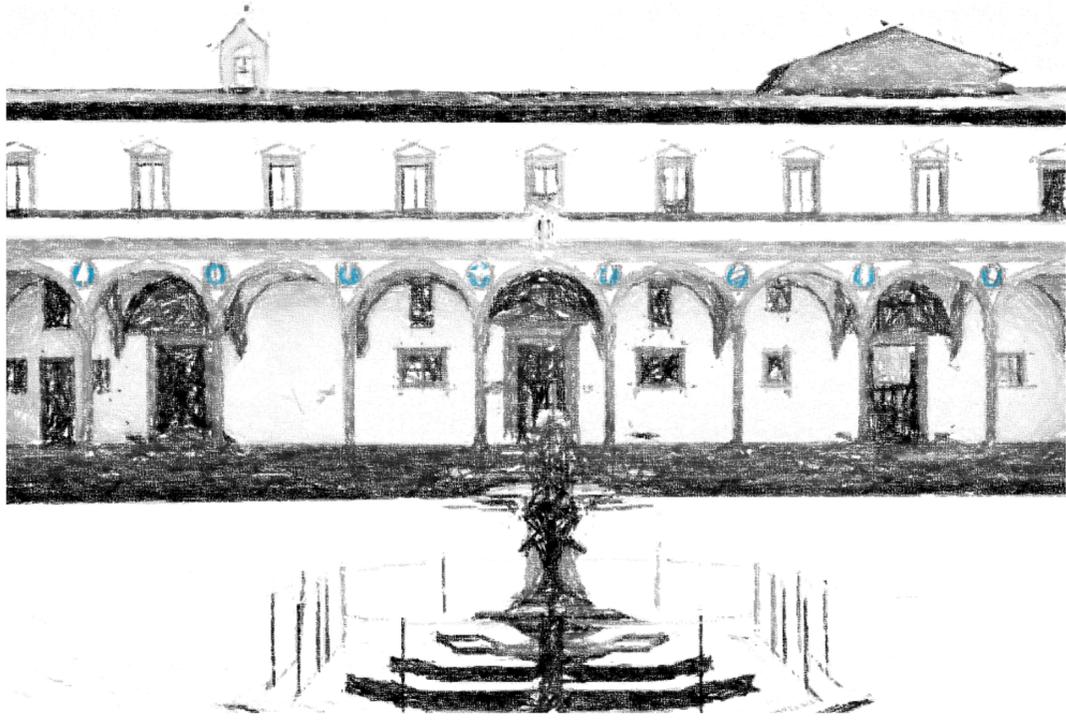


This project has received funding from the European Union's Research and Innovation programme under GAs No 101094300 and No 101004730.

IFAE 2024



Firenze, 3-5 Aprile 2024

Istituto degli Innocenti, Piazza SS Annunziata

Crilin: a semi-homogeneous crystal calorimeter for the Muon Collider

C. Giralдин - Università degli Studi di Padova e INFN Padova per la collaborazione IMCC e CRILIN

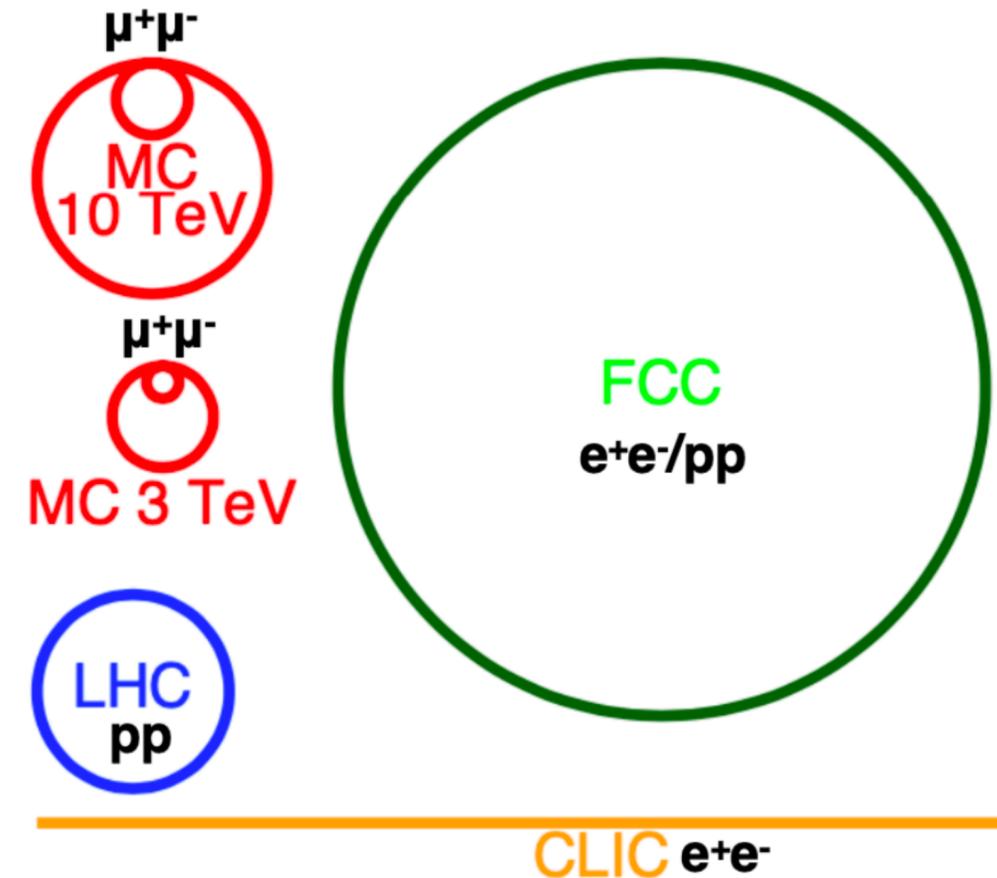
La proposta di un Muon Collider

- Il muon collider è un collisore futuro a geometria circolare in cui fasci di muoni e anti-muoni collidono ad energia del centro di massa dell'ordine dei multi-TeV.

- I muoni sono **particelle elementari** con una **massa circa 200 volte la massa dell'elettrone**.

Collisioni “pulite” e tutta l'energia è disponibile nell'interazione

Energia persa per radiazione da sincrotrone è trascurabile



<https://arxiv.org/abs/2303.08533>

- Possibilità di combinare i vantaggi dei collisori pp con quelli dei collisori e⁺ e⁻, in una macchina relativamente compatta.

Il fondo indotto dal decadimento del fascio

- I muoni sono particelle **instabili** ($\tau=2.2 \mu\text{s}$ a riposo).

<https://arxiv.org/abs/2303.08533>

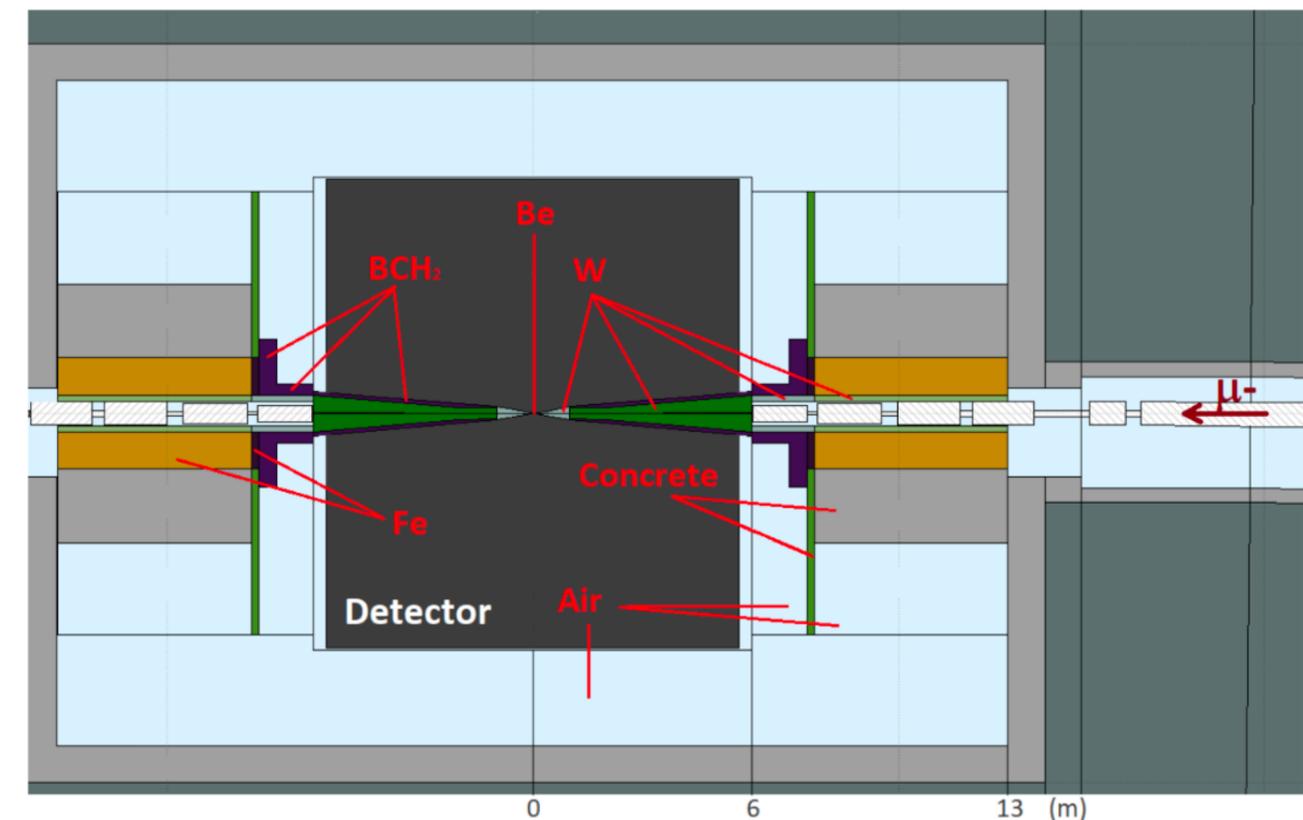
- Il decadimento dei muoni e le loro interazioni con i materiali della macchina, produce un intenso flusso di particelle secondarie e terziarie che forma il **fondo indotto dal fascio**.

- **Alta densità** nella regione del detector, ciò rende impegnativa la **ricostruzione** degli eventi di interazione $\mu^+ \mu^-$.



Fondamentale la riduzione del fondo indotto dal fascio all'interno della regione del rivelatore (software e hardware)

- **Coppia di coni assorbitori (nozzles) in Tungsteno:** mitigazione del flusso di particelle del fondo indotto dal fascio.



<https://arxiv.org/abs/2105.09116>

Rivelatore per Muon Collider

- Struttura **cilindrica** con geometria **ermetica**.
- Progetto ottimizzato per gli studi a $\sqrt{s}=3$ TeV .

- In fase di studio la struttura del rivelatore per $\sqrt{s}=10$ TeV.

hadronic calorimeter

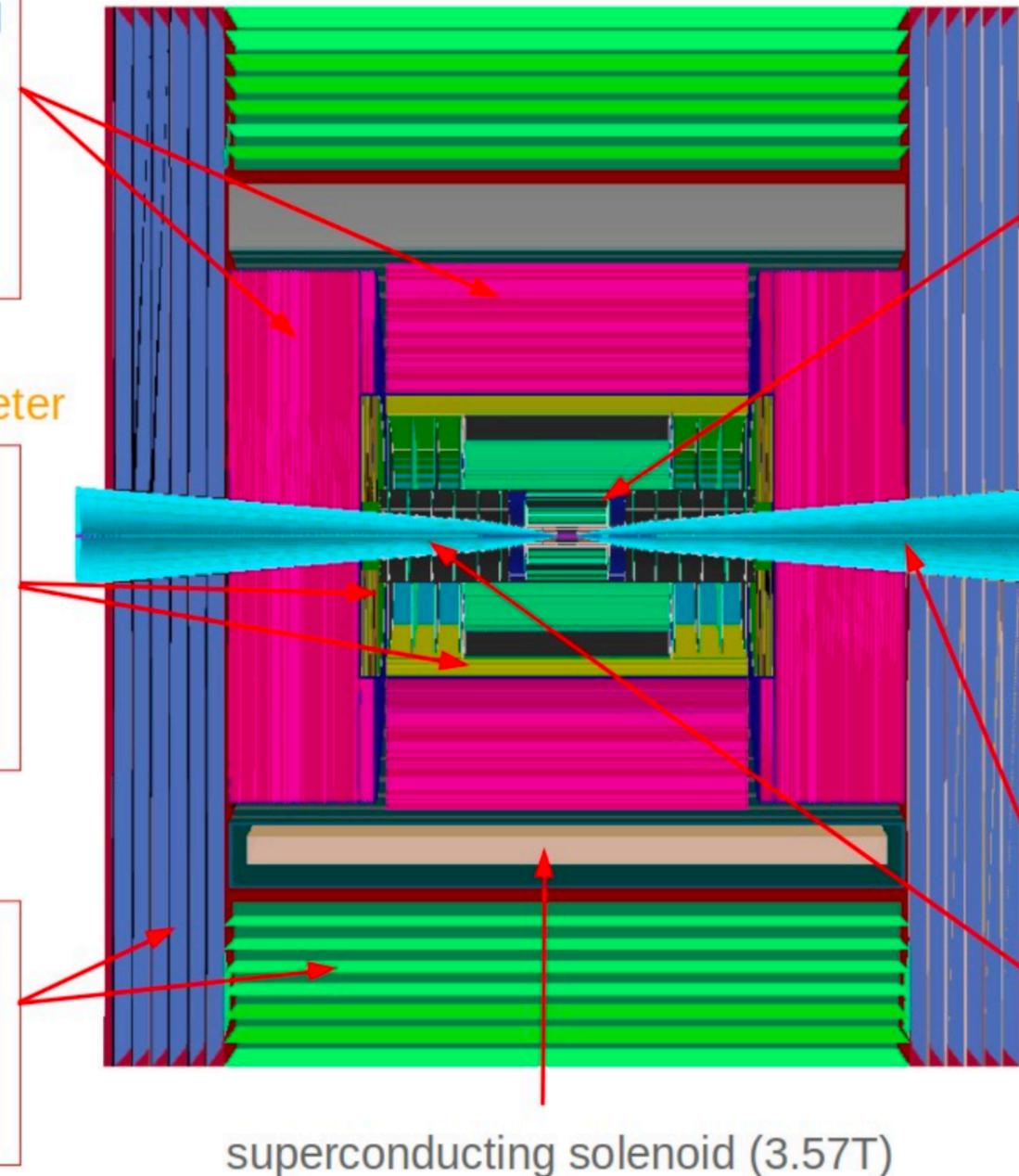
- ◆ 60 layers of 19-mm steel absorber + plastic scintillating tiles;
- ◆ 30x30 mm² cell size;
- ◆ 7.5 λ_I .

electromagnetic calorimeter

- ◆ 40 layers of 1.9-mm W absorber + silicon pad sensors;
- ◆ 5x5 mm² cell granularity;
- ◆ 22 X_0 + 1 λ_I .

muon detectors

- ◆ 7-barrel, 6-endcap RPC layers interleaved in the magnet's iron yoke;
- ◆ 30x30 mm² cell size.



tracking system

- ◆ **Vertex Detector:**
 - double-sensor layers (4 barrel cylinders and 4+4 endcap disks);
 - 25x25 μm^2 pixel Si sensors.
- ◆ **Inner Tracker:**
 - 3 barrel layers and 7+7 endcap disks;
 - 50 μm x 1 mm macro-pixel Si sensors.
- ◆ **Outer Tracker:**
 - 3 barrel layers and 4+4 endcap disks;
 - 50 μm x 10 mm micro-strip Si sensors.

