

FCC@NA: primi studi sui cristalli

M. Campajola, M. Francesconi, A.O.M. Iorio, J. Scamardella,

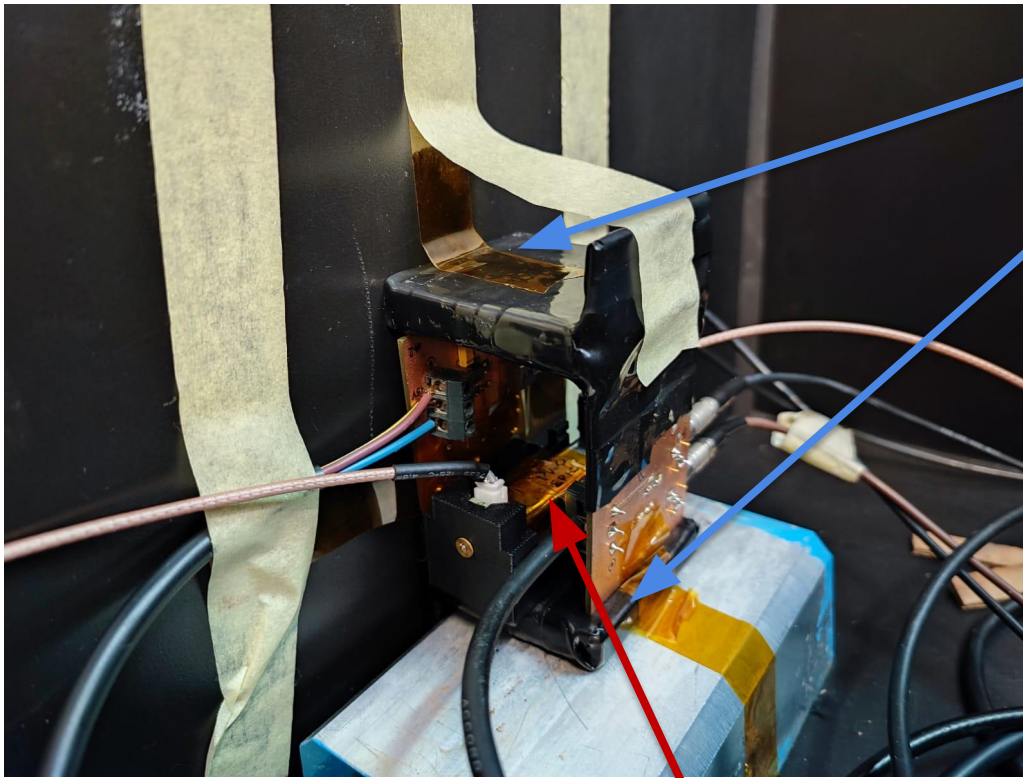
Premessa e contesto

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 mutate da là

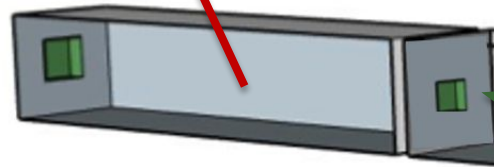
ditta/materiale	SICCAS		EPIC-CRYSTALS		HILGER	
	x150	x50	x150	x50	x150	x50
BSO	2	1		1		
PWO	2	1		1		
LYSO				1		
GAGG				1		
BGO	2	1			2	1

Setup sperimentale



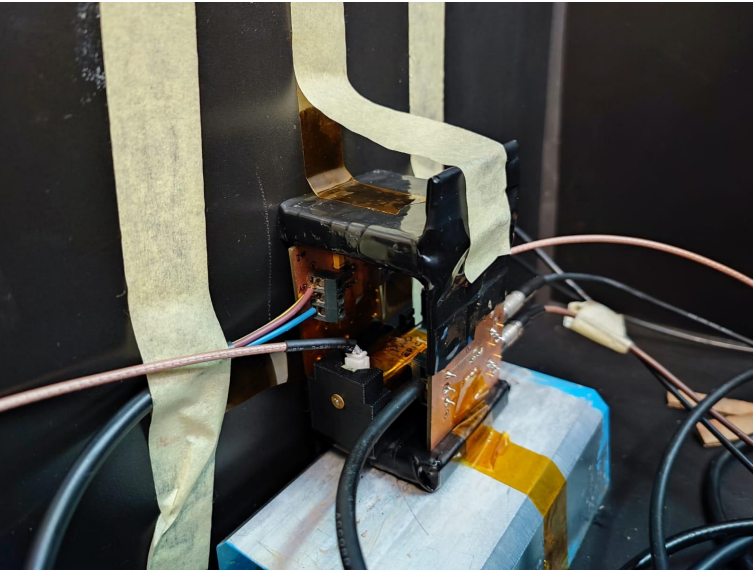
Scintillatori di trigger
 $5 \times 5 \text{ cm}^2$, distanti $5,4 \text{ cm}$

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 mm²**

Celle **50 μ m**

Number of pixels: 3600

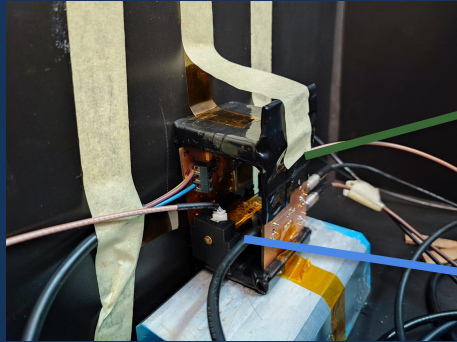
V_{operational} = 55 V, 3V sopra il bd



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 mm²

Preamplificatore
(Transimpedance amplifier)

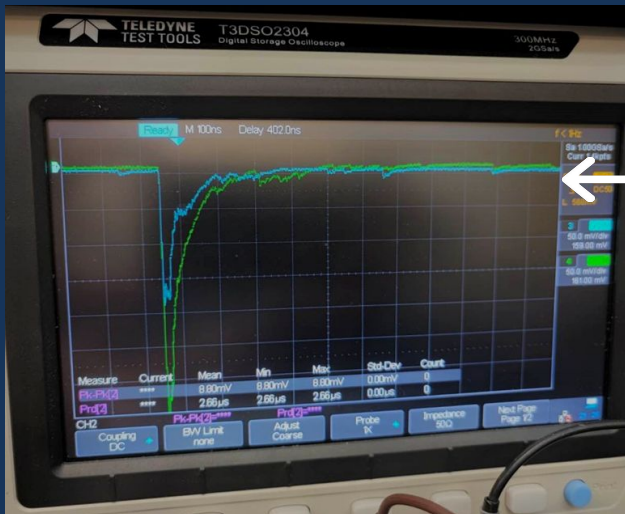
Scintillatori →
discriminatore

**Modulo di
coincidenza**
(**trigger dagli
scintillatori**)

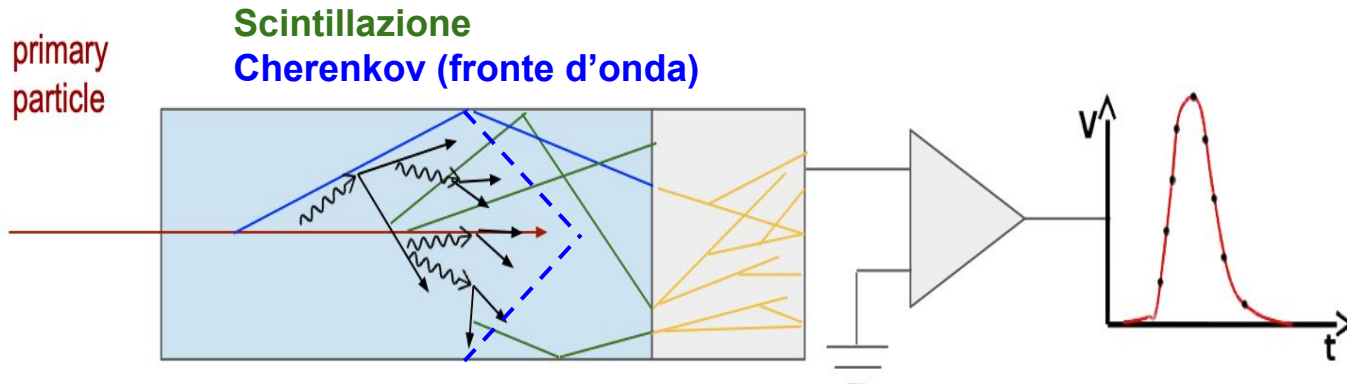
Oscilloscopio

CONTATORE

Registrazione Waveform

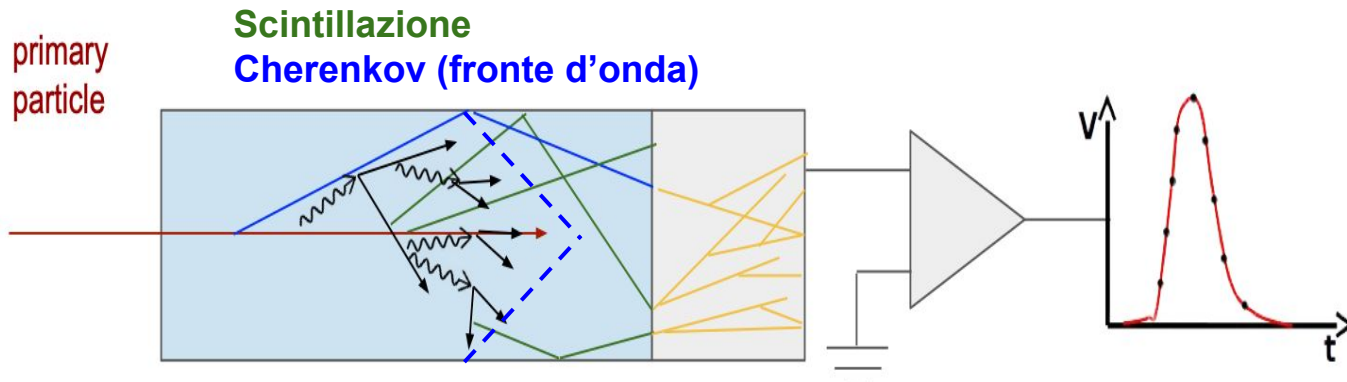


Schematizzazione processo



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

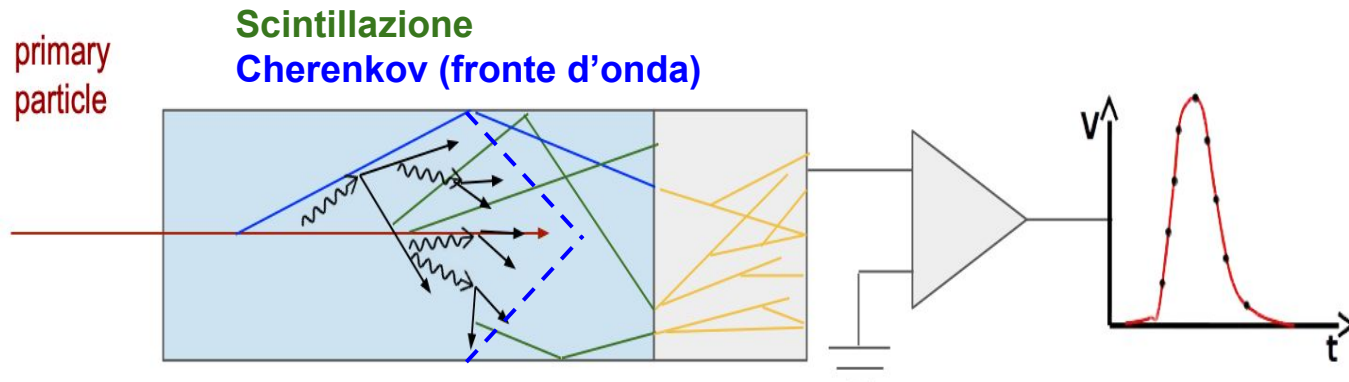
$$\begin{aligned} \text{Energia} &= l \cdot q \cdot E_{MIP} \\ N_{\text{Fotoni}} &= \text{Energia} \cdot LY \end{aligned}$$

