



# Caratterizzazione di un calorimetro shashlik piombo- scintillatore

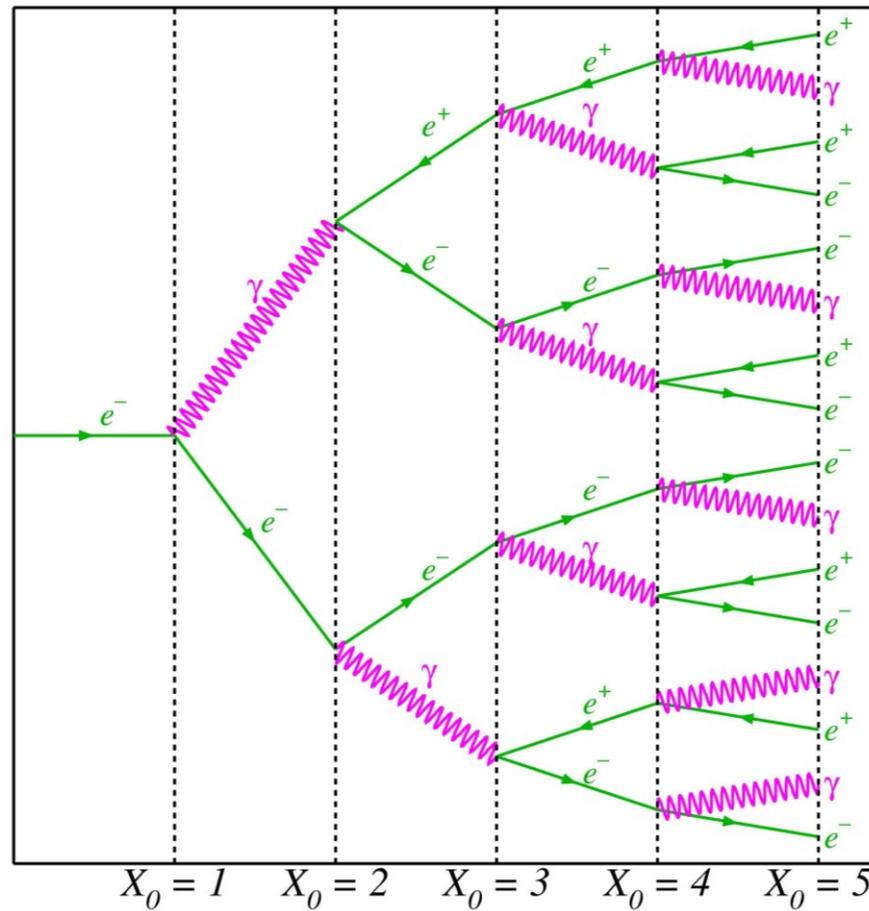
- ▶ Stefano Carsi
- ▶ Matricola 736512
- ▶ Dipartimento di Scienza e Alta Tecnologia
- ▶ 14 Dicembre 2021

# Sommario

- ▶ **La calorimetria** e i calorimetri elettromagnetici
- ▶ **La risoluzione energetica** e i suoi contributi
- ▶ **Il calorimetro Jack**
- ▶ **Misure di efficienza** con raggi cosmici nel laboratorio INSULAB
- ▶ **Caratterizzazione su fascio** estratto H2 al CERN
  - ▶ Equalizzazione
  - ▶ Calibrazione
  - ▶ Risoluzione energetica
- ▶ **Conclusioni**

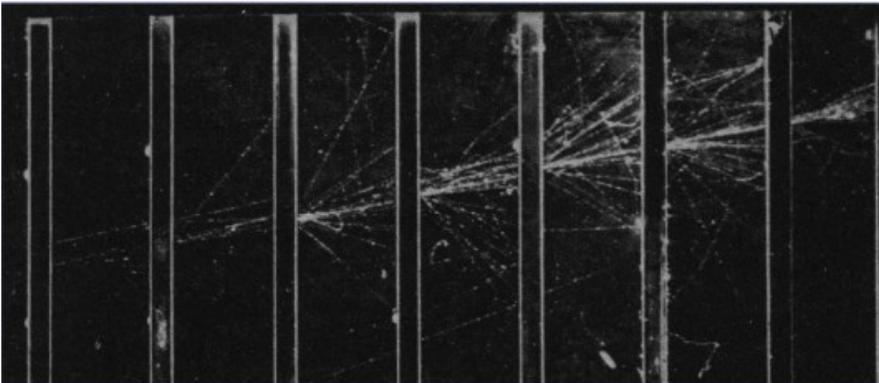
# I calorimetri

- Blocchi di materiale instrumentato che producono un **segnale** **proporzionale all'energia** della particella
- I calorimetri possono essere:
  - Elettromagnetici o adronici
  - Omogenei o a campionamento



**Lunghezza di radiazione:** distanza necessaria affinché l'energia di un elettrone venga **ridotta di un fattore 1/e** solo via bremsstrahlung

$$X_0 \text{ (g cm}^{-2}\text{)} = \frac{716 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)}$$



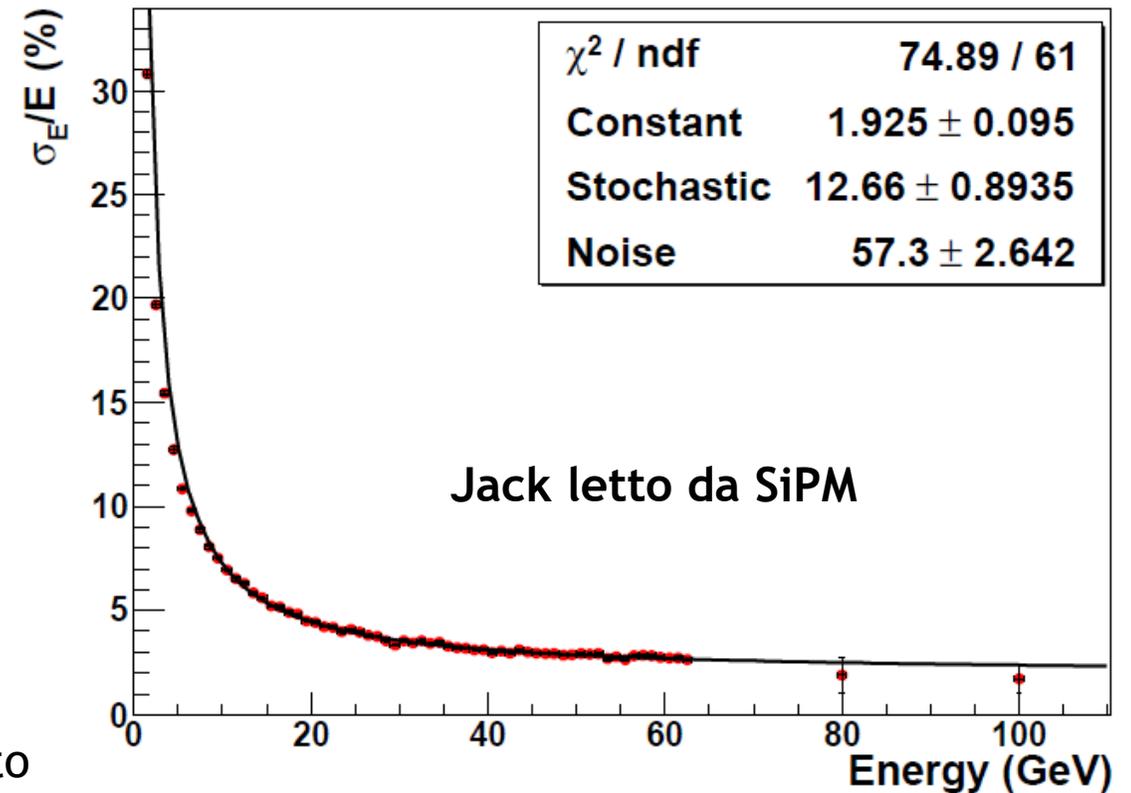
Lo sviluppo di **sciame elettromagnetici** che degradano in energia permette di **misurare l'energia** della particella incidente

# La risoluzione energetica

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

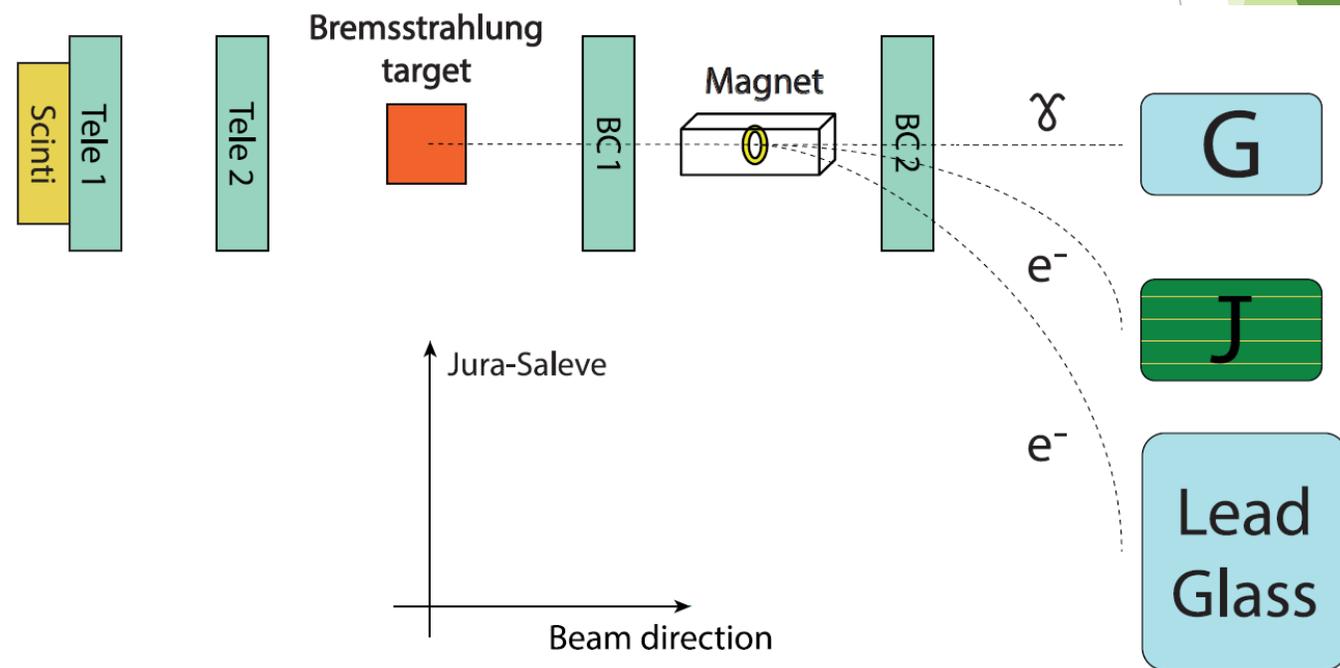
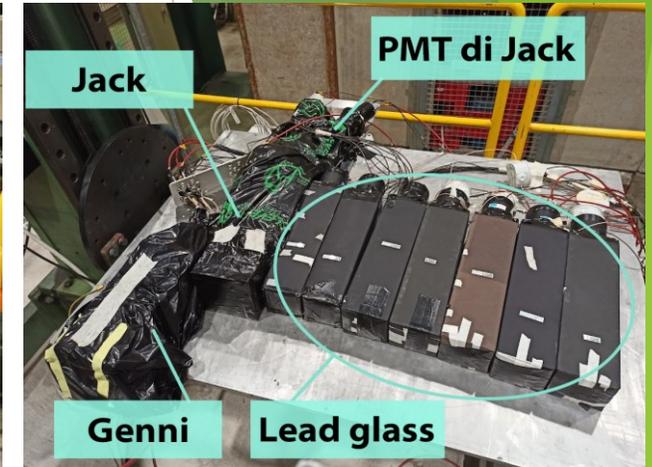
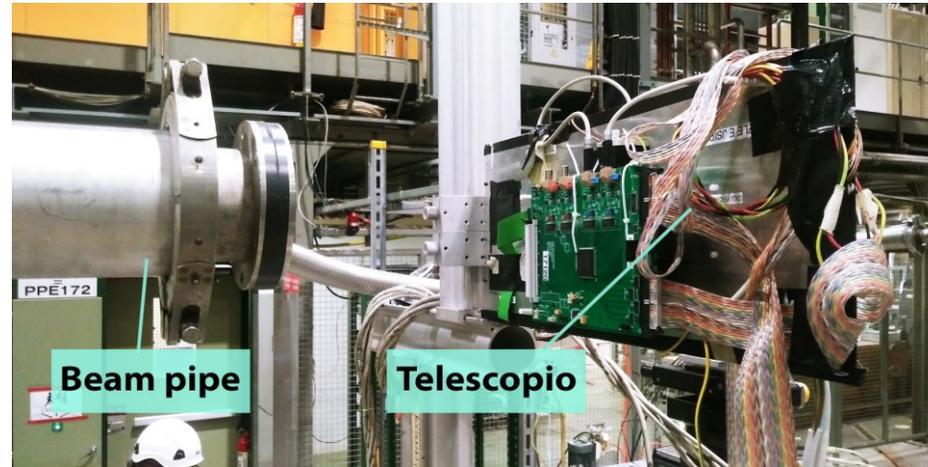
- ▶ **Termine stocastico:** fluttuazioni statistiche nello sviluppo dello sciame
- ▶ **Termine di rumore:** rumore della catena elettronica di lettura
- ▶ **Termine costante:** leakage longitudinale e trasversale, presenza di zone morte, gradiente di temperatura, danno da radiazione o invecchiamento del materiale attivo

