Ottimizzazione della risoluzione temporale del futuro calorimetro elettromagnetico di LHCb

Alberto Bellavista

10/04/2025 Università e INFN, Bologna





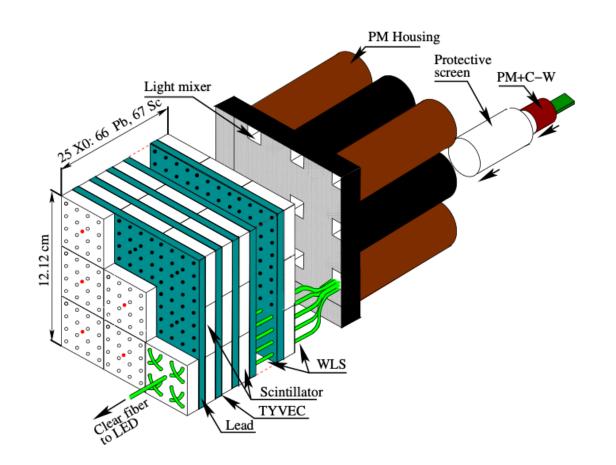


<u>Scaletta</u>

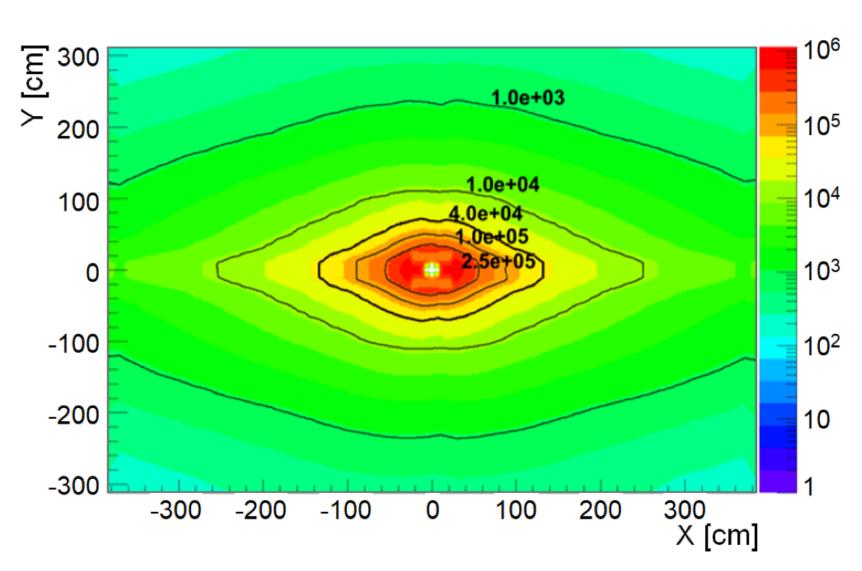
- Introduzione: l'Upgrade 2 dell'ECAL di LHCb
- Studio delle simulazioni di un modulo Piombo-Polistirene
- Analisi di dati Test Beam
- Conclusioni

LHCb ECAL - Upgrade II

- Attualmente: ECAL composto da moduli Shashlik
- 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. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/160/1/012047)



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)

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)

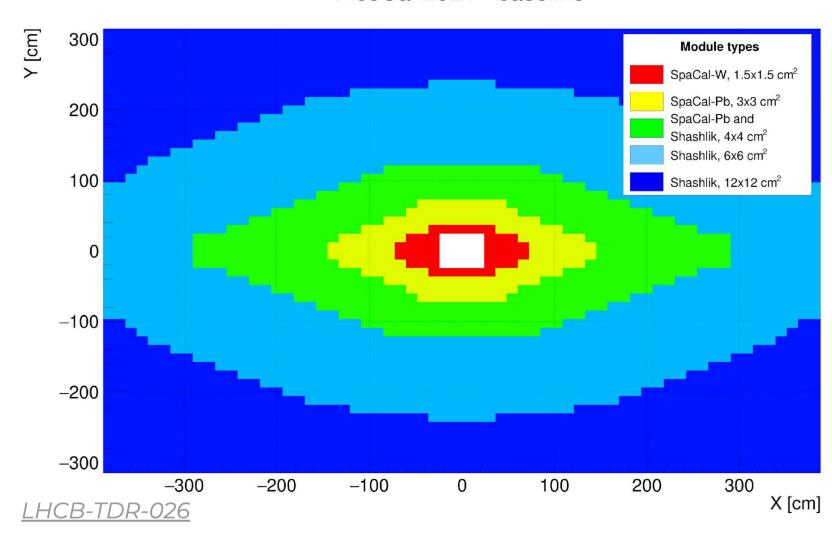
→ Run 4:

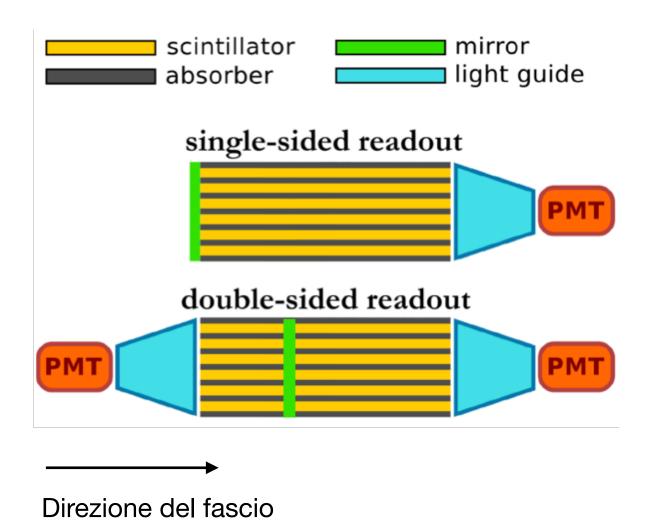
- W-Poly & Pb-Poly
- Readout singolo lato

→ 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

PicoCal 2024 - baseline



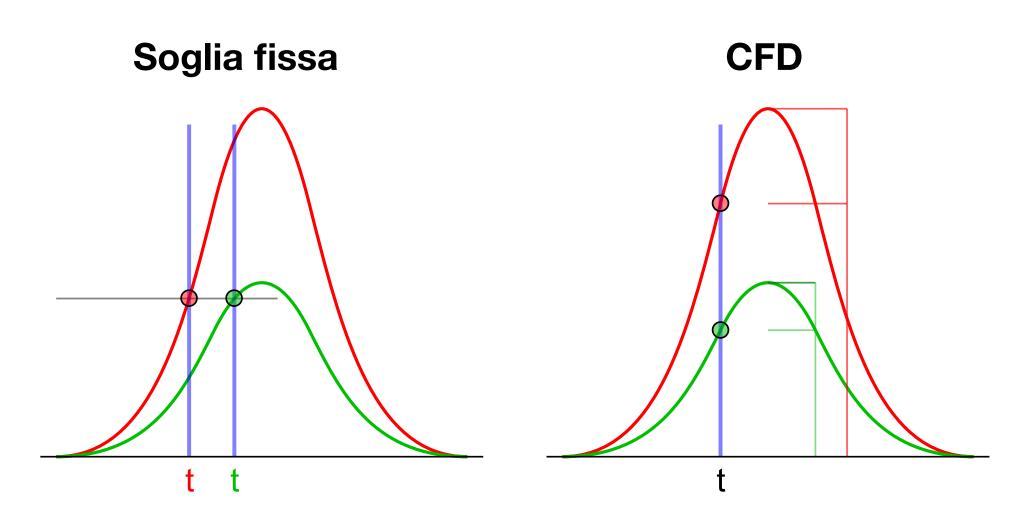


<u>Scaletta</u>

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

Tempo di arrivo di un segnale

- 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 tempi di arrivo



https://en.wikipedia.org/wiki/Constant_fraction_discriminator

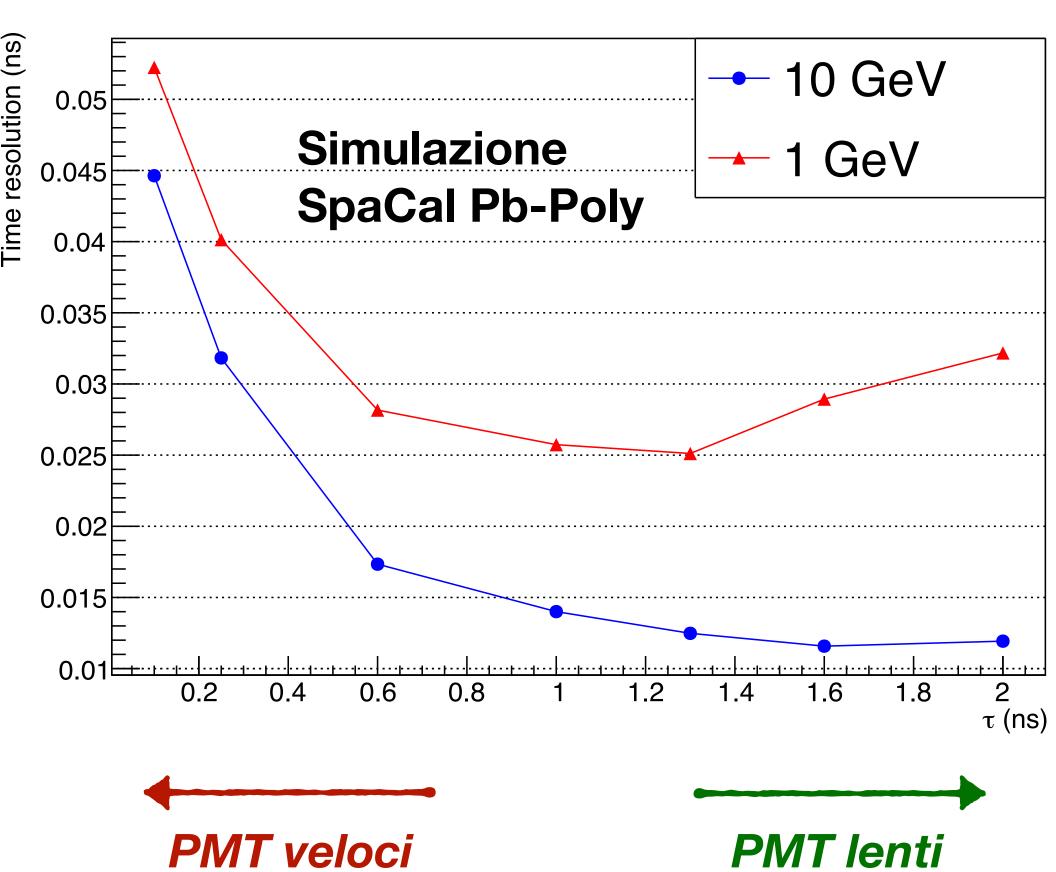
Primi risultati

- Risoluzione ottenuta con e- incidenti nel centro del modulo (1 GeV e 10 GeV)
- Migliore risoluzione ad energie più alte (contributo della fotostatistica)
- Migliori risultati: PMT lenti (alto τ)

Perché?