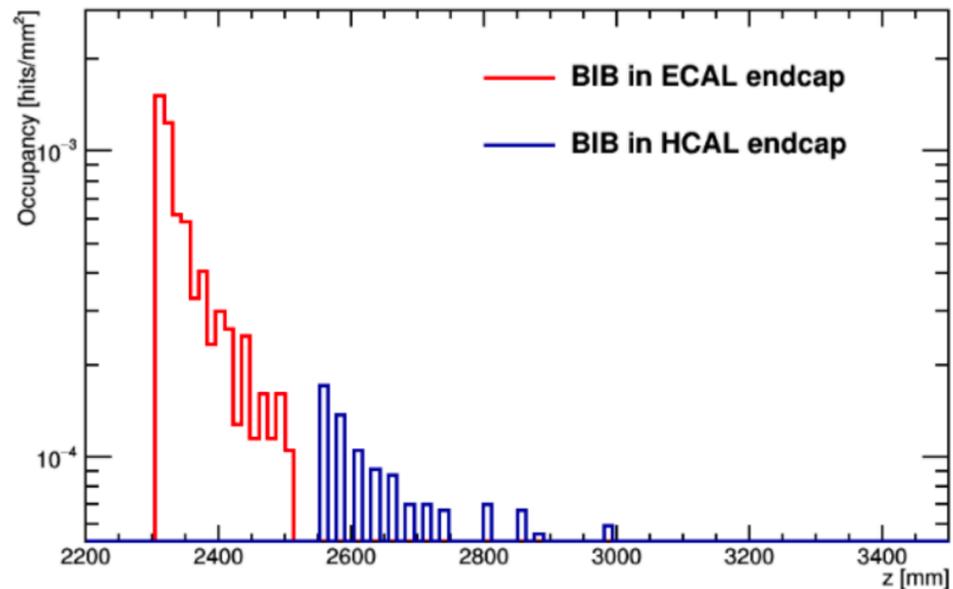
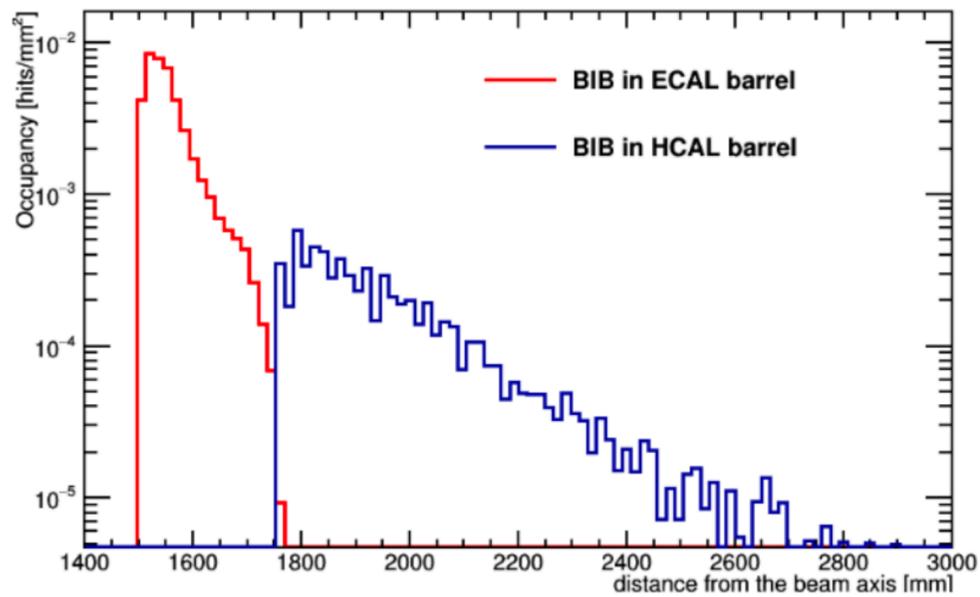
shielding nozzles

- ◆ Tungsten cones + borated polyethylene cladding.

<https://arxiv.org/abs/2303.08533>

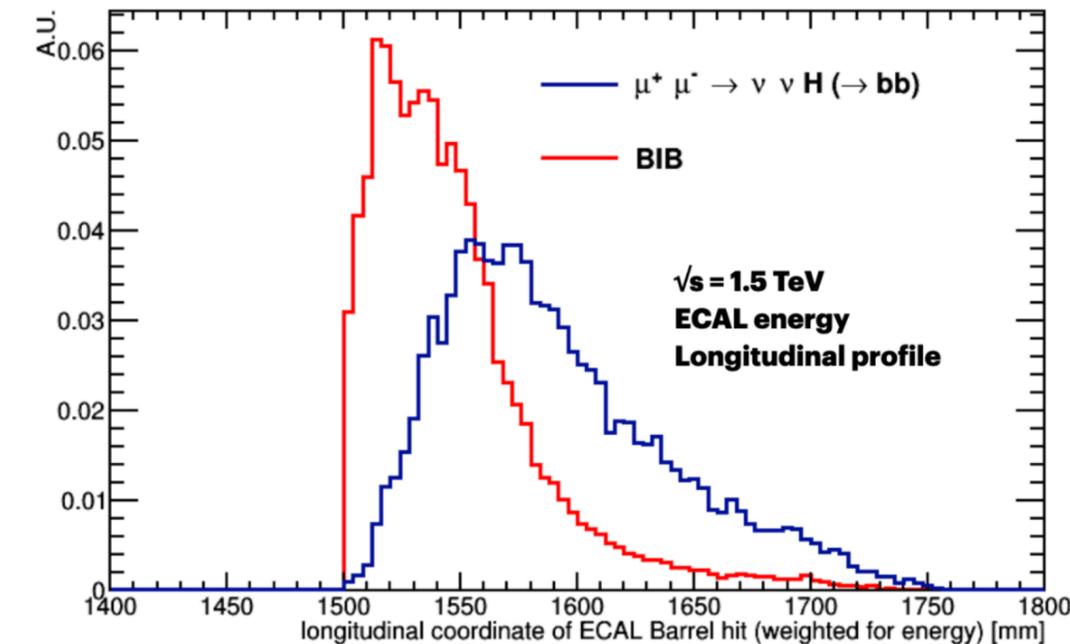
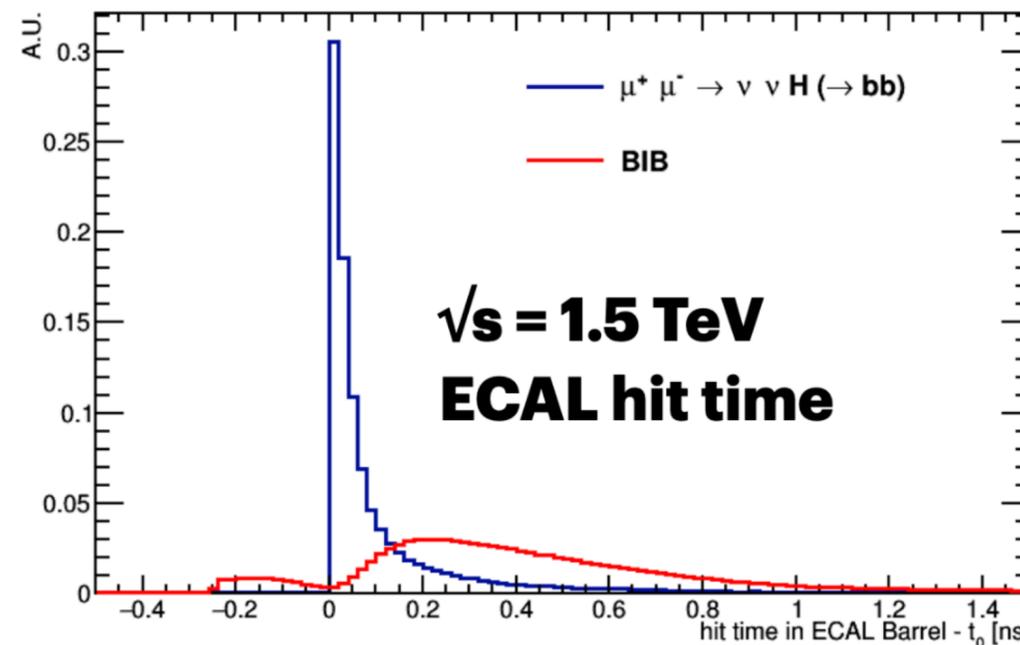
Richieste per il calorimetro elettromagnetico

- Intenso flusso di **fotoni** (96%) e **neutroni** (4%) indotto dal fascio.
- Energia media fotoni **1.7 MeV**.



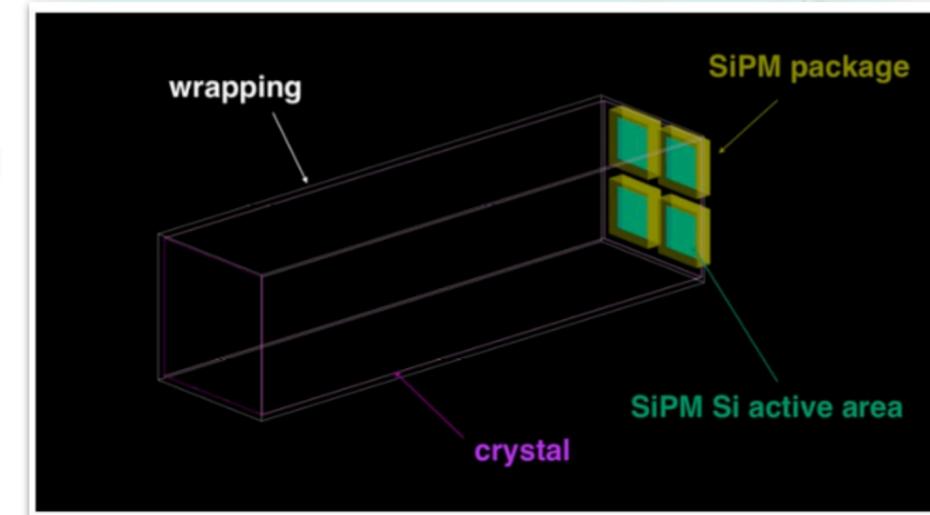
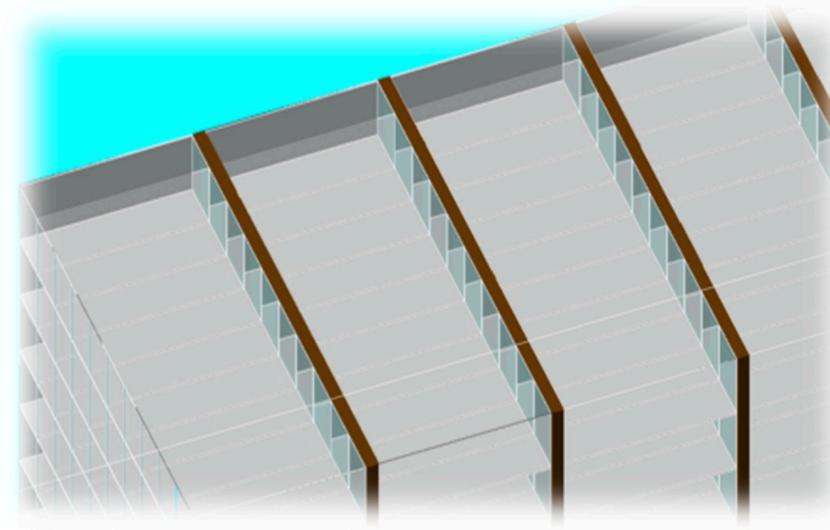
- **Elevata granularità:** riduzione del numero delle hit nella singola cella. Distinzione delle hit di segnale da quelle del fondo.
- **Ottima risoluzione temporale:** (<100ps) riduzione della componente fuori tempo delle particelle del fondo indotto dal fascio.
- **Segmentazione longitudinale:** distinzione delle cascate elettromagnetiche dovute alle particelle del fondo.
- **Alta risoluzione in energia:** 10%/√E per ottenere buone prestazioni di fisica.

<https://pos.sissa.it/398/776/pdf>



La tecnologia Crilin

- **Crilin** (Crystal calorimeter with longitudinal information) nuova proposta per calorimetro elettromagnetico: consiste in un calorimetro **semi-omogeneo** basato su cristalli **PbF2** e letti da fotomoltiplicatori in silicio (SiPM).
 - Architettura modulare, composta da moduli di matrici di cristalli.
 - Struttura formata da **5 strati** di cristalli ($22 X_0$).
 - Dimensione dei cristalli: **10x10x40 mm³** letti da quattro SiPM ognuno con due canali di lettura.



