

# FCC@NA: studi sui cristalli

P. Amato, L. Borriello, M. Campajola, F. Conventi,  
M. Francesconi, A.O.M.lorio, E. Rossi, J. Scamardella

15/11/2023

# Status update al 3/11/2023

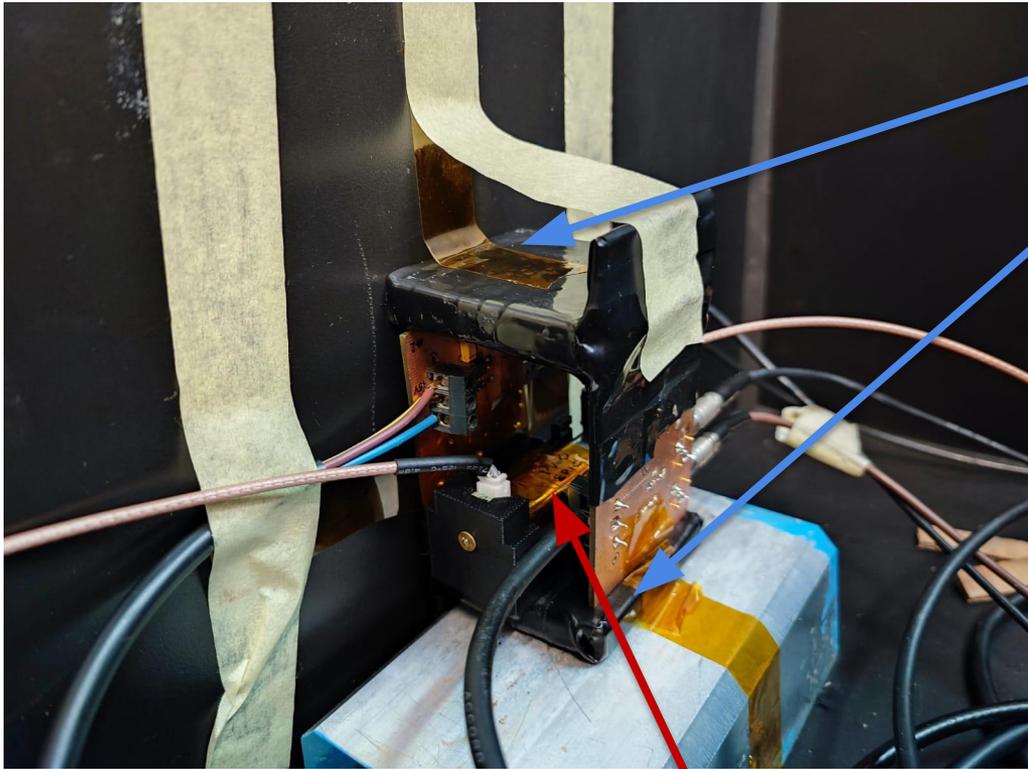
# Premessa e contesto

## Lo studio:

- Testare un setup con 2 cristalli per valutare luce di scintillazione dovuta a cosmici passanti
- Fare uno studio al “primo ordine” su **muoni cosmici** usando solo **geometria, distanza percorsa, formule di perdita di energia e cherenkov, efficienze (more in next slides)**
- studio parte di un **lavoro di tesi triennale** (Julia Scamardella, Ottobre 2023), slides in parte mutuate da là

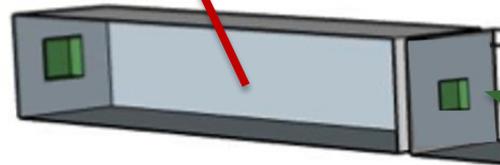
ditta/materiale	SICCAS		EPIC-CRYSTALS		HILGER	
	x150	x50	x150	x50	x150	x50
BSO	2	1		1		
PWO	2	1		1		
LYSO				1		
GAGG				1		
BGO	2	1			2	1

# Setup sperimentale



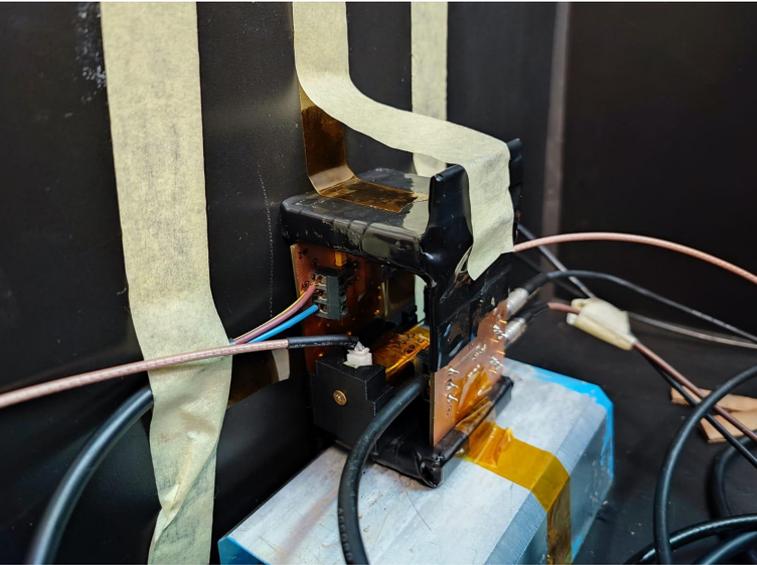
Scintillatori di trigger  
 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ , distanti  $5,4 \text{ cm}$

Cristallo BGO o PWO  $5 \times 1,2 \times 1,2 \text{ cm}^3$



*SiPM*  $3 \times 3 \text{ mm}^2$

# Dettagli wrapping e SiPM



Modello: s13360-3050pe

Dimensioni: 3 x 3 mm<sup>2</sup>

Celle 50  $\mu\text{m}$

Number of pixels: 3600

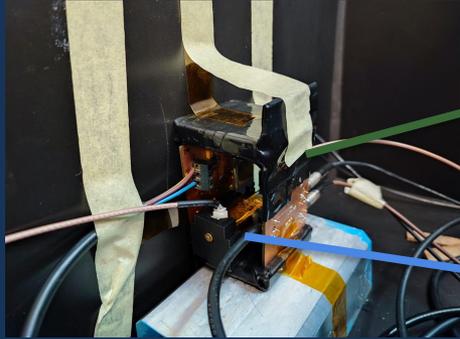
$V_{\text{operational}} = 55 \text{ V}$ , 3V sopra il bd



## Note importanti:

- C'è wrapping sulle superfici lunghe ma non sulle "basi" (dove è ubicato il SiPM)
- Il SiPM **NON copre** tutta la base, ma **NON è la versione finale che useremo**
- Questo viene tenuto in conto nella simulazione (vedere dopo)

# Acquisizione dati



SiPM 3x3 mm<sup>2</sup>

Preamplificatore  
(Transimpedance amplifier)

Scintillatori →  
discriminatore

Modulo di  
coincidenza  
(trigger dagli  
scintillatori)

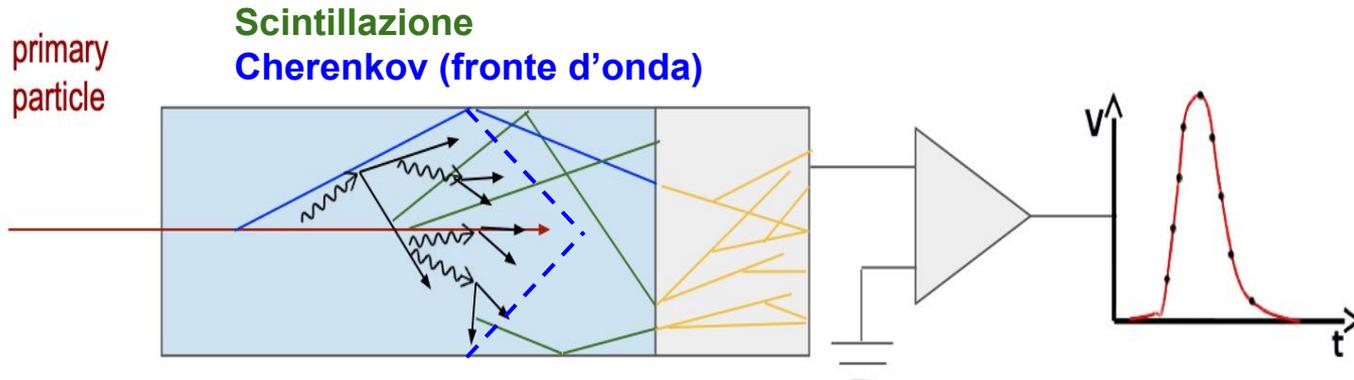
Oscilloscopio

CONTATORE

Registrazione Waveform

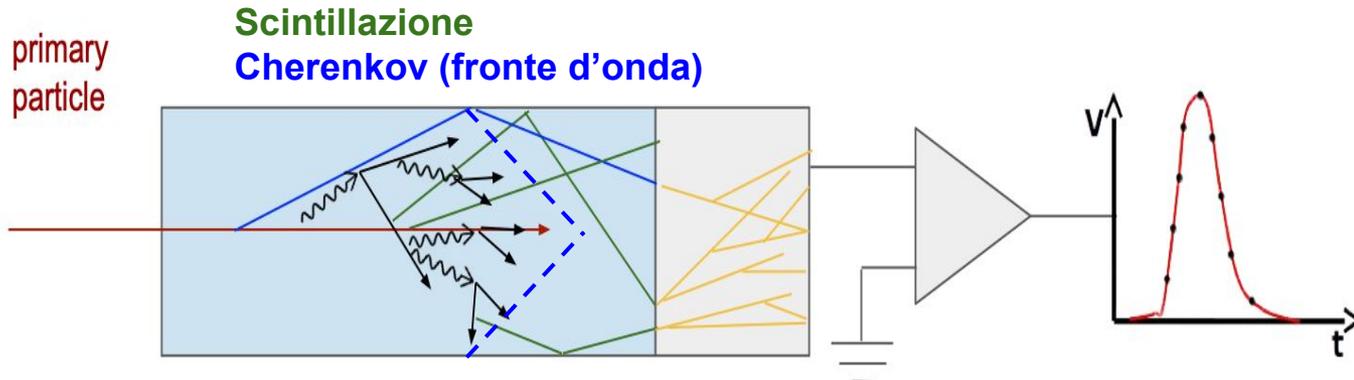


# Schematizzazione processo



1) Produzione dei fotoni 2) Trasmissione e rivelazione 3) Lettura segnale

# Schematizzazione processo



## 1) Produzione dei fotoni

### Scintillazione:

- si considera il muone al MIP
- #fotoni dalla LY tabulata

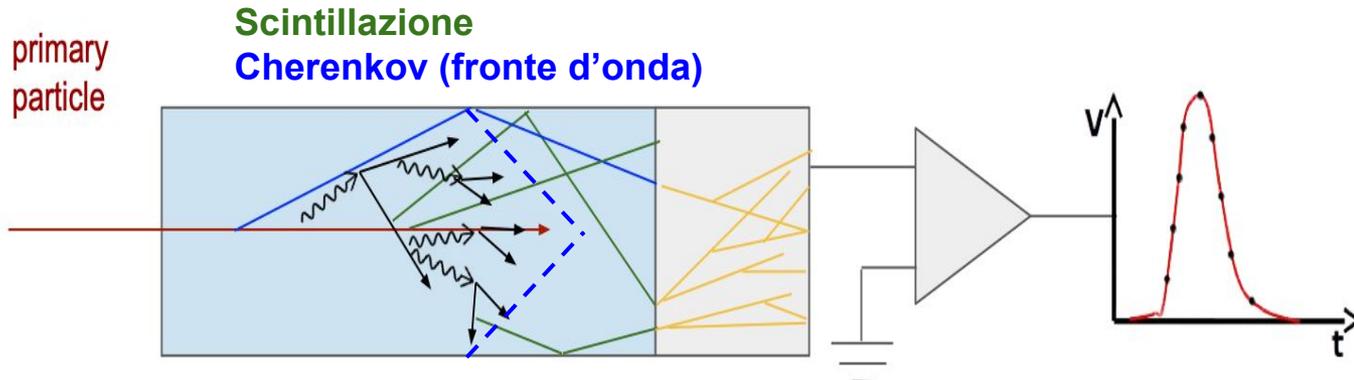
$$\begin{aligned} \text{Energia} &= l \cdot \rho \cdot E_{MIP} \\ N_{\text{Fotoni}} &= \text{Energia} \cdot LY \end{aligned}$$

### Cherenkov:

- si considera  $\beta \sim 1$
- formula in funzione della lunghezza d'onda

$$\frac{dN}{dx d\lambda} = 2\pi z^2 \alpha \frac{1}{\lambda^2} \left( 1 - \frac{1}{(n \cdot \beta)^2} \right)$$

# Schematizzazione processo



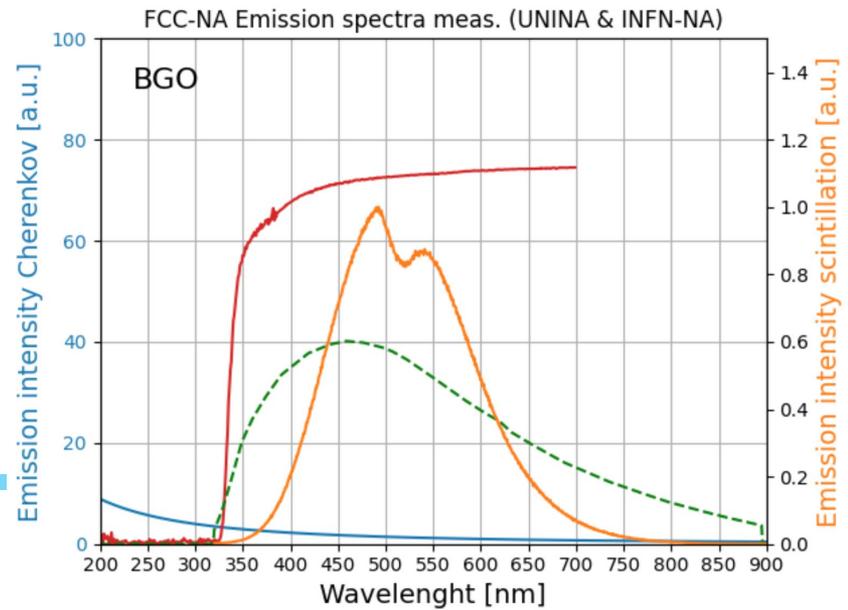
## 2) Trasmissione e rivelazione

### Rate complessivo dato da:

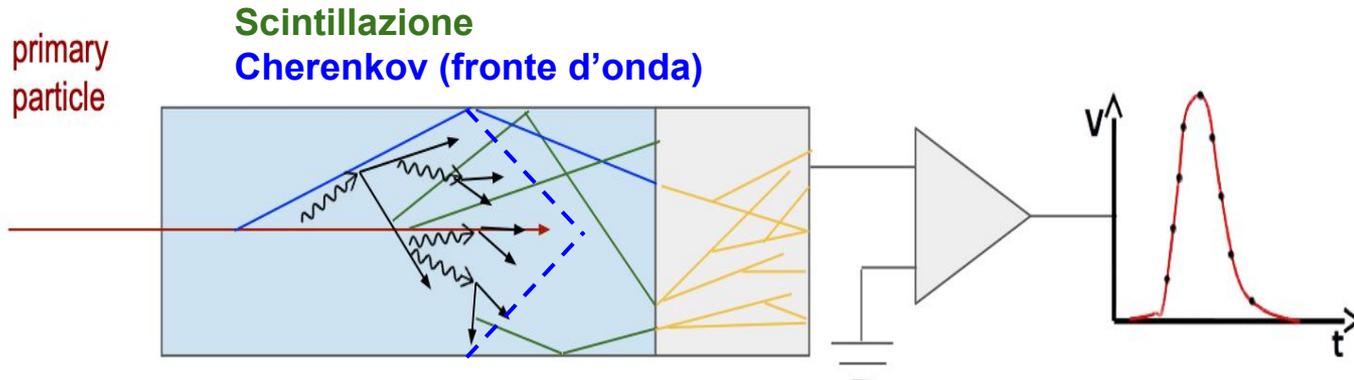
- Rate di produzione fotoni (scint. o Cherenkov)
- Trasmissione
- Efficienza geometrica del SiPM
- Efficienza di photodetection