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

Resolution vs tau

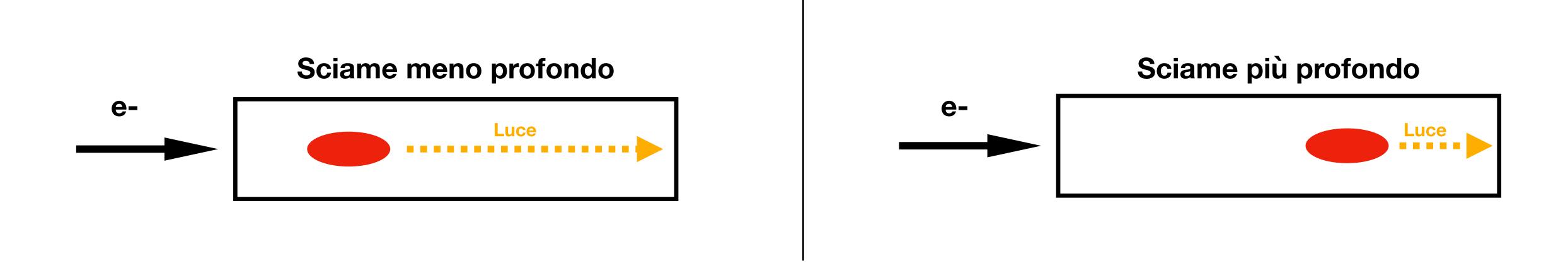


Risultati ottenuti senza simulare rumore elettronico, fluttuazioni del segnale di singolo fotoelettrone e guide di luce

Profondità degli sciami

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

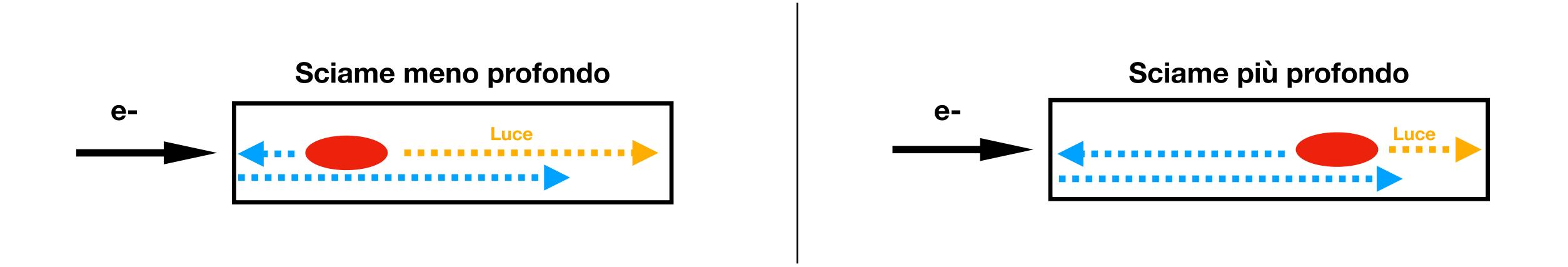
- Baricentro dei depositi di energia
- Fotoni riflessi
- Fotoni diretti



Profondità degli sciami

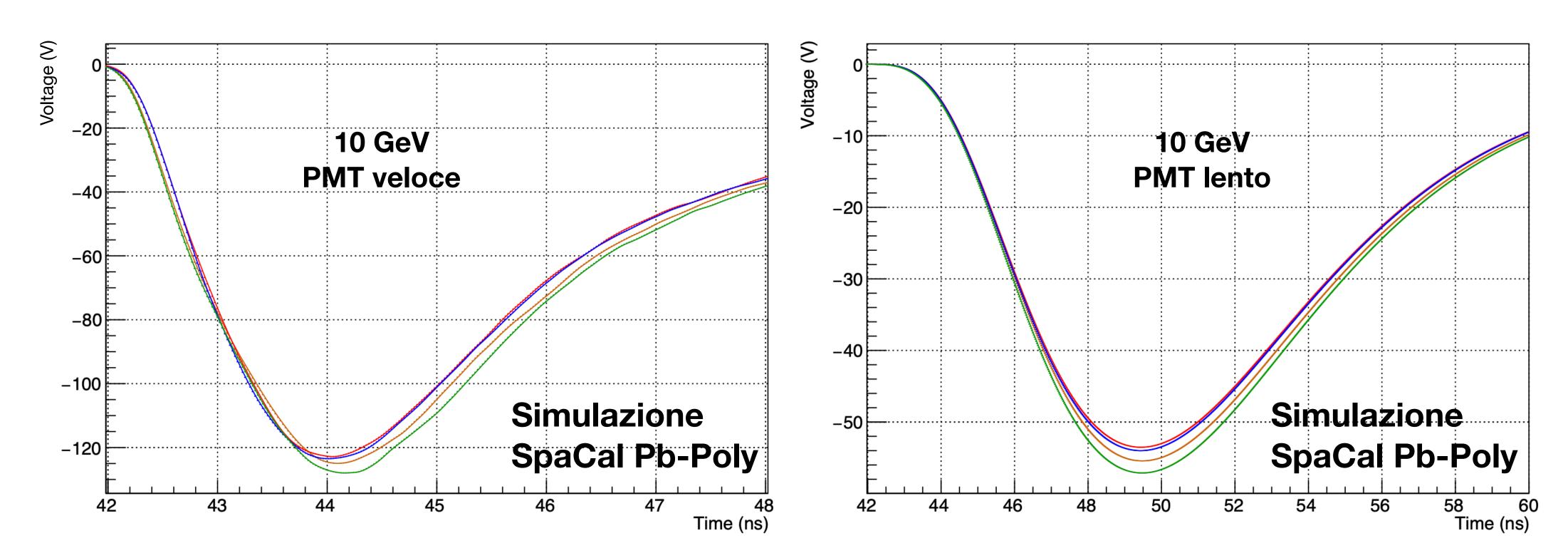
- Profondità dello sciame e tempo di arrivo del segnale sono correlati. Per sciami più profondi:
 - ► I fotoni diretti arrivano prima al PMT —> Correlazione negativa
 - I fotoni riflessi arrivano in ritardo
- -> Correlazione positiva

- Baricentro dei depositi di energia
- Fotoni riflessi
- Fotoni diretti
- ➡ Il tempo di arrivo (CFD) è influenzato dalla profondità dello sciame
- **→** Questo bias peggiora la risoluzione temporale



Profondità degli sciami

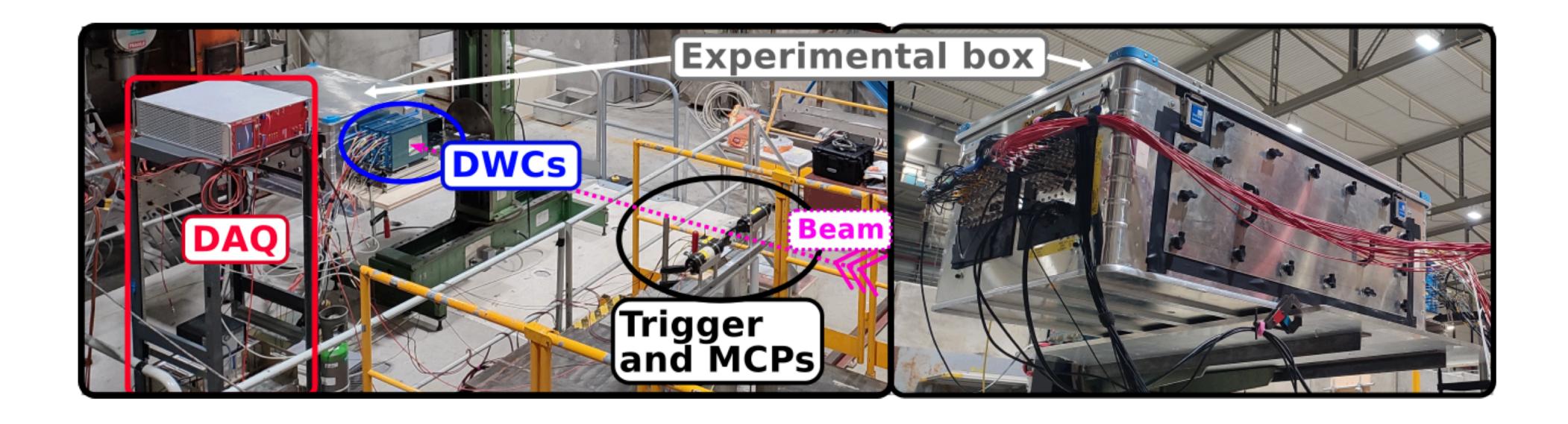
- Questo effetto è più rilevante per i PMT veloci (discriminano meglio la componente diretta da quella riflessa)
- Influenza la forma dei segnali —> L'algoritmo CFD non ne tiene conto
- Dipende dalla soglia CFD scelta:
 - Soglie basse rilevano principalmente i fotoni diretti
 - Per alcune soglie le due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



<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

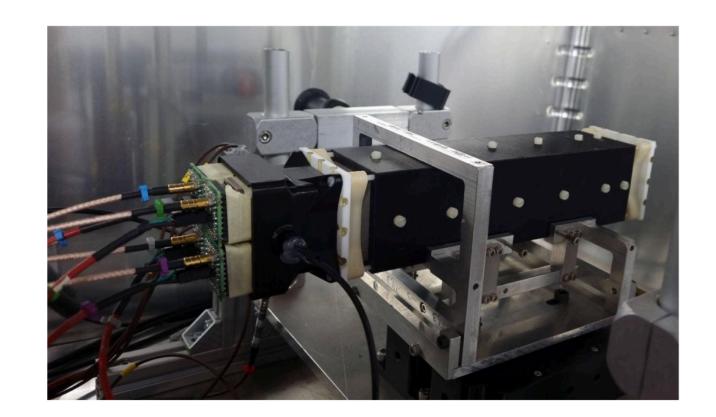
<u>CERN SPS (20-100 GeV)</u>

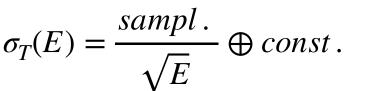


DAQ: segnali digitalizzati con il digitizer V1742 CAEN basato sulla DRS4 con 5 GS/s

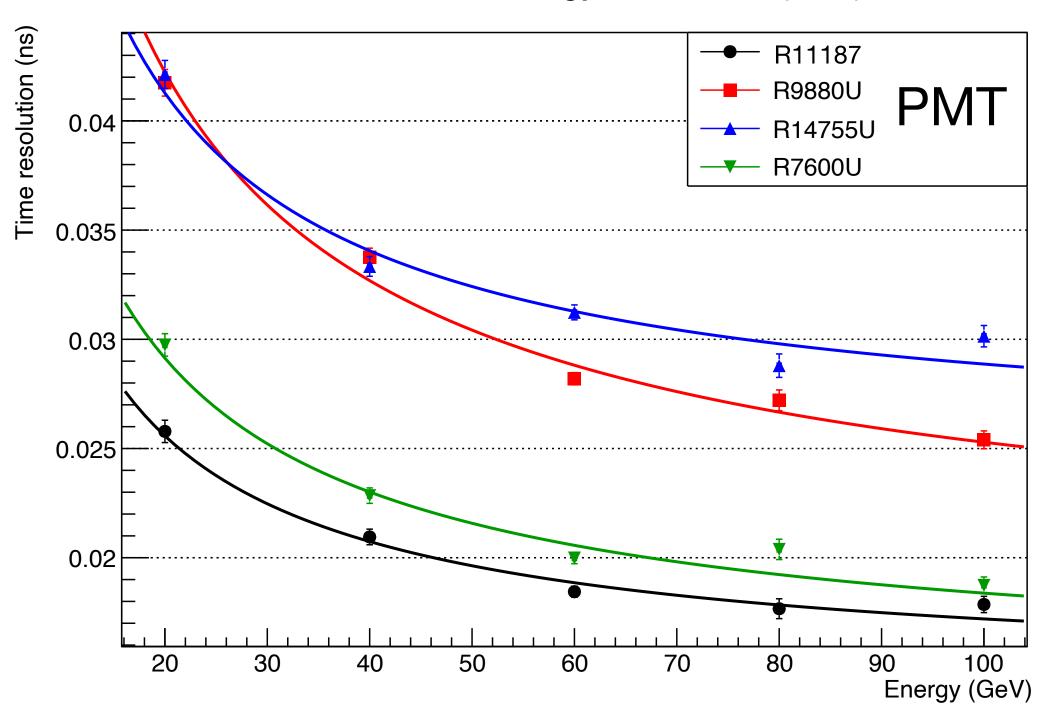
Risoluzione temporale

- Modulo: SpaCal W-Poly, 4 celle, 2x2 cm² 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