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



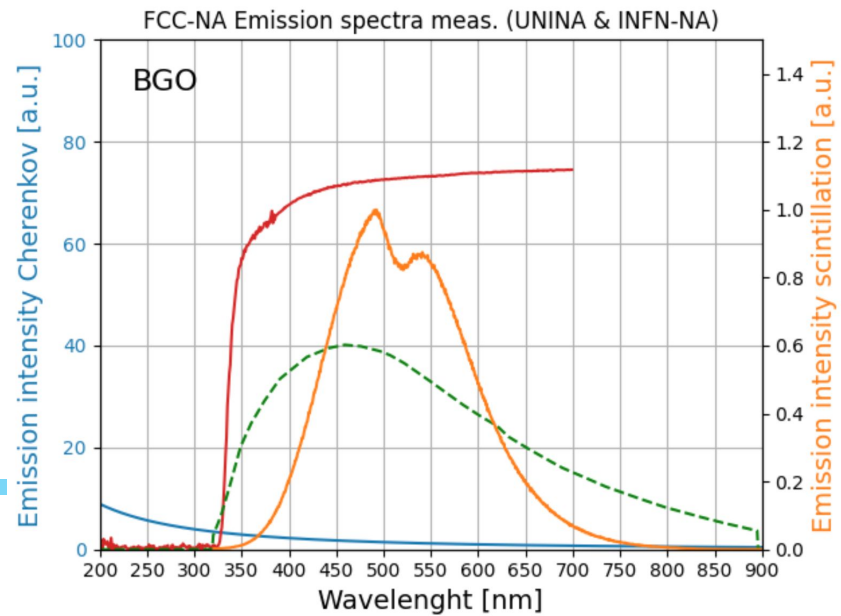
2) Trasmissione e rivelazione

Rate complessivo dato da:

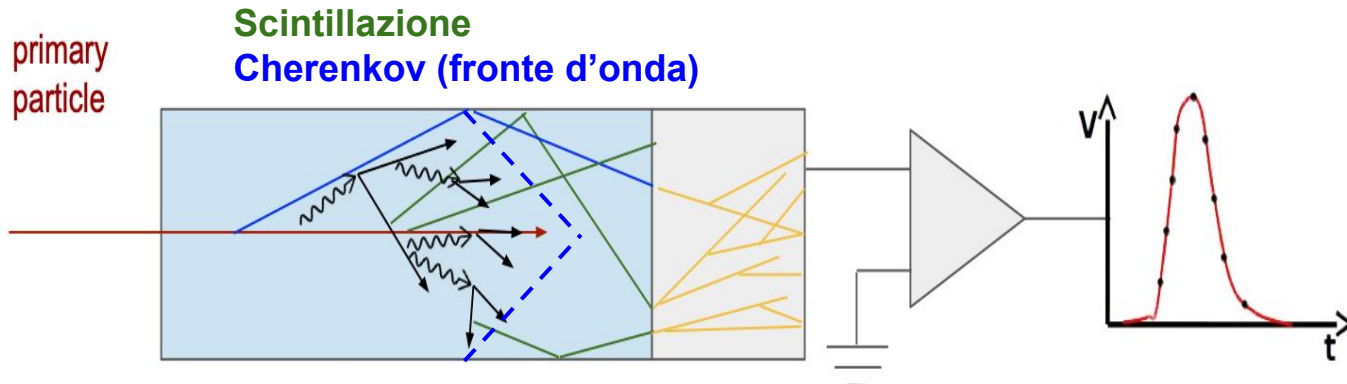
- Rate di produzione fotoni (scint. o Cherenkov)
- Trasmittanza
- Efficienza geometrica del SiPM
- Efficienza di photodetection

Tutti vanno:

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



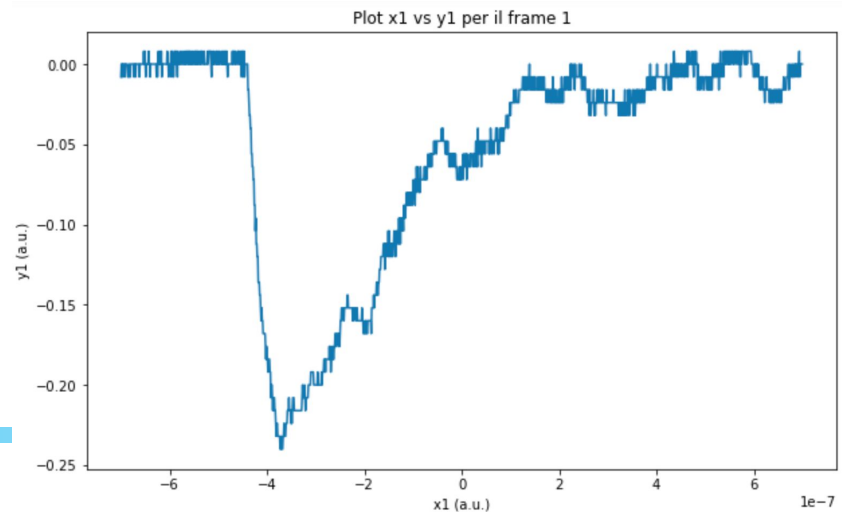
Schematizzazione processo



3) Lettura segnale

Il segnale è letto all'oscilloscopio

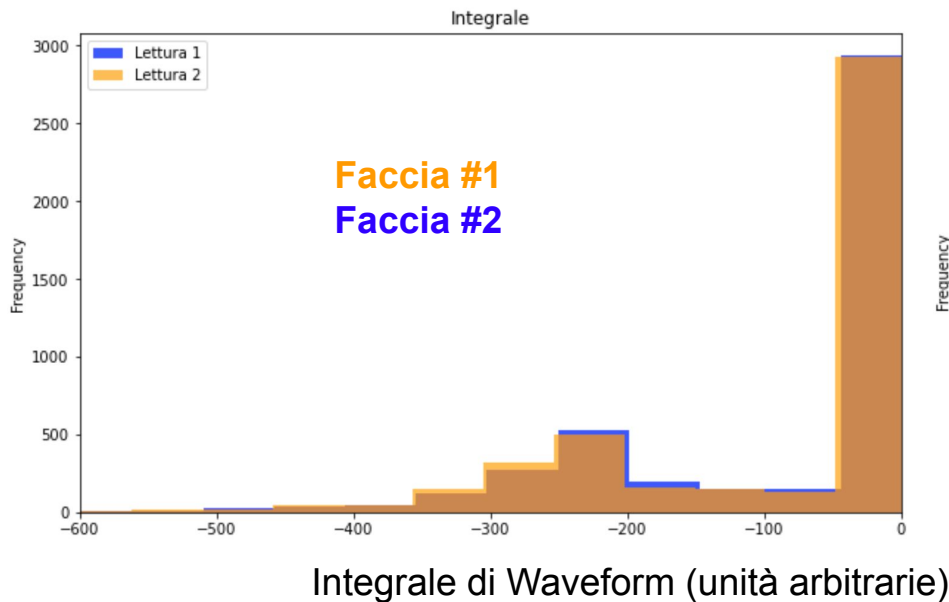
- Area segnale proporzionale alla carica raccolta
- Va calibrato in funzione del numero di fotoni
- Relazione lineare, con qualche caveat.



Cariche raccolte: presa dati di 2 giorni

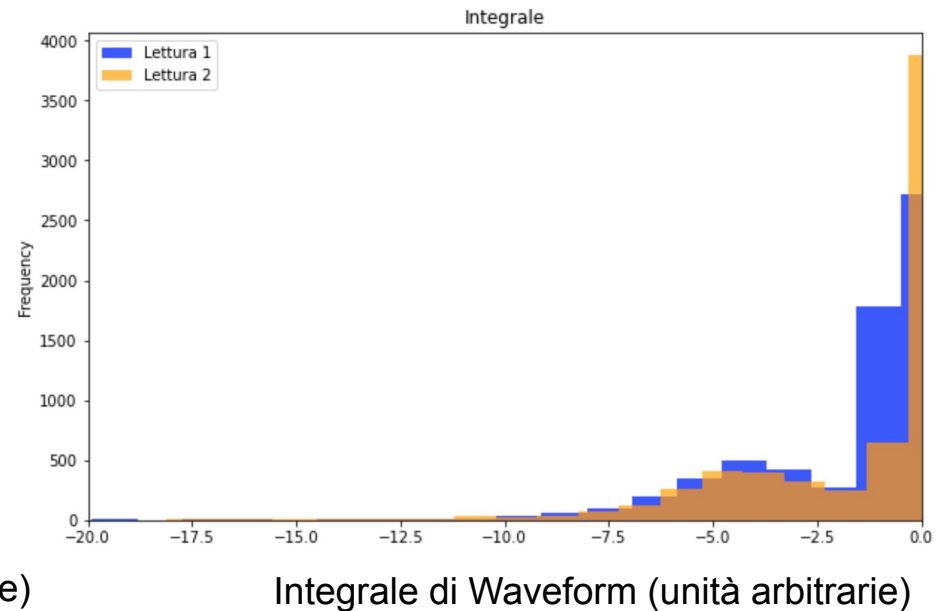
BGO

Light yield: ~8000 fotoni/MeV



PWO

Light yield: ~190 fotoni/MeV

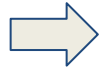


Studi preliminari:

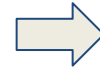
- I picchi hanno valori centrali ~250 BGO e ~4 PWO e possono essere fittati con landau
- I rapporti nel range giusto per essere compatibili con le Yields di scintillazione, ma come facciamo a sapere cosa stiamo vedendo?

