# Ottimizzazione della risoluzione temporale del futuro calorimetro elettromagnetico di LHCb

**Alberto Bellavista** 10/04/2025 Università e INFN, Bologna





ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

### Scaletta

### Introduzione: l'Upgrade 2 dell'ECAL di LHCb

- Studio delle simulazioni di un modulo Piombo-Polistirene
- Analisi di dati Test Beam
- Conclusioni

# <u>LHCb ECAL - Upgrade II</u>

- Attualmente: ECAL composto da moduli lacksquareShashlik
- Dose di radiazione accumulata da LHCb Upgrade 2: ~1 MGy (regione interna)
- Limite per Shashlik: 40 kGy
- L'alta luminosità richiederà:
  - Risoluzione temporale di poche decine di picosecondi
  - Resistenza alla radiazione
  - Risoluzione energetica confrontabile con quella attuale (10% termine di sampling, 1% termine constante)



Schema di un modulo Shashlik (Irina Machikhiliyan and LHCb calorimeter group. <u>https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/160/1/012047</u>)



Dose di radiazione attesa per la fare ad Alta Luminosità, in Gy ("Framework TDR for the LHCb Upgrade II: Opportunities in flavour physics, and beyond, in the HL-LHC era." https://inspirehep.net/literature/2707810)

3



# LHCb ECAL - Upgrade II

- PicoCal:
  - Parte interna: Calorimetro a **Spaghetti** (SpaCal)
  - Parte esterna: Shashlik
- SpaCal: fibre scintillanti inserite in un assorbitore passivo
  - Fibre: polistirene / cristalli di granato
  - Assorbitore: **piombo (Pb)** / **tungsteno (W)**

#### **Run 4:**

- W-Poly & Pb-Poly
- Readout singolo lato

#### **Dopo Run 4:**

- W-Crystal & Pb-Poly
- Readout doppio lato
- Informazione temporale 🗸
- Se le prestazioni con readout singolo sono abbastanza buone:
  - Possibilità di utilizzarlo anche dopo Run 4 (in alcune regioni)
  - Riduzione dei costi
  - Possibilità di aumentare la granularità









Direzione del fascio

### Scaletta

- Introduzione: l'Upgrade 2 dell'ECAL di LHCb
- Analisi di dati testbeam
- Conclusioni

### Studio delle simulazioni di un modulo Piombo-Polistirene

# <u>Tempo di arrivo di un segnale</u>

- Tempo di arrivo calcolato con l'algoritmo "Constant Fraction Discriminator" (CFD)
- Istante in cui il segnale supera una certa frazione del suo massimo
- La migliore frazione viene scelta in modo da ottimizzare la risoluzione
- Risoluzione = deviazione standard del campione dei lacksquaretempi di arrivo



https://en.wikipedia.org/wiki/Constant\_fraction\_discriminator

# Primi risultati

- Risoluzione ottenuta con e<sup>-</sup> incidenti nel centro del modulo (1 GeV e 10 GeV)
- Migliore risoluzione ad energie più alte (contributo della fotostatistica)
- Migliori risultati: PMT lenti (alto  $\tau$ )

#### **Perché?**

PMT lenti sono meno sensibili alle fluttuazioni longitudinali degli sciami elettromagnetici nel rivelatore

Simulazione Hybrid MC (LHCb TDR-024)



#### Resolution vs tau

Risultati ottenuti senza simulare rumore elettronico, fluttuazioni del segnale di singolo fotoelettrone e guide di luce



# Profondità degli sciami

- Profondità dello sciame e tempo di arrivo del segnale sono correlati. Per  $\bullet$ sciami più profondi:
  - ▶ I fotoni diretti arrivano prima al PMT -> Correlazione negativa

#### Sciame meno profondo





- Baricentro dei depositi di energia
- Fotoni riflessi
- Fotoni diretti

#### Sciame più profondo



# Profondità degli sciami

- Profondità dello sciame e tempo di arrivo del segnale sono correlati. Per sciami più profondi:
  - ► I fotoni diretti arrivano prima al PMT —> Correlazione negativa
  - I fotoni riflessi arrivano in ritardo
  - Il tempo di arrivo (CFD) è influenzato dalla profondità dello sciame Questo bias peggiora la risoluzione temporale

