Calorimetri in Fisica delle Alte Energie

Definizione di calorimetro:

•Blocco di materia con uno spessore sufficiente affinche' le particelle interagiscano e rilascino "tutta" la loro energia dentro il suo volume

•La maggior parte dell'energia ➔ calore dissipato

•Una certa frazione dell'energia rilasciata ➔ forma "visibile"

– (luce di scintillazione, luce Cerenkov, carica di ionizzazione)

Storia:

•Nascono all'inizio degli anni settanta (con l'avvento dei convertitori analogico-digitali)

Proprieta' generali dei calorimetri

- Misura dell'energia
  - operazione distruttiva della particella stessa
- Si puo' misurare l'energia di particelle cariche e neutre
- Con un'opportuna segmentazione si possono misurare posizione e angolo
- Entro certi limiti si puo' identificare il tipo di particelle
  - (e, μ, π)
- La loro risoluzione in energia e' $R \propto 1.0/\sqrt{E}$
  - Aumenta con l'energia
- Risposta veloce (dell'ordine di 10-500 ns)
  - Utilizzabili nella selezione veloce degli eventi (trigger)

Classi di calorimetri

- Calorimetri elettromagnetici:
  - Elettroni e fotoni
- Calorimetri adronici
  - Protoni, neutroni, pioni, etc…

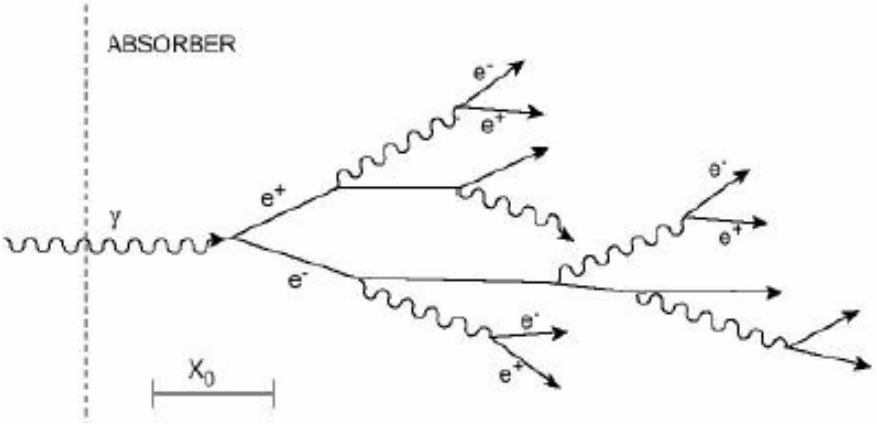
Sciame elettromagnetico (1)

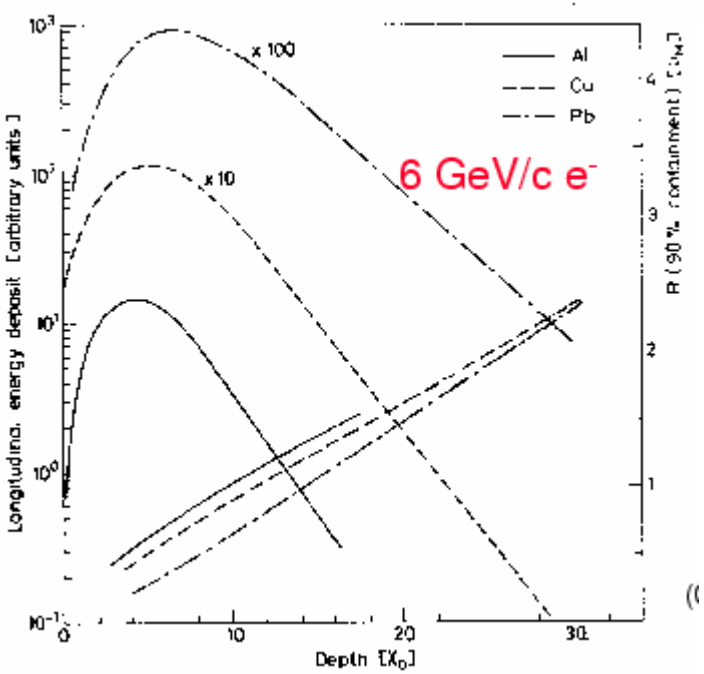
- Elettroni e fotoni hanno nella materia vari meccanismi di perdita di energia
  - bremsstrahlung (e), creazione di coppie(γ) dominanti a energie > 1 GeV
- Generazione dello sciame e.m.
  - Bremsstrahlung : l'elettrone irradia un fotone quando decelera
  - Creazione di coppie: il fotone si converte in una coppia e^+ e^-

→ **Cascata elettromagnetica**

- Parametro che regola la profondita' dello sciame nel materiale: lunghezza di radiazione = X_0 (cm)

Sciame elettromagnetico (2)





Lo sviluppo longitudinale dello sciame e' proporzionale al logaritmo dell'energia

Lo sviluppo longitudinale dello sciame dipende essenzialmente da X_0

e dipende da X_0 anche lo sviluppo trasversale dello sciame

Sciame elettromagnetico (3)

Come dipende dal materiale la lunghezza di radiazione X_0 ?

$$X_0[gm/cm^2] \approx 180 \cdot A/Z^2$$

dove A = massa atomica e Z = carica dell'elemento

Material	X_0 in g/cm^3	X_0 in cm	E_c in MeV	Density in g/cm^3
H_2	61	865	340	0.071
C	42	28	90	2
Al	24	8.9	49	2.7
Fe	13.8	1.8	22	7.9
Cu	12.9	1.43	20	8.9
Pb	6.3	0.56	6.9	11.3

per fermare un elettrone con energia E ~10 GeV occorrono ~ 20 X_0

Misura dell'energia

- 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

$$E_{visibile} \propto L$$

Risoluzione energetica

- **Definizione**: rapporto tra la "larghezza" della distribuzione energetica e il valor medio della distribuzione stessa quando il calorimetro e' investito da particelle della stessa energia

