

Particle Detectors

Lecture 21-

bis

01/06/18

a.a. 2017-2018

Emanuele Fiandrini

Energy Measurement (Calorimetry)

Why measure energy ?

I) Not always practical to measure momentum.

An important contribution to *momentum resolution* is proportional to the *momentum*.

Example: suppose we want to measure the momentum of a charged particle such that we can tell whether it is positively or negatively charged (to within 3σ).

We demand: $\sigma_p/p < 0.33$

From previous notes, we found for measuring trajectory in a wire chamber (e.g. drift chamber)

$$\frac{\sigma_{p_\perp}}{p_\perp} = \sqrt{\frac{720}{n+4}} \frac{\sigma p_\perp}{(0.3BL^2)} \text{ (m, GeV/c, T)}$$

Use BaBar or CDF-like parameters: $B=1\text{ T}$, $L=1\text{ m}$, $n=100$, $\sigma=150\mu\text{m}$ and find the max measurable p_\perp :

$$p_\perp = (0.33) \sqrt{\frac{n+4}{720}} \frac{(0.3BL^2)}{\sigma} = (0.33) \sqrt{\frac{104}{720}} \frac{(0.3)(1)(1^2)}{1.5 \times 10^{-4}} = 2.5 \times 10^2 \text{ GeV/c}$$

Thus above $\approx 250 \text{ GeV/c}$ we can't reliably measure the charge of the particle at the 3σ level.

⌚ There are practical limits on the values of B , L , σ , n , etc.

II) Some interesting particles do not have electrical charge.

Momentum measurement using B-field only works for charged particles.

What about photons, π^0 's and η 's (both decay to $\gamma\gamma$), K_L 's, neutrons, etc ?

In these cases, it is necessary to measure the particle energy, by absorbing it in some medium

Calorimetria

La misura del momento p e' limitata dal fatto che la misura deve essere non distruttiva, cioe' non deve alterare le grandezze cinematiche proprie della particella che attraversa il rivelatore (es. uno spettrometro magnetico).

Se si rilascia questo vincolo, si puo' misurare l'energia della particella tramite assorbimento completo in un mezzo opportuno. In tal caso si parla di calorimetria.

Il **calorimetro** non è altro che un **blocco di materiale** strumentato che risponde in maniera proporzionale all'energia depositata dalla 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**, **μ** 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 → e' piazzato a valle di tutti i rivelatori in cui la particella perde solo una frazione piccola della sua energia (es. tracciatori, sistemi TOF, rivelatori a cherenkov e TRD → sta alle estremita' di (quasi) degli apparati sperimentali).

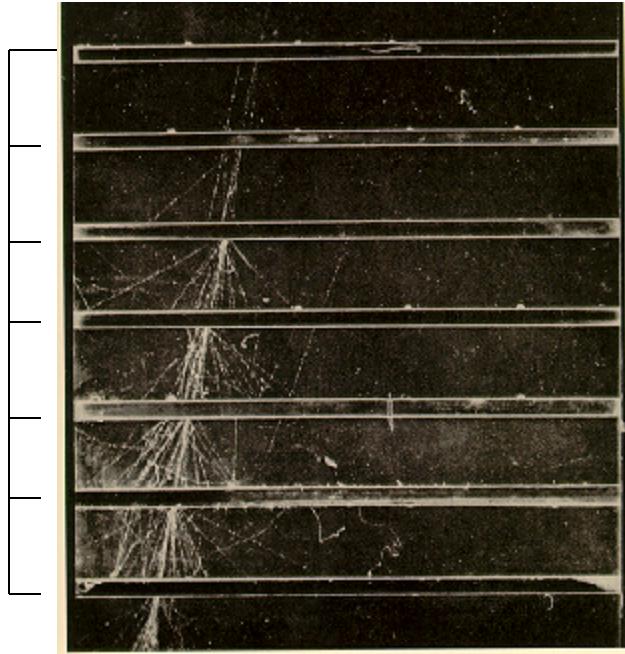
Energy Deposition and Showering

The key to calorimetry is the showering process.

In a shower the original particle interacts with the passive material creating many lower energy particles.

The low energy particles deposit energy (via ionization) in the active material.

The amount of ionization (or light) is proportional to the amount of energy deposited in the calorimeter.



Lead plates

Cloud chamber photo of an electromagnetic shower. A high energy electron initiates the shower. The electron radiates photons via bremsstrahlung when it goes through the first lead plate. The photons are converted to electrons and positrons by the lead and they in turn create new photons. This process continues until the photons are no longer energetic enough to undergo pair production.

Calorimetria

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

Sciami elettromagnetici → calorimetri elettromagnetici
Sciami adronici → calorimetri adronici

Le interazioni e.m. iniziate da e^\pm e γ sono molto diverse da quelle iniziate da adroni (cfr. sciami). Entrambe le interazioni producono particelle secondarie che perdono energia sciamando, 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) $\sim(1\div2\%)/E^{1/2}$, quelli adronici non avranno mai una risoluzione migliore del $\sim(35\%)/E^{1/2}$.

Sciame elettromagnetici

Al di sopra di **1 GeV** elettroni e fotoni interagiscono con la materia essenzialmente tramite bremsstrahlung (elettrone) e produzione di coppie (fotone). Questi processi creano γ ed **e** secondari che a loro volta interagiscono. Si crea così uno sciame di particelle secondarie fino al momento in cui l'energia di tali particelle è tale che il processo di interazione dominante diventa la perdita di energia per ionizzazione (Bethe Block).

L'energia alla quale la perdita di energia per radiazione (bremss.) e per collisione (Bethe-Block) sono uguali è chiamata energia critica E_c :

- per elettroni incidenti in liquidi o solidi $E_c = 610/(Z+1.24)$ MeV.
- per elettroni incidenti in gas $E_c = 710/(Z+0.92)$ MeV

Un elettrone incidente nella materia perde energia per bremss. come

$$dE/dx = -E/X_0$$

Dove X_0 è la lunghezza di radiazione definita come la distanza media in cui un elettrone rimane con un'energia pari ad $1/e$ la sua energia iniziale. X_0 può essere approssimata da:

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

Dove Z ed A sono il numero atomico ed il peso atomico del materiale.

Electromagnetic Shower Development

A simple shower model

Two dimensionless variables: $t=x/X_0$ and $y=E/E_c$ govern shower development

Shower development:

Start with an electron with $E_0 \gg E_c$

→ After $1X_0$: 1 e^- and 1 γ , each with $E_0/2$

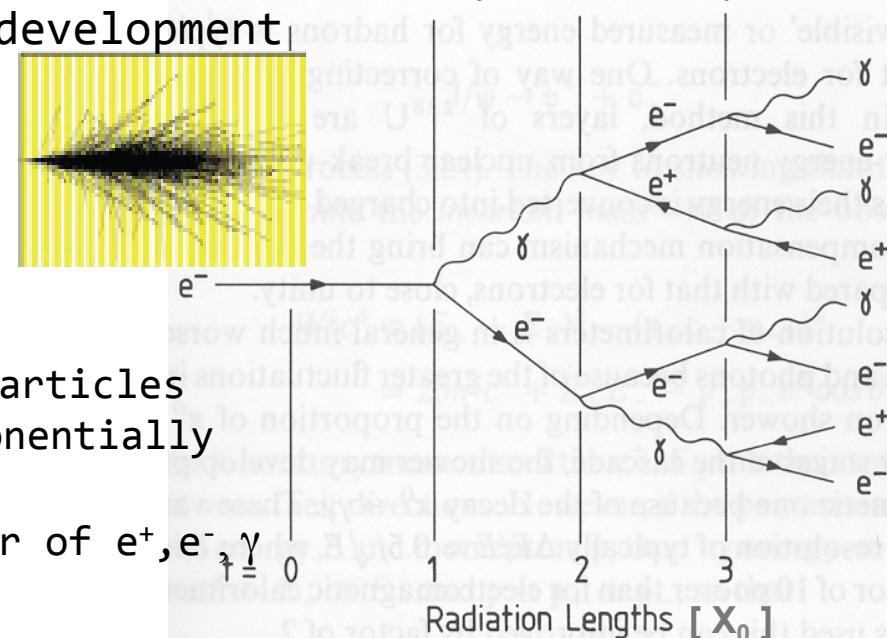
→ After $2X_0$: 2 e^- , 1 e^+ and 1 γ , each with $E_0/4$

$$N(t) = 2^t = e^{t \ln 2}$$

$$E(t) = E_0 / 2^t$$

→ After tX_0 :

→ Number of particles increases exponentially with t
 → equal number of e^+ , e^- , γ



$$t(E') = \frac{\ln(E_0/E')}{\ln 2}$$

$$N(E > E') = \frac{1}{\ln 2} \frac{E_0}{E'}$$

→ Depth at which the energy of a shower particle equals some value E'

→ Number of particles in the shower with energy $> E'$

Maximum number of particles reached at $E = E_c$

E_c is the critical energy →

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

$$N_{\max} = e^{t_{\max} \ln 2} = E_0/E_c$$

When the particle $E < E_c$, absorption processes like ionisation for electrons and Compton and photoelectric effects for photons start to dominate.

Sciame elettromagnetici

Per un fotone parametro importante è il cammino libero medio X_γ , ovvero la distanza media che un fotone percorre prima di convertire in una coppia elettrone-positrone, cioè la distanza media dopo la quale un fascio N_0 di γ si è ridotto ad $1/e$ il suo valore iniziale. Si ha:

$$X_\gamma = \frac{9}{7} X_0$$

Siccome X_0 e X_γ sono quasi uguali significa che possiamo parametrizzare in maniera semplice lo sviluppo di uno sciame elettromagnetico.

Sviluppo longitudinale dello sciame

$$\frac{dE}{dt} \propto t^\alpha e^{-t}$$

$$t = x/x_0$$

Massimo dello sciame

$$t_{\max} = \ln \frac{E_0}{E_c} \frac{1}{\ln 2}$$

Contenimento longitudinale

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

Le dimensioni longitudinali dello sciame crescono solo logaritmicamente con E_0

Lo sviluppo trasversale dello sciame non è tanto dovuto agli angoli di emissione di γ od e^\pm (entrambi molto piccoli) quanto allo scattering multiplo. 95% dello sciame è in un cilindro di raggio $2R_M$. (raggio di Moliere)

$$R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \left[\text{gr/cm}^2 \right]$$

Sciami elettromagnetici

La somma di tutti i segmenti di traccia che emergono dalla cascata elettromagnetica può essere considerata la lunghezza di traccia totale ed è data da:

$$T = N_{\max} X_0 = X_0 E_0 / E_c$$

In ogni calorimetro realistico esiste un'energia di taglio (cutoff) E_{cut} al di sotto della quale l'apparato non è più sensibile ai segmenti di traccia \rightarrow possiamo definire una lunghezza di traccia misurabile:

$$T_d = F(\xi)T = F(\xi)X_0 \frac{E_0}{E_c} \quad \text{con } \xi \text{ proporzionale a } \frac{E_{\text{cut}}}{E_c}$$

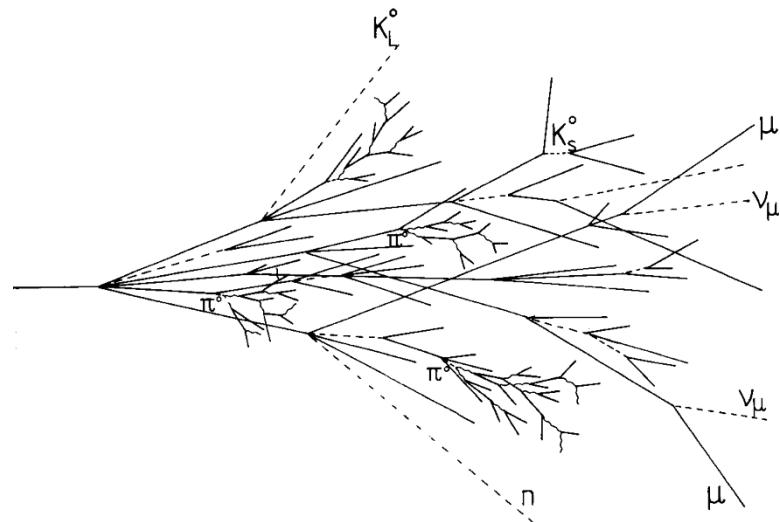
Cioè la lunghezza di traccia misurabile è proporzionale ad E_0 . Il calorimetro ideale da una risposta proporzionale all'energia incidente e le fluttuazioni della lunghezza di traccia misurabile determinano la risoluzione intrinseca del calorimetro.

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{\sigma(T)}{T}$$

Sciami adronici

Molti processi coinvolti → molto più complicate che gli sciami e.m.

$P_T \sim 350 \text{ MeV}$ → sciami adronici molto più larghi di quelli e.m. (95% in un cilindro di raggio λ_l)



Interazioni nucleari (forti)

In analogia alla lunghezza di interazione elettromagnetica possiamo definire una lunghezza di assorbimento -per reazioni anelastiche-

$$\lambda_a = A / (N_a \sigma_{inel})$$

Ed una lunghezza di interazione totale che comprende anche quelle elastiche

$$\lambda_t = A / (N_a \sigma_{total})$$

NB: e' tutto espresso in g/cm²

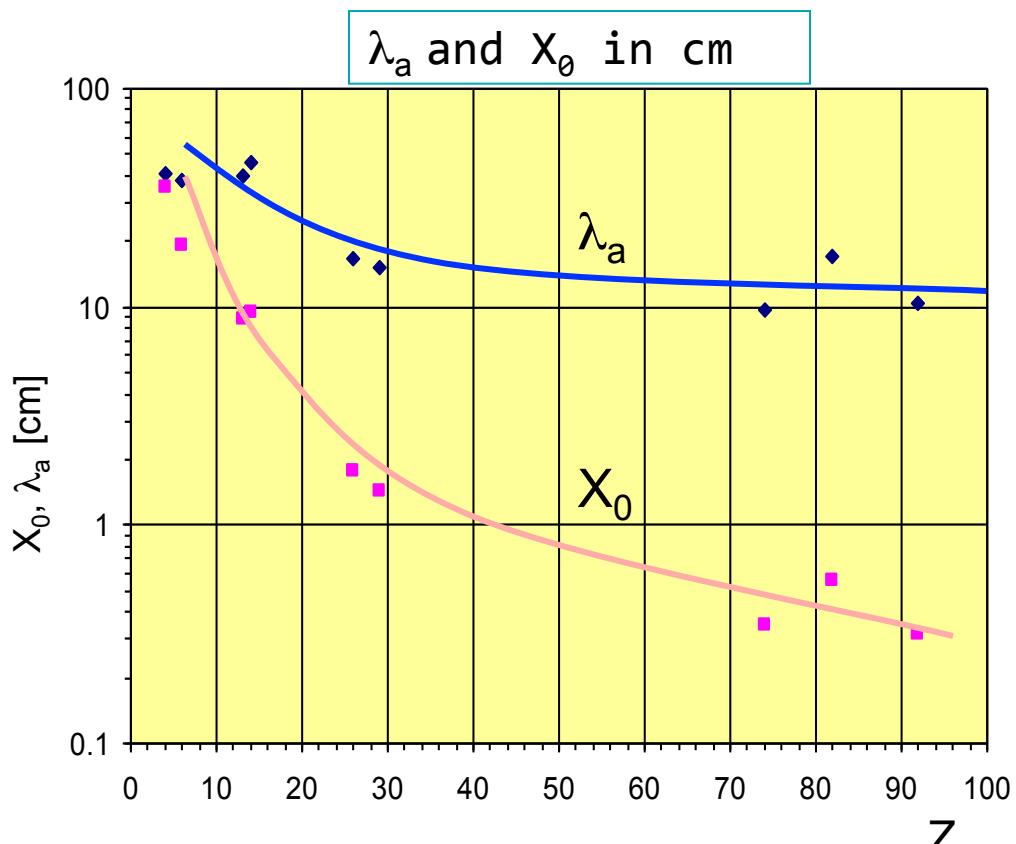
Ad alte energie (>qualche GeV) la sezione d'urto anelastica dipende poco dall'energia e dal tipo di particella incidente (p, π , K...) e domina il processo

$$\sigma_{inel} \approx \sigma_0 A^{2/3} \text{ con } \sigma_0 \approx 35 \text{ mb sez. d'urto pp}$$

$$\text{Quindi } \lambda_a = A^{1/3} / N_A \sigma_0$$

Interazioni nucleari (forti)

