

Calibrazione del calorimetro elettromagnetico di CMS

Studente: Giuseppe Fasanella
Tutor: prof. Daniele Del Re
Prof. Titolare: Carlo Dionisi

“Sapienza” Università di Roma
Dipartimento di Fisica

19 Giugno 2012



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

- Descrizione del calorimetro elettromagnetico
- Pre-calibrazione
- Calibrazione in-situ

- Descrizione del calorimetro elettromagnetico
- Pre-calibrazione
- Calibrazione in-situ

- Descrizione del calorimetro elettromagnetico
- Pre-calibrazione
- Calibrazione in-situ

- Il principale goal di fisica è la scoperta del bosone di Higgs
- Per un Higgs di bassa massa ($\lesssim 150 \text{ GeV}/c^2$), il canale d'oro è:

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- Vale la relazione:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = 2E_1E_2(1 - \cos\theta)$$

- Di conseguenza l'errore relativo sulla massa dell'Higgs è:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_{E_1}}{E_1} \oplus \frac{\sigma_{E_2}}{E_2} \oplus \frac{\sigma_\theta}{\tan \frac{\theta}{2}} \right]$$

- Il principale goal di fisica è la scoperta del bosone di Higgs
- Per un Higgs di bassa massa ($\lesssim 150 \text{ GeV}/c^2$), il canale d'oro è:

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- Vale la relazione:

$$m_{\gamma\gamma}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = 2E_1E_2(1 - \cos\theta)$$

- Di conseguenza l'errore relativo sulla massa dell'Higgs è:

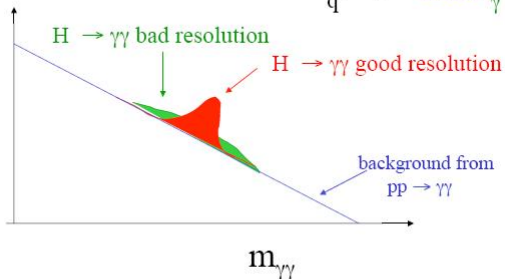
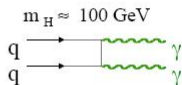
$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_{E_1}}{E_1} \oplus \frac{\sigma_{E_2}}{E_2} \oplus \frac{\sigma_\theta}{\tan\frac{\theta}{2}} \right]$$

- Excellent EM energy resolution:

e.g. to extract a $H \rightarrow \gamma\gamma$ signal over the background

$$\sigma(H \rightarrow \gamma\gamma) \approx 50 \text{ fb}$$

$$\sigma(pp \rightarrow \gamma\gamma) \approx 2 \text{ pb}$$



Mass resolution of $\sim 1\%$ needed for $m \approx 100 \text{ GeV}$

In particular : constant term $< 1\%$

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma E_1}{E_1} \oplus \frac{\sigma E_2}{E_2} \oplus \frac{\sigma_\theta}{\tan \frac{\theta}{2}} \right]$$

- Un calorimetro omogeneo garantisce un'elevata risoluzione in energia
- Per non rovinarne la risoluzione intrinseca, il solenoide deve essere posizionato all'esterno del calorimetro: deve essere il più possibile compatto
- Deve sopportare rate elevate e alta luminosità:

risposta veloce in tempo

alta granularità

alta resistenza alle radiazioni

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma E_1}{E_1} \oplus \frac{\sigma E_2}{E_2} \oplus \frac{\sigma_\theta}{\tan \frac{\theta}{2}} \right]$$

- Un calorimetro omogeneo garantisce un'elevata risoluzione in energia
- Per non rovinarne la **risoluzione intrinseca**, il solenoide deve essere posizionato all'esterno del calorimetro: deve essere il più possibile compatto
- Deve sopportare rate elevate e alta luminosità:

risposta veloce in tempo

alta granularità

alta resistenza alle radiazioni

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma E_1}{E_1} \oplus \frac{\sigma E_2}{E_2} \oplus \frac{\sigma_\theta}{\tan \frac{\theta}{2}} \right]$$

- Un calorimetro omogeneo garantisce un'elevata risoluzione in energia
- Per non rovinarne la risoluzione intrinseca, il solenoide deve essere posizionato all'esterno del calorimetro: deve essere il più possibile compatto
- Deve sopportare rate elevate e alta luminosità:

risposta veloce in tempo

alta granularità

alta resistenza alle radiazioni

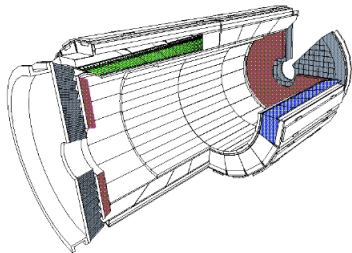
Le precedenti considerazioni hanno portato alla seguente scelta di disegno:

- Calorimetro elettromagnetico omogeneo ed ermetico (ECAL)
- 75848 cristalli di Tungstato di Piombo (PbWO_4), 23 cm di lunghezza ($26 X_0$) e una superficie frontale di $22 \times 22 \text{ mm}^2$, per un volume complessivo di 8.14 m^3 di cristalli
- $X_0 = 0.89 \text{ cm}$, Raggio di Molière $R_M = 2.2 \text{ cm}$: compatto e granulare
- La costante di tempo del meccanismo di scintillazione (*decay time* $< 15 \text{ ns}$) si adatta bene alla rate di LHC
- PbWO_4 : alta resistenza alle radiazioni [0.25-0.30 Gy/h] ma *light yield* piccola [$1.5 \times 10^2 \gamma/\text{MeV}$]: necessità di dotare APD e VPT di un gain intrinseco
- Necessità di monitorare la temperatura

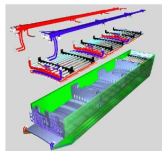
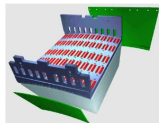
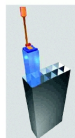
Le precedenti considerazioni hanno portato alla seguente scelta di disegno:

- Calorimetro elettromagnetico omogeneo ed ermetico (ECAL)
- 75848 cristalli di Tungstato di Piombo (PbWO_4), 23 cm di lunghezza ($26 X_0$) e una superficie frontale di $22 \times 22 \text{ mm}^2$, per un volume complessivo di 8.14 m^3 di cristalli
- $X_0 = 0.89 \text{ cm}$, Raggio di Molière $R_M = 2.2 \text{ cm}$: compatto e granulare
- La costante di tempo del meccanismo di scintillazione (*decay time* $< 15 \text{ ns}$) si adatta bene alla rate di LHC
- PbWO_4 : alta resistenza alle radiazioni [0.25-0.30 Gy/h] ma *light yield* piccola [$1.5 \times 10^2 \gamma/\text{MeV}$]: necessità di dotare APD e VPT di un gain intrinseco
- Necessità di monitorare la temperatura

	NaI (Tl)	CsI (Tl)	CsI	BGO	PBW0 ₄
Density (g/cm ³)	3.67	4.51	4.51	7.13	8.28
X ₀ (cm)	2.59	1.85	1.85	1.12	0.89
R _M (cm)	4.8	3.5	3.5	2.33	2.2
Emission peak (nm)	410	560	420 310	480	440
Decay time (ns) fast and slow	230	940	6 35	60 300	5 15
Light yield γ / MeV	4 10 ⁴	5 10 ⁴	4 10 ⁴	8 10 ³	1.5 10 ²
Yield in pe (relative to NaI)	100	45	5.6 2.3	9	1.3
Rad. hardness (Gy)	1	10	10 ³	1	10 ⁵



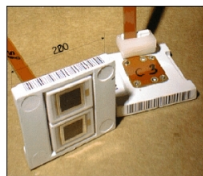
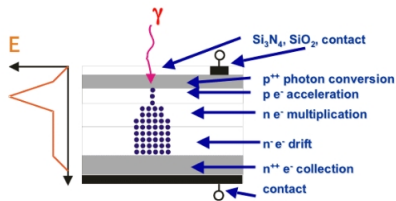
Overall view of ECAL



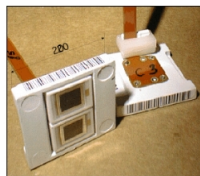
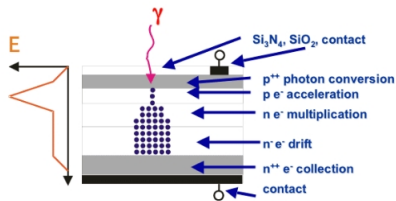
$$\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.0175 \times 0.0175$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

- $a = 2.8 \%$ (tiene conto della foto-statistica Poissoniana (+ correzioni))
- $b = 12 \%$ (tiene conto del rumore elettronico della catena di readout, correnti di leakage, pile-up)
- $c = 0.3 \%$ (tiene conto della non-uniformità nella produzione di luce, precisione dell'inter-calibrazione e della calibrazione complessiva)

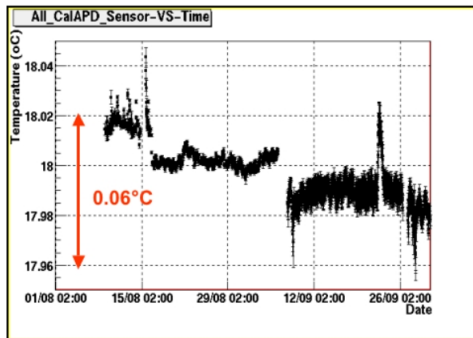


- Data la piccola light-yield dei cristalli di $PbWO_4$, i photo-detectors devono disporre di un gain intrinseco
- La presenza degli APDs influenza tutti i termini della risoluzione in energia: la loro efficienza quantica (75 %) influenza il termine stocastico, la stabilità del gain interviene nell'intercalibrazione, capacità parassite e *dark current* modificano il termine di noise