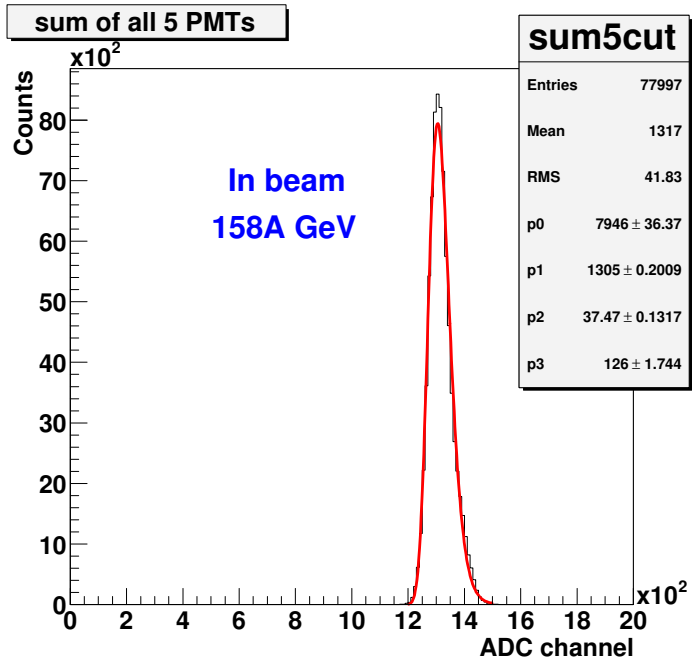
$$R = \sigma_E / E$$

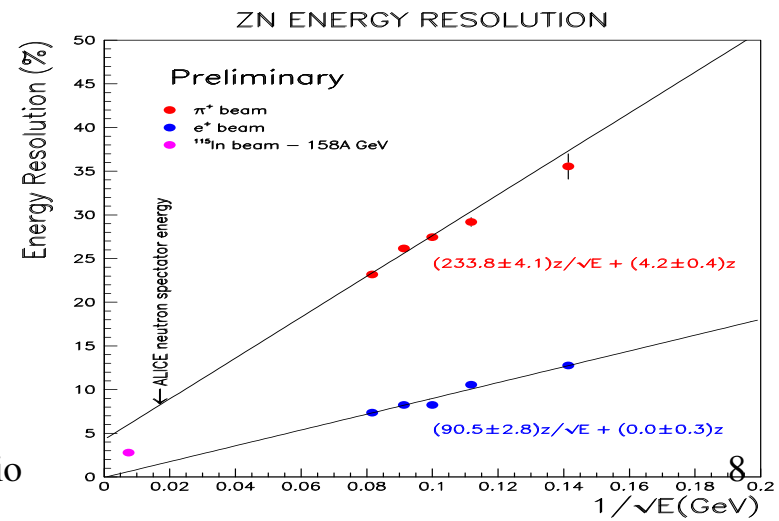
- limite intrinseco della risoluzione energetica di un calorimetro

$$\sigma_E / E \propto 1/\sqrt{E_0}$$

- piu' in generale (valido per calorimetri e.m. e adronici):

$$R = a/\sqrt{E} + b$$





Calorimetri e.m. omogenei

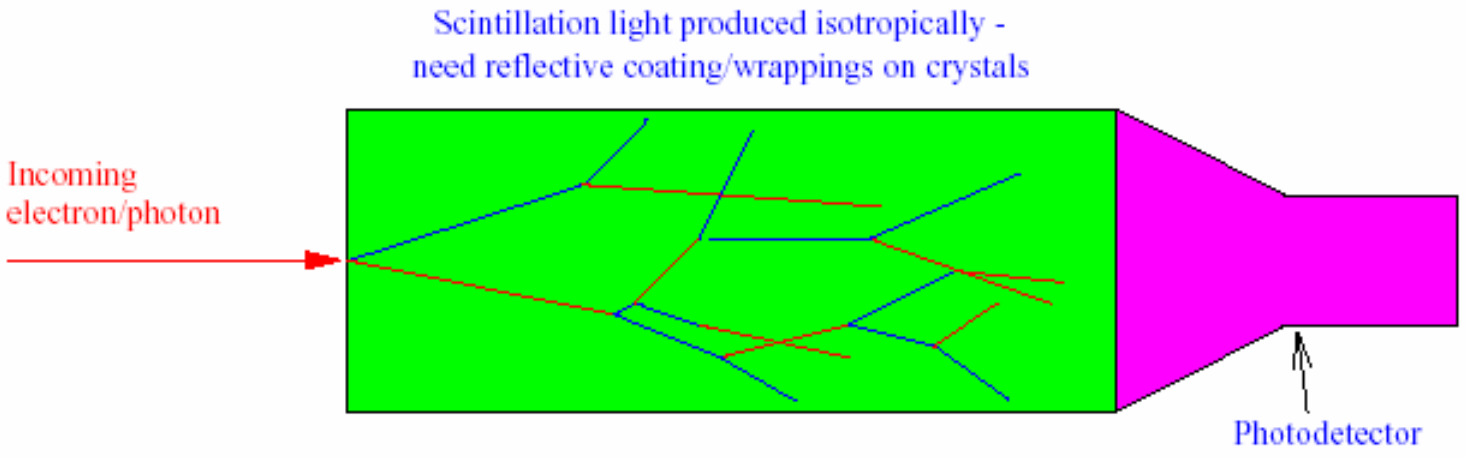


Figure 3: Schematic representation of a homogeneous calorimeter

Sono costituiti da un materiale attivo omogeneo

- cristalli (scintillatori)

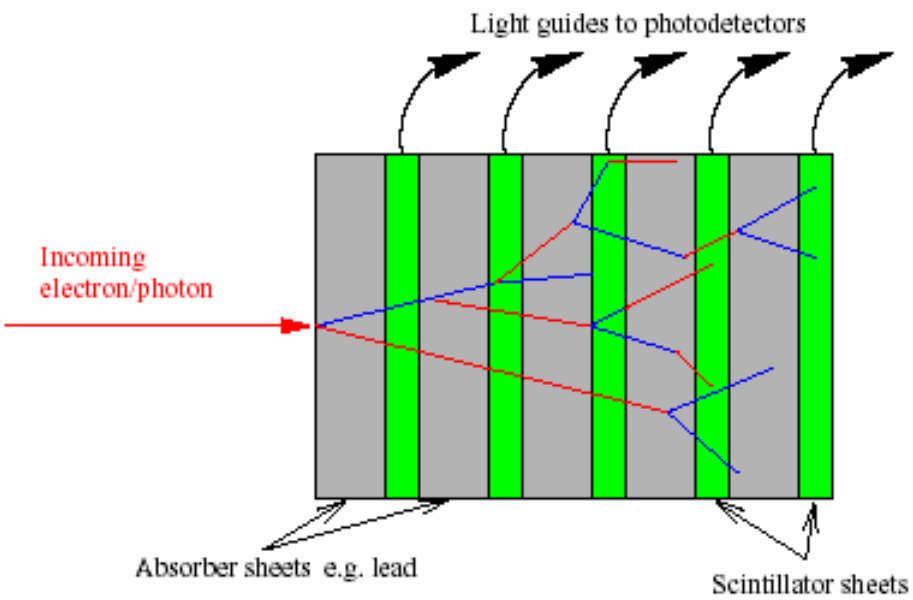
  esempio : BaBar [Csi(Tl)]

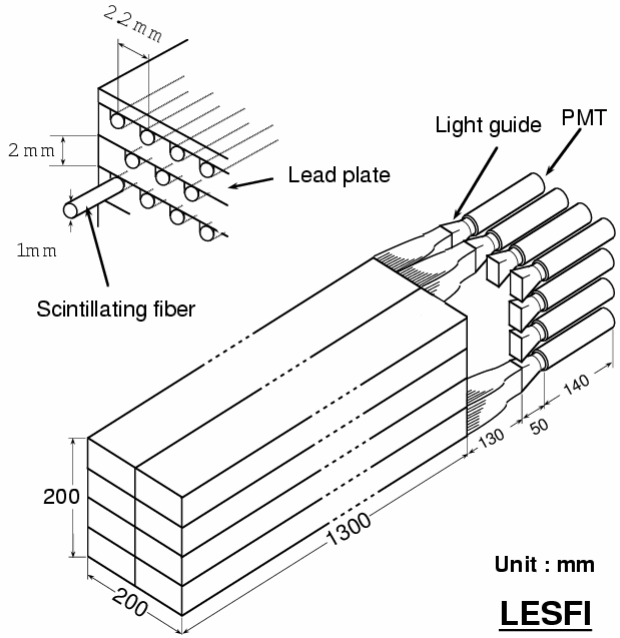
  : ALICE PHOS [$PbWO_4$]

-contatori Cerenkov (vetri al Piombo)

Buonissima risoluzione (~ 1-2%) ma alto costo e danneggiabili dalle radiazioni

Calorimetri e.m. a campionamento





Sono costituiti da strati alternati di materiali diversi:
- uno strato passivo dove avviene principalmente la perdita di energia
- uno strato attivo dove avviene le misura dell'energia