Steps della simulazione

**Simulazione
geometrica e
perdita di energia**



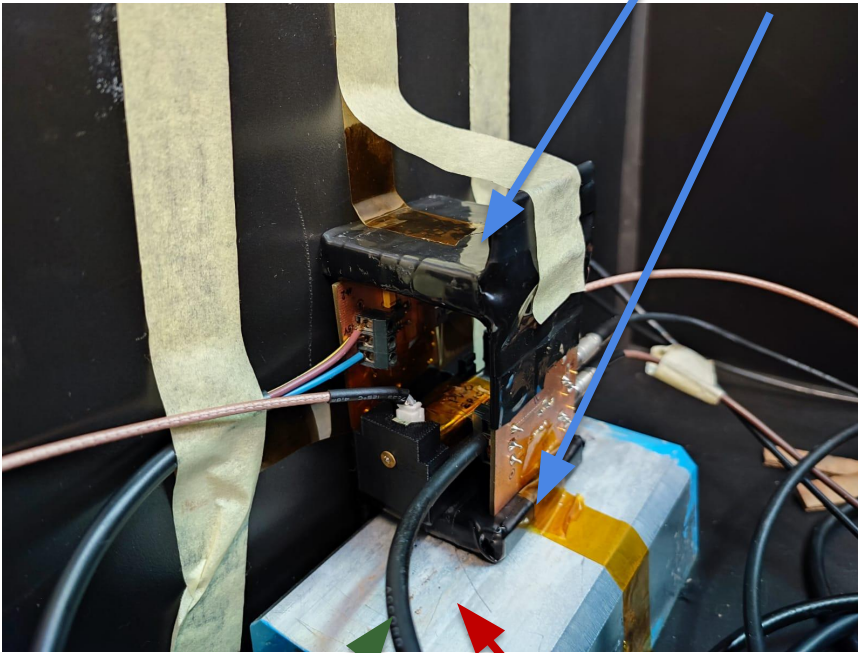
**Rate di
produzione ed
efficienza
rivelazione**



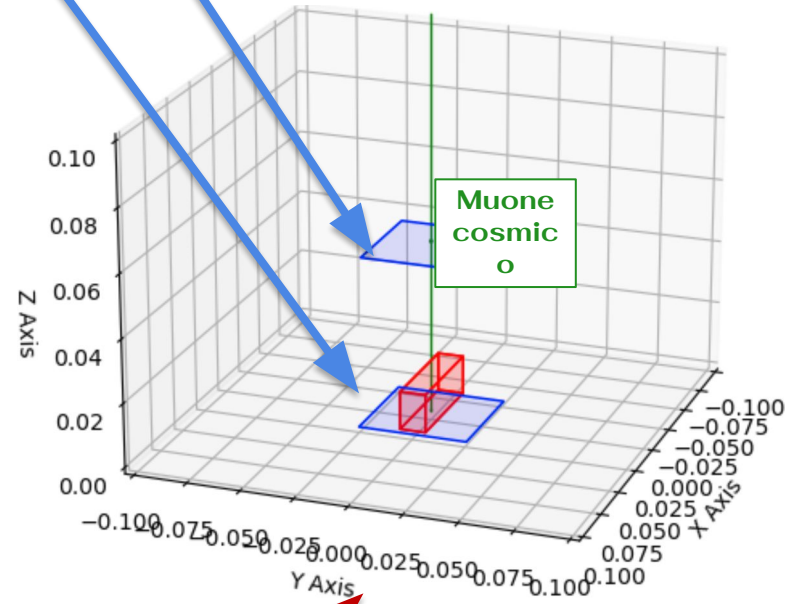
**Calibrazione
e simulazione
picco**

Step 1) Simulazione geometrica

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



SIMULAZIONE

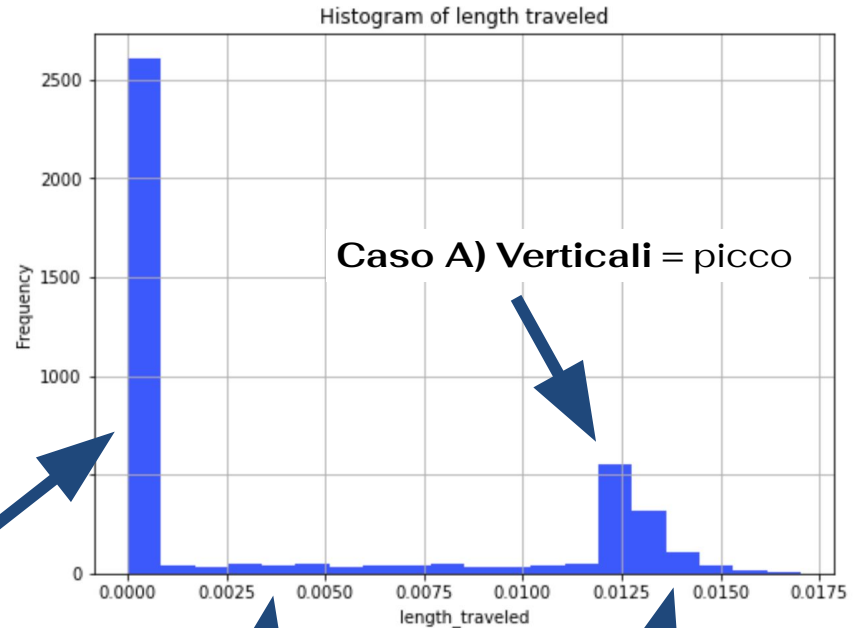
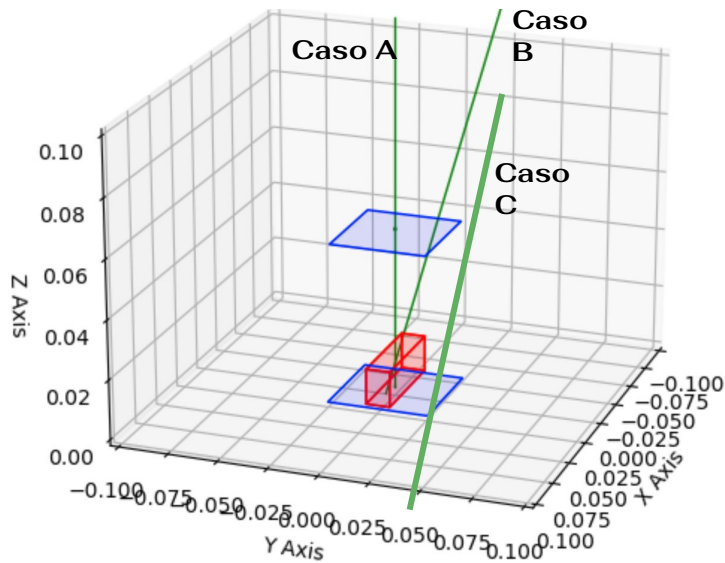


Cristallo BGO o
PWO
 $5 \times 1.2 \times 1.2 \text{ cm}^3$



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

Percorso nel cristallo



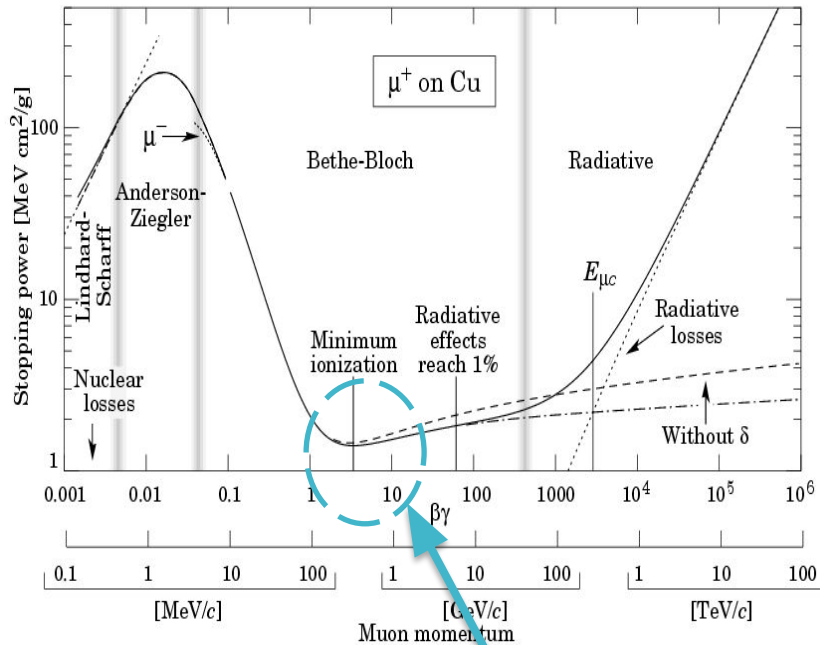
Caso D) raggi che **non** attraversano il cristallo

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



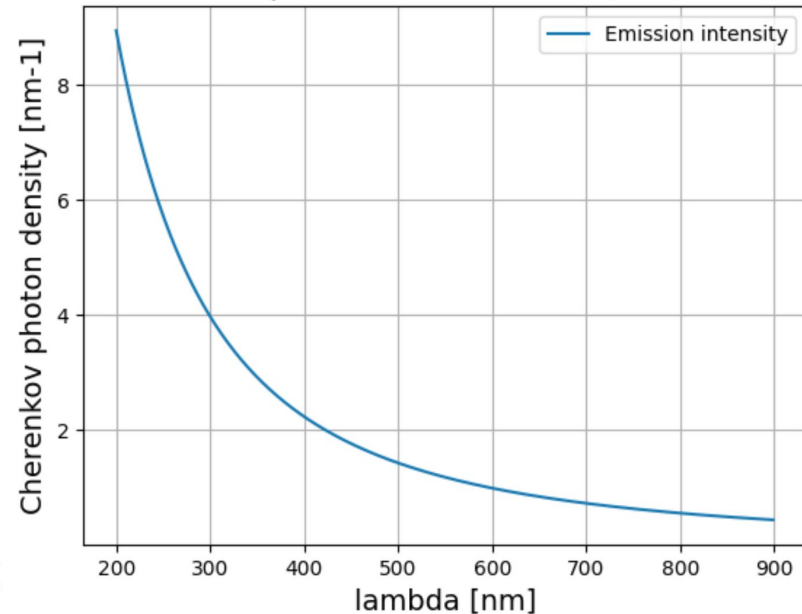
MIP

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

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

Cherenkov

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



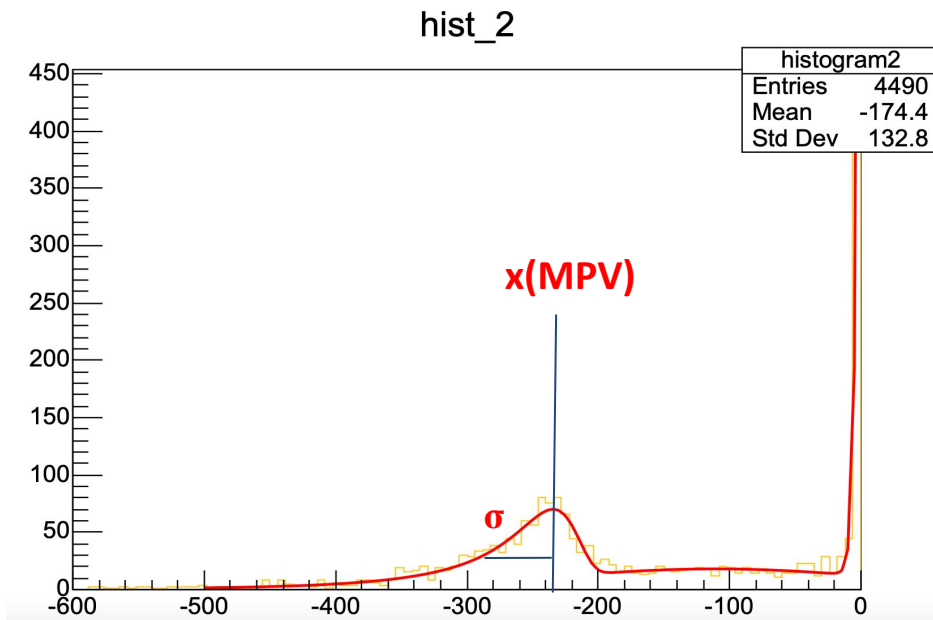
Questa funzione, integrata su lambda, ci da il # di fotoni Cherenkov:

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

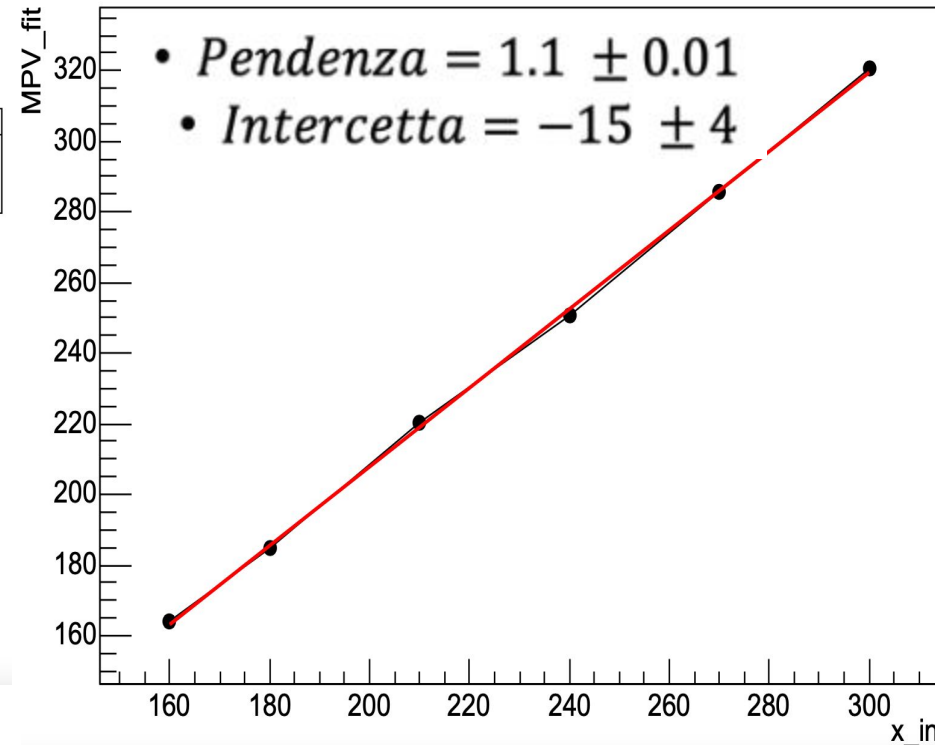
Nota: per semplicità **abbiamo preso beta ~0.99** nei conti successivi, **per i muoni è vero da circa 800 MeV**

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

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

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

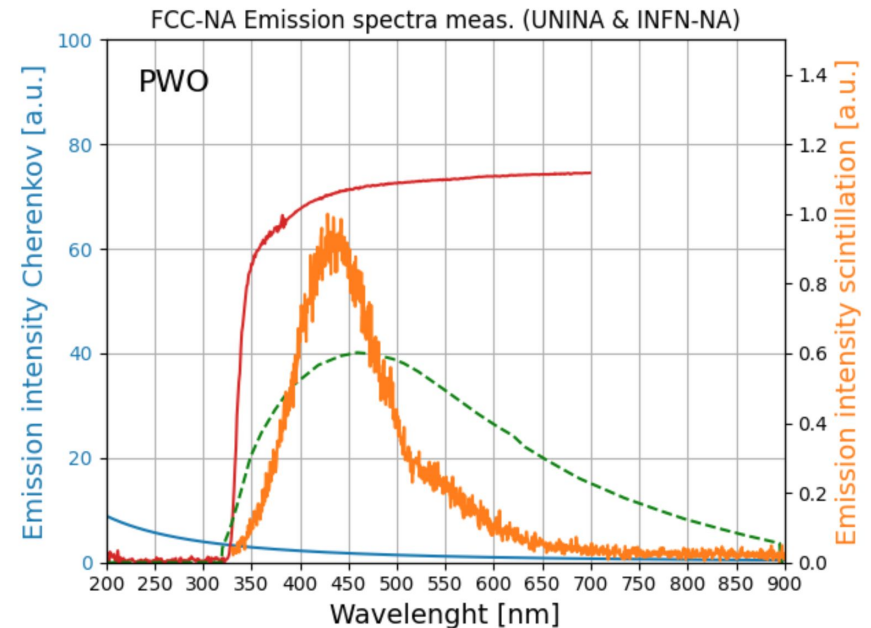
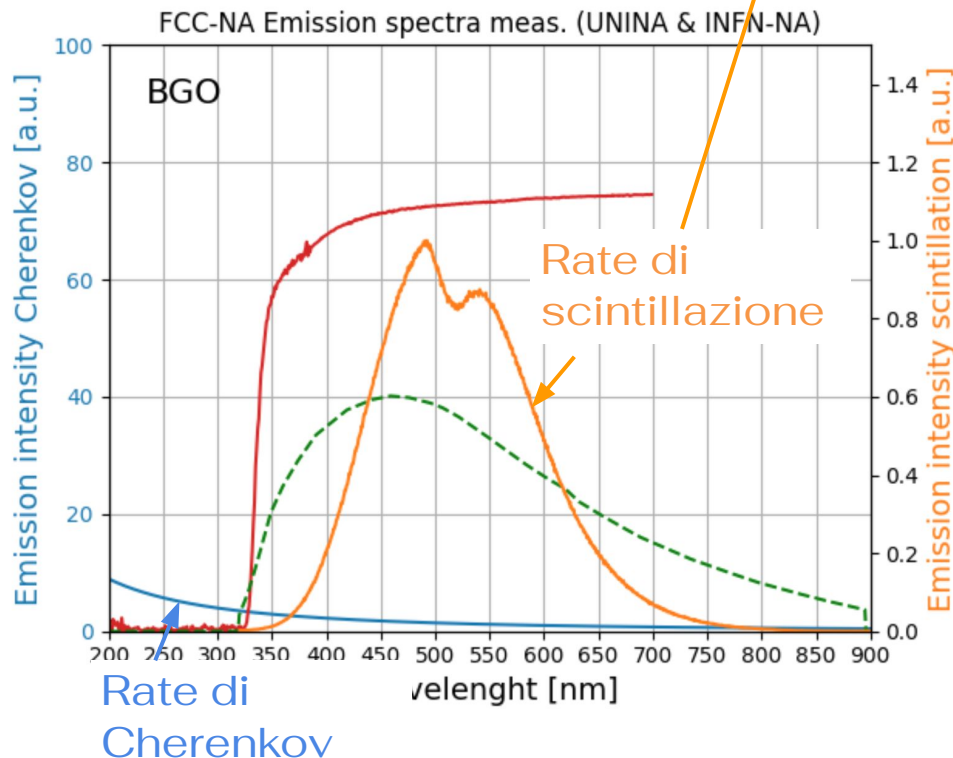
- **Studio MonteCarlo:** ricavato effetto della distribuzione angolare su MPV e σ
 - il valore migliore “vero” da inserire verrà da una calibrazione delle quantità osservate.
 - L’eventuale shift dovuto ad effetti geometrici (eventi caso B, C, D) è piccolo e può essere “retrofittato”

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:

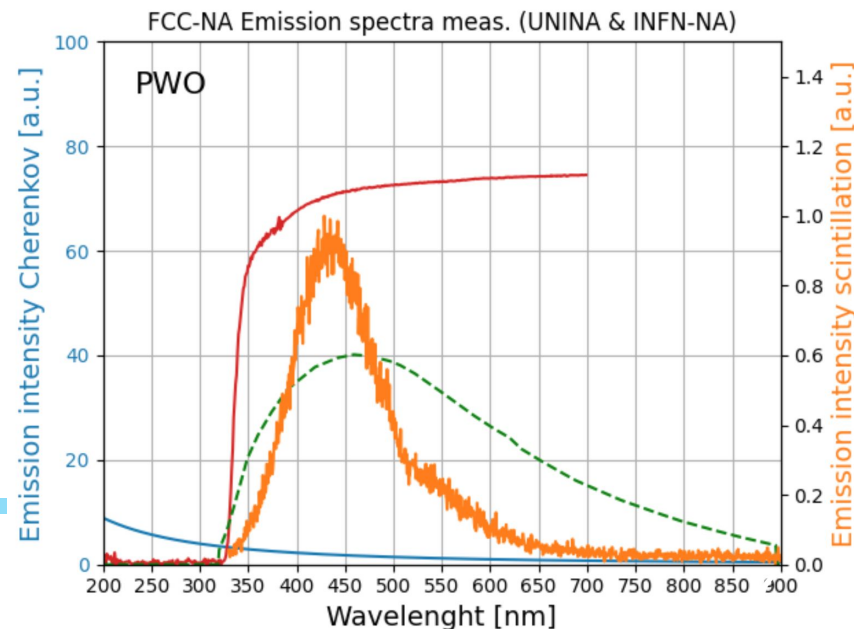
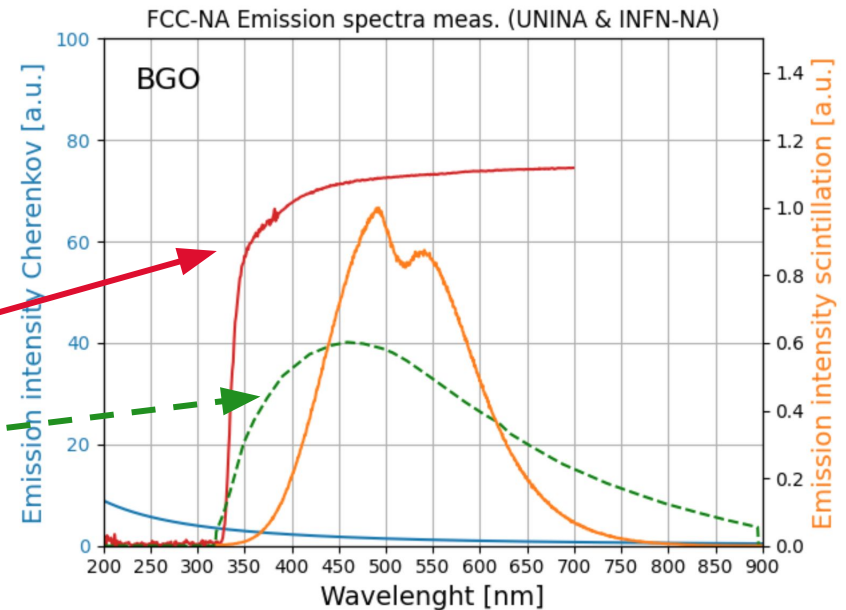
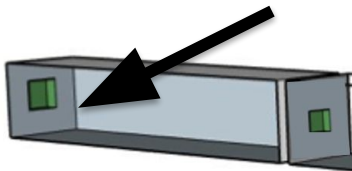
Sono funzioni della lunghezza d'onda:

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

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 ε_S oppure ε_C , generando la lunghezza d'onda un numero grande di volte K , e calcolando:

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

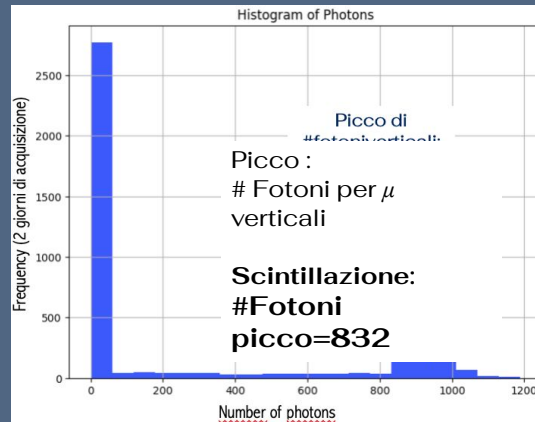
Fase 3: il numero di fotoni rivelato n_S o n_C è a questo punto

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

Numero di fotoni attesi

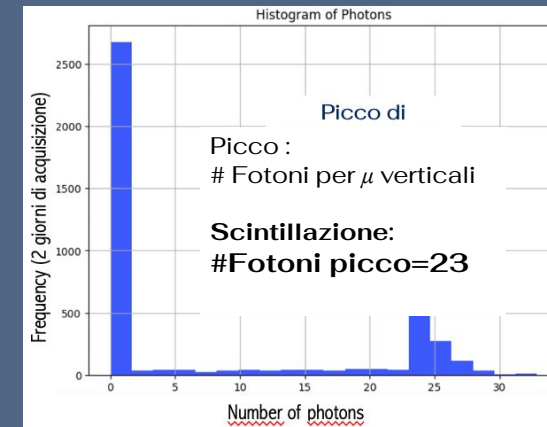
BGO

Accettanza
geometrica:

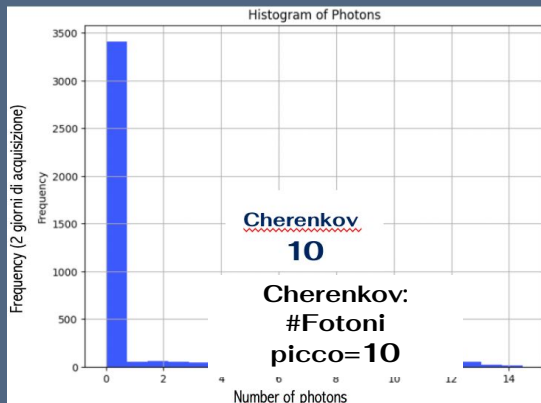


PWO

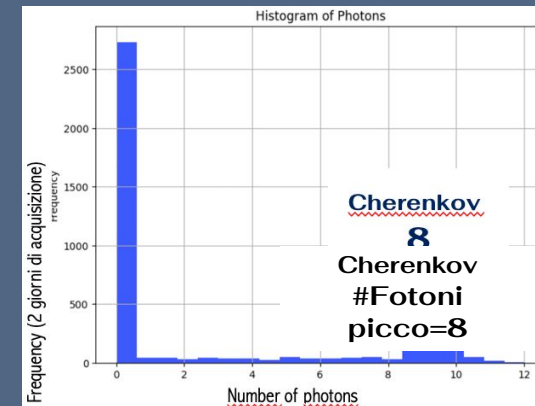
Accettanza
geometrica:



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

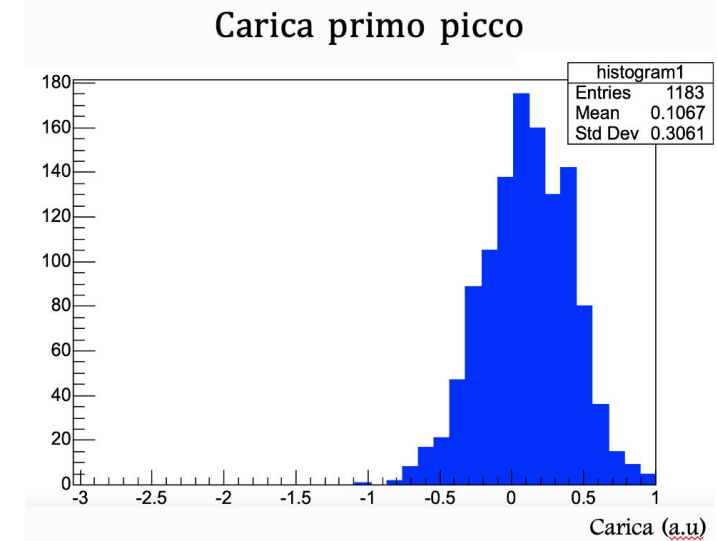
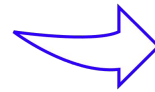
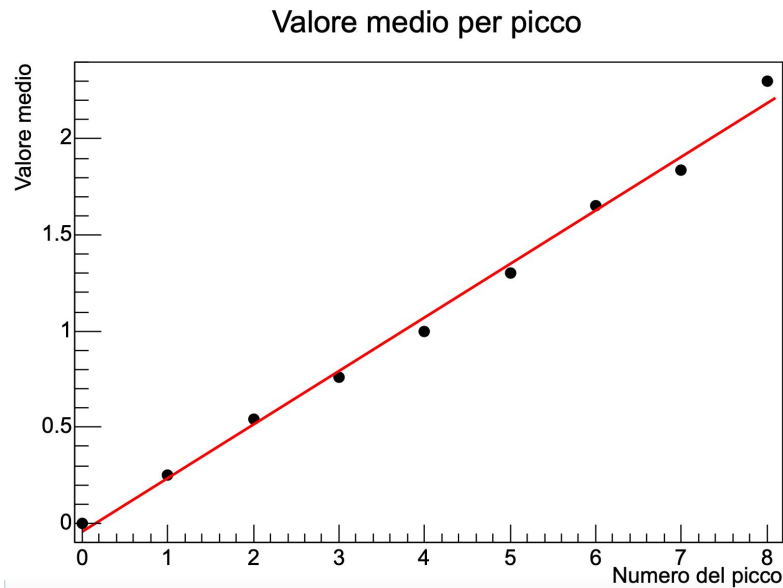


Simulata: $35.8 \pm 0.9 \%$
Osservata: 34.4 %



Numero di fotoni di scintillazione attesi >> 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

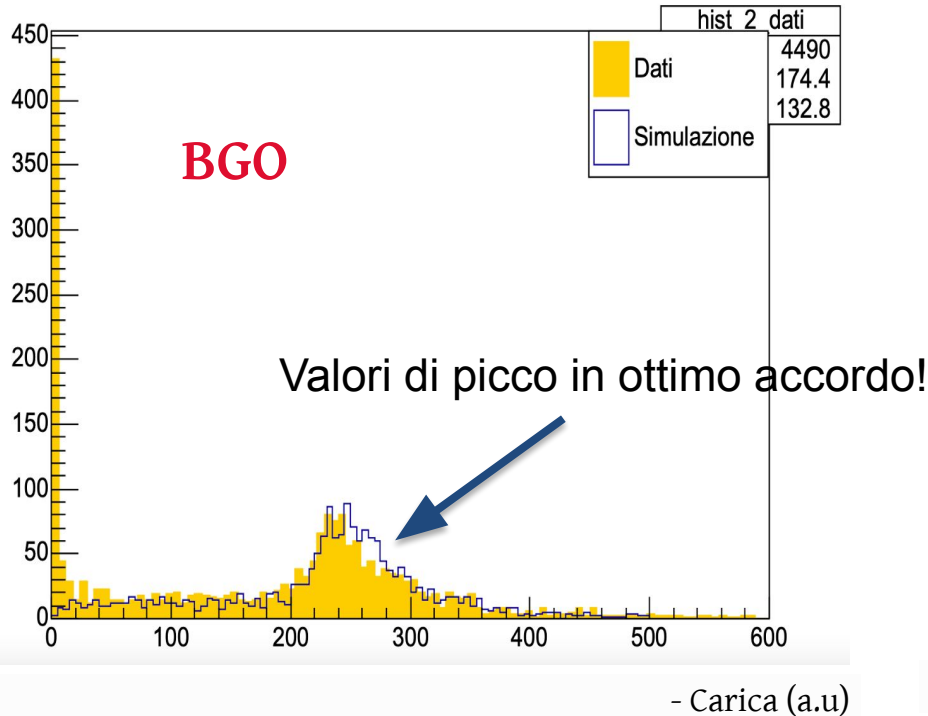
Ottenuto il **fattore di conversione** attraverso il Fit sui valori medi della carica per picco:

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

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

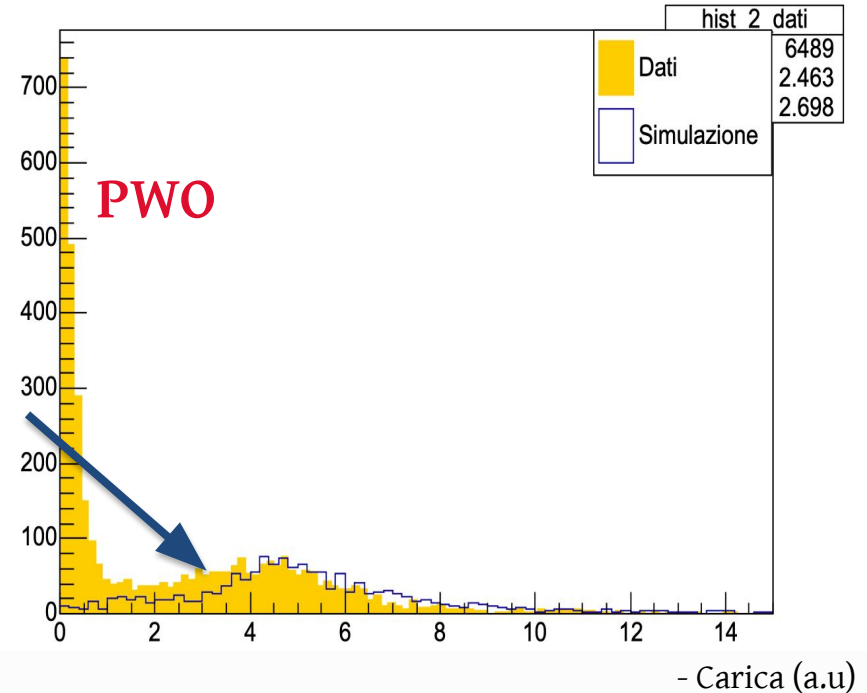
Confronto dati - simulazione BGO



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.)