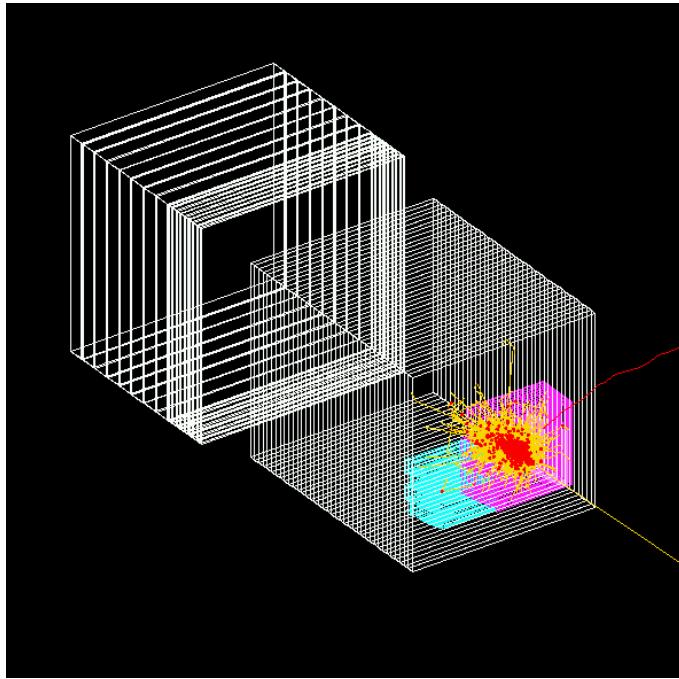
Per $Z > 6$ $\lambda_a > X_0$



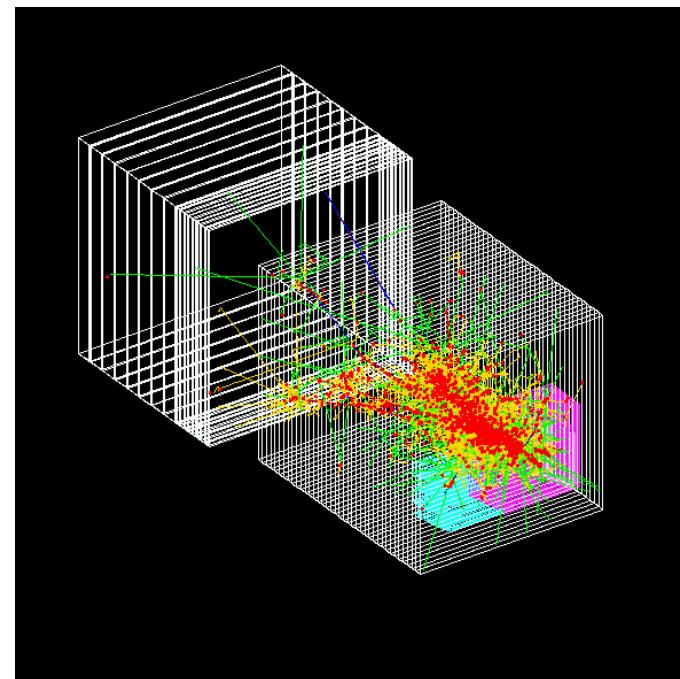
Le due grandezze sono quelle che fissano le dimensioni degli sciami: quelli adronici sono piu' "grandi" di quelli elettromagnetici

Comparison Elm Shower - Hadronic Shower

elm. Shower



hadronic Shower

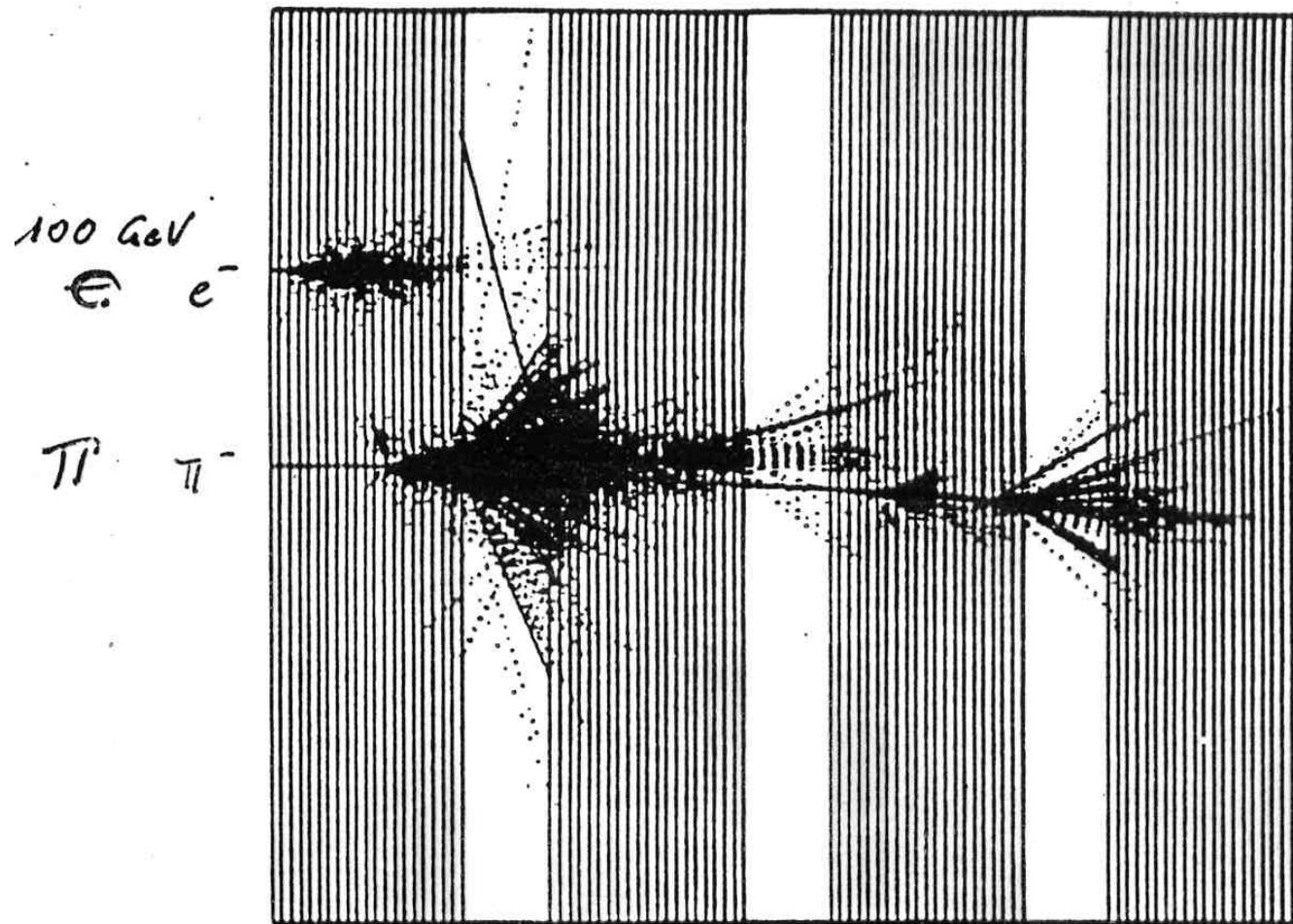


Characterized by $X_0 \propto \frac{A}{Z^2}$
 Radiation Length:

$$\frac{\lambda_{\text{int}}}{X_0} = \frac{A^{1/3}Z^2}{A} \propto \frac{Z^2}{A^{2/3}} = \left(\frac{Z}{A}\right)^{2/3} Z^{4/3} \Rightarrow$$

Characterized by **Interaction Length:**
 $\lambda_{\text{int}} \approx \frac{A}{N_A \sigma_0 A^{2/3}} \propto A^{1/3}$

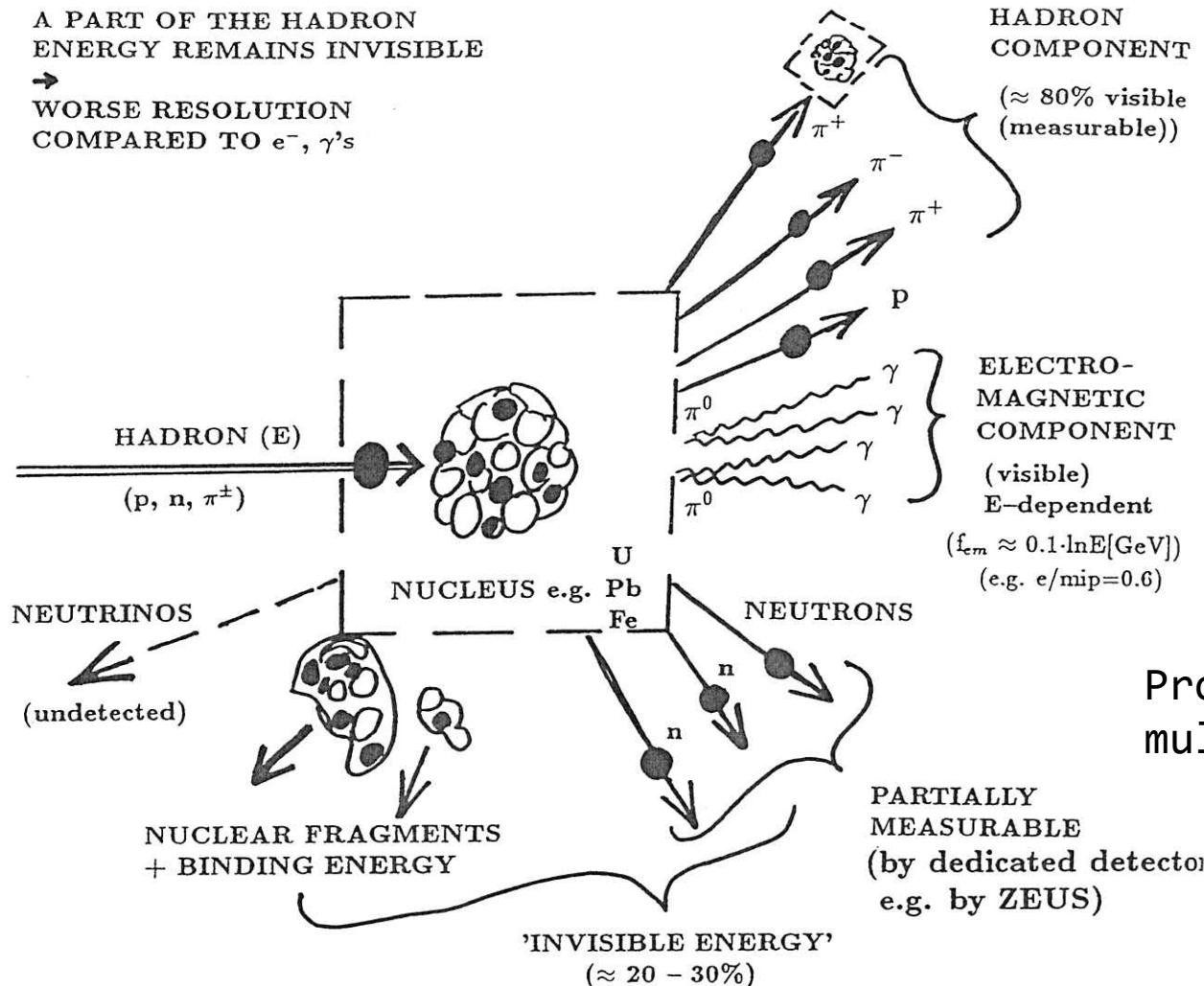
Comparison of Hadronic & Electromagnetic Showers



Hadronic Showers

'ELEMENTARY PROCESS' IN A HADRON SHOWER

A PART OF THE HADRON ENERGY REMAINS INVISIBLE
 → WORSE RESOLUTION COMPARED TO e^- , γ 's



La produzione di particelle e' determinata da processi nucleari anelastici.

Produced particle multiplicity $\propto \ln(E)$

$$p_t \approx 0.35 \text{ GeV/c}$$

Fig. 3.6 'Elementary physical process' in a hadron shower.

Interazioni nucleari (forti)

Nello sviluppo dello sciame sono presenti due componenti:

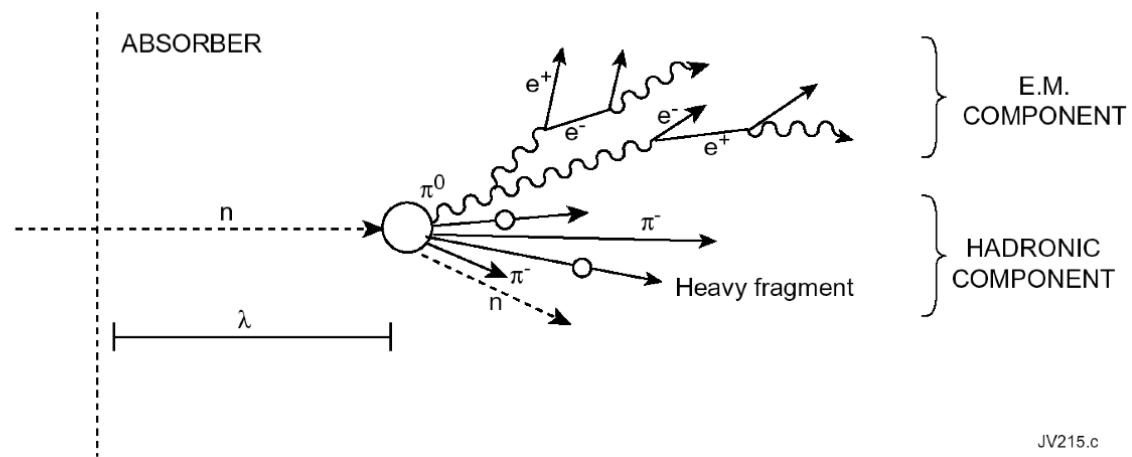
Adronica

+

Componente e.m.

