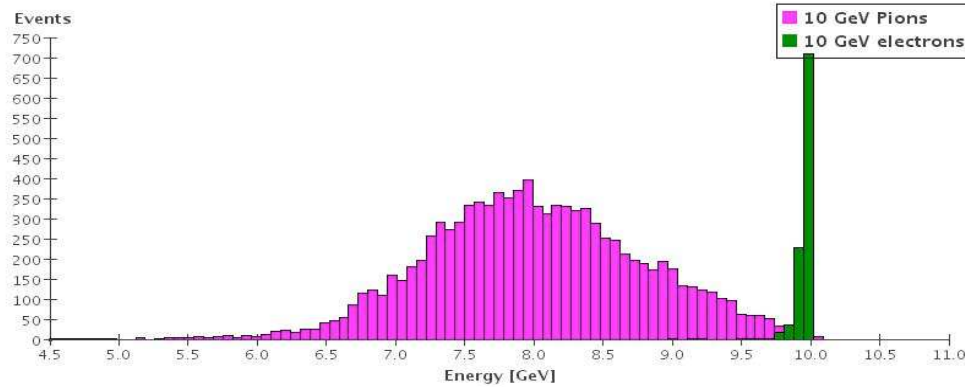
$$E_0 [GeV] = 0.7 [Fe] \div 1.3 [Pb]$$

- per ex per un adrone incidente da 100GeV si trova $f_{em} \approx 0.6$



Calorimetri Adronici

- frazione f_{em} è importante per la risoluzione dei calorimetri



- risposta di adroni ed elettroni molto diversa

- rapporto tra i segnali di un adrone e di un elettrone nel calorimetro

$$\frac{\pi}{e^{\pm}} = \left(f_{em} + \frac{h}{e} (1 - f_{em}) \right)$$

- h è l'efficienza del calorimetro per la parte di segnale adronica, e quella per la parte elettromagnetica
- in generale $h < e$, $e = 1.2 \div 1.5$

- fluttuazioni della frazione f_{em} generano fluttuazioni nella risposta e quindi peggioramento della risoluzione
- in genere si ottengono risoluzioni $\approx 60\% \sqrt{E}$

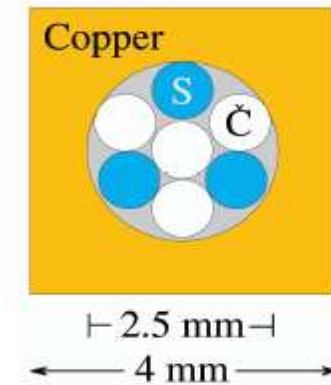
Calorimetri Adronici

- Soluzioni alle fluttuazioni di f_{em}
 - compensazione: $h/e=1$
 - ridurre il segnale EM
 - poichè la sezione d'urto EM cresce con Z più che quella adronica, aumentando lo spessore di assorbitori ad alto Z rispetto alla parte sensibile si riduce e rispetto ad h
 - aumentare il segnale adronico
 - uso di rivelatori contenenti idrogeno per essere più sensibili a neutroni
 - Zeus ha costruito un calorimetro uranio-scintillatore compensante
 - sampling
 - lastre di uranio da 3.3mm
 - lastre di scintillatore da 2.5mm
 - circa 5 lunghezze di interazione
- altri calorimetri sono stati costruiti con U/Lar e Pb/Scint
 - nel caso di PB/Scint il rapporto di campionamento per ottenere $h/e=1$ è sfavorevole (10mm Pb/2.5mm Scint)
 - la risoluzione è quindi peggiore
- vantaggio indiretto di usare uranio
 - il fondo di radiazione dell'uranio genera un segnale costante che permette una calibrazione continua del rivelatore

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{35\%}{\sqrt{E[GeV]}} \oplus 2\%$$

Calorimetri Adronici

- Doppia lettura
 - due sistemi di lettura con h/e molto diversi
 - lastre di rame come assorbitore
 - scintillatore
 - sensibile a tutte le particelle cariche, anche a bassa energia
 - fibre di quarzo
 - sensibile a luce Cherenkov e quindi soprattutto agli elettroni relativistici degli sciami EM
 - si ottengono due segnali Q, S



$$Q = E \left[f_{em} + \frac{h}{e} \Big|_Q (1 - f_{em}) \right] \quad S = E \left[f_{em} + \frac{h}{e} \Big|_S (1 - f_{em}) \right]$$

