



Il calorimetro elettromagnetico di BaBar

di

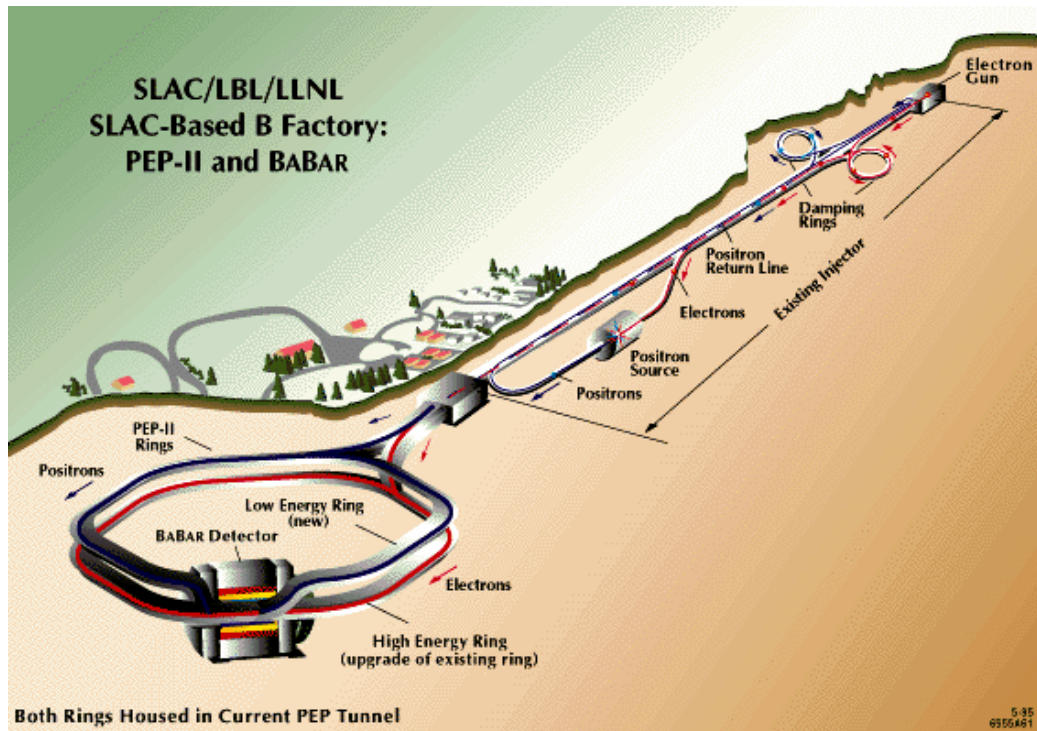
Marco Musich

XXIII ciclo di Dottorato in Fisica Torino

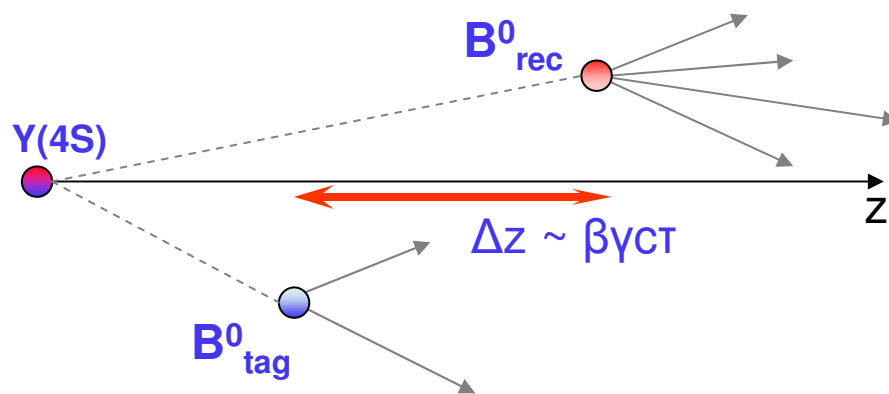
Outline

- **L'ambiente di lavoro di ECM:**
 - Il collider PEP-II
 - L'esperimento BaBar
 - La fisica a BaBar
- **Il Calorimetro elettromagnetico ECM:**
 - Layout del calorimetro
 - Obiettivi di fisica con ECM
 - Strategia di Calibrazione
 - Performance di ECM
- **Un canale di fisica studiato con ECM**

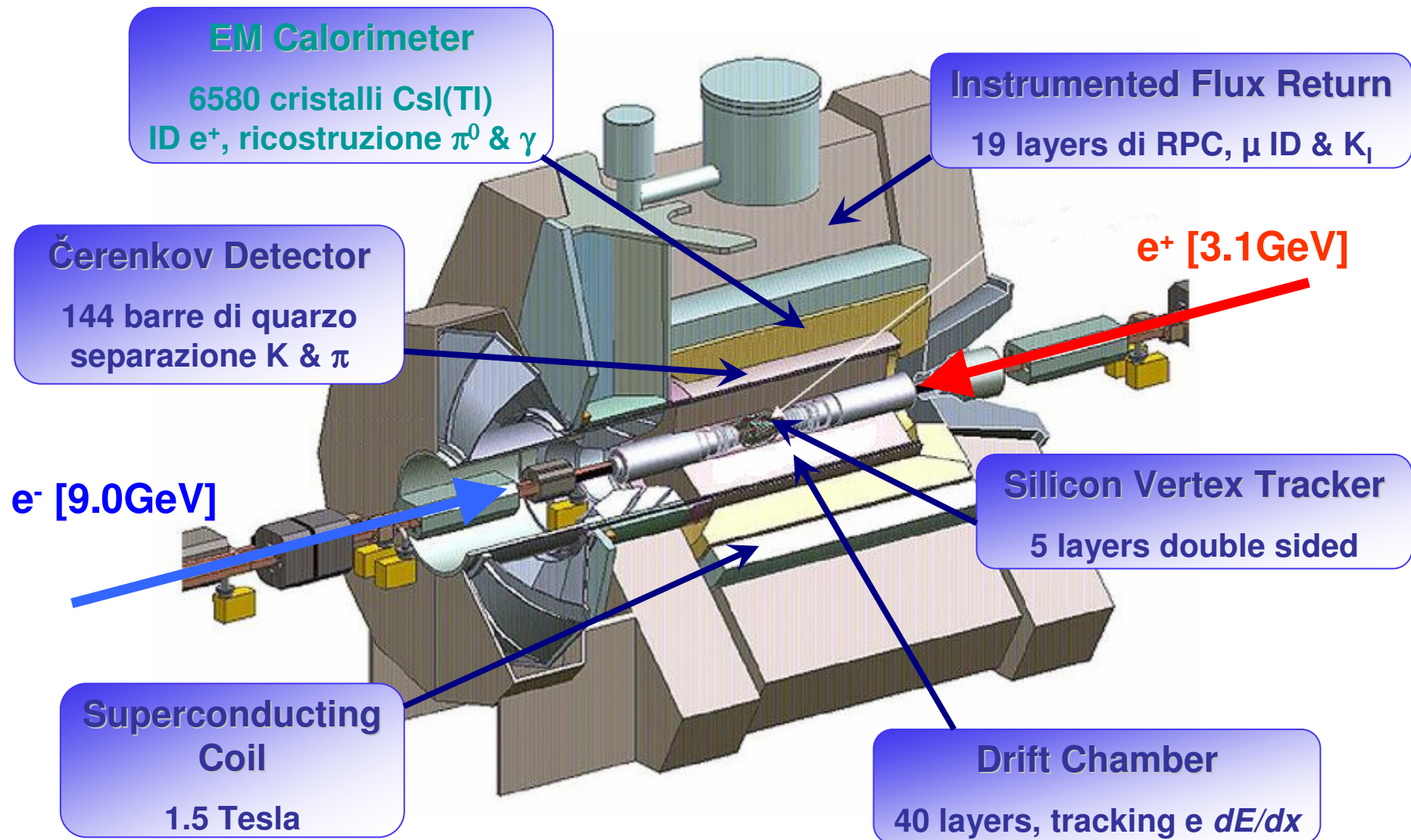
Il collider PEP-II



- PEP-II è un collider e^+e^- (*asymmetric B factory*)
- $e^- 9.0 \text{ GeV} \rightarrow \leftarrow e^+ 3.1 \text{ GeV}$
- $e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow BB$
 $\rightarrow \sqrt{s} = m_{Y(4S)} = 10.58 \text{ GeV}$
- Luminosità di picco:
 $\mathcal{L}(t) = 4 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Luminosità Integrata:
 $\int \mathcal{L}(t) dt > 570 \text{ fb}^{-1}$
- $\Delta z = 26 \text{ } \mu\text{m}$ senza boost
- $\Delta z = 260 \text{ } \mu\text{m}$ (boost $\beta\gamma = 0.56$)



L'esperimento BaBar



La Fisica a BaBar

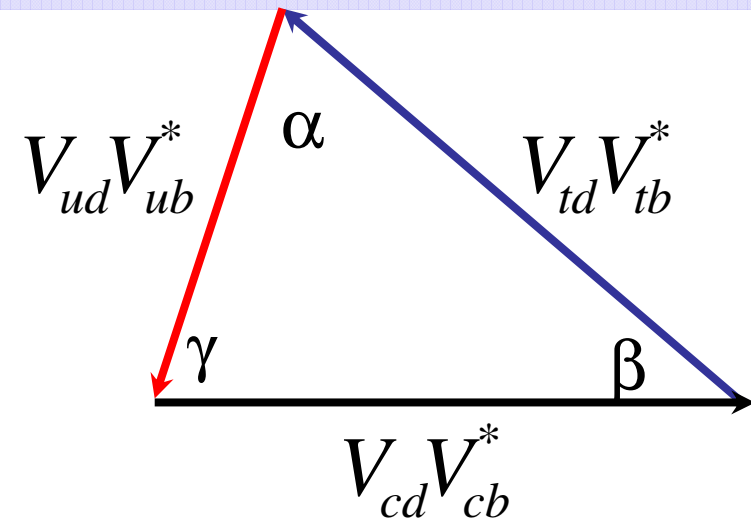
- Obiettivo di fisica primario di BaBar
 - Misura delle **asimmetrie di violazione di CP** nel decadimento di mesoni B neutri in autostati di CP
 - misura degli **angoli e dei lati del Triangolo Unitario**

● La violazione di CP può manifestarsi:

- Nel mixing: $P(B^0 \rightarrow \bar{B}^0) \neq P(\bar{B}^0 \rightarrow B^0)$
- Diretta: $P(\bar{B} \rightarrow f) \neq P(B \rightarrow f)$
- Interferenza nei decadimenti:

$$P(\bar{B}^0_{\text{phys}}(t) \rightarrow f_{\text{CP}}) \neq P(B^0_{\text{phys}}(t) \rightarrow f_{\text{CP}})$$