Risoluzione energetica nei test ad alta energia  
(A. Berra, PhD thesis)



# Il calorimetro Jack

- **Utilizzo:** indagini preliminari dell'esperimento KLEVER al CERN (studio di interazioni coerenti in cristalli orientati)
- Insieme ad altri calorimetri, era **parte di uno spettrometro per misurare l'energia degli elettroni** deviati da un campo magnetico dopo aver interagito con un bersaglio e aver prodotto fotoni per bremsstrahlung
- **Range energetico coperto nell'esperimento: 100 – 120 GeV**



# Il calorimetro Jack

70 strati di **scintillatore plastico** - spessore 4mm

69 strati di **piombo** - spessore 1.5mm

Sezione dei piani: 11.5 x 11.5 cm<sup>2</sup>

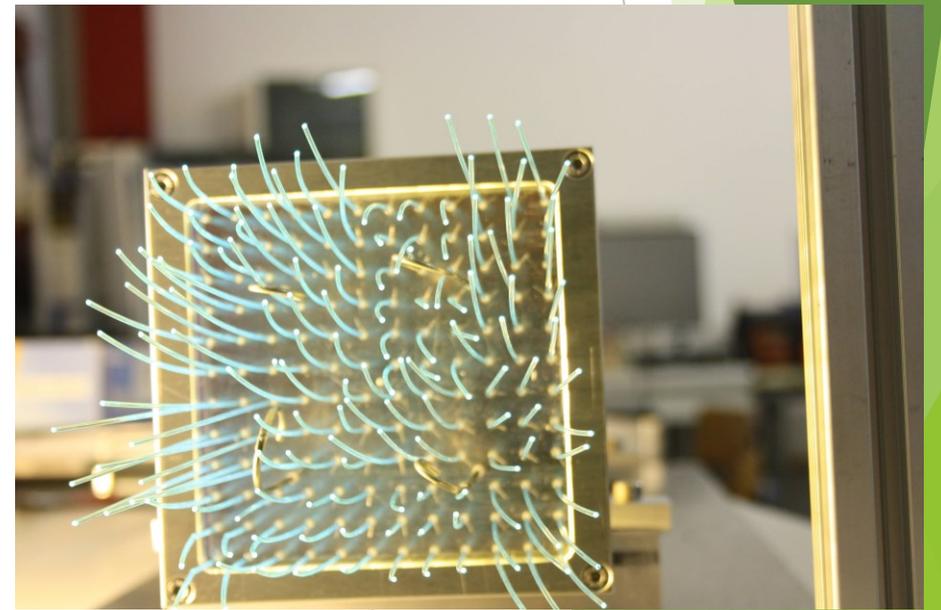
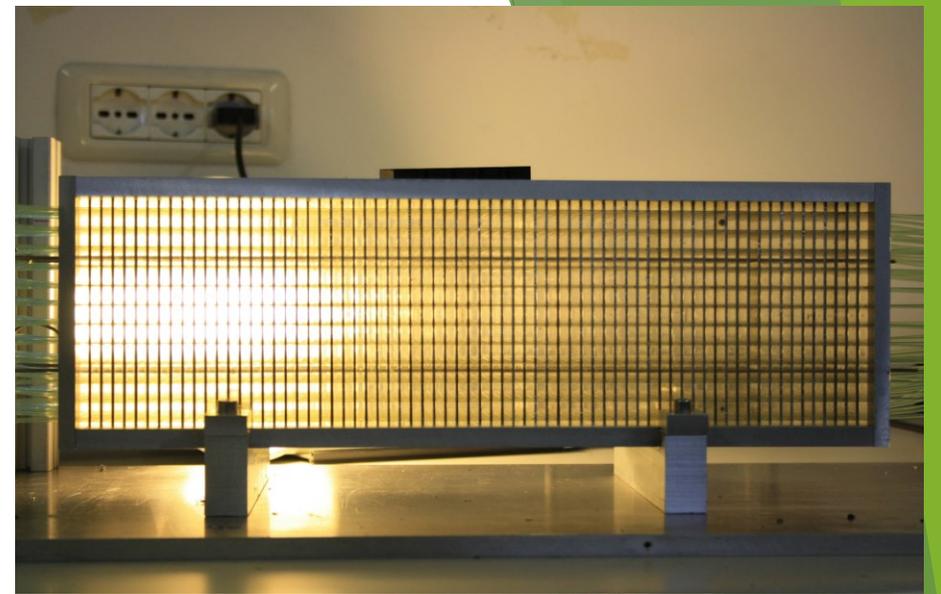
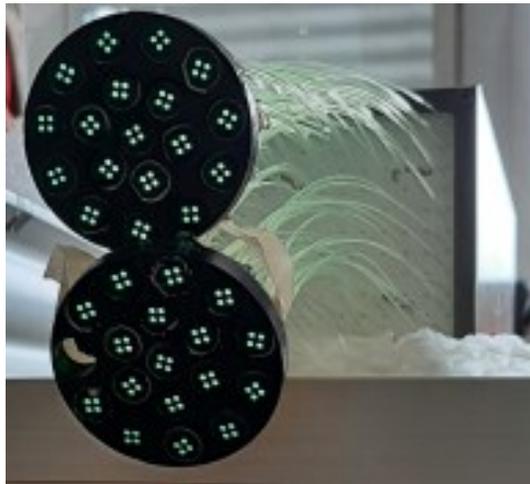
Lunghezza: 19 X<sub>0</sub>

Raggio di Molière: 6 cm

Layout **shashlik**

144 fibre **WaveLength Shifter (WLS)** a passo di 1 cm

Fibre lette da **due tubi fotomoltiplicatori (PMT)**



# La caratterizzazione di Jack

## Caratterizzazione preliminare

- **Funzionamento del sistema fibre + PMT** e relativo accoppiamento
- Misure in laboratorio con raggi cosmici per valutare l'**efficienza del sistema fibre + PMT**

## Caratterizzazione su fascio presso la North Area del CERN

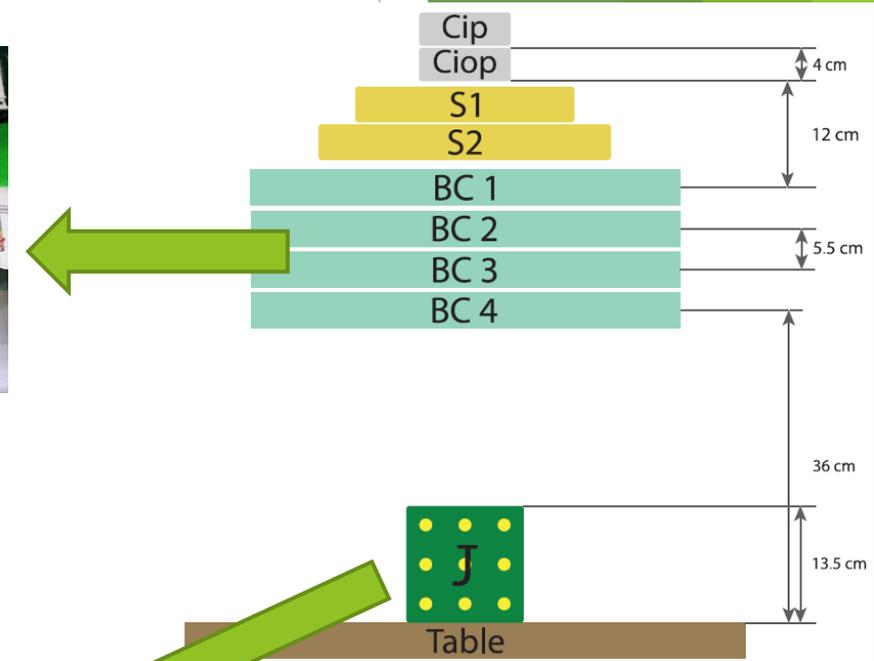
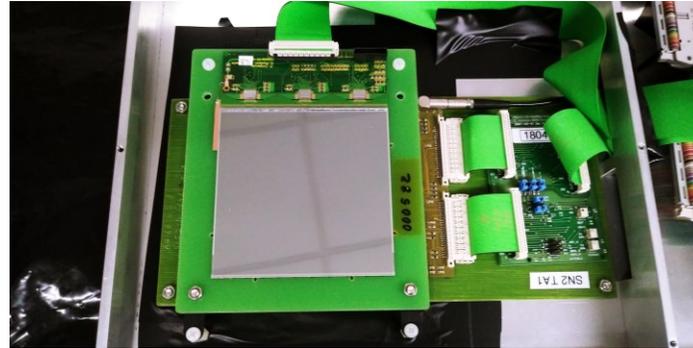
- Misura della **linearità**
- Misura della **risoluzione energetica**

## Le due misure hanno richiesto

- L'**equalizzazione della risposta** dei due canali
- La **calibrazione del rivelatore**

# Setup sperimentale INSULAB - 1

- **Tracciatori** a microstrip di silicio (BC) in **configurazione xy**
  - Area attiva:  $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$
  - Passo di lettura:  $242 \mu\text{m}$
- Scintillatori plastici di **trigger** (S)  $10 \times 10 \text{ cm}^2$
- Lettura PMT tramite un **digitizer** a 14 bit che campiona l'intera forma d'onda a  $500 \text{ Ms/s}$
- Il sistema di acquisizione **analizza la forma d'onda** per ottenere il **massimo del segnale** (PH) e il corrispondente **istante di tempo**
- PH e tempo sono le due variabili usate per **discriminare** eventi di **segnale** da eventi di **rumore**