### Tutti vanno:

- > Calcolati in funzione della lunghezza d'onda
- > Integrati per ottenere il numero totale



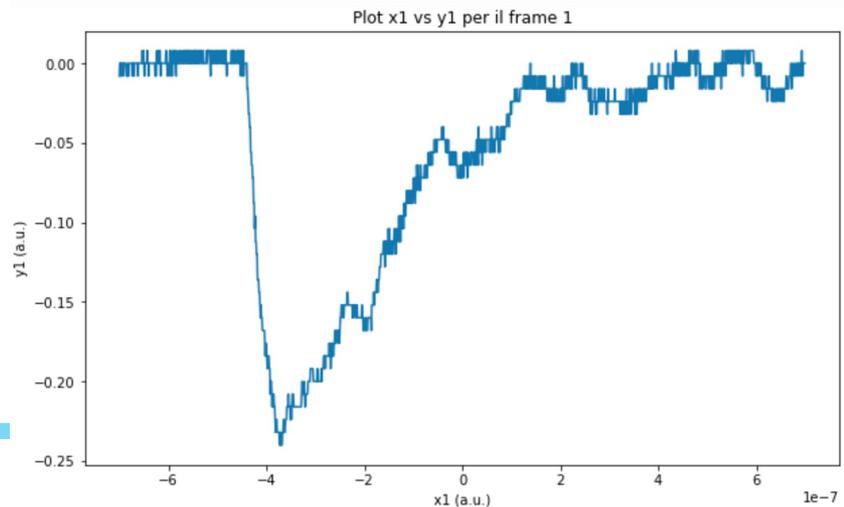
# Schematizzazione processo



## 3) Lettura segnale

### Il segnale è letto all'oscilloscopio

- Area segnale proporzionale alla carica raccolta
- Va calibrato in funzione del numero di fotoni
- Relazione lineare, con qualche caveat.



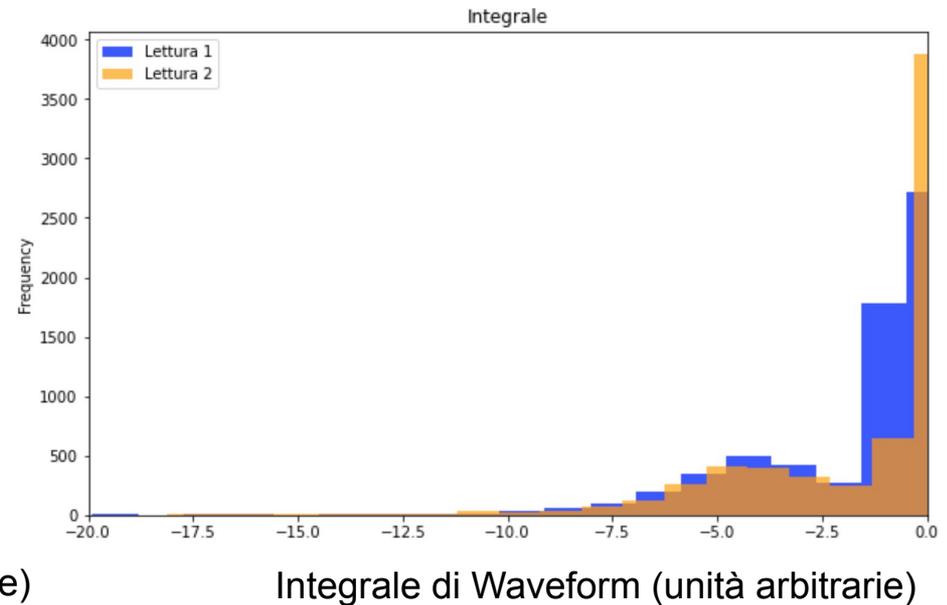
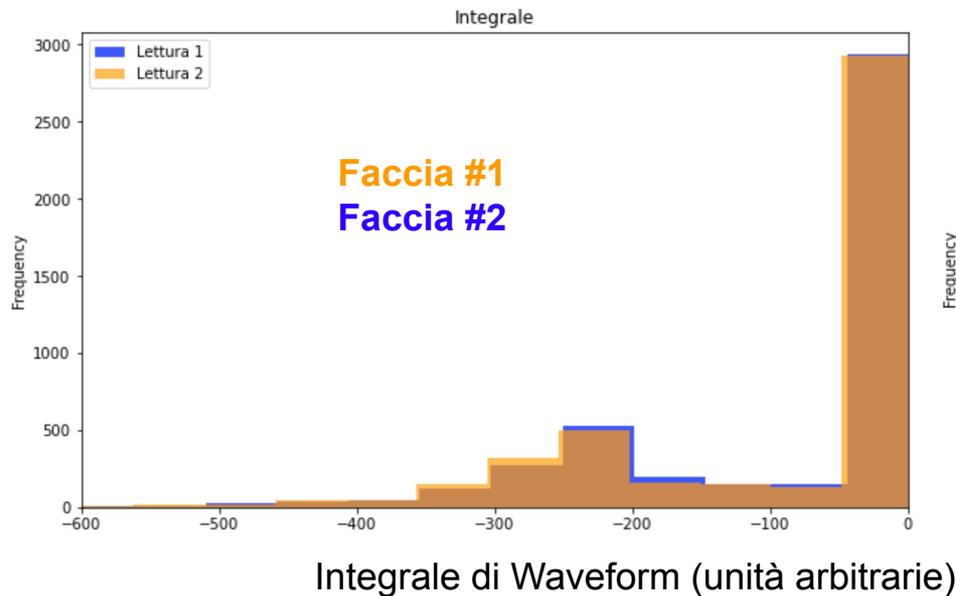
# Cariche raccolte: presa dati di 2 giorni

**BGO**

Light yield: ~8000 fotoni/MeV

**PWO**

Light yield: ~190 fotoni/MeV



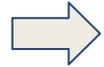
## Studi preliminari:

- I picchi hanno valori centrali ~250 BGO e ~4 PWO e possono essere fittati con landau
- I rapporti nel range giusto per essere compatibili con le Yields di scintillazione, ma come facciamo a sapere cosa stiamo vedendo?

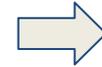
# Steps della simulazione

Simulazione  
**geometrica e**  
**perdita di energia**

```
graph LR; A[Simulazione geometrica e perdita di energia] --> B[Rate di produzione ed efficienza rivelazione]; B --> C[Calibrazione e simulazione picco];
```



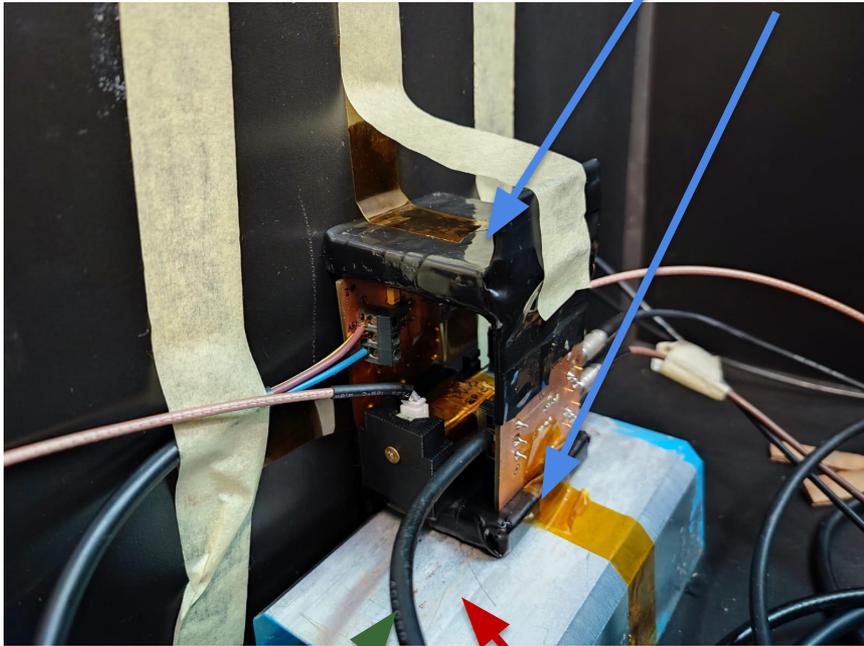
**Rate** di  
produzione ed  
efficienza  
**rivelazione**



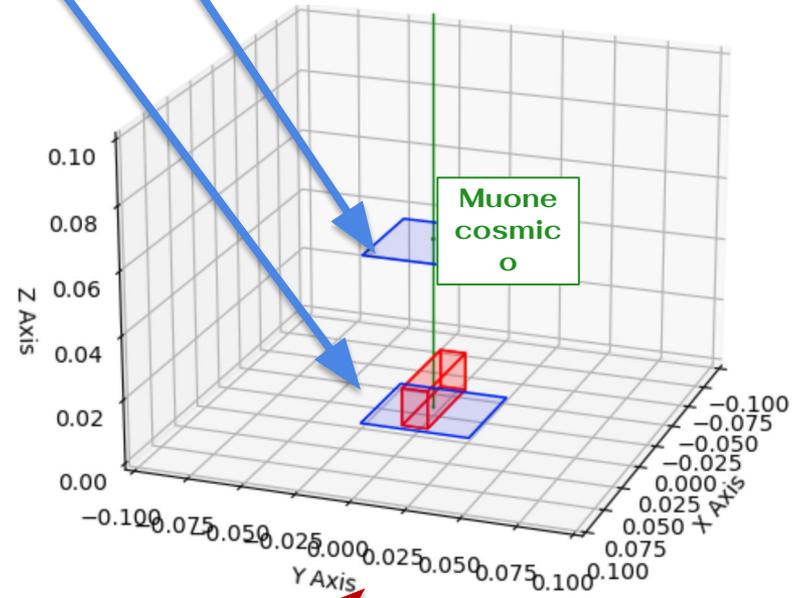
**Calibrazione**  
e simulazione  
**picco**

# Step 1) Simulazione geometrica

Scintillatori  $5 \times 5 \text{ cm}^2$   
distanti  $5,4 \text{ cm}$



SIMULAZIONE

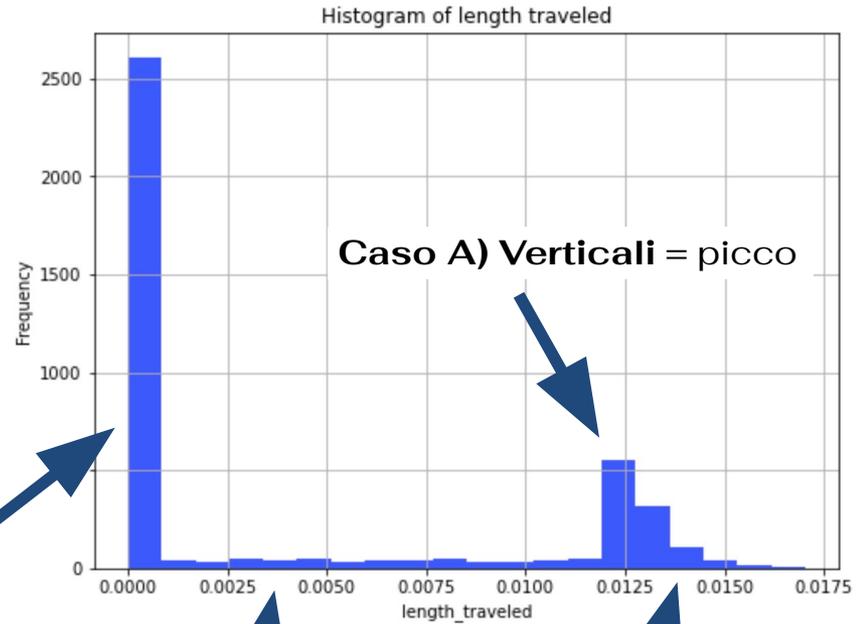
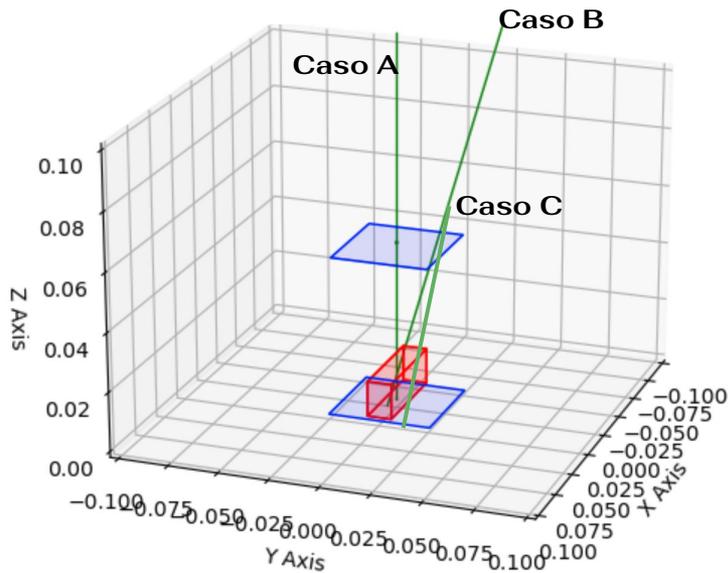