↓
charged pions, protons, kaons
Breaking up of nuclei
(binding energy),
neutrons, neutrinos, soft γ 's
muons \rightarrow invisible energy

↓
neutral pions $\rightarrow 2\gamma \rightarrow$
electromagnetic cascade



Larghe fluttuazioni dell'energia \rightarrow risoluzione in energia limitata

16

Semi-empirical model of hadron shower development

$$\frac{dE}{dS} = E_{INC} \left\{ \frac{Cx^{(\alpha_E-1)}e^{-x}}{\Gamma(\alpha_E)} \right\} + E_{INC} (1-C) \left\{ \frac{y^{(\alpha_H-1)}e^{-y}}{\Gamma(\alpha_H)} \right\}$$

electromagnetic
part

hadronic part

$$x \equiv \beta_E \frac{(S - S_0)}{\chi_0}$$

radiation length

$$y \equiv \beta_H \frac{(S - S_0)}{\lambda}$$

interaction length

$$\alpha_H = \alpha_E = 0.62 + 0.32 \ln E$$

$$\beta_H = 0.91 - 0.02 \ln E$$

$$\beta_E = 0.22$$

$$C = 0.46$$

$S_0 \neq 0$ - significant amount of material in front of calorimeter
(magnet coil etc.)

The processes are complex and a simple calculation is not possible.
Monte Carlo based simulations yield empirical relation for the longitudinal and transverse shower development

More Rules of Thumb for the Hobbyist

- Shower maximum

$$t_{\max}(\lambda) \sim 0.2 \ln E(GeV) + 0.7$$

- 95% Longitudinal containment

$$L_{95\%}(\lambda) \sim t_{\max} + 2.5 \lambda_{ATT}$$

$$\lambda_{ATT} \approx \lambda [E(GeV)]^{0.13}$$

- 95% Lateral containment

$$R_{95\%} \sim 1\lambda$$

- Mixtures in sampling calorimeters
active + passive material

$$\frac{1}{\chi_{eff}} = \sum_i \frac{f_i}{\chi_0^i}$$

$$f_{act} = \frac{m_{act}}{m_{act} + m_{pass}}$$

$$\frac{\epsilon_{eff}^{crit}}{\chi_{eff}} = \sum_i f_i \frac{\epsilon_i^{crit}}{\chi_0^i}$$

$$\frac{E_{vis}}{E_{inc}} = f_{act} \frac{\epsilon_{act}^{crit} / \chi_0^{act}}{\epsilon_{eff}^{crit} / \chi_{eff}}$$

Compensazione

Il concetto di compensazione:

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

$$R_h = \varepsilon_h E_h + \varepsilon_e E_e \quad \text{risposta allo sciamo adronico}$$

ε_h : efficienza per adroni

ε_e : efficienza per elettroni

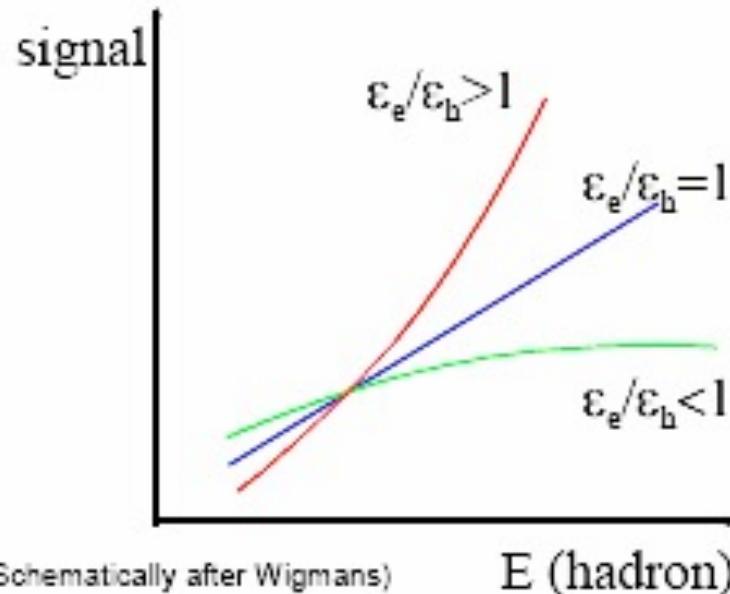
La frazione di energia depositata adronicamente dipende dall'energia:

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

La risposta del calorimetro agli sciami adronici diventa non lineare.

Compensazione

La risposta del calorimetro agli sciami adronici diventa non lineare:



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)

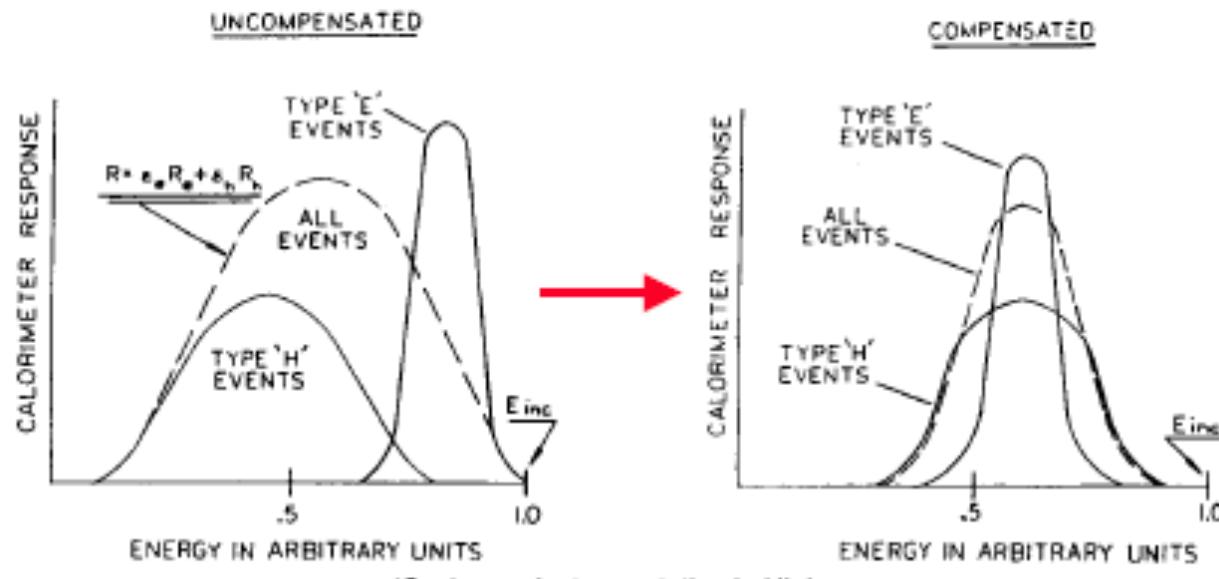
Compensazione

Come si può ottenere la compensazione?

- ◆ Aumentare ε_h
 - Usare assorbiti di Uranio → tramite fissione si amplifica la componente di neutroni e γ di bassa energia + usare rivelatori con idrogeno → alta efficienza per rivelare n
- ◆ Diminuire ε_e
 - Combinare assorbiti ad alto Z con rivelatori a basso Z. Si sopprime la rivelazione di γ di bassa energia.
- ◆ Compensazione offline
 - Richiede la conoscenza dettagliata dello sviluppo dello sciame → correzione evento per evento

Compensazione

Si noti che l'energia misurata e' sistematicamente minore di 1. Senza compensazione la risposta globale del calorimetro dipende fortemente dalla componente adronica ed elm. La media misurata "all events" si sposta a dx o sx a seconda del peso delle due componenti \rightarrow risposta non uniforme a particelle con la stessa energia!



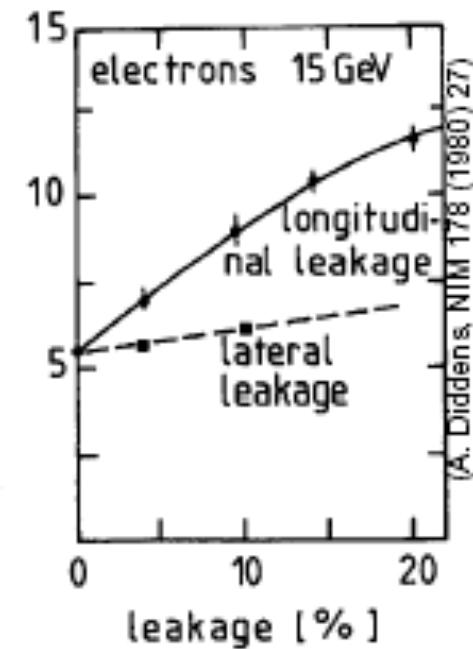
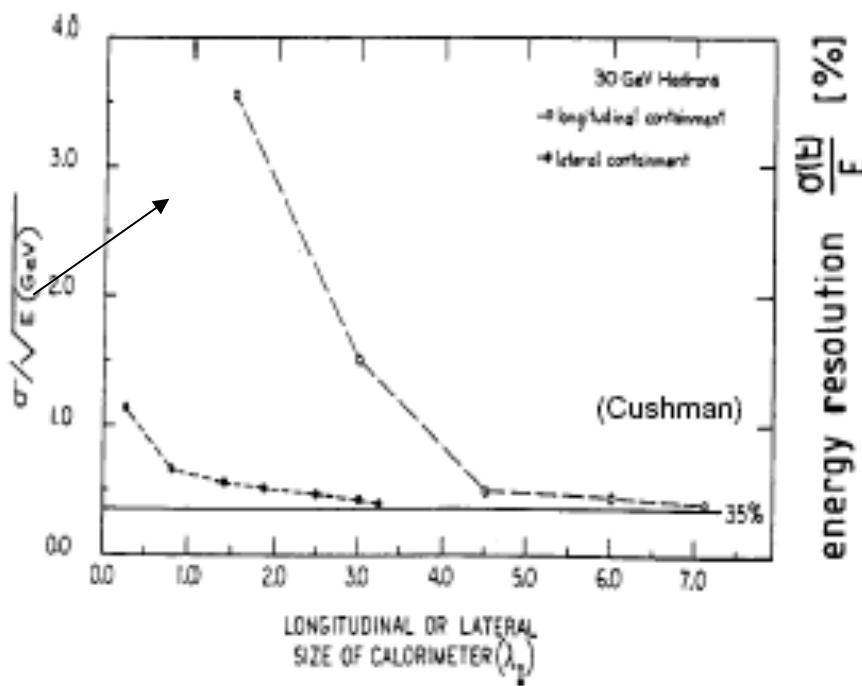
(Cushman, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific, 1992))

Perdite

Siccome un calorimetro non è infinito avremo anche delle perdite di energia. Le perdite **longitudinali** sono **più importanti** di quelle laterali (dovute alle fluttuazioni delle dimensioni trasverse dello sciame). La frazione di energia persa $f(E)$ dipende dall'energia. → peggiore risoluzione in energia:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{\sigma(E)}{E} \Big|_0 \cdot (1 + f(E) + 50f^2(E))$$

Adroni 30 GeV
o longitudinale
● trasversale



Energy Measurement (Calorimetry)

A calorimeter is used to measure the energy of a charged and/or neutral particle

The calorimeter should absorb all of the energy of an incident particle

Energy measurement by a calorimeter is a **DESTRUCTIVE** process.

Original particle no longer exists after the measurement.

Calorimeter usually located behind charged particle tracking chambers

MWPCs, drift chambers, silicon trackers are non-destructive measuring devices

The energy resolution of a calorimeter is determined by many factors:

Actual energy deposited in calorimeter (sampling fluctuations)

Leakage of energy out of the calorimeter

Noise (e.g. from electronics or pickup)

Ion or light collection efficiency

Usually, the dominant term in the energy resolution is due to sampling fluctuations

which are Poisson in nature. Thus this term in the energy resolution varies like:

$$\sigma_E / E = A / \sqrt{E} \quad A \text{ is a constant}$$

A more complete description of the energy resolution is:

$$\left(\frac{\sigma_E}{E} \right)^2 = \left(\frac{A}{\sqrt{E}} \right)^2 + \left(\frac{B}{E} \right)^2 + C^2 + (D \ln E)^2$$

B=contribution due to electronics (e.g. ADC resolution)

C=contribution due to calibration errors and other systematic effects

D=contribution due to energy leakage

Since C and D are usually small energy resolution **improves** as E increases. This is different than momentum resolution which gets worse as momentum increases.

Calorimetria

Le caratteristiche (**vantaggi**) principali di un calorimetro sono:

- ☺ La precisione della misura aumenta al crescere di E

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

rumore

termine costante

termine stocastico

- ☺ Le dimensioni di un calorimetro necessarie a contenere lo sciame 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)

(*) Ricorda: $L_{\max} \approx \ln(E_0)$

Calorimetry

Calorimeter information can also be used to:

- identify particles (e.g. γ 's, e 's)
- measure space coordinates of particles (no B-field necessary)
- form a “trigger” to signal an interesting event
- eliminate background events (e.g. cosmic rays, beam spill)
- can be optimized to measure electromagnetic or hadronic energy

Calorimeter usually divided into active and passive parts:

- Active: responsible for generation of signal (e.g. ionization, light)
- Passive: responsible for creating the “shower”

Many choices for the “active” material in a calorimeter:

- inorganic crystals (CsI used by CLEO, BELLE, BABAR)
- organic crystals (anthracene) {mainly used a reference for light output}
- plastic scintillator (ZEUS, CDF)
- liquid scintillator (used by miniBoone)
- Noble liquids (liquid argon used by D0, ATLAS)
- gas (similar gases as used by wire proportional chambers)
- glass (leaded or doped with scintillator)
- water (SuperK)
- silicon (Fermi)

Many choices for the “passive” material in a calorimeter:

- high density stuff: marble, iron, steel, lead, depleted uranium
- lower(er) density stuff: sand, ice, water

Calorimetria

I calorimetri si suddividono ulteriormente in:

- Calorimetri omogenei:

- ⇒ Rivelatore = assorbitore
- ⇒ Buona risoluzione in energia
- ⇒ Risoluzione spaziale limitata nella direzione longitudinale
- ⇒ Usati solo per calorimetria e.m.

- 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

Calorimetri omogenei

Sono costituiti da un blocco di materiale sensibile alle particelle cariche dello sciame. Usati solamente per calorimetri e.m.

Il materiale usato può essere [scintillatore](#) o [radiatore Cerenkov](#).

La lettura del segnale è normalmente ottenuta con [fotomoltiplicatori](#) o [diodi/triodi](#).

Se il numero di [fotoelettroni](#) è piccolo il contributo delle fluttuazioni statistiche:

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E} \right)_{p.e.} = \sqrt{\frac{(1 + g^{-1})}{\langle n_{p.e.} \rangle}}$$

g = guadagno del PM → fluttuazioni al dinodo

può contribuire parecchio alla risoluzione in energia.

Notiamo che per PM con guadagni $g \sim 10^5$ possiamo trascurare il termine g^{-1} , ma per diodi e/o triodi con $g = 1 \div 10$ → questo termine contribuisce al degrado della risoluzione in energia.

Calorimetri

◆ Radiatori Cerenkov

Material	Density [g/cm ³]	X ₀ [cm]	n	Light yield [p.e./GeV] (rel. p.e.)	λ _{cut} [nm]	Rad. Dam. [Gy]	Comments
SF-5 Lead glass	4.08	2.54	1.67	600 (1.5×10^{-4})	350	10^2	
SF-6 Lead glass	5.20	1.69	1.81	900 (2.3×10^{-4})	350	10^2	
PbF ₂	7.66	0.95	1.82	2000 (5×10^{-4})		10^3	Not available in quantity

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

Calorimetri omogenei

◆ Radiatori Cerenkov

Il **vetro-piombo** (lead glass) è il materiale più usato sia per la buona risoluzione che per il prezzo abbordabile.