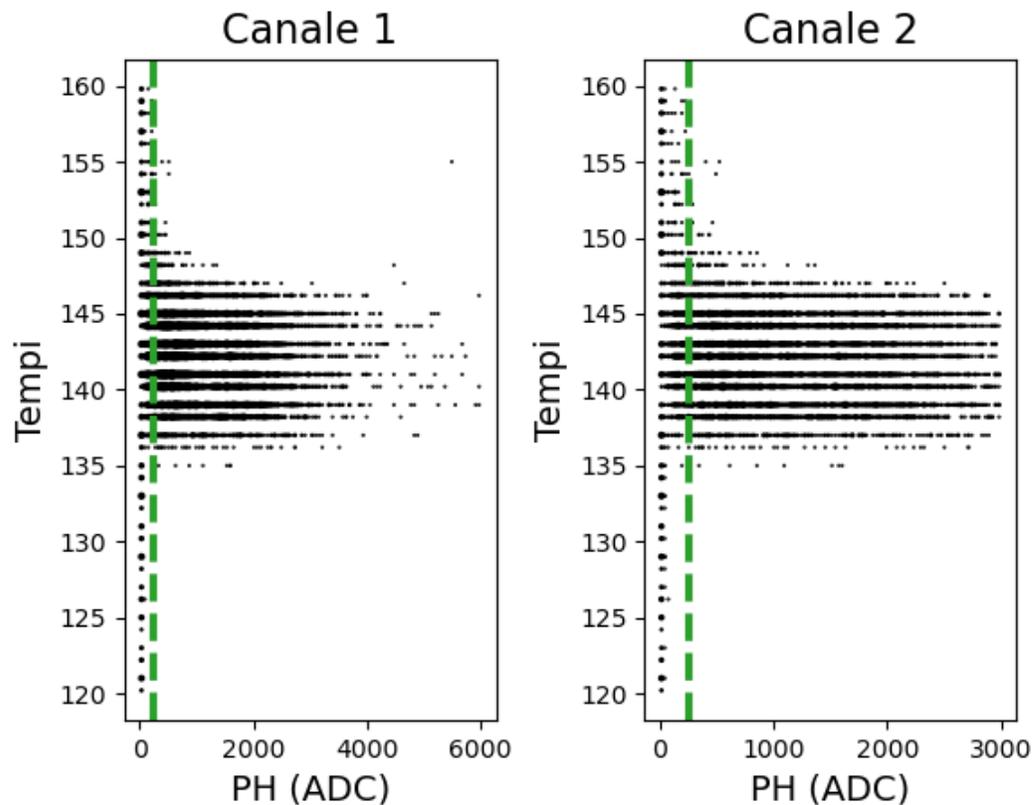


# Efficienza del sistema

Rapporto tra il numero di **particelle viste** dal calorimetro e il numero di **particelle che lo hanno attraversato**

Per identificare le particelle viste:

- **Soglia in pulse height**
- **Canali in OR**
- **Ricostruzione delle tracce** sul piano del calorimetro

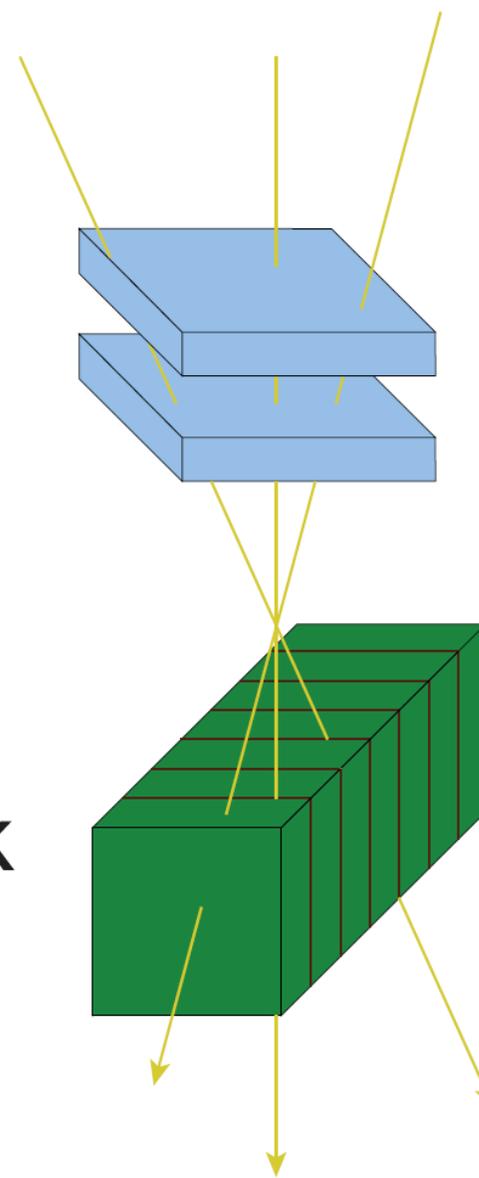


Pulse height espresse in unità di ADC  
Tempi espressi in tick: 1tick = 2ns

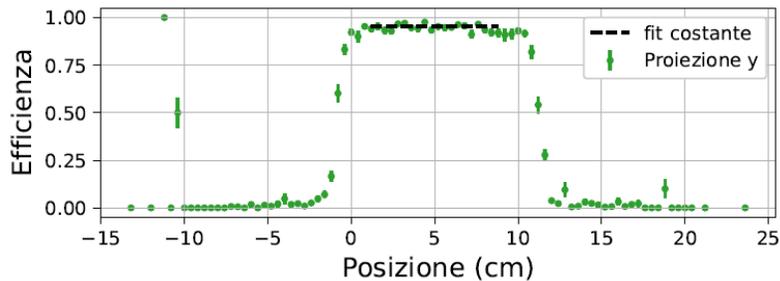
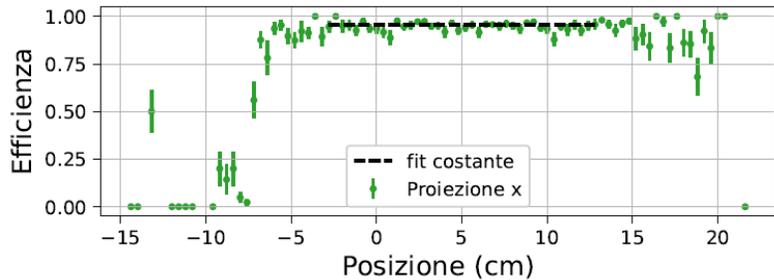
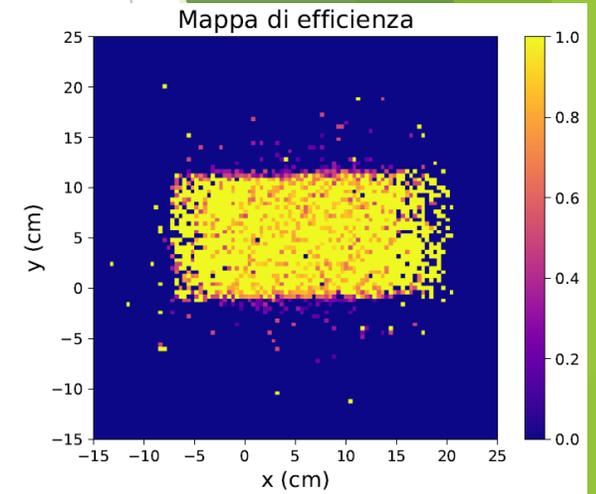
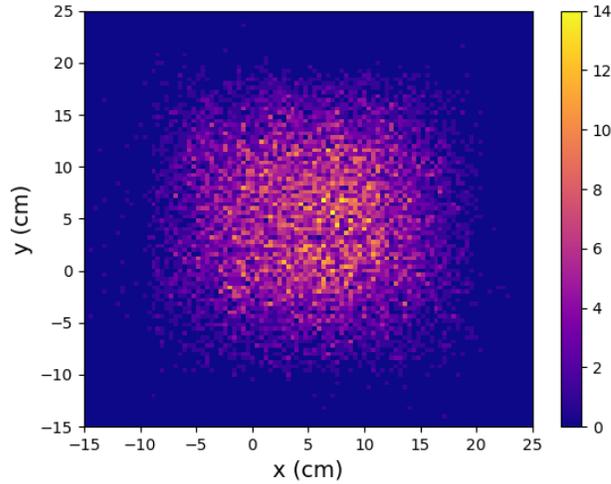
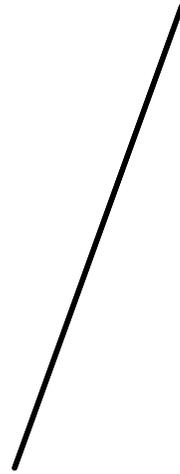
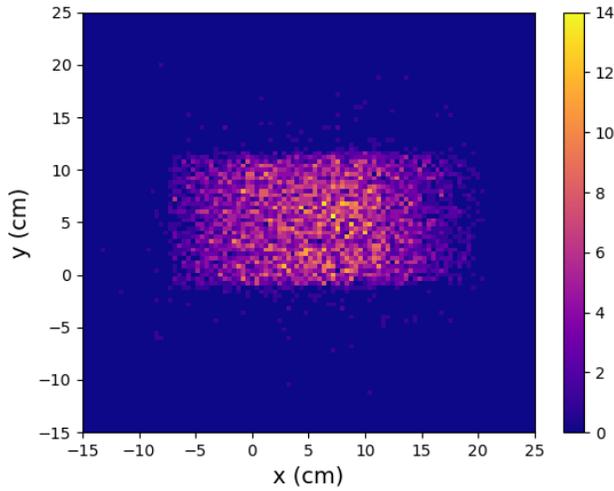
BC 1

