

Introduzione ai rivelatori di particelle

Parte 10 Calorimetria

Introduzione ai rivelatori di particelle

Calorimetri: introduzione

- **Calorimetri**

- misura dell'energia mediante l'assorbimento totale in un rivelatore
- dal punto di vista della particella da misurare due classi
 - **calorimetri elettromagnetici**
 - misurano l'energia di elettroni, positroni e fotoni
 - sciame elettromagnetico compatto sia longitudinalmente che lateralmente
 - **calorimetri adronici**
 - misurano l'energia di adroni
 - sciame adronico più lungo, largo e variabile
- dal punto di vista delle tecniche due classi
 - **calorimetri omogenei**
 - un unico materiale fa da assorbitore e rivelatore
 - tutta l'energia depositata può dare segnale
 - è necessario un rivelatore denso (cristalli)
 - **calorimetri "sampling"**
 - strati alternati di assorbitore e rivelatore
 - maggiore flessibilità di scelta del rivelatore (minori costi)
 - non tutta l'energia rilasciata è rivelata

Introduzione ai rivelatori di particelle

Calorimetri

- Requisiti
 - **risoluzione**
 - $\sigma(E)/E$
 - linearità della risposta
 - segnale proporzionale all'energia
 - assenza di saturazioni
 - facilità di calibrazione
 - **risposta in tempo**
 - in generale usati per trigger
 - **altri requisiti spesso importanti**
 - granularità
 - matching con i tracciatori
 - » distinzione tra elettroni e fotoni/ π_0
 - misura di "jets" di particelle
 - ermeticità (in un collider)
 - misura del bilancio energetico totale
 - identificazione di neutrini o particelle esotiche da "missing E_T "

Introduzione ai rivelatori di particelle

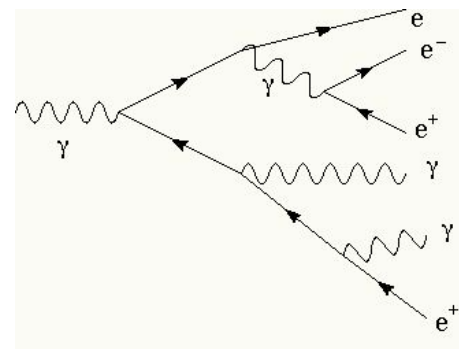
Sciame Elettromagnetici

- con energie superiori a $\approx 10\text{MeV}$ l'interazione di elettroni e fotoni avviene soprattutto per bremsstrahlung e produzione di coppie
- l'emissione di bremsstrahlung e la produzione di coppie sono descritti da X_0 lunghezza di radiazione

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

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

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



- La combinazione di bremsstrahlung e produzione di coppie genera uno sciame di fotoni ed elettroni
 - il picco dello sciame "t" cresce logaritmicamente con l'energia
 - lo sciame si arresta quando tutte le particelle hanno energia inferiore all'energia critica E_C
 - al crescere di Z lo sciame è più lungo (in unità di X_0) perché diminuisce E_C
 - la dimensione laterale dello sciame è definita dal raggio di Moliere R_M

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

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

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

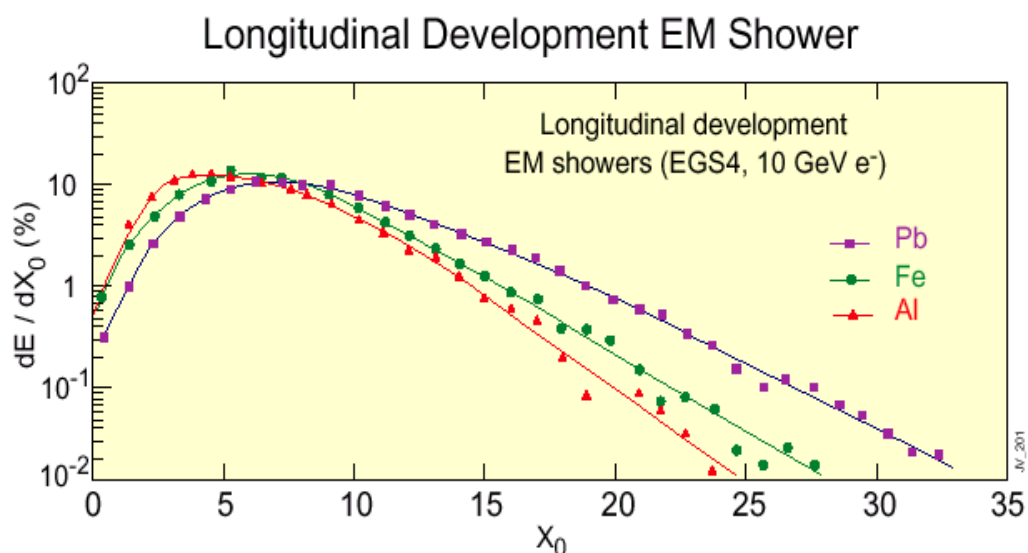
Introduzione ai rivelatori di particelle