<https://arxiv.org/abs/2308.01148>



Segmentazione longitudinale



Elevata granularità (dimensione SiPM)



Eccellente risoluzione temporale (Cherenkov)

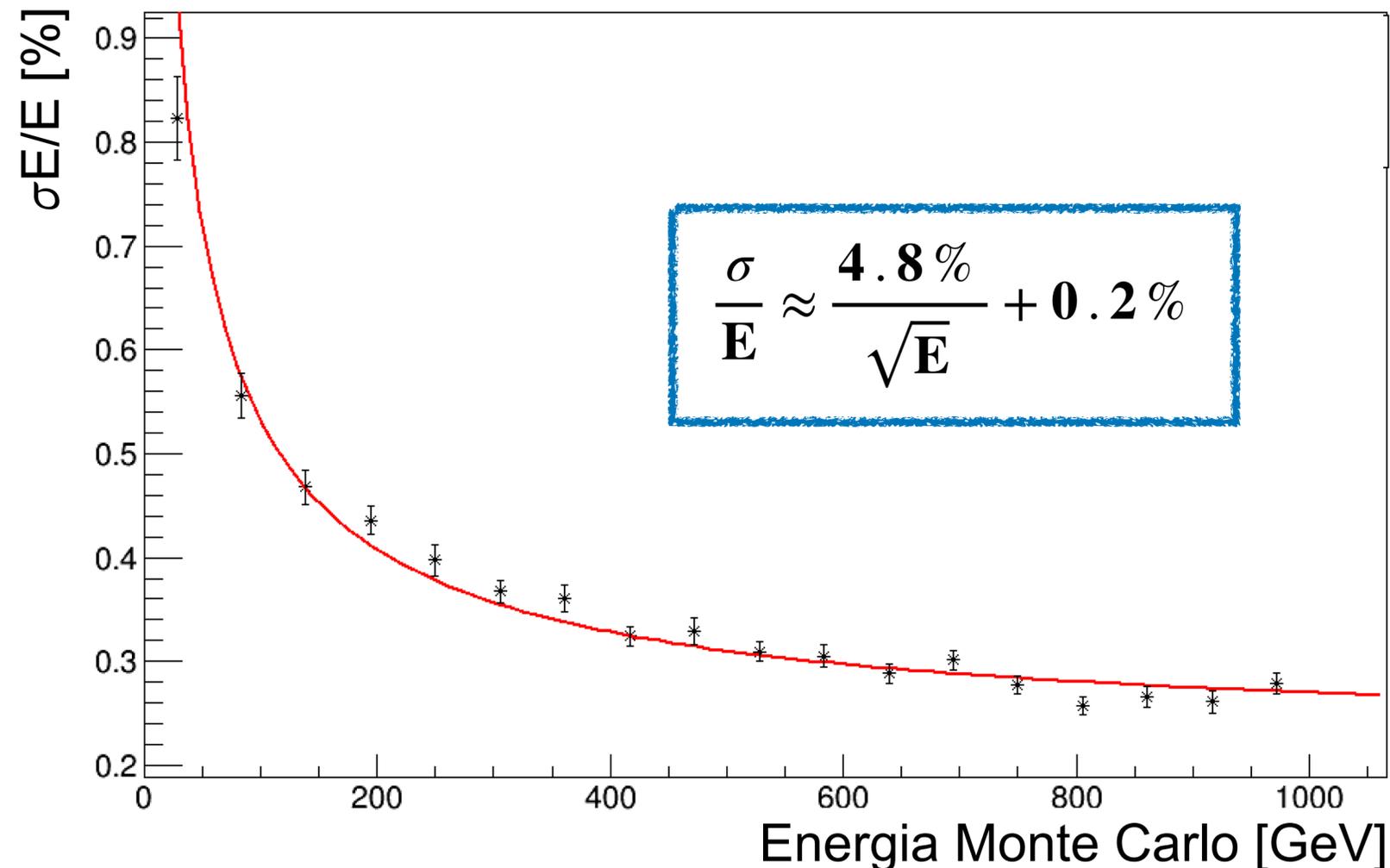


Ottima resistenza alle radiazioni

Caratterizzazione tramite simulazione

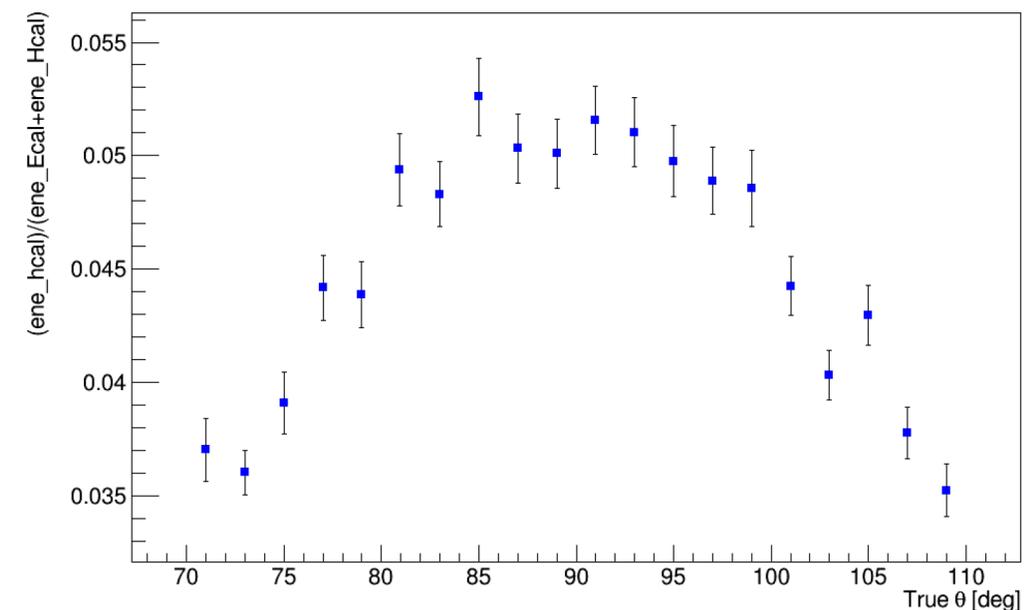
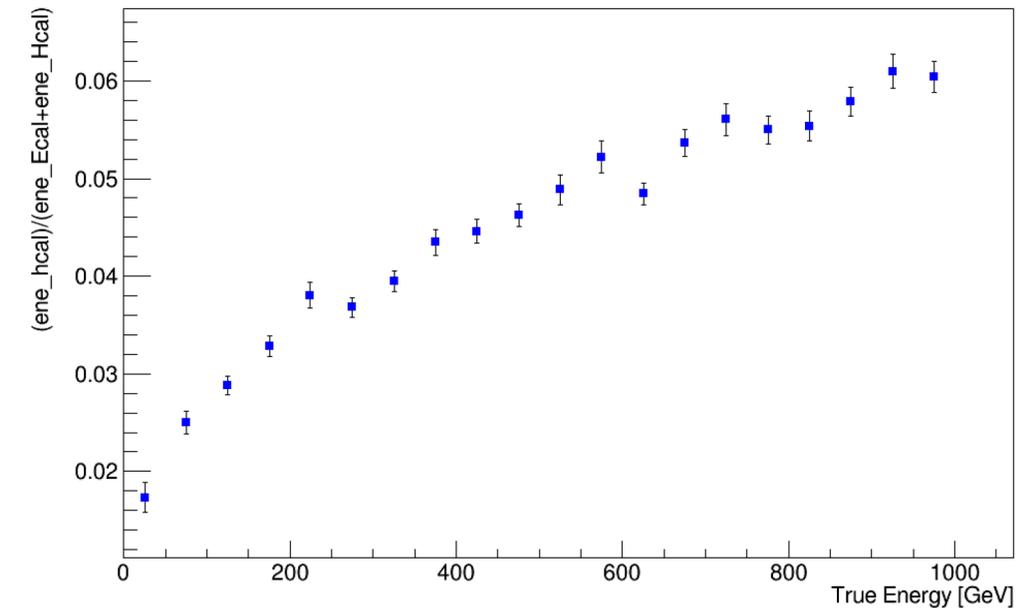
- Simulato campione 15000 fotoni Monte Carlo tra **1 GeV e 1000 GeV**.
- **Associazione** tra fotoni ricostruiti e Monte Carlo.
- **Correzione** dell'energia ricostruita.

$$\frac{\Delta E}{E_{True}} = \frac{(E_{True} - E_{Reco} \cdot K_{corr})}{E_{True}}$$



- **Contenimento dello sciame elettromagnetico**

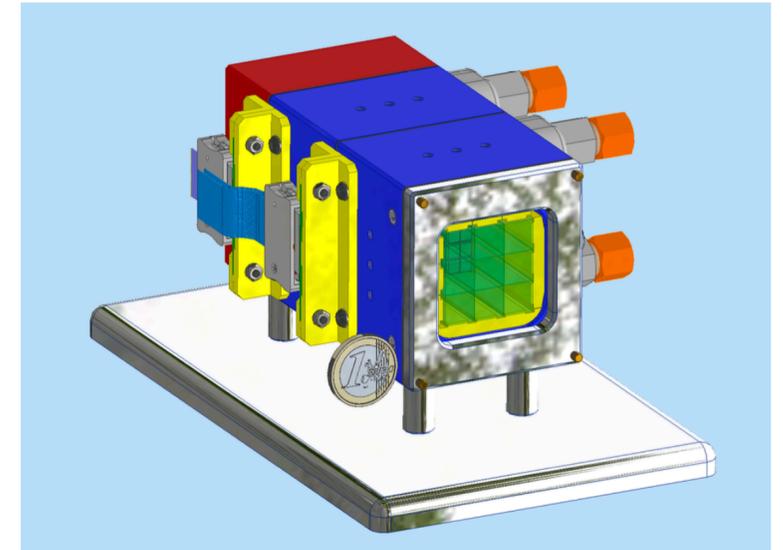
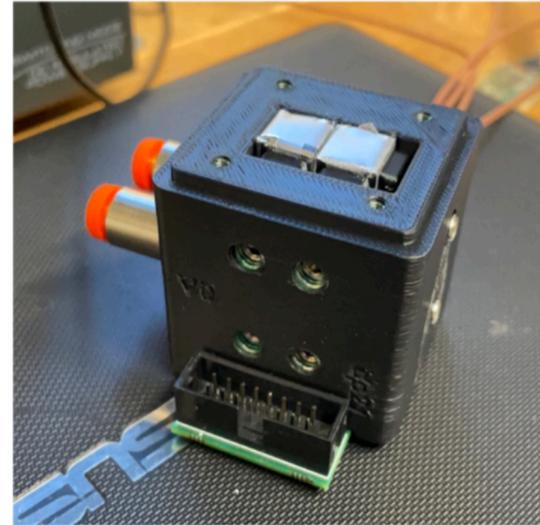
$$\frac{\text{Energia HCal}}{\text{Energia ECal} + \text{Energia HCal}}$$



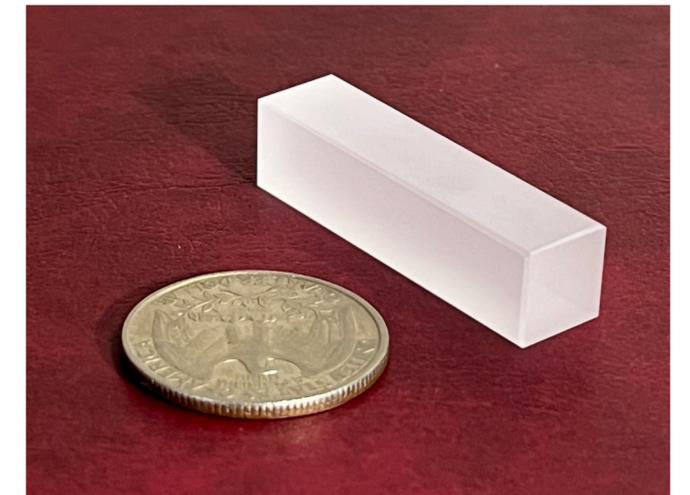
Stato di sviluppo dei prototipi

- **Versioni prototipi:**

- Proto-0 (2 cristalli -> 4 canali)
- Proto-1 (matrice cristalli 3x3, 2 strati -> 36 canali)

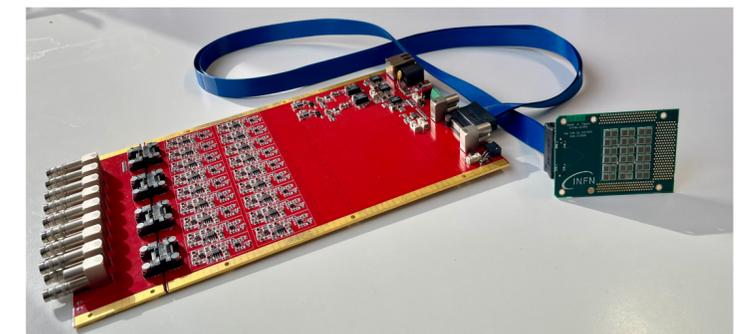


- **Verifica della resistenza alla radiazione dei cristalli e SiPM**



- **Campagne di prove con fascio**

- Proto-0: CERN H2 <https://arxiv.org/abs/2206.05838>
- Proto-1: LNF-BTF (luglio 2023) <https://inspirehep.net/literature/2753375>
CERN-SPS-H2 (Agosto 2023) <https://arxiv.org/abs/2308.01148>



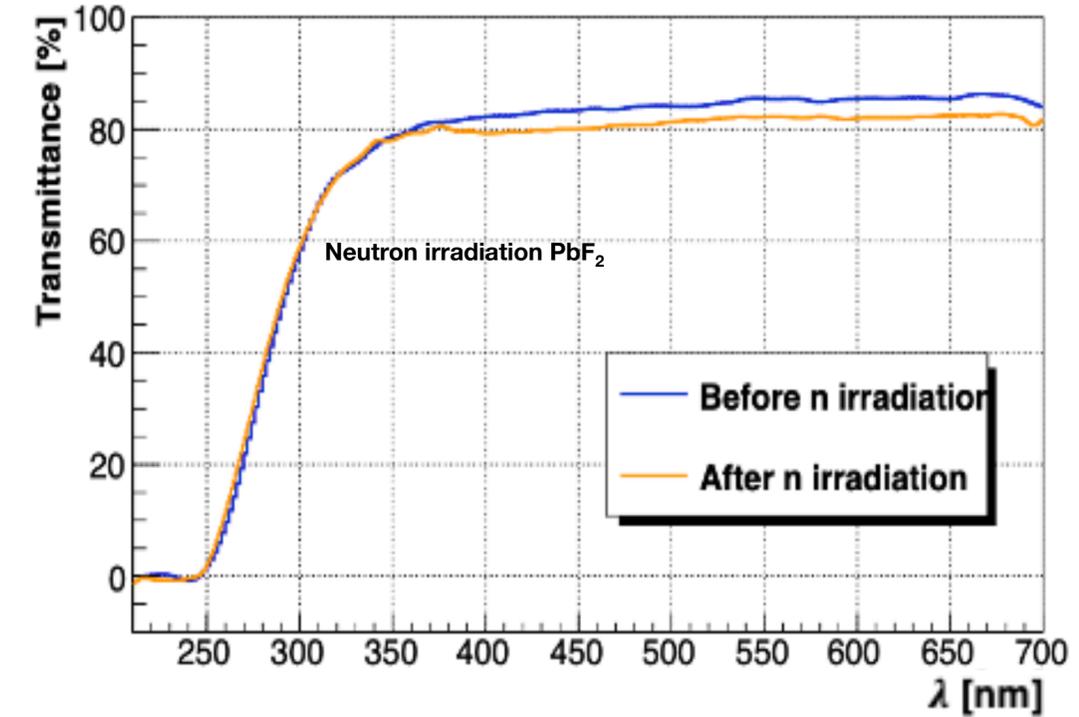
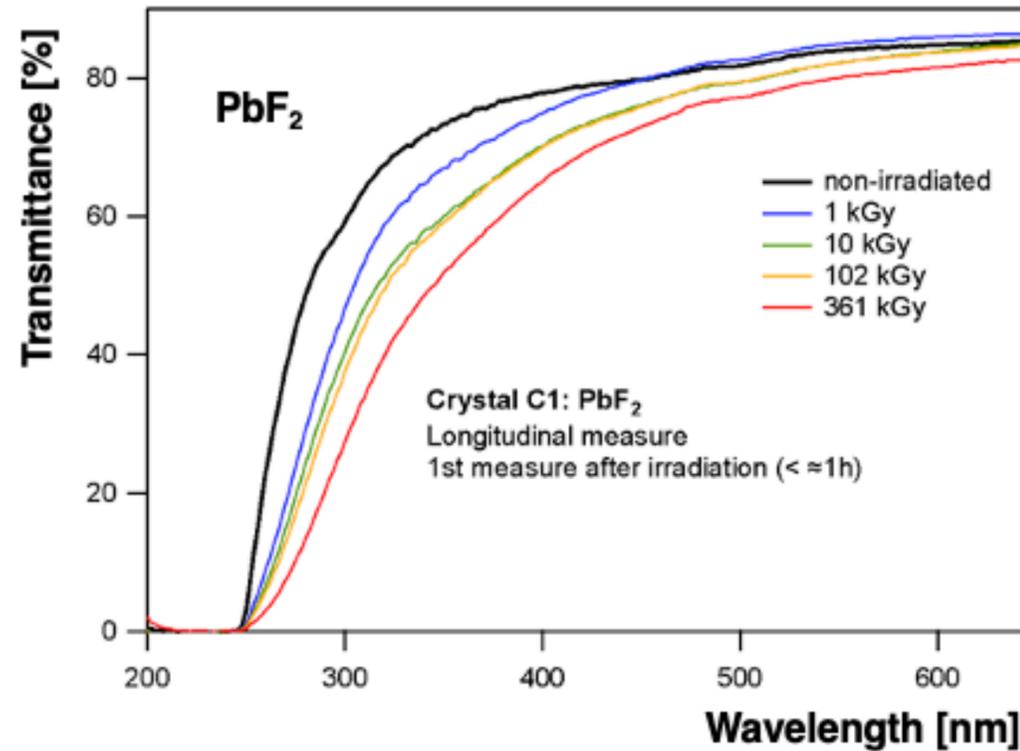
Resistenza ai danni da radiazione