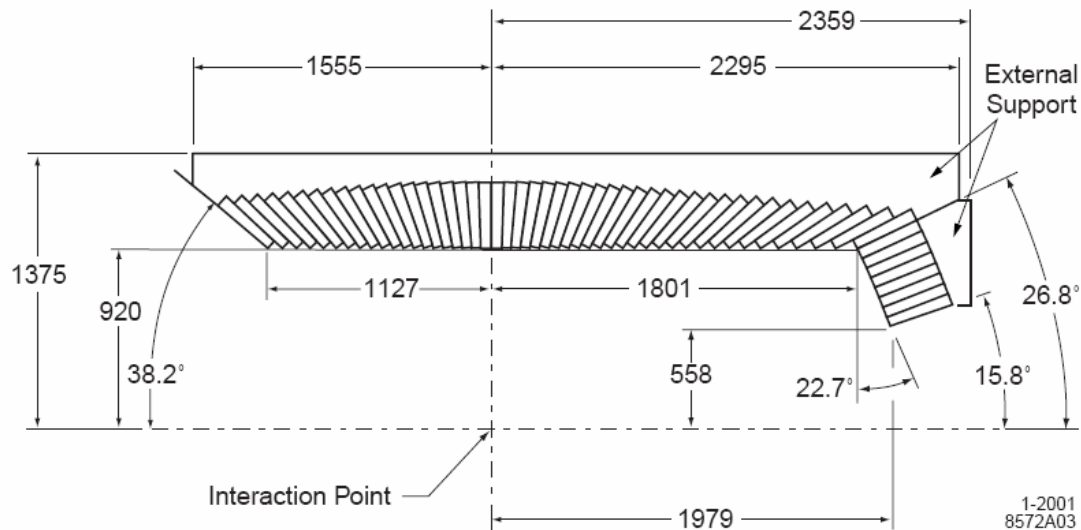
“Golden mode”: $B^0 \rightarrow K^0_S J/\psi$



$$L_{\text{int}} = -\frac{g}{\sqrt{2}} (J^\mu W_\mu^+ + J^{\mu+} W_\mu^-)$$

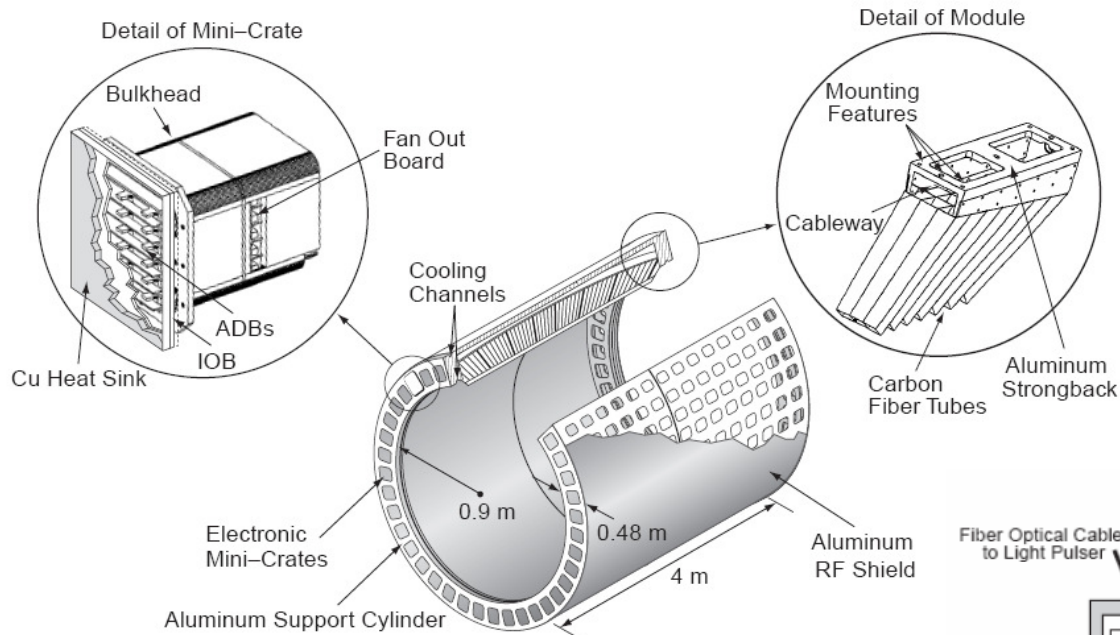
$$J^\mu = \sum_{i,j} V_{ij} J_{ij}^\mu = \sum_{ij} \bar{u}_i \gamma^\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma^5) V_{ij} d_{ij}$$

EMC: *Electromagnetic calorimeter*



- **ECM** formato da 6580 cristalli scintillanti di **CsI(Tl)**
- **Barrel**: 48 ring in η , 120 cristalli per ring
- **Fwd Endcap**: 8 ring in η , 80/100/120 cristalli per ring
- Accettanza angolare: **126°** in θ , **2π rad** in ϕ
- Geometria **pseudoproiettiva** (off-pointing di 14/45 mrad barrel/endcap)
- Gap di 2mm transizione endcap/barrel (protetto da non-proiettività)

EMC: dettaglio tecnico



Barrel

- 7 moduli in θ , 40 in ϕ
- 7 cristalli in θ , 3 in ϕ

Endcap

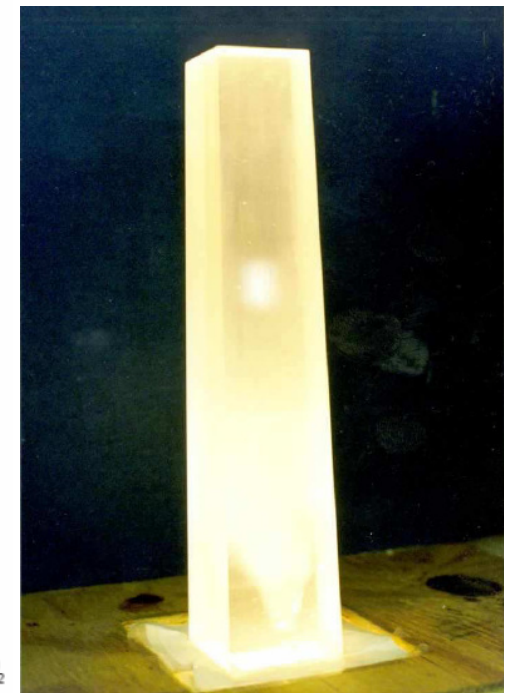
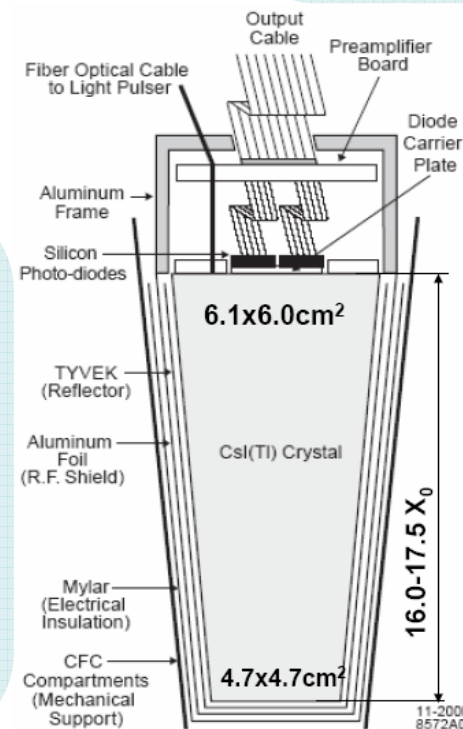
- 41 cristalli per modulo

Cristalli di CsI(Tl):

- Trasparenti ai γ di **fluorescenza**
- Avvolti da **foglio riflettente**

Photodetector:

- Diodi PID ($2 \times 1 \text{ cm}^2$)
- **QE = 85% @ 50V**
- Shaping time = $.85 \mu\text{s}$



Necessità del calorimetro

- Obiettivo di fisica principale di Babar: misura delle asimmetrie di CP nel sistema di mesoni neutri B.

- Il Calorimetro EMC è essenziale nella ricostruzione di:

- **elettroni e positroni:**

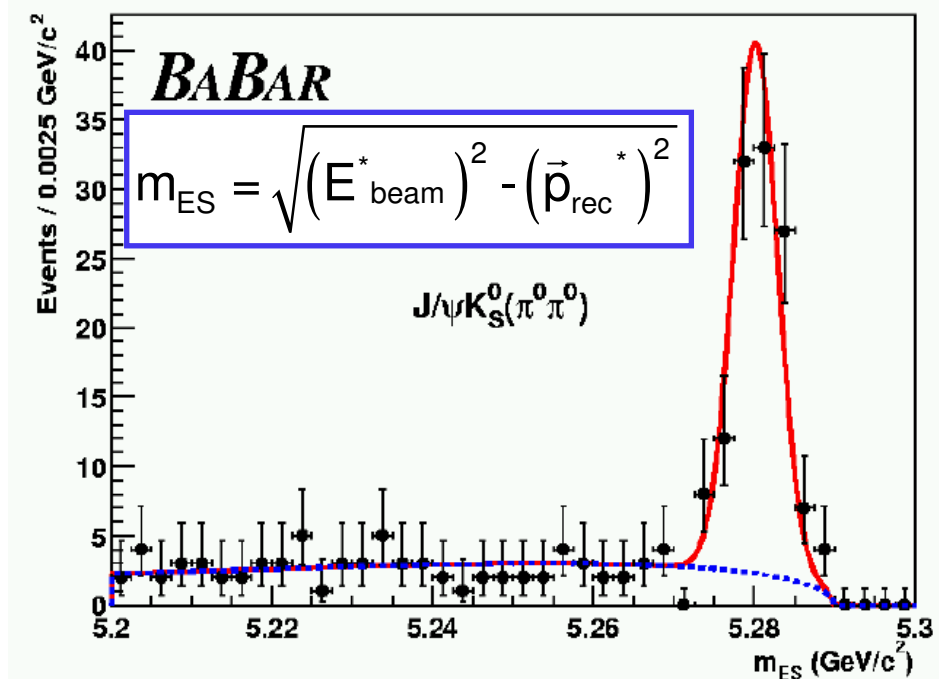
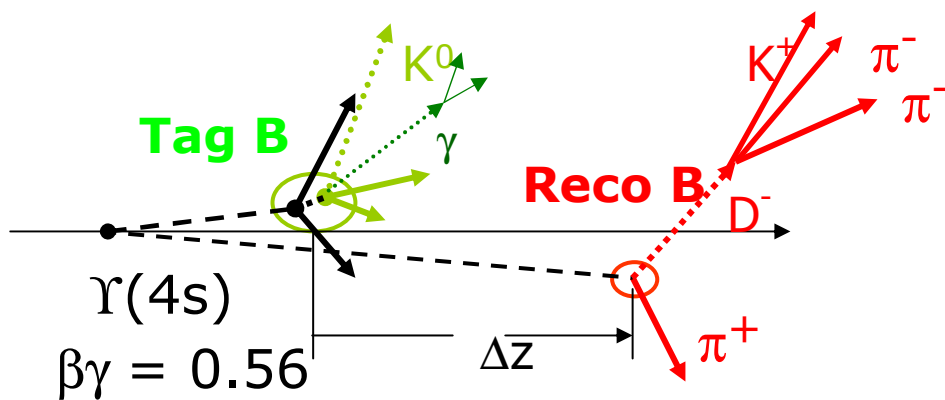
- nel “Golden Channel” per $\sin(2\beta)$: $B^0 \rightarrow K_S^0 J/\psi \rightarrow \pi\pi e^+e^-$

