

# Caratterizzazione di un rivelatore gamma $4\pi$ per lo studio della reazione $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$

*Relatrice: Francesca Cavanna*

Paolo Pusterla

Università degli Studi di Torino

Novembre 2024



- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Caratterizzazione
- 5 Simulazioni
- 6 Conclusion

# Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Caratterizzazione
- 5 Simulazioni
- 6 Conclusion

- L'esperimento LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) ricrea i processi nucleari che sono avvenuti durante la nucleosintesi primordiale e che avvengono tutt'ora nelle stelle.

- L'esperimento LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) ricrea i processi nucleari che sono avvenuti durante la nucleosintesi primordiale e che avvengono tutt'ora nelle stelle.
- Essendo processi molto rari, un laboratorio sulla superficie terrestre non è adatto per le misure sperimentali di questi, poiché i raggi cosmici maschererebbero il segnale debole atteso.

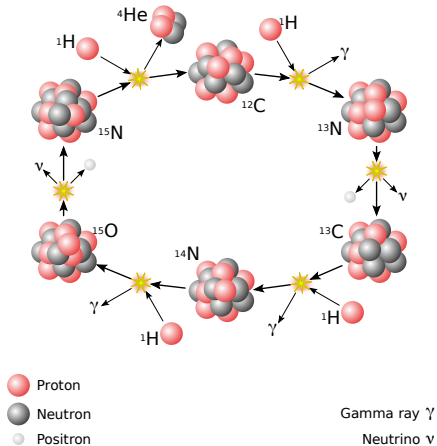
- I neutrini solari giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della composizione del Sole.

- I neutrini solari giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della composizione del Sole.
- Sono prodotti nel ciclo CNO del Sole.

- I neutrini solari giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della composizione del Sole.
- Sono prodotti nel ciclo CNO del Sole.
- In particolare, la sezione d'urto della reazione  $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$  è la fonte di errore principale sulle stime del flusso di neutrini.



# Il ciclo CNO



**Figure:** Ciclo Carbonio-Azoto-Ossigeno

- A energie solari (15-50 keV) la sezione d'urto è troppo piccola per essere misurata direttamente.

- A energie solari (15-50 keV) la sezione d'urto è troppo piccola per essere misurata direttamente.
- Le stime odierne sono quindi estrapolazioni da energie più alte.

- A energie solari (15-50 keV) la sezione d'urto è troppo piccola per essere misurata direttamente.
- Le stime odierne sono quindi estrapolazioni da energie più alte.
- Il progetto ha come obiettivo determinare la sezione d'urto ad energie 50-370 keV.

- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.

- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.
- La si può calcolare sperimentalmente come:

$$\sigma = \frac{N_{\text{reaz}} / \Delta t}{N_{\text{proj}} / \Delta t \times N_{\text{bers}} / A \times \varepsilon} \quad (1)$$

- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.
- La si può calcolare sperimentalmente come:

$$\sigma = \frac{N_{\text{reaz}}/\Delta t}{N_{\text{proj}}/\Delta t \times N_{\text{bers}}/A \times \varepsilon} \quad (1)$$

- $N_{\text{reaz}}/\Delta t$  è il numero di reazioni per unità di tempo;

# Sfide sperimentali della misura diretta

- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.
- La si può calcolare sperimentalmente come:

$$\sigma = \frac{N_{\text{reaz}}/\Delta t}{N_{\text{proj}}/\Delta t \times N_{\text{bers}}/A \times \varepsilon} \quad (1)$$

- $N_{\text{reaz}}/\Delta t$  è il numero di reazioni per unità di tempo;
- $N_{\text{proj}}/\Delta t \approx 10^{14}$  pps per intensità tipiche di un fascio stabile



# Sfide sperimentali della misura diretta

- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.
- La si può calcolare sperimentalmente come:

$$\sigma = \frac{N_{\text{reaz}}/\Delta t}{N_{\text{proj}}/\Delta t \times N_{\text{bers}}/A \times \varepsilon} \quad (1)$$