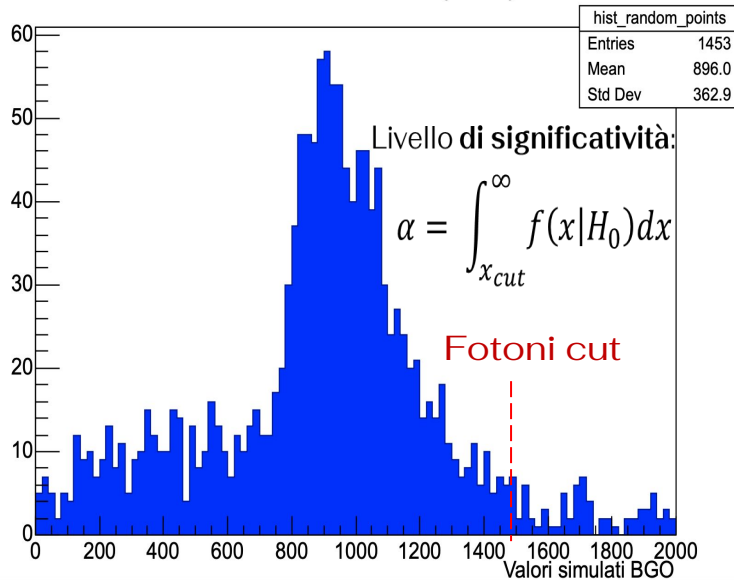
Nota: il picco a zero non è stato ancora considerato - c'è solo rumore intorno allo zero e non lo abbiamo modellizzato. Il numero totale però è corretto **perché è legato all'efficienza geometrica.**

Confronto con Cherenkov

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

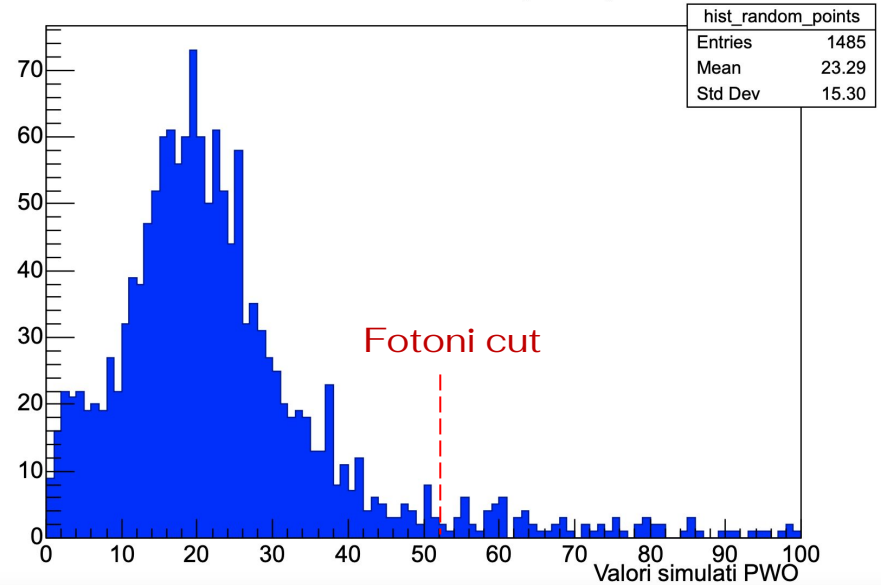
H_0 Ipotesi di solo S
 H_1 Ipotesi S + C

Distribuzione Fotoni (BGO)



Fotoni_{Cut} = 1540

Distribuzione Fotoni (PWO)



Fotoni_{Cut} = 52

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

Fotoni_{Necessari} = 610.

Fotoni_{Necessari} = 34

Fotoni_{Cut} - Fotoni_{medio, scintillazione} >> Fotoni_{Ch 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:



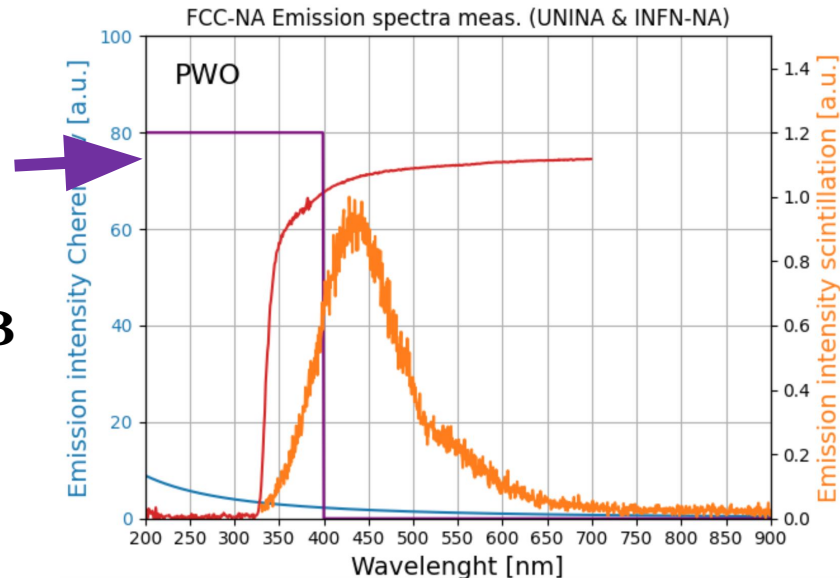
$$\text{Fotoni Attesi}_{\text{BGO}} = 2$$

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

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 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 _{Scintillazione}	Eff _{Cherenkov}	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 _{Scintillazione}	Eff _{Cherenkov}	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 e prossimi passi

Uso *soli 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

Piano short term:

- 1) **Misurare coi filtri** per vedere se il numero torna
- 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) Aumentare il **numero totale di fotoni** rivelati (per entrambi i segnali) di modo da aumentare la significatività

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

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

Codice:

- Aggiunto codice su branch NASetup_PY di FCCNAFW:

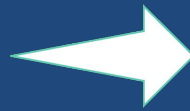
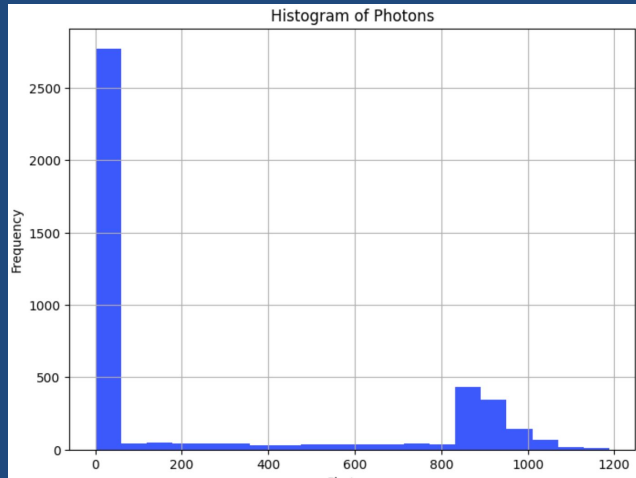
https://github.com/FCCNA/fcc-hardware/tree/NASetup_PY

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

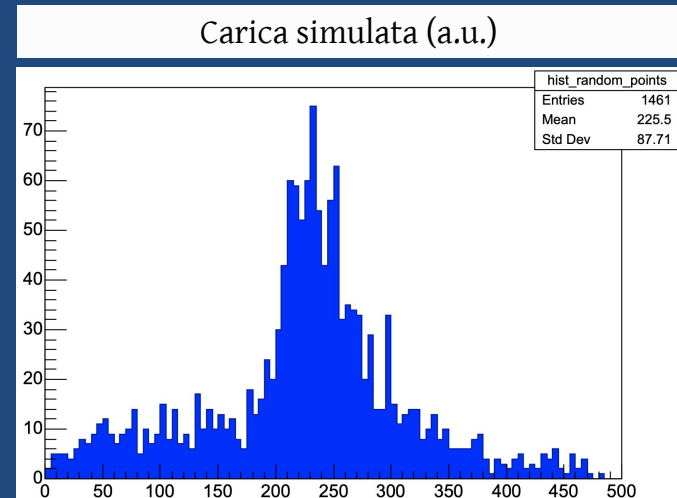
Backup

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

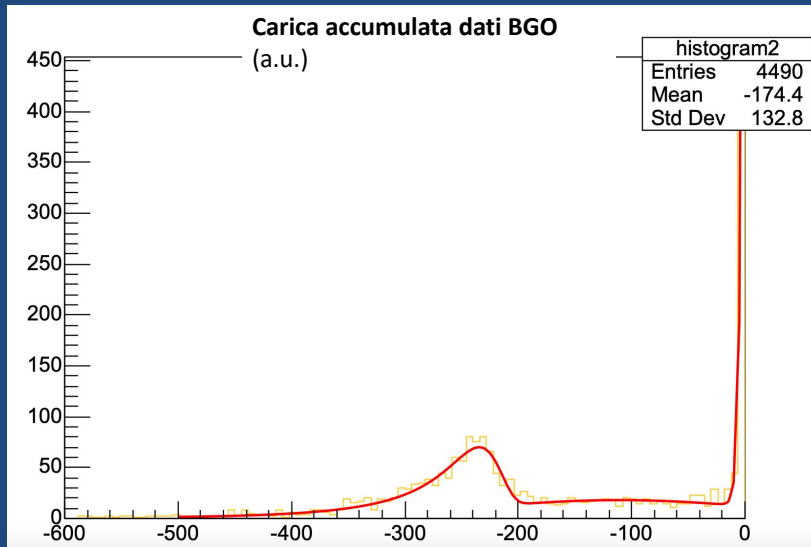
Perdita **media** di energia (processi di natura
stocastica)

Per spessori sottili non vale il
Teorema del Limite centrale

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

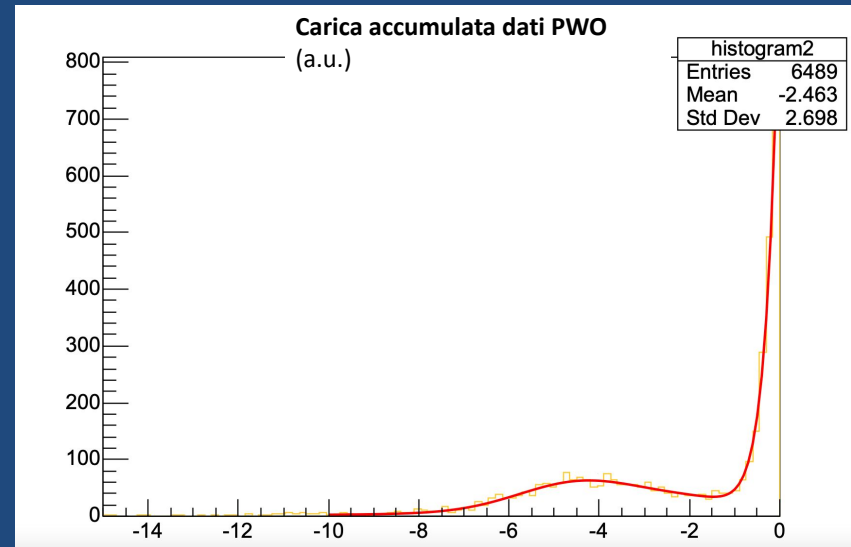
$$\begin{aligned} \text{Energia} &= l \cdot q \cdot E_{MIP} \\ N_{\text{Fotoni}} &= \text{Energia} \cdot LY \end{aligned}$$