Ricordiamo:

$$\frac{dN_\gamma}{dx} = 2\pi^2 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \cdot \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

La dipendenza λ^{-2} significa che l'emissione è concentrata a piccole lunghezze d'onda → poca luce perché il vetro-piombo assorbe a piccole lunghezze d'onda ($\lambda=350$ nm è la soglia di assorbimento).

Regge poca radiazione (~ 10 Gy) (diventa giallo → si degrada a basse lunghezze d'onda). Se si droga con Cs → regge 10^4 Gy però meno luce alle λ corte.

Calorimetri omogenei

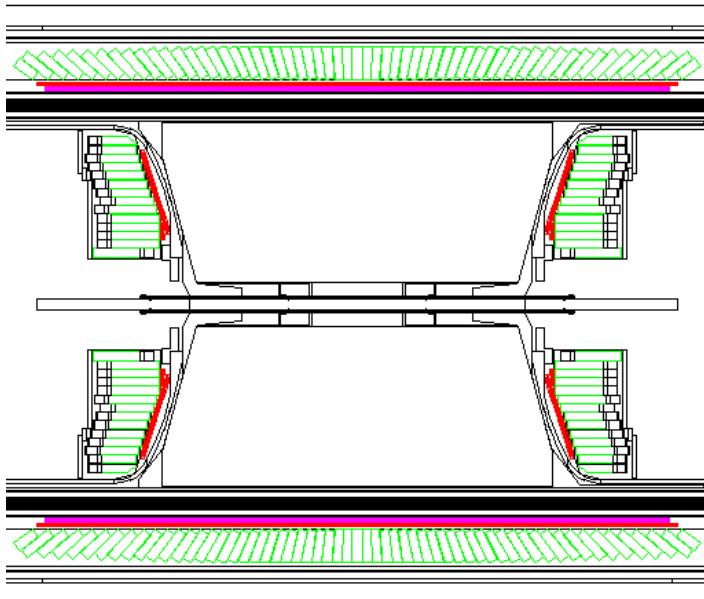
Accorgimenti per l'uso del vetro-piombo:

- 1) **Non usare guide di luce.** Infatti $n(\text{vetro-piombo}) \sim 1.7$, mentre le colle e le guide hanno n + basso → **si perde luce**.
Soluzioni: usare il vetro piombo stesso come guida oppure usare una guida costituita da tanti strati sottili che degradano fino a raggiungere l' indice di rifrazione della finestra del PM, o anche incollare direttamente il PM sul vetro-piombo con una colla ad alto n .
- 2) **Tenere la luce nel vetro-piombo** → ricoprire il vetro piombo con un materiale diffondente (e.g. Tyvek) → $n(\text{glass}):n(\text{air})=1.7:1$ → **tutta la luce con angoli d'incidenza > 36° viene riflessa totalmente**.
- 3) **L'assorbimento del vetro-piombo dipende dalla lunghezza d'onda** → siamo sensibili alle fluttuazioni longitudinali dello sciame. Sciami che si formano prima danno meno luce di sciami che si formano dopo → **compromesso sulla lunghezza del rivelatore (18÷20 X_0)**

Calorimetri omogenei

Esempio : OPAL Barrel +end-cap: vetro-piombo + pre-sampler

(OPAL collab. NIM A 305 (1991) 275)



≈10500 blocks (10 x 10 x 37 cm³, 24.6 X₀),
PM (barrel) or PT (end-cap) readout.

$$\sigma(E)/E = 0.06/\sqrt{E} \oplus 0.002$$

Spatial resolution
(intrinsic) ≈ 11 mm
at 6 GeV

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
- 😢 sono lenti (non è del tutto vero)
- 😢 meno luce di quelli organici

b. Organici

- 😢 minore linearità (Birk)
- 😊 sono veloci (almeno una componente)

Calorimetri omogenei

◆ Scintillatori (cristalli inorganici)

Scintillator	Density [g/cm ³]	X ₀ [cm]	Light Yield γ/MeV (rel. yield)	τ ₁ [ns]	λ ₁ [nm]	Rad. Dam. [Gy]	Comments
NaI (Tl)	3.67	2.59	4×10 ⁴	230	415	≥10	hydroscopic, fragile
CsI (Tl)	4.51	1.86	5×10 ⁴ (0.49)	1005	565	≥10	Slightly hygroscopic
CSI pure	4.51	1.86	4×10 ⁴ (0.04)	10 36	310 310	10 ³	Slightly hygroscopic
BaF ₂	4.87	2.03	10 ⁴ (0.13)	0.6 620	220 310	10 ⁵	
BGO	7.13	1.13	8×10 ³	300	480	10	
PbW ₀ ₄	8.28	0.89	≈100	10	≈440	10 ⁴	light yield =f(T)
				10	≈530		

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

Calorimetri omogenei

Promettente il PbWO_4 (CMS, Alice)

Parametro	valore
densità [g/cm ³]	8.28
lunghezza di radiazione [cm]	0.89
raggio di Moliere [cm]	2.0
punto di liquefazione [°C]	1123
conduttività [Moh]	4
indice di rifrazione ($\lambda=632$ nm) (birifrangente)	2.16
igroscopicità	nulla
attività chimica	inerte

Drogato con Nb è resistente alla radiazione.

Emette poca luce alla temperatura ambiente, ma rapida

Grosso indice di rifrazione
→ difficile il contatto ottico.

In CMS si leggerà con APD

Calorimetri omogenei

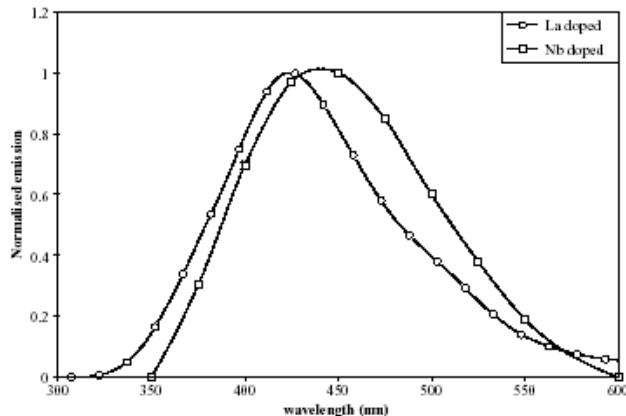


Fig. 2.1: Scintillation light spectrum of niobium- and lanthanum-doped PbWO₄.

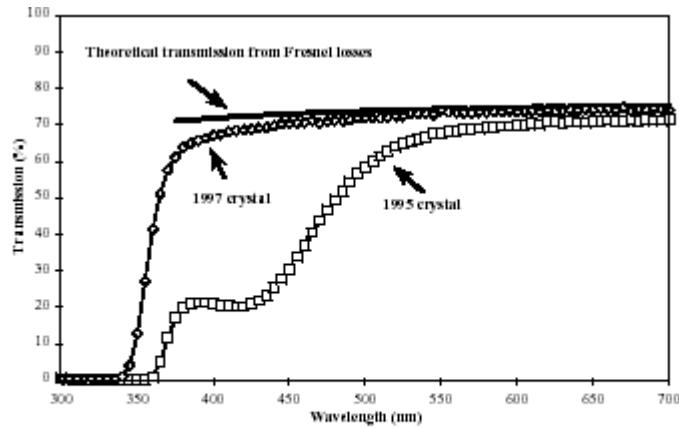


Fig. 2.2: Typical longitudinal transmissions for 23-cm-long PbWO₄ crystals produced in 1995 and 1997, compared to the maximum achievable transmission taking into account Fresnel losses and assuming infinite absorption length.

Spettro di emissione

Dipendenza dalla temperatura

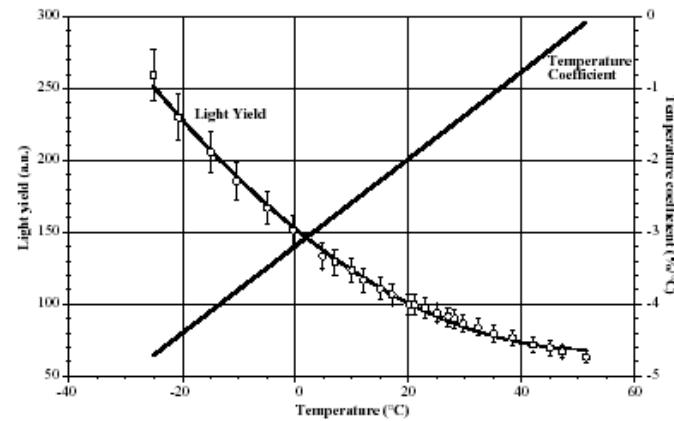


Fig. 2.4: Temperature dependence of PbWO₄ light yield (Ref. [2.4]).

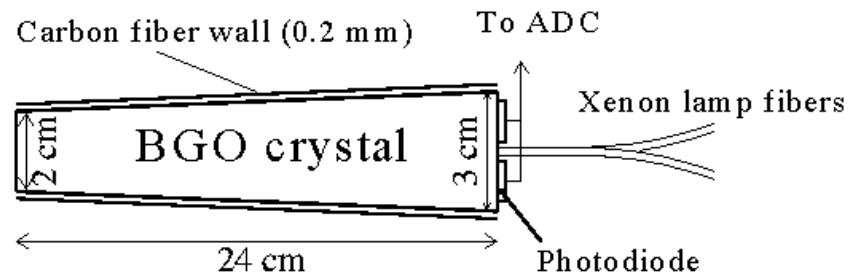
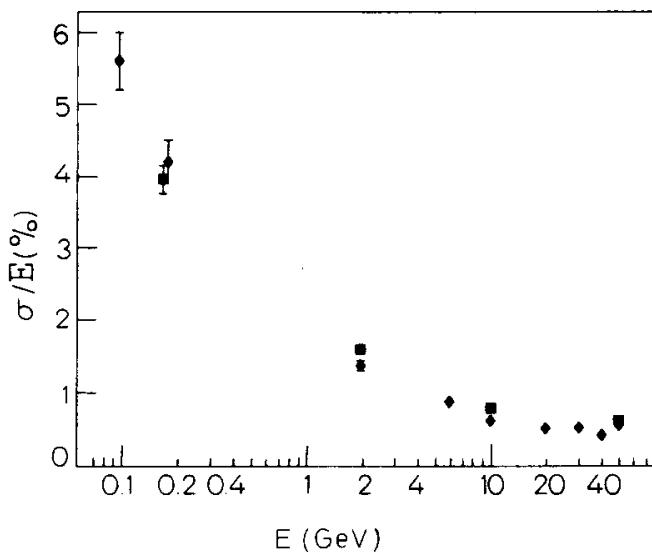
Spettro di assorbimento

Calorimetri omogenei

Esempio: Calorimetro e.m. a BGO di L3

(L3 collab. NIM A 289 (1991) 53)

11000 crystals, $21.4 X_0$,
temperature monitoring + control
system
light output $-1.55\% / ^\circ\text{C}$



$\sigma_E/E < 1\%$ for $E > 1\text{ GeV}$
spatial resolution $< 2\text{ mm}$
($E > 2\text{ GeV}$)

Partly test beam results !

Calorimetri a campionamento

Calorimetri a sampling (campionamento)

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

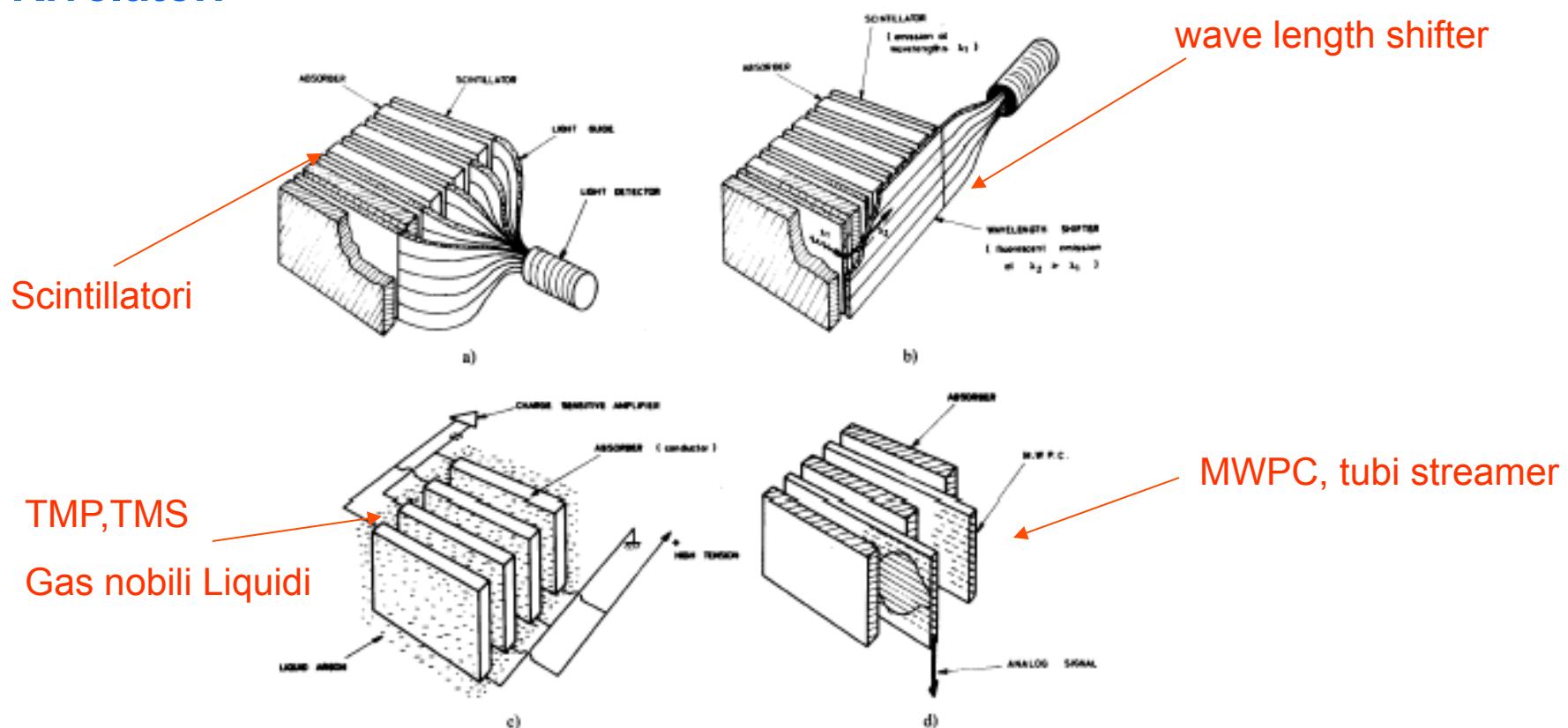
Costituiti da **assorbitore + rivelatore**

- **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)