- $N_{\text{reaz}}/\Delta t$  è il numero di reazioni per unità di tempo;
- $N_{\text{proj}}/\Delta t \approx 10^{14}$  pps per intensità tipiche di un fascio stabile
- $N_{\text{bers}}/A \approx 10^{19}$  atomi/cm per un tipico bersaglio allo stato solido

# Sfide sperimentali della misura diretta

- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.
- La si può calcolare sperimentalmente come:

$$\sigma = \frac{N_{\text{reaz}}/\Delta t}{N_{\text{proj}}/\Delta t \times N_{\text{bers}}/A \times \varepsilon} \quad (1)$$

- $N_{\text{reaz}}/\Delta t$  è il numero di reazioni per unità di tempo;
- $N_{\text{proj}}/\Delta t \approx 10^{14}$  pps per intensità tipiche di un fascio stabile
- $N_{\text{bers}}/A \approx 10^{19}$  atomi/cm per un tipico bersaglio allo stato solido
- $\sigma \approx 10^{-12}$  barn, spesso è anche più piccola

# Sfide sperimentali della misura diretta

- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.
- La si può calcolare sperimentalmente come:

$$\sigma = \frac{N_{\text{reaz}}/\Delta t}{N_{\text{proj}}/\Delta t \times N_{\text{bers}}/A \times \varepsilon} \quad (1)$$

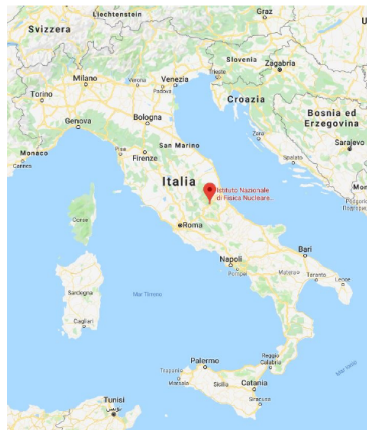
- $N_{\text{reaz}}/\Delta t$  è il numero di reazioni per unità di tempo;
- $N_{\text{proj}}/\Delta t \approx 10^{14}$  pps per intensità tipiche di un fascio stabile
- $N_{\text{bers}}/A \approx 10^{19}$  atomi/cm per un tipico bersaglio allo stato solido
- $\sigma \approx 10^{-12}$  barn, spesso è anche più piccola
- $\varepsilon \approx 1 \div 10\%$  per i raggi gamma

- Il *reaction rate* vale quindi appena  $1 \div 10$  conteggi al giorno

- Il *reaction rate* vale quindi appena  $1 \div 10$  conteggi al giorno
- Basta pochissimo rumore per nascondere i segnali che rivelano le reazioni

- Il *reaction rate* vale quindi appena  $1 \div 10$  conteggi al giorno
- Basta pochissimo rumore per nascondere i segnali che rivelano le reazioni
- La soluzione è cercare di minimizzare il rumore di fondo

- I Laboratori Nazionali del Gran Sasso, situati nella frazione di Assergi, sono schermati dai 1400 m di roccia del Monte Aquila.



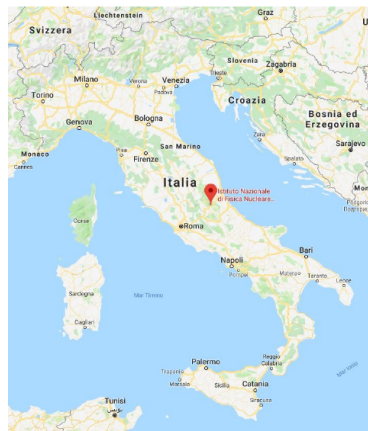
Radiazione      LNGS/superficie

Muoni                       $10^{-6}$

Neutroni                       $10^{-3}$

Figure: LNGS, Assergi, AQ.

- I Laboratori Nazionali del Gran Sasso, situati nella frazione di Assergi, sono schermati dai 1400 m di roccia del Monte Aquila.
- Ciò fa sì che il fondo di raggi cosmici sia fortemente soppresso



Radiazione LNGS/superficie

Muoni  $10^{-6}$

Neutroni  $10^{-3}$

Figure: LNGS, Assergi, AQ.