BC 2

Jack

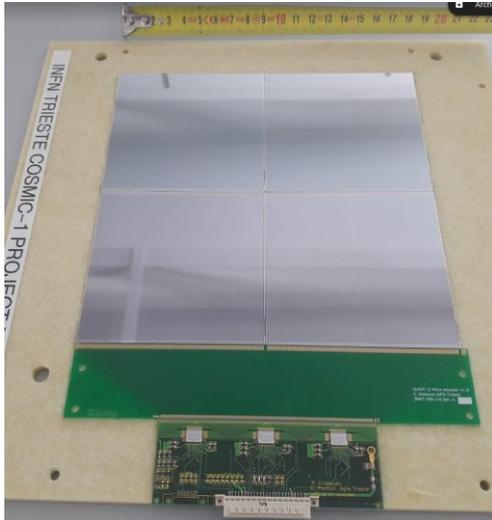


# Efficienza del sistema

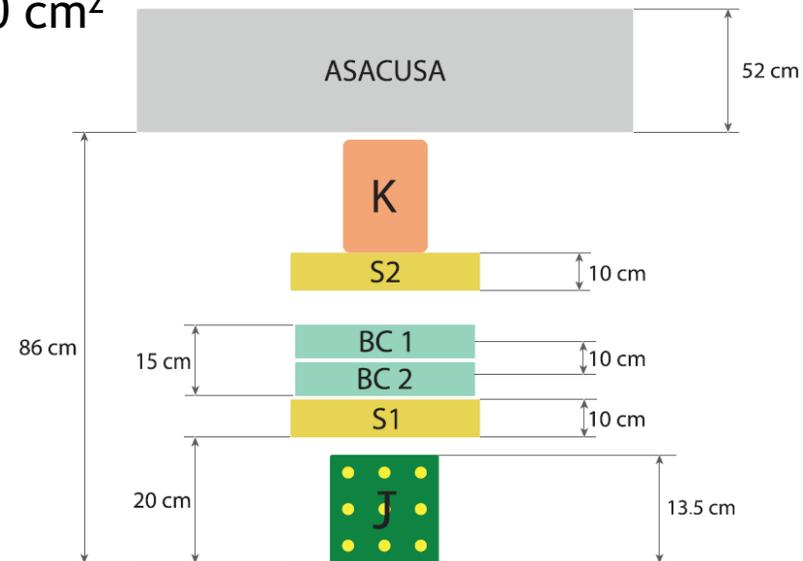


Valore ottenuto per  
l'efficienza del sistema:  
 $(95.0 \pm 0.3)\%$

# Setup sperimentale INSULAB - 2



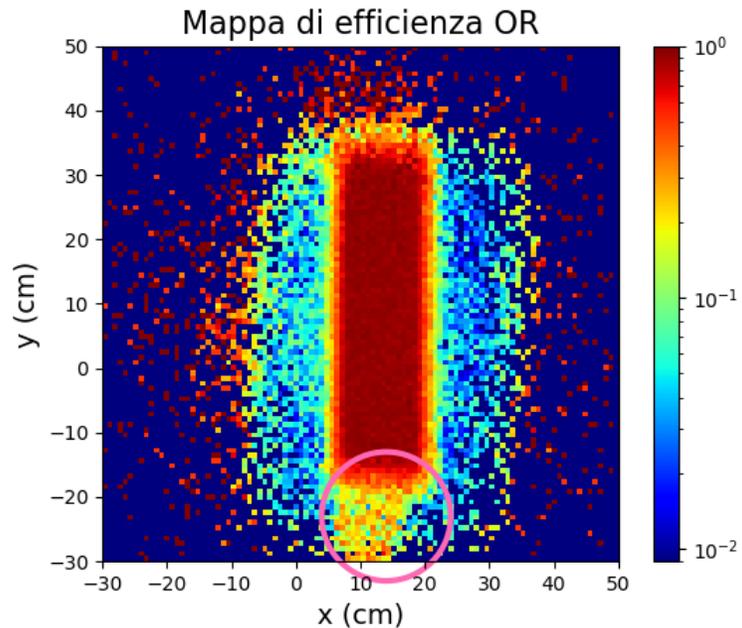
- **Tracciatori a microstrip di silicio (BC) in configurazione xy**
  - Area attiva: 19 x 19 cm<sup>2</sup>
  - Passo di lettura: 456  $\mu$ m
- Scintillatori plastici di **trigger** (S) 20 x 20 cm<sup>2</sup>



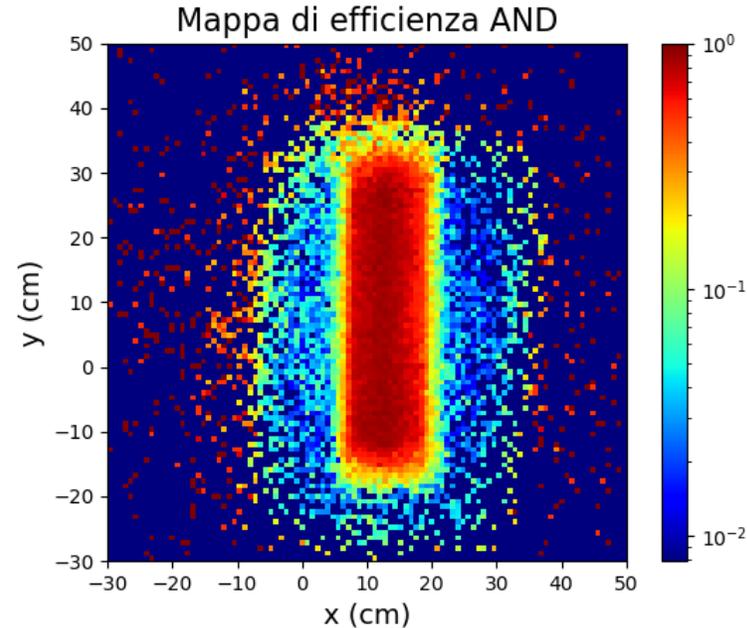
Setup analogo a quello precedente, ma con **tracciatori più grandi e più vicini al calorimetro per massimizzare l'accettanza angolare**



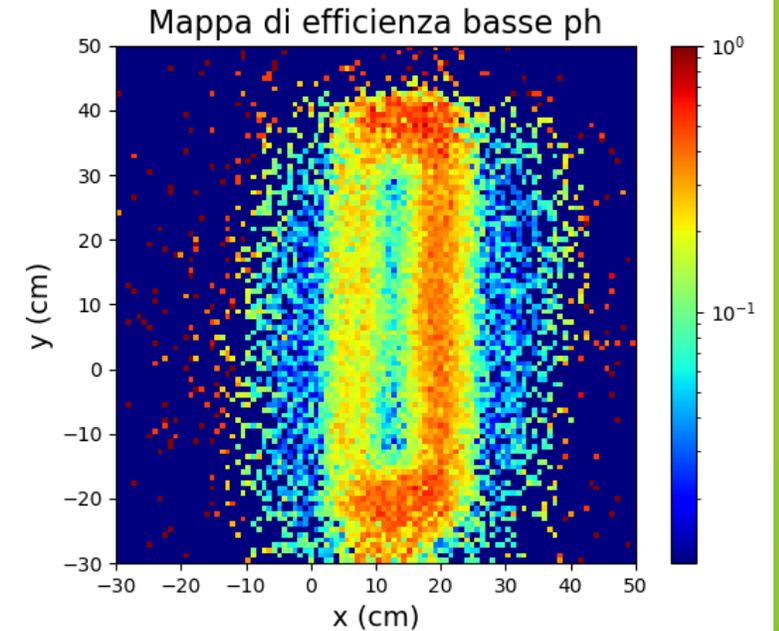
# Mappe di efficienza



Mettendo i due canali in **OR** il calorimetro viene visto uniformemente. Nella parte inferiore emergono le fibre WLS



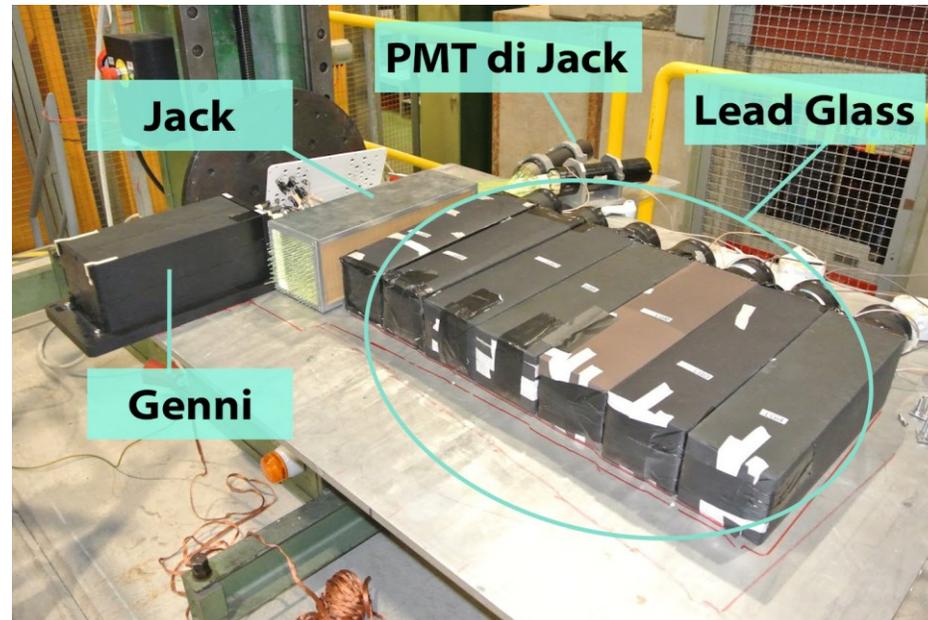
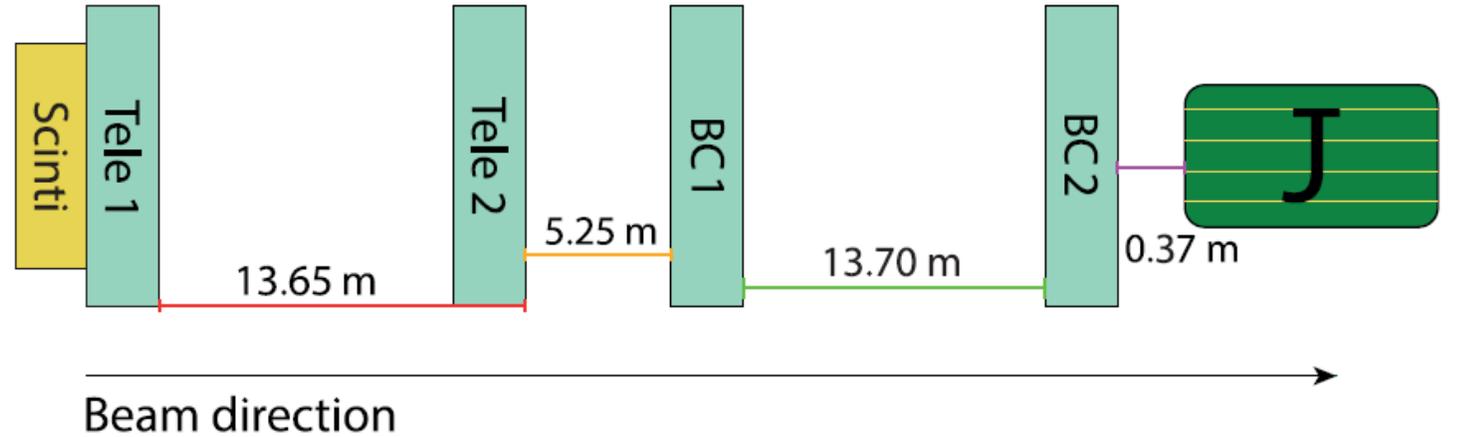
Mettendo i due canali in **AND** viene privilegiata la regione centrale del calorimetro



Selezionando per bassi valori della PH con i due canali in OR emerge il **bordo** del calorimetro

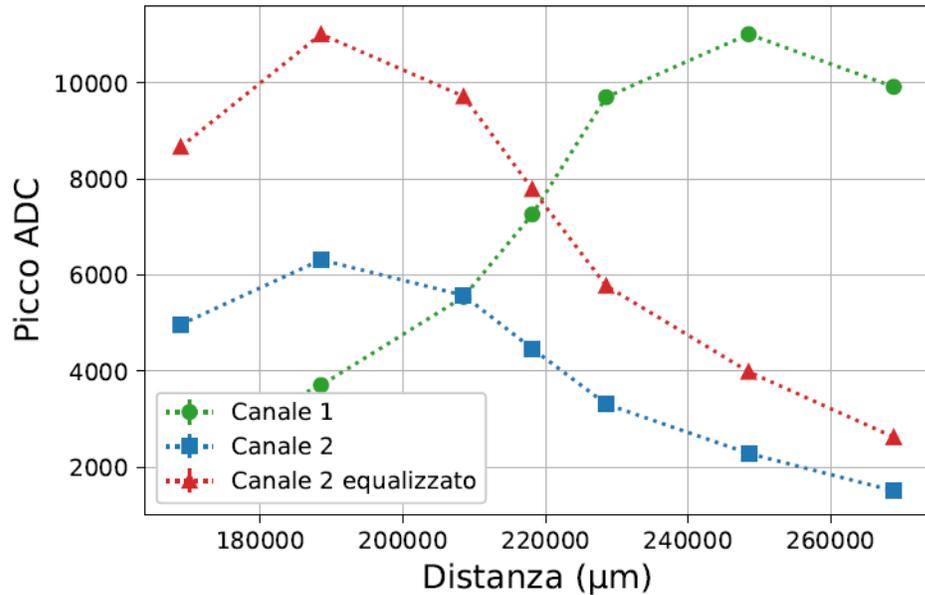
## Caratterizzazione su fascio

- ▶ Misure al CERN sul fascio estratto H2 dell'SPS presso la North Area
- ▶ Fascio di elettroni
  - ▶ 20 - 120 GeV
  - ▶  $\Delta p/p \leq 2\%$