Cristallo BGO o  
PWO  
 $5 \times 1,2 \times 1,2 \text{ cm}^3$

SiPM  $3 \times 3 \text{ mm}^2$



# Percorso nel cristallo



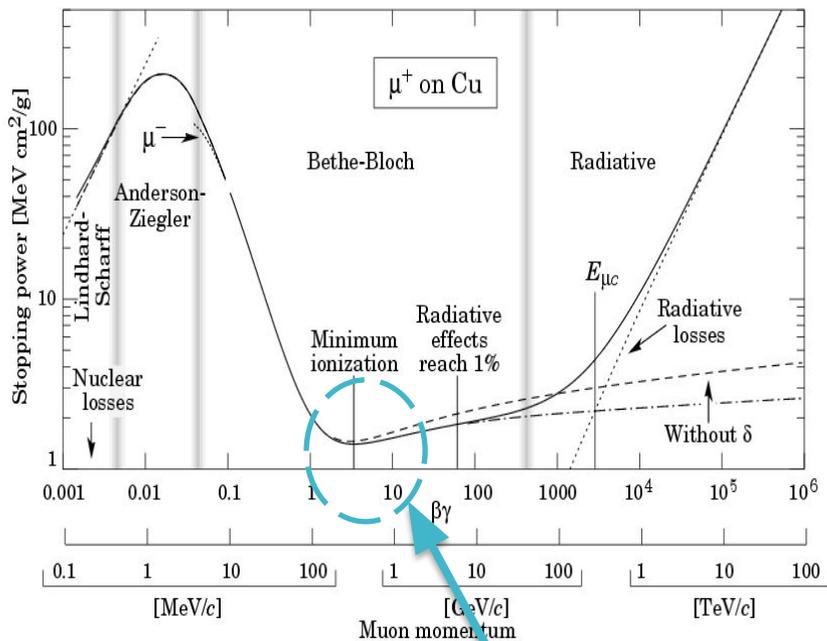
**Caso D)** raggi che **non** attraversano il cristallo

**Caso C)** Zona flat = non verticali  
(passano per almeno una parete laterale)

**Caso B)** Diagonali ma a basso angolo = lunghezze maggiori rispetto al picco

# Perdita di energia e fotoproduzione

## Ionizzazione → Scintillazione



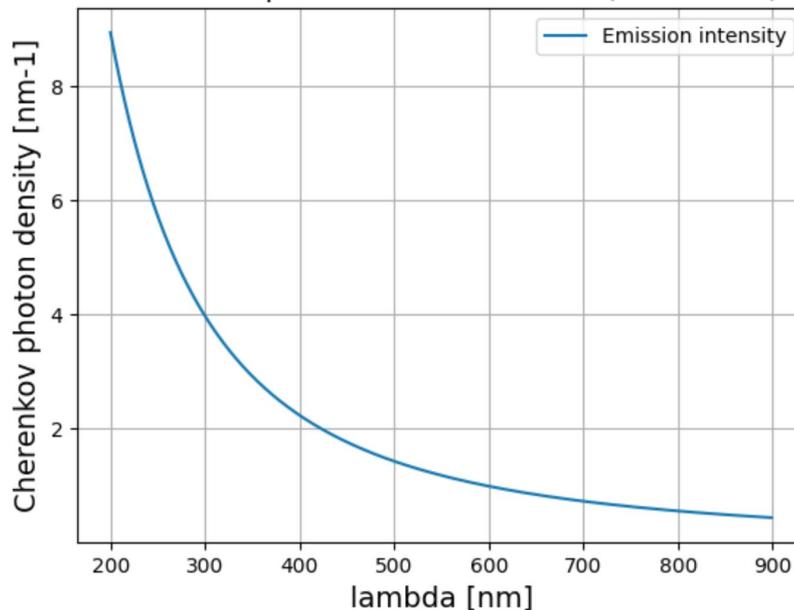
MIP

$$Energia = l \rho E_{MIP}$$

$$N_{Fotoni} = Energia \cdot LY$$

## Cherenkov

Cherenkov photons in 1cm of BGO (beta=0.99)



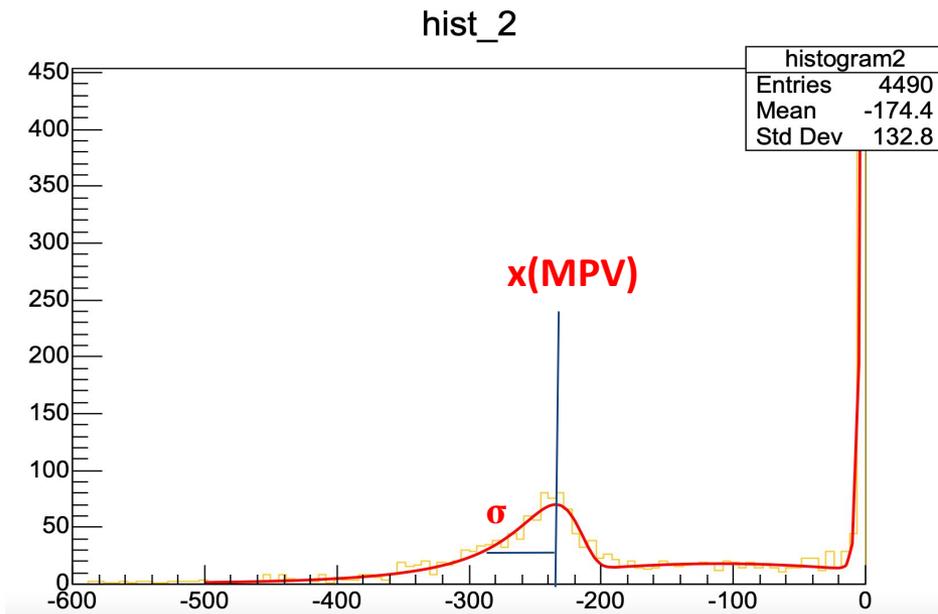
Questa funzione, integrata su lambda, ci da il # di fotoni Cherenkov:

$$\frac{dN}{dx d\lambda} = 2\pi z^2 \alpha \frac{1}{\lambda^2} \left( 1 - \frac{1}{(n \cdot \beta)^2} \right)$$

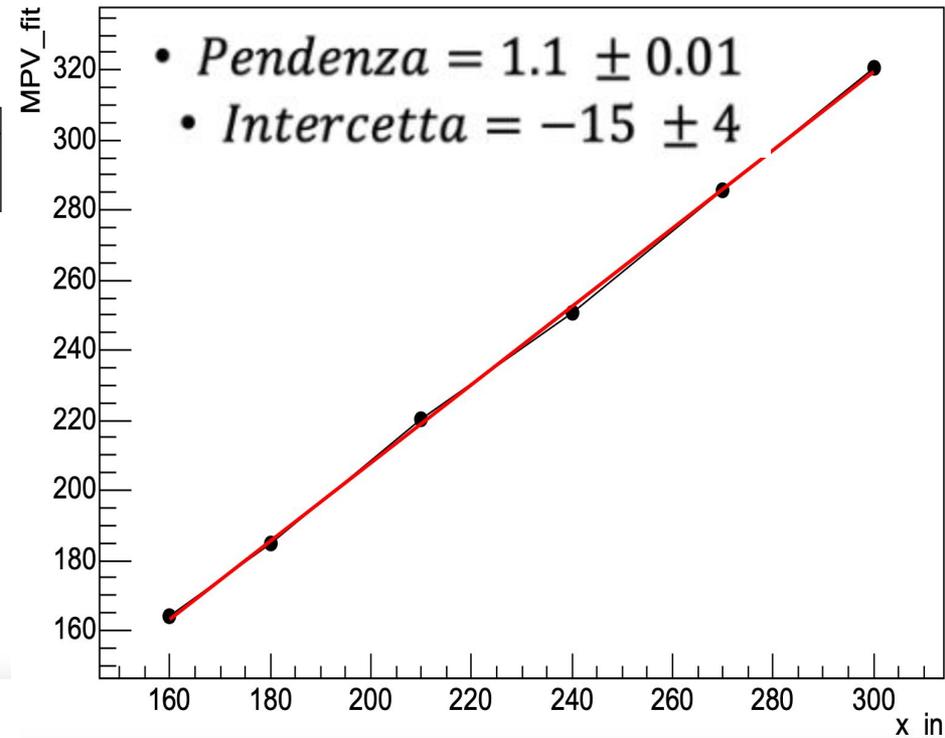
Nota: per semplicità abbiamo preso beta ~0.99 nei conti successivi, per i muoni è vero da circa 800 MeV

# Perdita di energia: distribuzione

Carica accumulata (x) dati BGO (a.u.)



Calibrazione MPV ch1



**La perdita di energia non è costante:**

- modellizzata come landau, con valore  $MPV = E(\text{picco}) = I * rho * E_{MIP}$
- parametro  $\sigma$  ottenuto dai dati, assumendo  $Carica \propto Energia$  con

**Fattore di proporzionalità =  $x(\text{picco}) / E(\text{picco})$**

**Eventi di caso B, C, D possono star “variando” effettivamente i parametri misurati:**

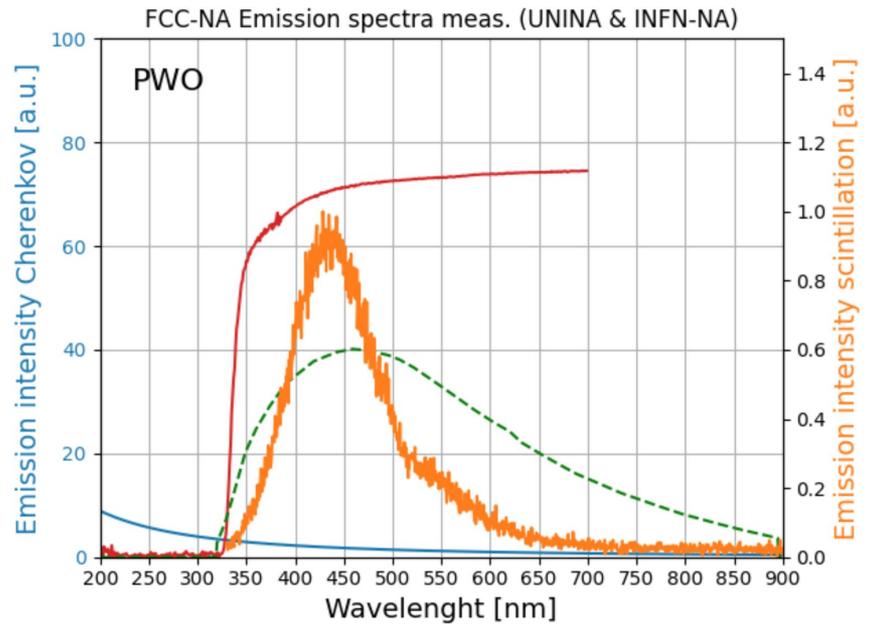
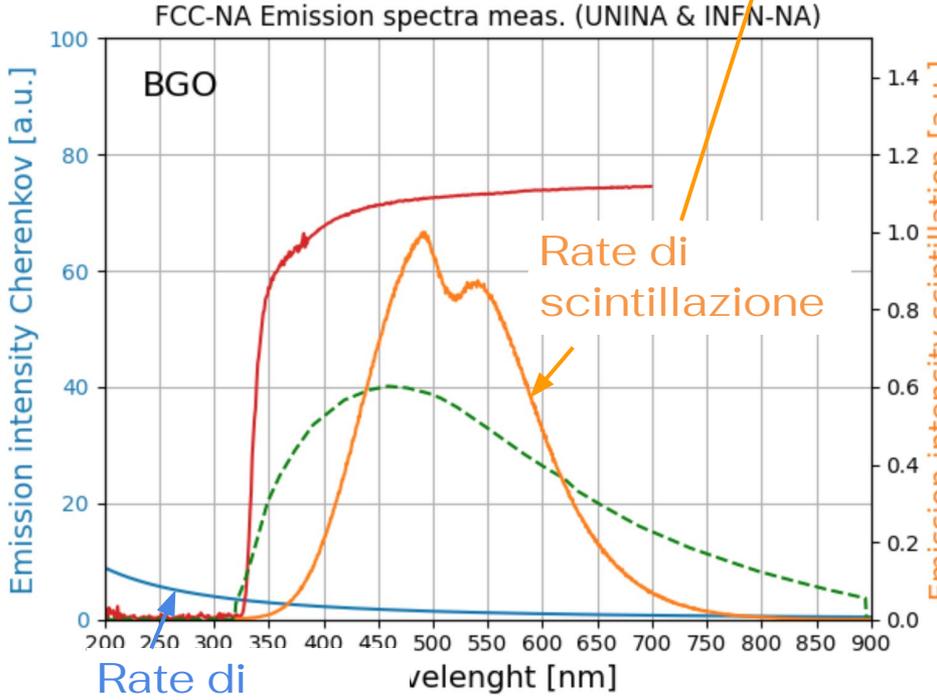
- **Studio MonteCarlo:** ricavato effetto della distribuzione angolare su  $MPV$  e  $\sigma$ 
  - il valore migliore “vero” da inserire verrà da una calibrazione delle quantità osservate.
  - L’eventuale shift dovuto ad effetti geometrici (eventi caso B, C, D) è piccolo e può essere “retrofittato”

# Step 2) Rate vs lunghezza d'onda

Per valutare trasmittanza ed eff. di rivelazione dobbiamo prima ricavare il rate differenziale

$$rate_{scint.}(\lambda) = dE/dX \cdot \rho \cdot x \cdot p_{scint}(\lambda)$$

$$rate_{cher.}(\lambda) = dE/dx \cdot x \cdot p_{cher}(\lambda)$$



# Trasmittanza, PDE, geometria

Trasmittanza e PhotoDetection Efficiency:

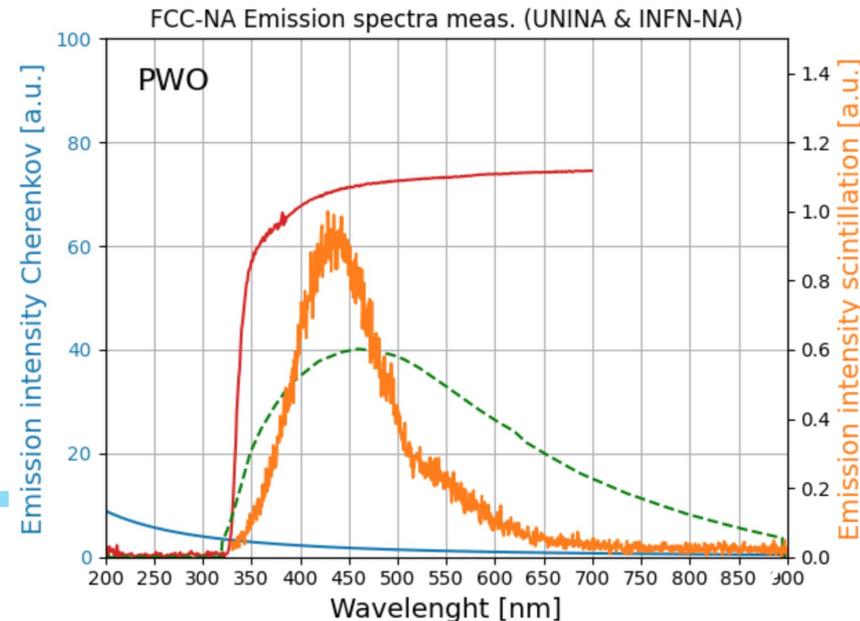
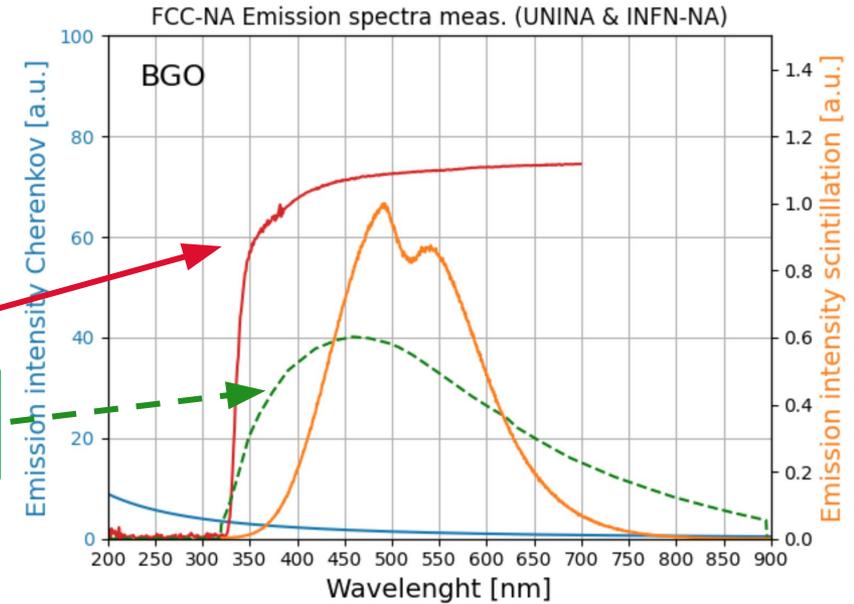
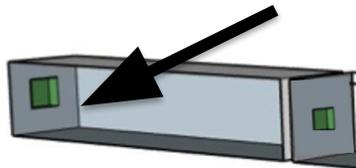
Sono funzioni della lunghezza d'onda:

$$Eff_{detection} = Trasmittance_{Eff} \cdot PDE$$

Quella geometrica è legata all'area del SiPM / l'area della base

$$Eff_{Geometrica} = \frac{3 \times 3}{12 \times 12} \cdot \frac{1}{2}$$

Sezione trasv



# Generazione in cascata:

**Fase 1:** Si riava il **totale** di fotoni di Scintillazione o Cherenkov  $N_S$  o  $N_C$

**Fase 2:** si ricava l'**efficienza media** di singolo fotone  $\varepsilon_S$  oppure  $\varepsilon_C$ , generando la lunghezza d'onda un numero grande di volte  $K$ , e calcolando:

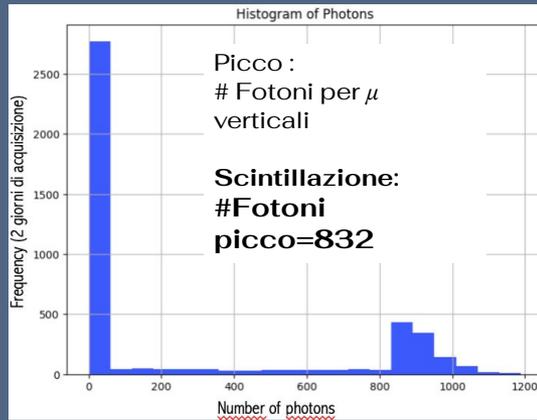
$$\varepsilon_{S,C}^{Avg} = \varepsilon^{Geom} \cdot \left( \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K \varepsilon_{S,C}^{Det}(\lambda) \right)$$

**Fase 3:** il numero di fotoni rivelato  $n_S$  o  $n_C$  è a questo punto

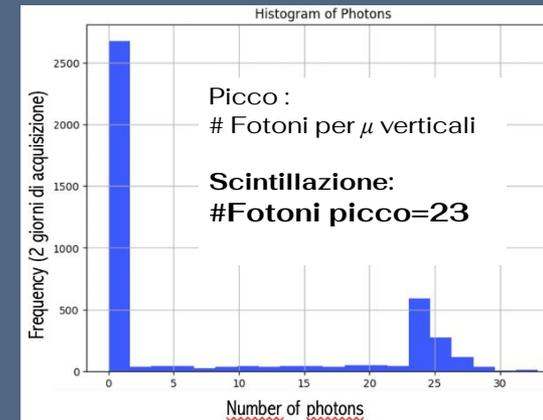
$$n_{S,C} = N_{S,C} \cdot \varepsilon_{S,C}^{Avg}$$

# Numero di fotoni attesi

## BGO



## PWO

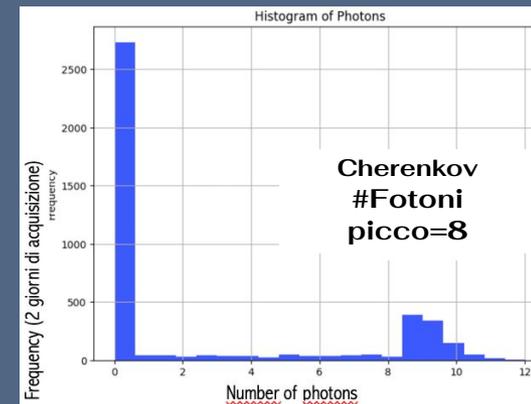
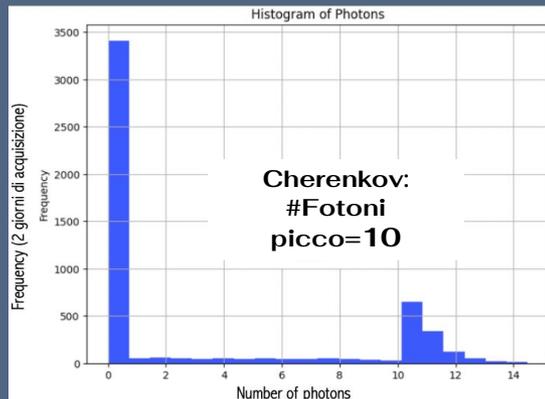


Accettanza  
geometrica:

Accettanza  
geometrica:

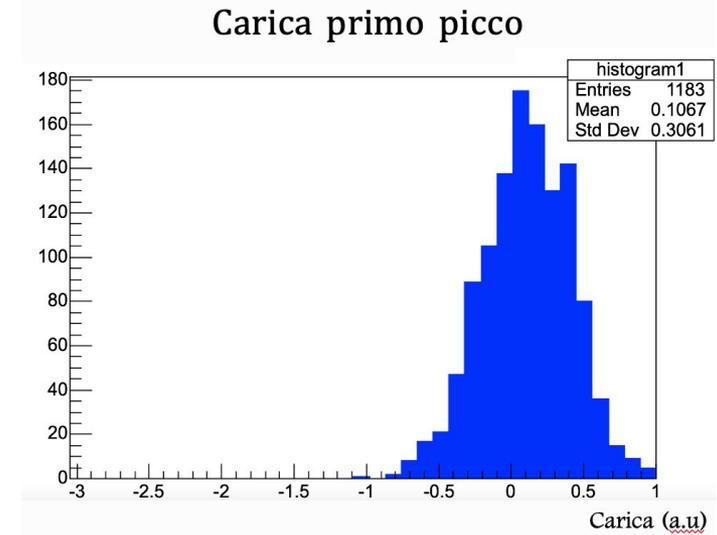
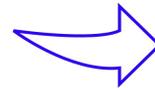
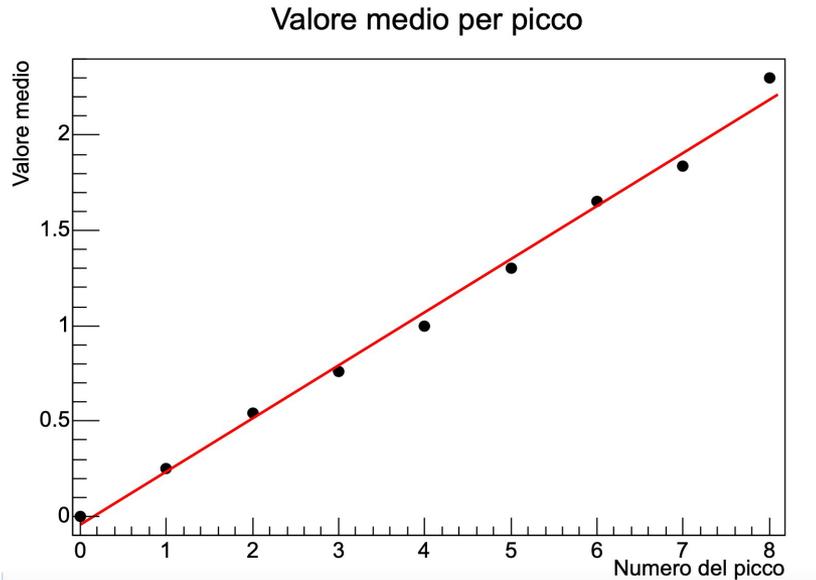
Simulata:  $36.6 \pm 0.9 \%$   
Osservata: 34.8 %

Simulata:  $35.8 \pm 0.9 \%$   
Osservata: 34.4 %



Numero di fotoni di scintillazione attesi  $\gg$  Numero di Cherenkov attesi

# Step 3) Calibrazione in energia



Distribuzione di carica di singolo fotone da emissione **PMMA**

Individuati i picchi si valuta la **carica media** per picco

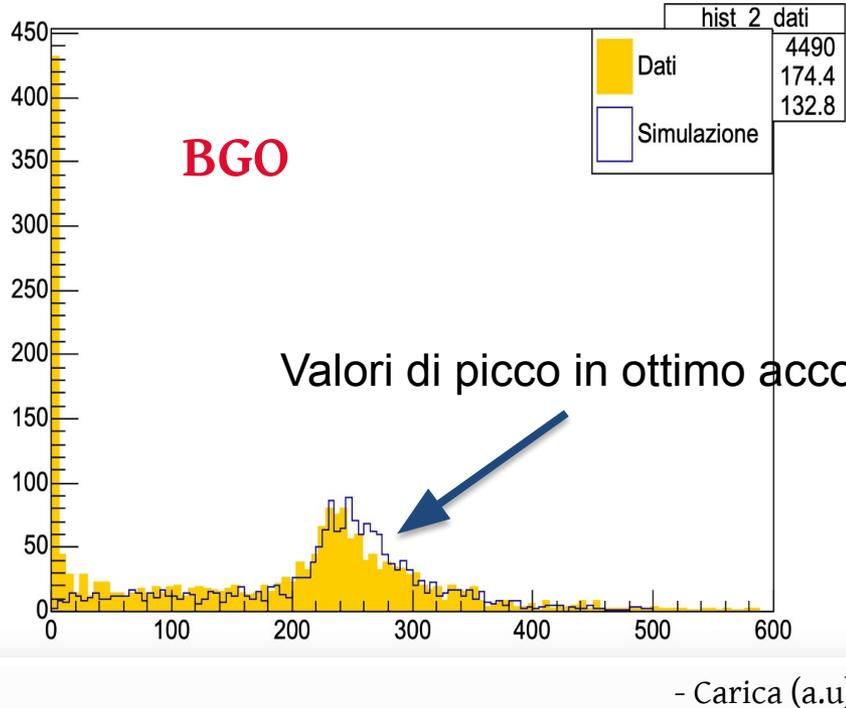
Ottenuto il **fattore di conversione** attraverso il Fit sui valori medi della carica per picco:

$$x (\text{carica a. u.}) = (0.25) \cdot \# \text{fotoni}$$

# Confronto Dati-Simulazione

- il valore centrale è preso dalla simulazione come detto prima
- la larghezza è stata ottenuta dal fit alla landau
- Si è invertito il segno della carica per semplicità di visualizzazione

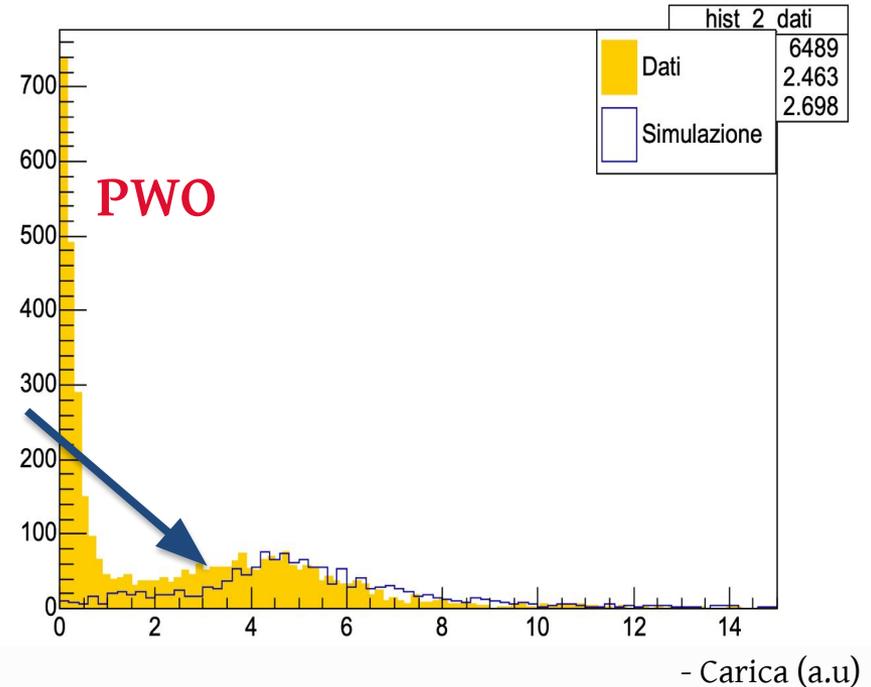
Confronto dati - simulazione BGO



Valori di picco

Osservato: 238 (a.u.)  
Simulato: 225 (a.u.)

Confronto dati - simulazione PWO



Osservato: 5.2 (a.u.)  
Simulato: 4.5 (a.u.)

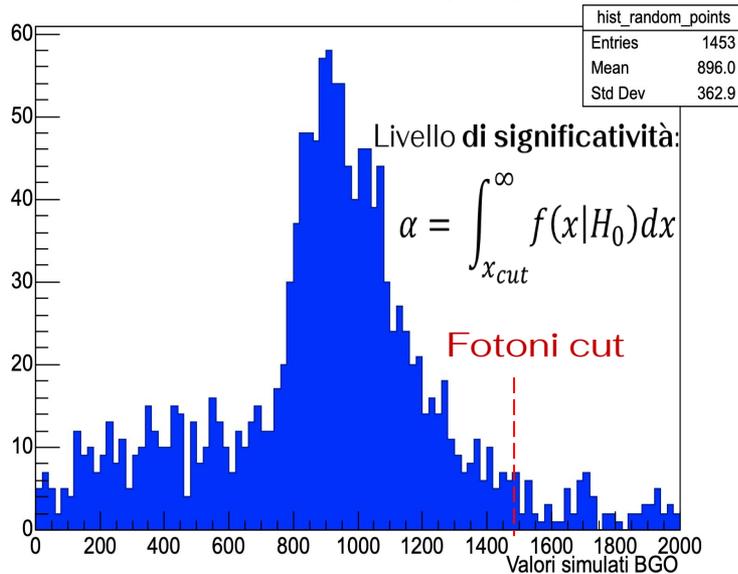
**Nota:** il picco a zero non è stato ancora considerato - c'è solo rumore intorno allo zero e non lo abbiamo modellizzato. Il numero totale però è corretto perché è legato all'efficienza geometrica.