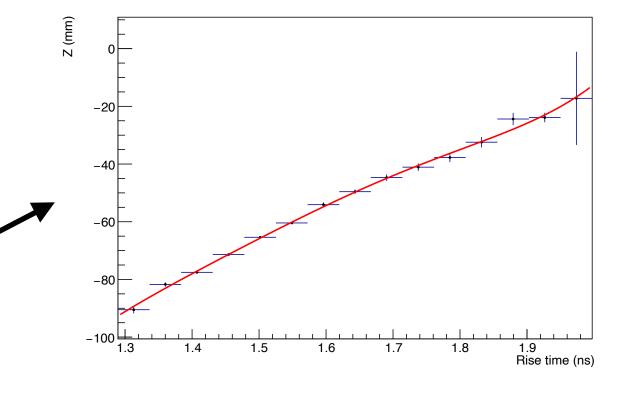


Correzione dei tempi di arrivo

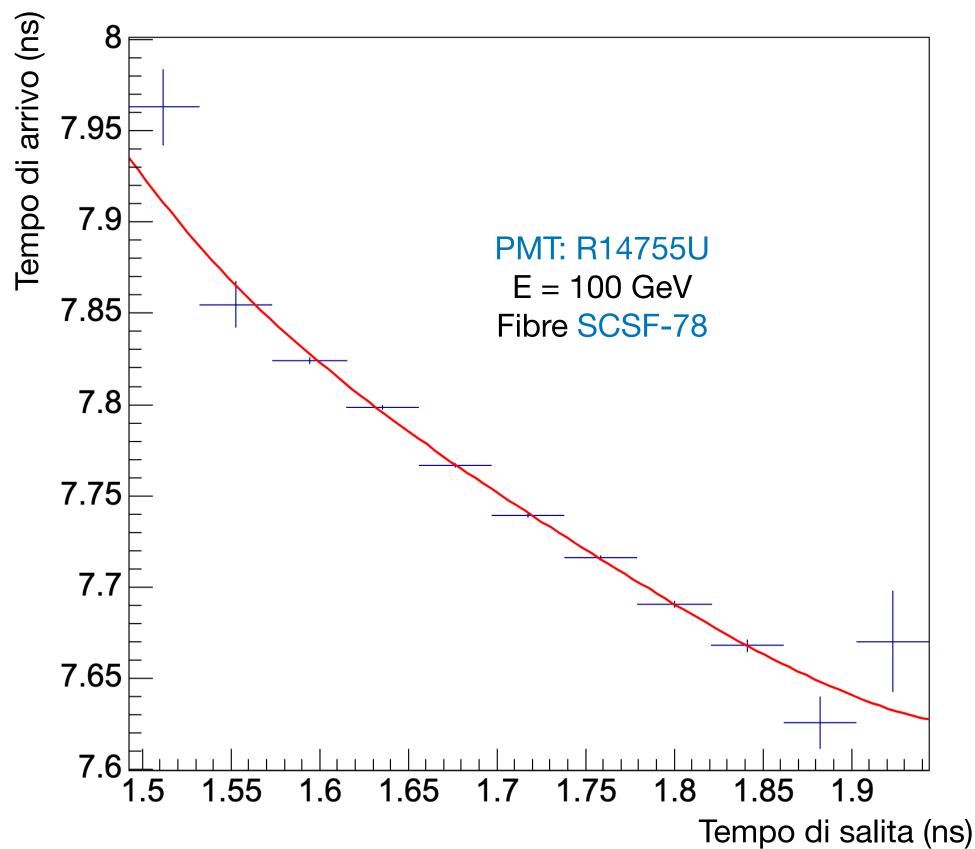
Le simulazioni mostrano che il tempo di salita è altamente correlato alla profondità degli sciami

⇒ È possibile sfruttarlo per rimuovere il bias

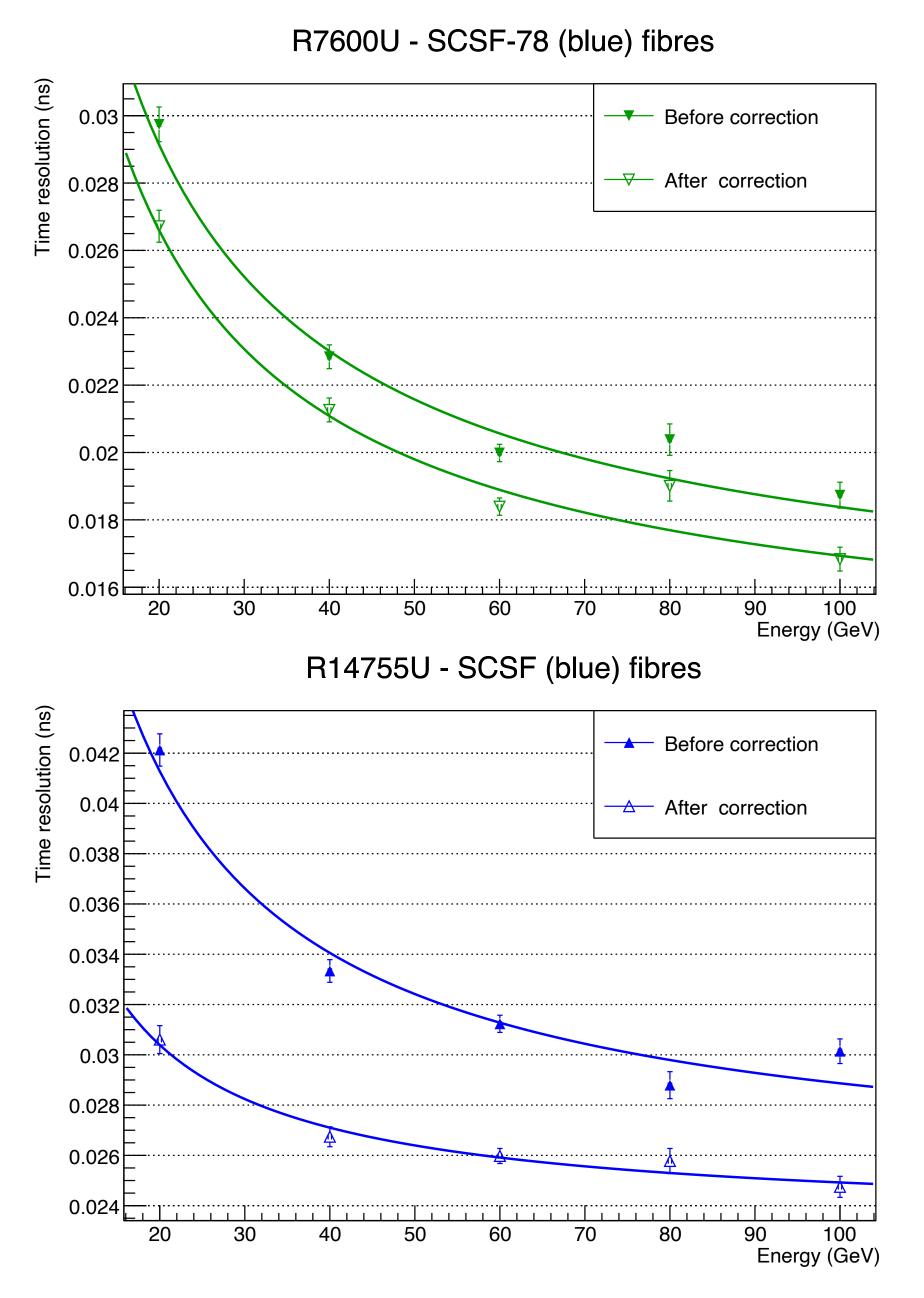
- Fit polinomiale: tempo di arrivo t vs tempo di salita di ogni segnale —> curva di correzione f
- Tempo di arrivo corretto: $\hat{t}_j = t_j f_j$
- La risoluzione temporale corretta è la deviazione standard di \hat{t}