- “Flavor tagging” ($B_{\text{tag}} \rightarrow X e^{+/-}$)

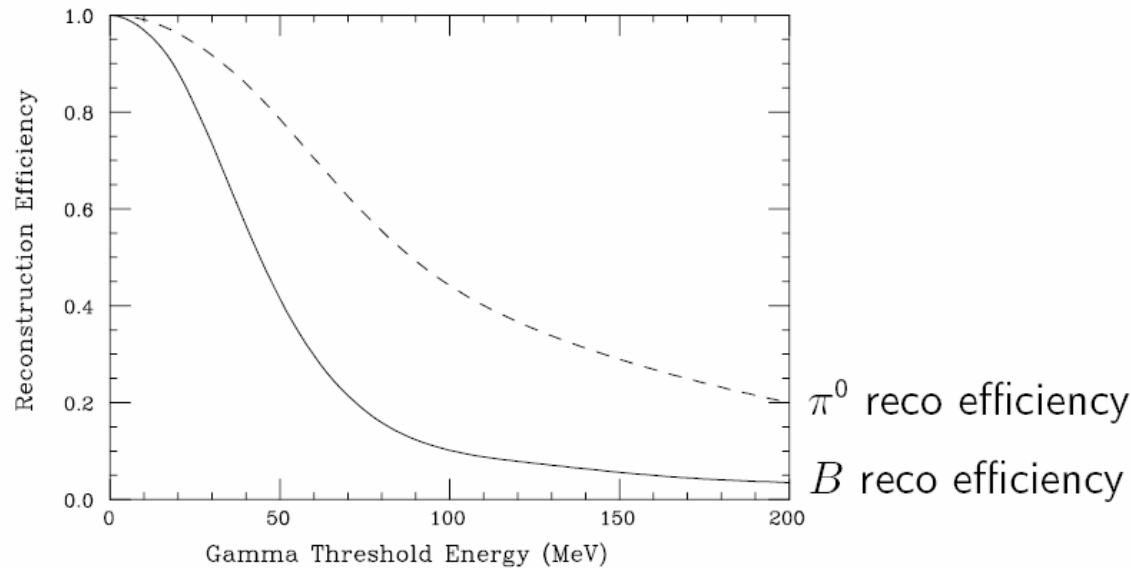
- **pioni neutri π^0 :**

- nel canale per $\sin(2\alpha)$: $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$

- **fotoni prompt e da decadimenti**



Richieste sul calorimetro



Properties of CsI(Tl) .

Parameter	Values
Radiation Length	1.85 cm
Molière Radius	3.8 cm
Density	4.53 g/cm ³
Light Yield	50,000 γ / MeV
Light Yield Temp. Coeff.	0.28%/°C
Peak Emission λ_{\max}	565 nm
Refractive Index (λ_{\max})	1.80
Signal Decay Time	680 ns (64%) 3.34 μ s (36%)

- Richiesta eccellente efficienza (>90%) dei γ nel range **20 MeV — 4 GeV** per i processi $B \rightarrow \pi^0\pi^0$, $b \rightarrow s \gamma$, misura del rapporto R con ISR...
- Alto **Light Yield** per consentire alta efficienza di ricostruzione dei B e dei π^0 → cristalli di CsI(Tl) [$Ly(CsI) = 50k\gamma/MeV$]
- Richiesta alta **granularità** per ottenere ottima **risoluzione angolare**, per ricostruzione delle masse invarianti ad **alta energia**

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})} \quad \longrightarrow \quad \frac{\delta m}{m} \approx \frac{\delta_{E_1}}{E_1} \oplus \frac{\delta_{E_2}}{E_2} \oplus \frac{\delta_{\theta}}{\tan\theta/2}$$

ECM – Calibrazione

● Energia misurata in ECM:

$$E_S = G \cdot F \cdot \sum_i c_i A_i$$

● Diversi tipi di calibrazione (c_i):

● Intercalibrazione:

→ I cristalli hanno differenti *LY (Light Yield)*

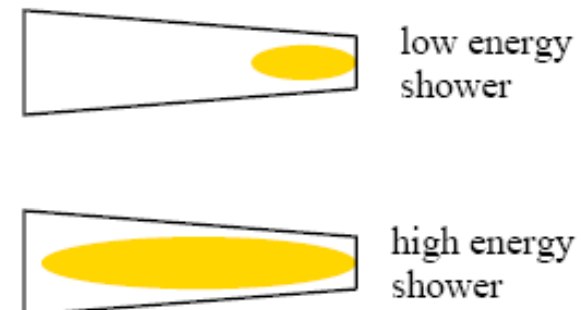
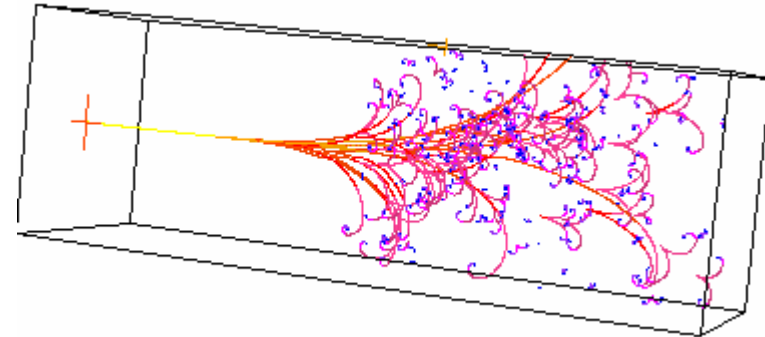
→ I cristalli hanno differenti **disomogeneità**

● **!!!** LY e disomogeneità varia nel tempo (in funzione della dose assorbita) → **monitoring**

● Correzioni dovute alla **forma dello shower**

→ $E_{\text{dep}} \neq E_{\text{true}}$

→ L'energia depositata dipende dal leakage che è funzione della geometria del detector e dal materiale



ECM – Calibrazione

- Descrizione della **Risoluzione** mediante la formula:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt[4]{E}} \oplus b$$

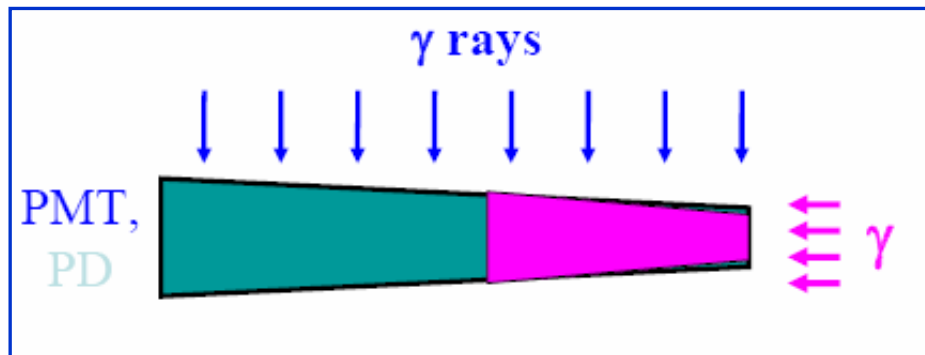
→ Termine stocastico $\sim a / 4\sqrt{E}$

b: Miscalibrazione, Leakage, Disuniformità cristalli

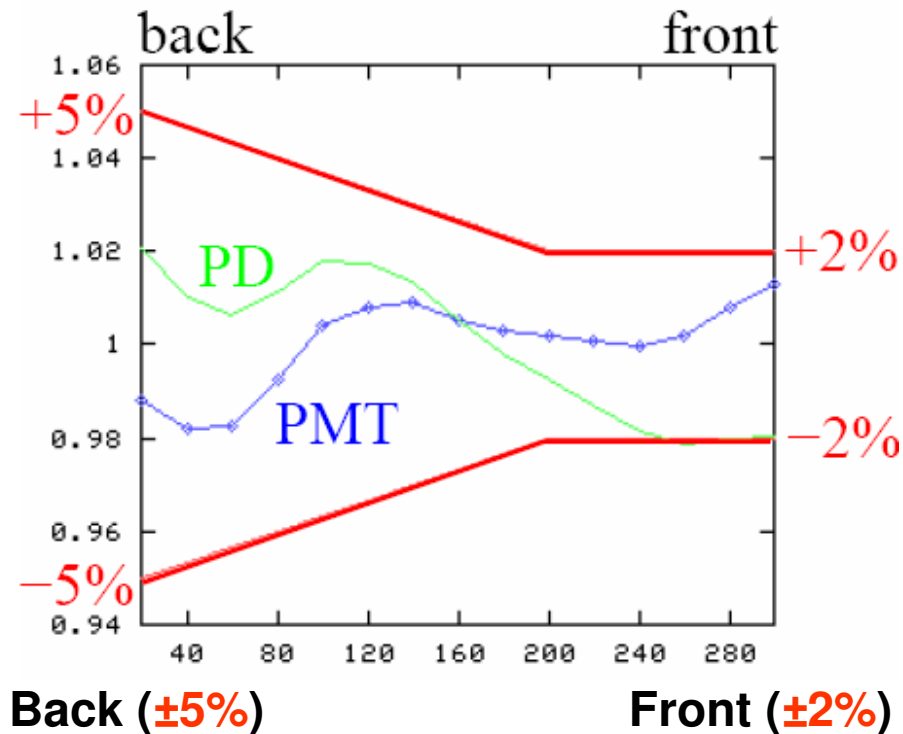
- Strategie di calibrazione con **scala di energia** e **durata** richiesta per la procedura

	Duration	Energy scale	Single Xtal	Absolute
Source	1/2 h	0.00613 GeV	✓	✓
Bhabha	12 h	3–9 GeV	✓	✓
Rad Bhabha	1 – 2 days	0.3 – 9 GeV	—	✓
Pi 0	4 h	0.03 – 3 GeV	—	✓
Electronics	15 min	0 – 13 GeV	✓	—
Light Pulser	3 min	0 – 13 GeV	✓	—