# Confronto con Cherenkov

Conteggio di fotoni per un livello di significatività del 5% rispetto all'ipotesi  $H_0$

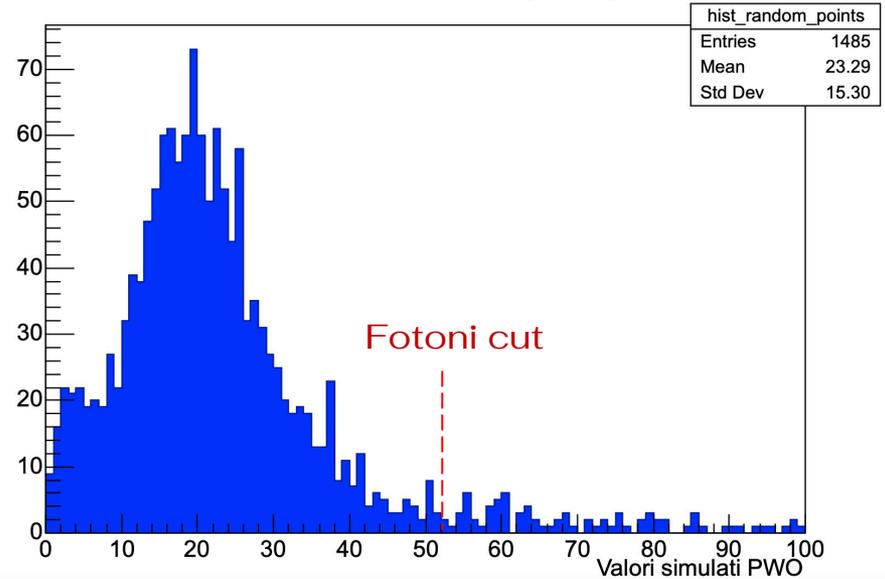
$H_0$  Ipotesi di solo S  
 $H_1$  Ipotesi S + C

Distribuzione Fotoni (BGO)



**Fotoni<sub>Cut</sub> = 1540**

Distribuzione Fotoni (PWO)



**Fotoni<sub>Cut</sub> = 52**

Consideriamo dataset “centrato” nel valore medio S + valore medio C  
 → Quale sarebbe il nvalore “visibile” solo con conteggi?

**Fotoni<sub>Necessari</sub> = 610.**

**Fotoni<sub>Necessari</sub> = 34**

$$\text{Fotoni}_{Cut} - \text{Fotoni}_{\text{medio, scintillazione}} \gg \text{Fotoni}_{Ch \text{ attesi}}$$

# Aggiunta filtri

Partiamo col filtro a 400 nm

Ragioniamo allo stesso modo

→ In pratica, alle efficienze di rivelazione si moltiplica **una ulteriore efficienza di filtro**

Numero di fotoni necessari per la discriminazione



$$\text{Fotoni}_{\text{BGO}} = 13$$

$$\text{Fotoni}_{\text{PWO}} = 5$$

Numero di fotoni Cherenkov attesi per i due cristalli:



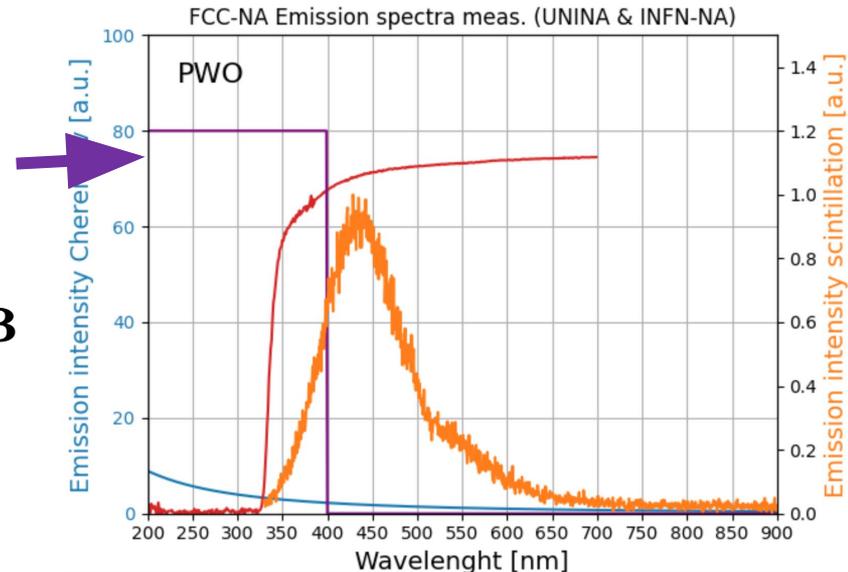
$$\text{Fotoni Attesi}_{\text{BGO}} = 2$$

$$\text{Fotoni Attesi}_{\text{PWO}} = 2$$

A basse lunghezze d'onda:

**Intensità Cherenkov più elevata ma**

**Trasmittanza si riduce**



# Effetto filtri complessivo

Abbiamo anche provato un filtro più “pesante” a 380 nm

Numero di fotoni necessari per la discriminazione



$$\text{Fotoni}_{\text{BGO}} = 6$$

$$\text{Fotoni}_{\text{PWO}} = 3$$

E valutato i la significatività di:

#fotoni medio S+Ch

vs

#fotoni medio S

In termini di dev. st (colonna z)

Numero di fotoni Cherenkov attesi per i due cristalli:



$$\text{Fotoni Attesi}_{\text{BGO}} = 1$$

$$\text{Fotoni Attesi}_{\text{PWO}} = 1$$

BGO

Filtro	Eff <sub>Scintillazione</sub>	Eff <sub>Cherenkov</sub>	Fotoni Ch. necessari	Fotoni Ch. attesi	z
No	0.26	0.13	610	10	≈ 0
λ = 400nm	0.004	0.03	13	2	0.2
λ = 380nm	0.001	0.02	6	1	≈ 0

PWO

Filtro	Eff <sub>Scintillazione</sub>	Eff <sub>Cherenkov</sub>	Fotoni Ch. necessari	Fotoni Ch. attesi	z
No	0.26	0.11	34	8	0.92
λ = 400nm	0.034	0.03	5	2	0.92
λ = 380nm	0.01	0.015	3	1	1.23

# Riassunto al 3/11

## Uso *solì* conteggi con 1 solo SiPM:

- Simulazione mostra **ottimo accordo con il segnale di scintillazione** (provato senza filtri)
- Con dei **filtri semplici** prevediamo di ottenere una **debole significatività ( $z \sim 1$ )** considerando il passaggio di una particella ultrarelativistica ( $\beta \geq 0.99$ ) al MIP

# Status update al 15/11/2023

# Misure in verticale

Aumentare luce Cherenkov e scintillazione renderà più facile discriminare i due casi

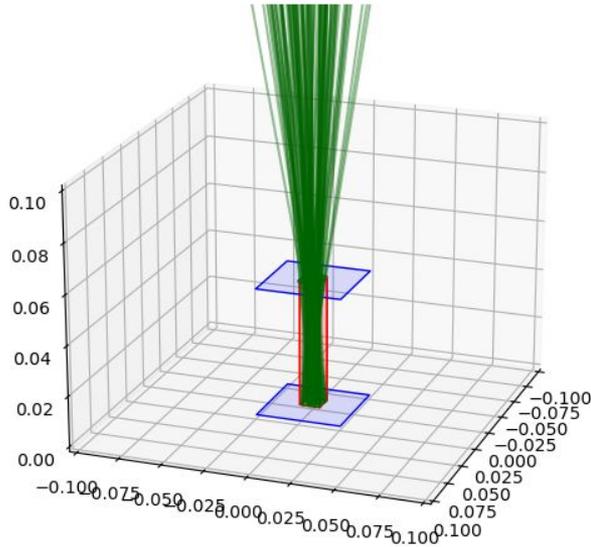
Primo semplice metodo  $\Rightarrow$  mettere il **crystallo in verticale!**

Problema: **accettanza di cosmici**

Abbiamo iniziato a studiare nel dettaglio la configurazione verticale per valutare la fattibilità e i tempi di esposizione necessari

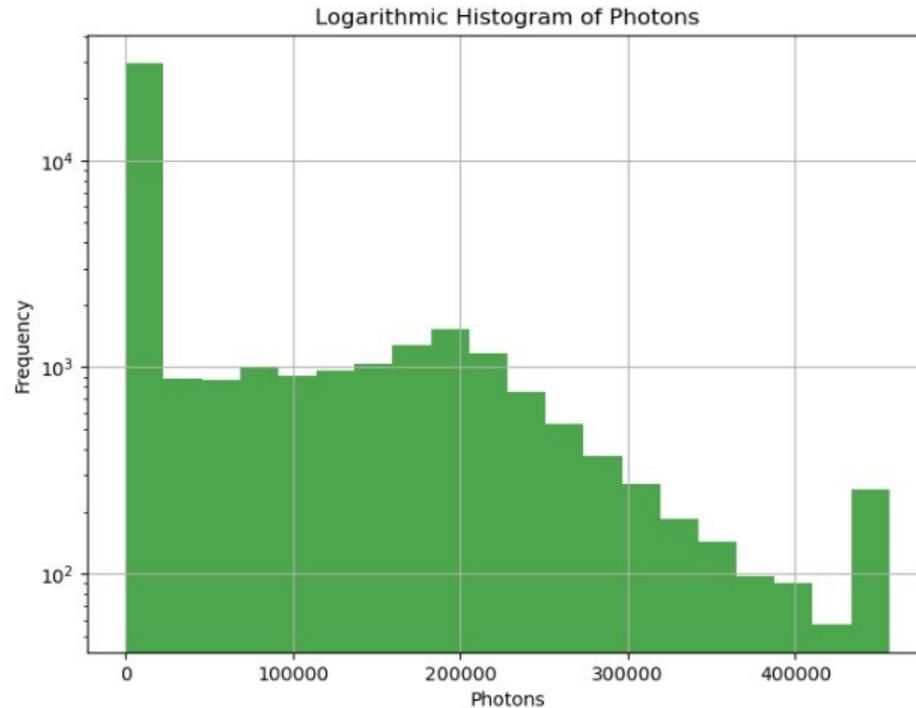
# Configurazione verticale

## Prima “semplice” configurazione - scintillatori attaccati



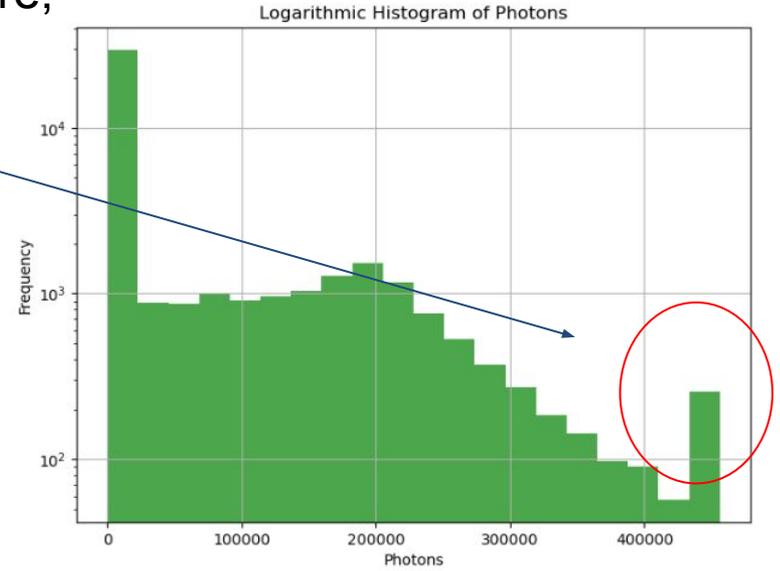
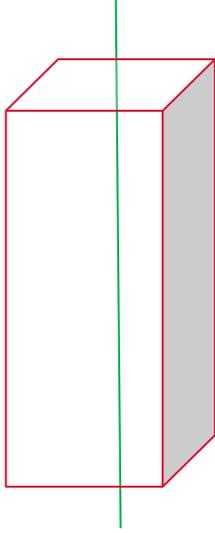
Non necessariamente 100% realistica ma utile per capire cosa vediamo!

Grafico del # di fotoni in 20 giorni di acquisizione:



# Features configurazione verticale

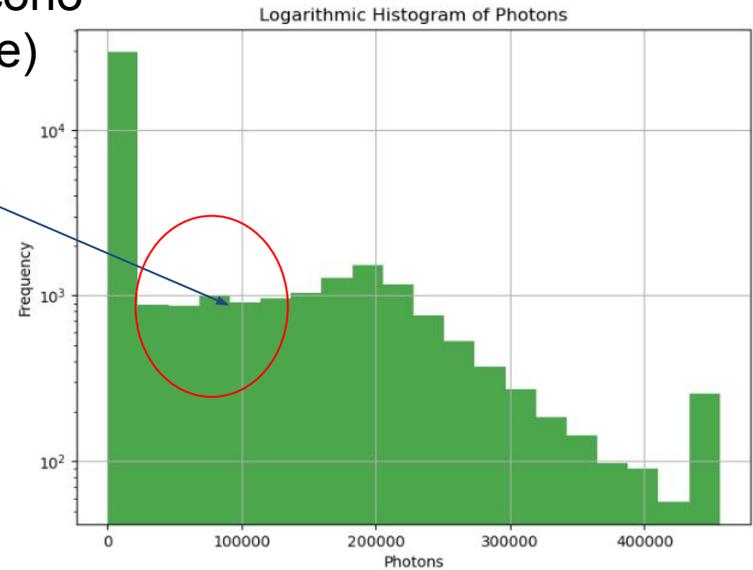
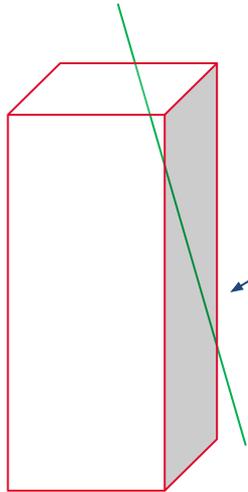
Caso A) verticali:  
Entrano dalla base superiore,  
escono dalla inferiore



# Features configurazione verticale

Caso B1) :

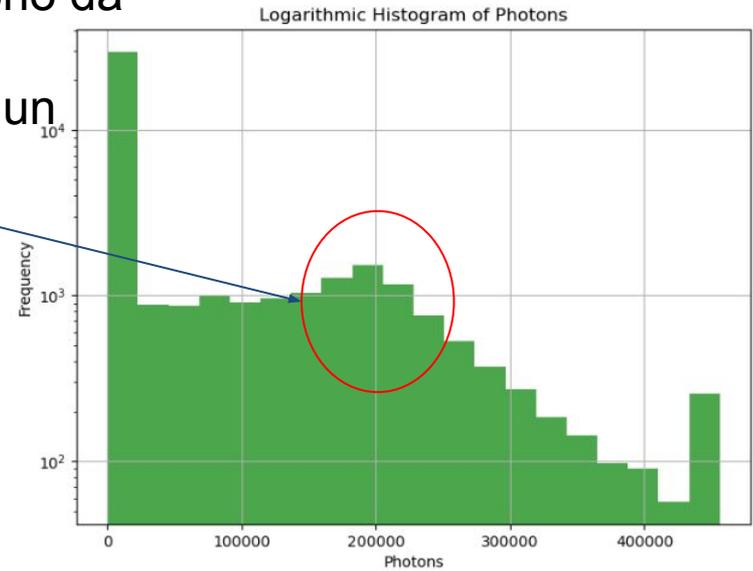
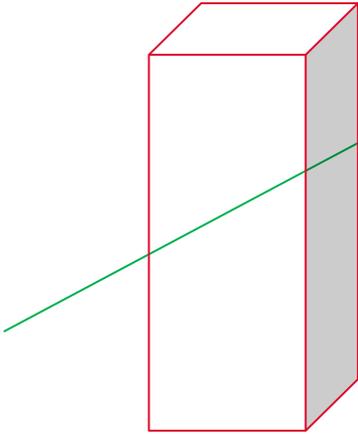
- Entrano da una base, escono da un lato (o a parti invertite)