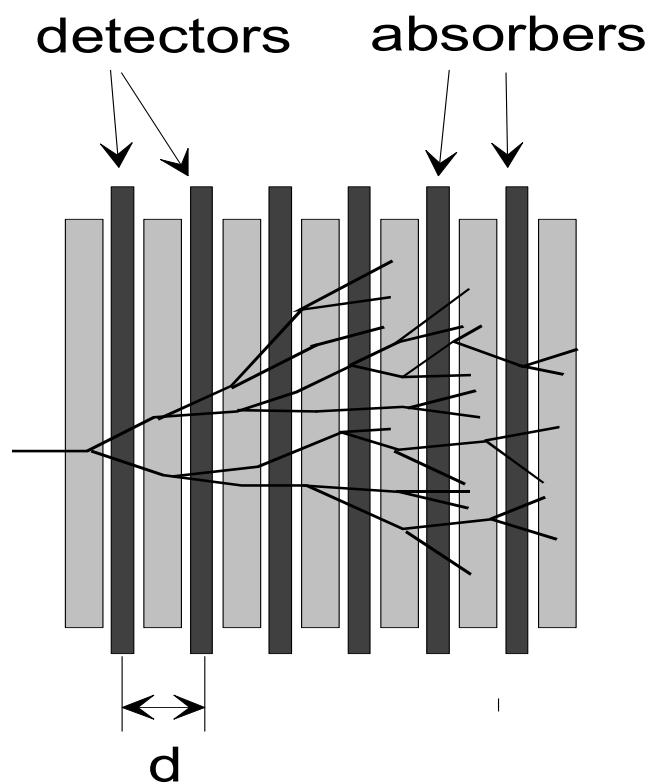
Calorimetri a campionamento

Rivelatori



Calorimetri a campionamento

Fluttuazioni di sampling



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

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

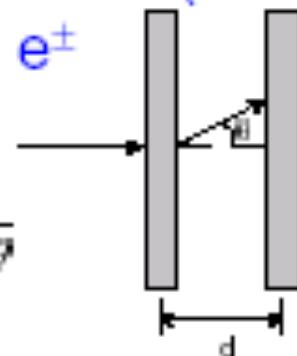
$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{\sqrt{N}}{N} \propto \sqrt{\frac{1}{E}} \cdot \sqrt{\frac{d}{X_0}}$$

Calorimetri a campionamento

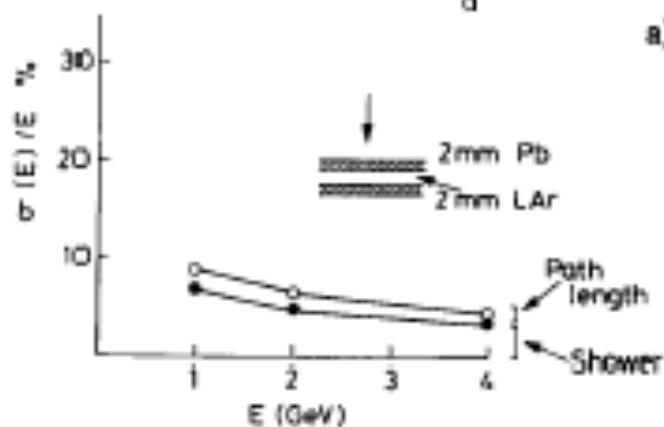
Fluttuazioni di percorso + fluttuazioni di Landau

wide spread angular distribution of (low energy) e^\pm

$$d_{\text{eff}} = \frac{d}{\cos \theta}$$

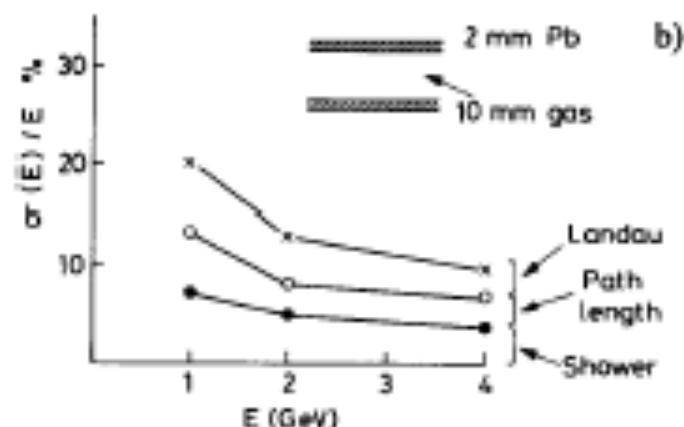


a)



In thin gas detector layers the deposited energy shows typical Landau tails

(C. Fabjan, T. Ludlam, CERN-EP/82-37)



Calorimetria

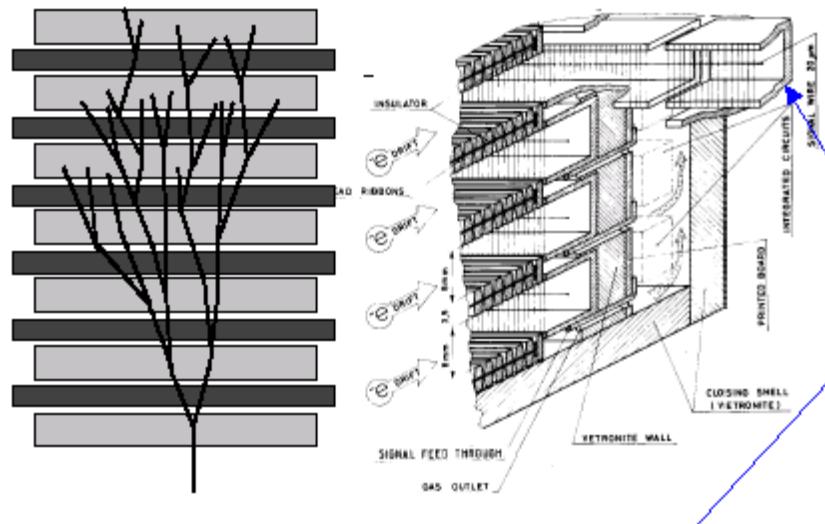
NOTE:

- ❖ In generale meglio scintillatore – piombo che rivelatore a gas – piombo per un calorimetro e.m.
- ❖ Fondamentale calibrare il calorimetro in assoluto e relativamente cella-cella
- ❖ Ordine di grandezza per la risoluzione di un calorimetro e.m. scintillatore piombo $\sigma(E)/E \sim 7\%/(E)^{1/2}$

Calorimetri a campionamento

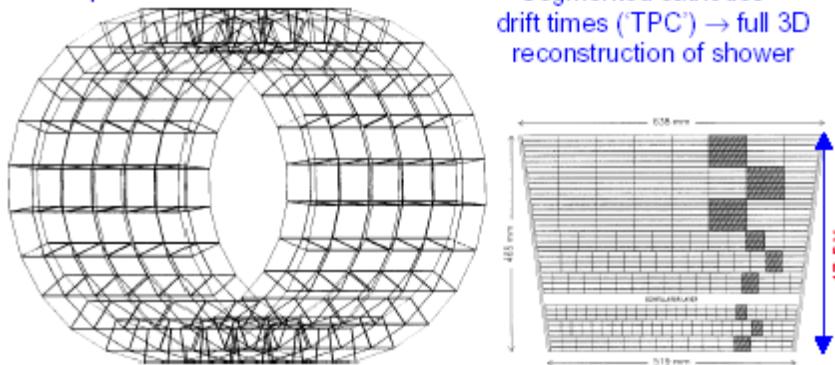
Esempi

- ◆ A special sampling ECAL:
DELPHI High Density Projection Chamber (HPC)



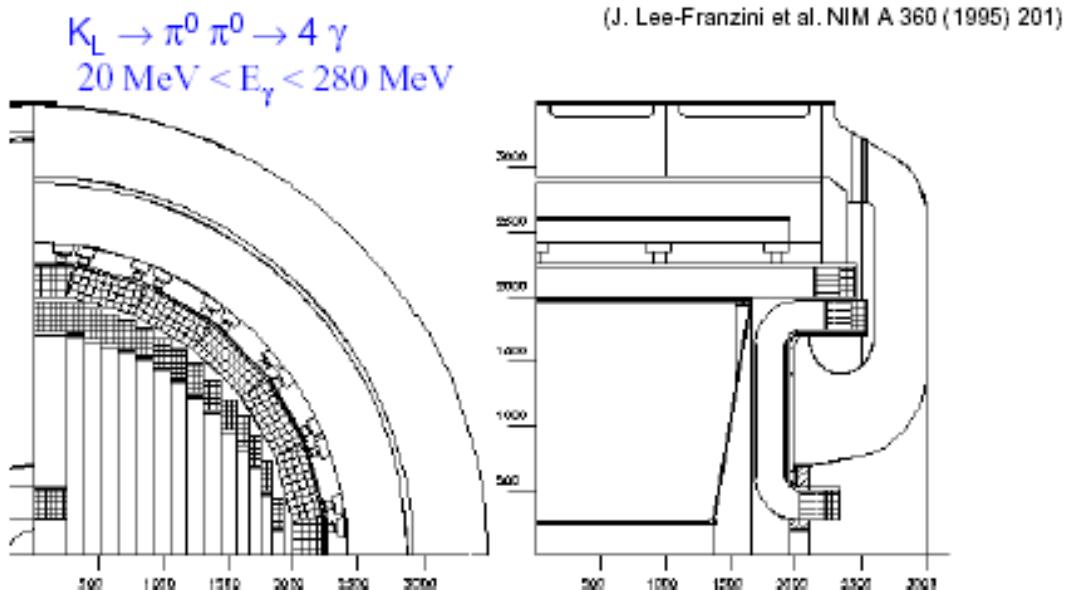
144 independent units

Segmented cathodes +
drift times (TPC) \rightarrow full 3D
reconstruction of shower



Calorimetri a campionamento

KLOE Spaghetti Calorimeter



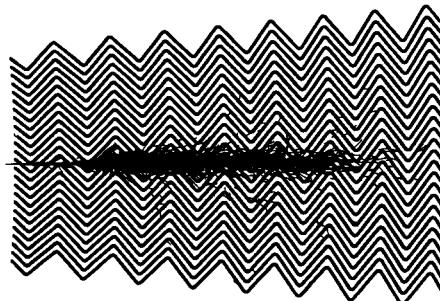
Scintillating fibers in grooved lead plates. PM ($\varnothing 5\text{cm}$) readout.
(lead:fiber:glue 48:42:10 %)

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

Test beam data !

Calorimetri a campionamento

Calorimetro e.m. di ATLAS



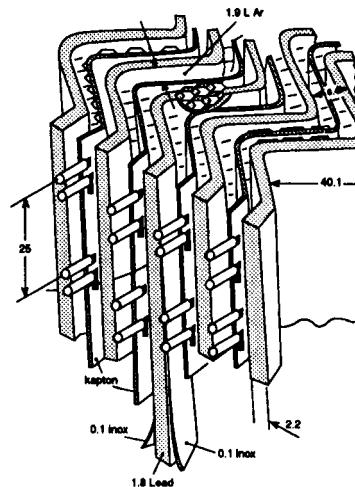
(RD3 / ATLAS)

Liquid Argon (90K)

- + lead-steel absorbers (1-2 mm)
- + multilayer copper-polyimide readout boards

→ Ionization chamber.

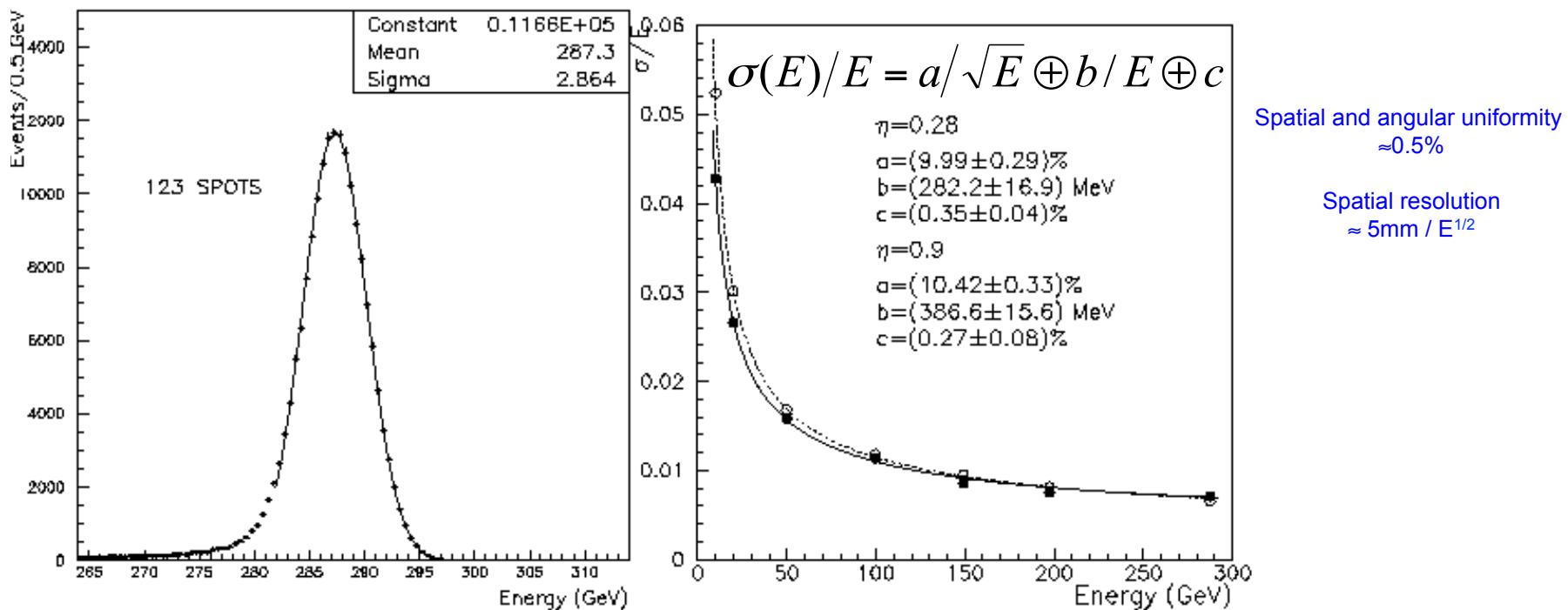
$1 \text{ GeV E-deposit} \rightarrow 5 \times 10^6 \text{ e}^-$



- Accordion geometry minimizes dead zones.
- Liquid Ar is intrinsically radiation hard.
- Readout board allows fine segmentation (azimuth, pseudo-rapidity and longitudinal) acc. to physics needs

Calorimetri a campionamento

Test beam results, e^- 300 GeV (ATLAS TDR)