Esempi : ATLAS EM,NA48

Risoluzione energetica: ~5 volte peggiore dei calorimetri omogenei

I calorimetri adronici sono tutti a campionamento (ALICE ZDC)

Sciame adronico (1)

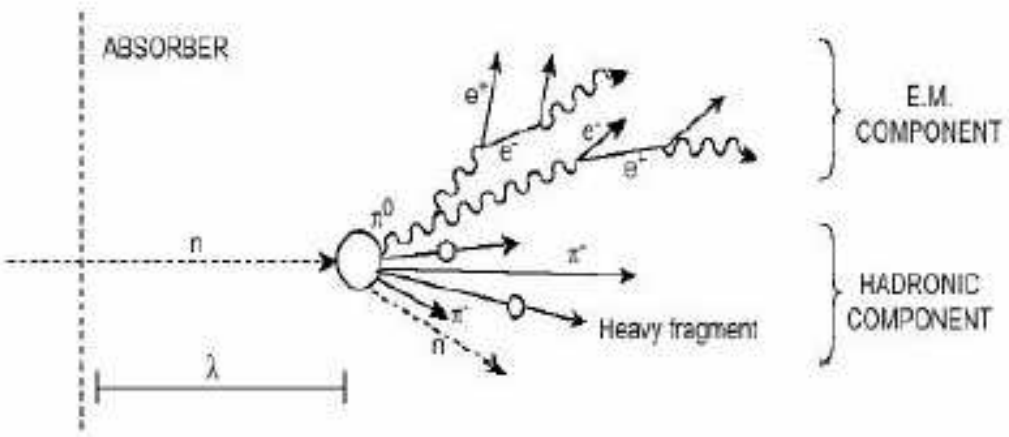
- Sciame generato da adroni:
  - concettualmete analogo allo sciame e.m., ma…
- interazioni forti
  - molto piu' complicate da descrivere delle interzioni elettromagnetiche

- Caratteristiche piu' importanti:
  - Produzione di molte particelle (π,p) nell'interazione
  - La maggior parte dell'energia e' assorbita in eccitazione e rottura dei legami nucleari

⇒ formazione di sciami lunghi e penetranti
λ : lunghezza di interazione nucleare

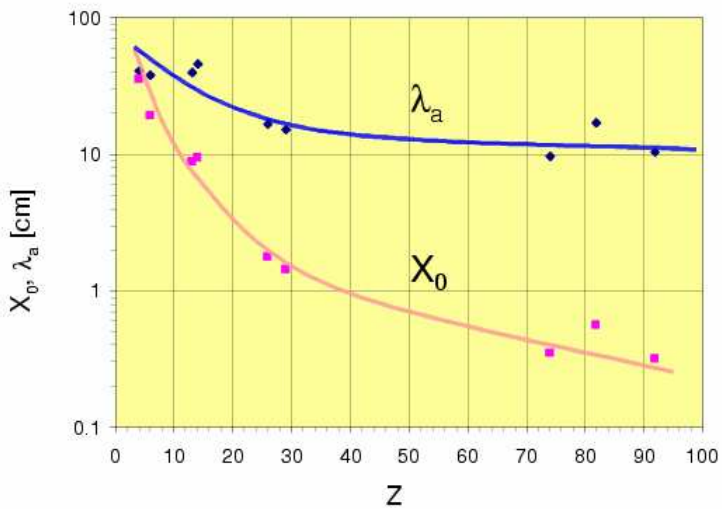
⇒ la frazione di energia "visibile" e' piccola

Sciame adronico (2)



Energia visibile presenta grandi fluttuazioni statistiche

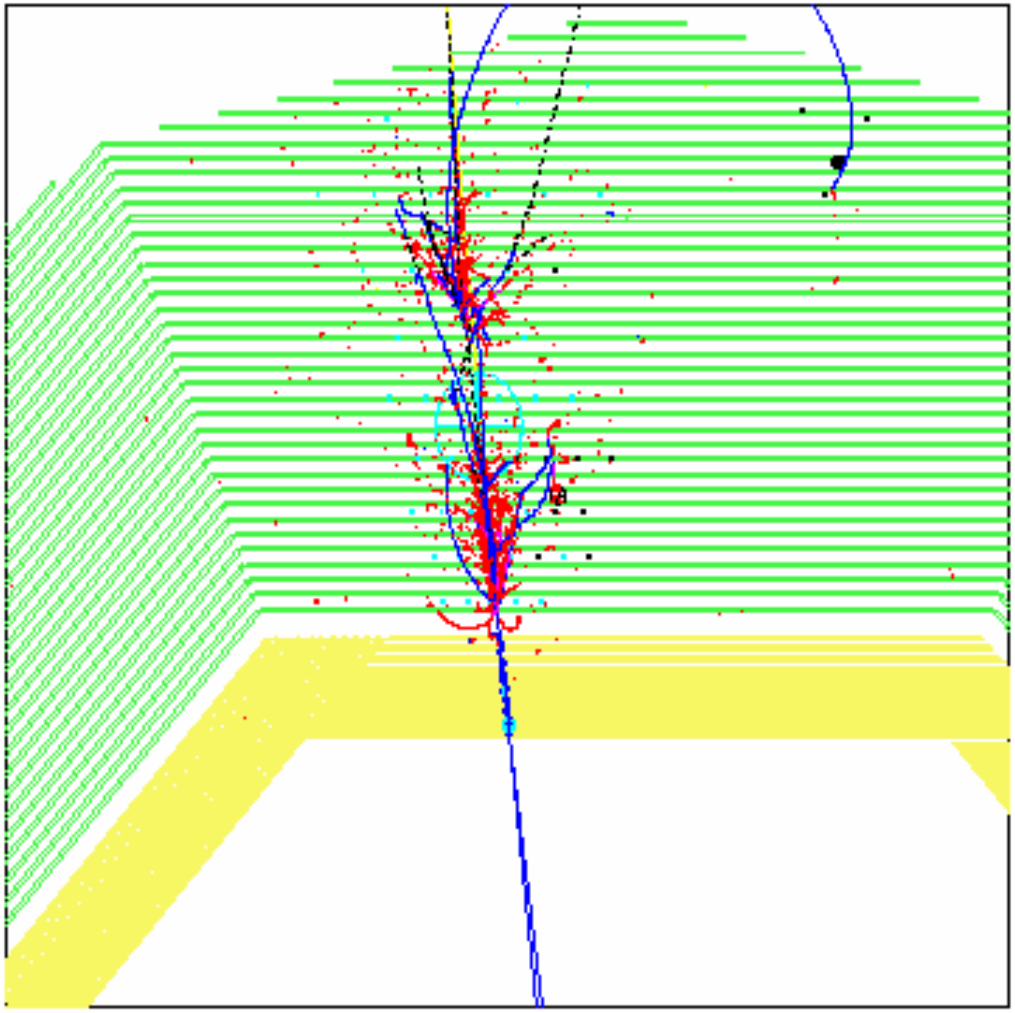
- risoluzione energetica intrinseca » calorimetri elettromagnetici



Lo sviluppo longitudinale dello sciame adronico scala con λ ma $\lambda >> \chi_0$ quindi dimensioni dei calorimetri adronici sono molto piu' grandi

➔ **Calorimetri a campionamento**

Simulazione di sciame adronico



TESLA Calorimeter Input: single π^+ (30 GeV)