sciame EM

- Sviluppo longitudinale dello sciame EM

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

- lunghezza in X_0 che contiene il 95% dell'energia

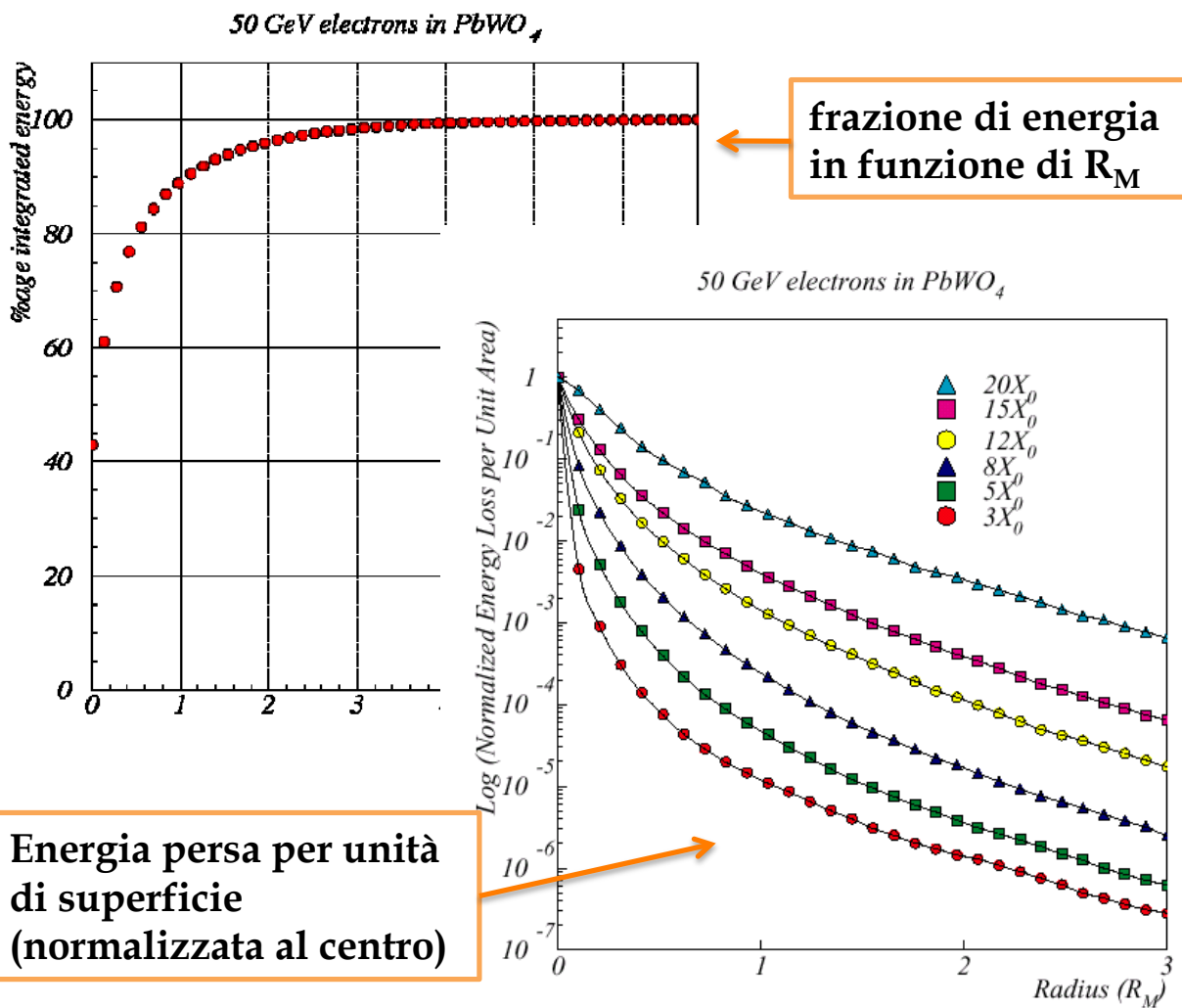


- Sviluppo laterale dello sciame EM

- e^\pm deviano a causa dello scattering multiplo
- fotoni emessi da elettroni che viaggiano ad angolo rispetto all'asse
 - Il 95% dell'energia è contenuto in un cilindro con raggio pari a $2R_M$
 - Il 99% dell'energia è contenuto in un cilindro con raggio pari a $3.5R_M$

Introduzione ai rivelatori di particelle

Sciami EM



- Profilo laterale di uno sciame di elettroni di 50 GeV
 - nucleo denso causato dal multiple scattering
 - alone dovuto a fotoni che allarga lo sciame

Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri EM

- la lunghezza totale delle tracce e^\pm si può calcolare

$$l = \left(\frac{4}{3} X_0 + \frac{2}{3} l_c \right) \cdot \frac{E}{E_c}$$

- l_c è il percorso medio di e^\pm con energia critica
- il segnale nel rivelatore dipende dalla lunghezza di traccia ($dE/dx \approx$ costante)
 - segnale proporzionale a l quindi ad E
 - risposta lineare con l'energia
- il segnale è dovuto a n particelle
 - fluttuazioni statistiche determinano parte della risoluzione
 - fluttuazioni dello sciame, perdite longitudinali e laterali
 - fluttuazioni della rivelazione (fotoelettroni)
 - fluttuazioni nel materiale davanti al calorimetro
 - eventuali fluttuazioni di campionamento

$$\sigma(n) \propto \sqrt{n} \rightarrow \sigma(E) \propto \sqrt{E}$$

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

- la risoluzione migliora al crescere dell'energia
 - se si limitano le perdite di energia longitudinali
 - **profondità di un calorimetro EM tipicamente $20/30 X_0$**

Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri EM

- in generale la risoluzione si può scrivere come

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

(E in GeV)