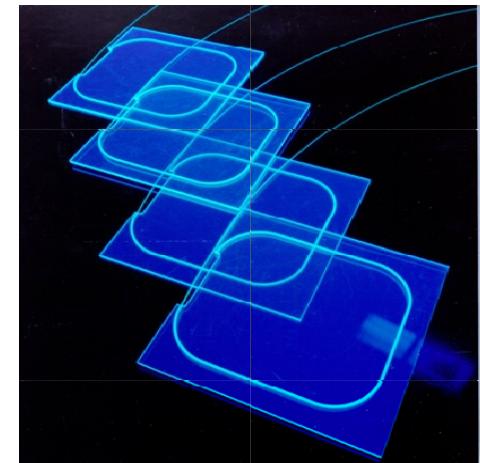


Calorimetri a campionamento

Calorimetro adronico di CMS



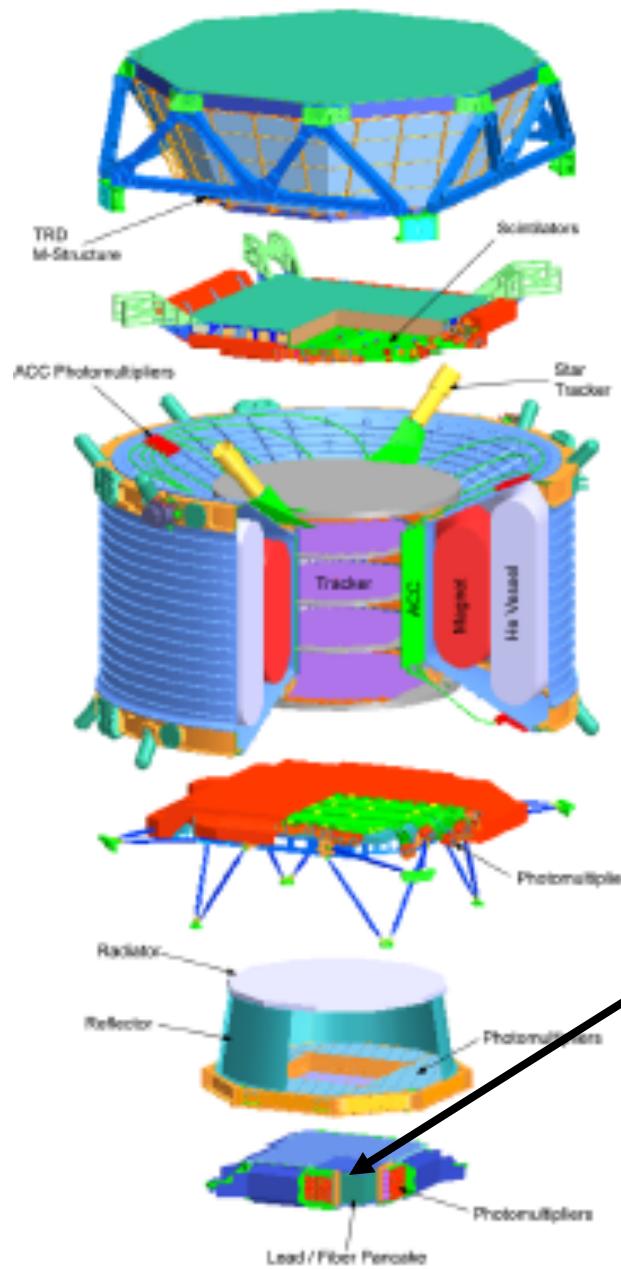
Assorbitore di Cu + scintillatore
1500 T di assorbitore



Scintillators fill slots and are read out
via fibres by HPDs

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

The Electromagnetic Calorimeter (ECAL)



TRD:
Transition
Radiation
Detector

TOF: (s1,s2)
Time of Flight
Detector

MG:
Magnet
TR:
Silicon Tracker
ACC:
Anticoincidence
Counter
AST:
Amiga Star
Tracker

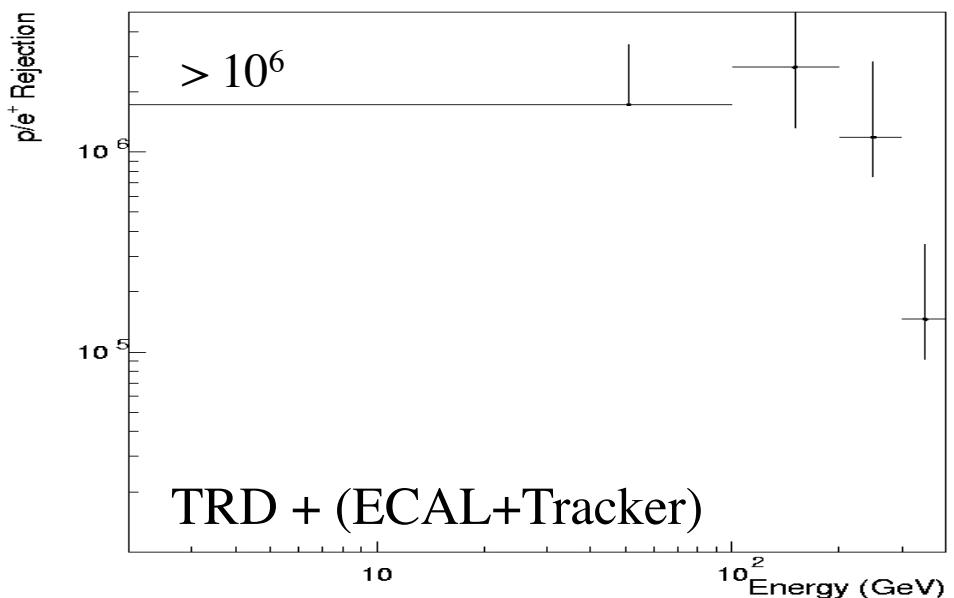
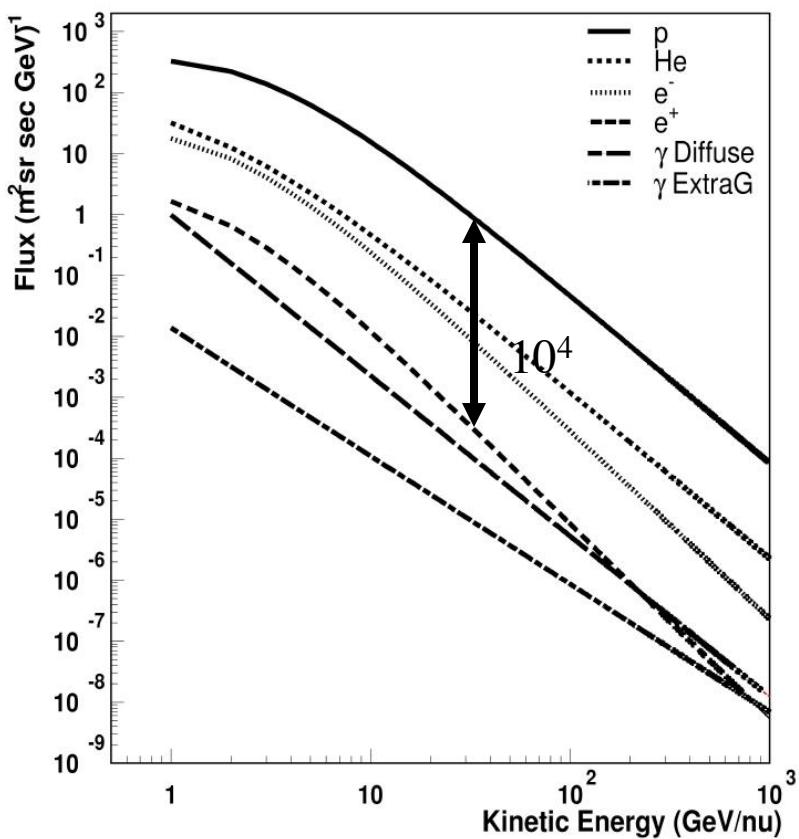
TOF: (s1,s2)
Time of Flight
Detector

RICH:
Ring Image
Cherenkov Counter

EMC:
Electromagnetic
Calorimeter

Required ECAL performances

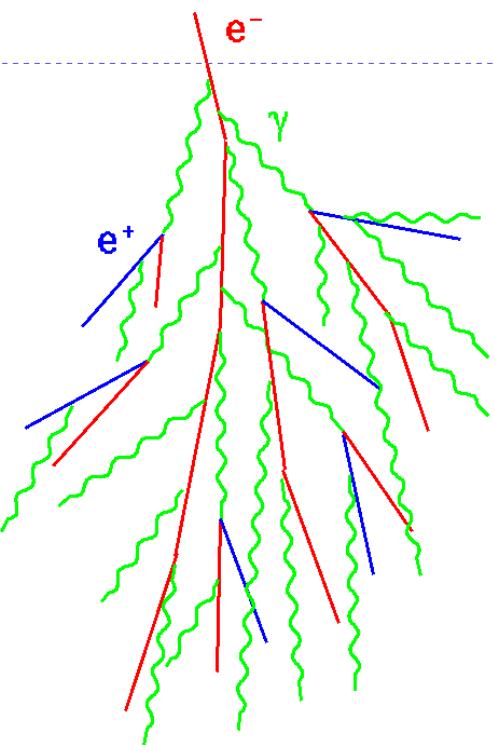
- Precise measurement of the e^- , e^+ , γ energy spectrum from 1 GeV to 1 TeV :
 - $\Delta E/E < 5\%$ (from 5 GeV to 1 TeV) [Tracker: $\Delta p/p|_{\text{hadron}} < 4\%$ (< 100 GV)]
- e/p discrimination from GeV to TeV :
 - e^+/p rejection $\sim O(10^3)$ (< 500 GeV) [TRD: $\sim 10^3$ - 10^2 (< 300 GeV)]



TRD + (ECAL+Tracker)

⇒ 3D imaging calorimeter

ECAL Operation Principle

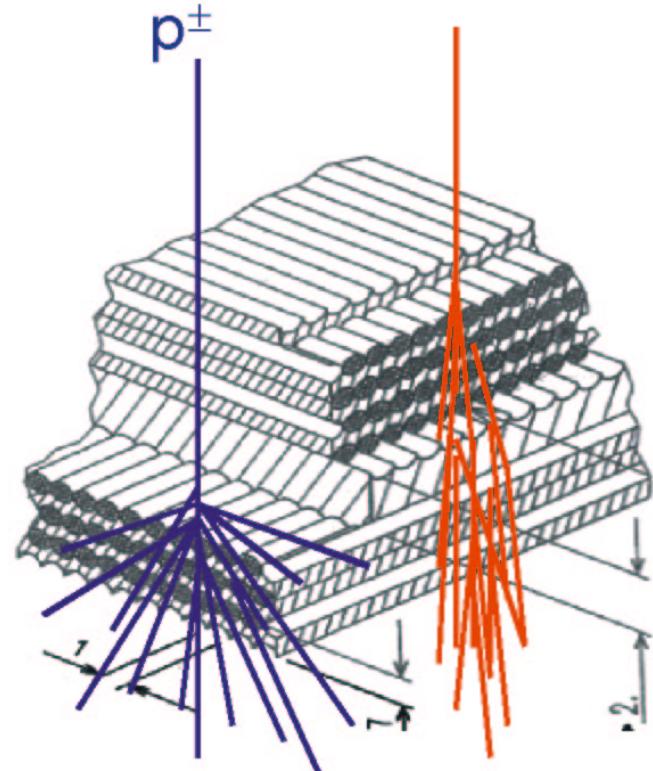
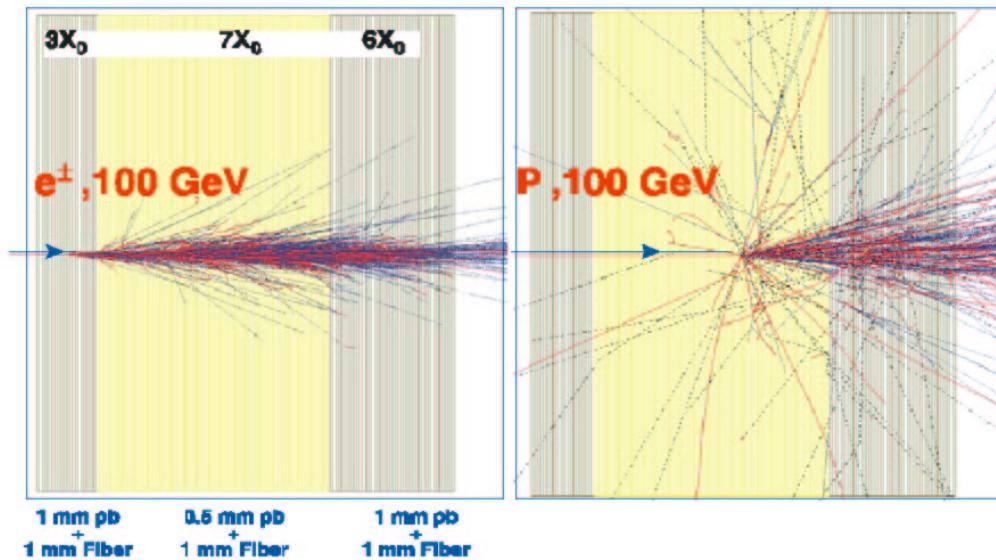


High energy electrons moving through matter lose their energies by bremsstrahlung radiation and high energy photons do by electron-positron pair production. Repeated these two processes, the secondary photons and electrons multiply and expand like as a **shower**.

If a material is large enough to absorb the energies of all electrons/gamma-rays by an electromagnetic shower, it produces signals proportional to those energies. The signals are: ionization, Cerenkov light, scintillation light. For example, we read out the total scintillation light so that the incident energy can be measured.

Hadrons (p) do not shower for brems but undergo to inelastic nuclear collisions that produce a spray of particles which initiate a shower

Electromagnetic Calorimeter

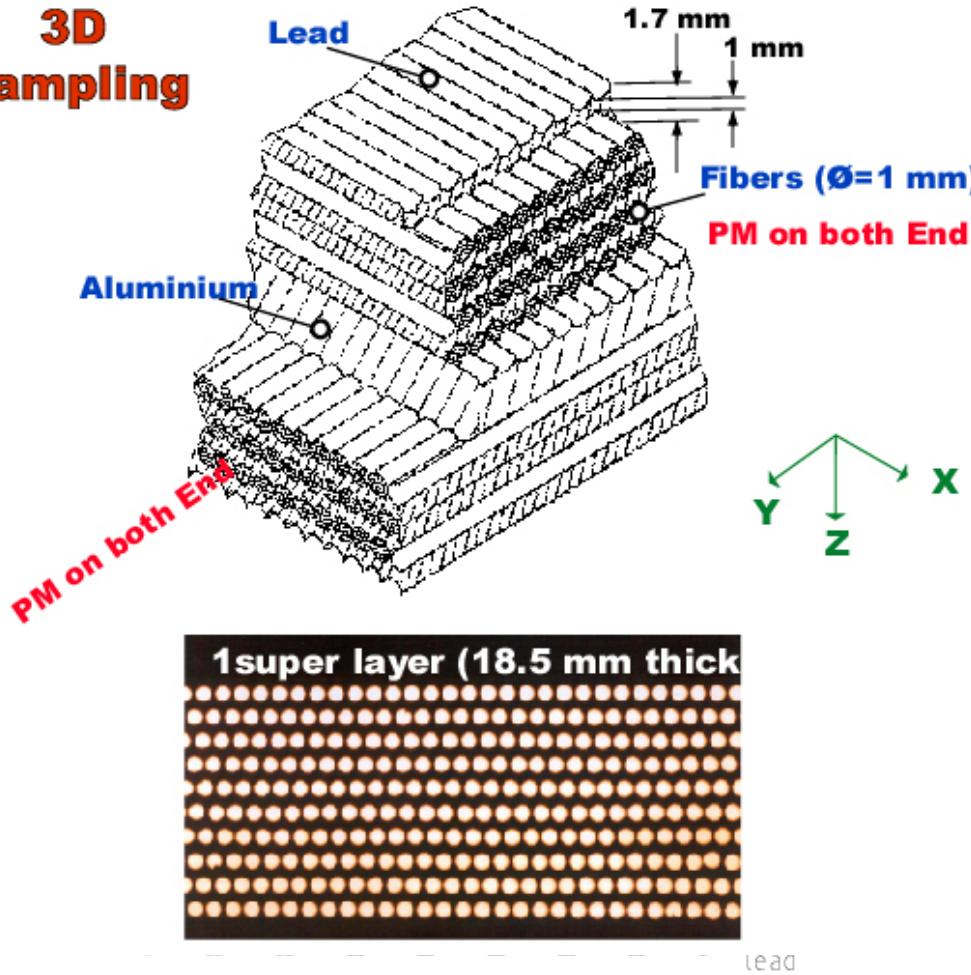


The shower shape and the starting point is different for e and hadrons $\rightarrow e/p$
discrimination possible with high efficiency