ECM – Test uniformità

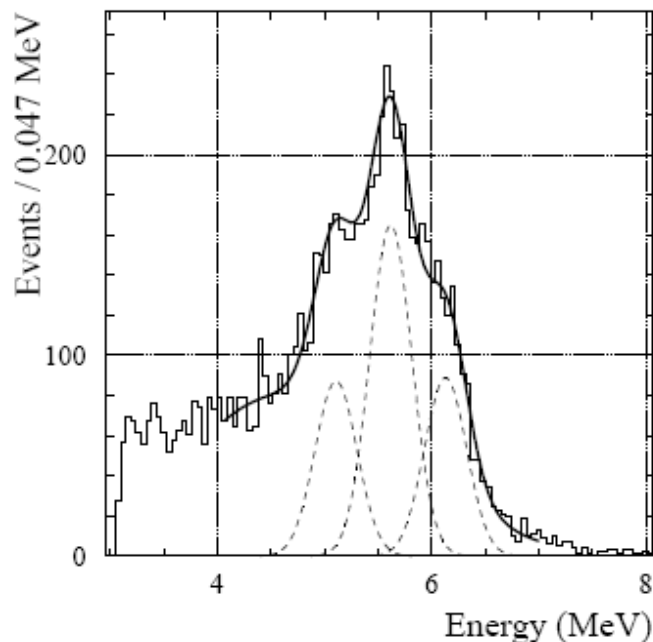


- Cristalli illuminati da diverse posizioni con raggi γ
- Testato l'andamento del LY in funzione della posizione con diversi fotorivelatori (PD, PMT)



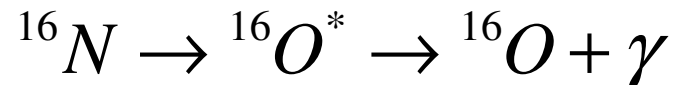
- La risposta in uniformità dipende da:
 - Chiarezza dei cristalli
 - Avvolgimento
 - Rifinitura superfici
 - Danni da radiazione
- Si richiede meno dello 0.5% di contributo a σ_E/E fino a 5 GeV

Calibrazione dei cristalli



- Calibrazione di ogni singolo cristallo mediante **sorgenti radioattive**

- Utilizzati fotoni dal decadimento:



- I fotoni hanno energia $E_\gamma = 6.13 \text{ MeV}$

- Fluido di ${}^{16}\text{N}$ attivato da neutroni da impianto termonucleare circola di fronte ai cristalli

- Lo spettro di fotoni presenta un doppio **“escape peak”** → misura risoluzione a bassa energia

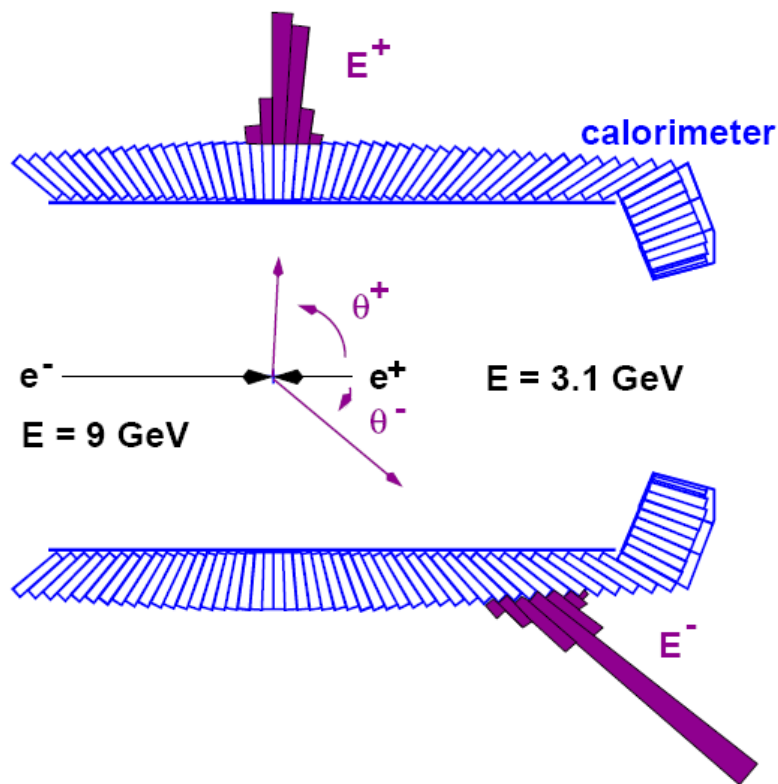
- **Tutti** i cristalli sono stati illuminati e calibrati

- Con 30 minuti di esposizione si sono ottenute le presioni sulla calibrazione:

$$\left(\frac{\sigma_E}{E} \right)_{E \approx 6 \text{ MeV}} = (0.35\%)_{stat} \pm (0.1\%)_{syst}$$

Calibrazione col Bhabha

- Utilizzo del processo Bhabha per la calibrazione $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
- Sezione d'urto teorica molto ben conosciuta \rightarrow noti i depositi attesi $\langle E_{\text{dep}} \rangle$
- Si costruisce da i depositi da Bhabha una statistica $\chi^2(c_i, \varepsilon_i)$:

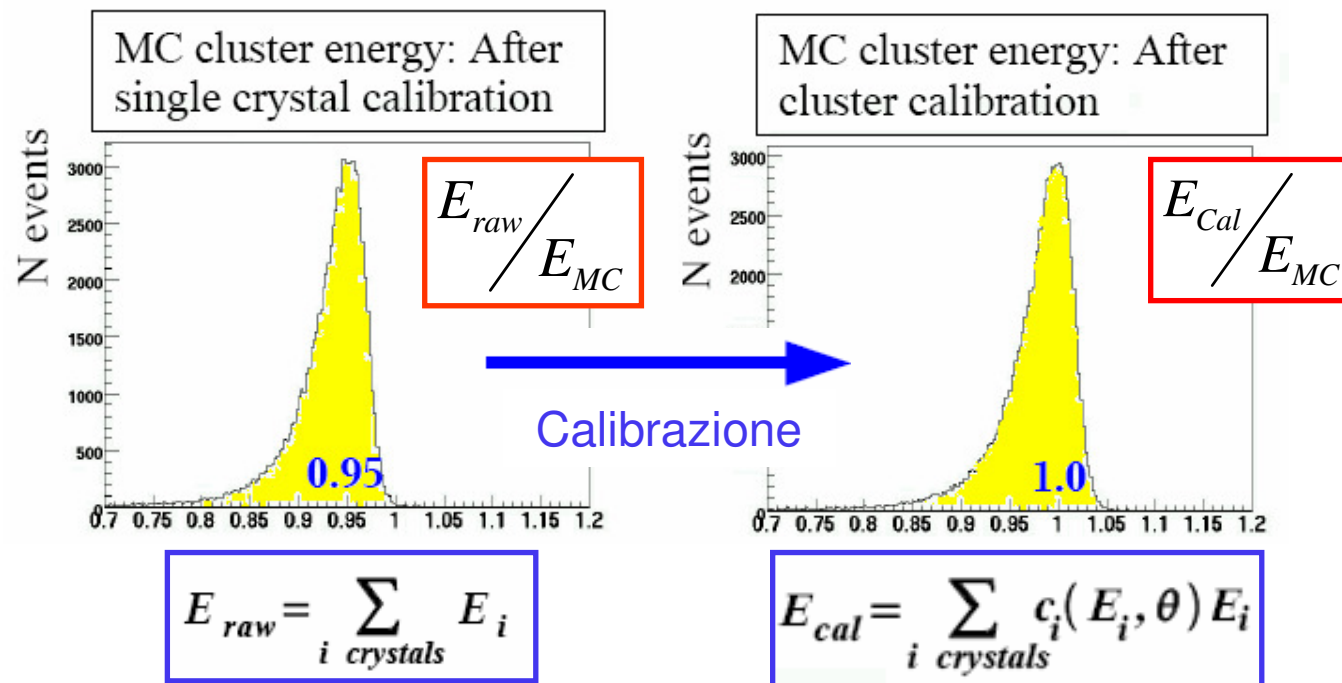


$$\chi^2 = \sum_{\text{events}} \frac{(\sum_i c_i \varepsilon_i - \langle E_i^{\text{dep}} \rangle^{\text{MC}})^2}{\sigma^2}$$

- **Minimizzazione** del χ^2 rispetto alle costanti di calibrazione c_i :
- Eseguita per via numerica con il **metodo dei minimi quadrati**
 \rightarrow inversione di una matrice 6850x6850

Calibrazione col Bhabha

- Costanti di calibrazione c_i ottenute con la **minimizzazione** del χ^2 utilizzate per costruire i cluster corretti:
- Si controlla la distribuzione di E_{Cal} / E_{MC} che deve piccare a 1.



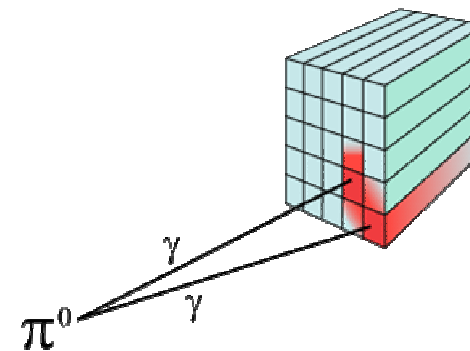
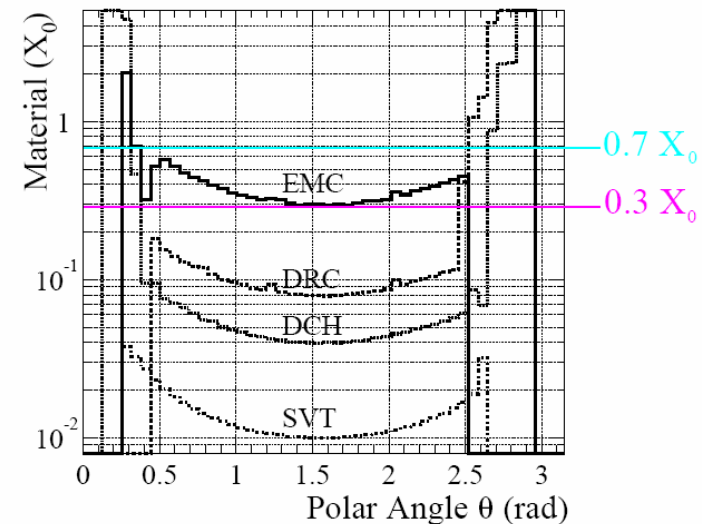
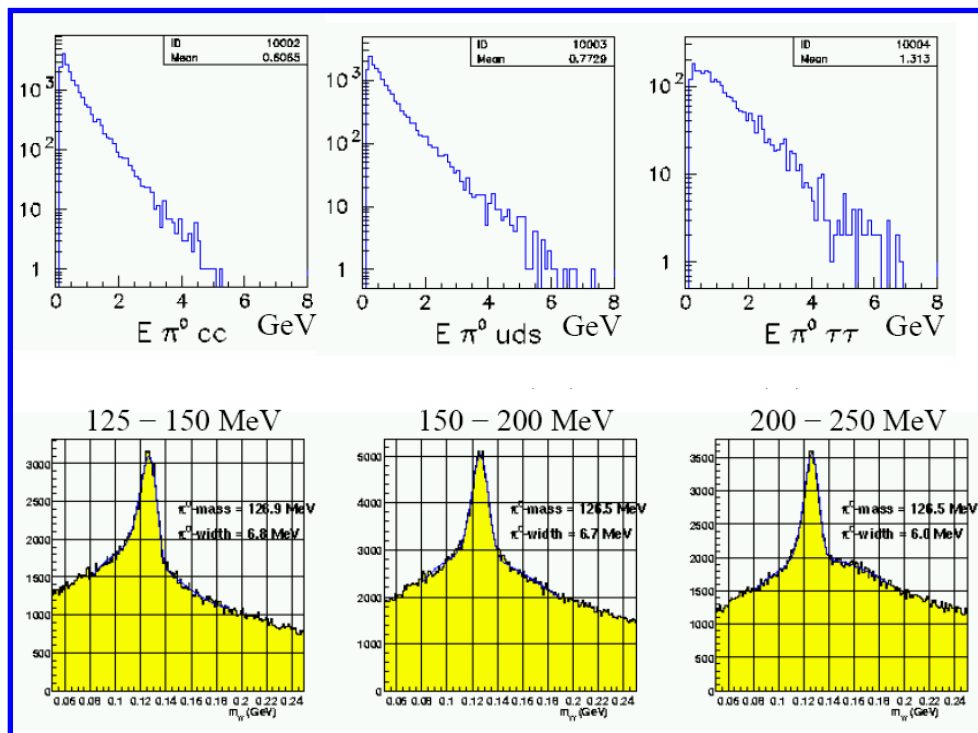
- La precisione di intercalibrazione ottenuta con questo metodo è:

$$\frac{\sigma_E}{E} = (1.8 \div 2.4)\% \quad E \in [4 \div 7.5 \text{ GeV}]$$

Calibrazione con i π^0

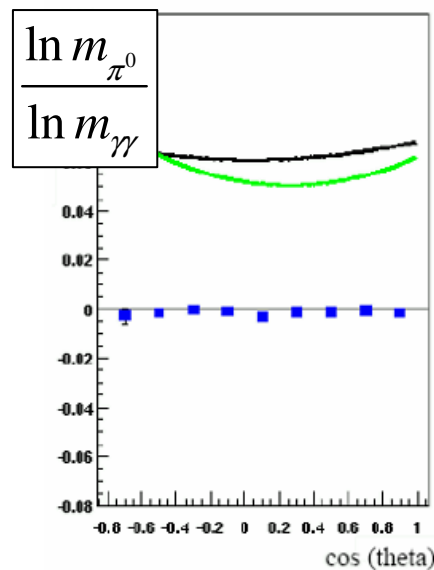
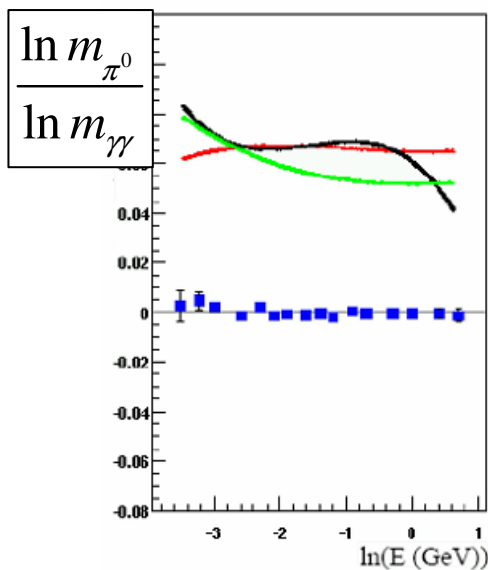
- Utilizzo dei fotoni da $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ per conversione da $E_{\text{DEP}} \rightarrow E_{\text{TRUE}}$
- Utilizzare il constraint sulla massa (nota) del π^0 per correggere l'energia dei fotoni $E_{\text{DEP}} \rightarrow E_{\text{TRUE}}$

Scelti $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ da diversi processi, diverse E_γ



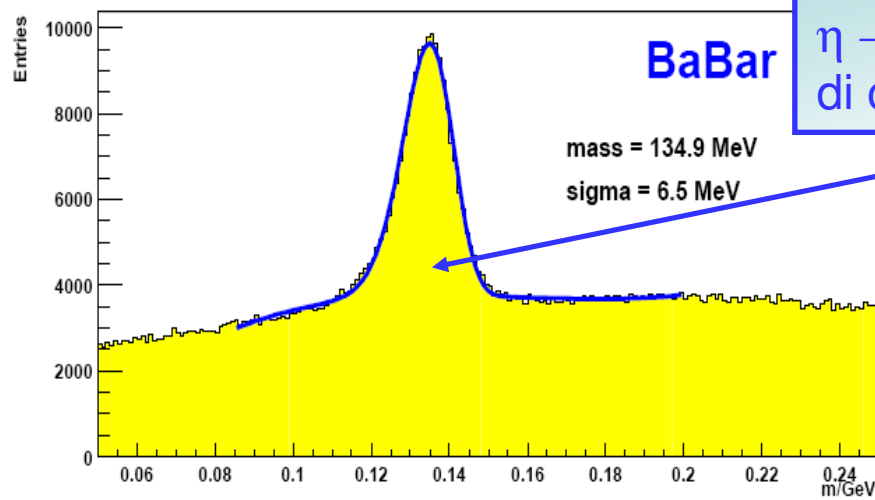
$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})}$$

Calibrazione con i π^0/η

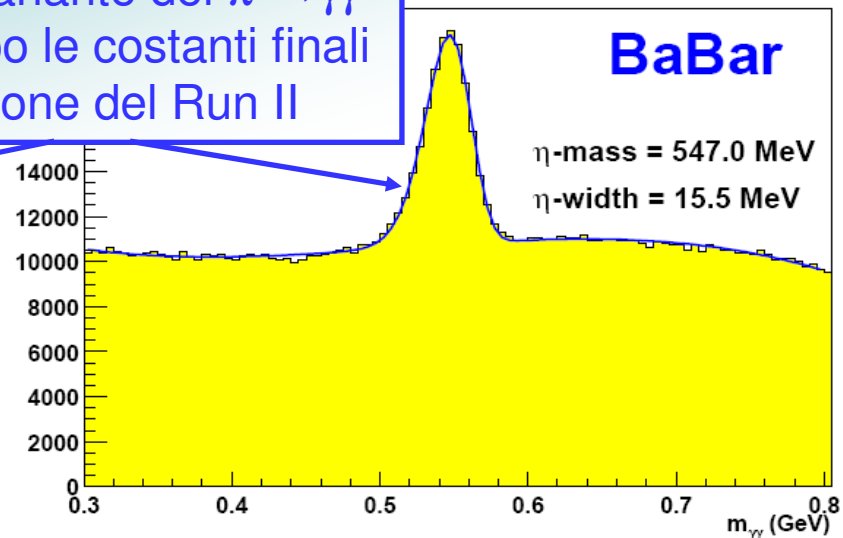


● Interpolati i bin con polinomi:

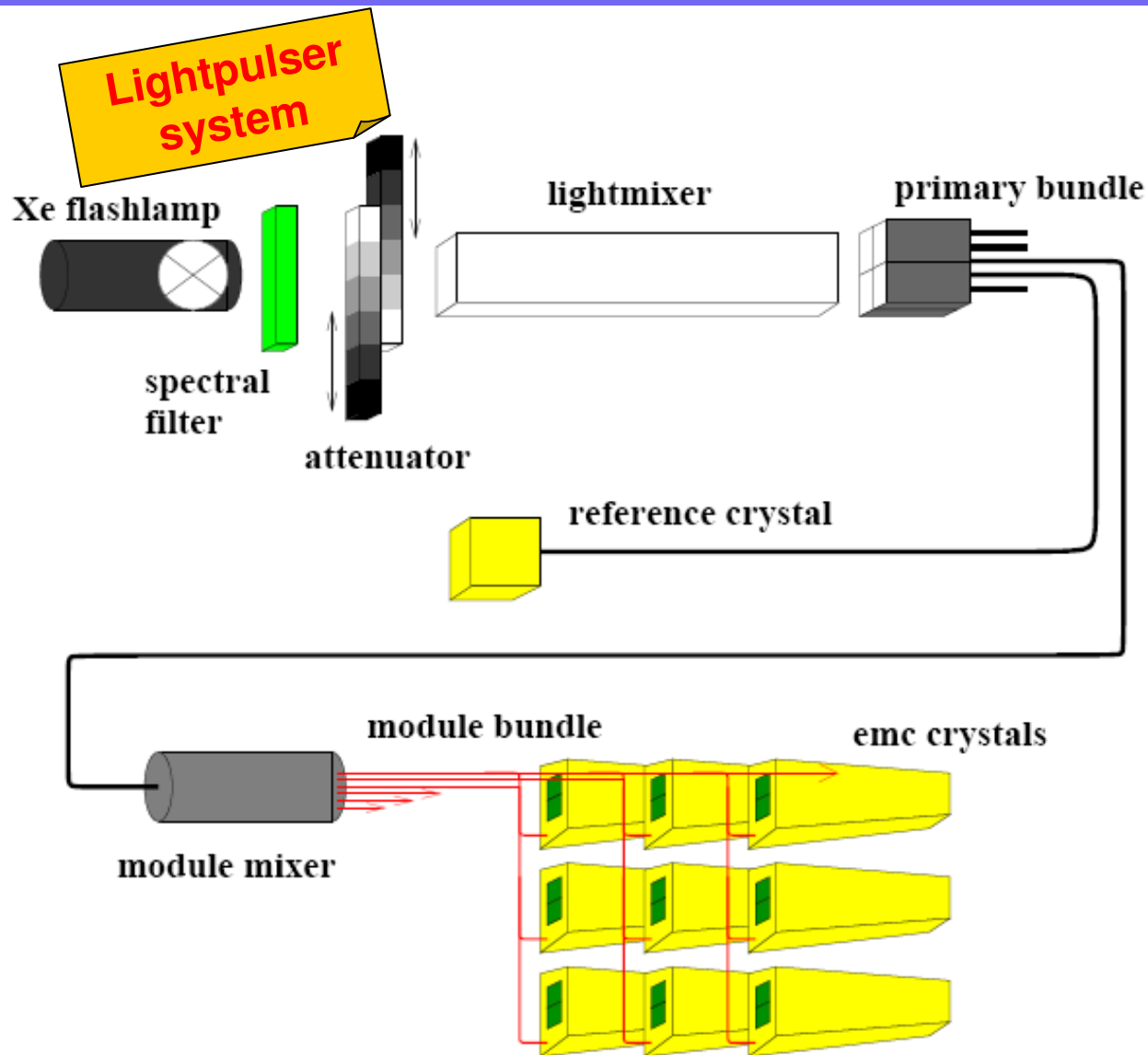
- Da tuning MC
- **Calibrazione Run I**
- **Calibrazione Run II**
- Dopo correzioni Run II