- a è il termine stocastico
 - il limite teorico calcolato è $a=0.01 GeV^{1/2}$
 - corrisponde ad una risoluzione stocastica di 1% ad 1 GeV
 - b dipende dal rumore ed è influente a basse energie
 - c dipende da non uniformità e incertezze di calibrazione e determina il limite della risoluzione ad alte energie
- risoluzione in posizione (o in angolo della traccia)
 - importante, è l'unica misura di posizione per i γ
 - dipende dal raggio di Moliere e dalla segmentazione laterale

$$\sigma(\theta) = \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \oplus \beta$$

(E in GeV)

- segmentazione dell'ordine di R_M permette una precisa ricostruzione della posizione
- in termini angolari tipicamente $45\text{mrad}/\sqrt{E}$

Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri EM omogenei

	Nal(Tl)	BaF2	CsI(Tl)	CsI	CeF3	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 $40 \times 10^3 \gamma / \text{MeV}$

- blocco di materiale omogeneo
 - in cui si sviluppa lo sciame
 - e contestualmente viene generato il segnale
- scelta essenzialmente limitata a
 - cristalli inorganici scintillanti
 - vetri con produzione di luce Cherenkov
 - gas nobili pesanti liquefatti (Xe)

Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri EM 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 ($\sigma \approx 2.5\%$)

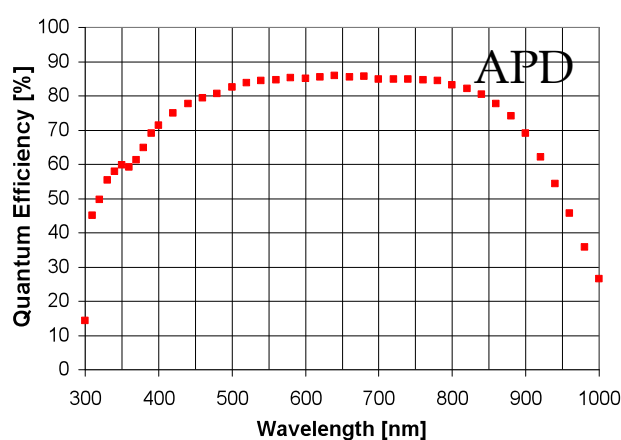
Cherenkov Radiator	Density	X0 (cm)	λ (cm)	Index of refraction
SF2 lead glass	3.85	2.76	38	1.65
SF6 lead glass	5.2	1.7	30	1.81
SF57 lead glass	5.5	1.5	28	1.85
PbF ₂ crystal	7.8	0.93	20	1.82
UVT acrylic	1	40	80	1.5

- Vetro al piombo
 - luce Cherenkov
 - veloce, circa 20ns
 - light yield limitato
 - emissione in UV
 - ≈ 1 fotoelettrone/MeV
 - in genere X_0 relativamente grande
 - si ingialliscono con la radiazione
 - si ottiene un termine stocastico a $\approx 5\%$

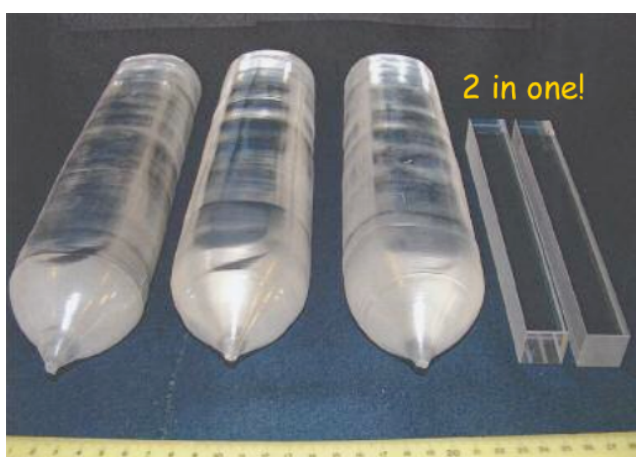
Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri EM omogenei

- PbWO_4 tungstanato di piombo
 - 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



- Scelto da CMS per il calorimetro elettromagnetico

Introduzione ai rivelatori di particelle

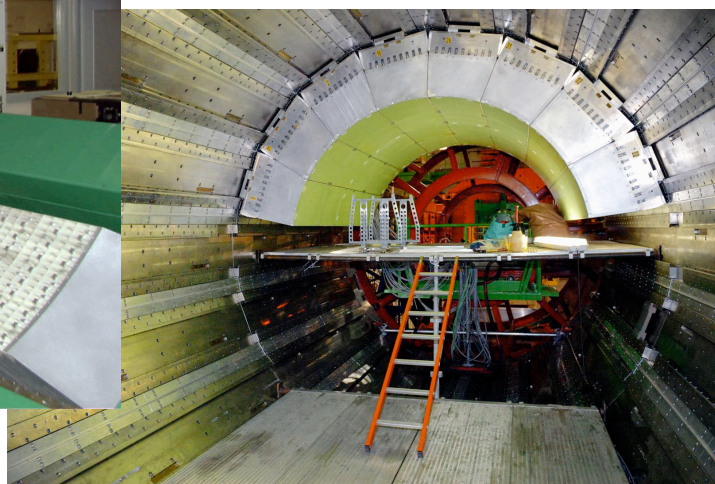
calorimetri EM omogenei

- 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 $\pm 0.1^\circ\text{C}$

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

(E in GeV)

- dimensioni dei cristalli $2.2 \times 2.2 \times 23\text{cm}$ ($26X_0$)
- 80×10^3 cristalli ciascuno letto da 2 APD



Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri EM segmentati

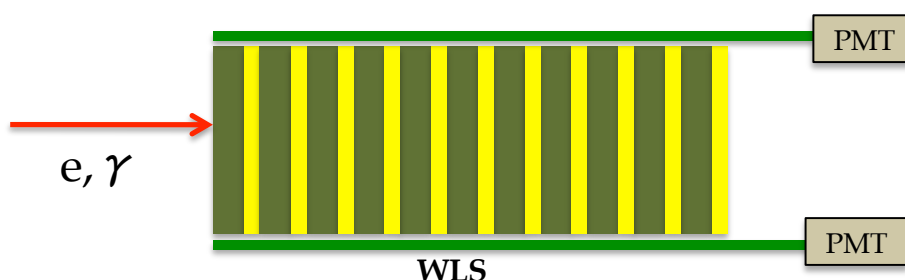


- **Sampling**
 - strato passivo di assorbitore dove si sviluppa lo sciame
 - strato attivo di rivelatore
 - struttura ripetuta fino ad ottenere la lunghezza in X_0 voluta
- vantaggi
 - maggior flessibilità nella scelta di materiali e rivelatori
- svantaggi
 - energia persa nell'assorbitore
 - maggiori fluttuazioni stocastiche, peggior risoluzione
 - la risoluzione dipende dal rapporto materiale passivo/attivo (sampling fraction)
- $$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{\sqrt{t/f}}{\sqrt{E}}$$
 - dove t è lo spessore dell'assorbitore e f il sampling fraction
- **in genere si hanno risoluzioni con contributo stocastico tra 10% e 15%**

Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri EM segmentati

- Tipiche tecnologie
 - piombo/scintillatore
 - lettura con lastre di wave length shifter ai lati, o con fibre di WLS inserite longitudinalmente (“spaghetti calorimeter”)

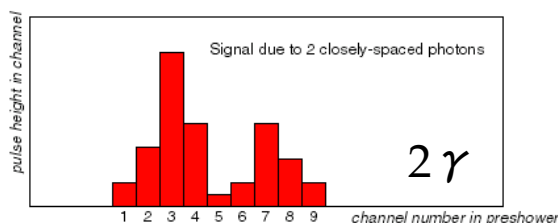
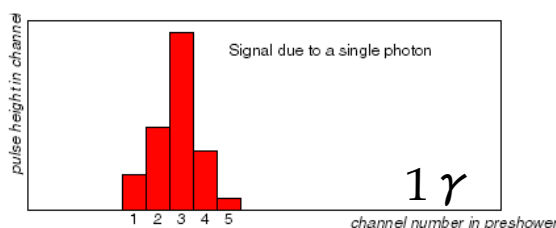
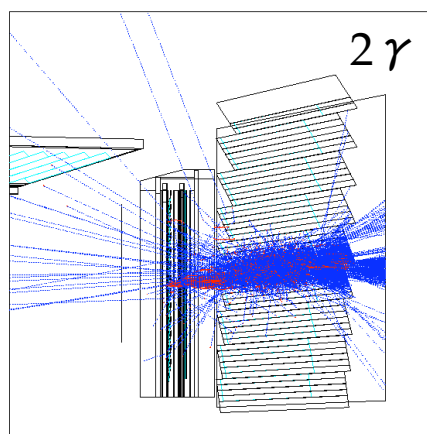
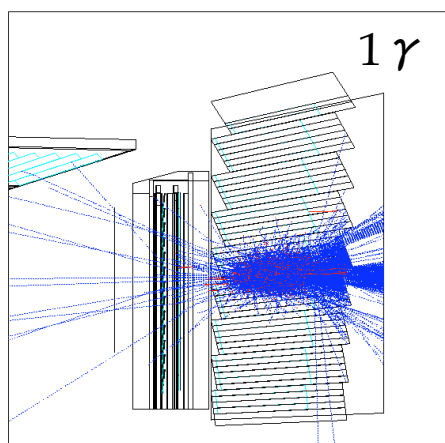


- piombo/Lar
 - argon liquido letto come camera a ionizzazione
- a volte calorimetro EM ed adronico in cascata, costruiti con la stessa tecnologia

