

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

Relatori: Francesca Cavanna, Ranjan Sariyal

Paolo Pusterla

Università degli Studi di Torino

Novembre 2024



- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Calibrazione in energia
- 5 Efficienza
- 6 Simulazioni
- 7 Conclusion

Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Calibrazione in energia
- 5 Efficienza
- 6 Simulazioni
- 7 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.

Proposta dell'esperimento

- 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, in quanto la più breve dell'intero ciclo.

- 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, in quanto la più breve dell'intero ciclo.
- A energie solari (15-50 keV) la sezione d'urto è troppo piccola per essere misurata direttamente.

Proposta dell'esperimento

- 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, in quanto la più breve dell'intero ciclo.
- A energie solari (15-50 keV) la sezione d'urto è troppo piccola per essere misurata direttamente.
- Il progetto ha come obiettivo determinare la sezione d'urto ad energie 50-370 keV.

Il ciclo CNO

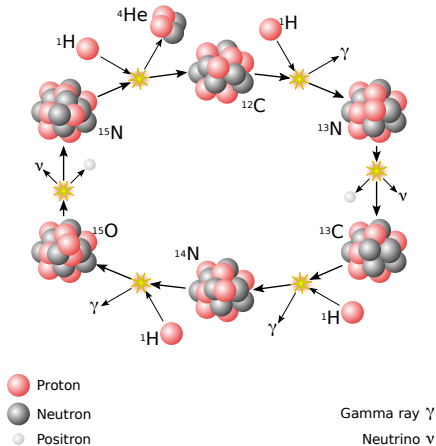


Figure: Ciclo Carbonio-Azoto-Ossigeno

- 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;

- 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

- 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:

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

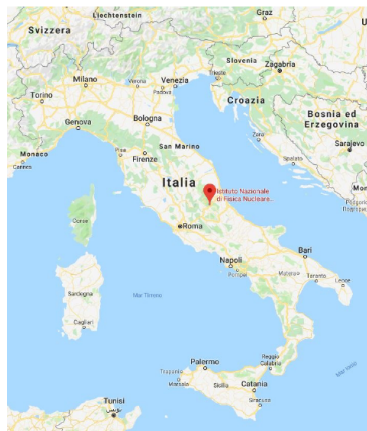
- $N_{\text{reaz}}/\Delta t$ è il numero di reazioni per unità di tempo;
- $N_{\text{proj}}/\Delta t \approx 10^{14}$ pps per intensità tipiche di un fascio stabile
- $N_{\text{bers}}/A \approx 10^{19}$ atomi/cm per un tipico bersaglio allo stato solido
- $\sigma \approx 10^{-12}$ barn, spesso è anche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

- Il *reaction rate* ($N_{\text{reaz}}/\Delta t$) vale quindi appena $1 \div 10$ conteggi al giorno

- Il *reaction rate* ($N_{\text{reaz}}/\Delta t$) vale quindi appena $1 \div 10$ conteggi al giorno
- Basta pochissimo rumore per nascondere i segnali che rivelano le reazioni

- Il *reaction rate* ($N_{\text{reaz}}/\Delta t$) 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.