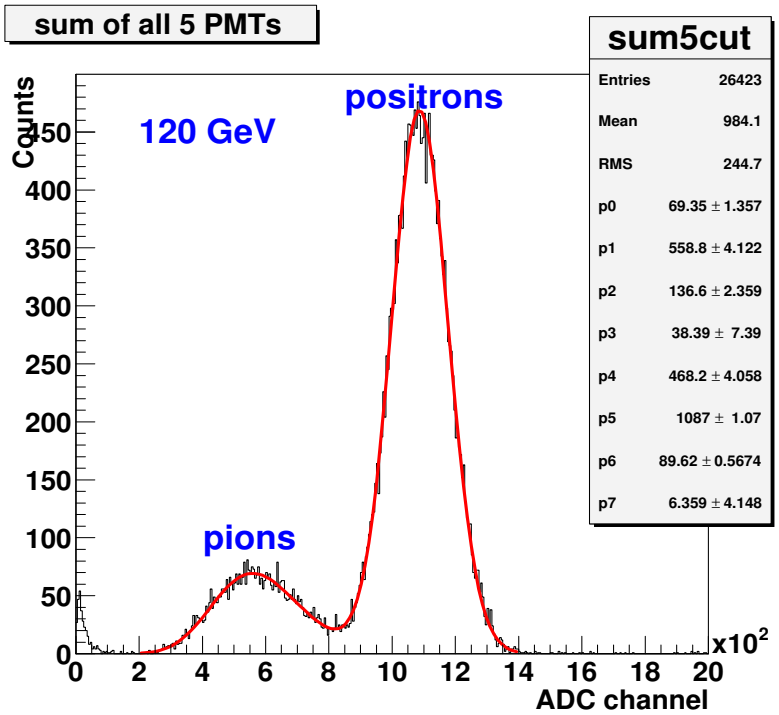
Rosso: energia depositata
da elettroni e positroni

Blu: tracce di adroni carichi (essenzialmente pioni)

Nero: neutroni

Compensazione

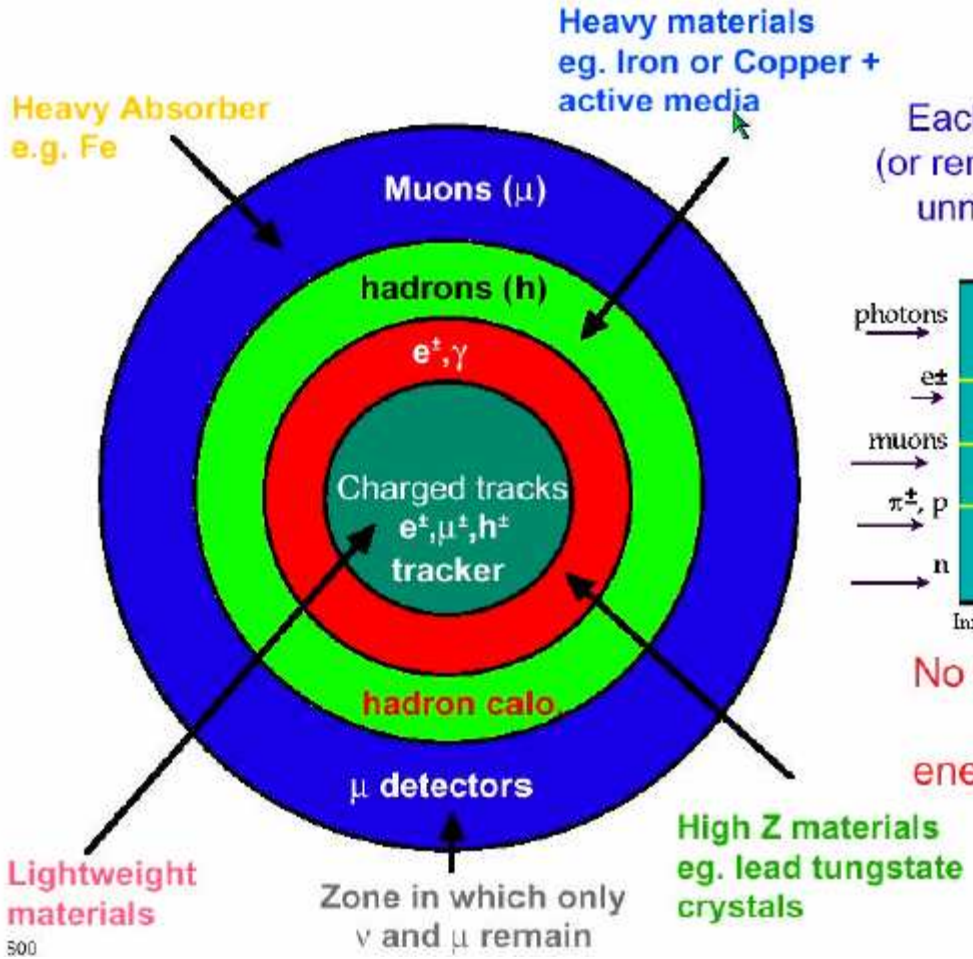
- L'energia "visibile" e' minore in uno sciame adronico rispetto ad uno sciame e.m.
- Il segnale di un calorimetro adronico ad un e^- e ad un π della stessa energia e' diverso
- Un calorimetro si dice **compensato** se la risposta a e^- e π e' uguale



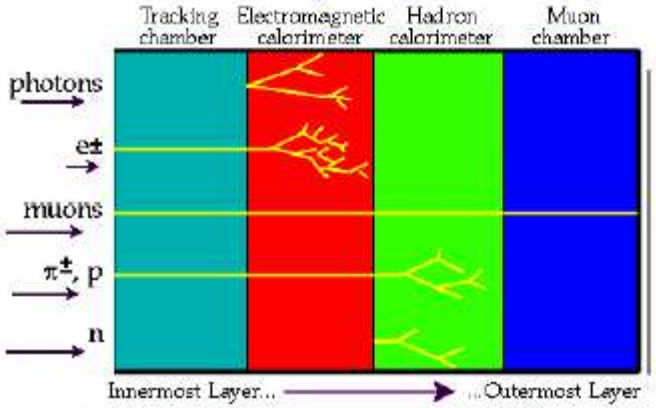
ALICE ZDC non e' compensato

… ma non importante
deve rivelare solo adroni (n e p)

Structure of a Typical Collider Detector



Each layer identifies and measures (or remeasures) the energy of particles unmeasured by the previous layer

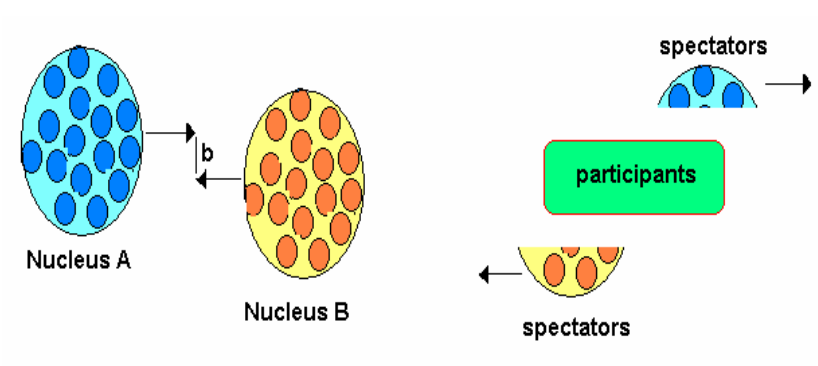


No single detector can determine identity and measure energies/momenta of all particles

ALICE ZDC : a cosa serve ?