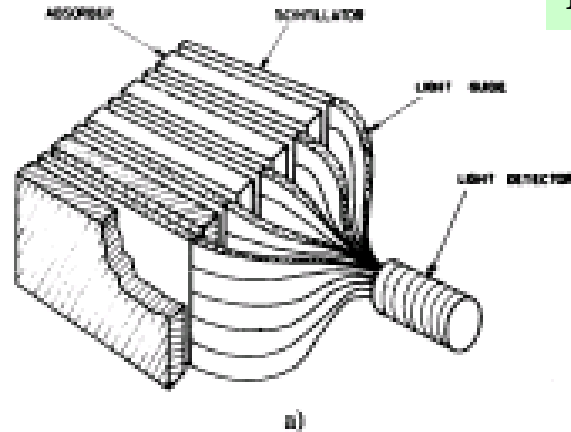
$$E = \frac{aS - Q}{a - 1} \quad \text{con } a = \frac{1 - \frac{h}{e} \Big|_Q}{1 - \frac{h}{e} \Big|_S}$$

$$\sigma_E / E = 36.9\% / \sqrt{E} \oplus 1\%$$

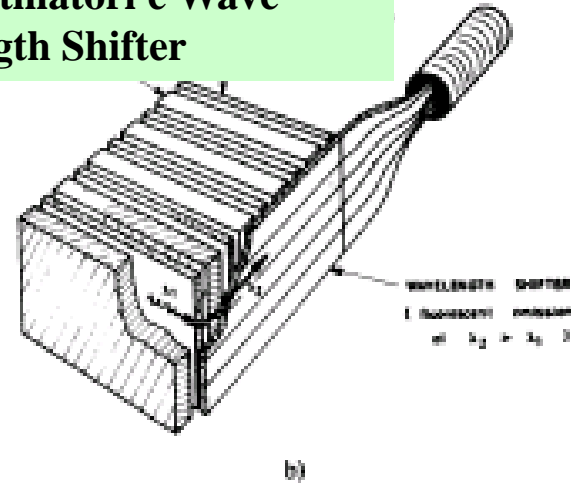
- risolvendo si ricava l'energia indipendente da f_{em}

Calorimetri Adronici

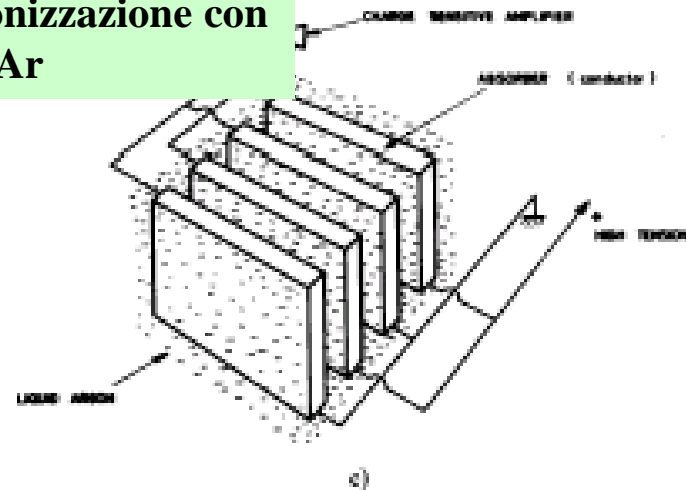
Scintillatori e guide di luce



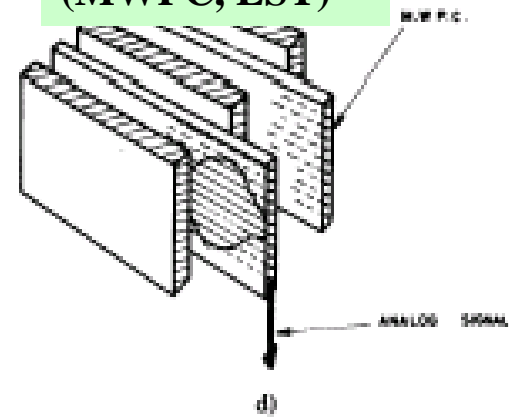
Scintillatori e Wave Length Shifter



Ionizzazione con LAr



Rivelatori a gas (MWPC, LST)



Separazione e.m.(e^\pm - γ)/h

Come visto gli sciame e.m. e adronici differiscono per:

1. frazione visibile dell'energia primaria
2. sviluppo longitudinale
3. sviluppo laterale

Il punto 1. è molto importante per l'identificazione degli e^\pm anche solo con l'utilizzo di un calorimetro elettromagnetico: se l'impulso \mathbf{p} della particella incidente è stato misurato, il rapporto E/p tra l'energia E misurata nel calorimetro e l'impulso (~ 1 per e^\pm , $\ll 1$ per h) dà un **fattore di reiezione tra 100-500**. Tipicamente $20 X_0$ del cal. e.m. corrispondono a $\sim 1 \lambda$ per cui la frazione di energia che rilascia un adrone (ricordo: $<$ di quella di un e di pari energia) è molto piccola.