# Features configurazione verticale

Caso B2) :

- Entrano da una lato, escono da un altro lato
- se è il lato opposto fanno un "picco"



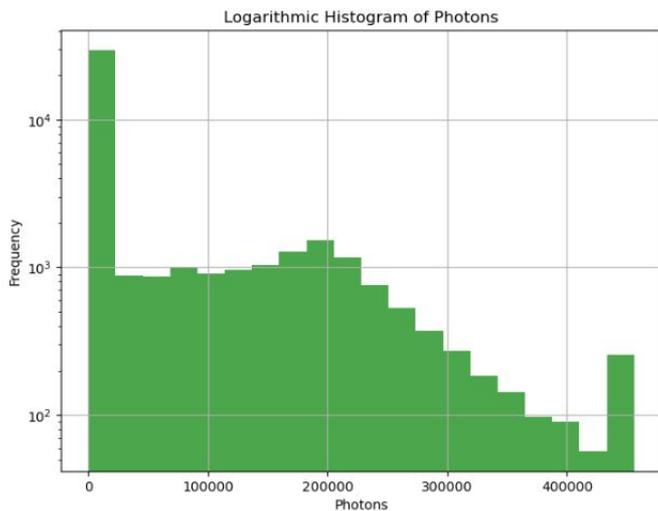
# Efficienze in verticale

Eventi generati: 480 ore (20 giorni)

Totale triggerati dagli scintillatori 500k

Totale rivelati dal calorimetro: 150k  $\Rightarrow$  **Efficienza = 30%**

Parziale casi A,B1,B2,C:



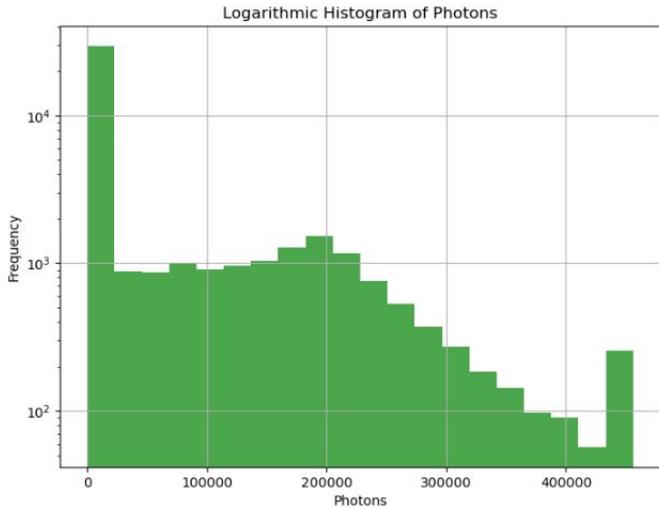
% Numero 1:	1.750930600173372
% Numero 2:	5.152083014634644
% Numero 3:	5.2897608485033905
% Numero 4:	5.148258630360512
% Numero 5:	5.024603538830248
% Numero 6:	5.2578909795522915
% Numero 7:	5.261077966447402
% Numero 8:	5.245780429350874
% Numero 9:	5.25406659527816
% Numero 10:	9.111595533119168
% Numero 11:	9.54438835347509
% Numero 12:	9.646371934118607
% Numero 13:	9.768114833511804
% Numero 14:	9.54438835347509
% Numero 15:	9.000688389169344

Caso A) verticali

Caso B1)

Caso B2)

# Confronto con configurazione orizzontale



```

% Numero 1: 1.750930600173372
% Numero 2: 5.152083014634644
% Numero 3: 5.2897608485033905
% Numero 4: 5.148258630360512
% Numero 5: 5.024603538830248
% Numero 6: 5.2578909795522915
% Numero 7: 5.261077966447402
% Numero 8: 5.245780429350874
% Numero 9: 5.25406659527816
% Numero 10: 9.111595533119168
% Numero 11: 9.54438835347509
% Numero 12: 9.646371934118607
% Numero 13: 9.768114833511804
% Numero 14: 9.54438835347509
% Numero 15: 9.000688389169344
    
```

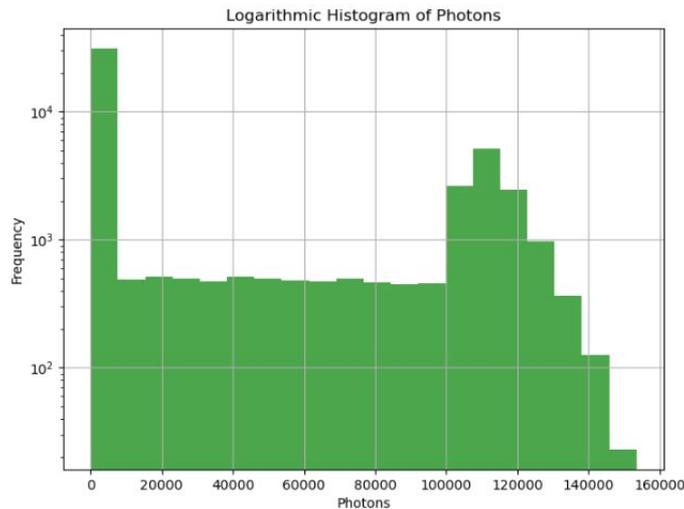
## Configurazione verticale:

Eventi generati: 480 ore (20 giorni)  
 Totale triggerati dagli scintillatori 500k  
 Totale rivelati dal calorimetro: 150k



**Efficienza = 30%**

**Picco #fotoni verticali ~ 450'000**  
**Efficienza totale verticale:**  
 $0.3 \times 0.017 = 0.51\%$



```

% Numero 1: 59.339308158915784
% Numero 2: 0.0
% Numero 3: 0.0
% Numero 4: 13.508388436526586
% Numero 5: 13.764686594895895
% Numero 6: 0.0
% Numero 7: 0.0
% Numero 8: 6.718399912563528
% Numero 9: 6.669216897098202
% Numero 10: 0.0
% Numero 11: 0.0
% Numero 12: 0.0
% Numero 13: 0.0
% Numero 14: 0.0
% Numero 15: 0.0
    
```

## Configurazione orizzontale:

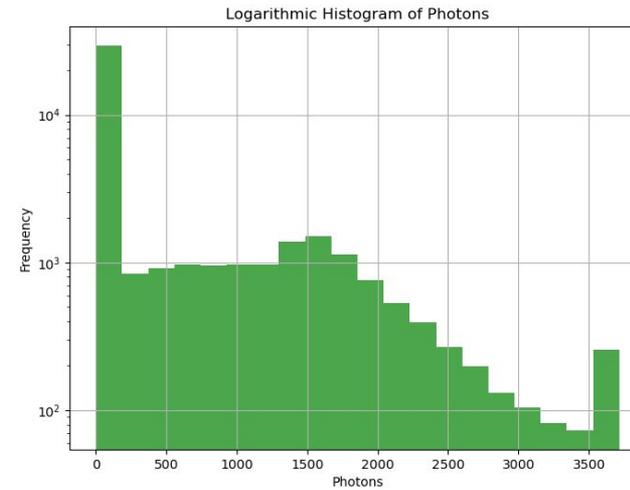
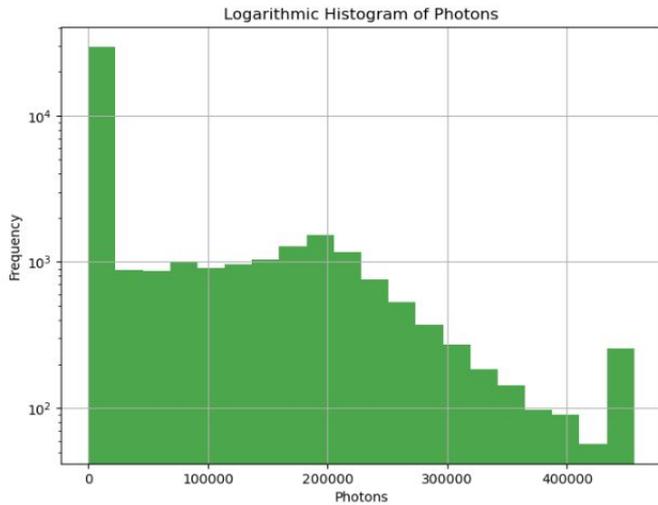
Eventi generati: 480 ore (20 giorni)  
 Totale triggerati dagli scintillatori 500k  
 Totale rivelati dal calorimetro: 180k



**Efficienza = 36%**

**Picco #fotoni verticali ~ 110'000**  
**Efficienza totale verticale:**  
 $0.36 \times 0.59 = 18\%$

# Aggiunta efficienze di PDE/trasmittanza



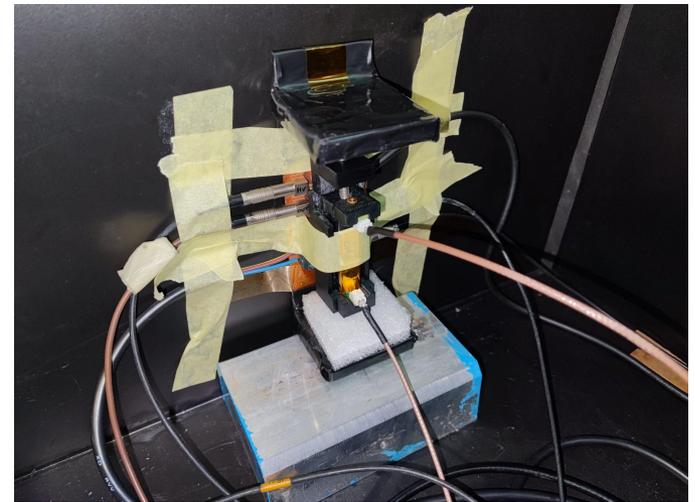
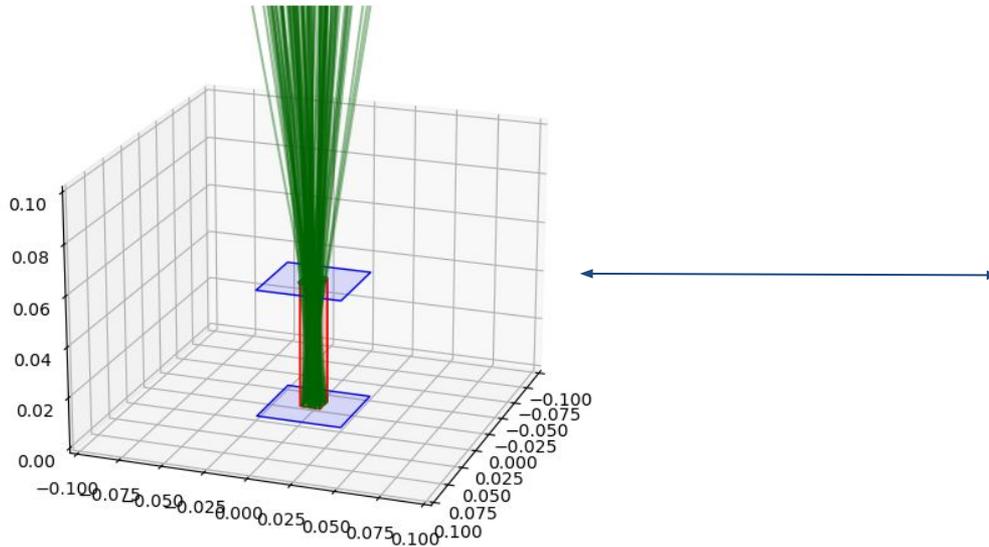
**Si considera la trasmittanza, PDE, ed efficienza di detection del sipm:**

→ Effetto di riduzione del # di fotoni di un fattore ordine  $10^{-2}$

# Configurazione verticale: caveat strutturale

**Nota Bene:** i dati che abbiamo preso non hanno gli scintillatori attaccati per questioni “strutturali”:

→ Urge richiedere un supporto custom-made!



# Riassunto e prossimi passi

## Piano di questi giorni :

1) Valutare la statistica di una presa dati verticale “lunga” e aggiungere l’effetto di Landau

## Piano short term:

2) **Misurare coi filtri** per vedere se i numeri coi filtri in orizzontale e verticale

2) Valutare i segnali ad **entrambi gli estremi di lettura** per sfruttare la direzionalità

→ In principio il fattore principale di incertezza è la **coda landau della perdita di energia**

→ Fittando entrambi gli estremi abbiamo una stima della perdita per ionizzazione ed eliminiamo la fluttuazione maggiore

3) Studiare setup con altri cristalli (BSO)

# Piano long term

## Aggiunta simulazione Geant4:

- 4) **Sviluppo simulazione GEANT4** che permetta di considerare anche gli effetti di timing → ora abbiamo un buon metro di paragone!
- 5) Considerare un segnale con sciame EM e non semplicemente una particella al MIP

# Codice e documentazione:

## Documentazione in fieri:

- Breve abstract tesi:

[https://agenda.infn.it/event/38281/contributions/214832/attachments/112526/160856/Abstract\\_Triennale\\_JS.pdf](https://agenda.infn.it/event/38281/contributions/214832/attachments/112526/160856/Abstract_Triennale_JS.pdf)

- **WIP**: Logbook su Overleaf dove ci sono molti dettagli in più

## Codice:

- Aggiunto codice su branch NACSetup\_PY di FCCNAFW:

[https://github.com/FCCNA/fcc-hardware/tree/NACSetup\\_PY](https://github.com/FCCNA/fcc-hardware/tree/NACSetup_PY)

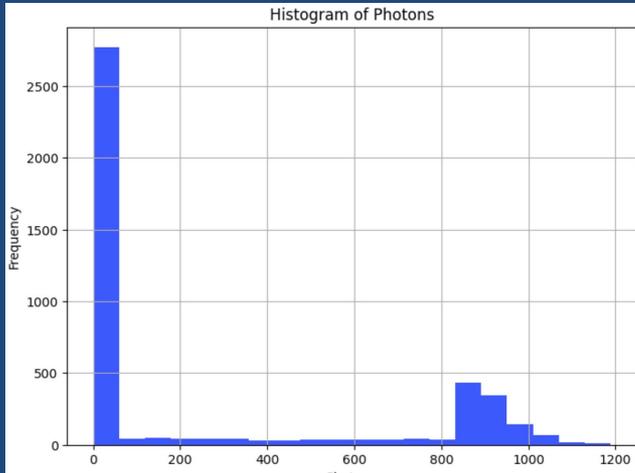
- **WIP** per farne una versione da usare out of the box

**Backup**

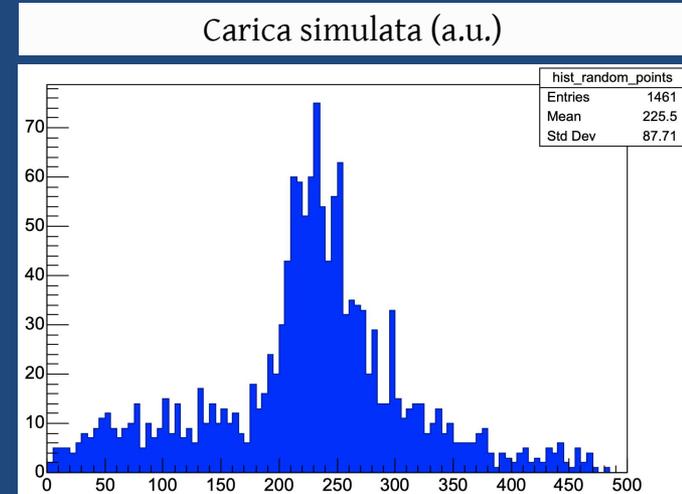
---

# Carica raccolta: simulazione

Generiamo attorno ai fotoni attesi una Poissoniana



Attorno ai valori generiamo una Landau



Number of photons

Perché l'energia persa dalla particella si distribuisce come una Landau?