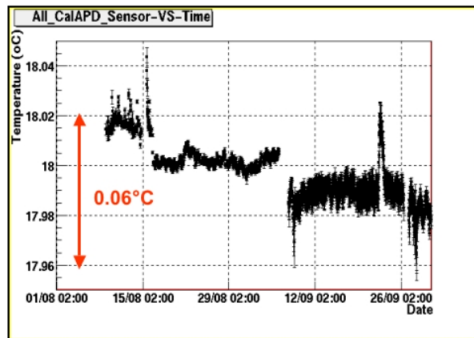


- Data la piccola light-yield dei cristalli di PbWO_4 , i photo-detectors devono disporre di un gain intrinseco
- La presenza degli APDs influenza tutti i termini della risoluzione in energia: la loro efficienza quantica (75 %) influenza il termine stocastico, la stabilità del gain interviene nell'intercalibrazione, capacità parassite e *dark current* modificano il termine di noise

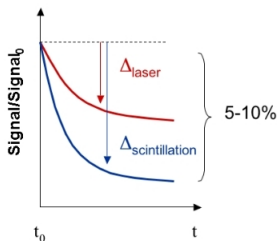
- La light-yield del PbWO4 e il gain degli APDs mostrano una forte dipendenza dalla temperatura ($-2 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ e $-2.4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$) : è necessaria una eccellente stabilità della temperatura
- *Water cooling system garantisce una stabilità della temperatura di lungo periodo sotto 0.1°C (almeno tra due successive calibrazioni in-situ)*



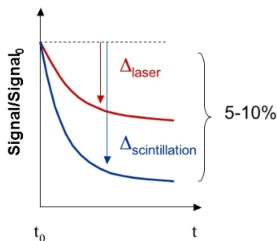
- La light-yield del PbWO₄ e il gain degli APDs mostrano una forte dipendenza dalla temperatura ($-2 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ e $-2.4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$) : è necessaria una eccellente stabilità della temperatura
- *Water cooling system* garantisce una stabilità della temperatura di lungo periodo sotto 0.1°C (almeno tra due successive calibrazioni in-situ)



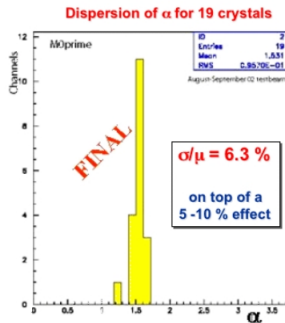
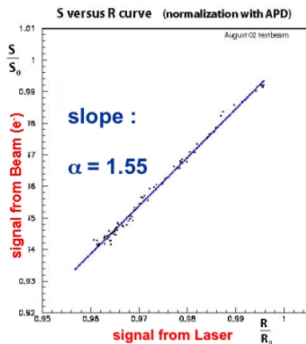
- La light-yield si degrada nel tempo a causa delle radiazioni che provocano una riduzione della trasparenza dei cristalli
- *Laser Monitor system*
- Si assume che la Δ_{laser} sia legata funzionalmente alla $\Delta_{scintillation}$.



- La light-yield si degrada nel tempo a causa delle radiazioni che provocano una riduzione della trasparenza dei cristalli
- *Laser Monitor system*
- Si assume che la Δ_{laser} sia legata funzionalmente alla $\Delta_{scintillation}$.



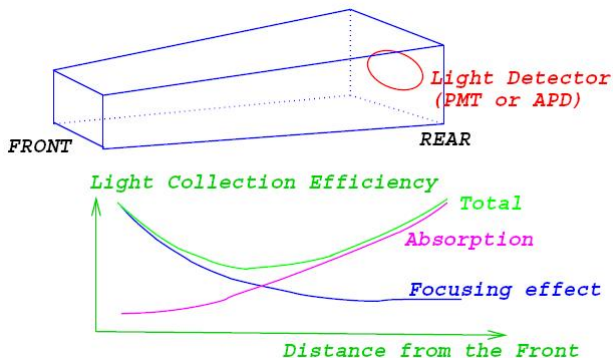
- Il risultato mostra un fit $\frac{S}{S_0} = (R/R_0)^\alpha$
- S è il segnale ottenuto con un fascio di elettroni da 120 GeV
- R è il segnale ottenuto con il laser
- S_0 e R_0 sono i segnali prima che i cristalli fossero investiti da radiazioni (Dose cumulata: 2-8 Gy)