# Equalizzazione

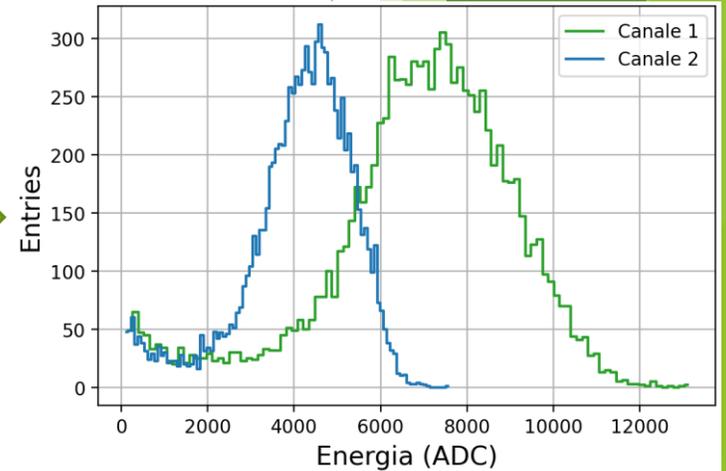
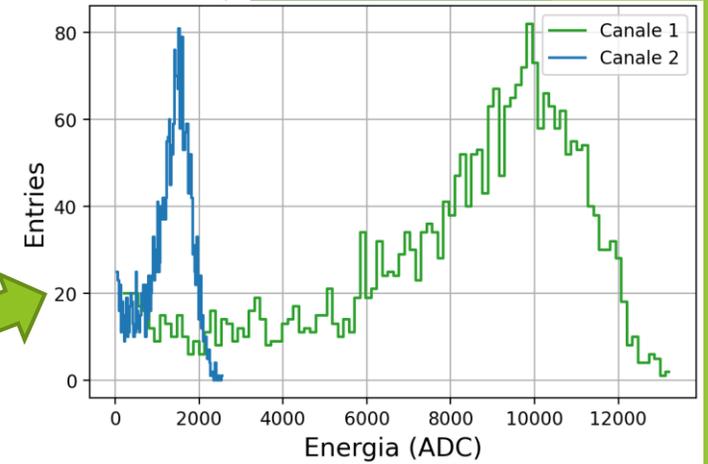
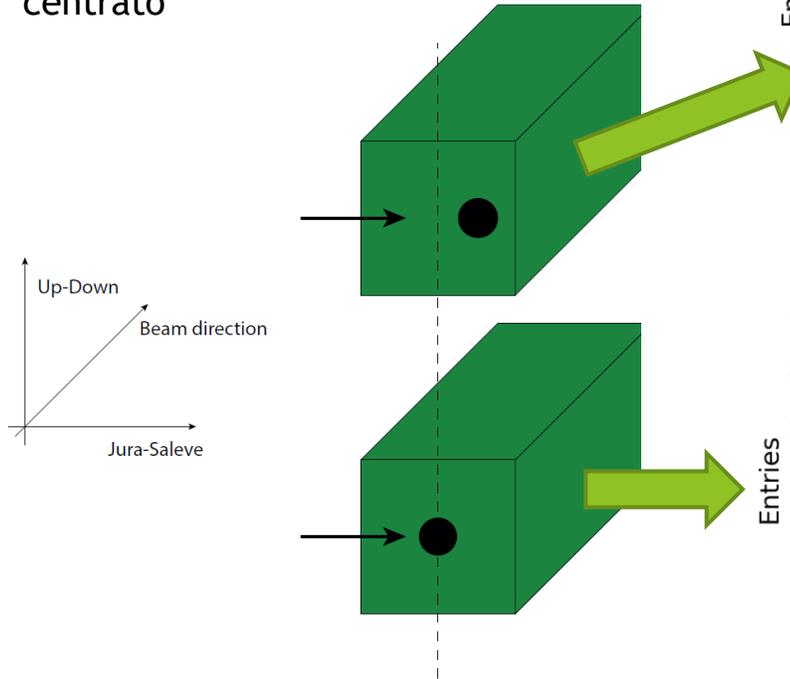
ADC picco vs distanza



Fasci di **energia fissa** incidenti in **diversi punti** della faccia del calorimetro

Due possibili coefficienti di equalizzazione:

1. Rapporto dei **massimi della distribuzione del valore più probabile** in funzione del punto di impatto
2. Rapporto dei **massimi delle PH** con fascio centrato



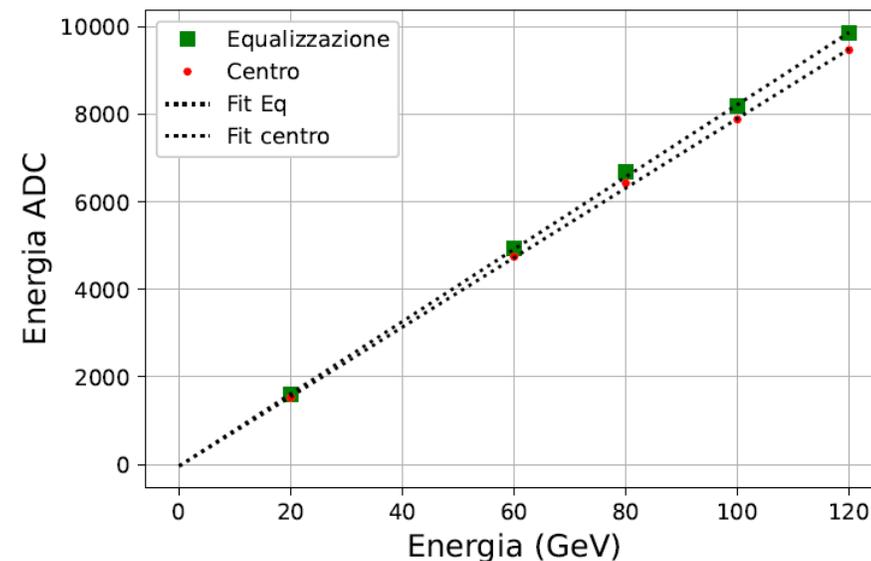
Procedura:

- Taglio in tempo e in pulse height
- Fit gaussiano delle pulse height per individuare il valore più probabile

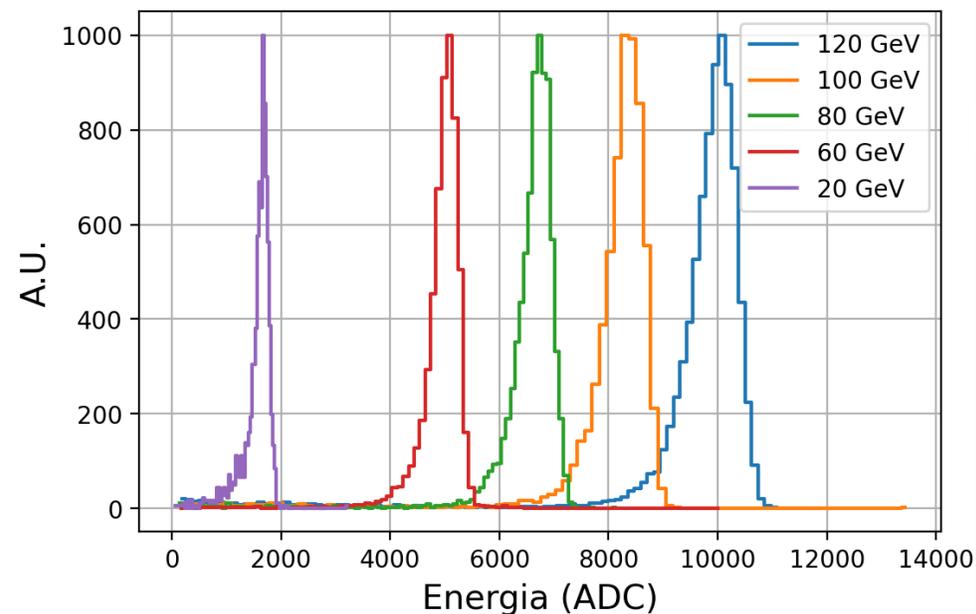
# Calibrazione

- ▶ Due diversi **coefficienti di equalizzazione**:
  - ▶ Procedura di equalizzazione completa
  - ▶ Rapporto del massimo delle pulse height con fascio centrato
- ▶ In entrambi i casi è verificato l'**andamento lineare**
- ▶ Permette di misurare l'**energia in GeV**
- ▶ Variando il **bias** dei PMT si può ridurre il guadagno ed **evitare saturazione** e **mantenere l'andamento lineare** per alte energie

Retta di calibrazione - dati sommati



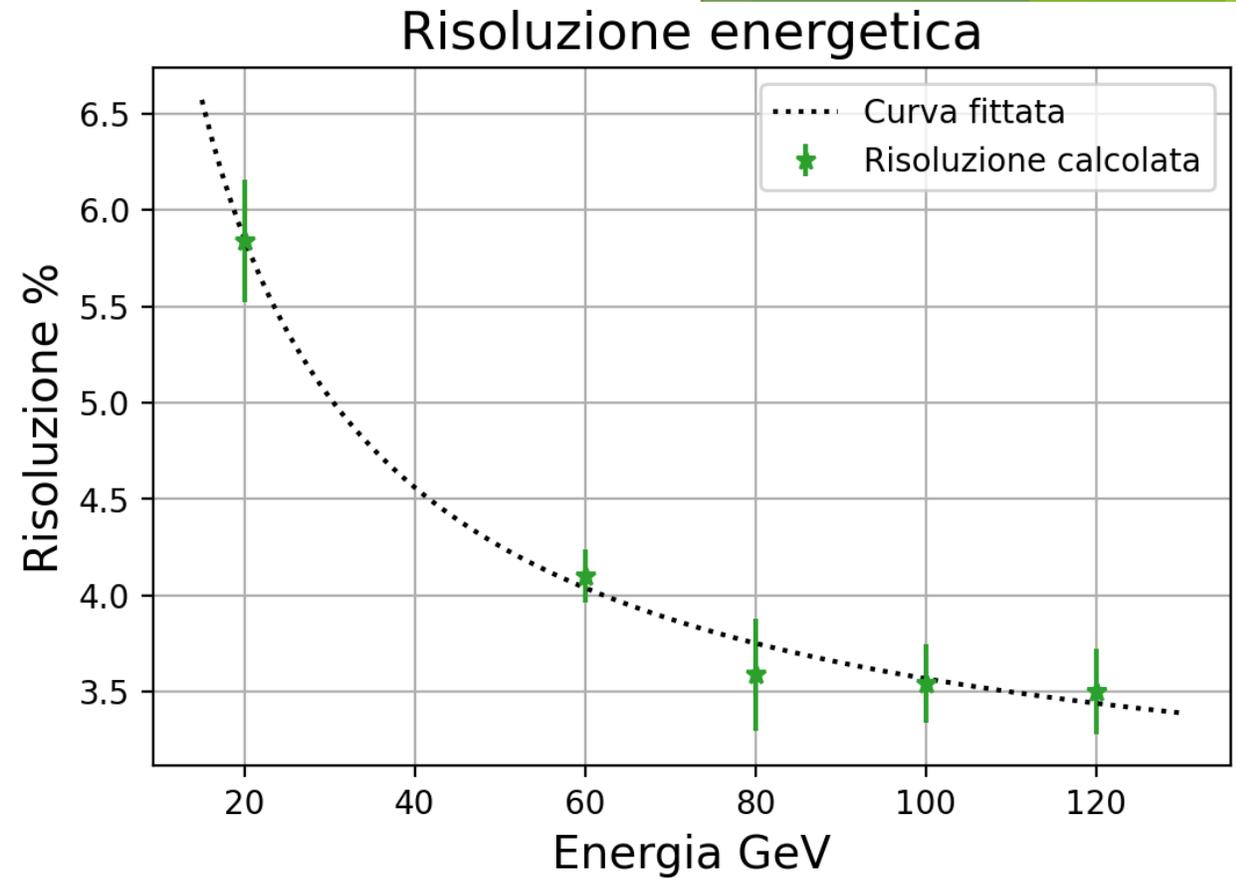
Fasci di **energia variabile** incidenti **al centro** della faccia del calorimetro