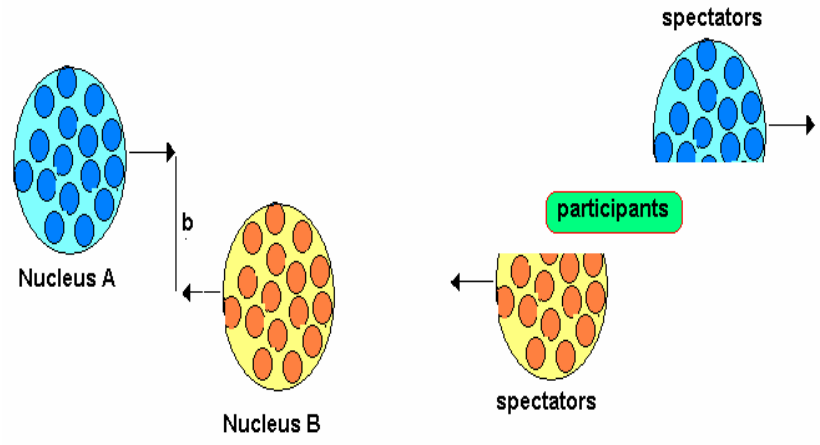
Con il calorimetro a zero gradi (ZDC) si misura
la centralita' dell'urto nelle collisioni Pb-Pb

1 Urti centrali



Piccolo parametro d'urto b
Alta densita' di energia
Piccolo numero di spettattori
⇒ poca energia nello ZDC

2 Urti periferici



Grande parametro d'urto b
Bassa densita' di energia
Grande numero di spettatori
⇒ grande energia nello ZDC

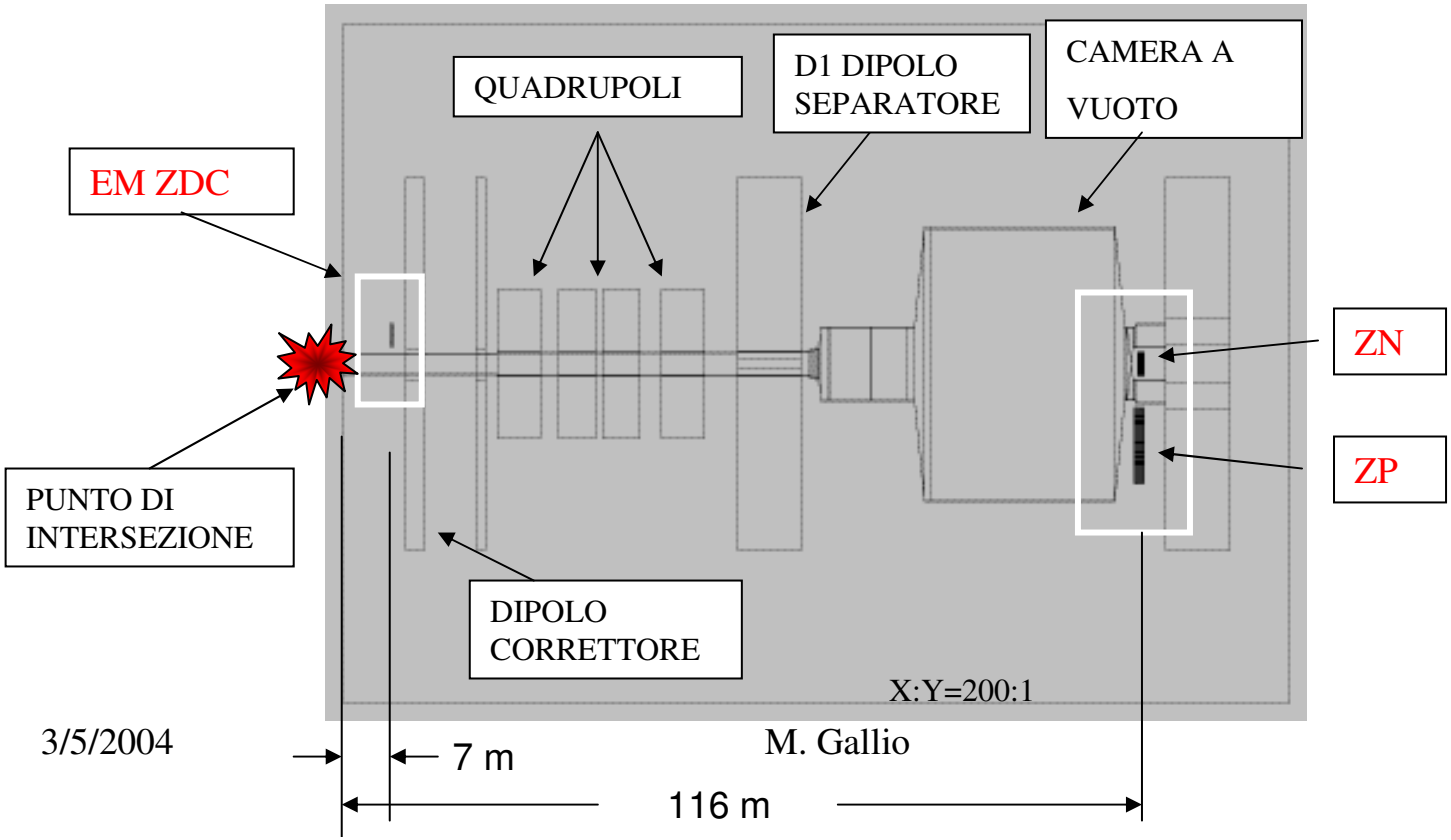
$N_{spec} = E_{zdc} / E_A \Rightarrow N_{part} = A - N_{spec}$

ALICE ZDC: dove e' posizionato ?

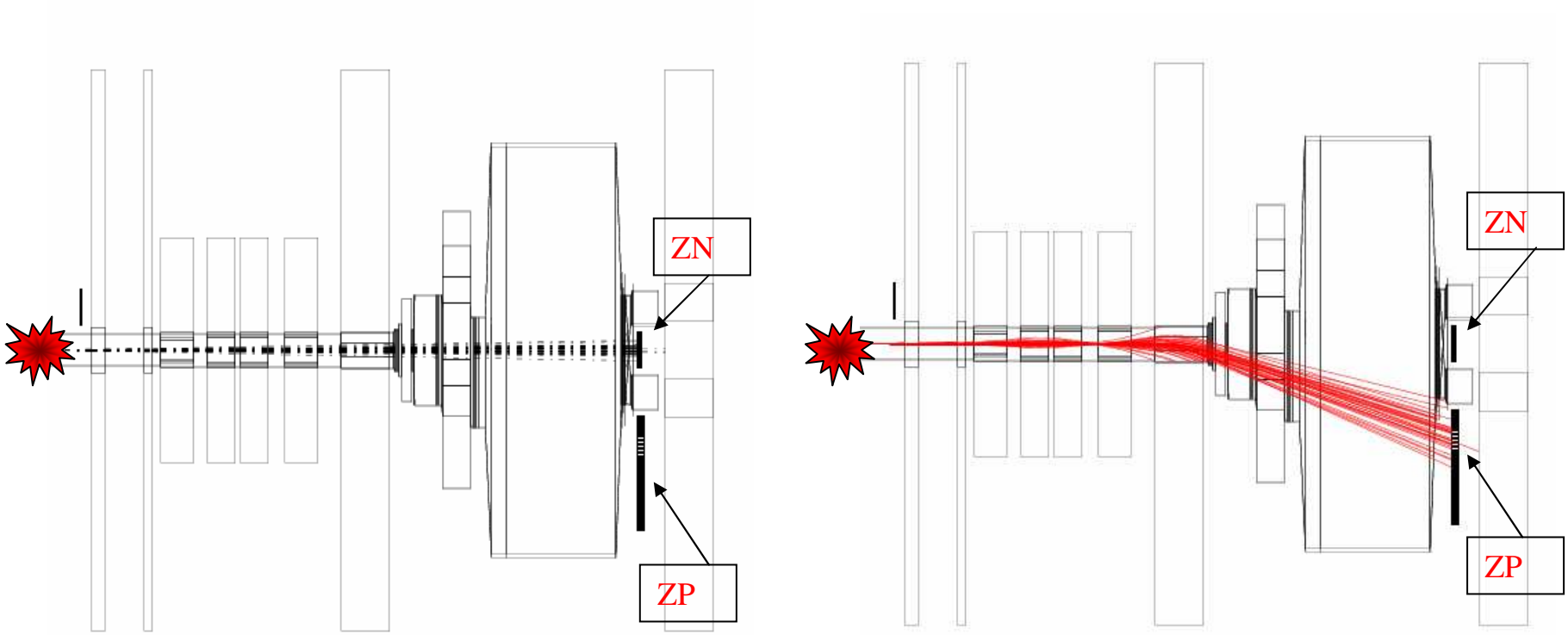
Il rivelatore ZDC e' fatto da due insiemi di calorimetri, ciascuno dei quali e' formato da:

2 calorimetri adronici a campionamento, 1 per I neutroni spettatori (ZN) e 1 per I protoni spettatori (ZP), piazzati a 0° rispetto all'asse del LHC , a circa 116 m dal punto di intersezione dei fasci IP), dove i tubi di fascio sono separati.

Un calorimetro EM piazzato a 7 m da IP che misura l'energia di e e γ prodotti in avanti



ALICE ZDC : che particelle rivela?



Esempi di traiettorie di neutroni spettatori (tratteggio nero)
protoni spettatori (linee rosse)

➔ Completa accettanza per I neutroni

➔ Perdita di protoni (~20%) lungo la linea di fascio

La risoluzione energetica richiesta ~ 10%

Principio di funzionamento

Calorimetro a campionamento basato sulla rivelazione della luce Cherenkov prodotta dalle particelle dello sciame in fibre di quarzo

- Alta resistenza alle radiazioni
  testato con successo nell'esperimento NA50 in un ambiente 10 volte piu' radiattivo di quello previsto in ALICE

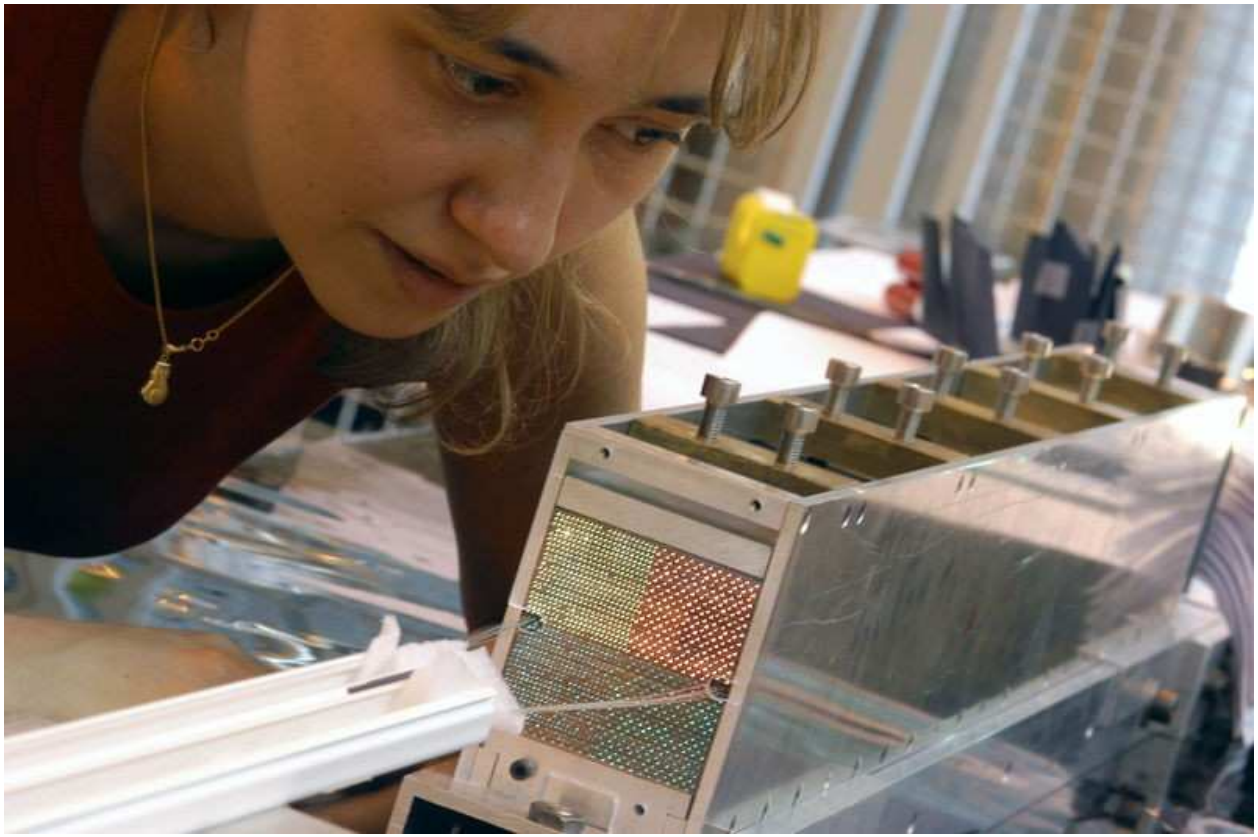
- Risposta veloce
  i segnali hanno una durata di ~10 ns

- Taglia laterale dello sciame limitata
  solo la parte centrale dello sciame contribuisce al segnale Cerenkov