Disuniformità longitudinale della risposta di luce

Devono essere considerati 2 effetti tra loro concorrenti:

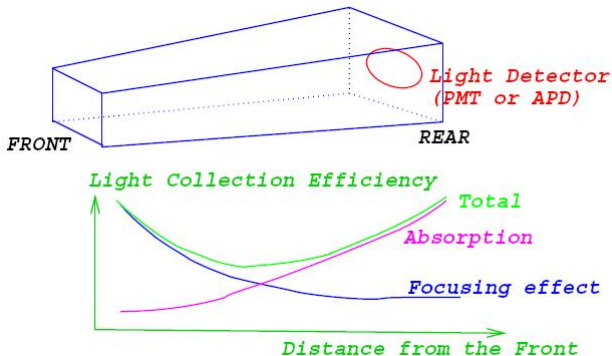
- la luce che raggiunge il fotorivelatore diminuisce all'allontarsi da esso a causa dell'assorbimento dei fotoni di scintillazione da parte del cristallo stesso
- la forma tronco-piramidale del cristallo unita all'alto indice di rifrazione, 2.3, produce un effetto di focalizzazione



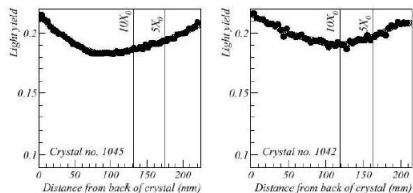
Disuniformità longitudinale della risposta di luce

Devono essere considerati 2 effetti tra loro concorrenti:

- la luce che raggiunge il fotorivelatore diminuisce all'allontarsi da esso a causa dell'assorbimento dei fotoni di scintillazione da parte del cristallo stesso
- la forma tronco-piramidale del cristallo unita all'alto indice di rifrazione, 2.3, produce un effetto di focalizzazione

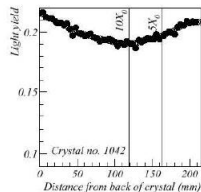
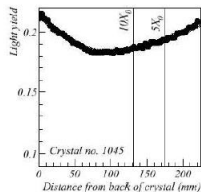


- un elettrone (o un fotone) incidente sul cristallo dà origine ad uno sciame elettromagnetico il cui profilo di deposizione varia da evento ad evento
- sciame elettromagnetici aventi profili diversi, anche se originati da elettroni (o fotoni) di uguale energia, possono dar luogo a segnali diversi
- nel caso di particelle con energie differenti, le posizioni dei massimi degli sciame elettromagnetici sono situate in zone del cristallo caratterizzate da valori diversi della risposta di luce (non linearità)



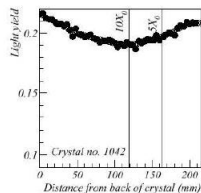
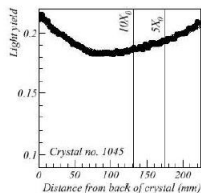
La procedura che viene attuata consiste nel trattare i cristalli in maniera da rendere una delle quattro facce laterali "ruvida", al fine di limitare l'effetto focalizzante.

- un elettrone (o un fotone) incidente sul cristallo dà origine ad uno sciame elettromagnetico il cui profilo di deposizione varia da evento ad evento
- sciame elettromagnetici aventi profili diversi, anche se originati da elettroni (o fotoni) di uguale energia, possono dar luogo a segnali diversi
- nel caso di particelle con energie differenti, le posizioni dei massimi degli sciame elettromagnetici sono situate in zone del cristallo caratterizzate da valori diversi della risposta di luce (non linearità)



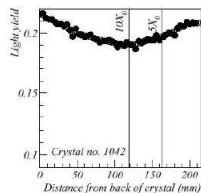
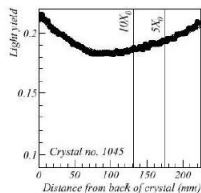
La procedura che viene attuata consiste nel trattare i cristalli in maniera da rendere una delle quattro facce laterali "ruvida", al fine di limitare l'effetto focalizzante.

- un elettrone (o un fotone) incidente sul cristallo dà origine ad uno sciame elettromagnetico il cui profilo di deposizione varia da evento ad evento
- sciame elettromagnetici aventi profili diversi, anche se originati da elettroni (o fotoni) di uguale energia, possono dar luogo a segnali diversi
- nel caso di particelle con energie differenti, le posizioni dei massimi degli sciame elettromagnetici sono situate in zone del cristallo caratterizzate da valori diversi della risposta di luce (non linearità)



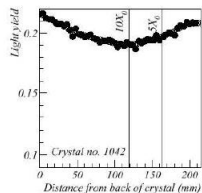
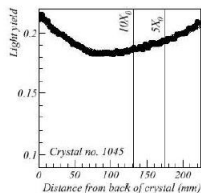
La procedura che viene attuata consiste nel trattare i cristalli in maniera da rendere una delle quattro facce laterali "ruvida", al fine di limitare l'effetto focalizzante.