- I Laboratori Nazionali del Gran Sasso, situati nella frazione di Assergi, sono schermati dai 1400 m di roccia del Monte Aquila.
- Ciò fa sì che il fondo di raggi cosmici sia fortemente soppresso
- Qui è collocato l'acceleratore LUNA2 a 400 kV, in attività dal 2001, che permette di concentrare fasci ionici molto intensi e stabili.



Radiazione	LNGS/superficie
Muoni	$10^{-6}$
Neutroni	$10^{-3}$

Figure: LNGS, Assergi, AQ.

# L'acceleratore

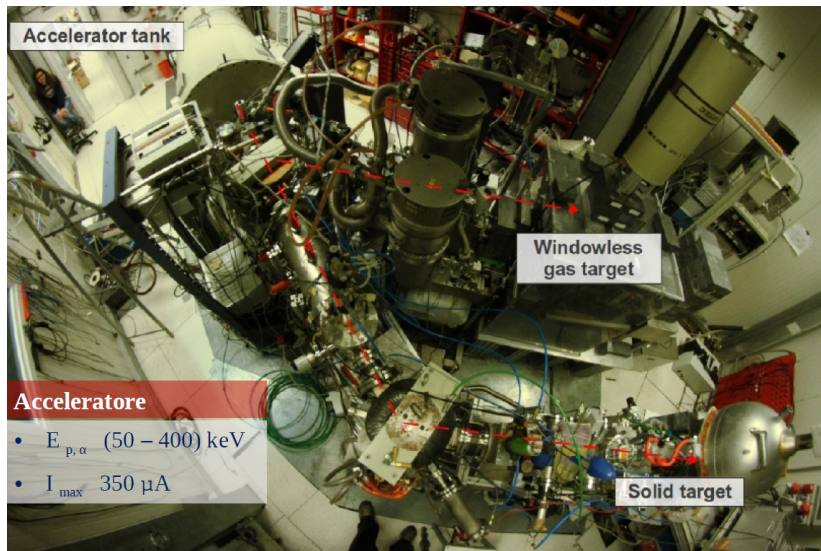
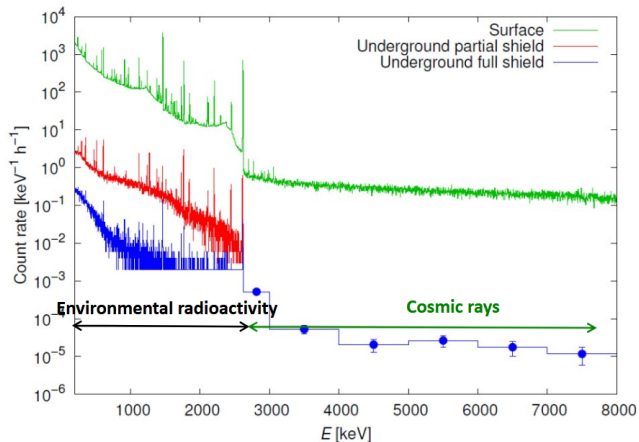


Figure: L'acceleratore LUNA2 a 400 kV.



**Figure:** Grafico riportante il rumore di fondo in superficie, sotto una schermatura parziale sottoterra e sotto una schermatura totale sottoterra.

# Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi**
- 3 Il rivelatore
- 4 Caratterizzazione
- 5 Simulazioni
- 6 Conclusion

- L'obiettivo della tesi è quello di caratterizzare in efficienza lo scintillatore  $4\pi$  utilizzato per la rivelazione di raggi  $\gamma$  nella riproduzione della reazione  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ .

- L'obiettivo della tesi è quello di caratterizzare in efficienza lo scintillatore  $4\pi$  utilizzato per la rivelazione di raggi  $\gamma$  nella riproduzione della reazione  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ .
- Nell'esperimento si proietta un intenso fascio di protoni su bersagli solidi di TiN (nitruro di titanio).