#### Sciame meno profondo



-> <u>Correlazione positiva</u>

- Baricentro dei depositi di energia
- Fotoni riflessi
- Fotoni diretti



## Profondità degli sciami

- Questo effetto è più rilevante per i PMT veloci (discriminano meglio la componente diretta da quella riflessa) Influenza la forma dei segnali -> L'algoritmo CFD non ne tiene conto
- Dipende dalla soglia CFD scelta:
  - Soglie basse rilevano principalmente i fotoni diretti Per alcune soglie le due correlazioni si cancellano a vicenda, migliorando la risoluzione finale



Simulazione Hybrid MC (<u>LHCb TDR-024</u>)



### <u>Scaletta</u>

- Introduzione: l'Upgrade 2 dell'ECAL di LHCb
- Studio delle simulazioni di un modulo Piombo-Polistirene
- Analisi di dati Test Beam
- Conclusioni

### ell'ECAL di LHCb n modulo Piombo-Polistirene

## <u>CERN SPS (20-100 GeV)</u>



DAQ: segnali digitalizzati con il digitizer V1742 CAEN basato sulla DRS4 con 5 GS/s

## Risoluzione temporale

- Modulo: SpaCal W-Poly, 4 celle, 2x2 cm<sup>2</sup> ognuna
- Fibre Kuraray SCSF-78
- Confronto tra 4 PMT
- Voltaggi dei PMT scelti per sfruttare l'intero intervallo disponibile del digitizer
- PMT più veloci (R14755U e R9880U) forniscono risoluzioni peggiori



$$\sigma_T(E) = \frac{sampl.}{\sqrt{E}}$$





### Correzione dei tempi di arrivo

Le simulazioni mostrano che il tempo di salita è altamente correlato alla profondità degli sciami

È possibile sfruttarlo per rimuovere il bias

- Fit polinomiale: tempo di arrivo *t vs* tempo di salita di ogni segnale —> curva di correzione *f*
- Tempo di arrivo corretto:  $\hat{t}_j = t_j f_j$
- La risoluzione temporale corretta è la deviazione standard di  $\hat{t}$





#### Prima vs dopo la correzione del bias





15

### Risoluzione temporale corretta

- Come atteso, correzioni più ampie per PMT veloci (R9880U and R14755U)
- Risoluzioni migliori ottenute comunque con PMT più lenti
- Qui, la migliore soglia CFD è sempre 10% o 90%

### $\sigma_T(E) = \frac{sampl.}{\sqrt{E}}$

Time resolution vs energy (corrected) - SCSF-78 (blue) fibres



 $- \oplus const$  .

## DESY - Hamburg (1-5 GeV)



### <u>**Risoluzione temporale**</u> (SpaCal W-Poly, 4 celle, 2x2 cm<sup>2</sup>)





- Confronto tra fibre diverse
- Solo le fibre con scintillazione più veloce (SCSF-78)  $\bullet$ hanno una correzione visibile
- A queste energie non c'è correzione significativa  $\bullet$





### Come cambia il bias a energie diverse?

- Energie diverse causano diverse profondità degli sciami
- Correlazione positiva (negativa) causata dai fotoni riflessi (diretti)



gli sciami toni riflessi (diretti)

### <u>Confronto tra diverse soglie CFD</u>

- Per alcune soglie CFD, la distribuzione dei tempi di arrivo presenta delle code
- Effetto causato dalle fluttuazioni longitudinali degli sciami
- Comportamento simile per tutte le energie (1-5 GeV)





-5.5

### <u>Scaletta</u>

- Introduzione: l'Upgrade 2 dell'ECAL di LHCb
- Studio delle simulazioni di un modulo Piombo-Polistirene
- Analisi di dati Test Beam
- Conclusioni

### ell'ECAL di LHCb n modulo Piombo-Polistirene

## Conclusioni

- rilevato
  - Modifica della forma dei segnali

#### L'algoritmo CFD non ne tiene conto

- migliorando la risoluzione
- Risoluzioni di poche decine di picosecondi ottenute

Buone capacità di misura temporale per i moduli SpaCal anche con readout singolo

- **Prossimi passi:** 
  - Elettronica dedicata in fase di sviluppo
  - Test sfruttando una catena DAQ simile a quella finale

Nei moduli SpaCal con readout singolo, la profondità degli sciami influenza il tempo di arrivo