- un elettrone (o un fotone) incidente sul cristallo dà origine ad uno sciame elettromagnetico il cui profilo di deposizione varia da evento ad evento
- sciame elettromagnetici aventi profili diversi, anche se originati da elettroni (o fotoni) di uguale energia, possono dar luogo a segnali diversi
- nel caso di particelle con energie differenti, le posizioni dei massimi degli sciame elettromagnetici sono situate in zone del cristallo caratterizzate da valori diversi della risposta di luce (non linearità)



La procedura che viene attuata consiste nel trattare i cristalli in maniera da rendere una delle quattro facce laterali "ruvida", al fine di limitare l'effetto focalizzante.

- un elettrone (o un fotone) incidente sul cristallo dà origine ad uno sciame elettromagnetico il cui profilo di deposizione varia da evento ad evento
- sciame elettromagnetici aventi profili diversi, anche se originati da elettroni (o fotoni) di uguale energia, possono dar luogo a segnali diversi
- nel caso di particelle con energie differenti, le posizioni dei massimi degli sciame elettromagnetici sono situate in zone del cristallo caratterizzate da valori diversi della risposta di luce (non linearità)



La procedura che viene attuata consiste nel trattare i cristalli in maniera da rendere una delle quattro facce laterali “ruvida”, al fine di limitare l’effetto focalizzante.

- L'energia di una particella, stimata da ECAL sarà:

$$E = F \sum_{\text{cluster crystals}} G(\text{GeV}/\text{ADC}) \times C_i \times A_i$$

- A_i : conteggi ADC relativi al cristallo i-mo
- C_i : costante di intercalibrazione (media pesata di C_i ottenute da diversi metodi)
- G : costante di scala
- F : correzione che dipende dal tipo di particella, dalla sua energia e dalla pseudo-rapidità

1	2	3
4	5	6
7	8	9

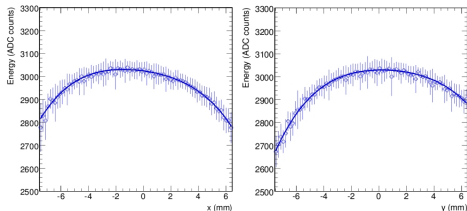
- L'energia di una particella, stimata da ECAL sarà:

$$E = F \sum_{cluster\ crystals} G(\text{GeV}/\text{ADC}) \times C_i \times A_i$$

- A_i : conteggi ADC relativi al cristallo i -mo
- C_i : costante di intercalibrazione (media pesata di C_i ottenute da diversi metodi)
- G : costante di scala
- F : correzione che dipende dal tipo di particella, dalla sua energia e dalla pseudo-rapidità

1	2	3
4	5	6
7	8	9

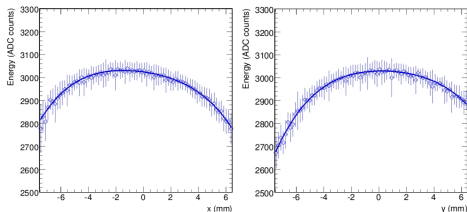
- 9 supermoduli sono stati intercalibrati mediante un test-beam di elettroni da 90 GeV/c e 120 GeV/c (RMS= 0.09 %)
- supermoduli montati su un tavolo rotante, per permettere di dirigere il fascio su ogni cristallo, a turno



$$\Delta x = \Delta y = 150 \mu m$$

La frazione di energia depositata in un cristallo dipende dalla posizione di incidenza sullo stesso: se ne tiene conto tramite una funzione di correzione, fattorizzata in entrambe le coordinate

- 9 supermoduli sono stati intercalibrati mediante un test-beam di elettroni da 90 GeV/c e 120 GeV/c (RMS= 0.09 %)
- supermoduli montati su un tavolo rotante, per permettere di dirigere il fascio su ogni cristallo, a turno



$$\Delta x = \Delta y = 150 \mu m$$

La frazione di energia depositata in un cristallo dipende dalla posizione di incidenza sullo stesso: se ne tiene conto tramite una funzione di correzione, fattorizzata in entrambe le coordinate

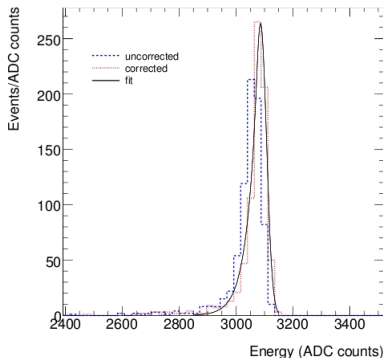


Figure 2. Distributions of the single channel response in ADC counts before (dashed line) and after (dotted line) correcting for the impact point for a typical crystal exposed to 120 GeV electrons. The best-fit of a Gaussian curve with an exponential left tail to the data after correction is superimposed (continuous line).