Introduzione ai rivelatori di particelle

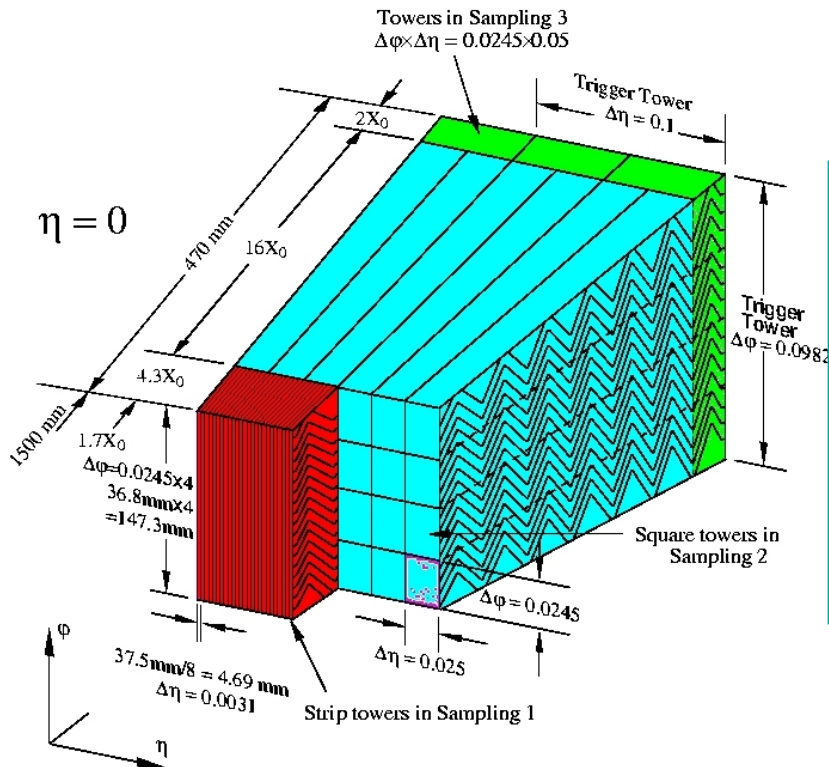
preshower

- 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



Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetro EM di Atlas



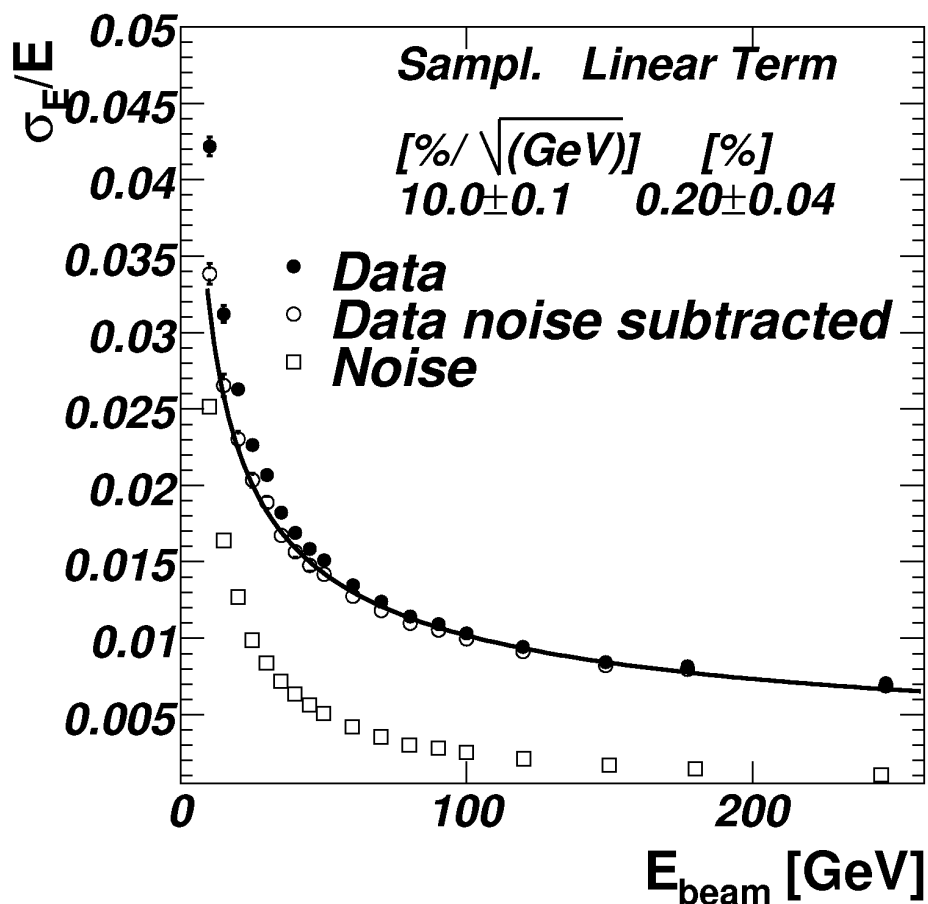
- Atlas
 - calorimetro sampling Pb/Lar
 - Parte 1: misura di posizione/angolo
 - Parte 2: misura di energia principale
 - parte 3: "tail catcher" identificazione degli sciami lunghi

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

(E in GeV)

Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetro EM di Atlas



- Risoluzione del calorimetro di Atlas
 - misurata in un fascio di test con elettroni fino a 200GeV

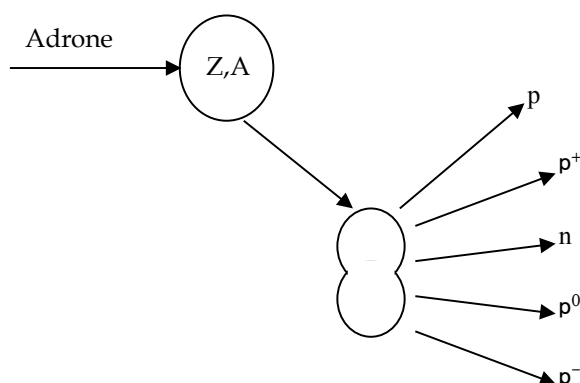
Introduzione ai rivelatori di particelle

parametri di vari calorimetri EM

Technology (Exp.)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
Bi ₄ Ge ₃ 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

Introduzione ai rivelatori di particelle

Calorimetri adronici



- **Gli adroni danno origine ad interazioni nucleari eccitando o frammentando il nucleo**
 - produzione di particelle secondarie che a loro volta possono generare interazioni nucleari
 - sciame adronico in analogia allo sciame EM

$$\sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{0.7} \quad \sigma_0 \approx 35 \text{ mb}$$