Sfruttando il tempo di salita dei segnali, è possibile rimuovere (parzialmente) questi effetti,

### Grazie per l'attenzione!





ALMA MATER STUDIORUM Università di Bologna



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare





### Backup



ALMA MATER STUDIORUM Università di Bologna



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

- Studio della risoluzione temporale di un modulo simulato
- Elettroni di 1 GeV e 10 GeV
- Modulo SpaCal Pb + Polistirene
- Readout solo sul retro







## <u>Simulazione dei PMT</u>

Impulso di singolo fotoelettrone:





$$f(t) = A \cdot t^2 \cdot e^{-t/\tau} \qquad A = \frac{R \cdot \text{gain} \cdot q_e}{\tau^3} \cdot 10^9$$









#### Tau = 0.1 ns (FWHM = 0.35 ns)







#### Tau = 2.0 ns (FWHM = 7 ns)







# Risultati della simulazione

- **Risoluzione corretta** = deviazione standard dei tempi di arrivo corretti  $\hat{t}$
- PMT veloci ricevono correzioni più ampie
- La soglia CFD ottimale può essere diversa dal caso in cui non si applica la correzione. Qui: 10% o 90%
  - A questi livelli: correlazione massima tra profondità dello sciame e tempo di arrivo
  - Correzioni massime



Best resolutions vs tau

Risultati ottenuti senza simulare rumore elettronico, fluttuazioni del segnale di singolo fotoelettrone e guide di luce



### Come cambia il bias a energie diverse?

- Energie diverse causano diverse profondità degli sciami
- Correlazione positiva (negativa) causata dai fotoni riflessi (diretti)



gli sciami toni riflessi (diretti)

#### Prima della correzione



#### Dopo la correzione



### Confronto tra diverse soglie CFD

- Per alcune soglie CFD, la distribuzione dei tempi di arrivo presenta delle code
- Effetto causato dalle fluttuazioni longitudinali degli sciami
- Comportamento simile per tutte le energie (1-5 GeV)



#### tempi di arrivo presenta delle code li degli sciami 1-5 GeV)

### Confronto tra soglie CFD - DESY





### Confronto tra soglie CFD - DESY



34

#### Segnale di singolo fotoelettrone

PMT	FWHM (ns)	Tempo di salita 10-90 % (ns)
R7600U	3.2	1.6
R9880U	1.25	0.57
R14755U	0.68	0.4
R11187	/	/

Valori dati dal produttore (Hamamatsu)

#### Quantum efficiency

	SCSF-78	3HF
R7600U	12%	12%
R9880U	15%	18%
R14755U	26%	10%
R11187	/	/

Valori dati dal produttore (Hamamatsu)

#### Tempo di salita misurato

Fibre	Tempo di salita 10-90 (ns), E = 1 GeV
3HF	2.5 ns
Luxium	3.0 ns
SCSF-78	1.9 ns
3HF+Bundle	2.5 ns



## <u>Modello di risoluzione temporale</u>

Risoluzione temporale in funzione del numero di fotoni che arrivano al PMT: lacksquare

$$\sigma_T(N_{ph}) = \frac{a}{N_{ph}} \bigoplus \frac{b}{\sqrt{N_{ph}}} \bigoplus C$$

• Assumendo linearità:  $N_{ph} \propto E$  (energia del  $e^-$  incidente)

$$\sigma_T(E) =$$

- Termine di rumore
- Termine di sampling
- Termine costante

$$\frac{a'}{E} \oplus \frac{b'}{\sqrt{E}} \oplus c'$$

## <u>Modello di risoluzione temporale</u>

- **Termine di rumore:** causato dalle fluttuazioni dovute al rumore elettronico
- PMT più veloci (tempo di salita più rapido) causano termini di rumore minori
- Con l'algoritmo CFD, può essere stimato come  $\bullet$

 $\sigma_{T_{noise}}$ 

Sottraendolo in quadratura, la risoluzione in funzione dell'energia diventa: lacksquare

$$=\sqrt{\frac{2}{3}}\frac{\sigma_n}{dA/dt}$$

- $\sigma_n$  = std. dev. del rumore elettronico
- A = ampiezza del segnale

$$=\frac{b'}{\sqrt{E}}\oplus c'$$

Ref: Eric Delagnes, June 2016, "What is the theoretical time precision achievable using a dCFD algorithm?"