ECAL structure (1)

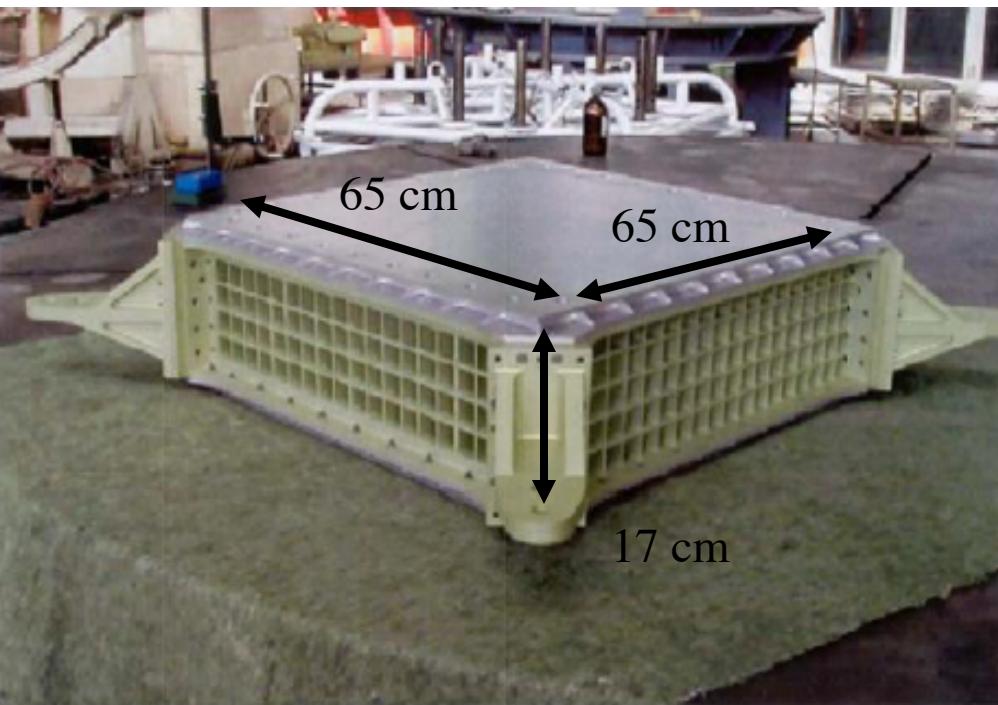
The ECAL is a 3D sampling calorimeter made of Pb/scintillating fibers (Spacal Type).

3D Sampling



- 9 superlayers alternatively oriented along X or Y axis
- 1 SuperLayer:
 - 11 grooved Pb foils (1mm thick) interleaved with 10 layers of scintillator fibers ($\Ø=1$ mm) glued by an epoxy resin
- Active detector
 - 9 superlayers alternatively in Y & X direction
 - 16 radiation lengths (X_0)

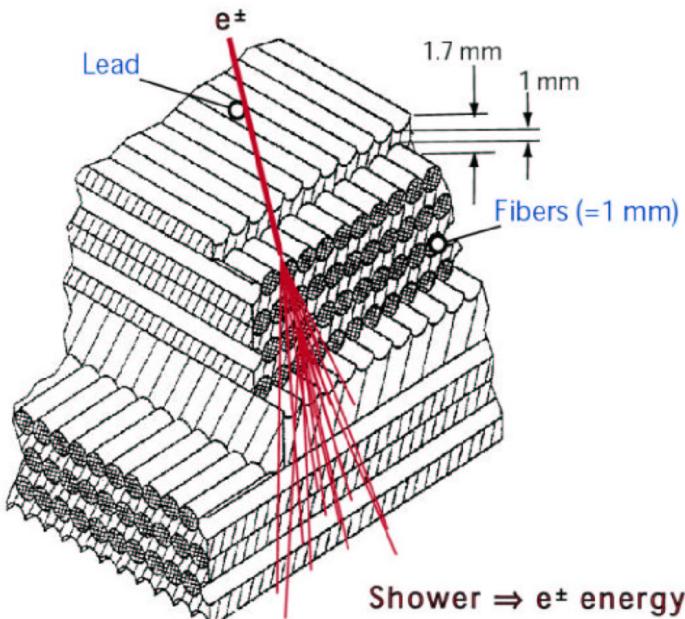
ECAL structure (2)



- Each fiber is read on one side only by multi-anodes PMTs
- ⇒ Read-out granularity: $9 \times 9 \text{ mm}^2$
- 324 PMTs with 4 pixels
 - Hamamatsu R7600-00-M4
 - $324 \times 4 = 1296$ cells
- ⇒ High granularity :
 - 0.5 Mollier radius in X-Y
 - 0.9 X_0 in depth : 18 samplings

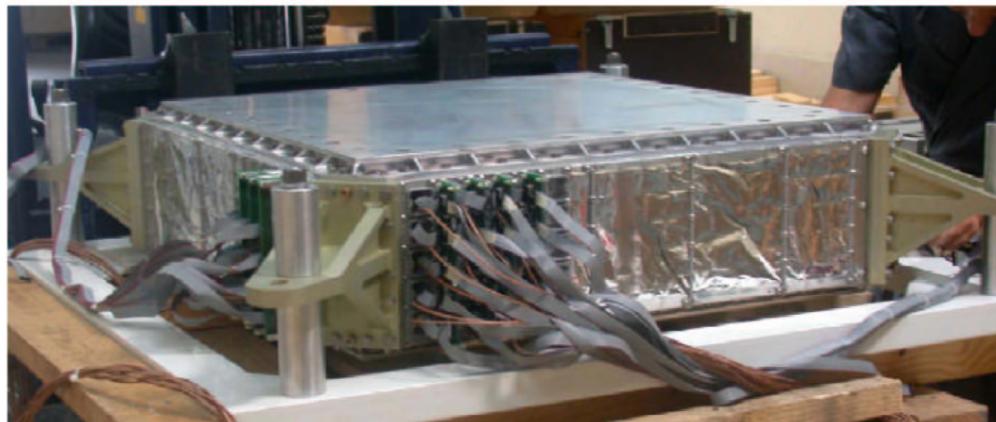
Construction

- ▷ sampling e.m. calorimeter
 $658 \times 658 \times 166 \text{ mm}^3$
- ▷ lead-scintillating fibers structure
- ▷ 9 superlayers piled up
disposed along X and Y alternately
- ▷ $\sim 17X_0$ radiation lengths
- ▷ cell granularity $\sim 0.5 R_M$ (35 fibers)
18 samplings of e.m. shower
- ▷ multi-pixel (2×2) photomultiplier's
large dynamic range

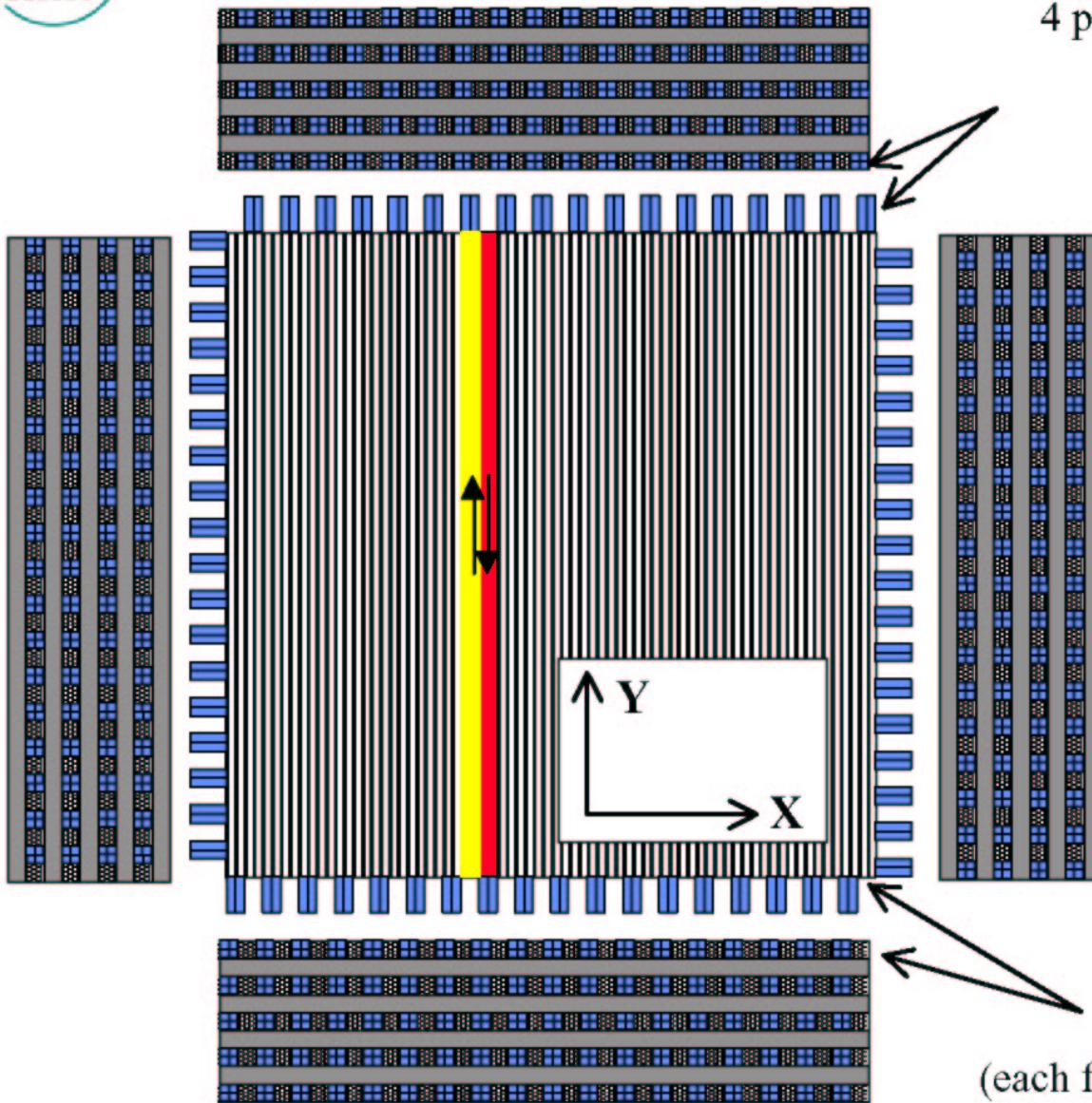


It provides

- ▷ e^\pm, γ energy measurement
- ▷ particle direction
- ▷ trigger signal for photons tagging (dy-node)



X-Y, X-Z and Y-Z projections of the ECAL



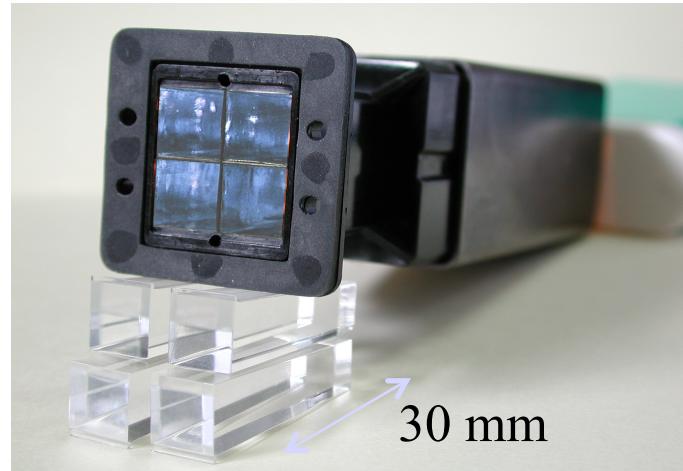
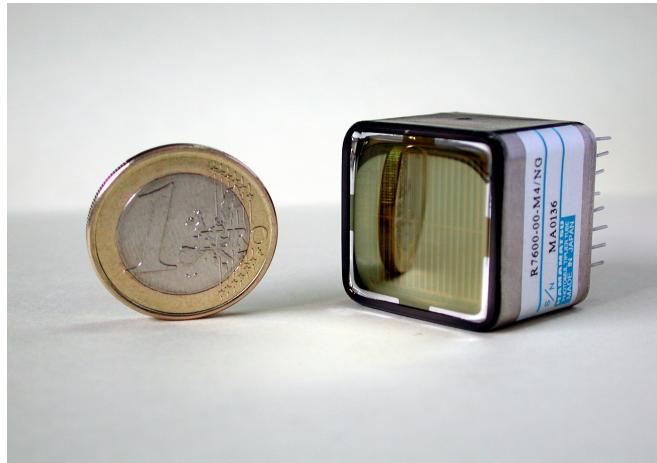
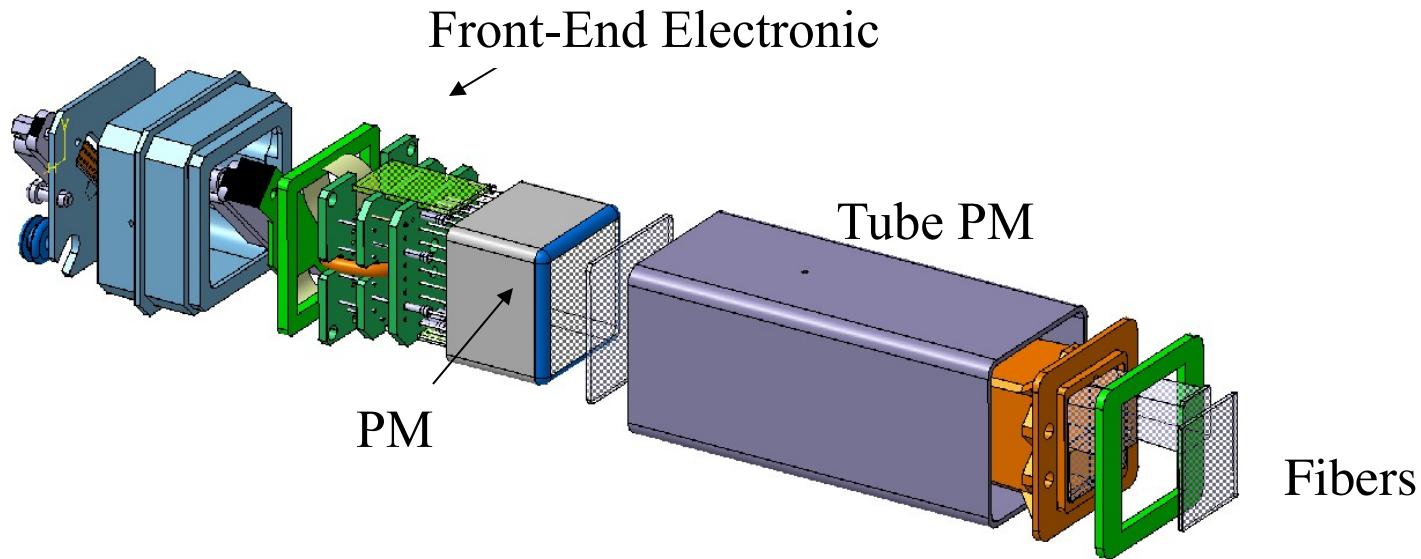
4 pixels PMT : R7600-00-M4
from Hamamatsu
total of 324 PMT

Granularity :