Rivelatori compatti, veloci e resistenti alle radiazioni

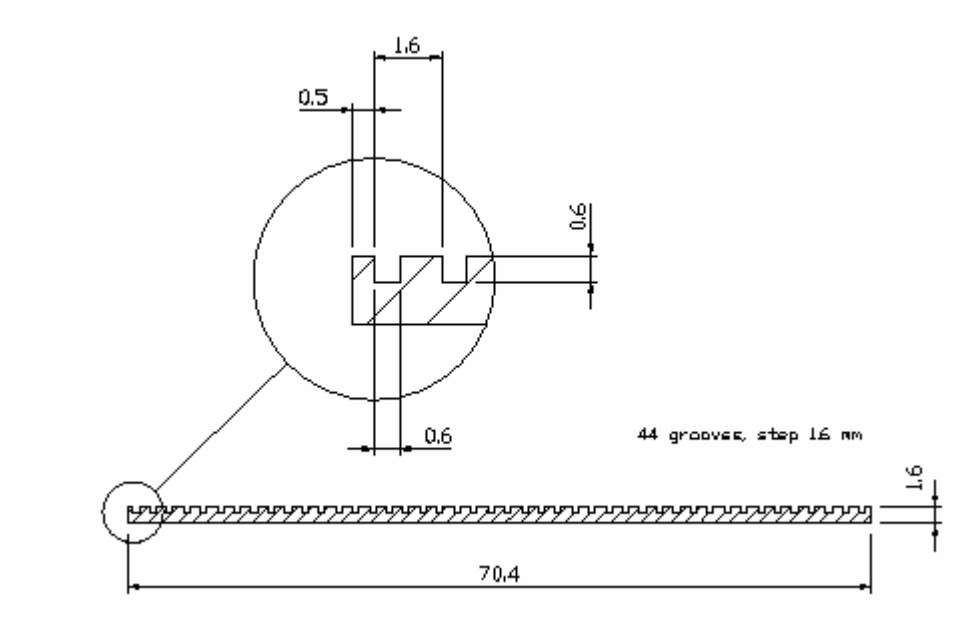
I calorimetri ZDC di ALICE

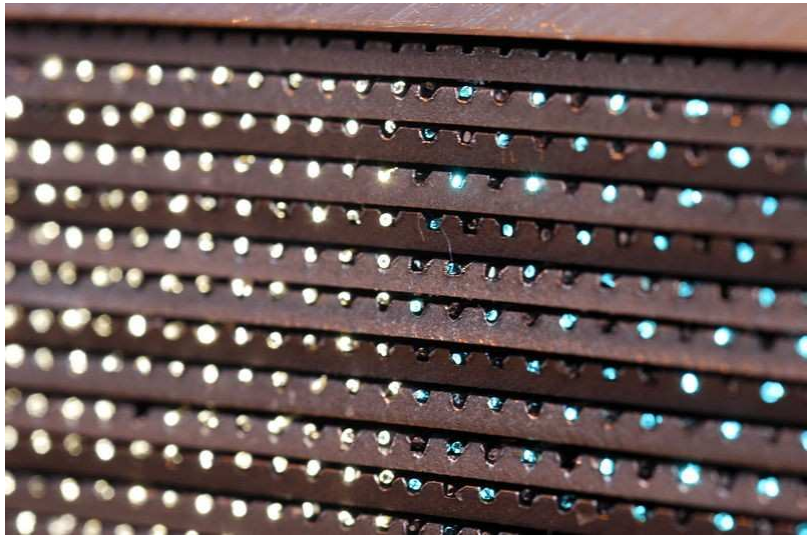
I calorimetri per neutroni (ZN) sono gia' stati costruiti
quelli per protoni sono in costruzione



ZN

ALICE ZN : descrizione del rivelatore (1)





Materiale passivo : lega di tungsteno

93.5 % W, 6.5% Ni-Fe, ρ = 17.6 g/cm3

44 lastre scanalate, di spessore 1.6 mm ,

Impilate a formare un parallelepipedo didimensioni 7x7x100 cm^3.

Materiale attivo : fibre di quarzo

raggio esterno : 430 μm con apertura numerica 0.22

In tutto ci sono 44 x 44 = 1936 fibre di quarzo

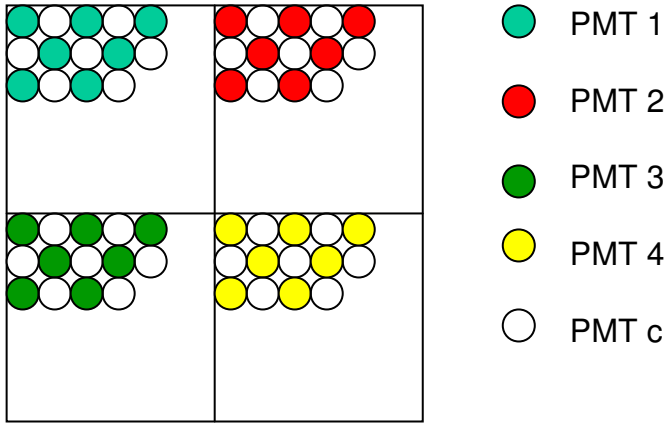
La distanza tra le fibre e' 1.6 mm

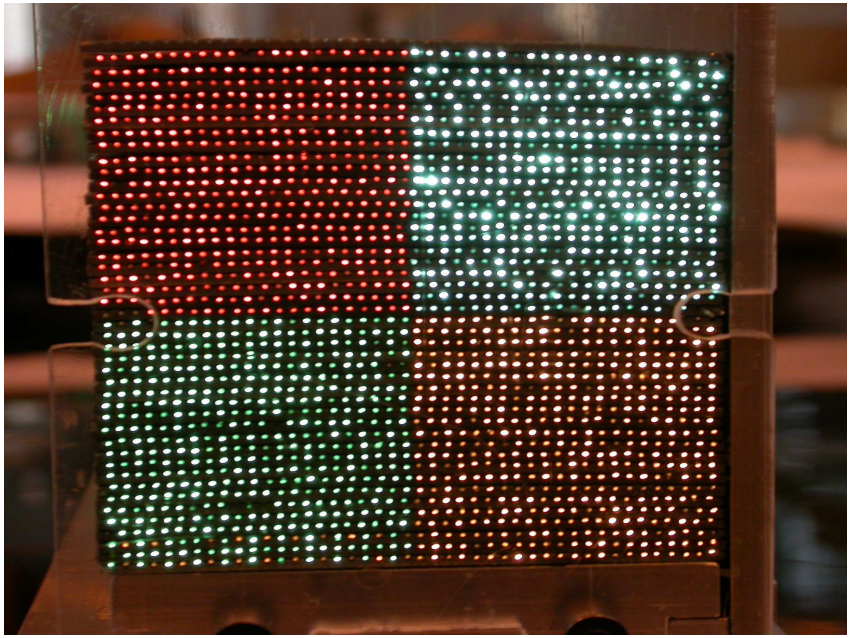
Il rapporto tra il volume attivo e il volume dell'assorbitore e' **1/22**

Le fibre sono poste a 0° rispetto alla direzione delle particelle incidenti ed escono dalla faccia posteriore.

ALICE ZN : descrizione del rivelatore (2)

Una fibra ogni due e' mandata ad un fotomoltiplicatore comune (PMTc), mentre le rimanenti sono connesse a 4 fotomoltiplicatori (PMT1 to PMT4), che raccolgono la luce proveniente da 4 torri.
I fotomoltiplicatori (Hamamatsu R-029) trasformano la luce in segnale elettrico.