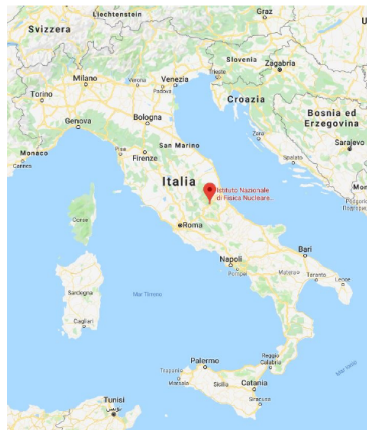
Radiazione LNGS/superficie

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



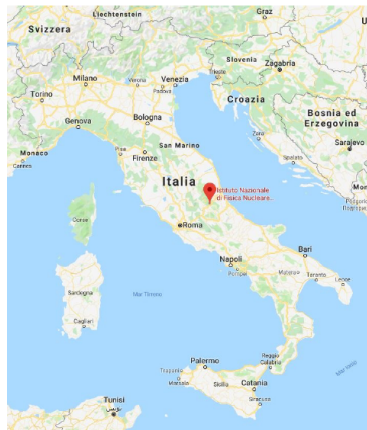
Radiazione LNGS/superficie

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

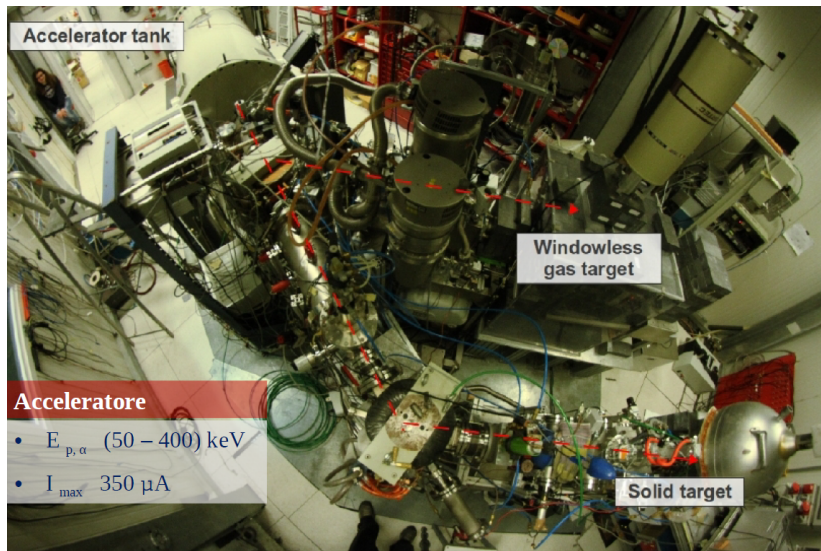


Figure: L'acceleratore LUNA2 a 400 kV.

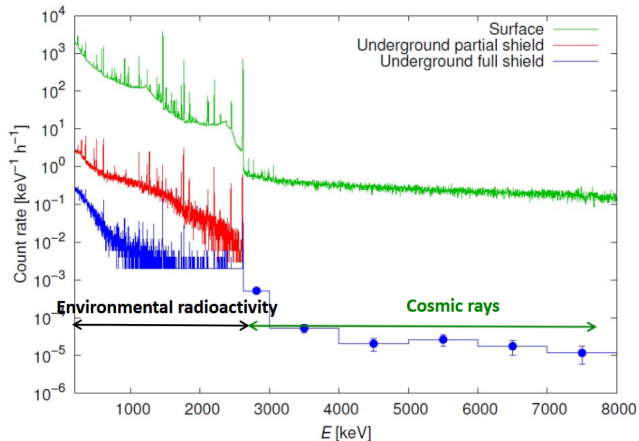


Figure: Grafico riportante il rumore di fondo in superficie, sotto una schermatura parziale sottoterra e sotto una schermatura totale sottoterra.

Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi**
- 3 Il rivelatore
- 4 Calibrazione in energia
- 5 Efficienza
- 6 Simulazioni
- 7 Conclusion

- L'obiettivo della tesi, incentrato sull'analisi dei dati, è quello di calibrare in energia e caratterizzare in efficienza lo scintillatore 4π utilizzato per la rivelazione di raggi γ nella riproduzione della reazione $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$.

- L'obiettivo della tesi, incentrato sull'analisi dei dati, è quello di calibrare in energia e caratterizzare in efficienza lo scintillatore 4π utilizzato per la rivelazione di raggi γ 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, incentrato sull'analisi dei dati, è quello di calibrare in energia e caratterizzare in efficienza lo scintillatore 4π utilizzato per la rivelazione di raggi γ 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 Calibrazione in energia
- 5 Efficienza
- 6 Simulazioni
- 7 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.
- Si tratta di uno scintillatore, ossia uno strumento che quando eccitato da radiazione ionizzante, ne assorbe l'energia depositata e la riemette sotto forma di fotoni

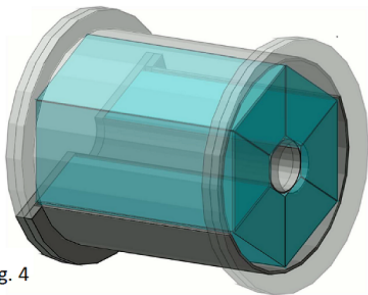


Fig. 4

Figure: Rappresentazione 3D del rivelatore BGO.

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

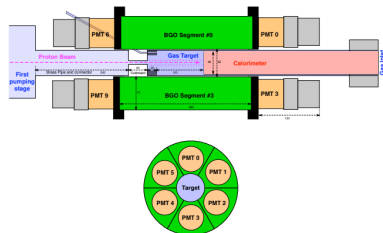


Figure: Rappresentazione schematica del rivelatore BGO. In alto una sezione sagittale, in basso una sezione trasversale.

Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Calibrazione in energia**
- 5 Efficienza
- 6 Simulazioni
- 7 Conclusion

- La calibrazione in energia consiste nel calcolo dei fattori che convertono da valori in canali (CHN) a valori in energia (keV)
- Viene effettuata con due sorgenti radioattive, ^{60}Co e ^{137}Cs
- Tutta l'analisi dei dati è effettuata in ROOT, framework per l'analisi dei dati scritta in C++ e sviluppata dal CERN.

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

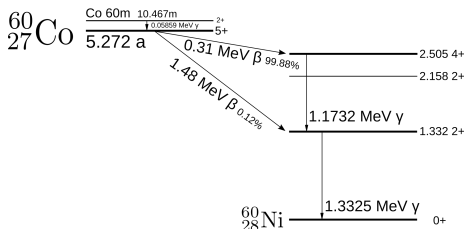


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

- Il ^{60}Co decade tramite decadimento β^- (99.75%) in ^{60}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.

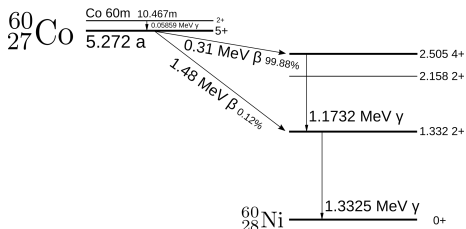


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

- Il ^{60}Co decade tramite decadimento β^- (99.75%) in ^{60}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.

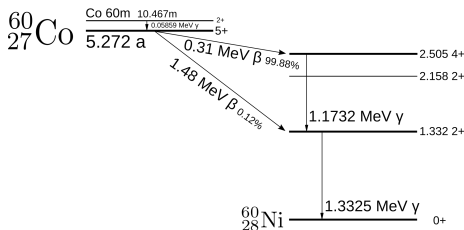


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

- Il ^{137}Cs decade sempre tramite decadimento β^- .

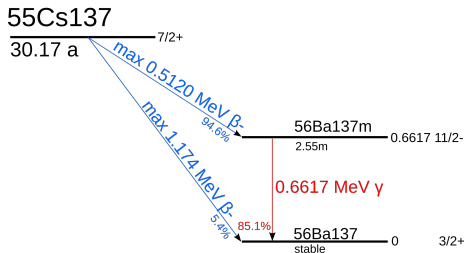


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

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

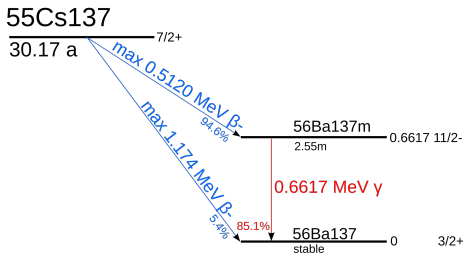


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

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

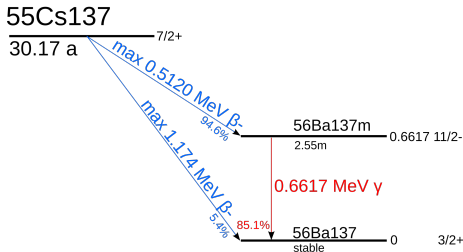
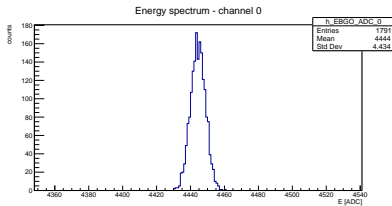
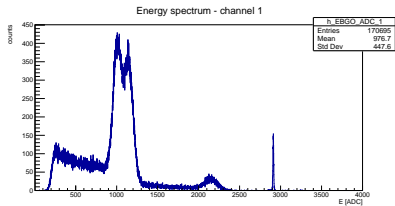
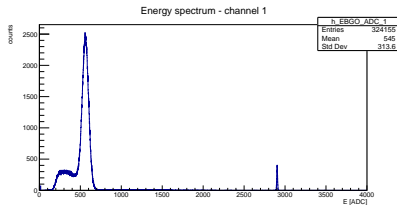
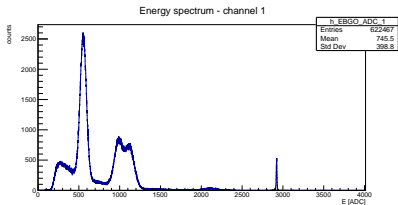


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

Istogrammi

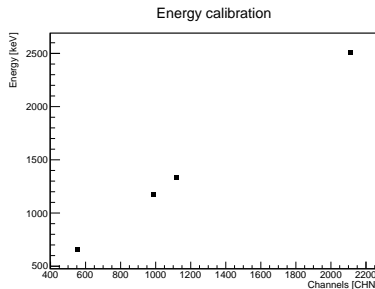


- Si effettuano fit sui file con entrambe le sorgenti

- Si effettuano fit sui file con entrambe le sorgenti
- I valori dei picchi vengono graficati contro quelli in energia caratteristici, noti.