# La risoluzione energetica

- Fasci di **energia variabile** incidenti **al centro** della faccia del calorimetro
- **Fit gaussiano** per ottenere la **varianza**
- Risoluzione a 100 GeV: **3.55%** (2.35% nel caso di lettura con SiPM)

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



Parametro	Jack con PMT		Jack con SiPM	
	Valore	Incertezza	Valore	Incertezza
Termine di rumore (%/E (GeV))	0.0173	71.487	57.3	2.6
Termine stocastico (%/√E (GeV))	23.6216	3.3477	12.7	0.9
Termine costante (%)	2.6966	0.2387	1.9	0.1

# Conclusioni

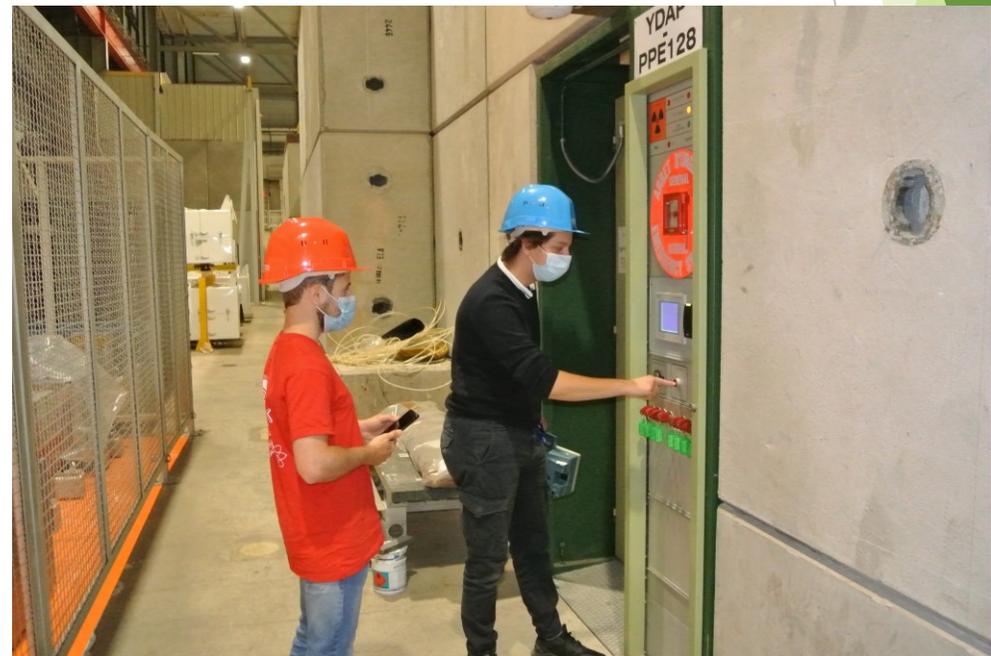
## Il calorimetro Jack è stato caratterizzato

- Nel laboratorio INSULAB, utilizzando raggi cosmici, in termini di **efficienza di rivelazione**, ottenendo  $(95.0 \pm 0.3)\%$
- Sulla linea di fascio estratto H2 presso la North Area del CERN in termini di **risoluzione energetica** (previa **equalizzazione e calibrazione**). I valori ottenuti sono risultati peggiori rispetto ad uno studio precedente, ma in quel caso Jack era letto mediante SiPM
- La lettura mediante PMT **semplifica** notevolmente **l'acquisizione** rispetto alla lettura mediante SiPM in quanto si hanno solamente **due canali**, non vi sono problemi legati alla **temperatura**, si può agire sul **bias per evitare saturazioni** ed inoltre hanno un **basso rumore**

## Possibili sviluppi futuri

- **Misure specifiche su fascio** per misurare la risoluzione energetica e per distinguere i piani
- Stima del **punto di impatto** di una particella a partire dai segnali dei due canali

# GRAZIE DELL'ATTENZIONE

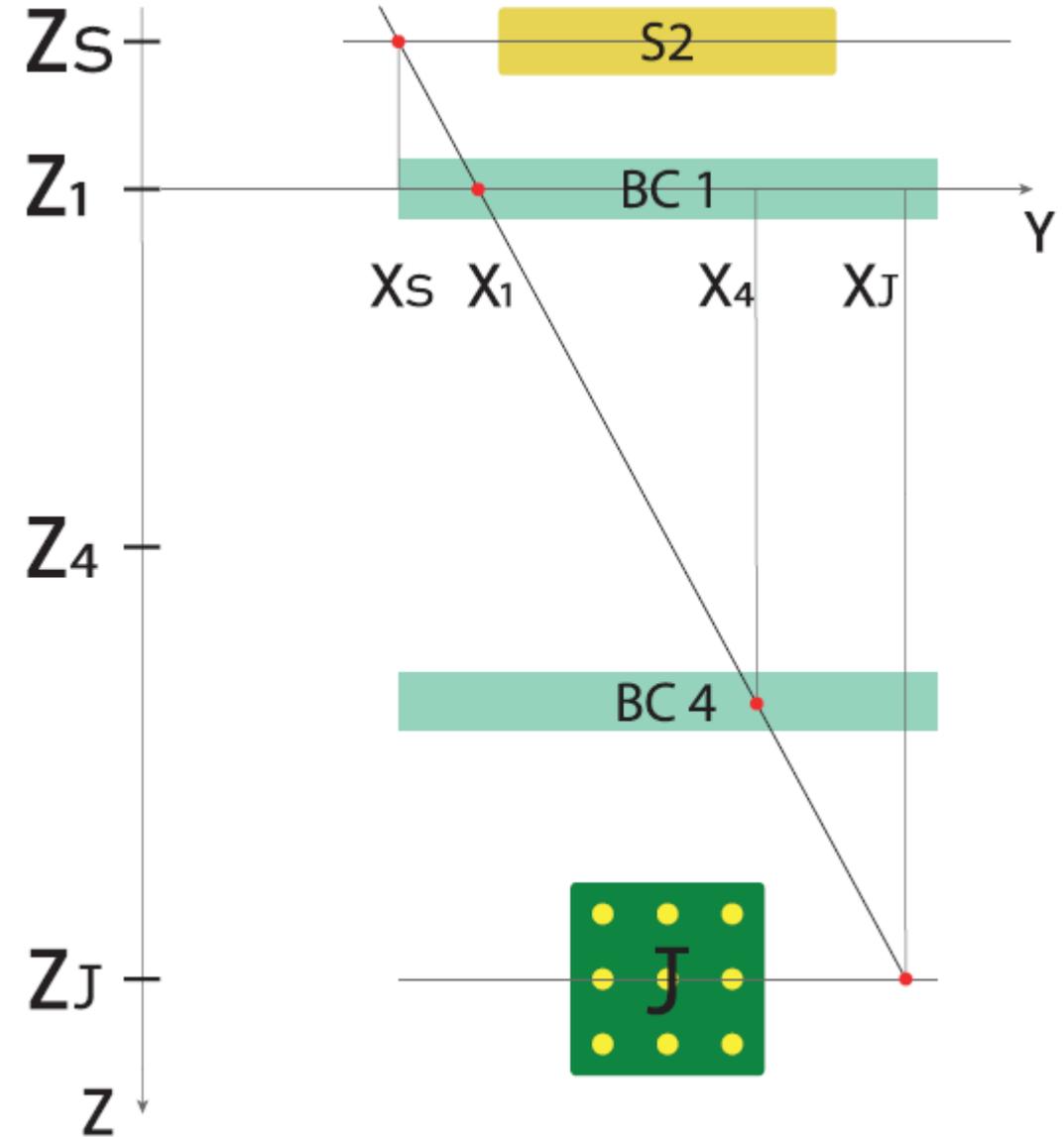


# BACKUP SLIDES

# Ricostruzione delle tracce

- ▶ Con una coppia di rivelatori a silicio posso ricostruire la traiettoria di una particella
- ▶ La proietto su un piano a metà altezza di Jack

$$y(z) = \frac{y_4 - y_1}{\Delta z} z + y_1$$



# Parametri caratteristici sciame em

**Raggio di Molière:** deflessione laterale **media** degli elettroni all'**energia critica** dopo aver percorso una lunghezza di radiazione.

In un cilindro di raggio pari a  $2\rho_M$  è contenuto **il 90% dello sciame**

$$\rho_M = E_S \frac{X_0}{\varepsilon_c}$$

Con  $E_S$  scala tipica di energia

$$E_S = m_e c^2 \sqrt{4\pi/\alpha} = 21.2 \text{ MeV}$$

**Energia critica per elettroni e positroni:** energia tale per cui le perdite per **ionizzazione** e **irraggiamento** si equivalgono.

**Lunghezza di radiazione:** distanza necessaria affinché l'energia di un elettrone venga **ridotta di un fattore 1/e** solo via bremsstrahlung

$$X_0 (\text{g cm}^{-2}) = \frac{716 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

**Profilo longitudinale** dello sciame

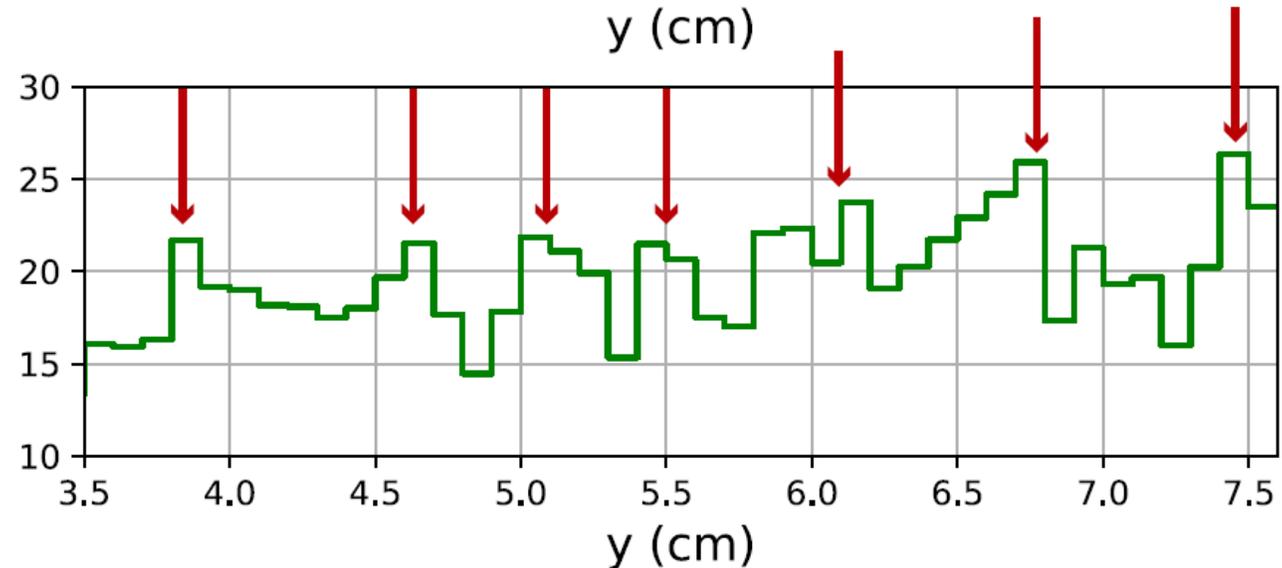
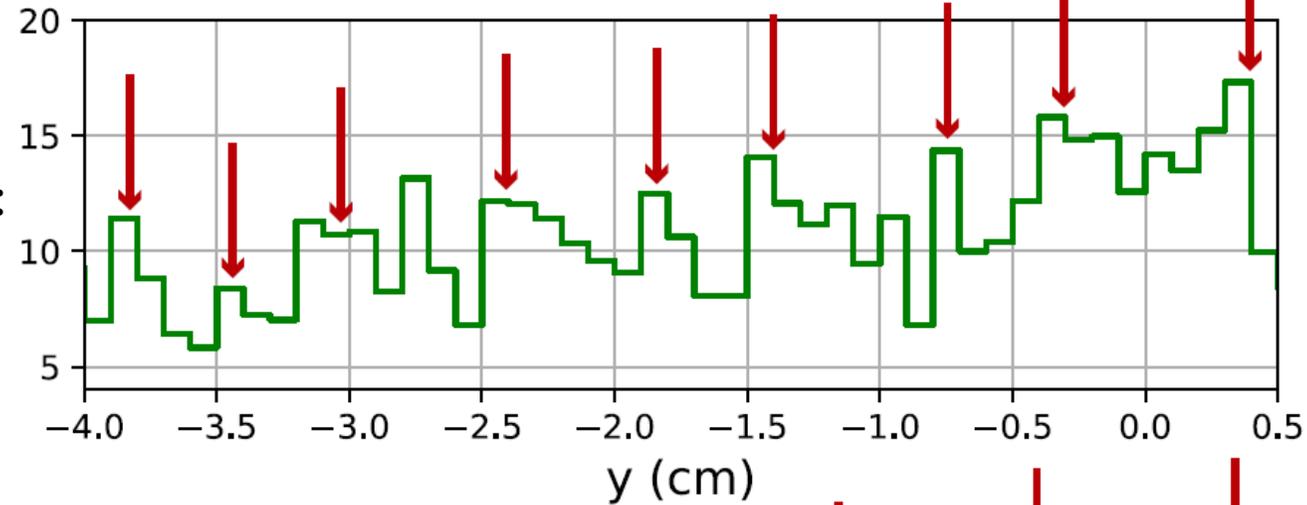
$$\frac{dE}{dx} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}$$