- In ECAL ci si aspetta una fluenza di equivalente di neutroni $\sim 10^{14}$ 1MeV-neq $\text{cm}^{-2}\text{y}^{-1}$ e TID ~ 10 kGy y^{-1}

- **Cristalli:**

- TID fino a 1 MGy (Calliope, ENEA Casaccia).
- Neutroni da 14 MeV (ENEA-FNG, fino a 10^{13} n cm^{-2}).

Non si osservano perdite importanti di trasmittanza



- **SiPM:**

- Confronto SiPM con dimensioni **10 μm** e **15 μm** .
- Irradiati con neutroni da 14 MeV e fluence di 10^{14} n cm^{-2} (ENEA-FNG).

<https://inspirehep.net/literature/2753375>

10 μm pixel-size SiPMs

T [°C]	V _{br} [V]	I(V _{br} +4V) [mA]	I(V _{br} +6V) [mA]	I(V _{br} +8V) [mA]
-10 ± 1	76.76 ± 0.01	1.84 ± 0.01	6.82 ± 0.01	29.91 ± 0.01
-5 ± 1	77.23 ± 0.01	2.53 ± 0.01	9.66 ± 0.01	37.51 ± 0.01
0 ± 1	77.49 ± 0.01	2.99 ± 0.01	11.59 ± 0.01	38.48 ± 0.01

Hamamatsu S14160-3015PS

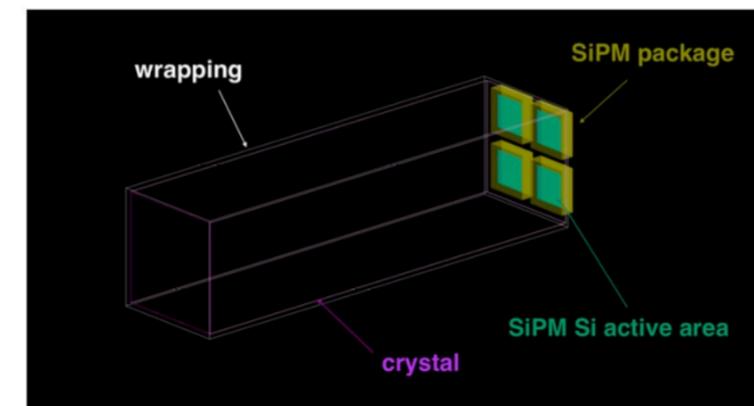
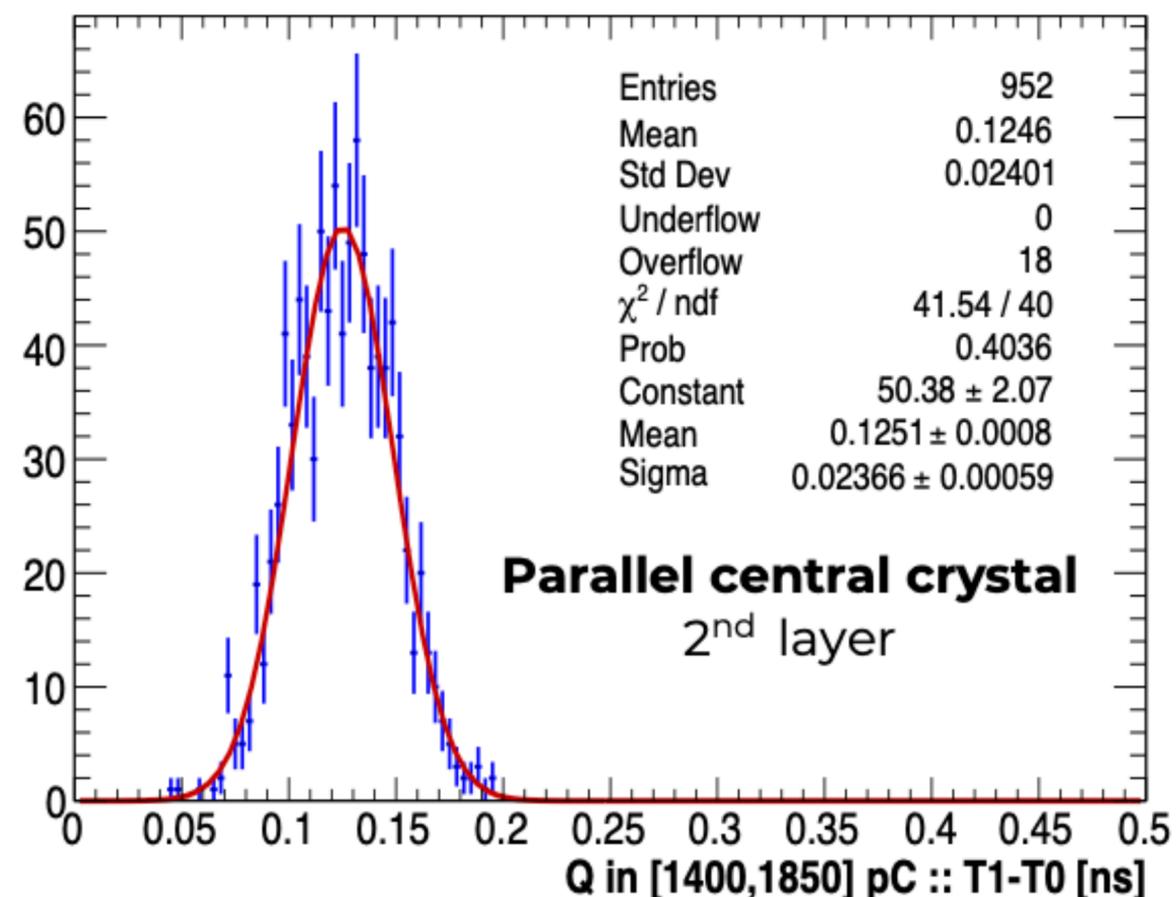
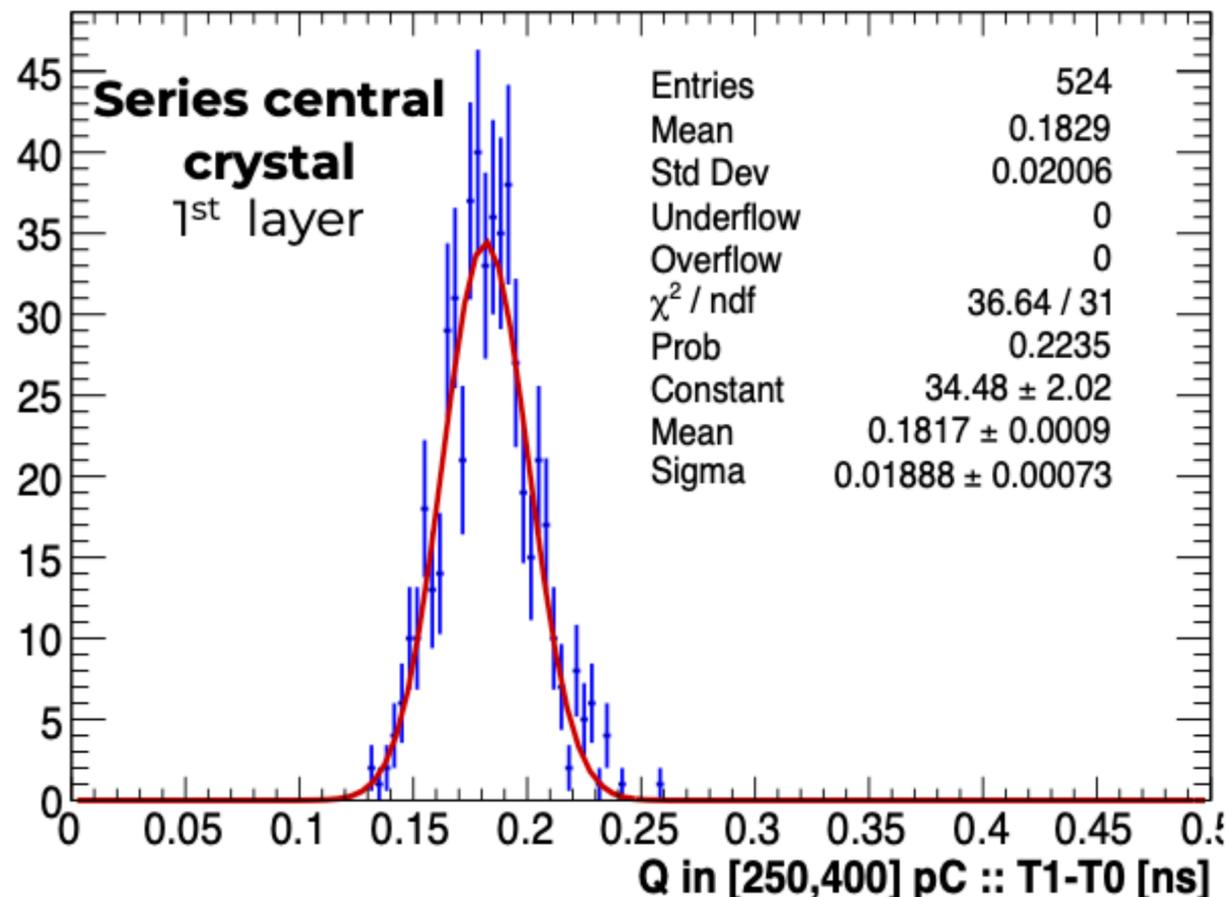
Prova con fascio: risoluzione temporale

- Test di proto-1 presso CERN-H2:

- Fascio di **elettroni a 120 GeV**, centrato sul cristallo centrale (matrice 3x3).
- Misura basata sulla differenza tra i tempi dei due canali del cristallo centrale:

$$\Delta T = T_0 - T_1$$

- Risoluzione temporale **O(20ps)** per entrambi gli strati.

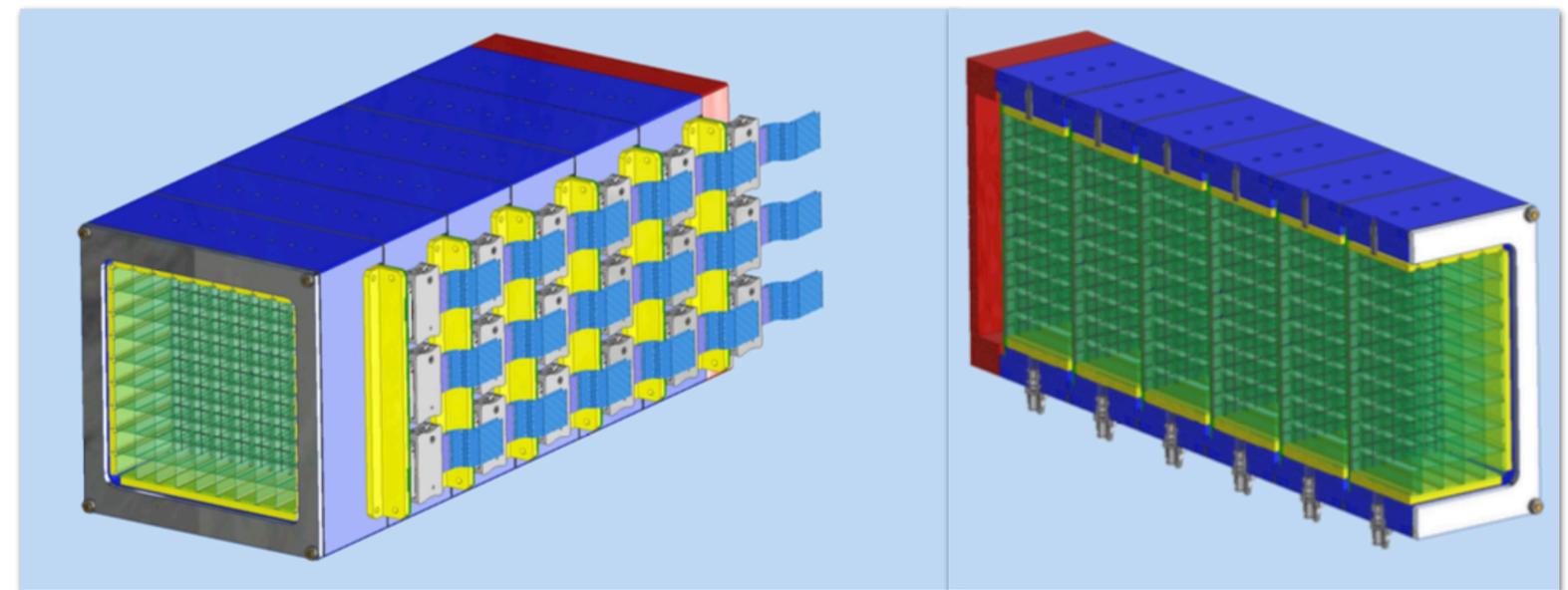


Tecniche differenti di analisi sono in corso

Conclusione

- **Crilin** rappresenta una proposta molto interessante per il calorimetro elettromagnetico per il muon collider.
- I risultati sia a livello di simulazione e sia da test sperimentali presentano delle prestazioni molto promettenti e compatibili con i requisiti richiesti.
 - Risoluzione in energia: $\frac{\sigma}{E} \approx \frac{4.8\%}{\sqrt{E}} + 0.2\%$
 - Eccellente risoluzione temporale: **O(20ps) @ 120 GeV**
 - Ottima resistenza alle radiazioni

- Ulteriori studi sperimentali sulla resistenza alle radiazioni (LNF-BTF).
- **Nuovo prototipo** in fase di sviluppo: 5/6 strati con matrici di cristalli 9x9.