Il valore del picco (in ADC counts) è confrontato con quello di un set (arbitrariamente fissato) di cristalli, in modo da equalizzarne le risposte

$$peak_{ref} / peak_i = C_i$$

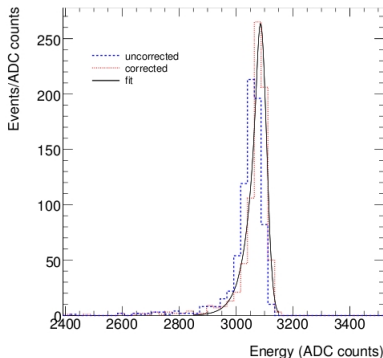
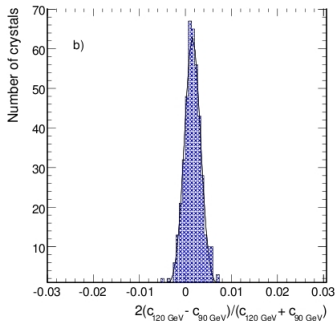
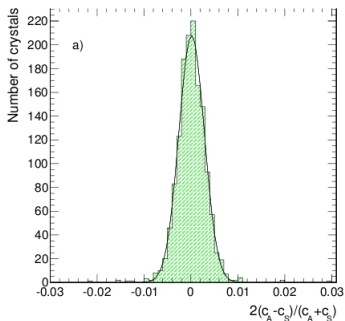


Figure 2. Distributions of the single channel response in ADC counts before (dashed line) and after (dotted line) correcting for the impact point for a typical crystal exposed to 120 GeV electrons. The best-fit of a Gaussian curve with an exponential left tail to the data after correction is superimposed (continuous line).

Il valore del picco (in ADC counts) è confrontato con quello di un set (arbitrariamente fissato) di cristalli, in modo da equalizzarne le risposte

$$peak_{ref} / peak_i = C_i$$



Stabilità nella determinazione delle costanti di intercalibrazione (test beam)

- a) RMS spread $\simeq 0.27$ %
- b) RMS spread $\simeq 0.2$ %

Tutti i (36) supermoduli sono stati calibrati con raggi cosmici.

Con un sistema di trigger si selezionano i raggi cosmici che attraversano il cristallo longitudinalmente, lungo l'asse del cristallo (approssimativamente). Il deposito tipico di energia è di circa 250 MeV.

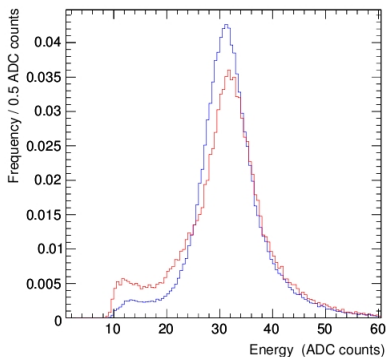


Figure 5. Observed spectra of cosmic ray muons crossing ECAL crystals in the “single crystal” sample. The two histograms show the spectrum observed in crystals belonging to module of type 1 (blue), located at small angles to the zenith, and in crystals belonging to module 4 (red), located at large angles to the zenith. These distributions were obtained by adding single crystal samples collected in the supermodules previously intercalibrated with test beam electrons (see text).

La distribuzione in Energia è η -dependent.

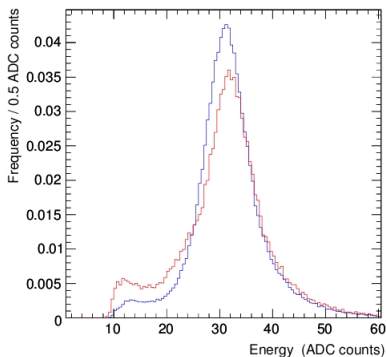


Figure 5. Observed spectra of cosmic ray muons crossing ECAL crystals in the “single crystal” sample. The two histograms show the spectrum observed in crystals belonging to module of type 1 (blue), located at small angles to the zenith, and in crystals belonging to module 4 (red), located at large angles to the zenith. These distributions were obtained by adding single crystal samples collected in the supermodules previously intercalibrated with test beam electrons (see text).

La distribuzione in Energia è η -dependent.