- L'obiettivo della tesi è quello di caratterizzare in efficienza lo scintillatore  $4\pi$  utilizzato per la rivelazione di raggi  $\gamma$  nella riproduzione della reazione  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ .
- Nell'esperimento si proietta un intenso fascio di protoni su bersagli solidi di TiN (nitruro di titanio).
- L'analisi dei dati viene confrontata con delle simulazioni in GEANT4.

# Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore**
- 4 Caratterizzazione
- 5 Simulazioni
- 6 Conclusion



- Si tratta di un rivelatore in germanato di bismuto ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , detto BGO), coprente il 95% dell'angolo solido totale attorno al bersaglio.

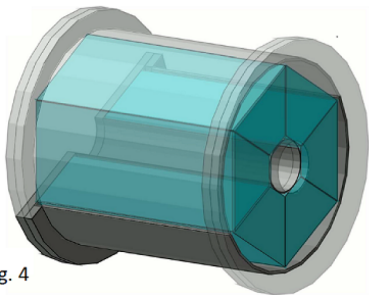
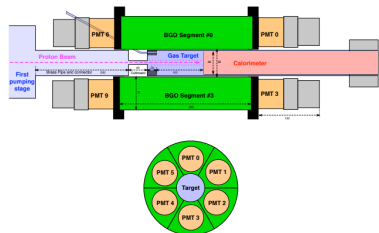


Fig. 4

**Figure:** Rappresentazione 3D del rivelatore BGO.

- Il cristallo, a simmetria cilindrica, è otticamente separato in 6 spicchi uguali.



**Figure:** Rappresentazione schematica del rivelatore BGO. In alto una sezione sagittale, in basso una sezione trasversale.

- Nel caso dei nostri istogrammi, composti da un picco gaussiano centrato su un'energia caratteristica e un fondo di *bremsstrahlung*, l'efficienza si può stimare nel modo seguente:

$$\varepsilon = \frac{N_{cont.}}{A(t^*)\Delta t} \quad (2)$$

- Nel caso dei nostri istogrammi, composti da un picco gaussiano centrato su un'energia caratteristica e un fondo di *bremsstrahlung*, l'efficienza si può stimare nel modo seguente:

$$\varepsilon = \frac{N_{cont.}}{A(t*)\Delta t} \quad (2)$$

dove  $N_{cont.}$  è il numero di conteggi del picco gaussiano sottraendone il fondo,  $A(t*)$  è l'attività calcolata al momento della misura,  $\Delta t$  è il tempo "vivo" dello strumento.

- Ogni strumento è elettronicamente vincolato a processare il segnale in ingresso
- Questo può richiedere fino a ns
- Un fotone in arrivo durante questo intervallo di tempo non può essere quindi rilevato
- Alla fine della misura verranno osservati meno fotoni di quelli effettivamente giunti allo strumento, perché quest'ultimo è attivo solo per una parte di tempo rispetto al totale della misura.
- L'intervallo in cui lo strumento è attivo e pronto a ricevere nuovi segnali è il *tempo vivo*.

# Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Caratterizzazione**
- 5 Simulazioni
- 6 Conclusion

- Il  $^{60}\text{Co}$  decade tramite decadimento  $\beta^-$  (99.75%) in  $^{60}\text{Ni}$  ed emette due raggi gamma di energie 1.17 MeV e 1.33 MeV.

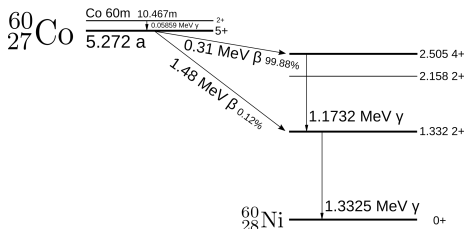


Figure: Schema di decadimento del  $^{137}\text{Cs}$ .

- Il  $^{60}\text{Co}$  decade tramite decadimento  $\beta^-$  (99.75%) in  $^{60}\text{Ni}$  ed emette due raggi gamma di energie 1.17 MeV e 1.33 MeV.
- Ha il vantaggio di emettere raggi gamma ad alta intensità con un'emivita relativamente lunga di 5.27 anni.