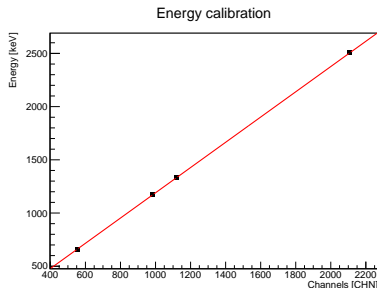
Calcolo della calibrazione

- Si effettuano fit sui file con entrambe le sorgenti
- I valori dei picchi vengono graficati contro quelli in energia caratteristici, noti.



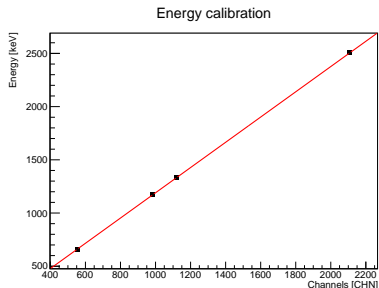
Calcolo della calibrazione

- Si effettuano fit sui file con entrambe le sorgenti
- I valori dei picchi vengono graficati contro quelli in energia caratteristici, noti.
- Si effettua dunque un fit lineare per i punti di ciascun istogramma.



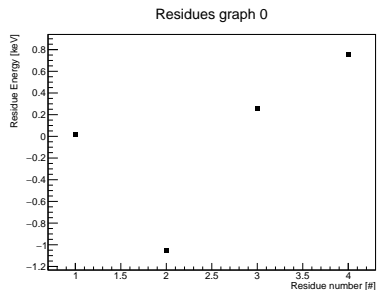
Calcolo della calibrazione

- Si effettuano fit sui file con entrambe le sorgenti
- 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.



- 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

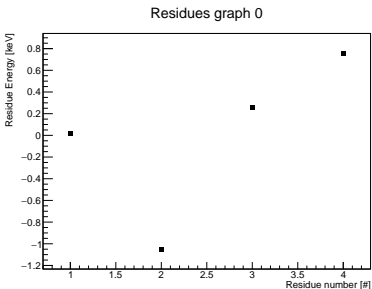


Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Calibrazione in energia
- 5 Efficienza**
- 6 Simulazioni
- 7 Conclusion

- 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 *bremssstrahlung*, 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, Δt è il tempo "vivo" dello strumento.

- 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

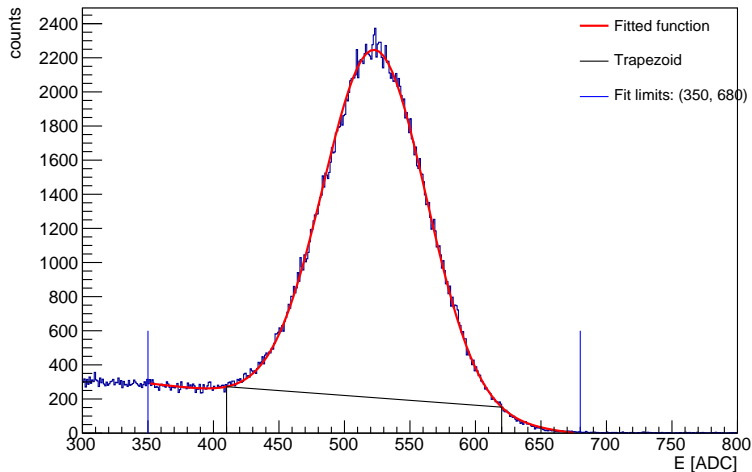


Figure: Visualizzazione del metodo del trapezio.