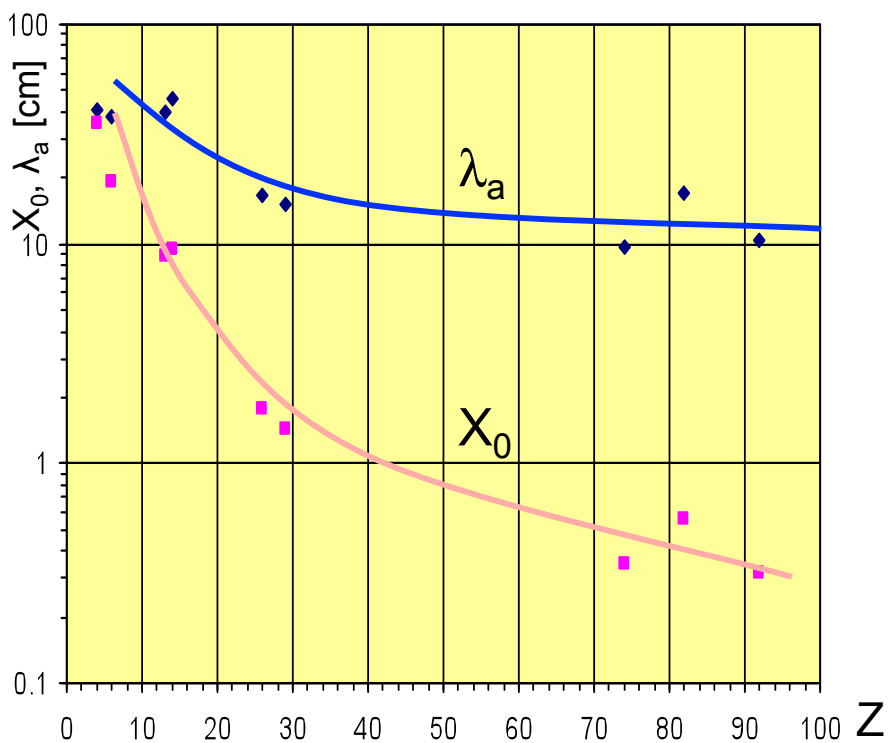
$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}} \approx \frac{A}{N_A \sigma_0 A^{0.7}} \approx \frac{A^{1/3}}{N_A \sigma_0}$$

$$N = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda_a}}$$

- ci sono molte differenze rispetto allo sciame elettromagnetico
 - $\lambda \gg X_0$
 - processi molto meno omogenei
- ovviamente gli adroni carichi perdono anche energia per ionizzazione/eccitazione del mezzo

Introduzione ai rivelatori di particelle

sciame adronico

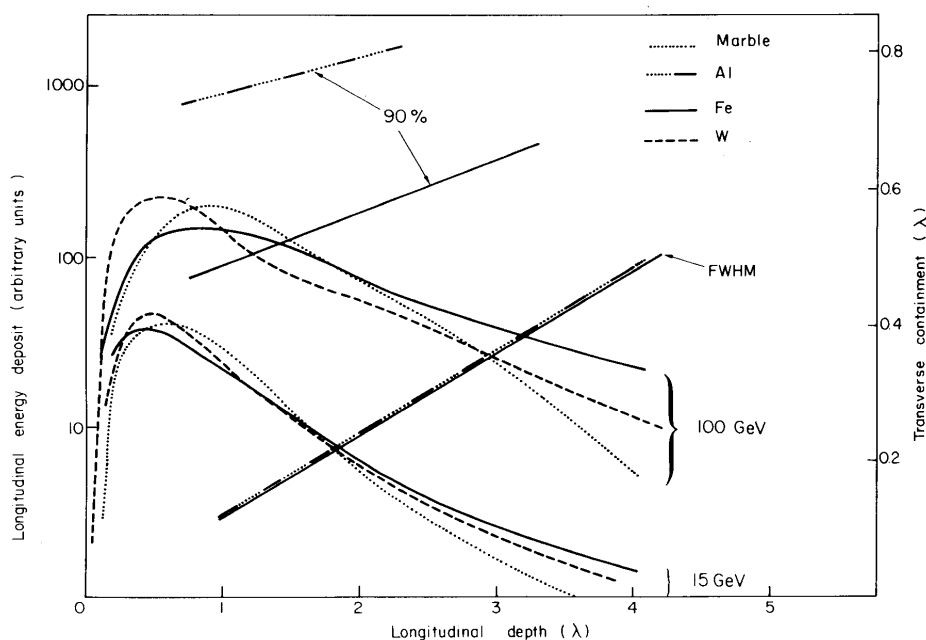


- Sciame adronico molto più lungo e largo
- λ_a dipende meno da Z ad alto Z

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

Introduzione ai rivelatori di particelle

sciame adronico



- Profilo della cascata

$$t_{\max}(\lambda_I) \approx 0.2 \ln E[\text{GeV}] + 0.7$$

$$t_{95\%}(\text{cm}) \approx a \ln E + b$$

- a e b dipendono dal materiale, per il ferro $a=9.4$, $b=39$ (cm)
- la crescita è molto rapida e con una lunga coda
 - Esempio, per 100GeV in Fe