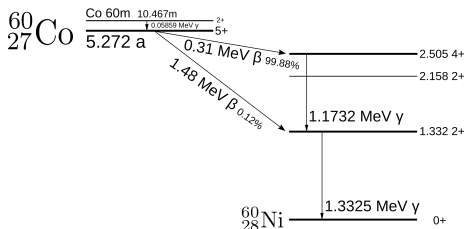


Figure: Schema di decadimento del  $^{137}\text{Cs}$ .



- Il  $^{60}\text{Co}$  decade tramite decadimento  $\beta^-$  (99.75%) in  $^{60}\text{Ni}$  ed emette due raggi gamma di energie 1.17 MeV e 1.33 MeV.
- Ha il vantaggio di emettere raggi gamma ad alta intensità con un'emivita relativamente lunga di 5.27 anni.
- Trova applicazione nella radioterapia del cancro.

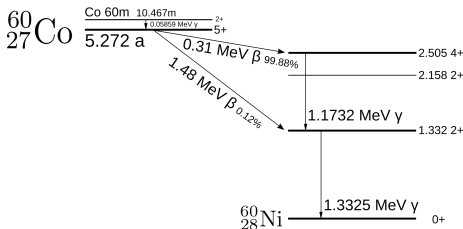


Figure: Schema di decadimento del  $^{137}\text{Cs}$ .

- Il  $^{137}\text{Cs}$  decade sempre tramite decadimento  $\beta^-$ .

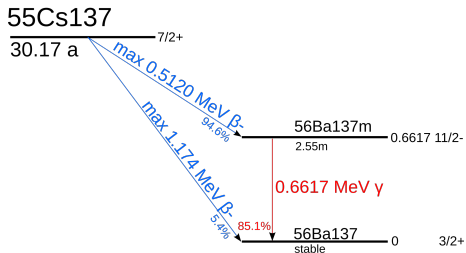


Figure: Schema di decadimento del  $^{137}\text{Cs}$ .

- Il  $^{137}\text{Cs}$  decade sempre tramite decadimento  $\beta^-$ .
- Il 94.6% dei decadimenti hanno come prodotto uno stato metastabile del  $^{137}\text{Ba}$ .

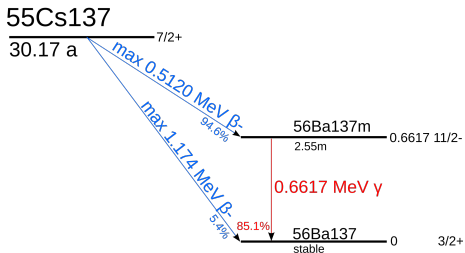


Figure: Schema di decadimento del  $^{137}\text{Cs}$ .

- Il  $^{137}\text{Cs}$  decade sempre tramite decadimento  $\beta^-$ .
- Il 94.6% dei decadimenti hanno come prodotto uno stato metastabile del  $^{137}\text{Ba}$ .
- Questo stato eccitato emette l'85% delle volte raggi gamma di 661.7 keV decadendo nello stato fondamentale del  $^{137}\text{Ba}$  (tutti i raggi gamma provenienti dal  $^{137}\text{Cs}$  sono prodotti così).

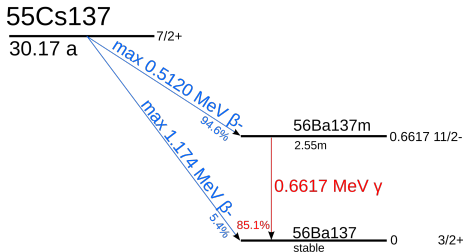
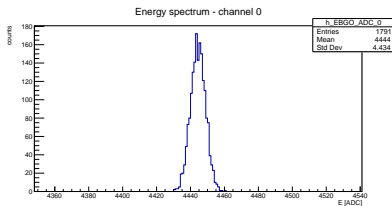
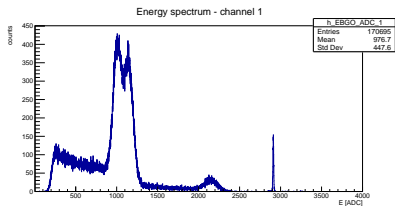
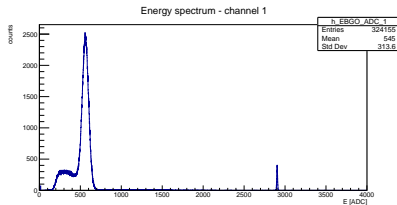
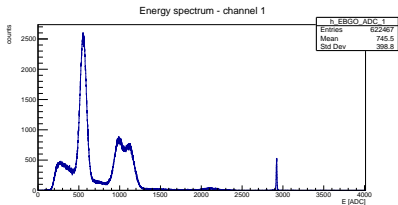