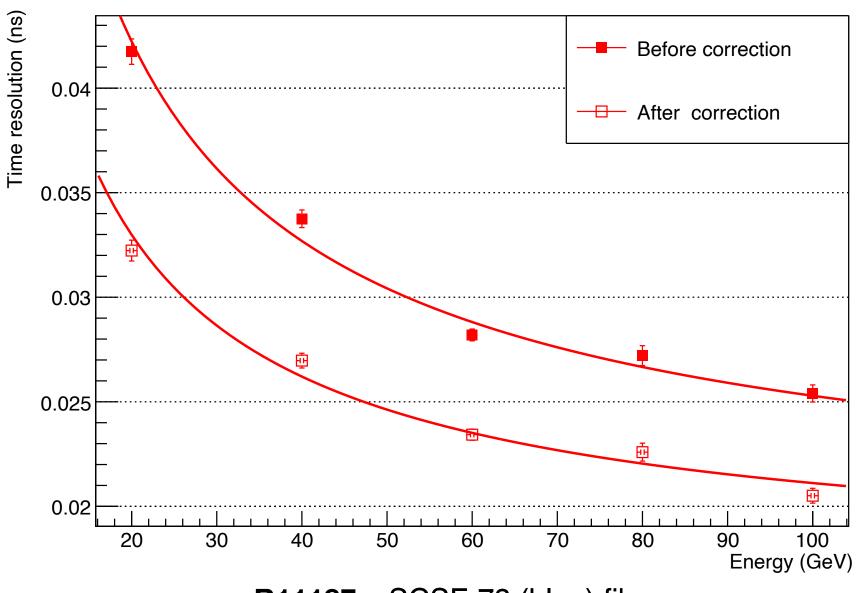
Profile Z vs rise time



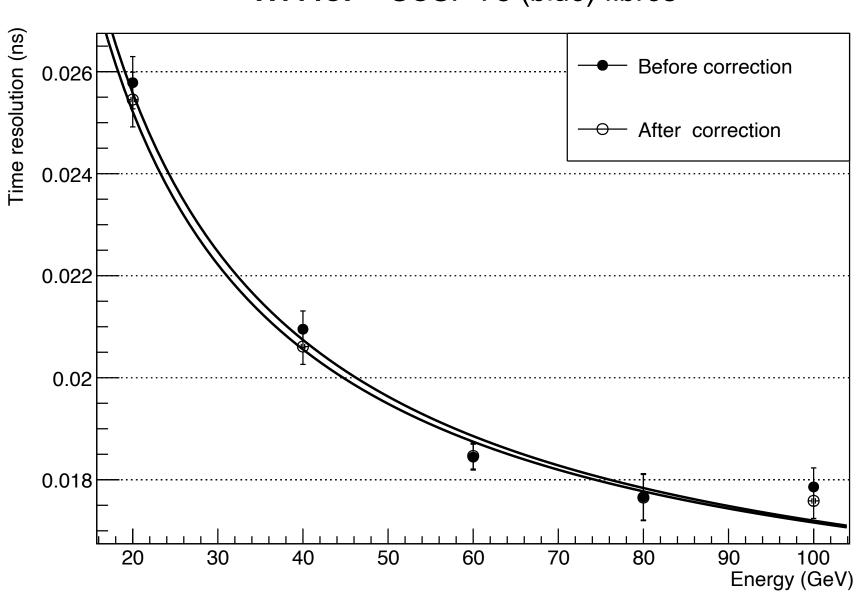
Prima vs dopo la correzione del bias







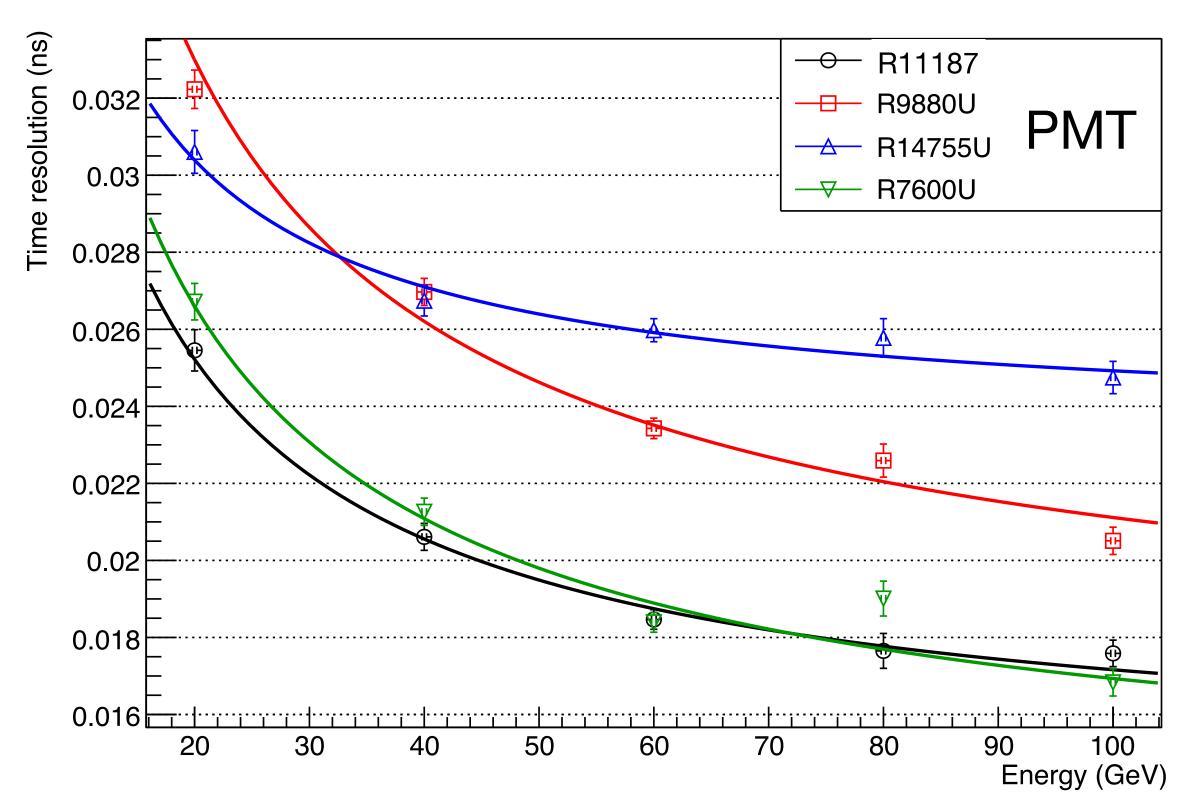
R11187 - SCSF-78 (blue) fibres



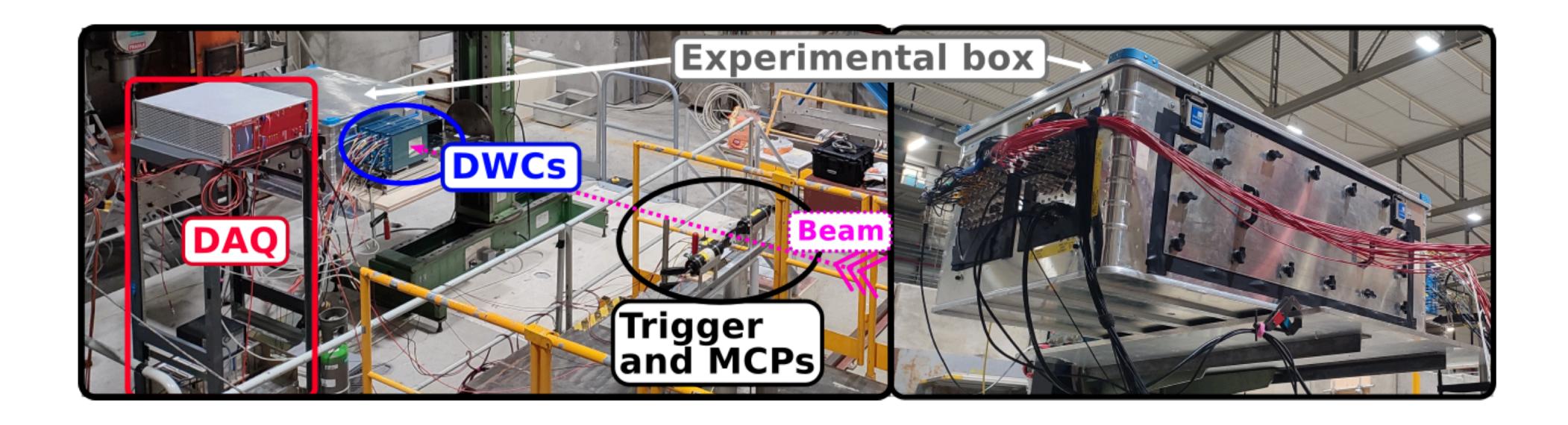
Risoluzione temporale corretta

- 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%

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

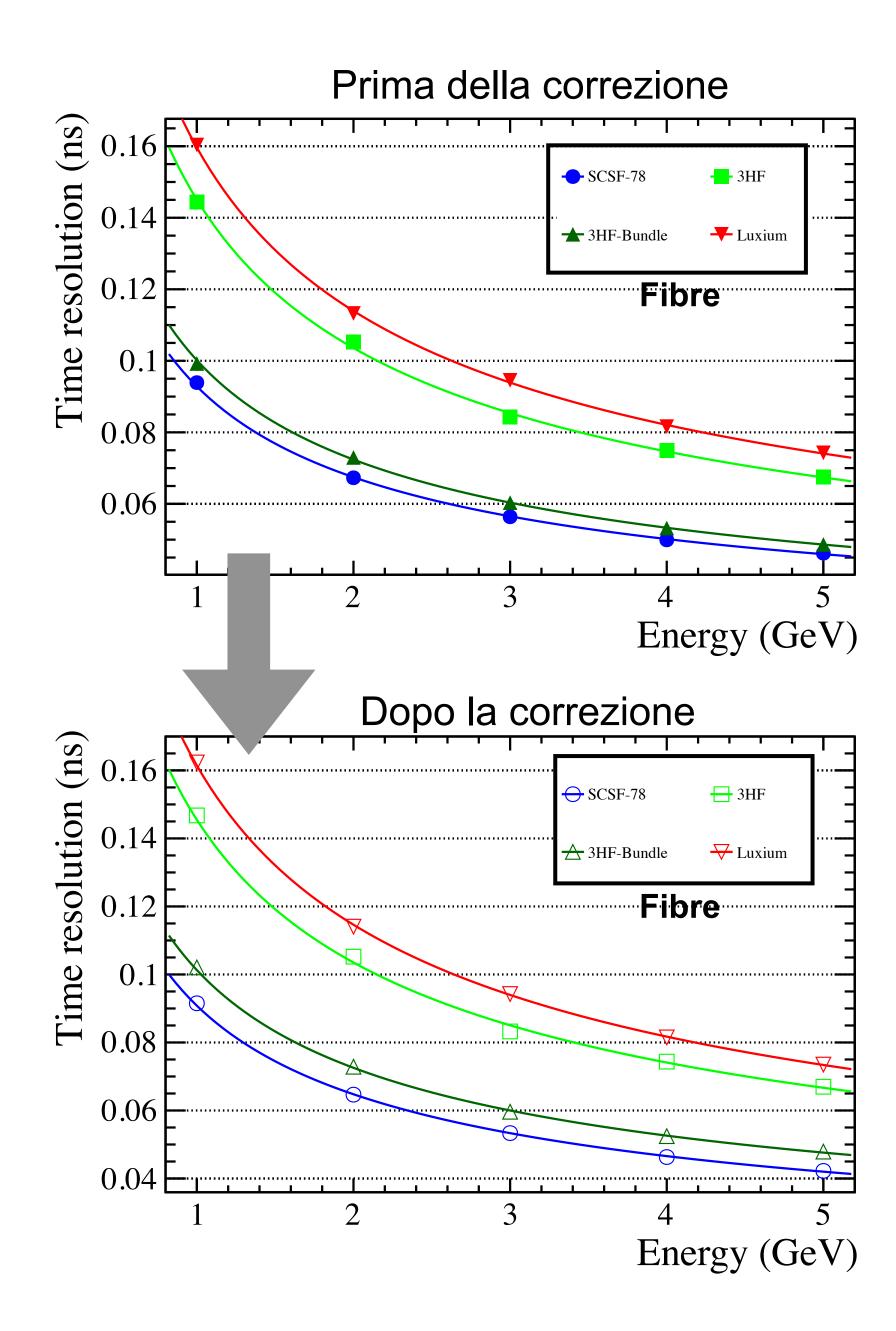


DESY - Hamburg (1-5 GeV)

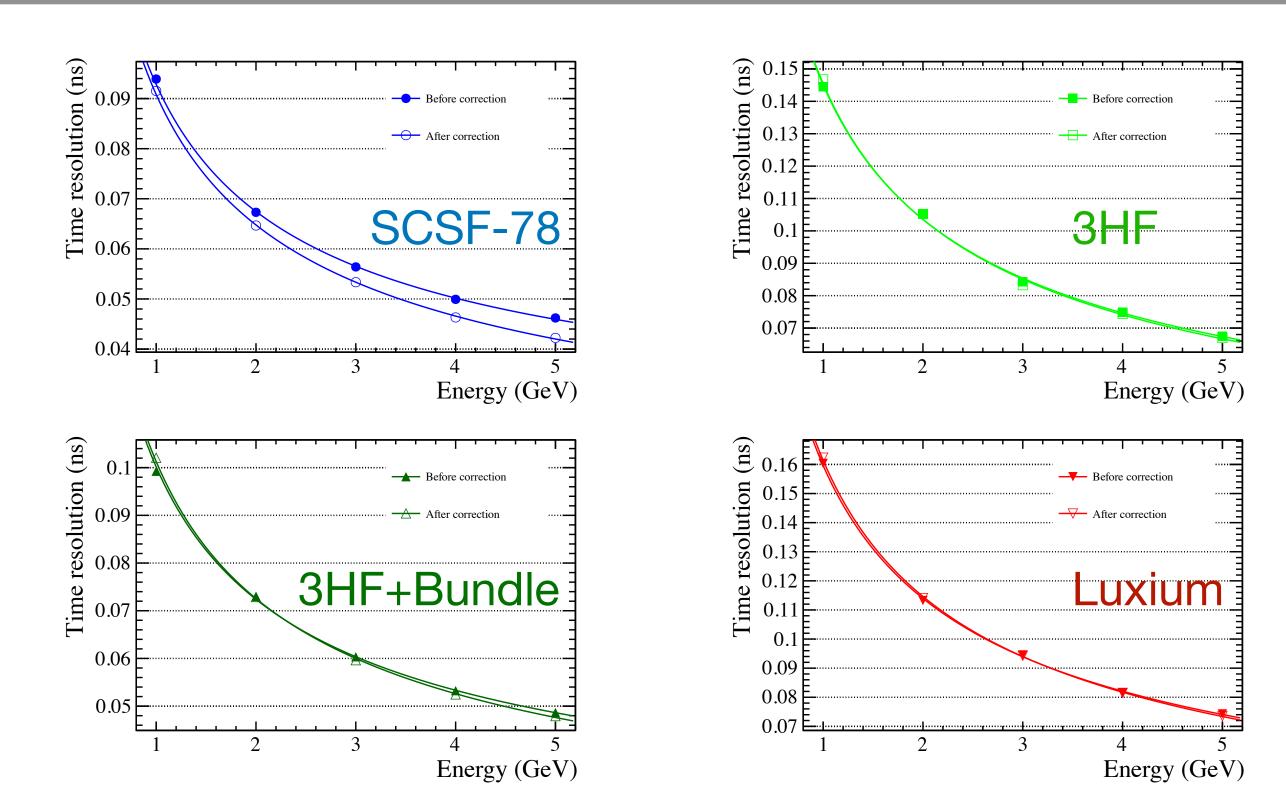


Risoluzione temporale (SpaCal W-Poly, 4 celle, 2x2 cm²)