Per intercalibrare:

- Si media sulla distribuzione in energia a η costante, sui 9 SM intercalibrati al test-beam
- In questo modo si ricavano distribuzioni di riferimento η – *dependent*
- Le costanti di intercalibrazione per ogni canale sono estratte da un maximum-likelihood fit alla distribuzione di riferimento a quel valore di η , con parametri liberi del fit la normalizzazione e la scala di energia.
- La precisione di questo metodo di intercalibrazione è circa 0.015

Per intercalibrare:

- Si media sulla distribuzione in energia a η costante, sui 9 SM intercalibrati al test-beam
- In questo modo si ricavano distribuzioni di riferimento η – *dependent*
- Le costanti di intercalibrazione per ogni canale sono estratte da un maximum-likelihood fit alla distribuzione di riferimento a quel valore di η , con parametri liberi del fit la normalizzazione e la scala di energia.
- La precisione di questo metodo di intercalibrazione è circa 0.015

$$E = F \sum_{\text{cluster crystals}} G(\text{GeV}/\text{ADC}) \times C_i \times A_i$$

$$C_i = C_i^{\text{precalib.}} \times C_i^{\text{in-situ}}$$

La precalibrazione ha ottenuto una precisione:

- EB: $\simeq 0.5\%$ (test beam); 1.5% - 2.2% (μ)
- EE: $\simeq 1\%$ (500 cristalli test beam); $\simeq 5\%$ (altrove)

$$E = F \sum_{\text{cluster crystals}} G(\text{GeV}/\text{ADC}) \times C_i \times A_i$$

$$C_i = C_i^{\text{precalib.}} \times C_i^{\text{in-situ}}$$

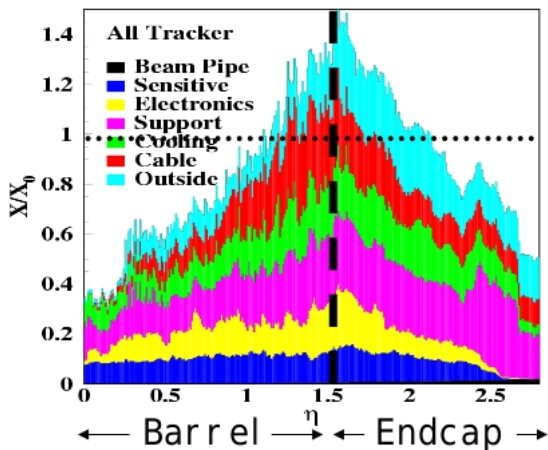
La precalibrazione ha ottenuto una precisione:

- EB: $\simeq 0.5\%$ (test beam); 1.5% - 2.2% (μ)
- EE: $\simeq 1\%$ (500 cristalli test beam); $\simeq 5\%$ (altrove)

Intercalibrazione in-situ: problema aggiuntivo

Conoscere la quantità di materiale presente tra il punto di interazione e il calorimetro riveste un ruolo importante nella selezione degli elettroni e dei fotoni con cui effettuare la calibrazione.

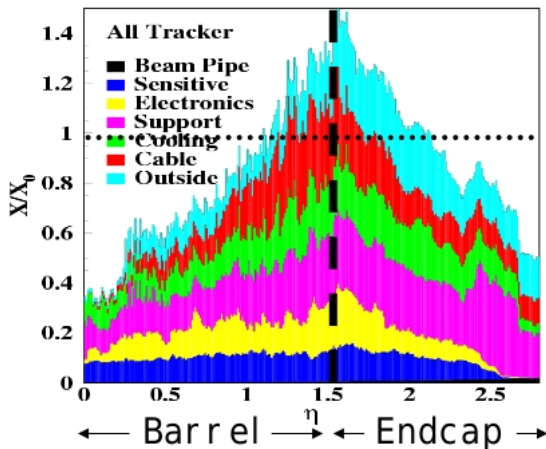
55 % degli elettroni da 10-50 GeV p_T perdono più del 50 % della loro energia in bremsstrahlung. Nel 20 % dei casi più del 90 %.



Intercalibrazione in-situ: problema aggiuntivo

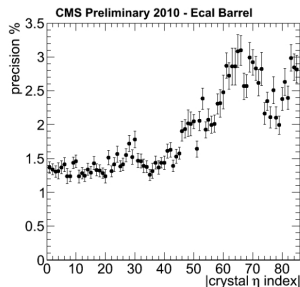
Conoscere la quantità di materiale presente tra il punto di interazione e il calorimetro riveste un ruolo importante nella selezione degli elettroni e dei fotoni con cui effettuare la calibrazione.

55 % degli elettroni da 10-50 GeV p_T perdono più del 50 % della loro energia in bremsstrahlung. Nel 20 % dei casi più del 90 %



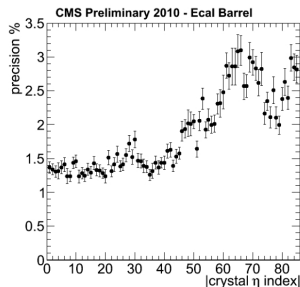
Il metodo è basato sull'attesa che per un numero grande di eventi di minimum bias ($1.6 \cdot 10^8$) l'energia depositata dovrà essere la stessa per tutti i cristalli di un anello a η fissato.