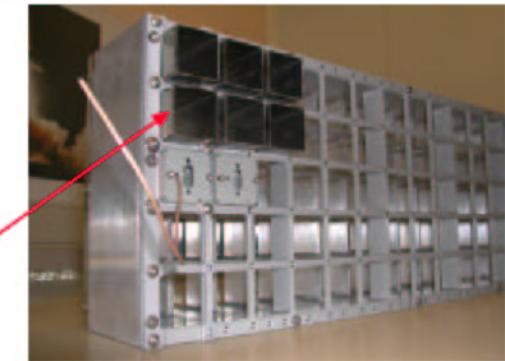
~0.5 Mollier radius in X-Y
~0.9 X_0 in Z - 18 samplings

Reflecting surfaces out
of PMT windows
(each fiber is read only on one end)

Light collection system



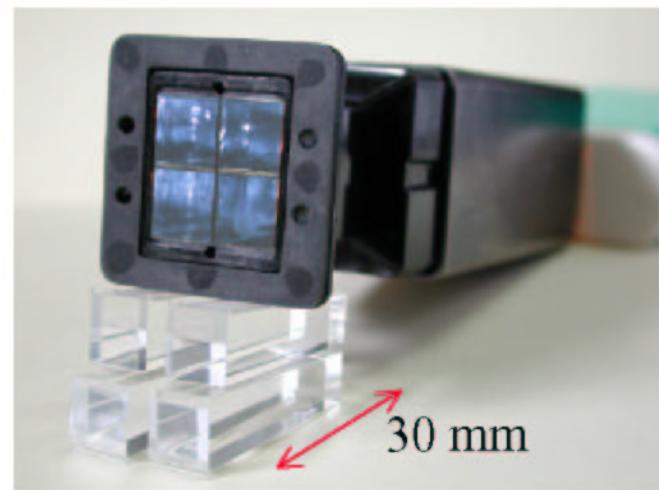
The overall optimization of the magnetic shielding and of the light collection system :



Lateral panel supporting the individual PMT shielding (square tubes made of 1mm thick soft iron)

Detail of the light collection system :

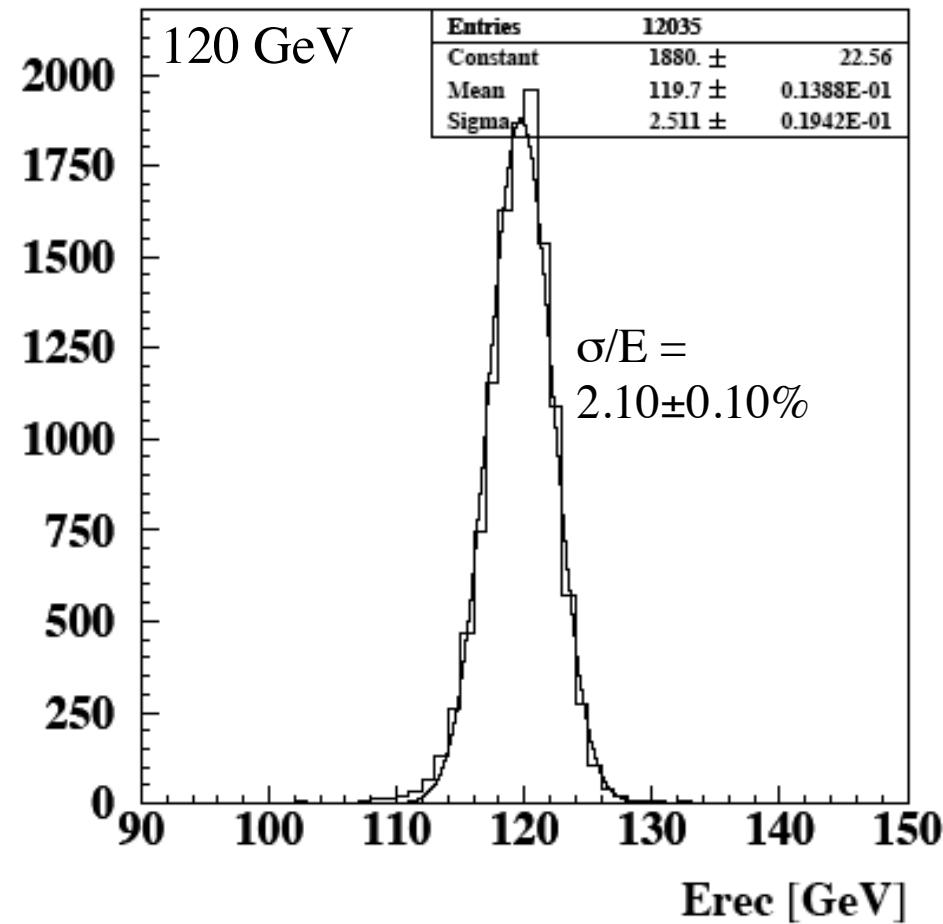
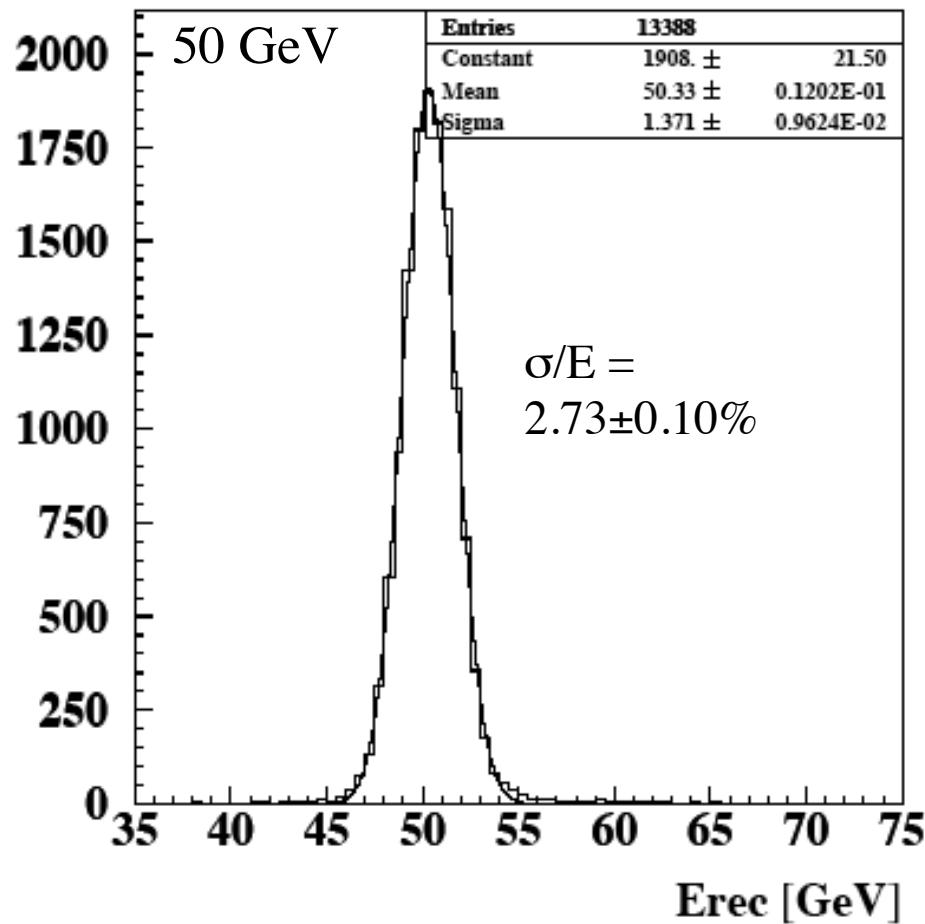
- polycarbonate box logging PMT and FE electronics
- aluminum covered conical channels
- conical Plexiglas light guides
- transparent RTV joint (not shown)



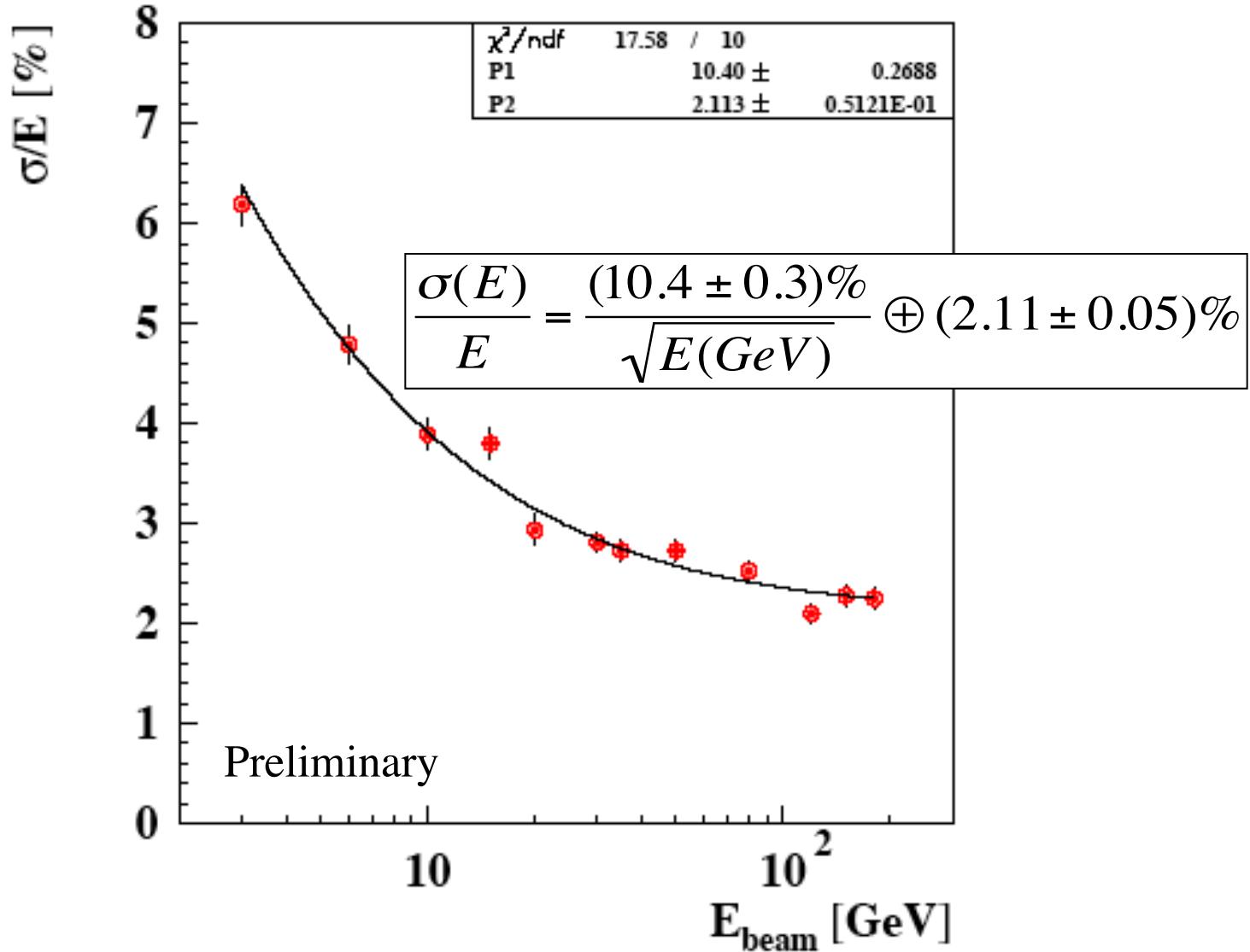
Magnetic field < 10 Gauss

Light transport efficiency ~70%

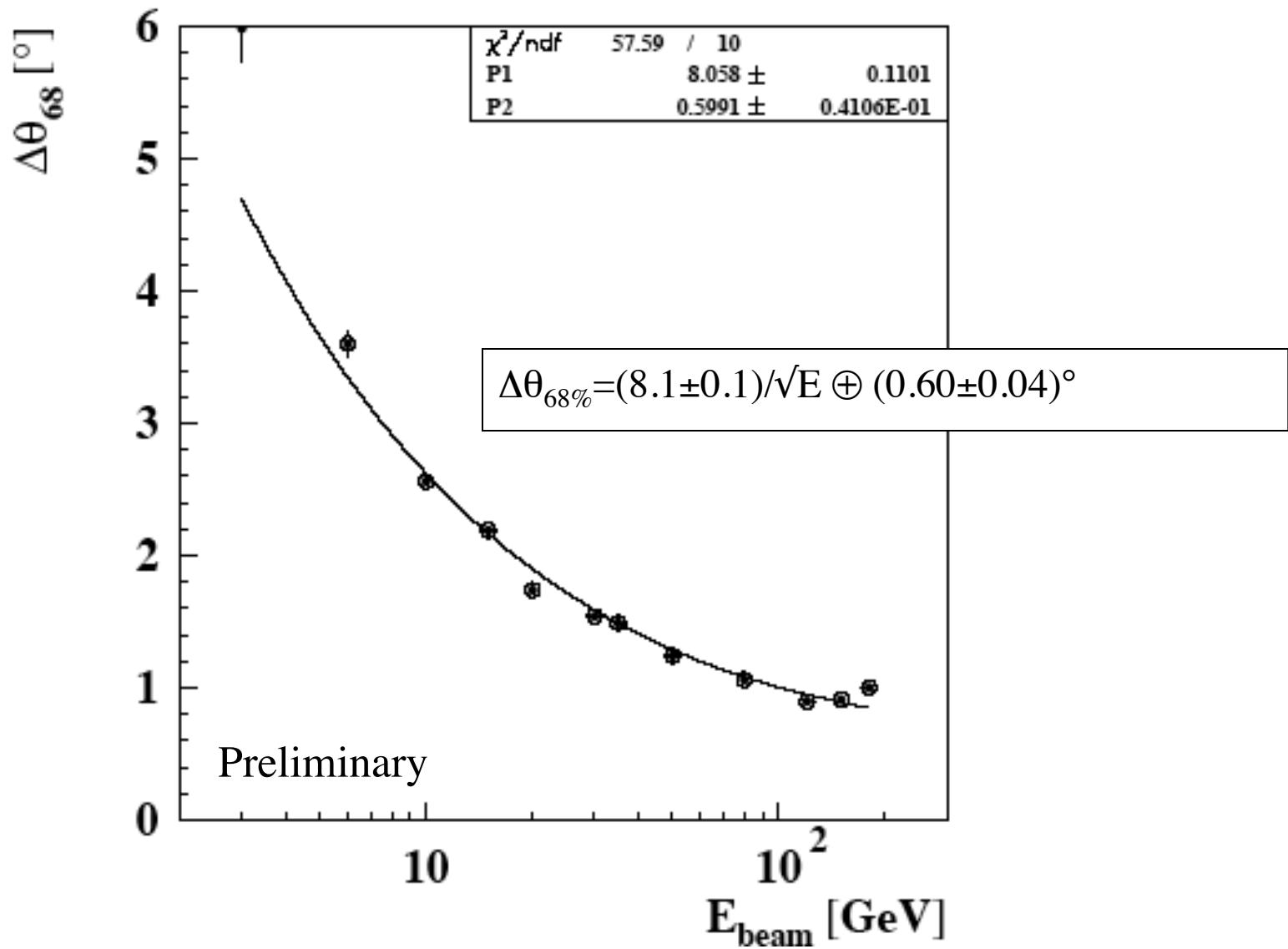
Energy resolution



Energy resolution



Angular resolution



e/p separation (50 GeV e vs 120 GeV p)