Il punto 2. si basa sul fatto che le fluttuazioni di uno sciame e.m. attorno alla media dello sviluppo longitudinale sono abbastanza piccole e quindi uno sciame e.m. non può simularne uno di adronico. Necessita **segmentazione (2-3)** longitudinale del rivelatore. Fattore di reiezione aggiuntivo **5-10**

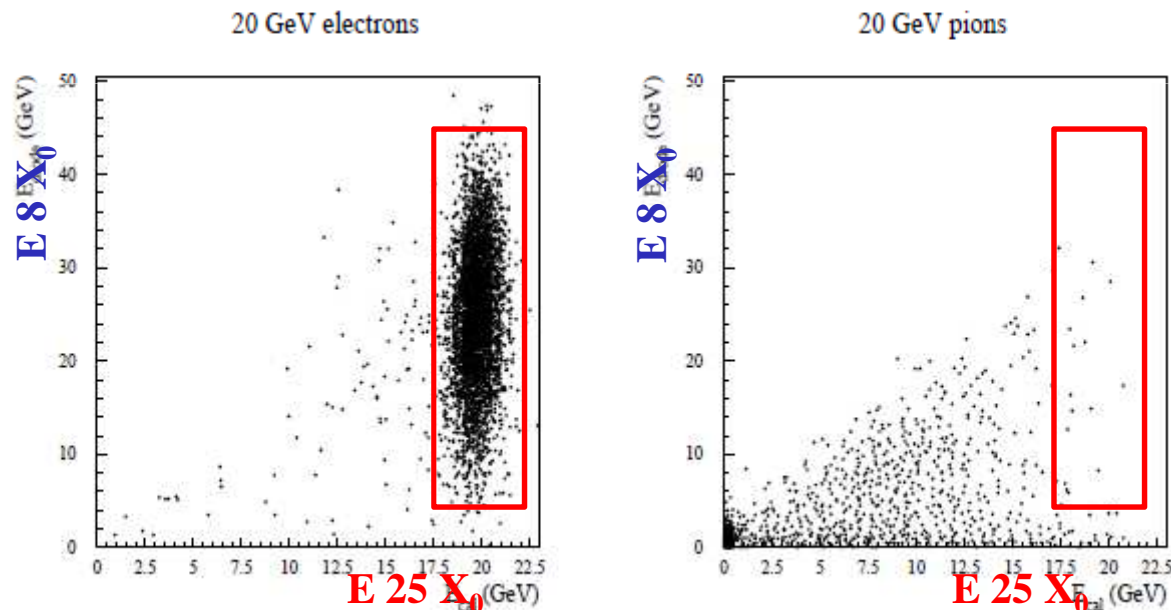
Il punto 3 aiuta (meno) sfruttando la dimensione più ridotta degli sciame e.m. ; indispensabile quando manca la segmentazione longitudinale

Separazione e.m.(e^\pm - γ)/h

Es.: Calorimetro elettromagnetico (a campionamento) :

Totale $25 X_0$

Lettura indipendente delle prime $8 X_0$



Se dietro ci fosse un calorimetro adronico il fattore di reiezione sarebbe ancora più alto perchè gli elettroni che han già perso tutta la loro energia non lascierebbero quasi nulla, contrariamente agli adroni

“Particle flow”:

$$E_{\text{jet}} = \sum_{\text{carichi}} p^{\text{tk}} + \sum_{\gamma} E^{\text{ecal}} + \sum_{\text{neutri}} E^{\text{hcal}}$$

$$\delta E/E = .60 \times 0 + .25 \times 10\% / \sqrt{E} + .10 \times 80\% / \sqrt{E} + \delta_{\text{confusione}}$$

identificare e misurare le particelle
cariche nel tracking detector

associare ad ogni traccia la relativa
energia nel calorimetro e sottrarla

*richiede un'ottima granularità
del calorimetro*

l'energia finale è quella delle
tracce cariche (misurate nel
tracciatore) più quanto rimane nel
calorimetro fotoni, adroni neutri
algoritmi di ricostruzione
sostanzialmente sofisticati

CMS Preliminary