Massa invariante del $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ dopo le costanti finali
 di calibrazione del Run II

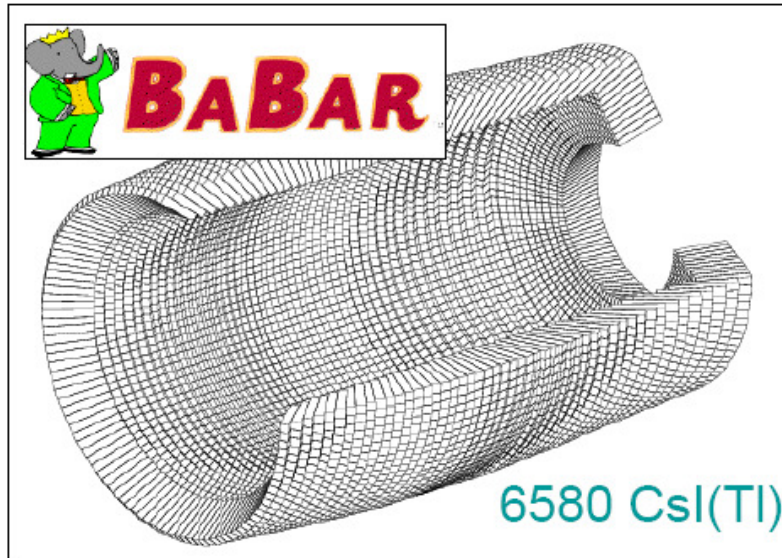


Monitoring



- **Calibrazioni quotidiane:** controllano l'intero percorso del readout
- La lampada copre l'equivalente dell'intero spettro misurabile, salvo le energie più basse
- **Guadagni calibrati iniettando carica nei preamplificatori**

ECM: risoluzione



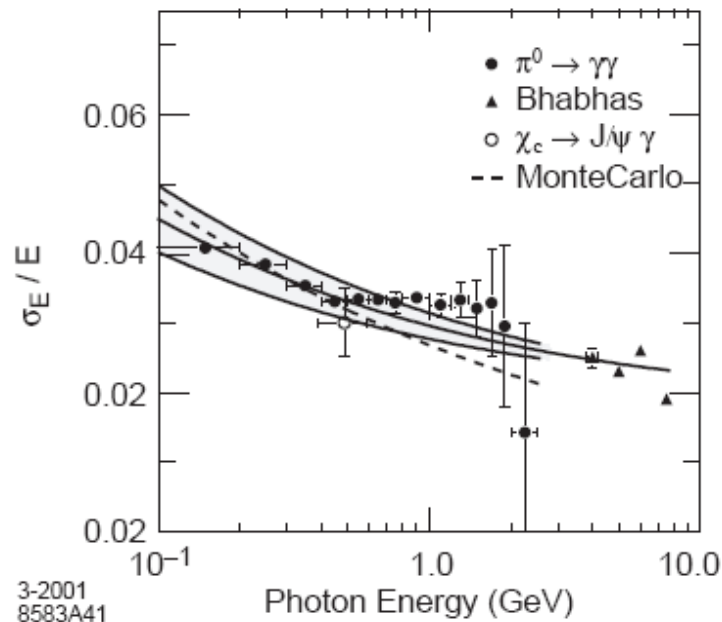
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\phi = \frac{d}{\sqrt{E}} \oplus f$$

- **Termine stocastico (a):** fluttuazioni nello sciame, statistica dei fotoelettroni, materiale davanti al calorimetro
- **Termine costante (b):** non uniformità del detector, incertezze di calibrazione
- **Termine di rumore (c):** rumore elettronico sommato su tutti i canali di readout in alcuni raggi di Moliere R_M .
- **La risoluzione in posizione** dipende da R_M e dalla granularità

ECM – Performance

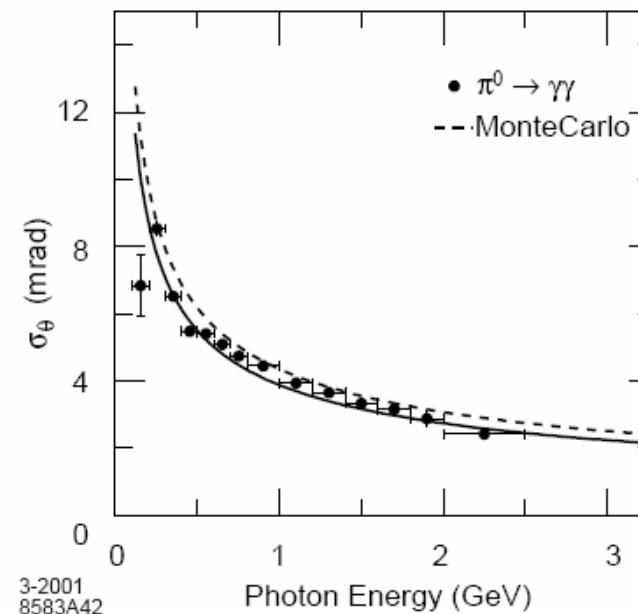
- Risultati finali di risoluzione in energia e in angolo utilizzando i processi Bhabha $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$; $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$; $\chi_c \rightarrow J/\psi \gamma$



$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt[4]{E}} \oplus b$$

- $a = 2.32 \pm 0.30 \%$

- $b = 1.85 \pm 0.12 \%$



$$\sigma_\theta = \sigma_\varphi = \frac{c}{\sqrt{E}} \oplus d$$

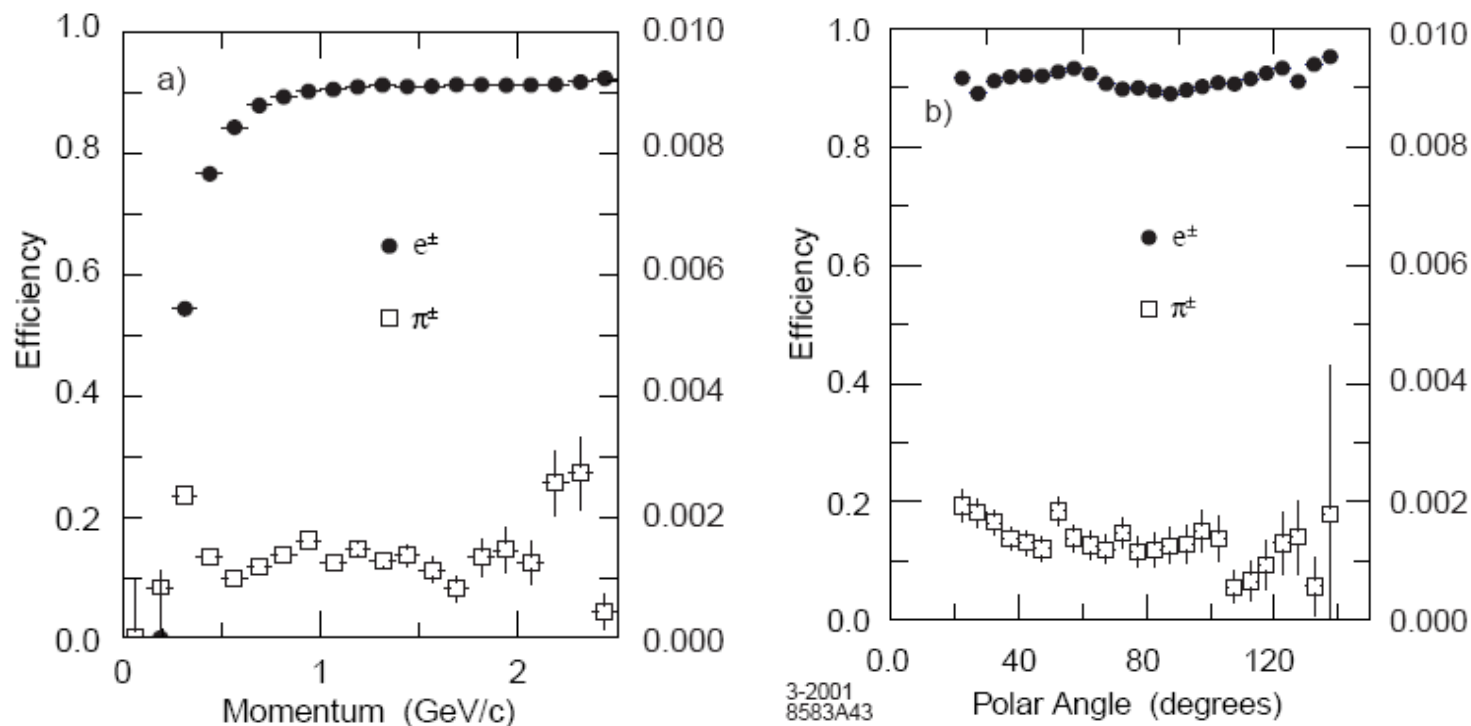
- $c = 3.87 \pm 0.07 \%$

- $d = 0.00 \pm 0.04 \%$

- Principali fonti di errori sistematici: **disuniformità nella collezione della luce** ($\leq 0.5\%$), **perdite dello sciame in avanti e indietro** (1%)

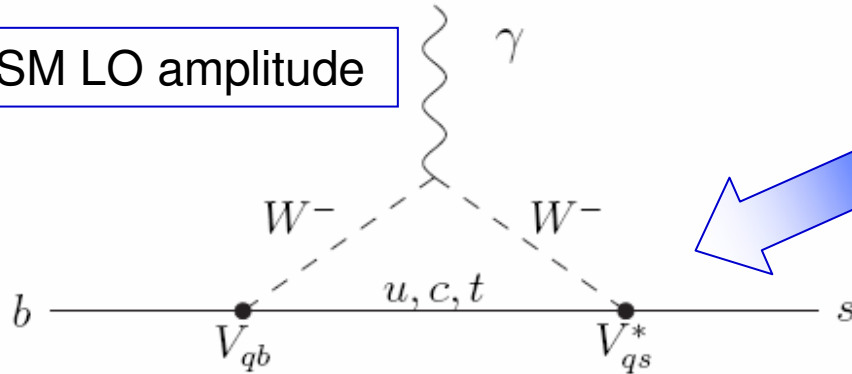
ECM – Performance

- Efficienze di ricostruzione degli e^\pm e probabilità di mis-id con π^\pm
→ n.b.: informazione combinata da Calorimetro + dE/dX + Č



ECM: una misura

SM LO amplitude



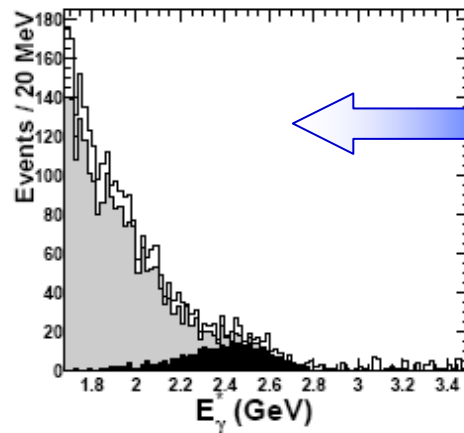
In questo loop può circolare anche un Higgs SM o un eventuale particella supersimmetrica:

→ **Segnatura di nuova fisica**

Per taggare l'evento e dunque misurare la **branching fraction** è **vitale misurare accuratamente E_γ**

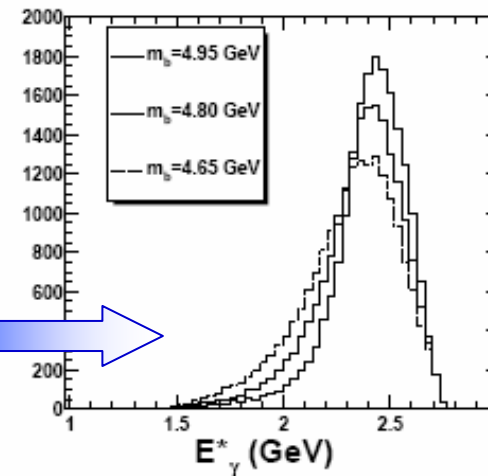
Constraint cinematico su E_γ

$$E_\gamma = \frac{M_B^2 - M_{had}^2}{2M_B}$$

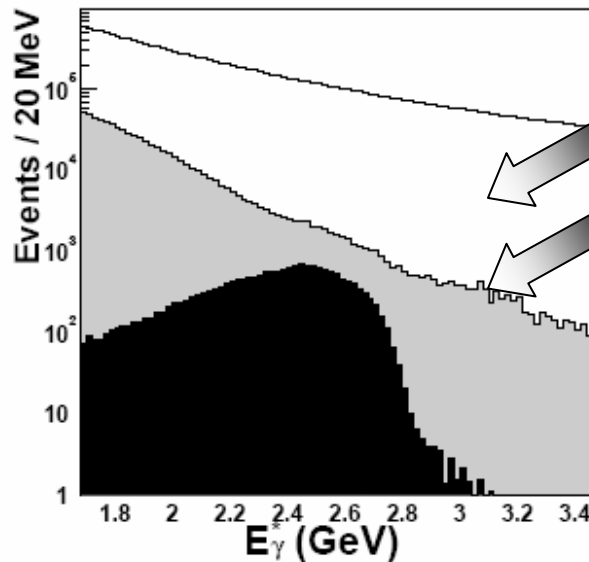


Spettro atteso:

- Confronto con i fondi attesi
- Diverse ipotesi di mass del b



ECM: una misura



Fondi principali:

- $e^+e^- \rightarrow qq (\tau\tau) + \text{ISR (FSR)}$
- $B \rightarrow \pi + X \rightarrow \gamma(\gamma) + X$

Strategia di analisi:

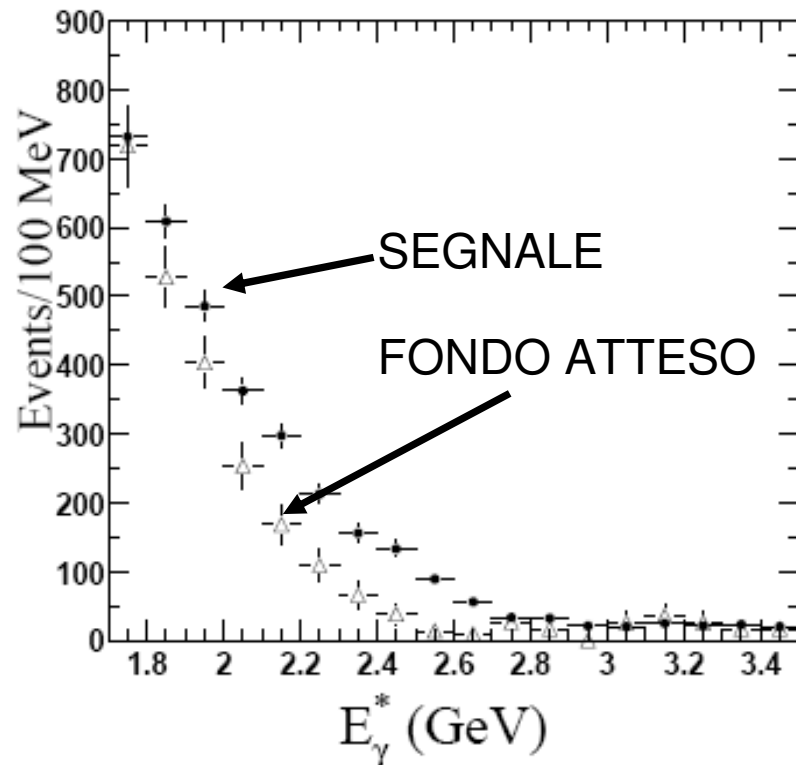
- tagli scelti in modo da massimizzare la **variabile statistica t**:

$$t = \frac{n_s^2}{(n_s + n_B + n_c / f_{off})}$$

Systematic Uncertainty	$\Delta\mathcal{B}(B \rightarrow X_s\gamma)/\mathcal{B}(\%)$
$B\bar{B}$ background estimation	± 7.8
Signal Monte Carlo statistics	± 2.6
Photon efficiency	± 2.5
Lepton tag efficiency	± 2.0
Energy scale	± 1.0
Energy resolution	± 1.0
Photon distance requirement	± 2.0
π^0/η veto	± 1.0
$B\bar{B}$ count	± 1.1
Total	± 9.3
Signal model dependence	+11.2, -5.9

- $1.5 < E_\gamma < 3.5$ GeV
- $-0.74 < \cos\theta_\gamma < 0.93$
- Shower shape cut \rightarrow Seleziona sciame da fotoni isolati (soppressione dei π/η)
- Anti-lepton tag (soppressione di BB)
- Tagli angolari $\cos\theta_{l\gamma}$ (soppressione FSR $e^+e^- \rightarrow l+l\gamma$)

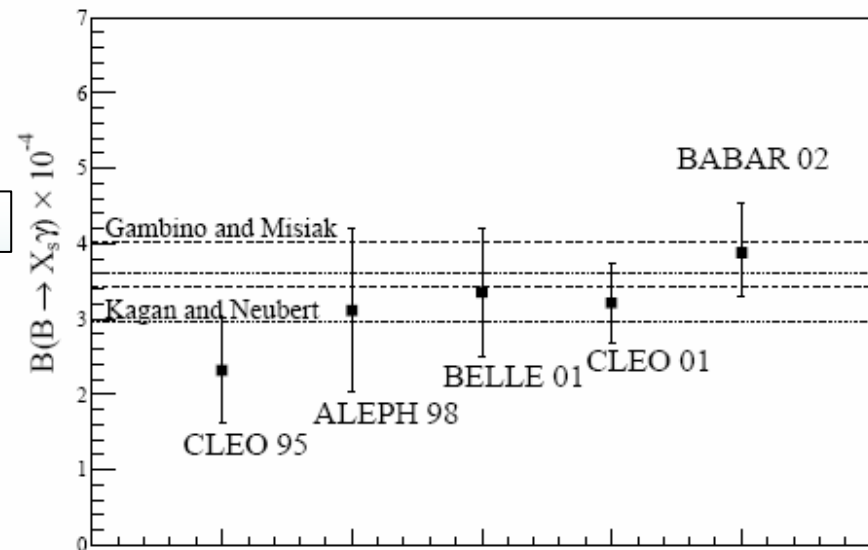
$b \rightarrow s\gamma$: risultati



Dopo i tagli rimangono 543 evt di segnale
Misura della Branching Fraction:

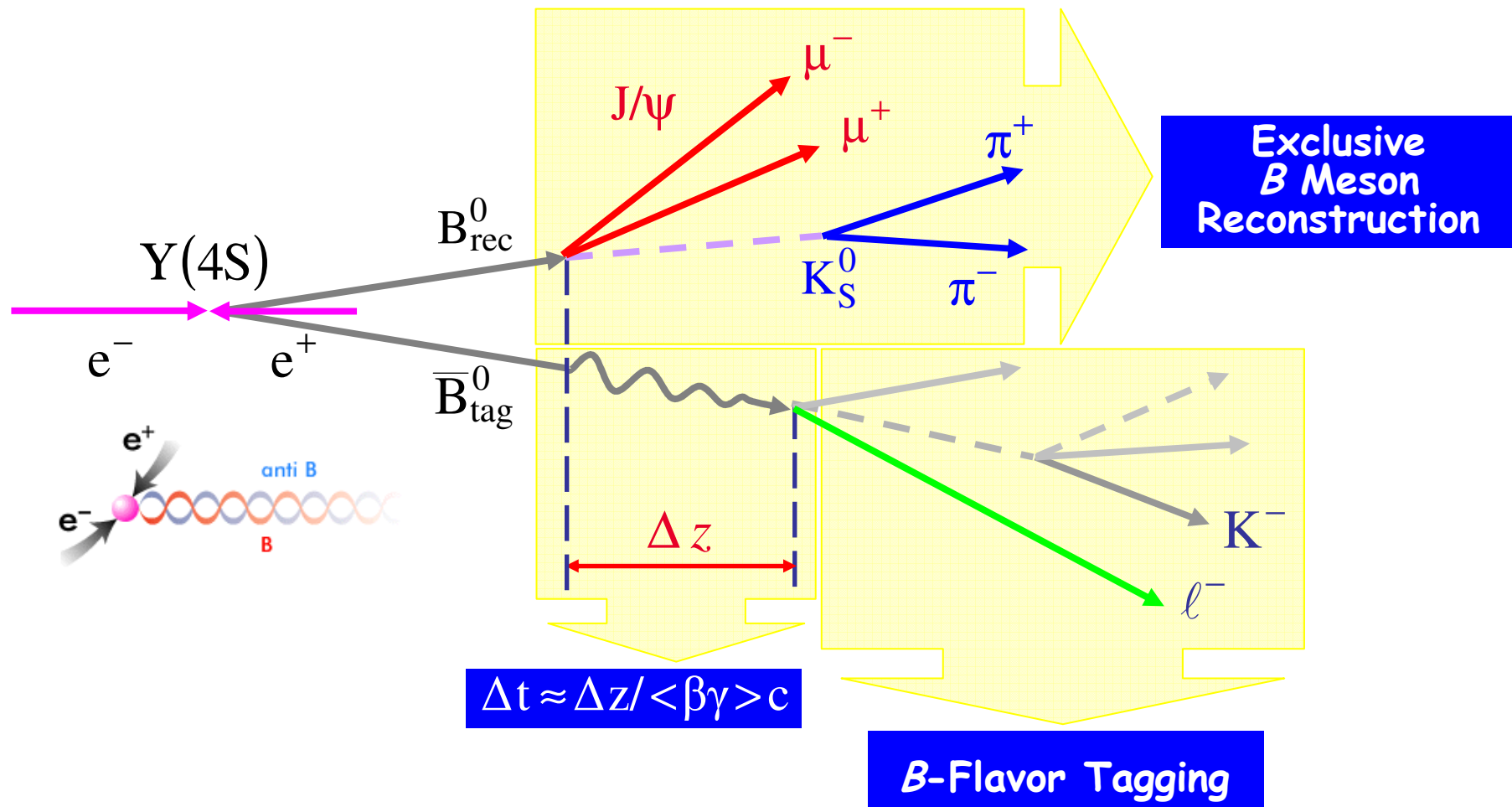
- **BF ($B \rightarrow X_s \gamma$) = 3.38×10^{-4}**
- Stat error: 0.36×10^{-4}
- Syst error : 0.37×10^{-4}
- Model error: 0.43×10^{-4}