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:

$$z = 1$$

$$\beta = 0.99$$

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

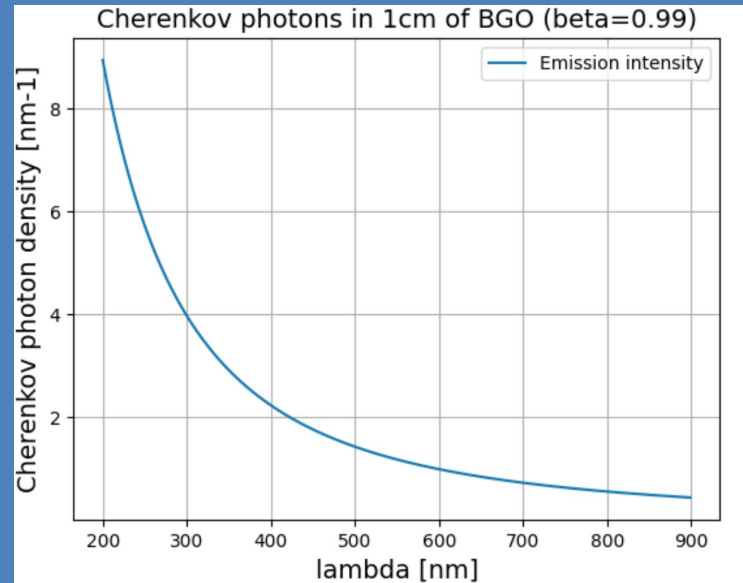
$$n_{\text{PWO}} = 2.16$$

Ottenendo:

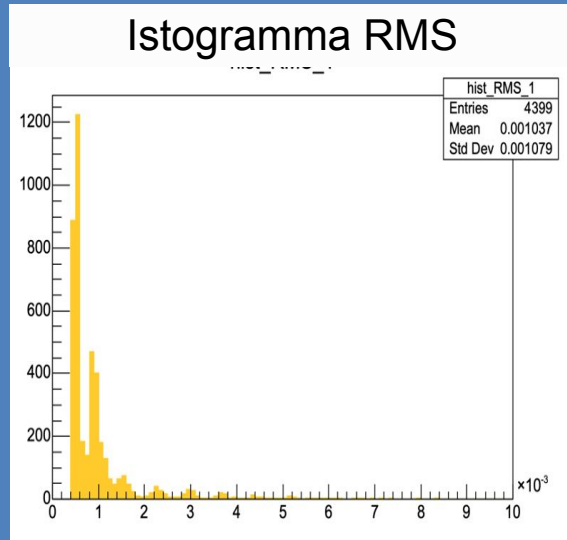
$$\bullet \text{ } ly_{\text{BGO}} = 1389.51$$

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

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

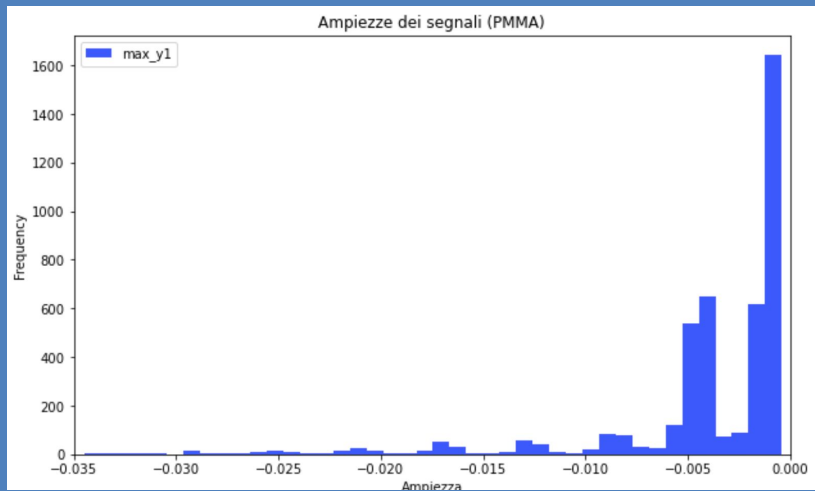
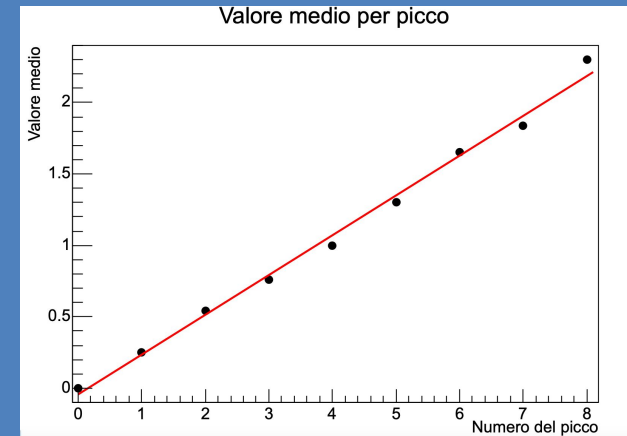


Calibrazione della risposta al singolo fotone



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

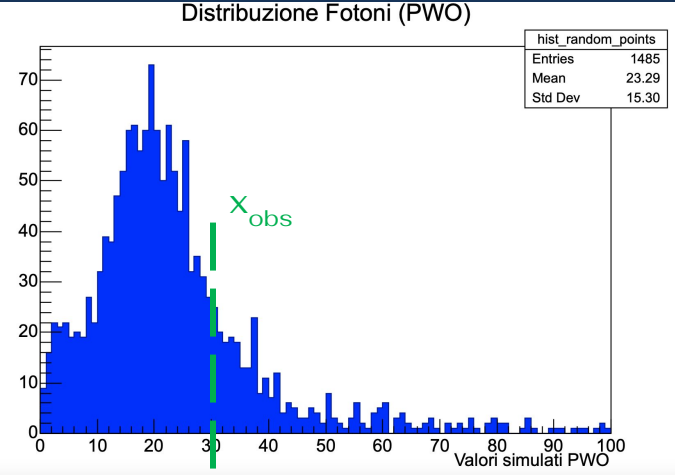
Come otteniamo z ?

Calcoliamo il p-value:

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


$x_{obs} = \text{mean}_{\text{Scintillazione}} + \text{mean}_{\text{fondo}}$

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	0.9726	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							



Es:
 $\text{mean}_{\text{Scintillazione}} = 23$

$\text{mean}_{\text{Cherenkov}} = 8$

$x_{obs} = 30$

Ricaviamo la **significatività statistica z**

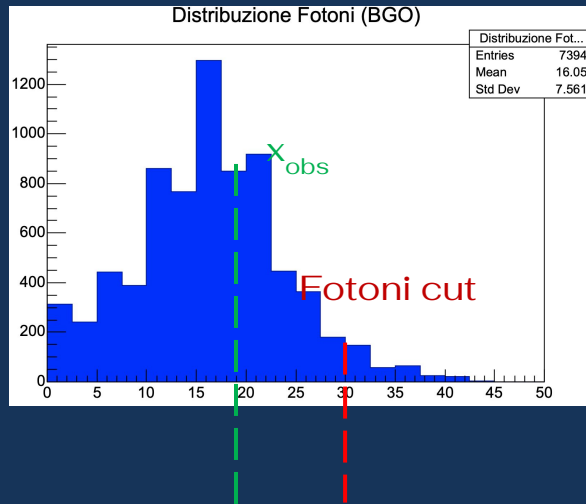


corrisponde al numero di deviazioni standard di una **distribuzione normale** per cui la coda corrispondente ha la stessa probabilità del p-value del fondo.

Test d'ipotesi: significance Filtri

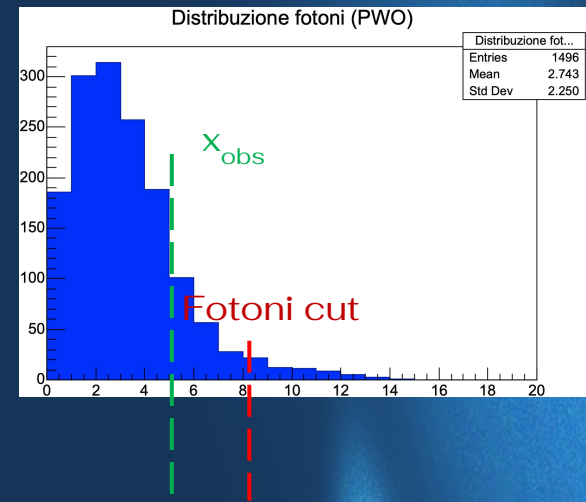
$\lambda = 400 \text{ nm}$

BGO



$Z = 0.23$

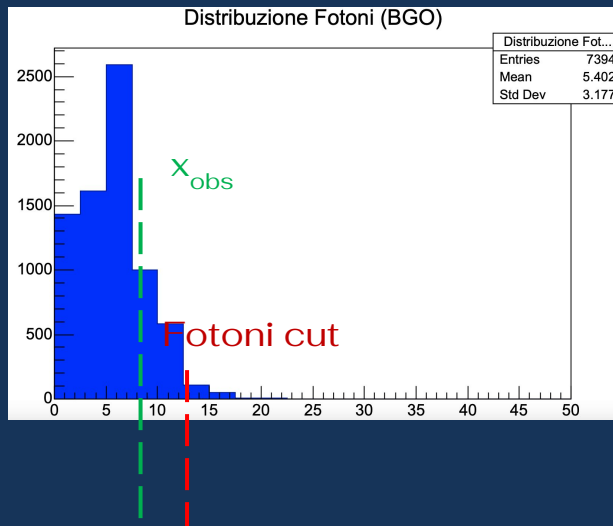
PWO



$Z = 0.59$

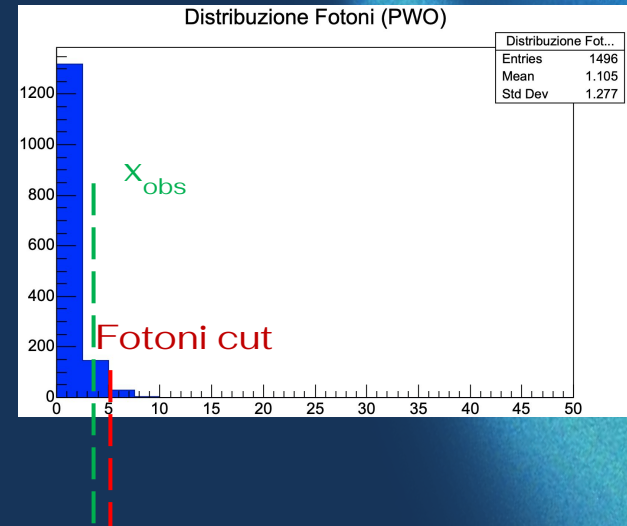
$\lambda = 380 \text{ nm}$

Distribuzione Fotoni (BGO)



$Z \approx 0$

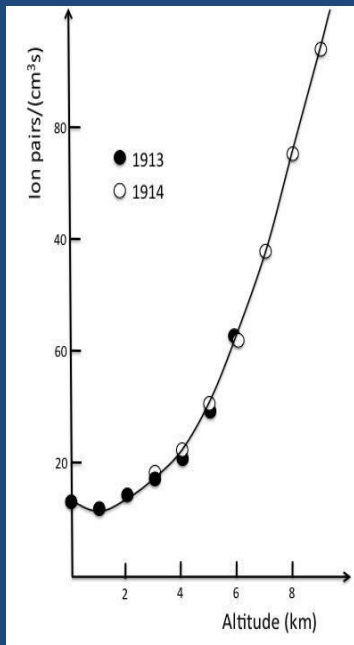
Distribuzione Fotoni (PWO)



$Z = 1.23$

Raggi Cosmici

Particelle energetiche provenienti dal cosmo
Rate: 1 particella/cm²s



Hess 1936:
aumento della
ionizzazione con
l'altitudine

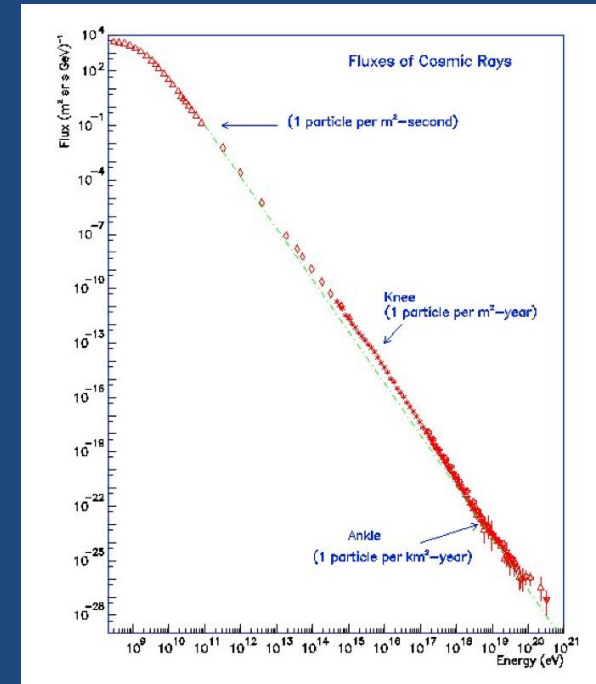
RAGGI PRIMARI

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 10¹⁸-10¹⁹ 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.