PMT: R9880U

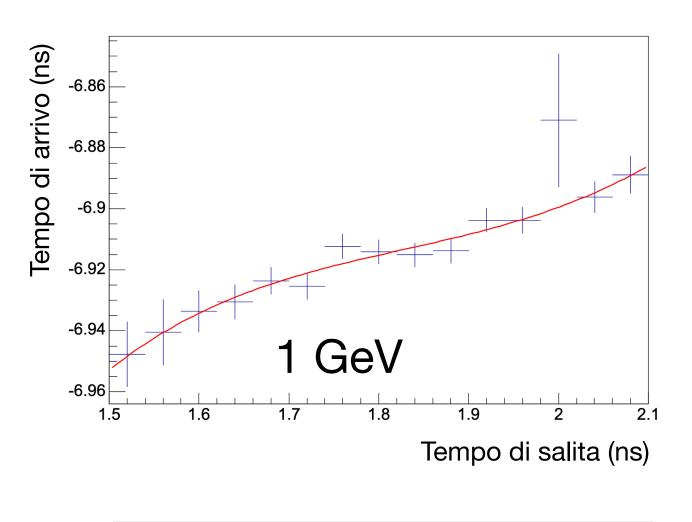


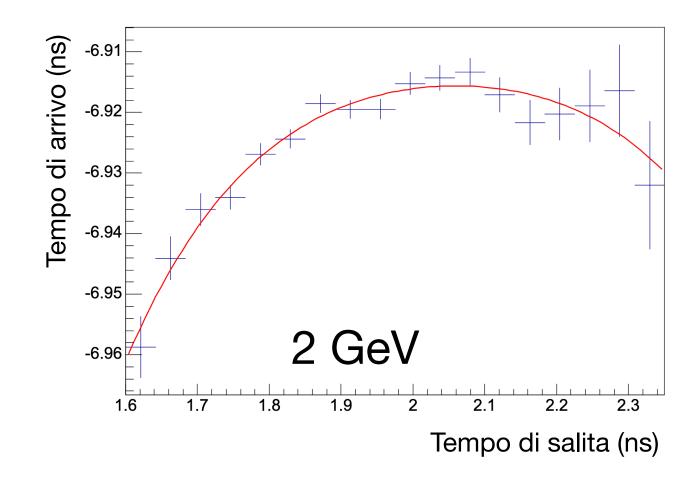
- Confronto tra fibre diverse
- Solo le fibre con scintillazione più veloce (SCSF-78) hanno una correzione visibile
- A queste energie non c'è correzione significativa

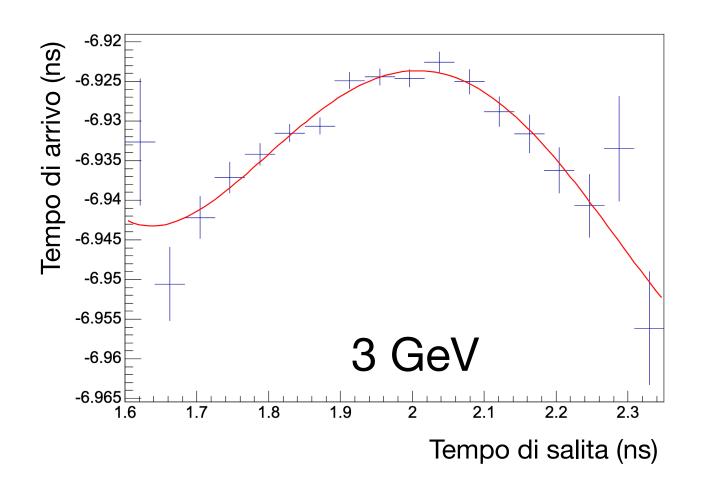


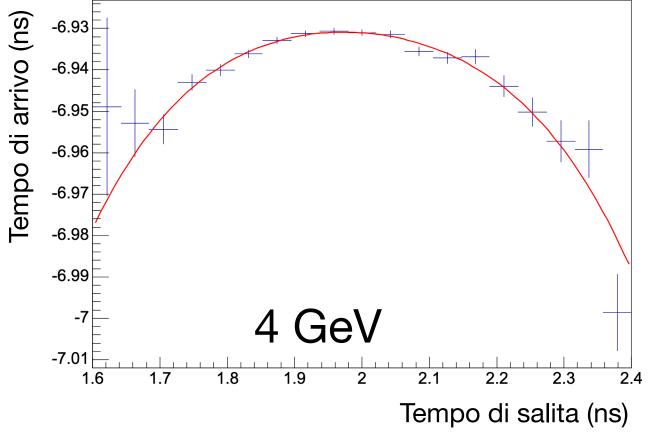
Come cambia il bias a energie diverse?

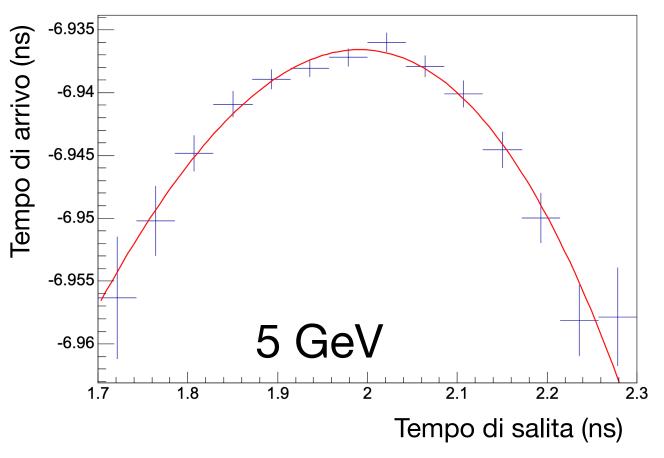
- Energie diverse causano diverse profondità degli sciami
- Correlazione positiva (negativa) causata dai fotoni riflessi (diretti)







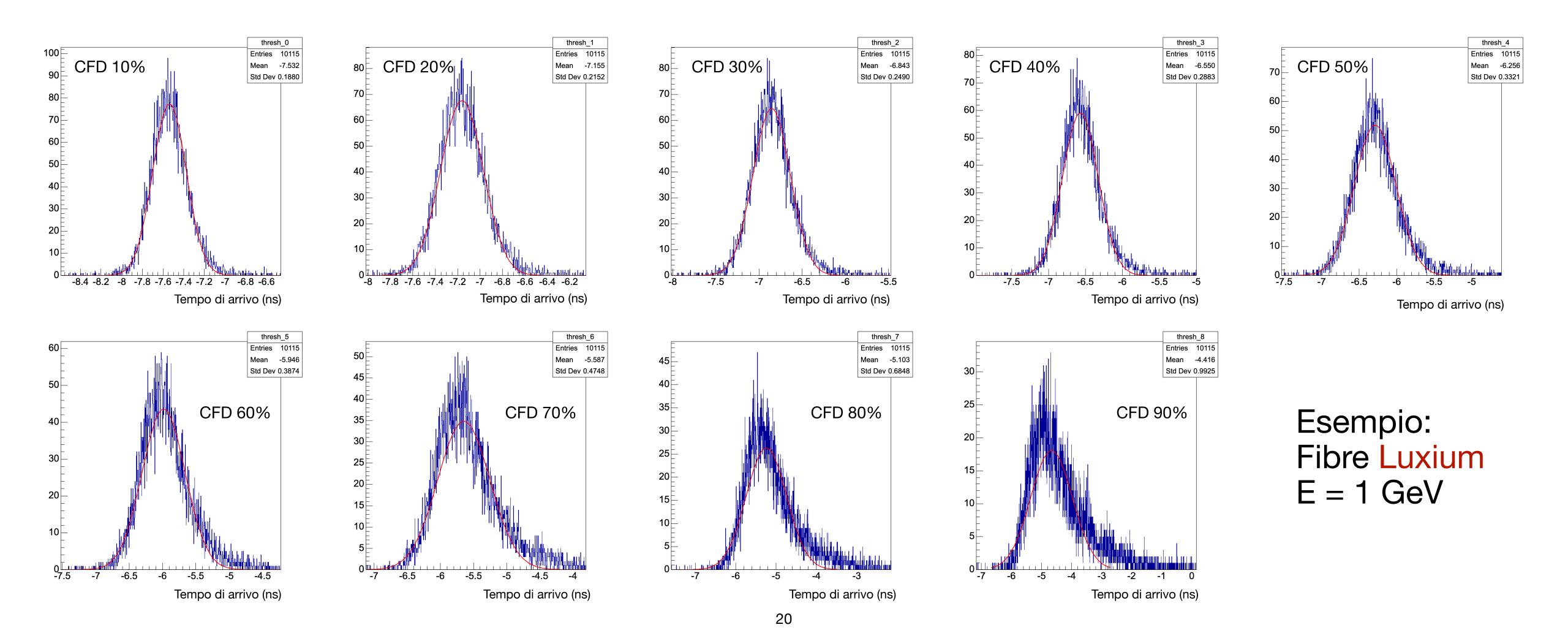




Fibre SCSF-78 Soglia CFD = 10%

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)



Scaletta

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

Conclusioni

- Nei moduli SpaCal con readout singolo, la profondità degli sciami influenza il tempo di arrivo rilevato
 - → Modifica della forma dei segnali
 - → L'algoritmo CFD non ne tiene conto
- Sfruttando il tempo di salita dei segnali, è possibile rimuovere (parzialmente) questi effetti, 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

Grazie per l'attenzione!