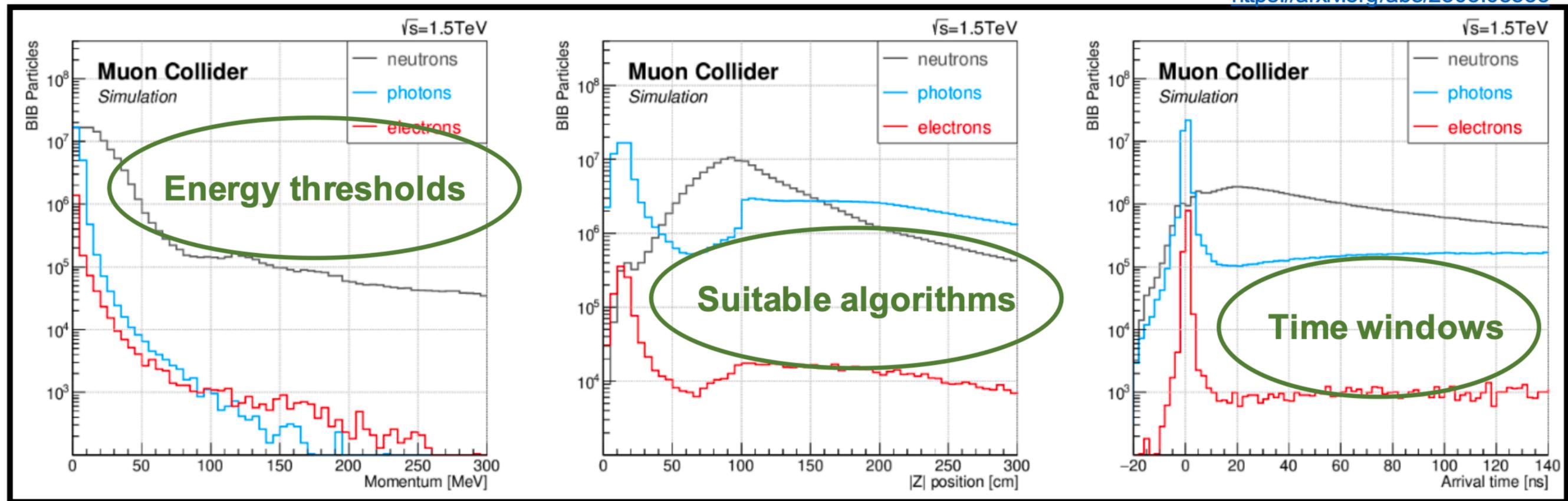


Backup

Il fondo indotto dal decadimento del fascio

- Tuttavia una componente irriducibile del fondo indotto dal fascio entra nella regione del detector.
- Simulazioni del BIB con **FLUKA** ad $\sqrt{s}=1.5$ TeV (con i coni assorbitori).

<https://arxiv.org/abs/2303.08533>



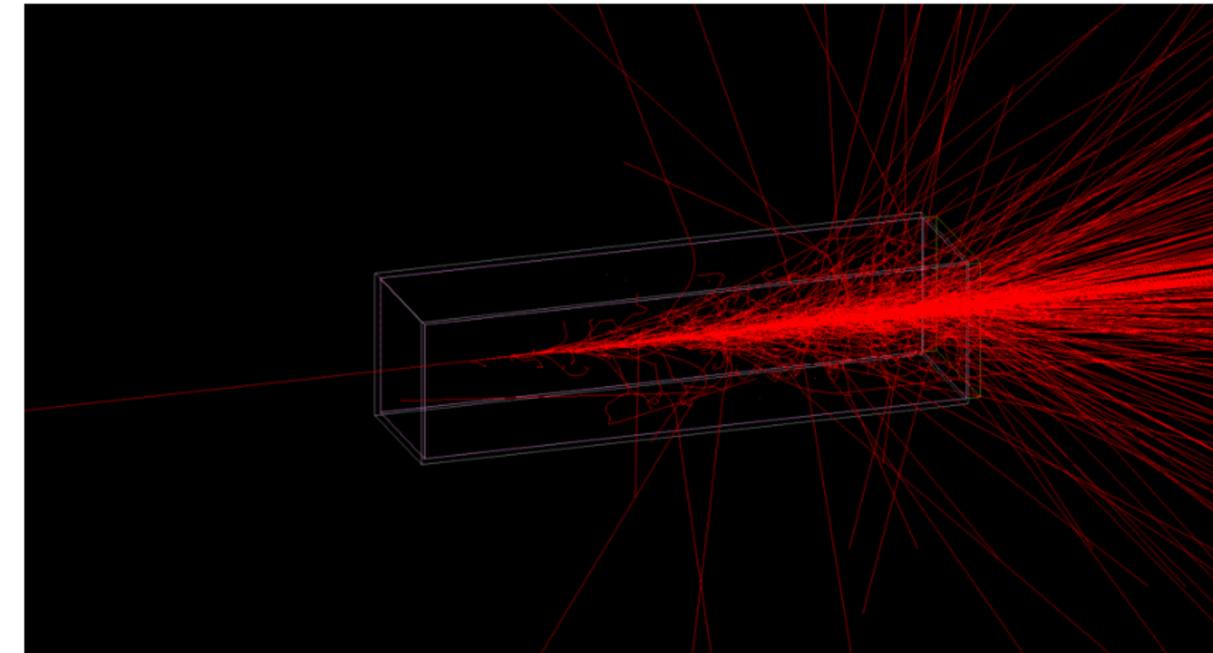
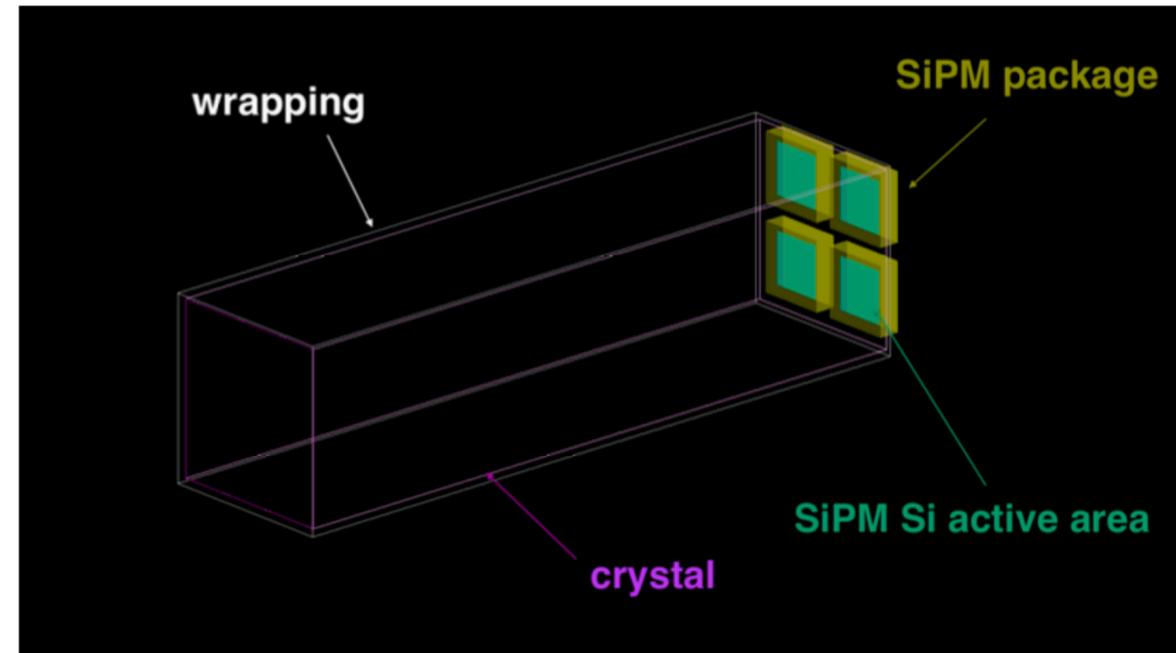
Basso momento

Origine spostata rispetto al punto di interazione

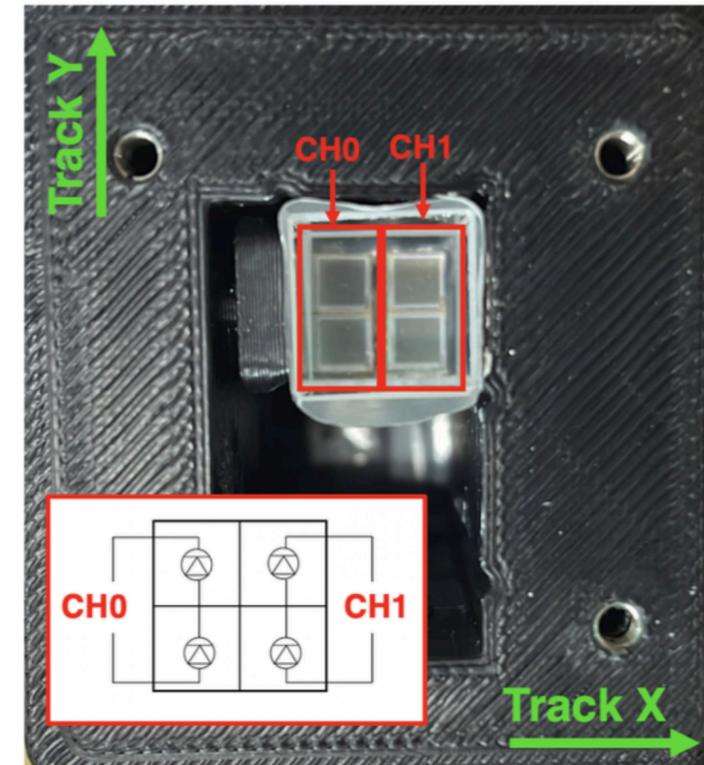
Asincrono rispetto al tempo di attraversamento del bunch

Sciame nel cristallo

- Geometria con simulazione Geant4
- Esempio di sviluppo dello sciame per elettroni a 120 GeV



- Ogni singolo cristallo è letto da 4 Sipm.
- Coppie di Sipm sono collegati in serie e formano due canali di lettura (CH0, CH1).



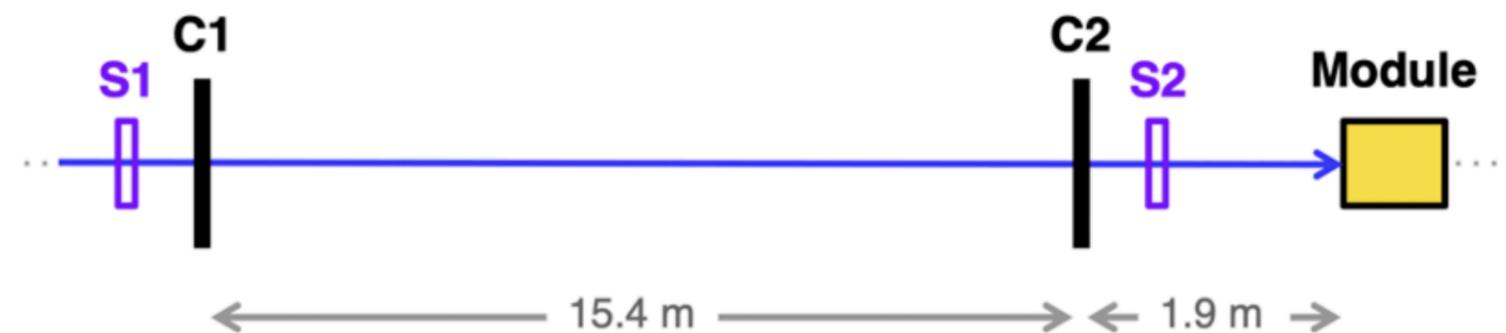
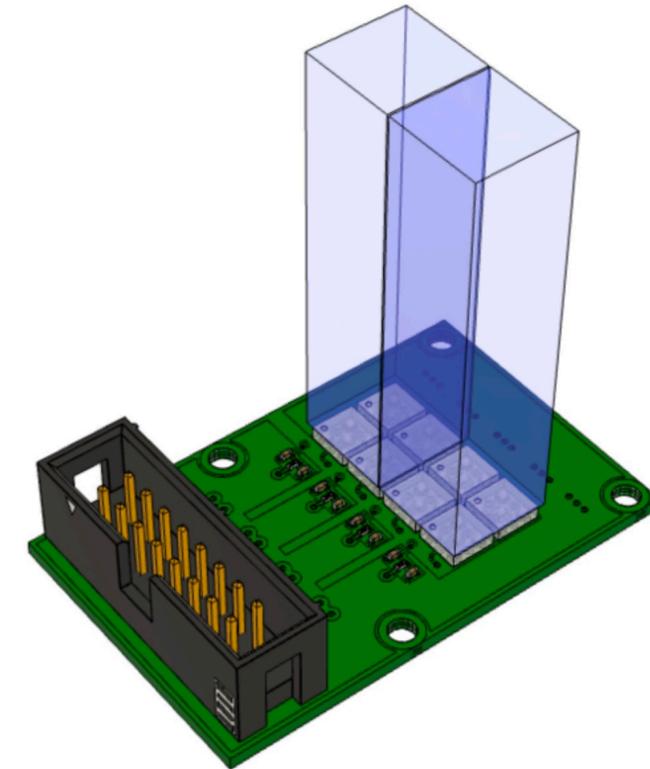
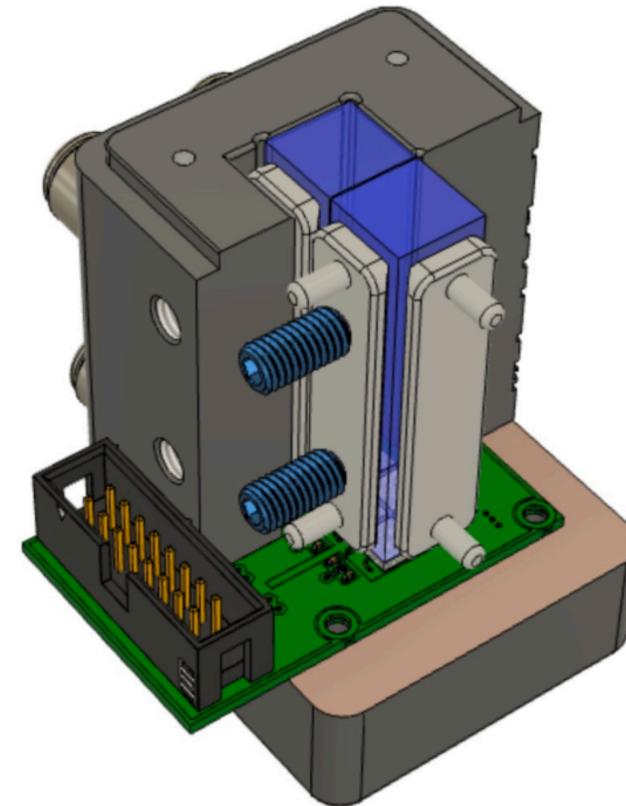
Proto-0 test SPS-H2 CERN