**Massimo dello sciame:** profondità (in unità di  $X_0$ ) a cui si ha il **massimo numero di particelle** ( $t_0 = 0.5$  per fotoni e  $-0.5$  per elettroni)

$$t_{\max} \approx \ln\left(\frac{E_0}{\varepsilon_c}\right) + t_0$$
$$t_{95\%} \approx t_{\max} + 0.08Z + 9.6$$

# Modulazione dell'intensità

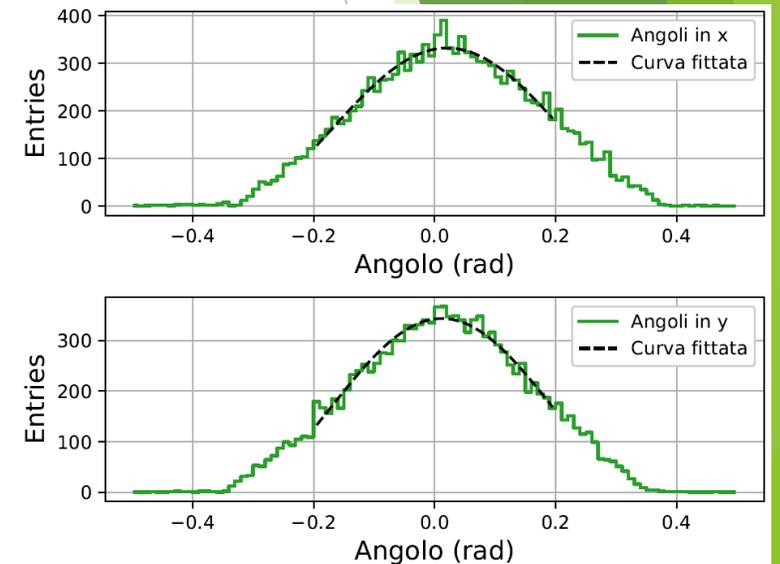
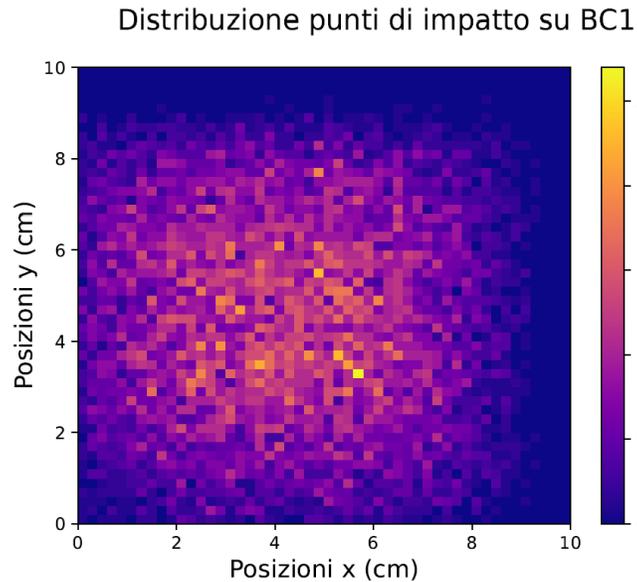
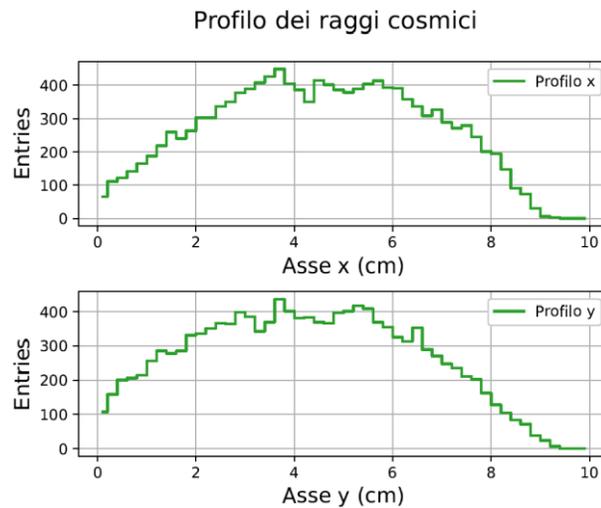
- ▶ Periodo di modulazione: 5.5 mm: compatibile con quello dei piani piombo-scintillatore
- ▶ Si vedono i piani di scintillatore, che rivelano i raggi cosmici



# Risultati numerici

Parametro	Valore
Divergenza del fascio ad 80GeV	x: 164 $\mu$ rad - y: 102 $\mu$ rad
Divergenza del fascio a 120GeV	x: 139 $\mu$ rad - y: 79.5 $\mu$ rad
Coeff. equalizzazione (centro)	1.63
Coeff. equalizzazione (procedura eq)	1.74
Coeff. calibrazione (centro)	79.4
Coeff. calibrazione (procedura eq)	82.5
Angolo di rotazione secondo setup	4.5°

# Distribuzione angolare e profilo raggi cosmici



$$\Phi = 10^4 \frac{\text{particelle}}{\text{m}^2 \text{ s}}$$

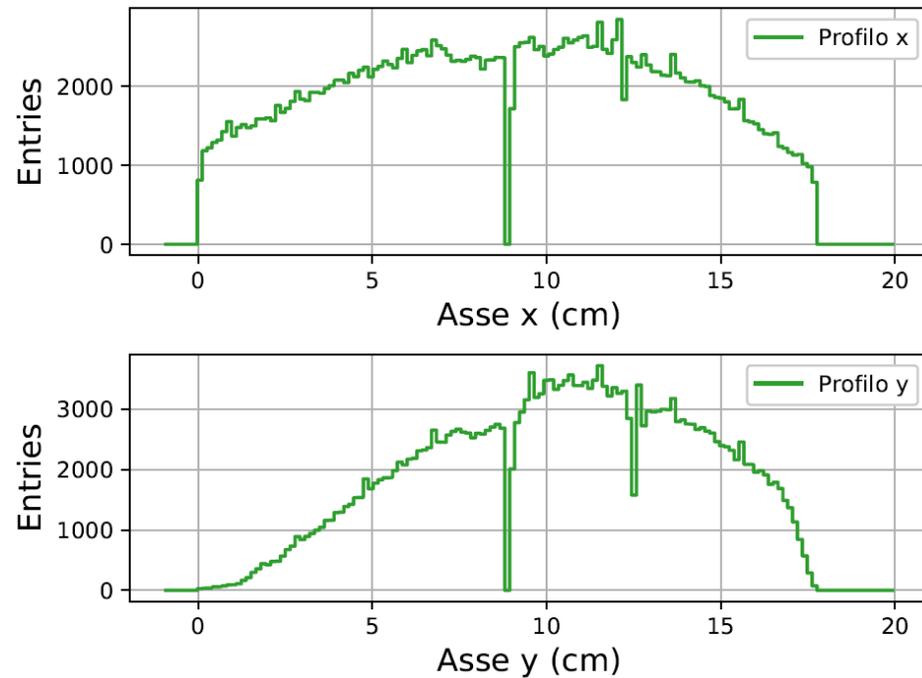
$$f(\theta) = \frac{4}{\pi} \cos^2 \theta$$

$$\text{con } \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$$

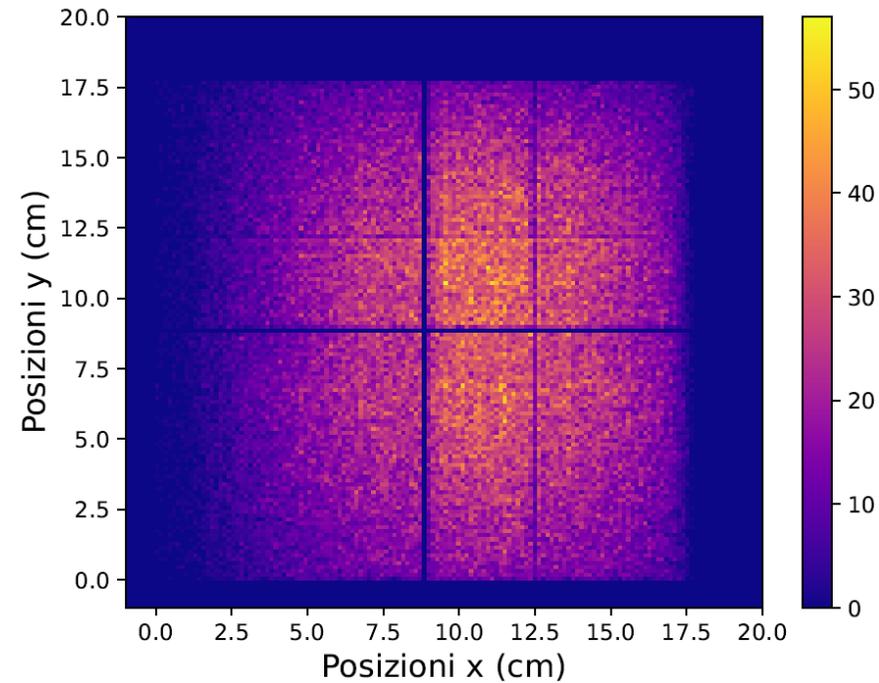
# Distribuzione secondo setup

- ▶ Ladder 2x2 di piani di silicio: si vede la zona morta (larga 2mm)