Bethe-Bloch

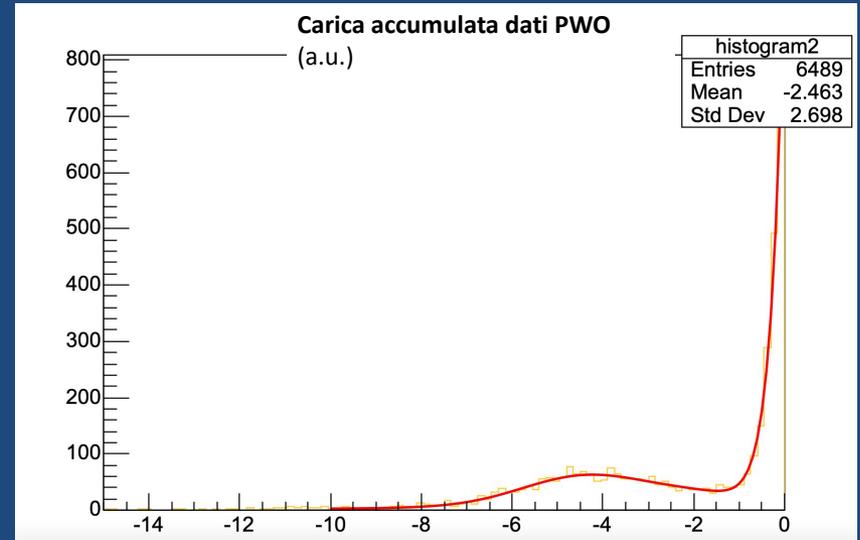
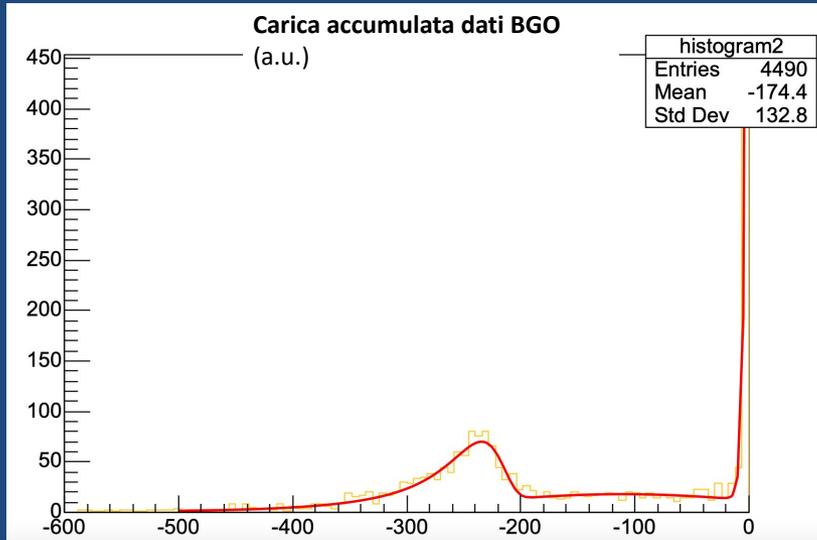
Perdita **media** di energia (processi di natura stocastica)

$$\begin{aligned} \text{Energia} &= l \rho E_{MIP} \\ N_{\text{Fotoni}} &= \text{Energia} \cdot LY \end{aligned}$$

Per spessori sottili non vale il Teorema del Limite centrale

Distribuzioni **asimmetriche** con una coda verso gli alti rilasci energetici (**Landau**).

# Fit dei dati: Landau della carica raccolta



I parametri della Landau fittati sono:

- $MPV_{Fit} = 238.6 \pm 0.7$
- $Sigma_{Fit} = 15.5 \pm 0.8$

I parametri del Fit sono:

- $MPV_{Fit} = 5.2 \pm 0.3$
- $Sigma_{Fit} = 0.6 \pm 0.1$

# Fotoni Cherenkov attesi

Per calcolare il numero di fotoni Cherenkov attesi, calcoliamo dapprima la *light yield* del Cherenkov, a partire da:

Dove:

$$z = 1$$

$$\beta = 0.99$$

$$n_{\text{BGO}} = 2.15$$

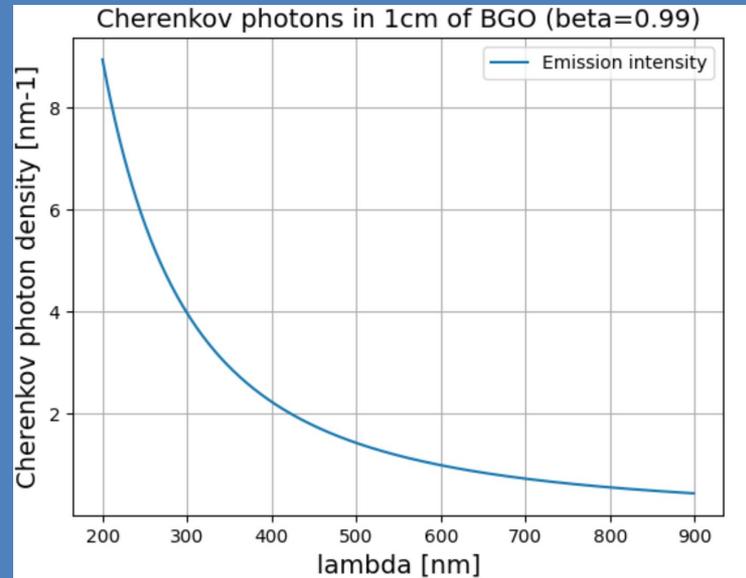
$$n_{\text{PWO}} = 2.16$$

Ottenendo:

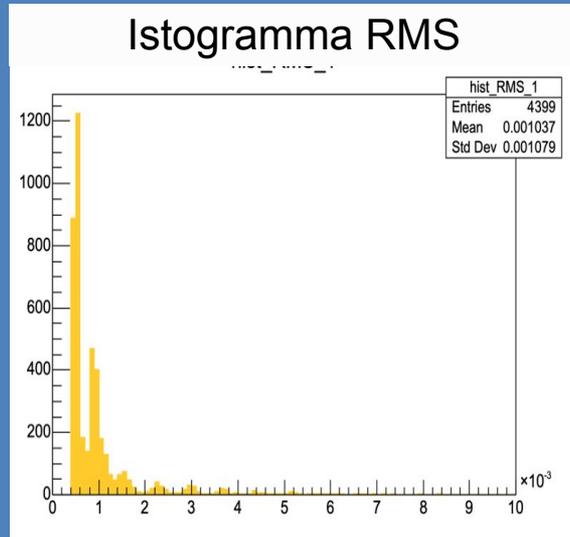
$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \left( 1 - \frac{1}{(n \cdot \beta)^2} \right)$$

- $ly_{\text{BGO}} = 1389.51$

- $ly_{\text{PWO}} = 1393.15$

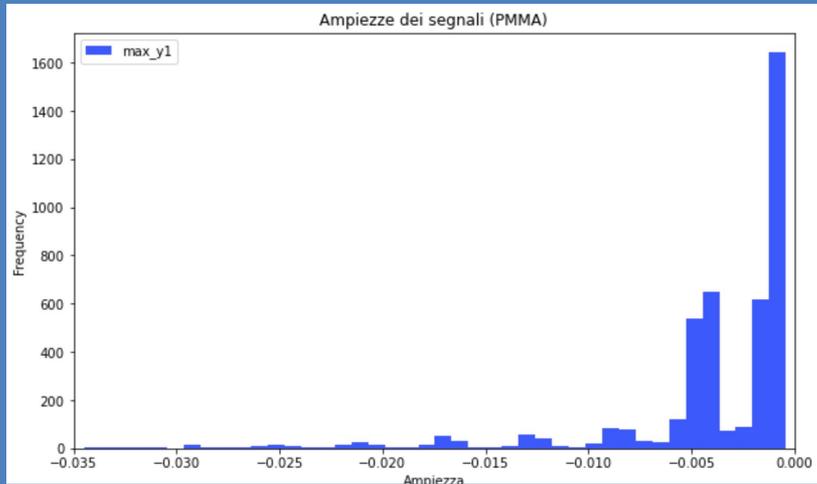
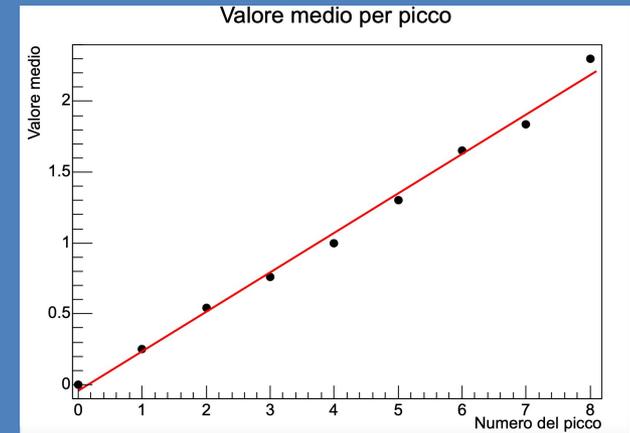


# Calibrazione della risposta al singolo fotone



Isolato il picco  
corrispondente  
al singolo  
fotone

Visualizzata  
l'energia media  
raccolta



Separato i contributi di fondo  
attraverso un taglio sulle **RMS**



Risultati Fit Lineare:

$$\text{Pendenza} = 0.251 \pm 0.008$$

$$\text{Intercetta} = -0.04 \pm 0.04$$

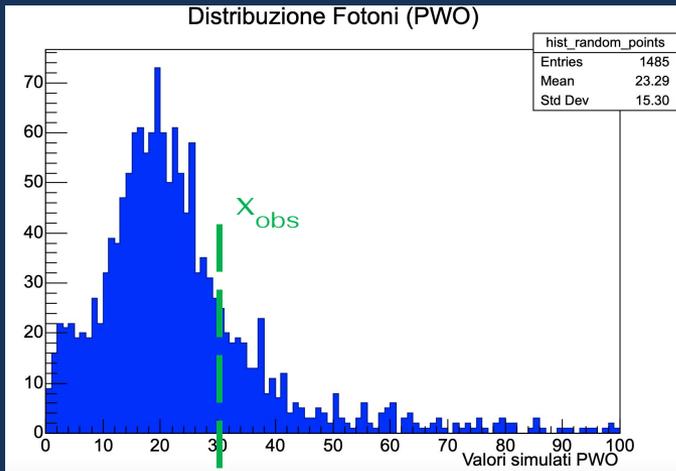
$$x (\text{carica a. u.}) = (0.25) \cdot \#\text{fotoni}$$

# Test d'ipotesi: significance

Come otteniamo z ?

Calcoliamo il p-value:

$$p = \int_{x_{obs}}^{\infty} f(x|H_0) dx$$



Es:  
 $mean_{Scintillazione} = 23$   
 $mean_{Cherenkov} = 8$   
 $x_{obs} = 30$

$x_{obs} = mean_{Scintillazione} + z \cdot mean_{Cherenkov}$

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9725	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.6	0.9998	0.9998	0.9999							

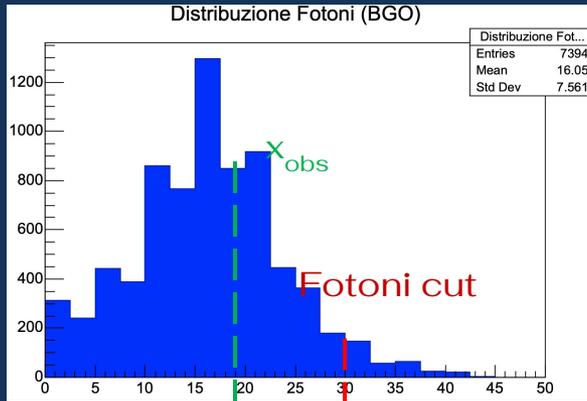
Ricaviamo la **significatività statistica z**

corrisponde al numero di deviazioni standard di una **distribuzione normale** per cui la coda corrispondente ha la stessa probabilità del p-value del fondo.