- 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

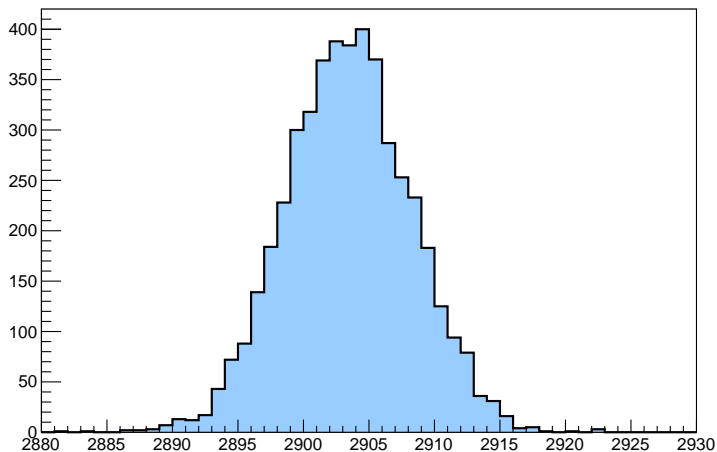


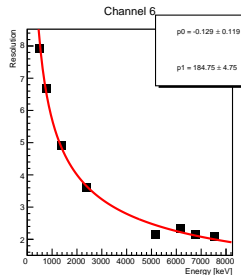
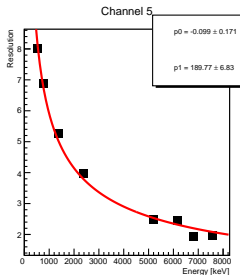
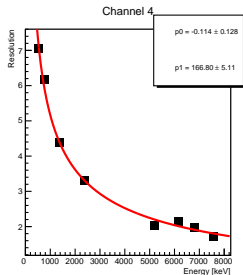
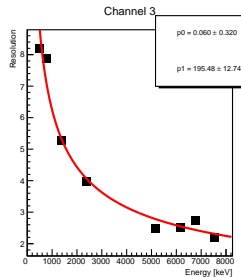
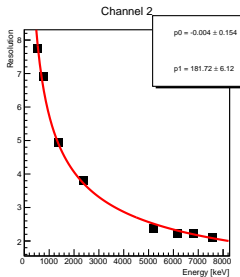
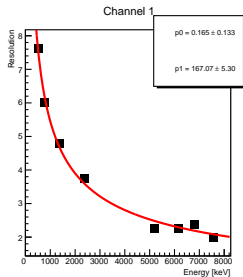
Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Calibrazione in energia
- 5 Efficienza
- 6 Simulazioni**
- 7 Conclusion

- Le simulazioni contengono picchi di energia ideali, a cui non è stata applicata la risoluzione dello strumento
- Questa si può trovare eseguendo fit gaussiani sugli istogrammi in energia, anziché canali
- La risoluzione è il rapporto tra la deviazione standard del picco e la corrispondente energia nota
- Le risoluzioni si mettono su un grafico contro le corrispettive energie note, fittandovi una funzione:

$$f(x) = a + \frac{b}{\sqrt{x}}$$

Fit risoluzioni



- Le risoluzioni trovate servono per "spalmare" i picchi ideali delle simulazioni, che poi possono essere analizzati come gli istogrammi visti in precedenza

Table of Contents

- 1 Introduzione
- 2 Obiettivi della tesi
- 3 Il rivelatore
- 4 Calibrazione in energia
- 5 Efficienza
- 6 Simulazioni
- 7 Conclusion**

- Risultati calibrazione
- Risultati efficienza
- Risultati simulazioni

Grazie per l'attenzione.

Slide di backup

- 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.

- 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*.

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

- La caratterizzazione in energia è effettuata utilizzando due sorgenti radioattive: ^{60}Co e ^{137}Cs .

- L'analisi dati dell'esperimento è compiuta in ROOT
- Il vantaggio di utilizzarlo è una discreta ottimizzazione per quanto riguarda l'analisi di grandi moli di dati grazie al formato file `.root`
- Si utilizza principalmente in ambito di fisica delle particelle

- I dati ricavati sono contenuti in file `.root`
- Ogni file `.root` contiene 8 istogrammi, con indici da 0 a 7, di conteggi
- L'istogramma 0 contiene il pulser, utilizzato per calcolare il tempo vivo dello scintillatore
- Gli istogrammi da 1 a 6 sono i singoli spicchi del BGO
- L'istogramma 7 è la corrente del fascio incidente sul BGO

- Può accadere che lo strumento riveli due fotoni emessi dallo stesso evento contemporaneamente
- In tal caso, viene registrato come un unico fotone, ma con energia pari alla somma delle energie dei fotoni