L'intercalibrazione è calcolata rapportando l'energia depositata in un cristallo con la media delle energie depositate nei cristalli dell'anello.

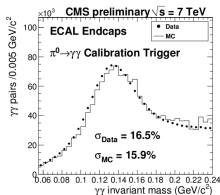
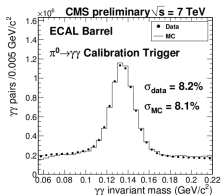


Il metodo è basato sull'attesa che per un numero grande di eventi di minimum bias ($1.6 \cdot 10^8$) l'energia depositata dovrà essere la stessa per tutti i cristalli di un anello a η fissato.

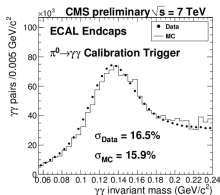
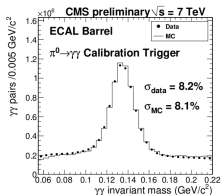
L'intercalibrazione è calcolata rapportando l'energia depositata in un cristallo con la media delle energie depositate nei cristalli dell'anello.



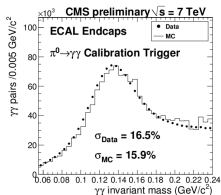
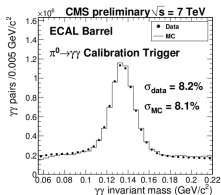
- I candidati fotoni sono ricostruiti usando un cluster da 3×3 cristalli, con la richiesta $E_{seed} > 0.5 \text{ GeV}$ e che i cristalli appartengano a un solo cluster
- La massa invariante dei 2 fotoni è minore di $0.25 \text{ GeV}/c^2$
- La pseudo-rapidità e l'angolo azimutale del fotone candidato sono ottenute calcolando la media pesata delle posizioni dei cristalli del cluster
- La forma del cluster deve essere compatibile con quella di uno shower originato da fotoni non convertiti
- Per ricavare la $c_i^{\pi^{decay}}$ si esegue (numericamente) una procedura iterativa di unfolding
- È possibile ricavare, insieme al decadimento $Z \rightarrow e^+ e^-$ la scala assoluta di ECAL (Il fattore G).



- I candidati fotoni sono ricostruiti usando un cluster da 3×3 cristalli, con la richiesta $E_{seed} > 0.5 \text{ GeV}$ e che i cristalli appartengano a un solo cluster
- La massa invariante dei 2 fotoni è minore di $0.25 \text{ GeV}/c^2$
- La pseudo-rapidità e l'angolo azimutale del fotone candidato sono ottenute calcolando la media pesata delle posizioni dei cristalli del cluster
- La forma del cluster deve essere compatibile con quella di uno shower originato da fotoni non convertiti
- Per ricavare la $c_i^{\pi^{decay}}$ si esegue (numericamente) una procedura iterativa di unfolding
- È possibile ricavare, insieme al decadimento $Z \rightarrow e^+ e^-$ la scala assoluta di ECAL (Il fattore G).



- I candidati fotoni sono ricostruiti usando un cluster da 3×3 cristalli, con la richiesta $E_{seed} > 0.5 \text{ GeV}$ e che i cristalli appartengano a un solo cluster
- La massa invariante dei 2 fotoni è minore di $0.25 \text{ GeV}/c^2$
- La pseudo-rapidità e l'angolo azimutale del fotone candidato sono ottenute calcolando la media pesata delle posizioni dei cristalli del cluster
- La forma del cluster deve essere compatibile con quella di uno shower originato da fotoni non convertiti
- Per ricavare la $c_i^{\pi^{decay}}$ si esegue (numericamente) una procedura iterativa di unfolding
- È possibile ricavare, insieme al decadimento $Z \rightarrow e^+ e^-$ la scala assoluta di ECAL (Il fattore G).



- I candidati fotoni sono ricostruiti usando un cluster da 3×3 cristalli, con la richiesta $E_{seed} > 0.5 \text{ GeV}$ e che i cristalli appartengano a un solo cluster
- La massa invariante dei 2 fotoni è minore di $0.25 \text{ GeV}/c^2$
- La pseudo-rapidità e l'angolo azimutale del fotone candidato sono ottenute calcolando la media pesata delle posizioni dei cristalli del cluster
- La forma del cluster deve essere compatibile con quella di uno shower originato da fotoni non convertiti
- Per ricavare la $c_i^{\pi^{decay}}$ si esegue (numericamente) una procedura iterativa di unfolding
- È possibile ricavare, insieme al decadimento $Z \rightarrow e^+ e^-$ la scala assoluta di ECAL (Il fattore G).