# Test d'ipotesi: significante Filtri

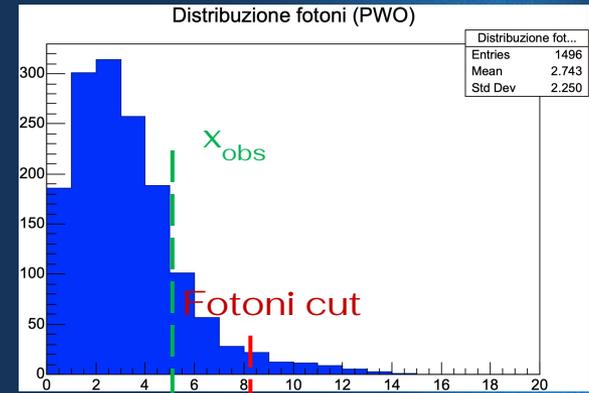
$\lambda = 400 \text{ nm}$

BGO



$Z = 0.23$

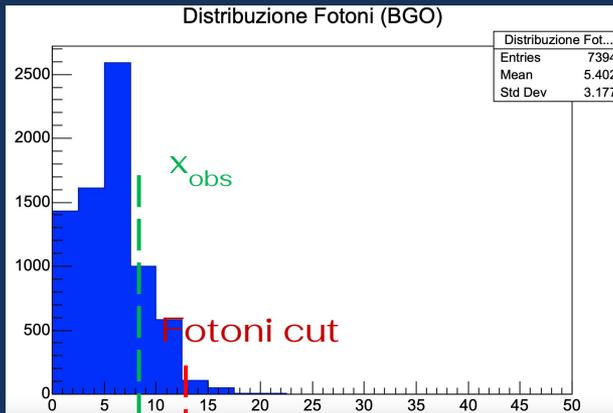
PWO



$Z = 0.59$

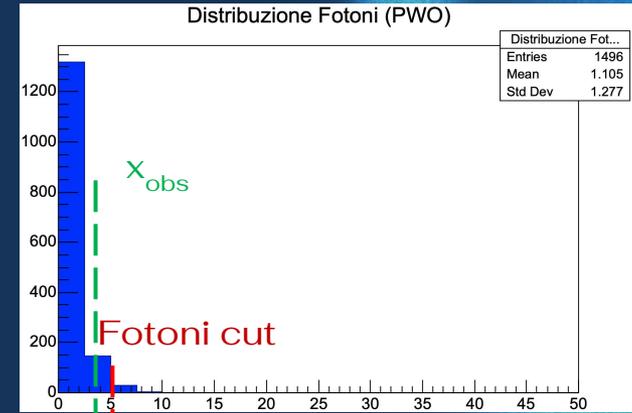
$\lambda = 380 \text{ nm}$

Distribuzione Fotoni (BGO)



$Z \approx 0$

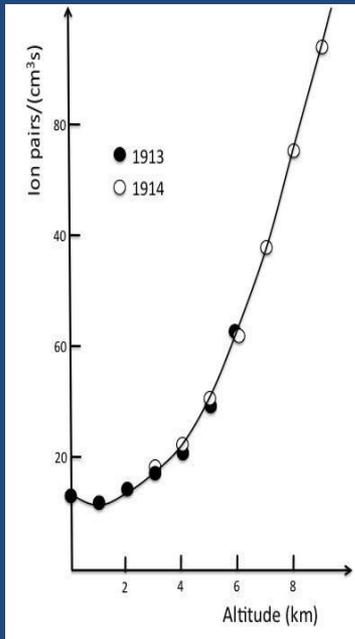
Distribuzione Fotoni (PWO)



$Z = 1.23$

# Raggi Cosmici

Particelle energetiche provenienti dal cosmo  
Rate: 1 particella/cm<sup>2</sup>s



Hess 1936:  
aumento della  
ionizzazione con  
l'altitudine

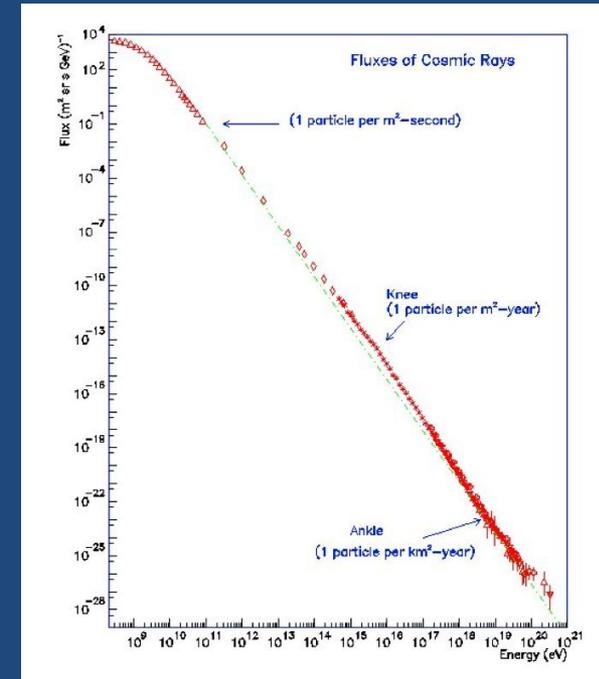
## RAGGI PRIMARI

Protoni (90%), nuclei d Elio, elettroni, fotoni, neutrini e antimateria (minima parte)

Spettro descritto dalla legge a potenza  
 $\phi \propto E^{-\alpha}$  dove:

$$\begin{cases} \alpha = 2.7 \text{ se } E < 10^{15} \text{ eV} \\ \alpha = 3 \text{ se } E > 10^{15} \text{ eV} \end{cases}$$

Il punto in cui avviene il cambio pendenza è denominato **ginocchio**. Per energie 10<sup>18</sup>-10<sup>19</sup> eV lo spettro torna ad essere meno ripido, dando luogo ad un ulteriore cambio di pendenza: **caviglia**.



# Raggi Cosmici

Flusso medio  $1 \frac{\text{particelle}}{\text{cm}^2\text{s}}$  ha energia a livello del mare di 3 GeV

## RAGGI SECONDARI

Componente **MOLLE**(30%): elettroni e fotoni, capace di attraversare pochi centimetri di assorbitore

Componente **DURA**(70%): muoni penetra spessori assorbenti di oltre un metro.

Distribuzione angolare rispetto alla normale alla superficie della Terra in funzione della latitudine:

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

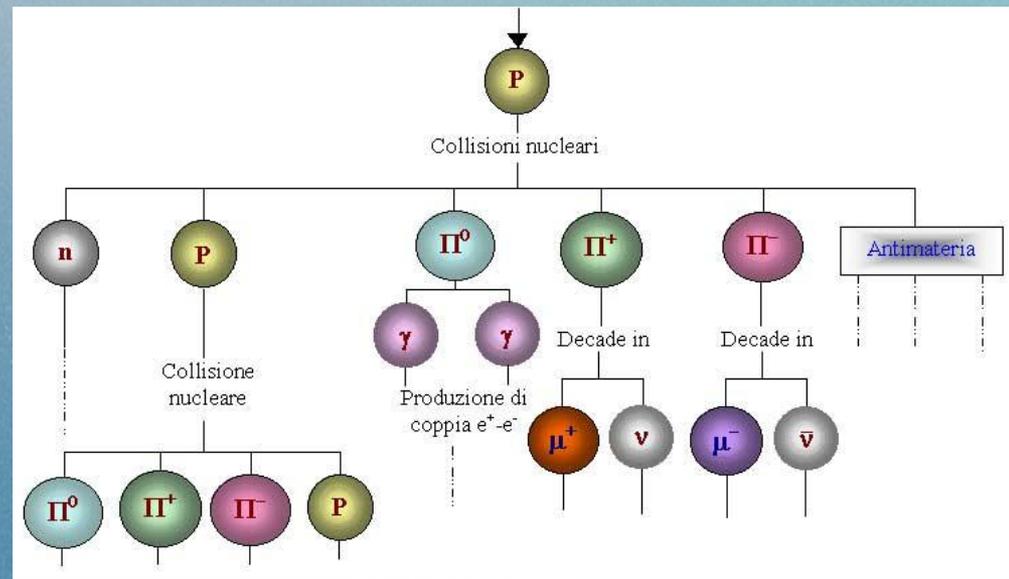
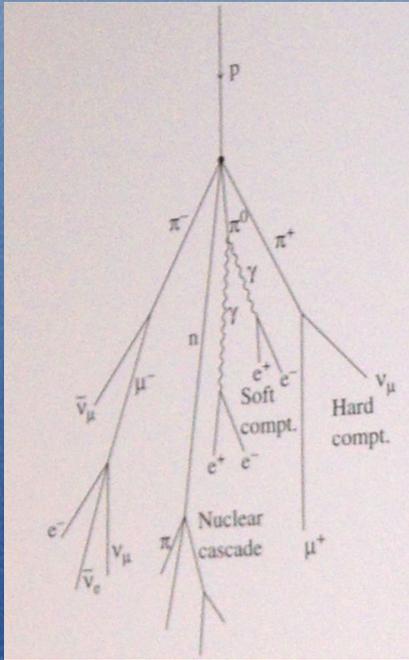
Naturalmente la distribuzione della longitudine è uniforme:

$$f(\phi) = (2\pi)^{-1}$$

# MUONI

Massa = 105.7 MeV/c<sup>2</sup>

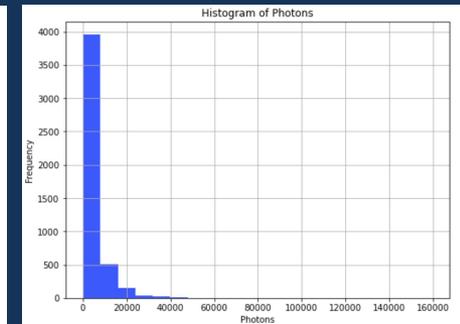
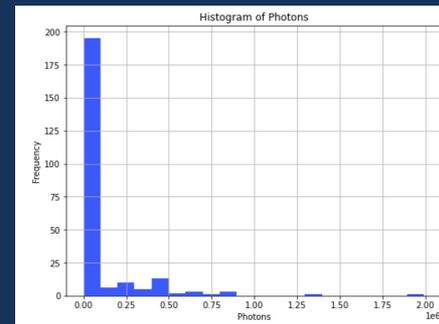
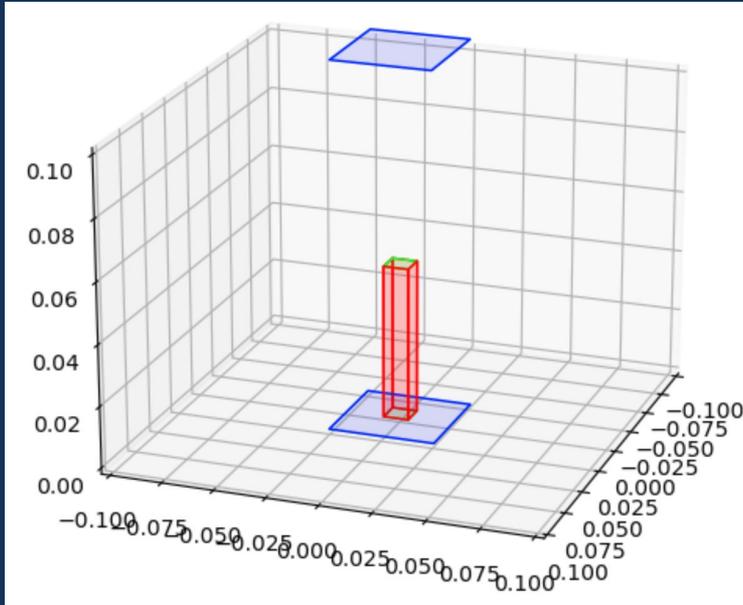
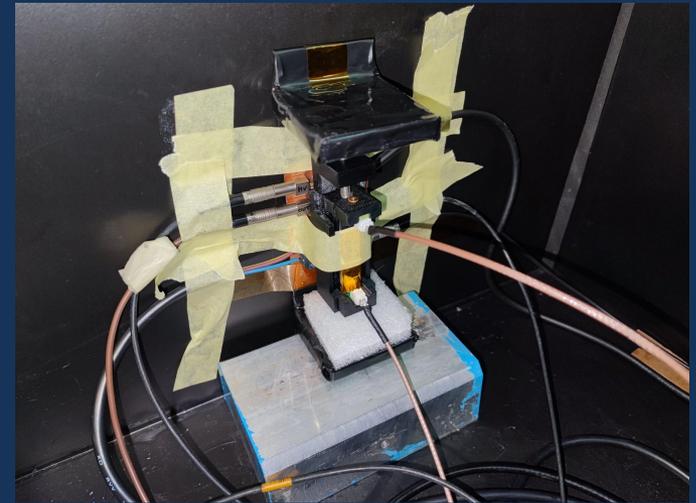
Vita media = 2.2  $\mu$ s



- Le particelle molto energetiche → media di 3 GeV.
- I  $\mu$  sono prodotti nell'alta atmosfera principalmente dal decadimento di  $\pi$  carichi
- Alla produzione → velocità relativistiche e, per via del fenomeno

# Cristallo in verticale

*Distanza trigger = 12 cm  $\Rightarrow$  Rate basso*



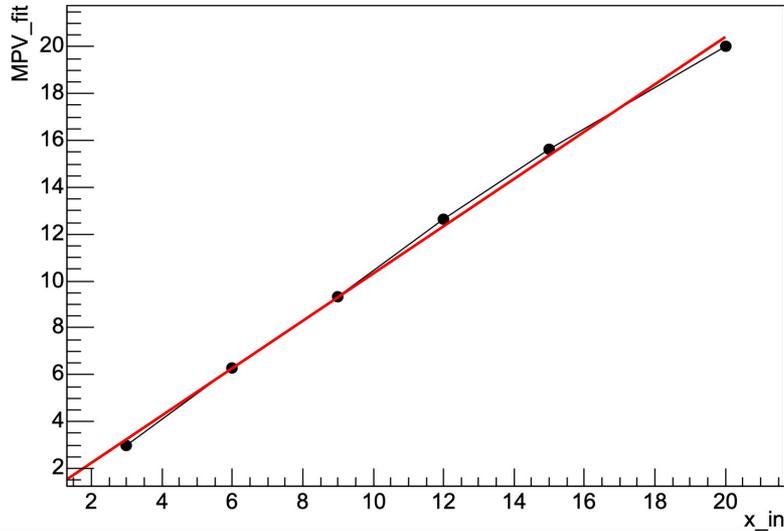
$\rightarrow$  **BGO**: #fotoni più probabile = 398527\*

$\rightarrow$  **PWO**: #fotoni più probabile = 7982\*

\*No efficienze

Riportiamo dunque le curve di calibrazione per il valore centrale e la sigma della Landau, relative al ch2:

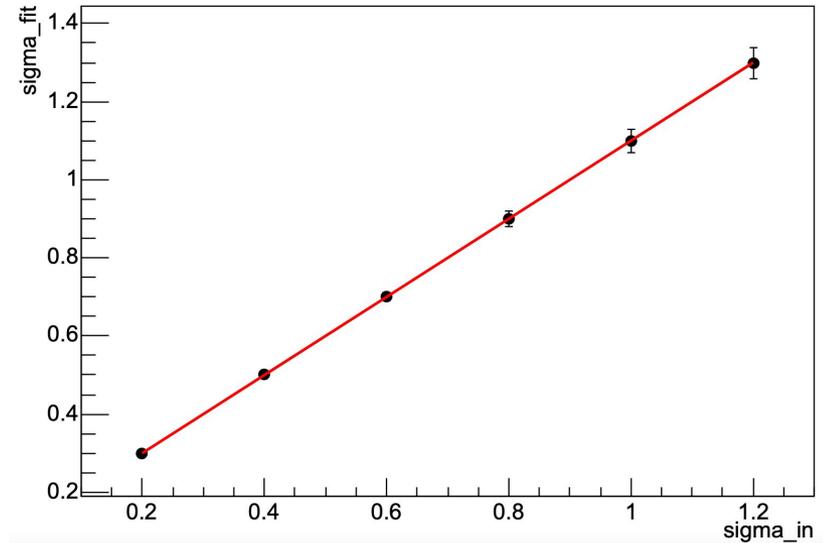
Calibrazione MPV ch2



- $Pendenza = 1.020 \pm 0.003$
- $Intercetta = 0.120 \pm 0.004$

Al valore iniziale di  $MPV_{fit} = 5.2$  corrisponde il valore corretto di  $x_{in} = 4.9$

Calibrazione Sigma ch2



- $Pendenza = 0.99 \pm 0.02$
- $Intercetta = 0.090 \pm 0.009$

Al valore iniziale di  $\sigma_{fit} = 0.6$  corrisponde il valore corretto di  $\sigma_{in} = 0.5$