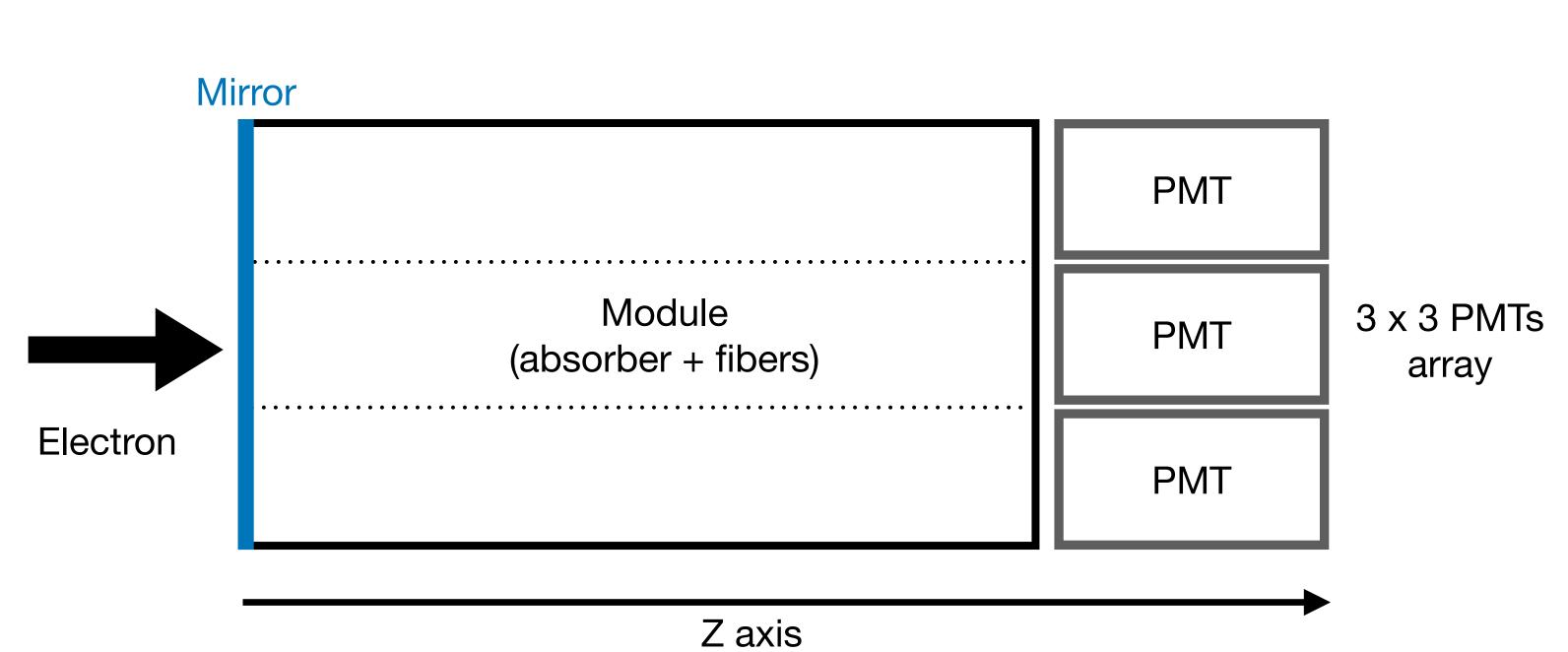
Backup

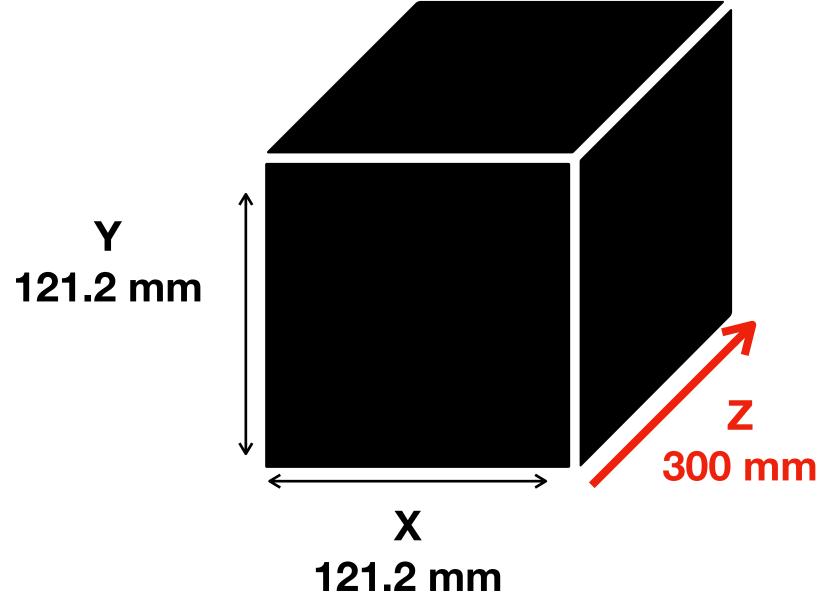


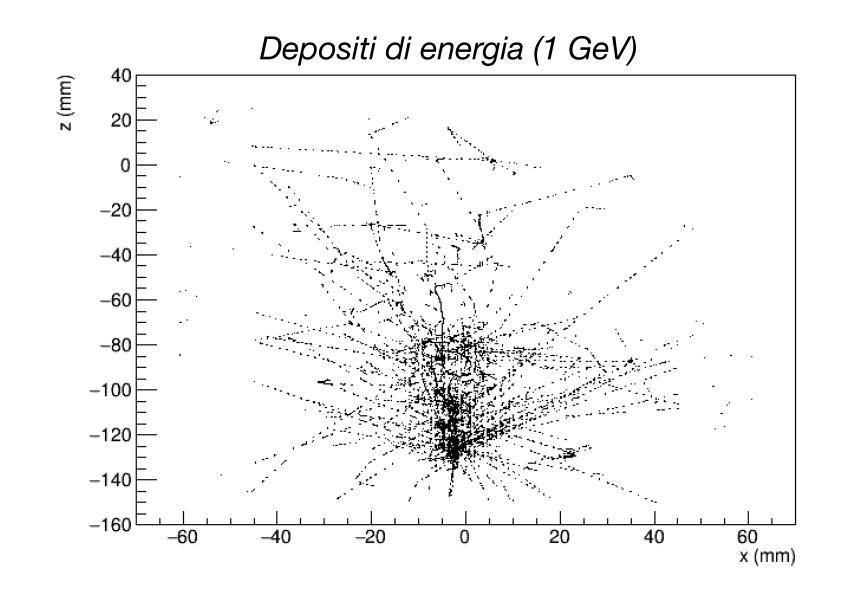




- Studio della risoluzione temporale di un modulo simulato
- Elettroni di 1 GeV e 10 GeV
- Modulo SpaCal Pb + Polistirene
- Readout solo sul retro



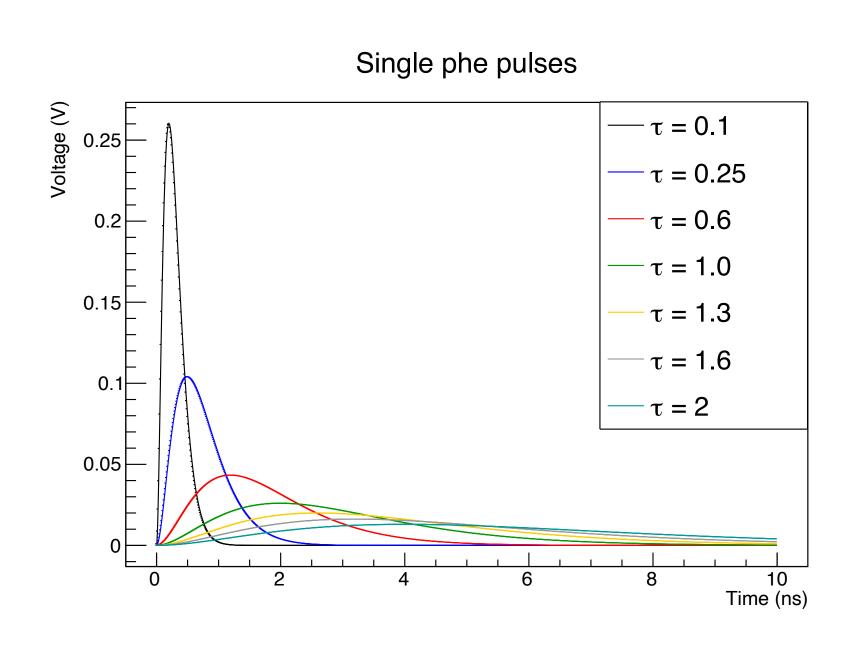


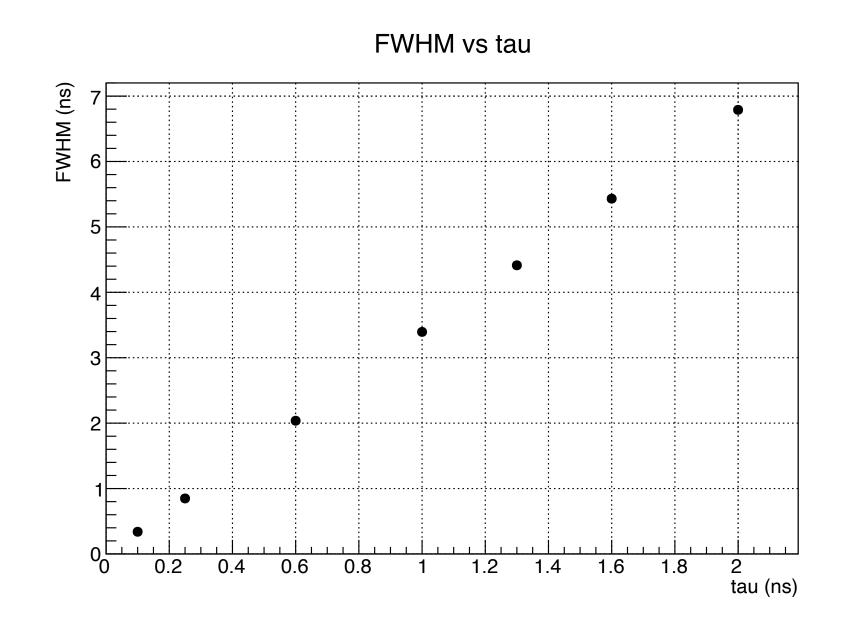


Simulazione dei PMT

Impulso di singolo fotoelettrone:

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





10 % 20 % 30 % -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) 50 % 60 % 40 % -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) 80 % 70 % 90 % -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) Z of the barycenter (mm)

27

Tau = 0.1 ns

(FWHM = 0.35 ns)