**Segnale compatibile con le predizioni
NLO del Modello standard entro una σ**

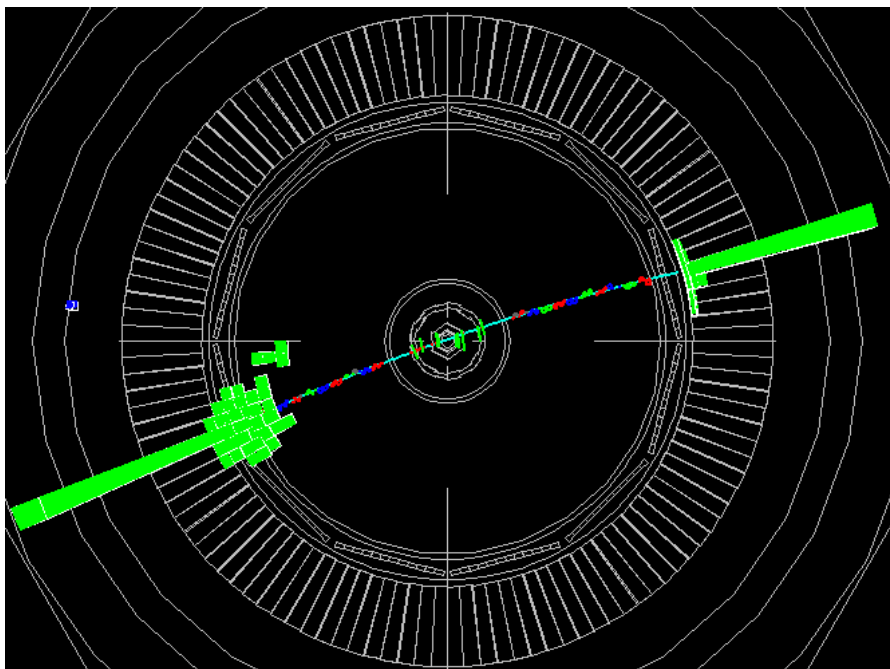


Backup Slides

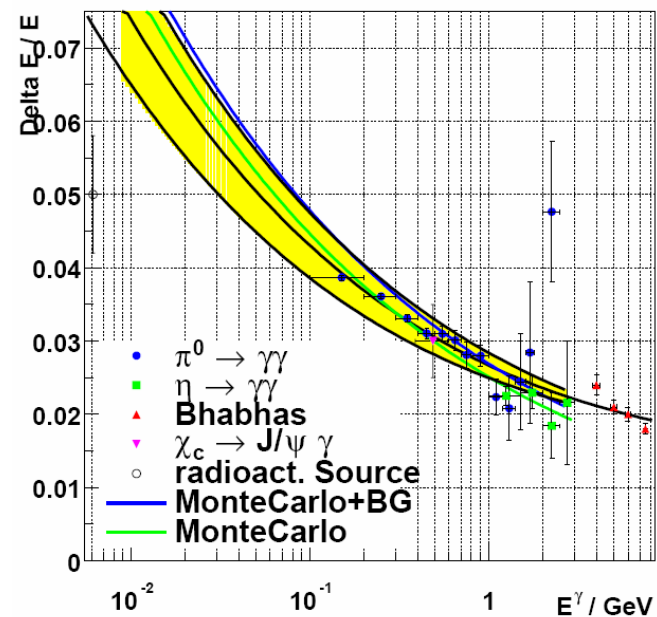
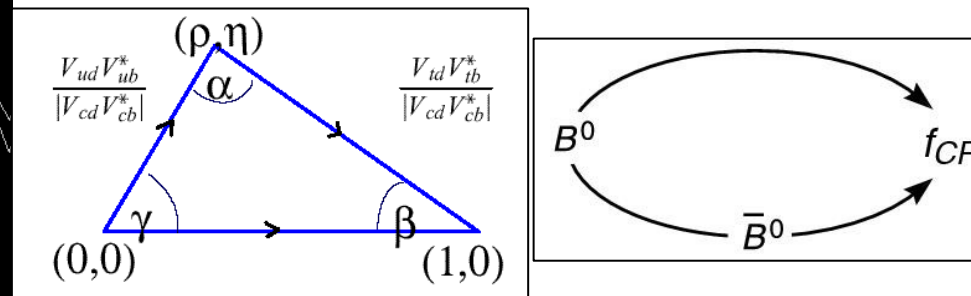
Fisica a BaBar



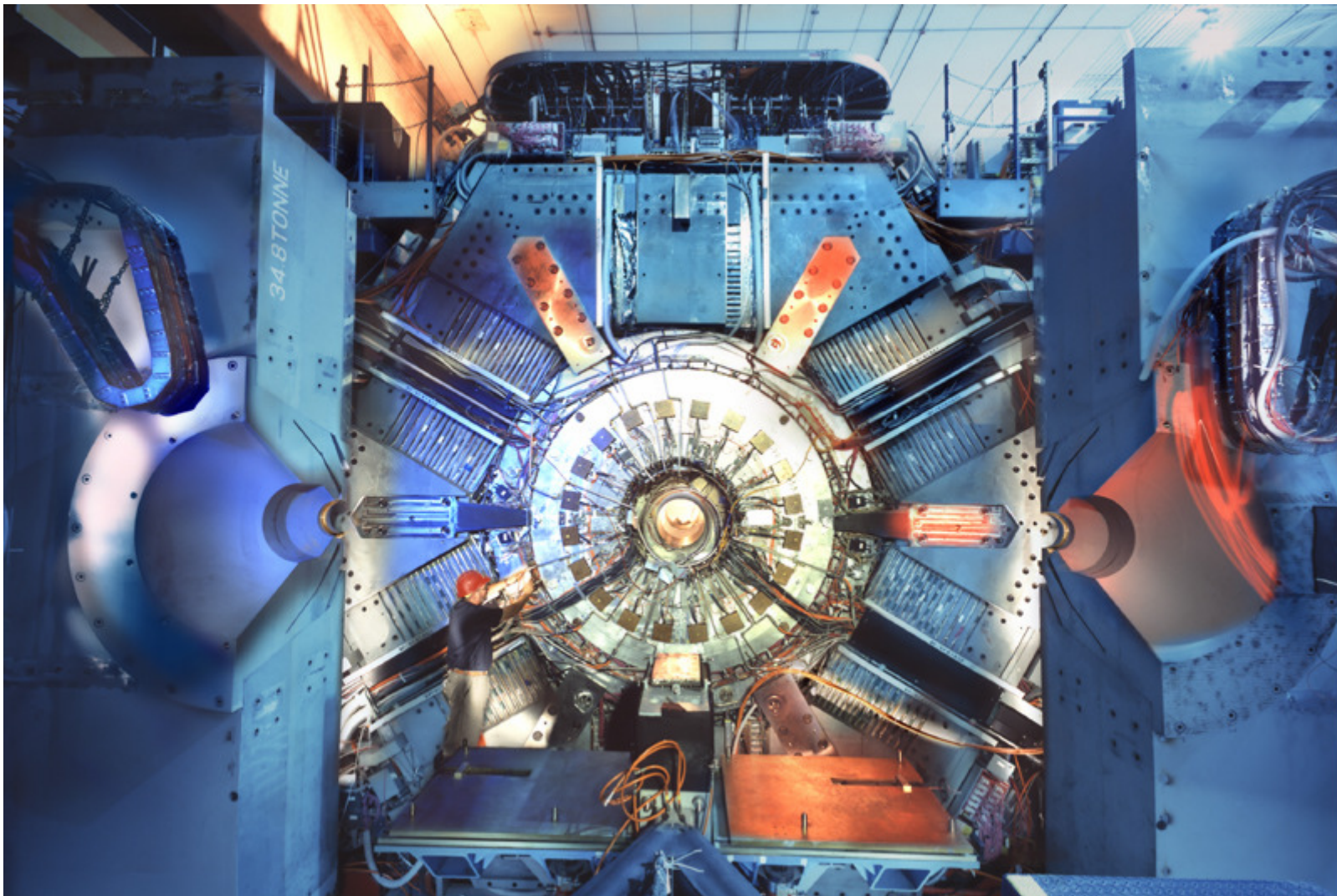
ECM – I @ work



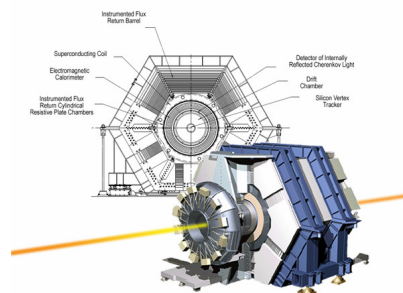
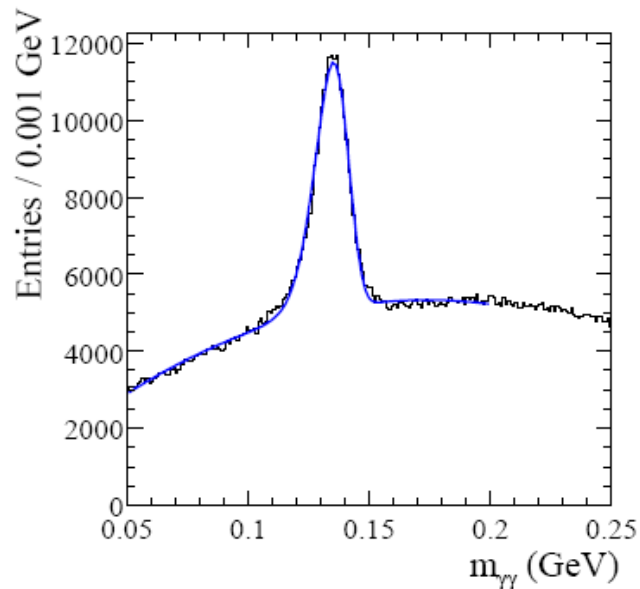
A nice Bhabha event $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ with EMC



ECM - I



Physics with EMC



$$m_{ES} = \sqrt{(E_{\text{beam}}^*)^2 - (\vec{p}_{\text{rec}}^*)^2}$$