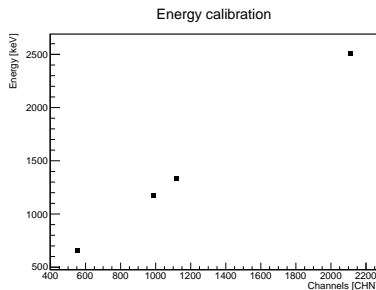
Figure: Schema di decadimento del  $^{137}\text{Cs}$ .

# Istogrammi

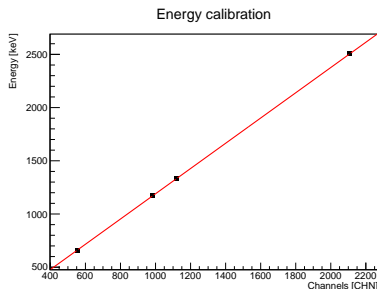


- I valori dei picchi vengono graficati contro quelli in energia caratteristici, noti.

- I valori dei picchi vengono graficati contro quelli in energia caratteristici, noti.



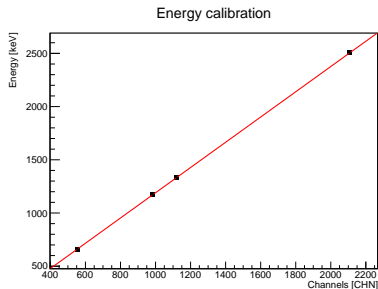
- I valori dei picchi vengono graficati contro quelli in energia caratteristici, noti.
- Si effettua dunque un fit lineare per i punti di ciascun istogramma.





# Calcolo della calibrazione

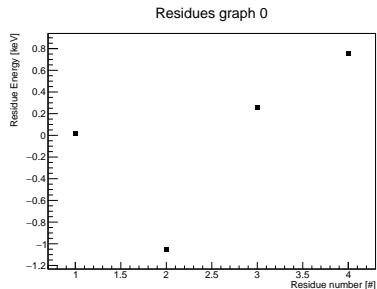
- I valori dei picchi vengono graficati contro quelli in energia caratteristici, noti.
- Si effettua dunque un fit lineare per i punti di ciascun istogramma.
- I coefficienti angolari di questi fit sono i fattori di conversione cercati.



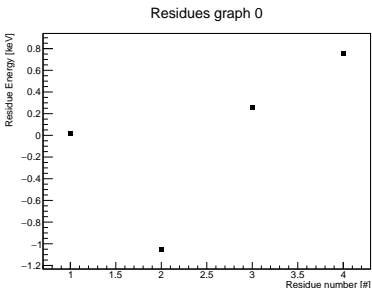
Canale	Conversione [keV/CHN]
CHN1	$1.1863 \pm 0.0009$
CHN2	$1.1659 \pm 0.0013$
CHN3	$1.3550 \pm 0.0019$
CHN4	$1.2676 \pm 0.0006$
CHN5	$1.2574 \pm 0.0010$
CHN6	$1.1388 \pm 0.0014$

- I residui sono la differenza tra i valori in energia noti e quelli assunti dalla retta

- I residui sono la differenza tra i valori in energia noti e quelli assunti dalla retta
- Sono una rappresentazione della bontà della calibrazione



- I residui sono la differenza tra i valori in energia noti e quelli assunti dalla retta
- Sono una rappresentazione della bontà della calibrazione
- In generale una calibrazione è buona se i residui non superano la decina di keV