Profilo dei raggi cosmici



Distribuzione punti di impatto su BC1

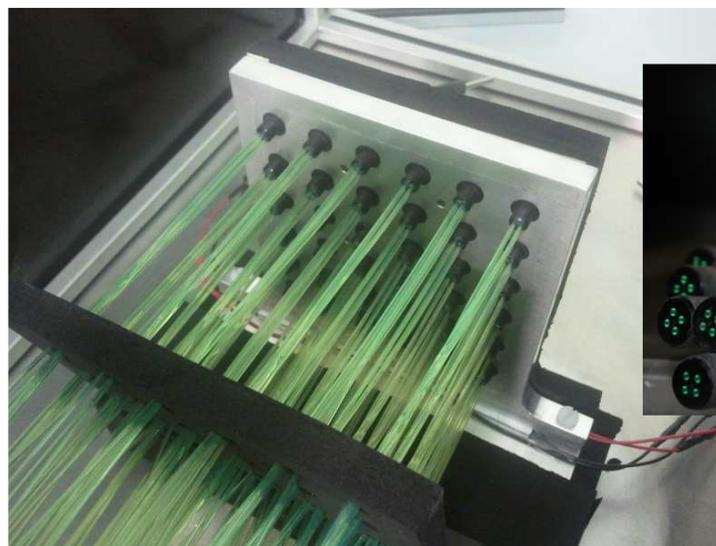
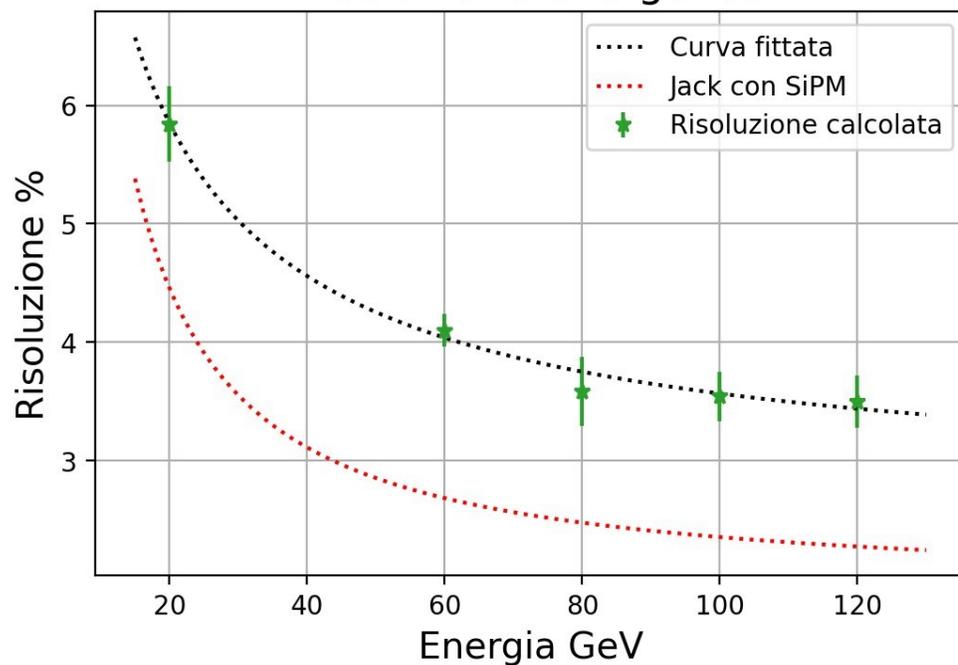


# Jack con SiPM

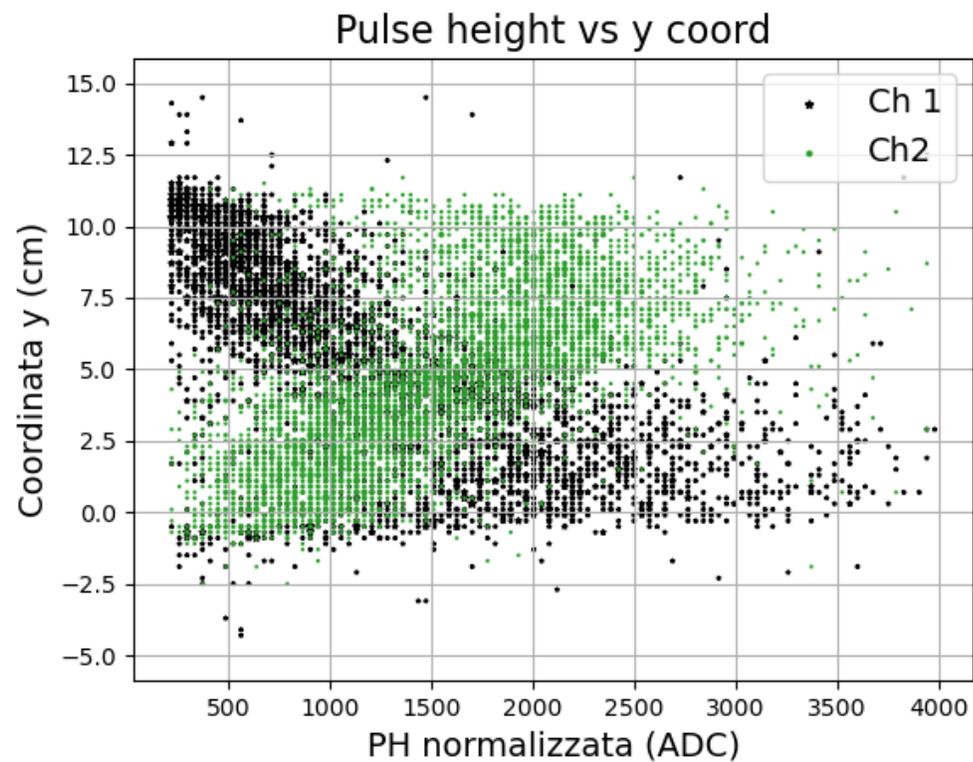
- ▶ Matrice di 6x6 SiPM
- ▶ 4 fibre per SiPM



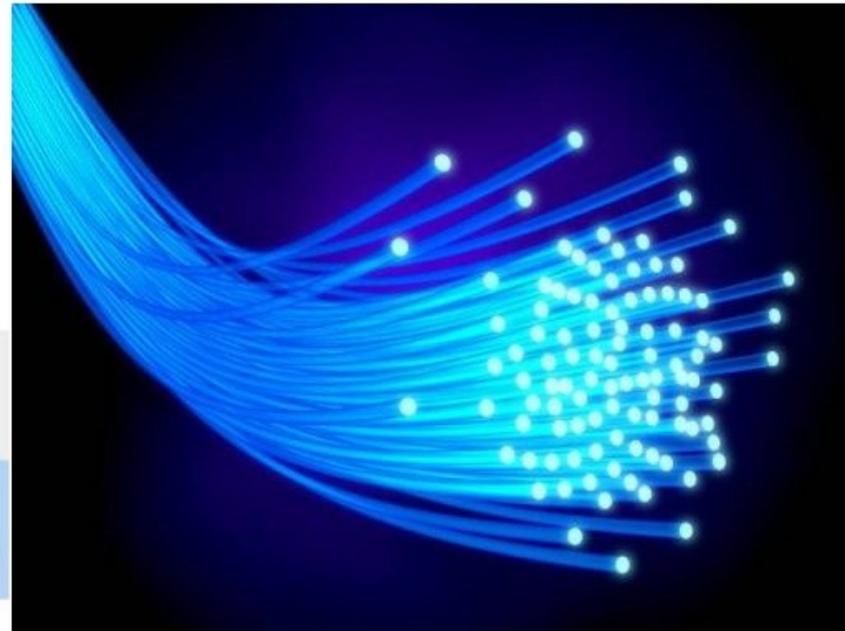
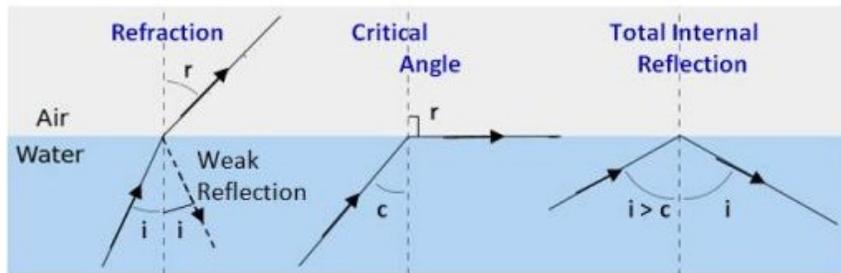
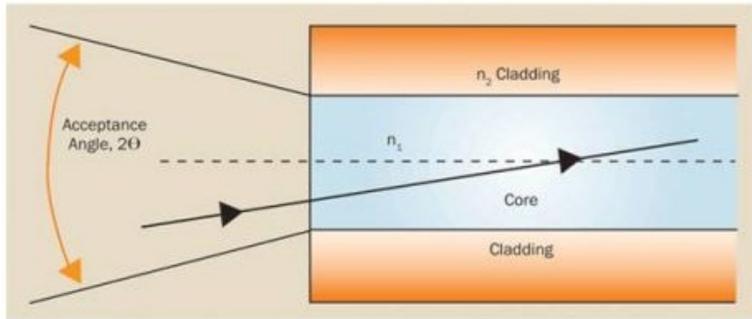
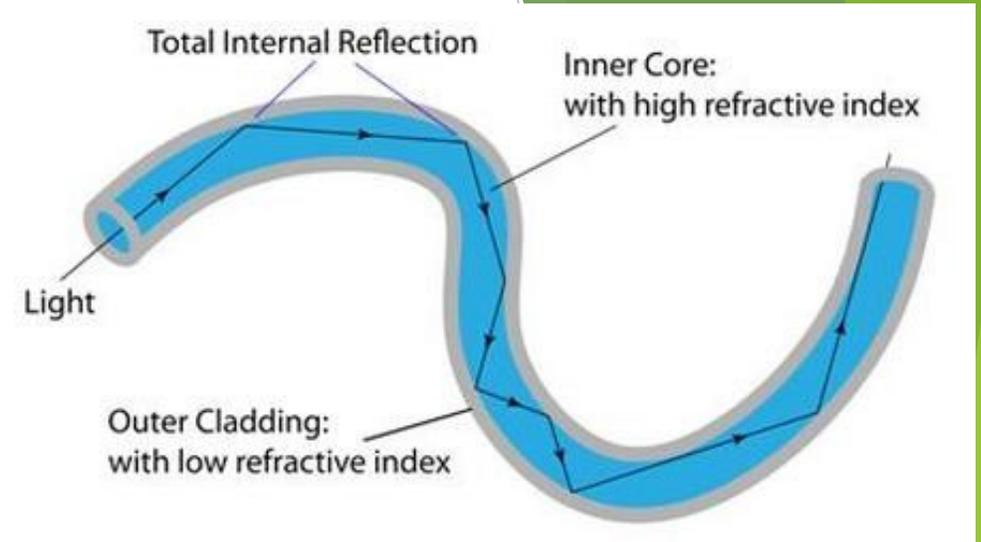
Risoluzione energetica



# Ampiezza vs coordinata y



# Funzionamento fibra ottica



# Crystal ball function

- ▶ Si tratta di un PDF utile per modellare **processi** in fisica delle alte energie in cui vi sia **una perdita** (non completo contenimento dello sciame oppure perdita in materiali prima del calorimetro)
- ▶ Si tratta di un **nucleo gaussiano** e una legge di potenza per la **coda a bassa energia**
- ▶ Si tratta di una funzione continua, differenziabile e normalizzata

$$f(x; \alpha, n, \bar{x}, \sigma) = N \cdot \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right), & \text{for } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} > -\alpha \\ A \cdot \left(B - \frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^{-n}, & \text{for } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases}$$

dove

$$A = \left(\frac{n}{|\alpha|}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{|\alpha|^2}{2}\right)$$

$$B = \frac{n}{|\alpha|} - |\alpha|$$