$$t_{\max} = 1.6\lambda$$

$$t_{95\%}(\text{cm}) \approx 80\text{cm}$$

Introduzione ai rivelatori di particelle

sciame adronico

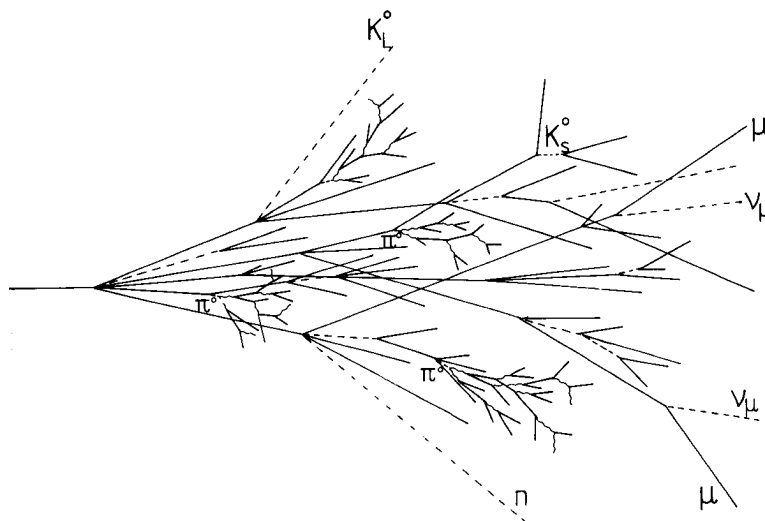
- NB a causa della lunghezza di λ non è praticabile un calorimetro omogeneo
 - calorimetri adronici tutti del tipo “sampling”
 - la maggior parte delle reazioni nucleari avviene nell'assorbitore
- cascate adroniche
 - variazione nella molteplicità delle particelle prodotte in un'interazione con un nucleo
 - interazioni nucleari producono protoni e neutroni di spallazione
 - segnale in genere trascurabile
 - neutroni di evaporazione
 - si termalizzano e producono γ di cattura in tempi lunghi rispetto alla lettura del segnale
 - rinculo del nucleo (in genere eccitato)
 - segnale prodotto trascurabile
 - decadimenti deboli con produzione di μ e ν
 - una frazione importante (e variabile) di energia non è rilevabile
 - 20%÷35%
 - i secondari carichi rilasciano energia per ionizzazione/eccitazione ma anche
 - ulteriori interazioni nucleari che continuano la cascata
 - se nella cascata vengono prodotti π_0 si ha

$$\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$$

- una parte dello sciame diventa elettromagnetico
- la frazione f_{em} dello sciame è molto variabile ed influenza molto la risoluzione del calorimetro

Introduzione ai rivelatori di particelle

sciami 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:

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

$$k=0.8 \div 0.85$$

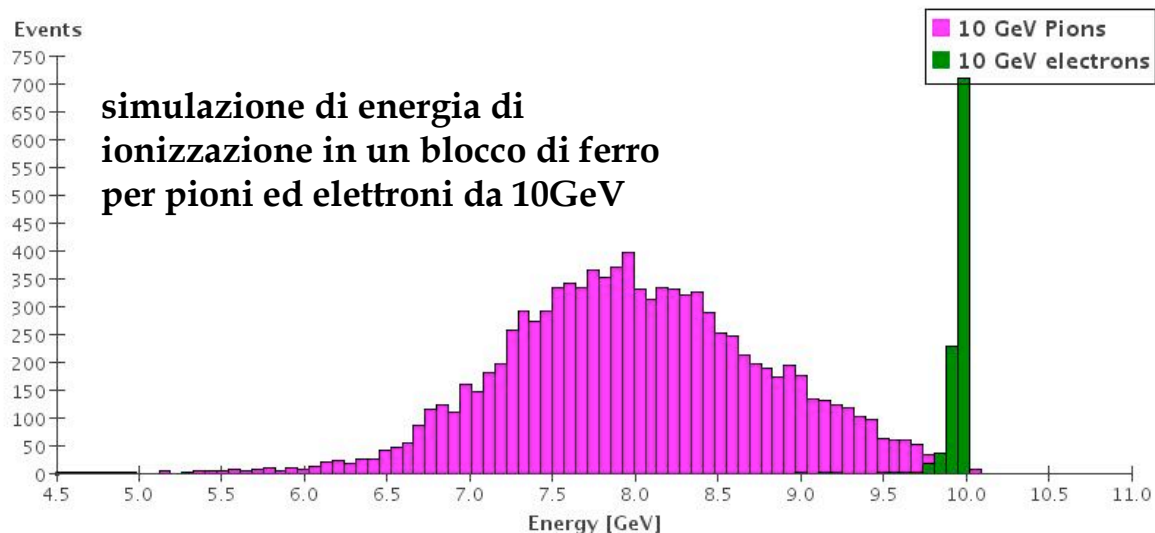
$$E_0 [GeV] = 0.7 [Fe] \div 1.3 [Pb]$$

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

Introduzione ai rivelatori di particelle

fluttuazioni nello sciame adronico

- 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 $\approx 60\% \sqrt{E}$

Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri compensanti

- 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

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

- 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

Introduzione ai rivelatori di particelle

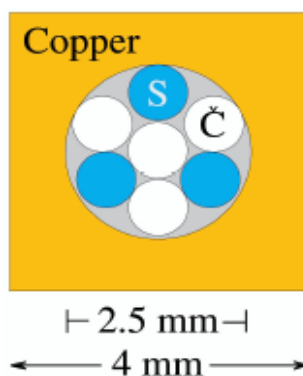
altre soluzioni alle fluttuazioni di f_{em}