- Proto-0 formato da due cristalli in un singolo strato (4 Canali).
- Caratteristiche dei cristalli testati:

Crystal	PbF ₂	PWO-UF
Density [g/cm ³]	7.77	8.27
Radiation length [cm]	0.93	0.89
Molière radius [cm]	2.2	2.0
Decay constant [ns]	-	0.64
Refractive index at 450 nm	1.8	2.2
Manufacturer	SICCAS	Crytur

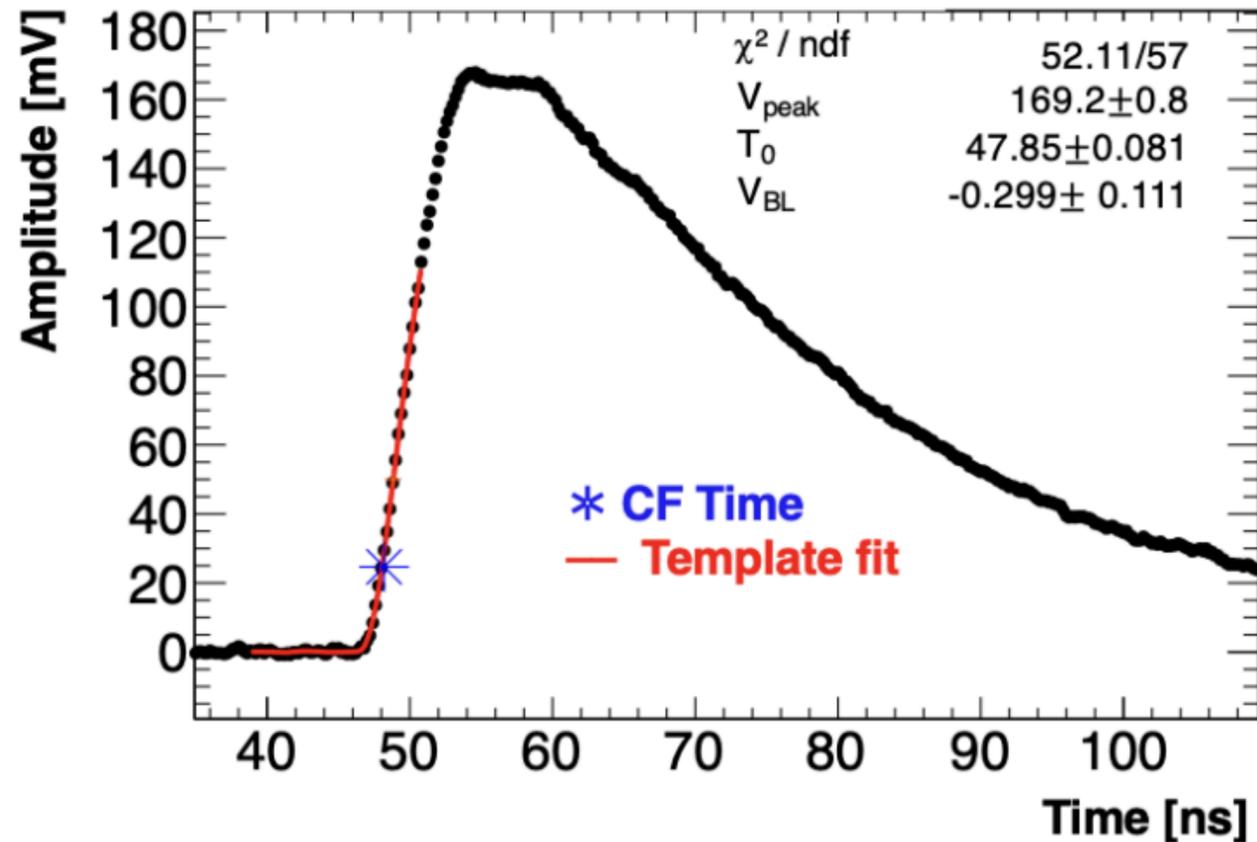
- Ogni cristallo letto da 4 Sipm Hamamatsu S14160-3010PS SMD.
- Dimensione 3x3 mm² (singolo pixel 10μm).
- Leggere caratteristiche delle FEE

- Fascio: **elettroni da 120 GeV**
- **Trigger scintillatori S1 e S2**
- **Tracciamento con micro-strip silicon tracker C1 e C2**

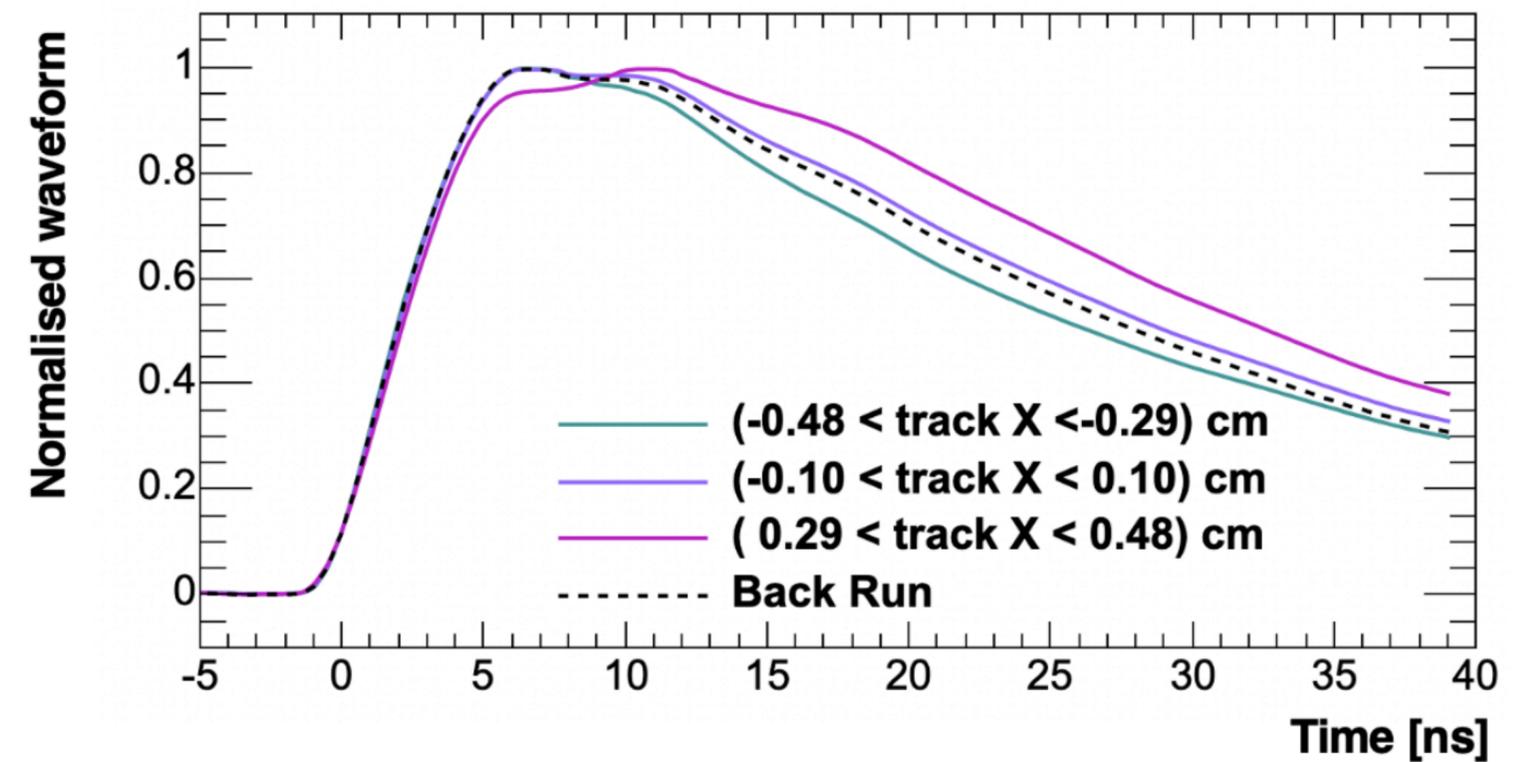


Proto-0 test SPS-H2 CERN

- La carica del segnale è stata ottenuta integrando tra $[T_{\text{picco}} - 20 \text{ ns}, T_{\text{picco}} + 140 \text{ ns}]$
- Il tempo dell'impulso è stato ottenuto tramite un fit della salita del segnale, considerando un valore ottimizzato di CF a 12%.



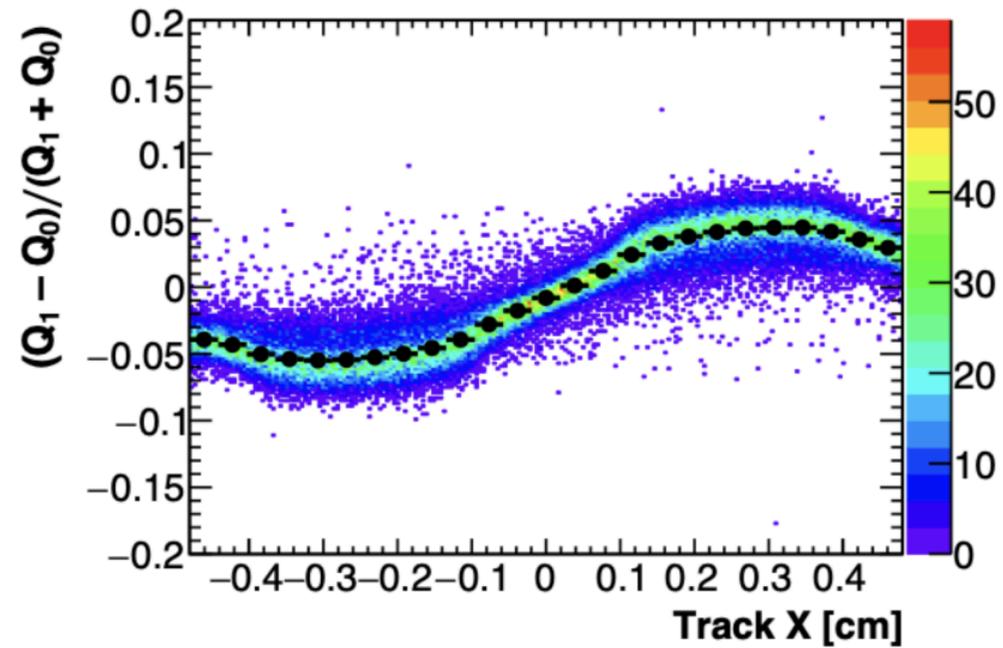
- Studio del segnale variando la posizione di impatto sul cristallo.
- Effetti di trasporto ottico nel cristallo.
- Effetto sul singolo canale (CH0) variando la posizione con dei tagli fiduciali.