- Per il calcolo dell'efficienza è necessario trovare il numero di conteggi nei picchi gaussiani. Si possono applicare due metodi diversi per trovarlo:
-

- Per il calcolo dell'efficienza è necessario trovare il numero di conteggi nei picchi gaussiani. Si possono applicare due metodi diversi per trovarlo:
- 

## *Trapezio*

- Metodo geometrico
- Consiste nell'isolare la regione del picco e rimuoverne il fondo trapezoidale
- Adatto solo per il cesio: i due picchi del cobalto non sono sufficientemente risolti dallo strumento

- Per il calcolo dell'efficienza è necessario trovare il numero di conteggi nei picchi gaussiani. Si possono applicare due metodi diversi per trovarlo:
- 

## *Trapezio*

- Metodo geometrico
- Consiste nell'isolare la regione del picco e rimuoverne il fondo trapezoidale
- Adatto solo per il cesio: i due picchi del cobalto non sono sufficientemente risolti dallo strumento

## *Parametrico*

- Metodo che sfrutta i parametri del fit
- Il coefficiente di normalizzazione del picco gaussiano è il numero di conteggi nel picco
- Adatto per cesio e cobalto



## Energy spectrum - channel 5

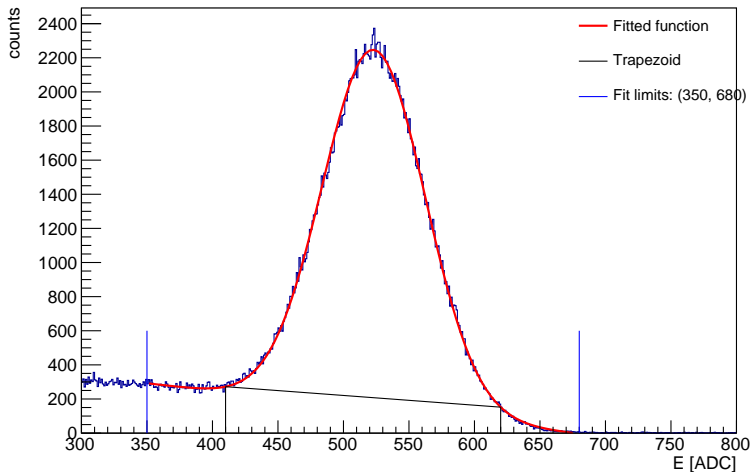
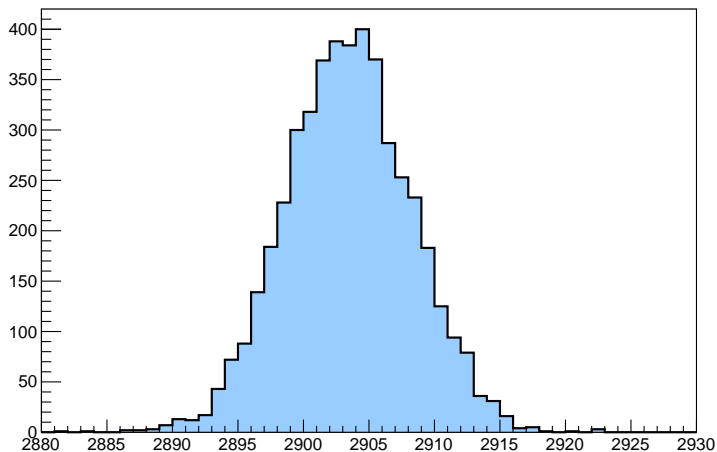


Figure: Visualizzazione del metodo del trapezio.

- L'attività viene calcolata al momento della presa dati, in data 03/04/2024
- Il tempo vivo è ricavato dal TTree delle coincidenze, ossia dove lo spicchio del BGO registra i fotoni del pulser nello spettro dei canali

EnergyADC/h\_EBGO\_ADC\_1 coinc



# Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Caratterizzazione
- 5 Simulazioni**
- 6 Conclusion

# Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Caratterizzazione
- 5 Simulazioni
- 6 Conclusion**

- COME RAPPRESENTARE I RISULTATI????????????

**Grazie per l'attenzione.**