- 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

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

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

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



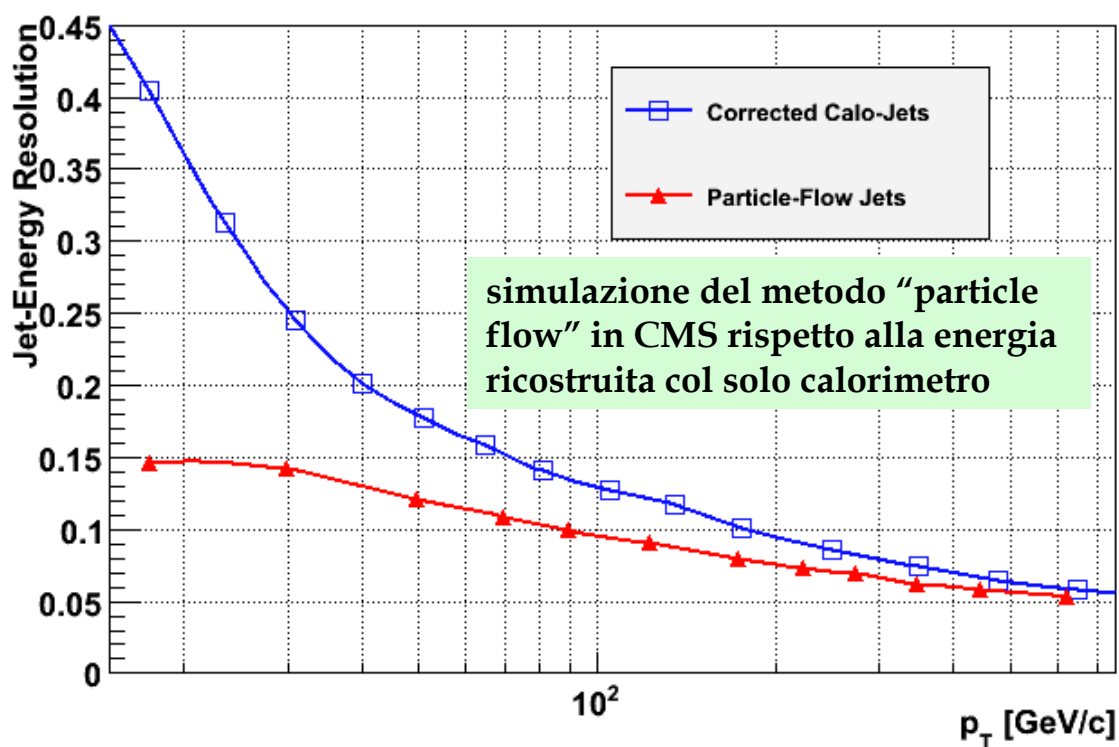
$$\sigma_E / E = 36.9\% / \sqrt{E} \oplus 1\%$$

Introduzione ai rivelatori di particelle

Particle flow

- Particle flow
 - 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 sofisticati

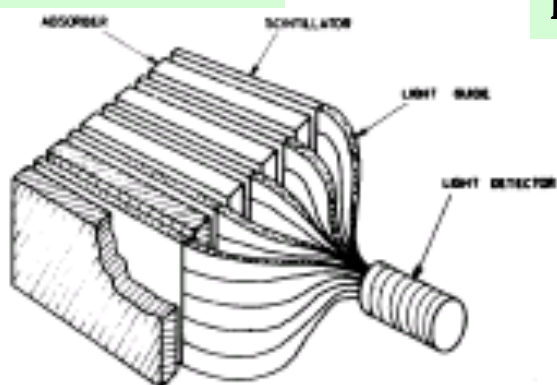
CMS Preliminary



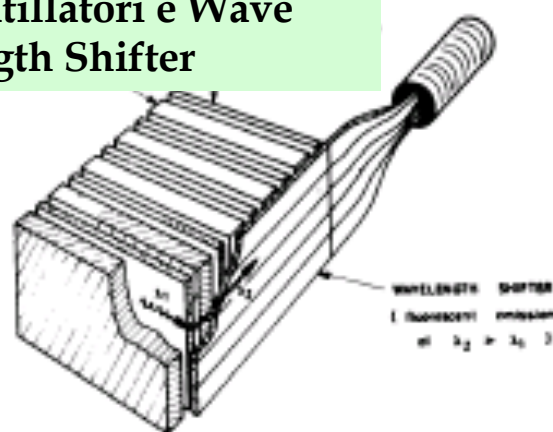
Introduzione ai rivelatori di particelle

calorimetri adronici

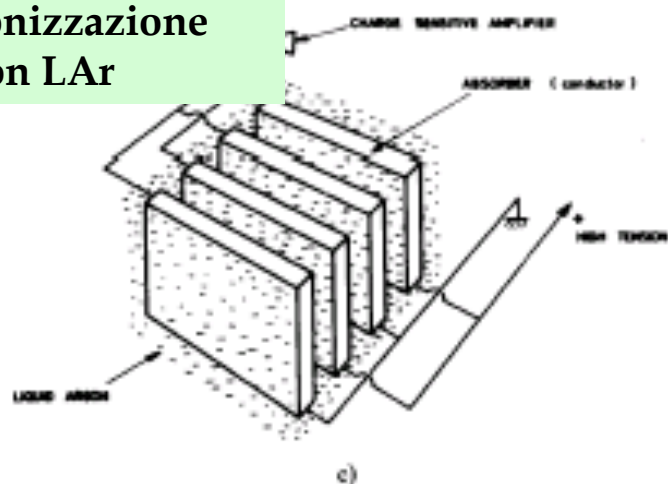
Scintillatori e guide di luce



Scintillatori e Wave Length Shifter



Ionizzazione con LAr



Rivelatori a gas (MWPC, LST)