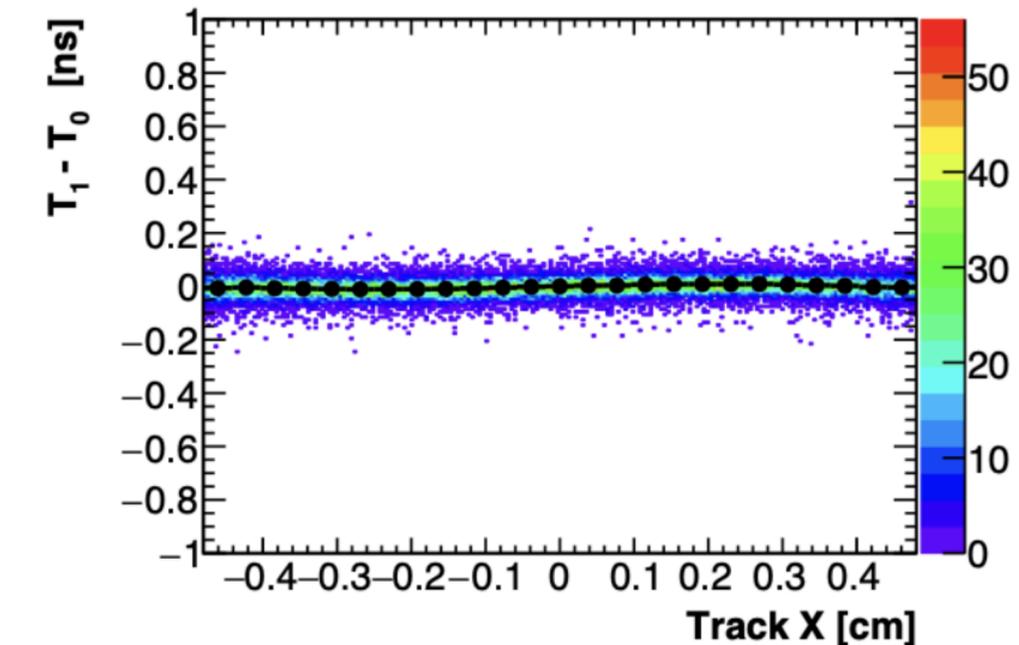
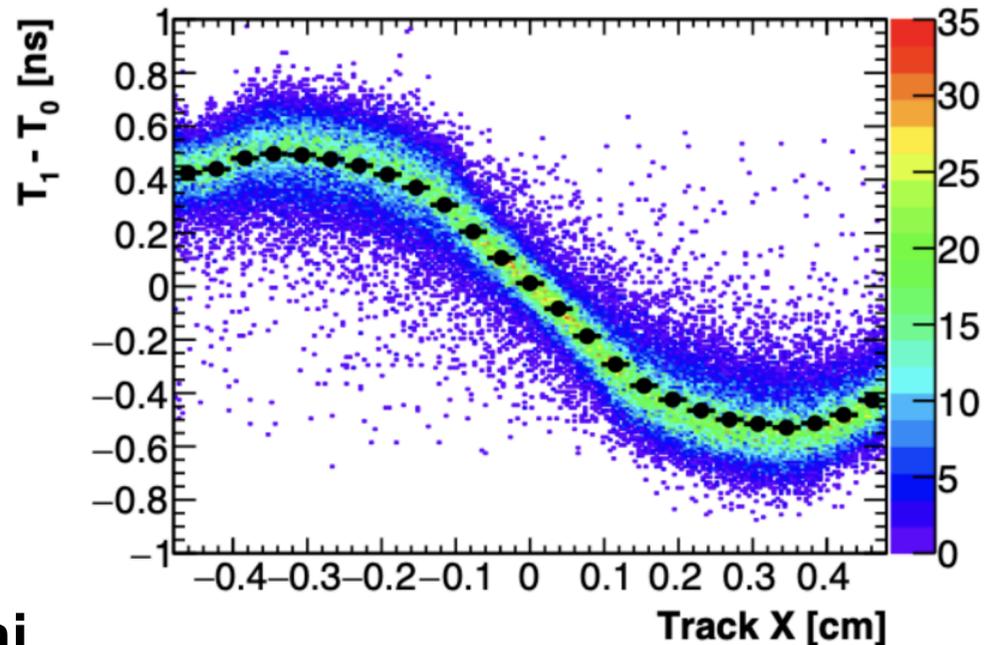
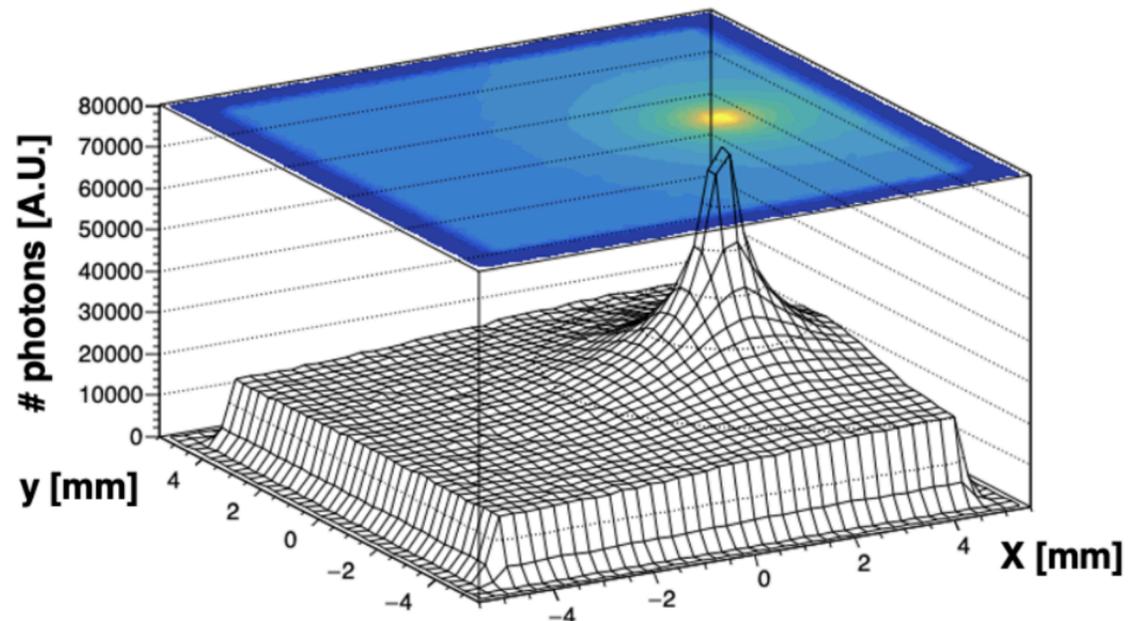
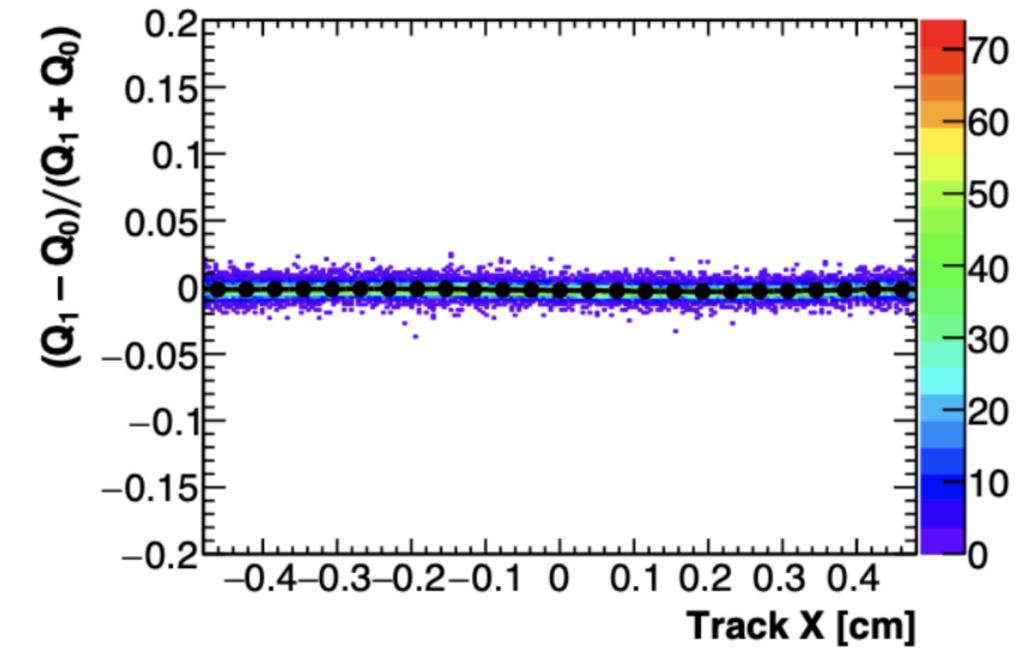
Proto-0 test SPS-H2 CERN

- Asimmetria di carica e tempo in funzione della posizione del fascio (x).
- La luce indiretta è maggiormente attenuata
- Nel caso della configurazione posteriore, non si osserva asimmetrie.
- La riflessione indietro lungo il cristallo appiana la correlazione rispetto la posizione del fascio.

- Fascio incidente **frontalmente**



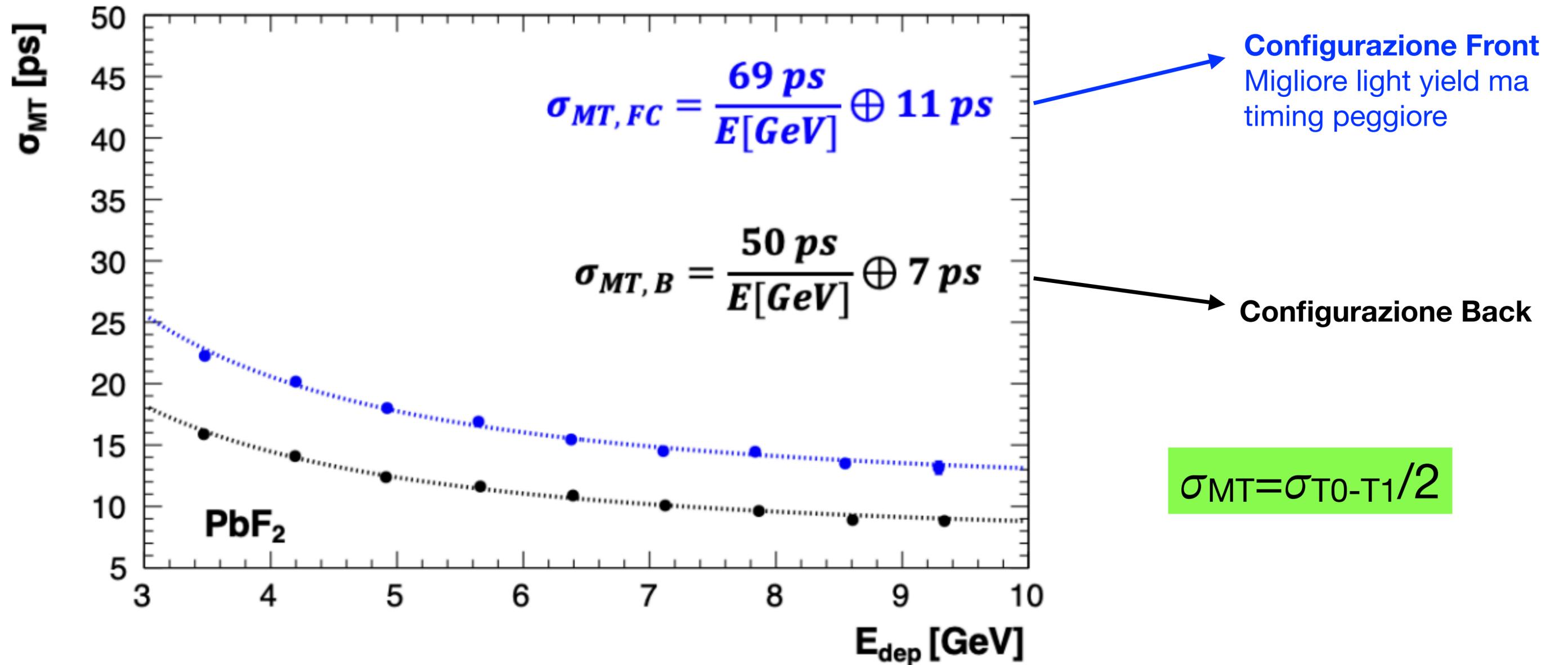
- Fascio incidente **posteriormente**



- **Risultati ottenuti anche dalle simulazioni**

Proto-0 test SPS-H2 CERN

Elettroni 120 GeV



Proto-0 test LNF-BTF

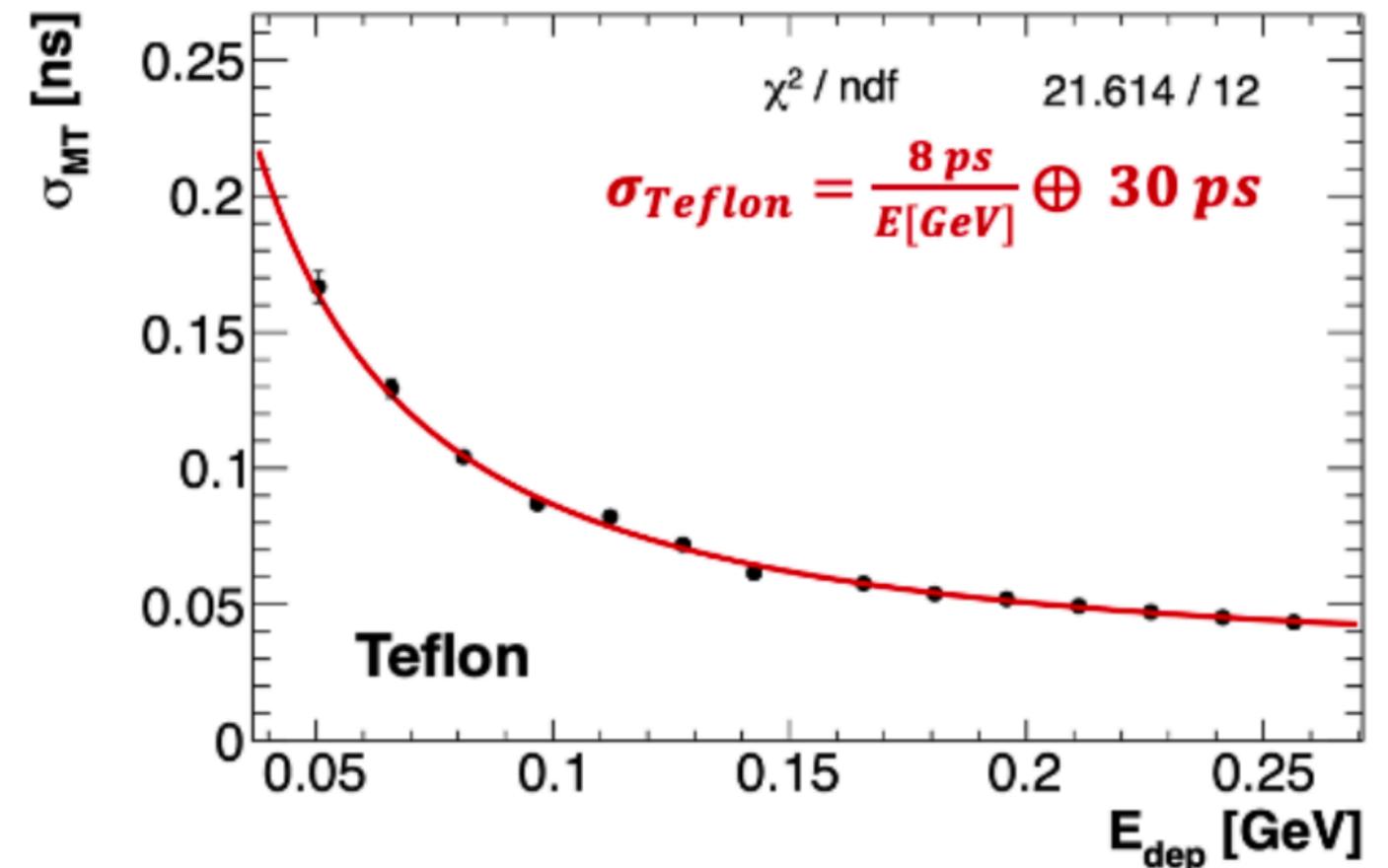
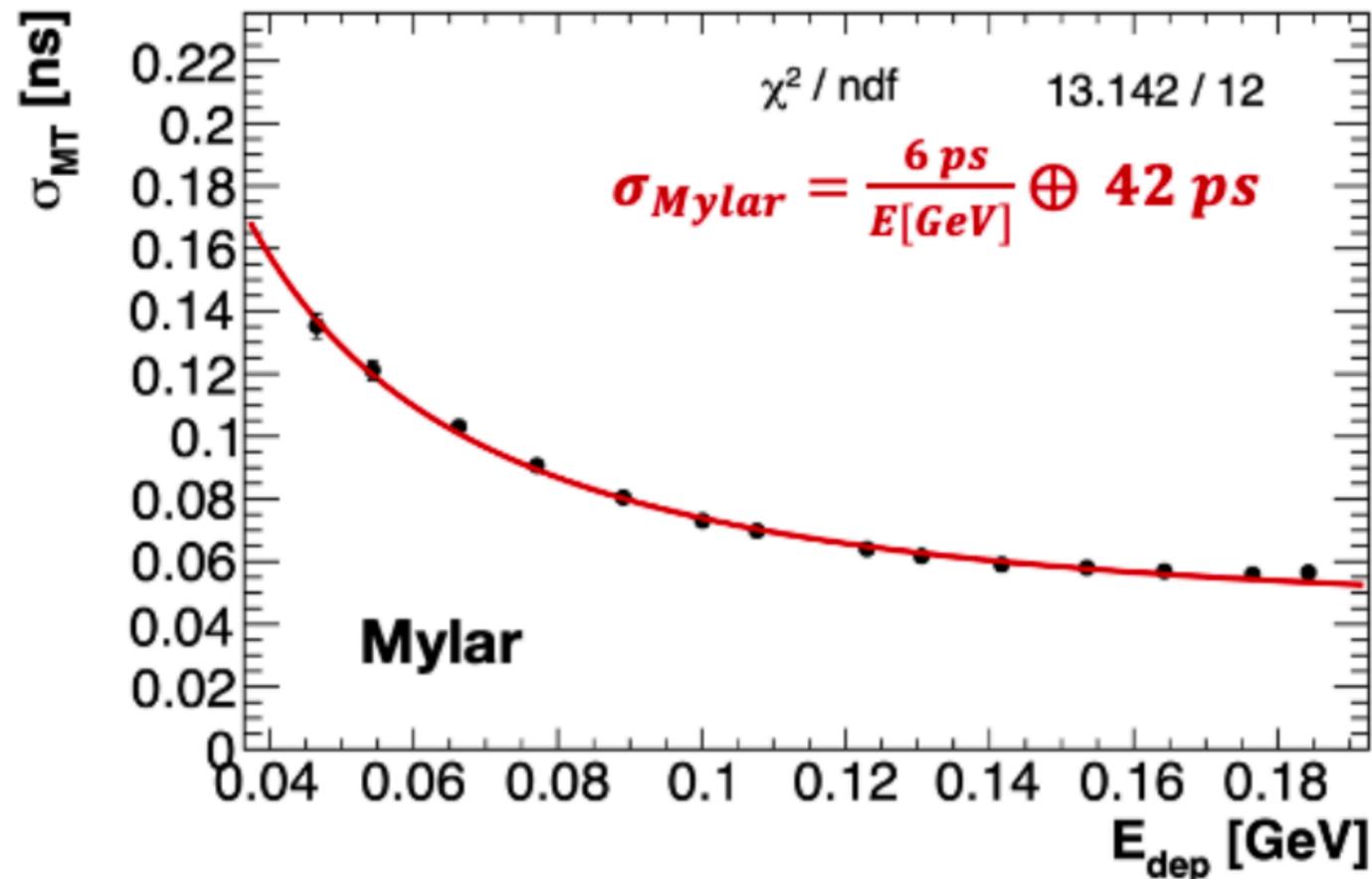
Elettroni a 450 MeV