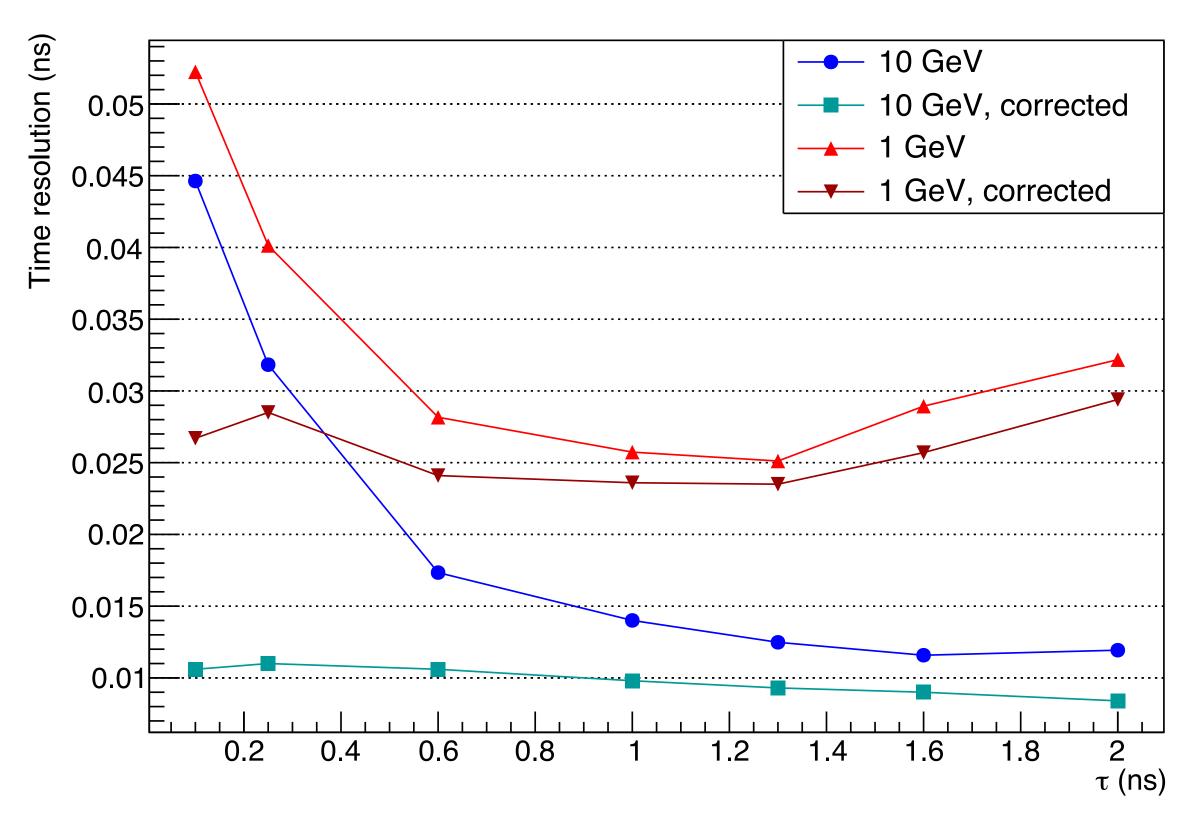
10 % 20 % 30 % 45.15 44.55 44.45 -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) 40 % 50 % 60 % (g) 46.05 45.95 45.85 46.15 -120 -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -100 -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -80 -120 -100 -100 70 % 80 % 90 % 46.95 47.25 46.7 47.2 47.15 47.75 47.1 -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -20 0 20 Z of the barycenter (mm) -120 -100 -80 -60 -40 -100 -80 -60 -40 -120 -100 -80 -60 -40

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

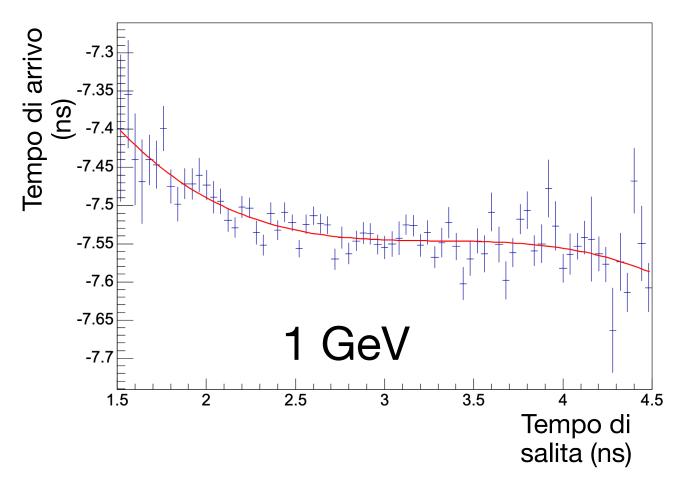
Best resolutions vs tau

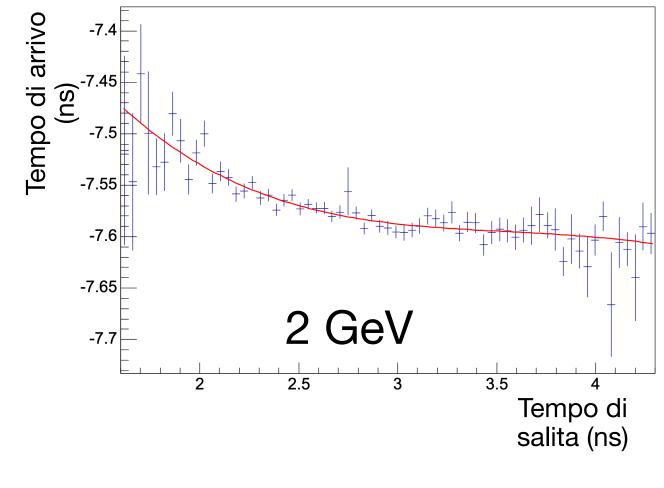


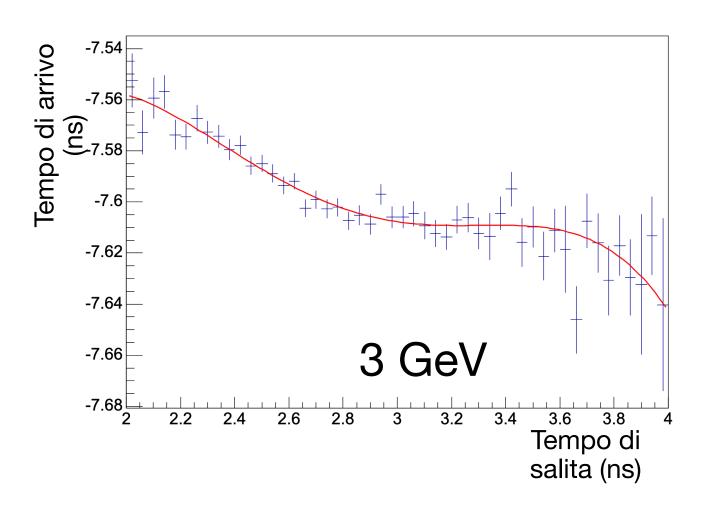
Risultati ottenuti senza simulare rumore elettronico, fluttuazioni del segnale di singolo fotoelettrone e guide di luce

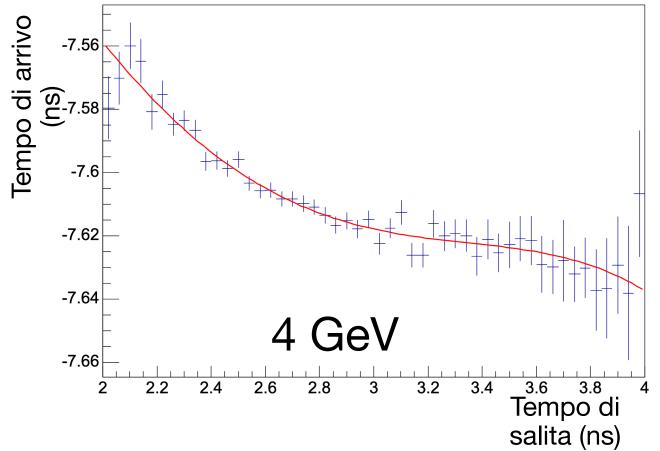
Come cambia il bias a energie diverse?

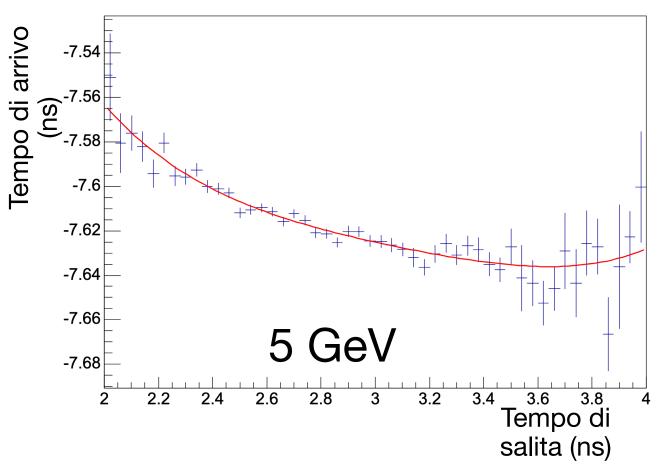
- Energie diverse causano diverse profondità degli sciami
- Correlazione positiva (negativa) causata dai fotoni riflessi (diretti)