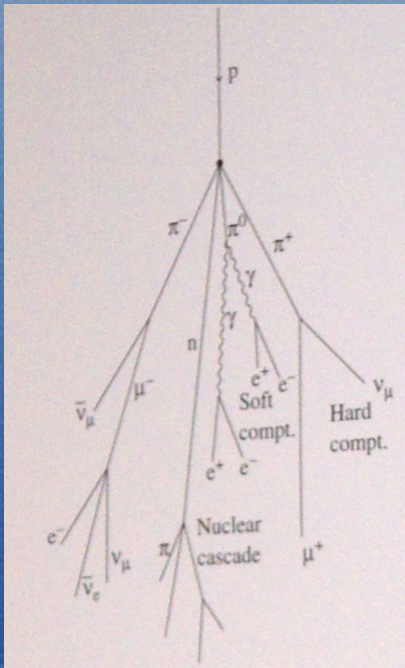
Distribuzione angolare rispetto alla normale alla superficie della Terra in funzione della latitudine:

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

Naturalmente la distribuzione della longitudine è uniforme:

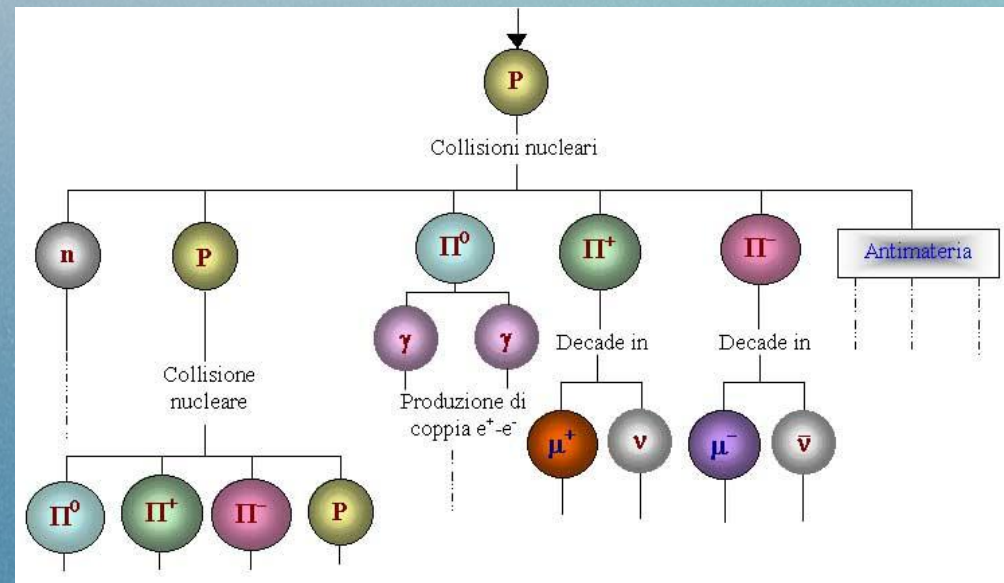
$$f(\phi) = (2\pi)^{-1}$$

MUONI



Massa = 105.7
MeV/c²

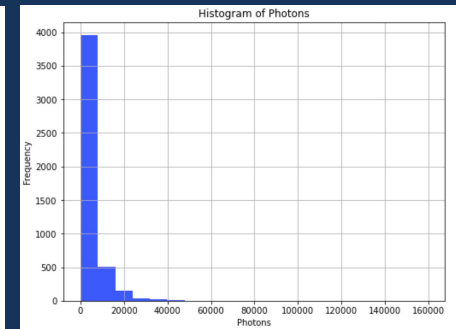
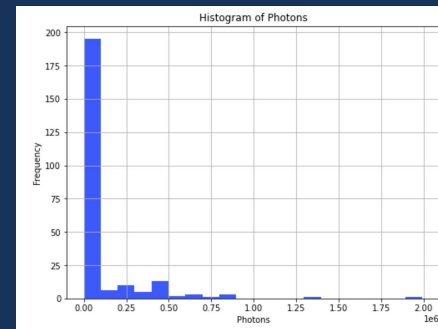
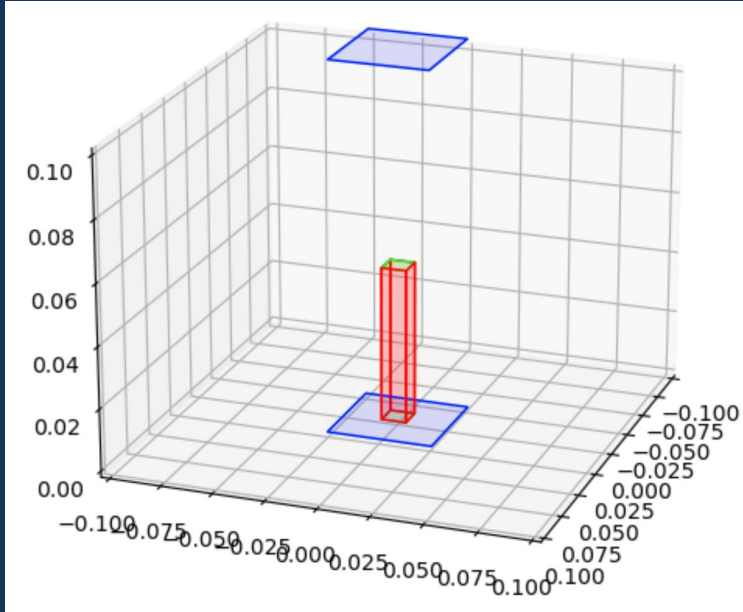
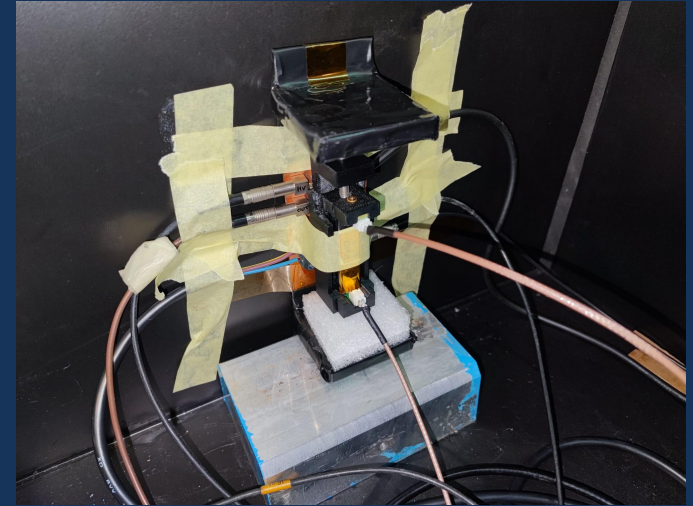
Vita media = 2.2
μs



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

Cristallo in verticale

Distanza trigger = 12 cm $\Rightarrow$ Rate basso

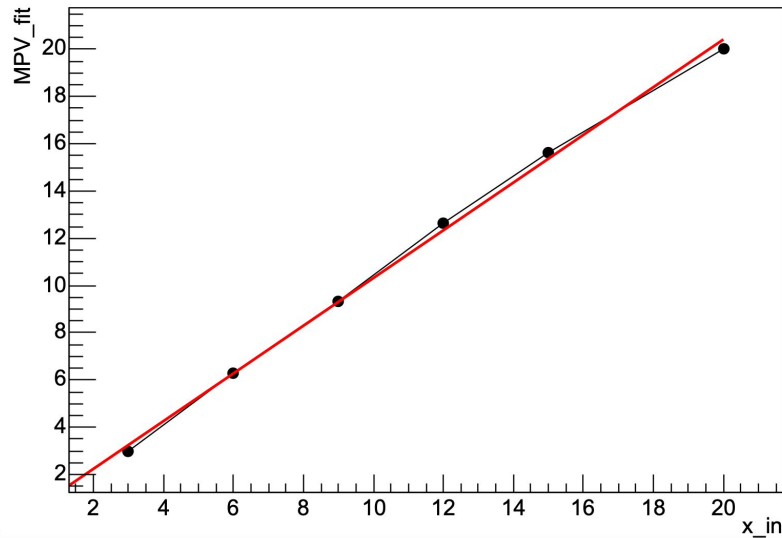


$\rightarrow$ **BGO**: #fotoni più probabile = 398527*
 $\rightarrow$ **PWO**: #fotoni più probabile = 7982*

*No efficienze

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

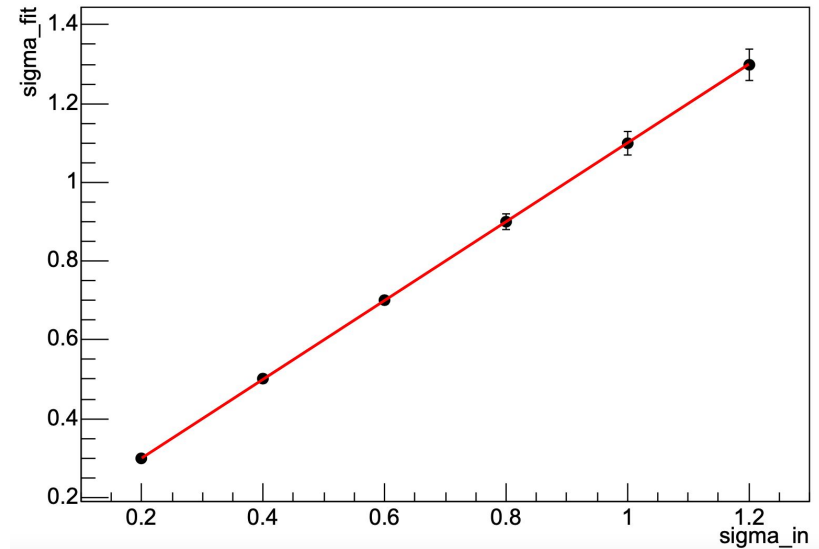
Calibrazione MPV ch2



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

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 $\sigma_{in} = 0.5$