Confronto tra due wrapping dei cristalli: Mylar e Teflon

Light yield (Vop+2V):

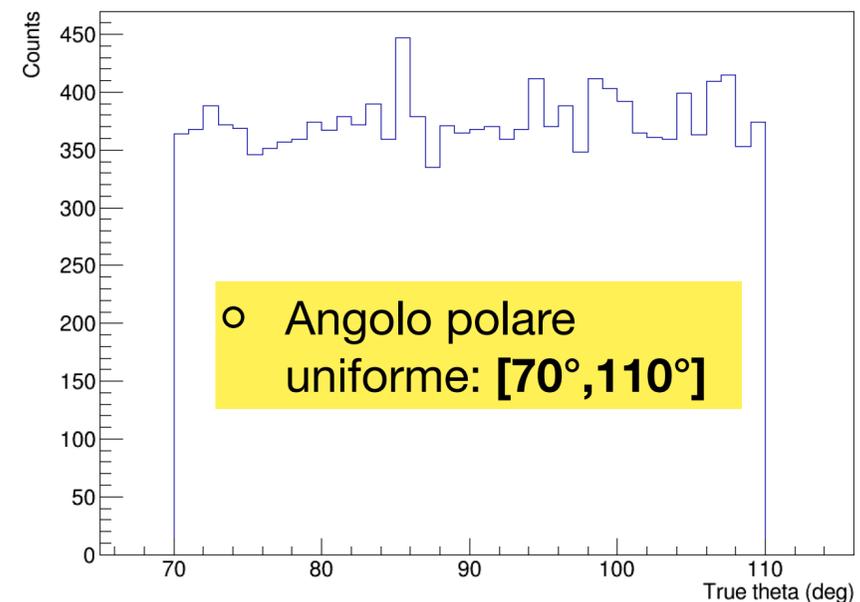
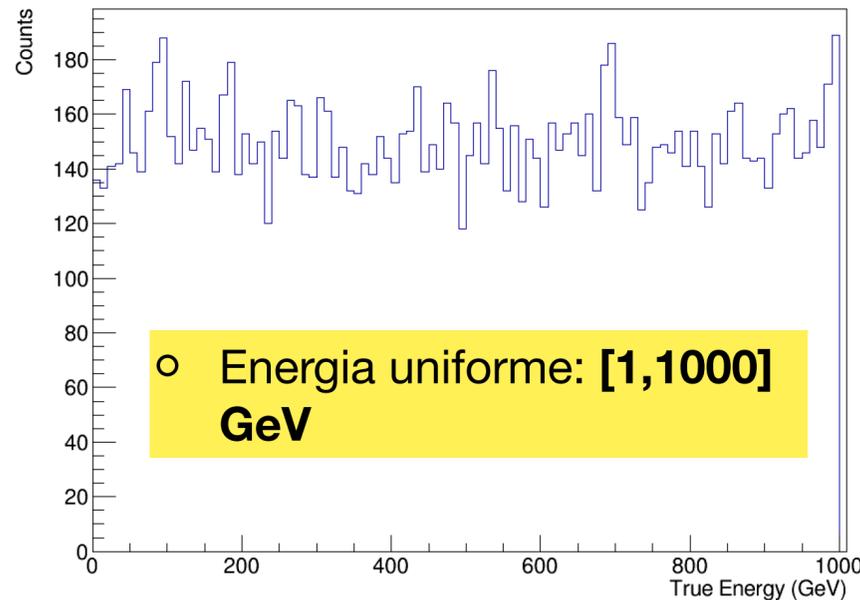
- Teflon: 0.32 p.e/MeV
- Mylar: 0.25 p.e/MeV

$$\sigma_{MT} = \sigma_{T0-T1}/2$$



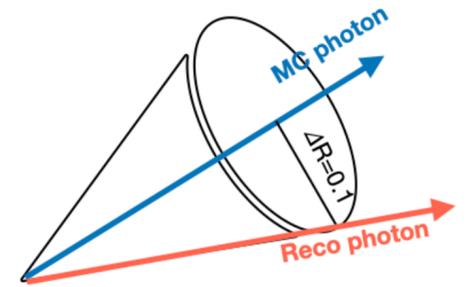
Studio di simulazione

- Campione di **15000 fotoni** Monte Carlo.
- **Senza** la presenza del fondo indotto dal fascio.



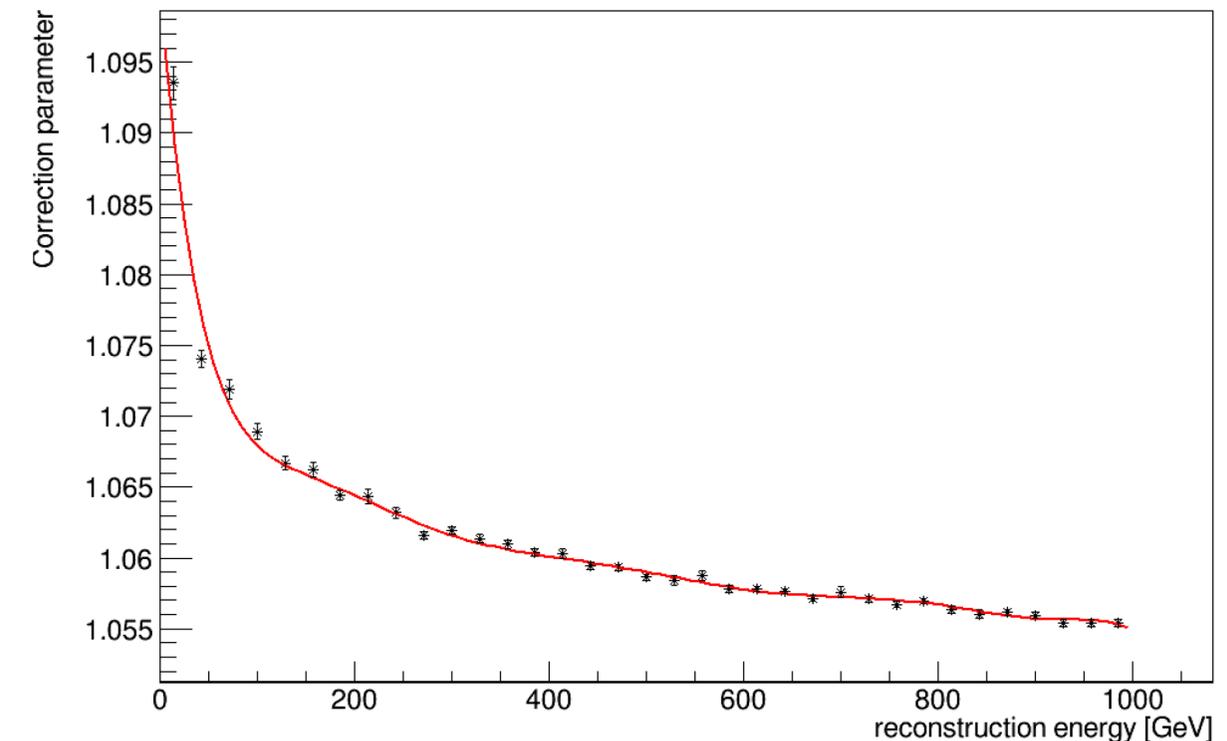
- Procedura di associazione tra fotoni Monte Carlo e ricostruiti dal rivelatore.

- Presenza di almeno un fotone ricostruito in un cono con $\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2} < 0.1$
- Fotone ricostruito con energia più vicina a fotone Monte Carlo.
- $\frac{\Delta E}{E_{True}} = \frac{(E_{True} - E_{Reco})}{E_{True}} < 0.5$



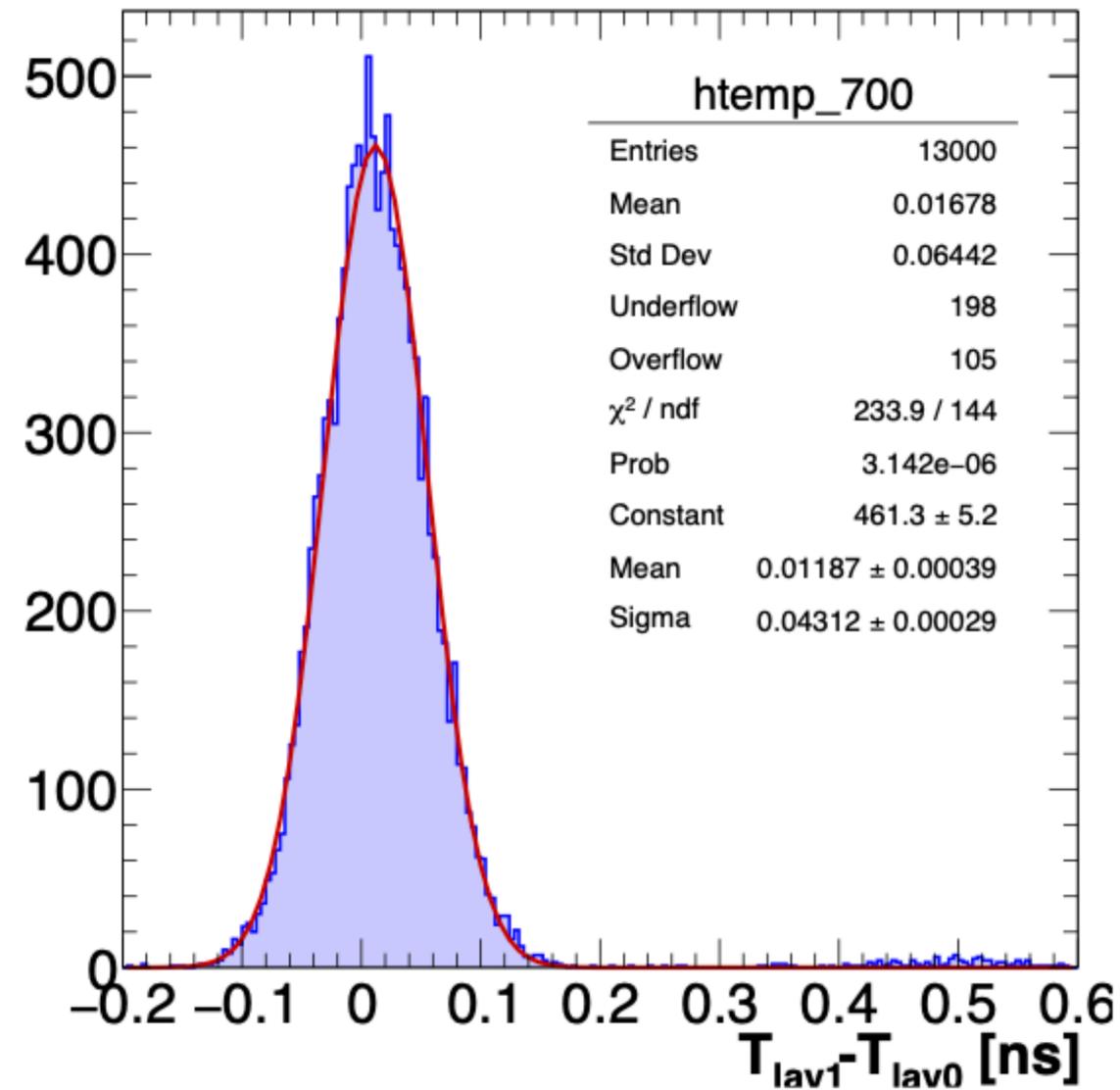
- Correzione energia ricostruita:

$$K_{corr} = \frac{E_{True}}{E_{Reco}}$$



Prova con fascio: risoluzione temporale

- Test di proto-1 presso CERN-H2:



- Analisi considerando l'informazione dei tempi medi di entrambi gli strati è in corso.
- Risoluzione temporale O(40ps) largamente dominata dall'effetto di jitter della sincronizzazione O(32ps)