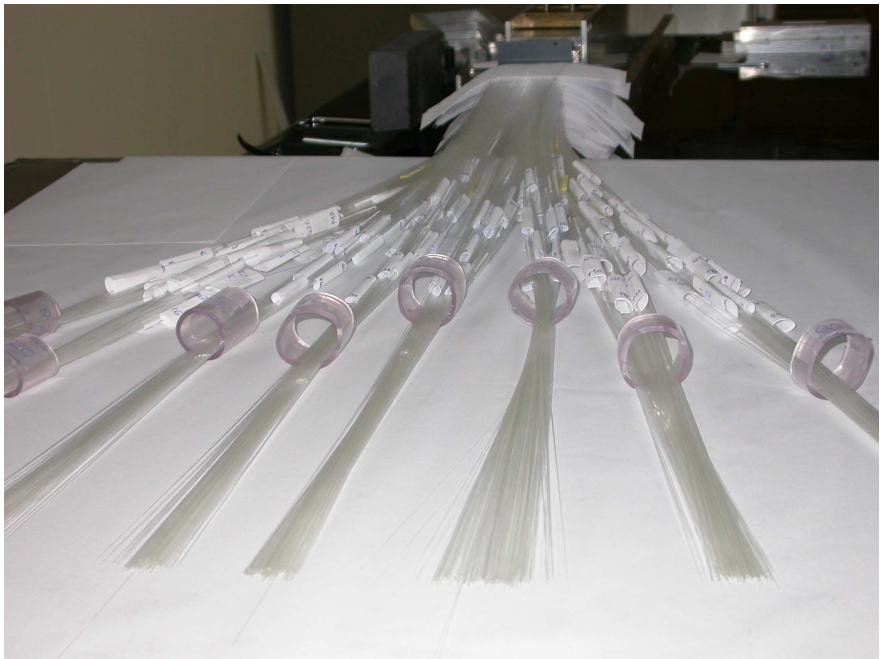


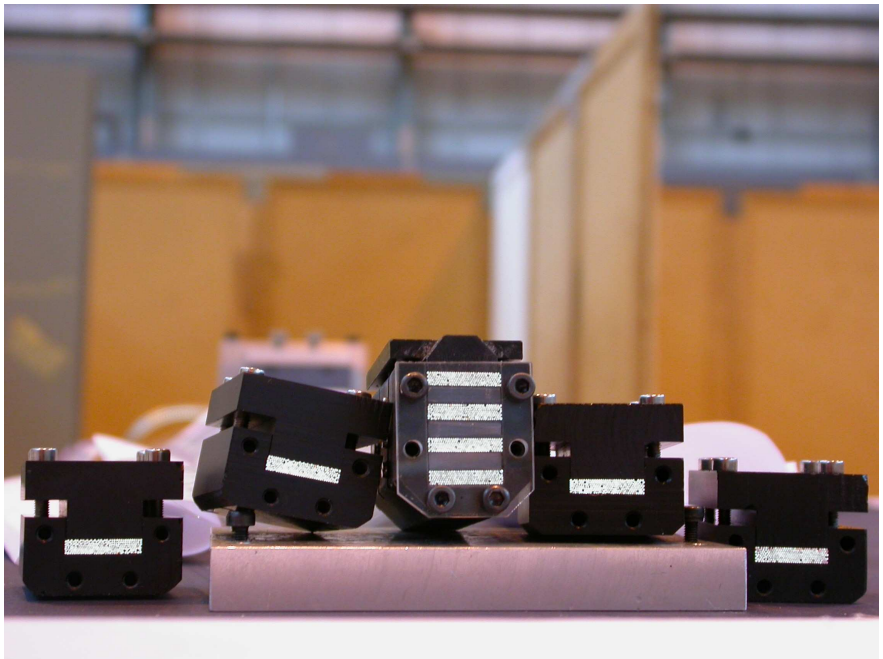


- questa disposizione permette una grossolana ricostruzione del punto dove e' arrivata la particella

Le fibre connesse a differenti PMTs sono illuminate con colori diversi.

ALICE ZN : descrizione del rivelatore (3)





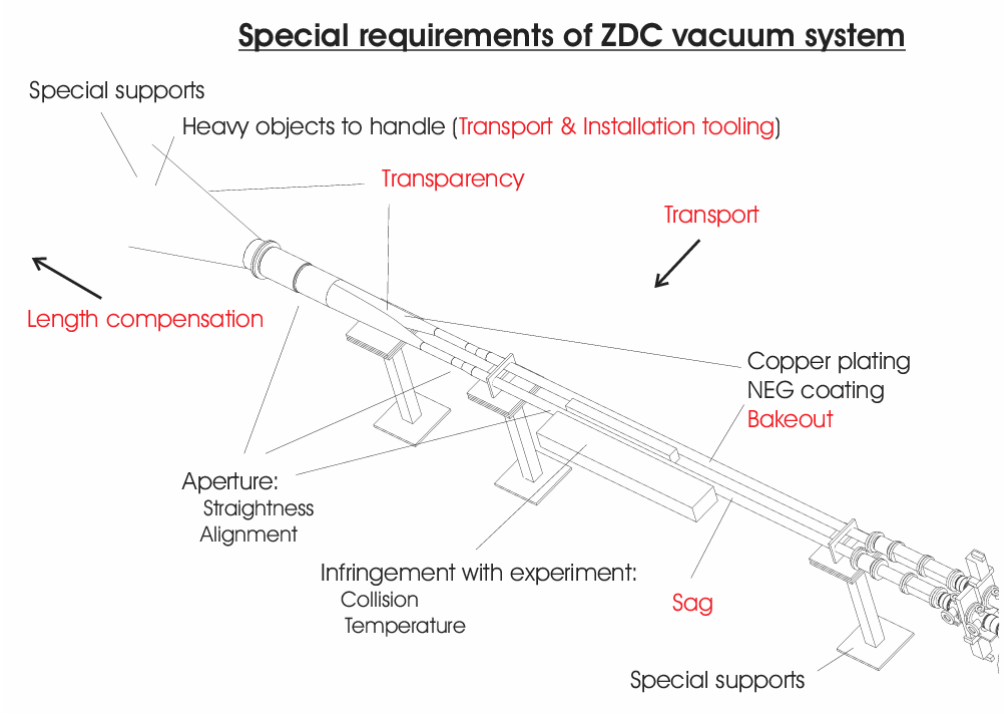
le fibre, le cui estremita' vengono lappate, escono dalla faccia posteriore del calorimetro, vengono divise in 8 mazzetti e sono raccolte in 5 scatolini che sono poi affacciati ai 5 fotomoltiplicatori

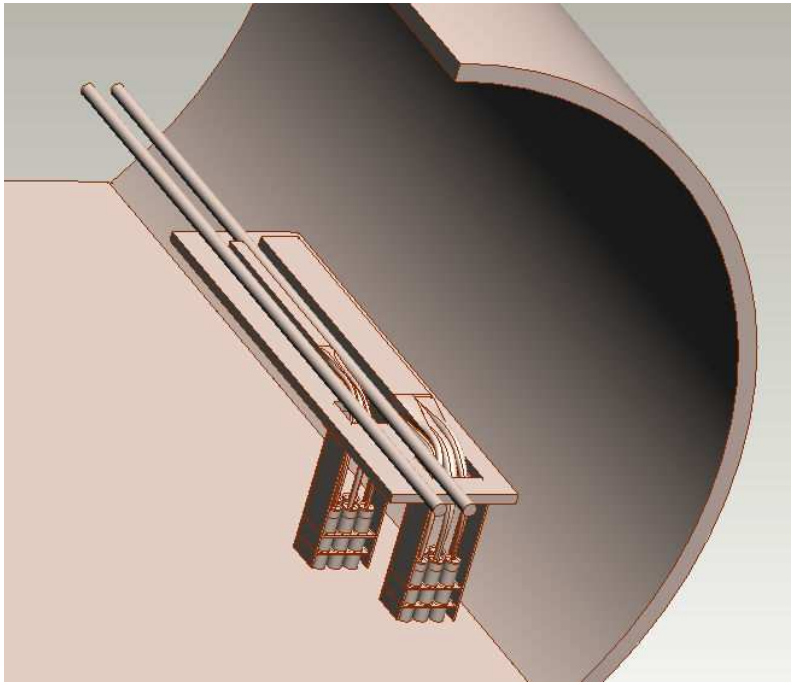
ALICE ZP : descrizione del rivelatore

- Posizione : esterna ai tubi di fascio
  - Meno vincoli geometrici, spot dei protoni spettatori piu' grande
- Materiale meno denso : ottone (Cu-Zn)
  - Sviluppo longitudinale e trasversale dello sciame piu' grande
  - dimensioni piu' grandi (224 x 120 x 1500 mm^3)

- Fibre di diametro piu' grande (diametro esterno 630 μm)
- Distanza tra le fibre (4 mm) uguale allo spessore delle lastre di ottone
- Analoga segmentazione
  - 4 torri questa volte affiancate (5 fotomoltiplicatori)
- Uguale modalita' di assemblaggio

Integrazione ZDC nel tunnel LHC





Un problema ancora da affrontare e' l'integrazione dello ZDC tra i tubi del fascio nel tunnel LHC