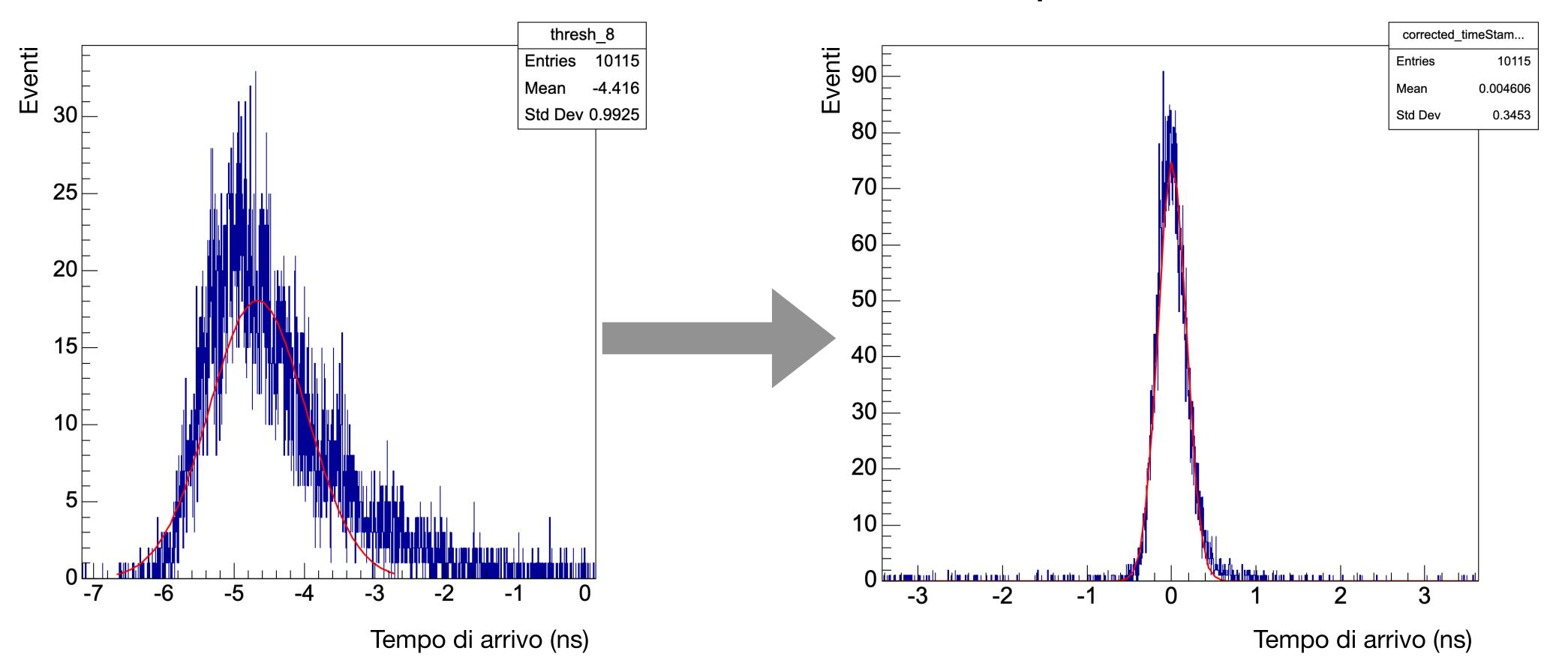






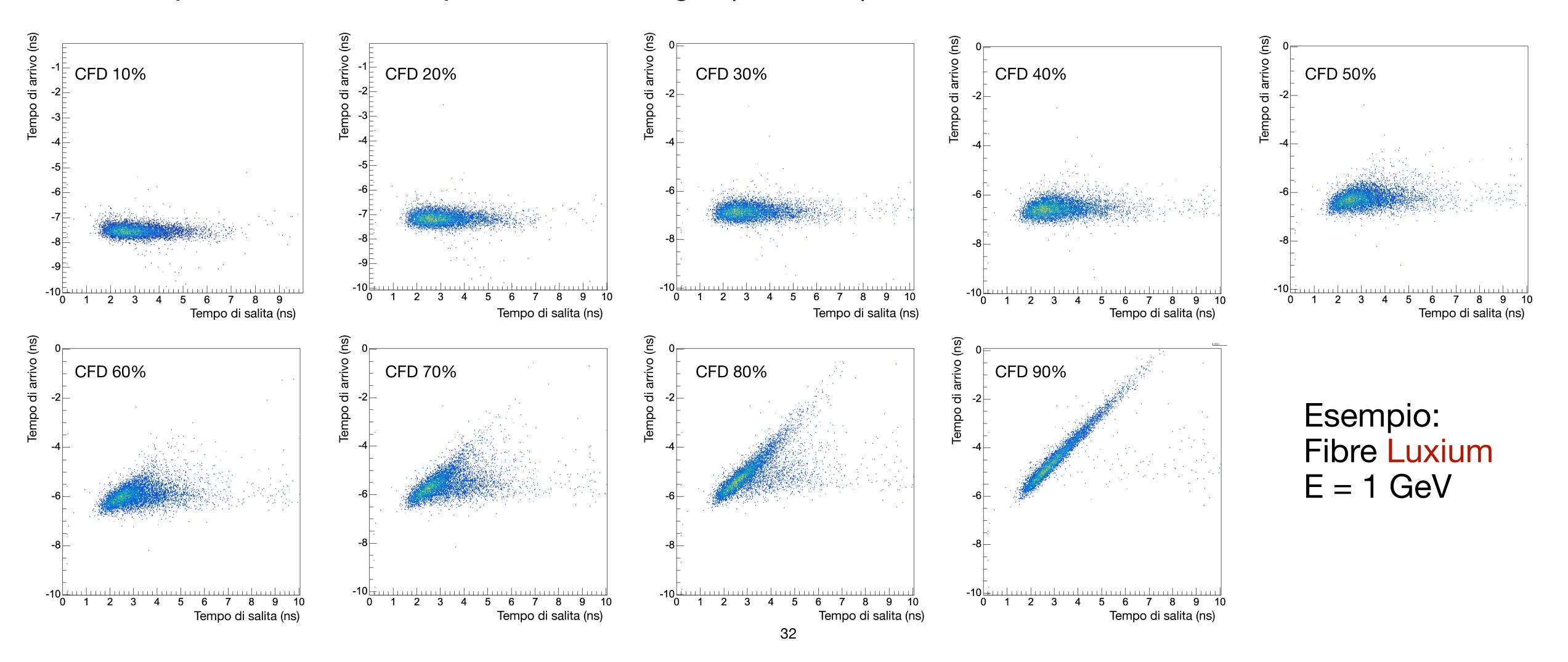
Prima della correzione

Dopo la correzione

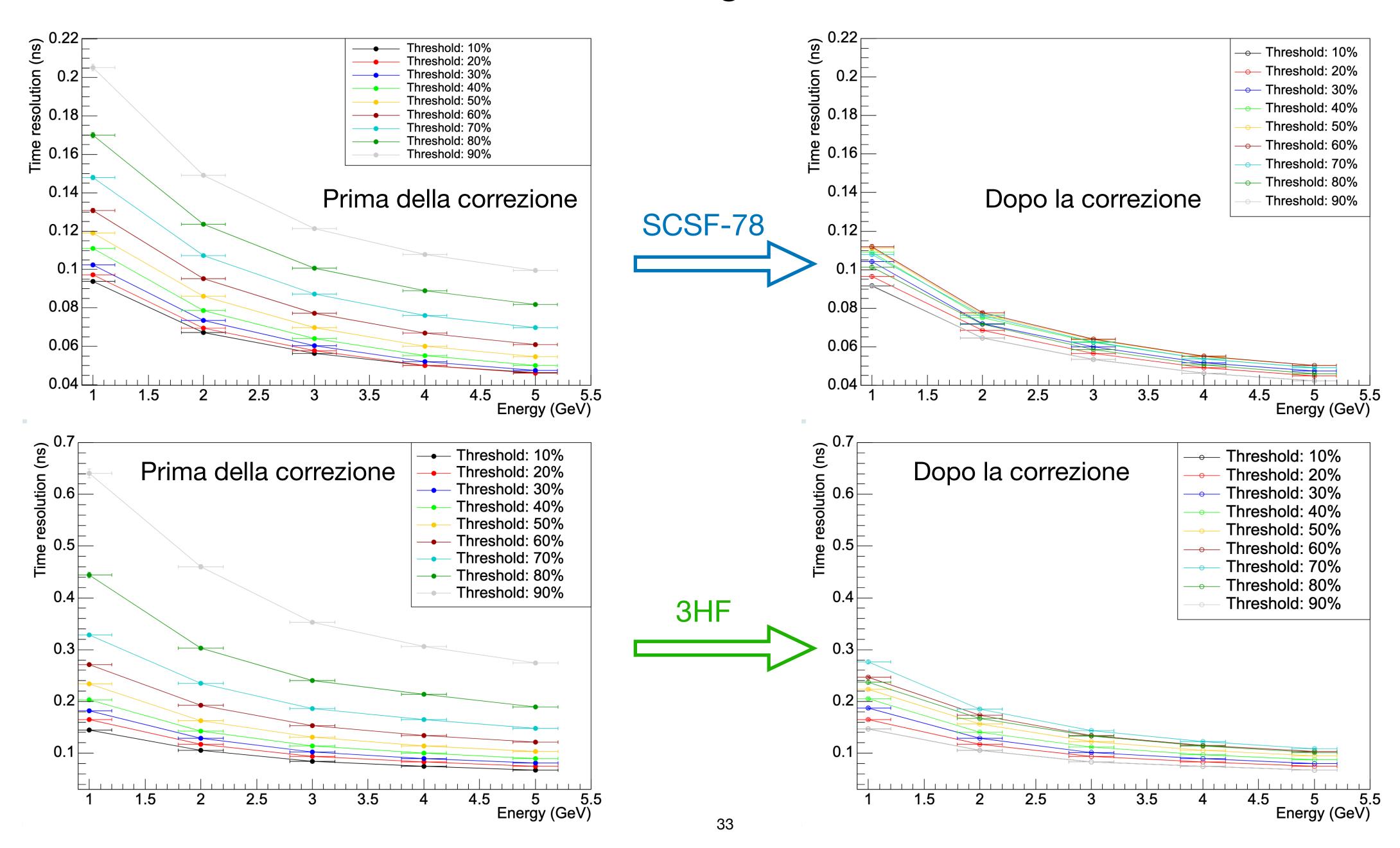


Confronto tra diverse soglie CFD

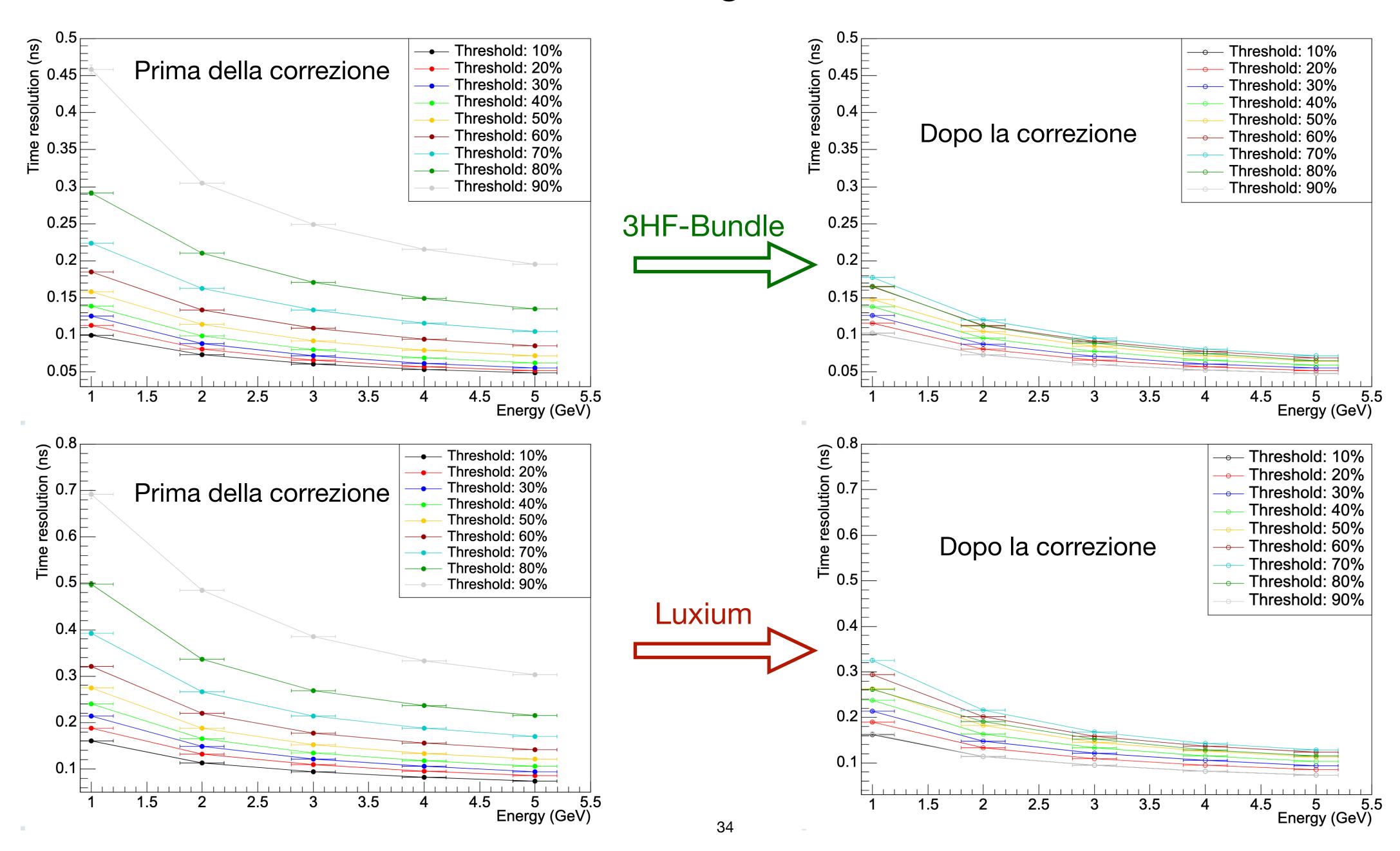
- Per alcune soglie CFD, la distribuzione dei tempi di arrivo presenta delle code
- Effetto causato dalle fluttuazioni longitudinali degli sciami
- Comportamento simile per tutte le energie (1-5 GeV)



Confronto tra soglie CFD - DESY



Confronto tra soglie CFD - DESY



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

Modello di risoluzione temporale

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

$$\sigma_T(N_{ph}) = \frac{a}{N_{ph}} \oplus \frac{b}{\sqrt{N_{ph}}} \oplus c$$

- Termine di rumore
- Termine di sampling
- Termine costante
- Assumendo linearità: $N_{ph} \propto E$ (energia del e^- incidente)

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

Modello di risoluzione temporale

- 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

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

- $\sigma_n = \text{std. dev. del rumore}$
- elettronico A = ampiezza del segnale
- Sottraendolo in quadratura, la risoluzione in funzione dell'energia diventa:

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