

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

Paolo Pusterla

Università degli Studi di Torino

Novembre 2024

Relatori:
F. Cavanna
G. Gervino
R. Sariyal



Outline

1 Introduzione

2 Obiettivo della tesi

3 Calibrazione in energia

4 Efficienza

5 Simulazioni

6 Conclusione

Table of Contents

1 Introduzione

2 Obiettivo della tesi

3 Calibrazione in energia

4 Efficienza

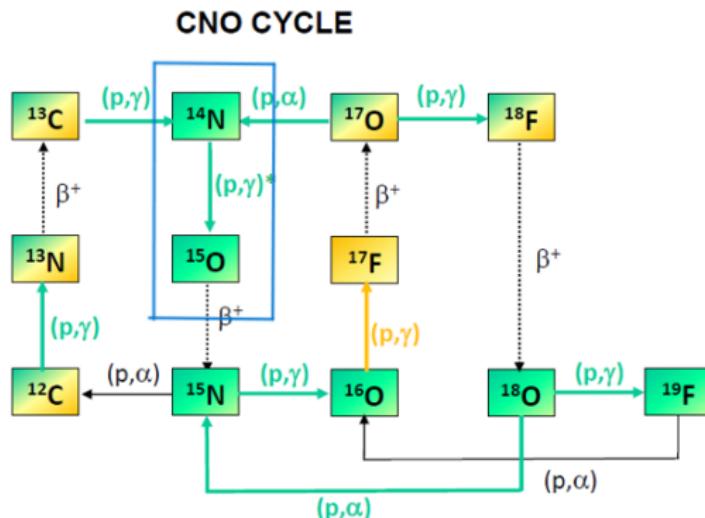
5 Simulazioni

6 Conclusione

Motivazione astrofisica

- Il modello standard solare (SSM) richiede conoscenze sulla composizione chimica del Sole
- Analisi spettroscopiche della fotosfera solare propongono due modelli: LZ (otosfera 3D) e HZ (otosfera 1D)
- La metallicità è l'abbondanza di elementi più pesanti dell'elio
- Per capire se la composizione chimica del Sole sia uniforme in funzione della profondità, si studia il flusso di neutrini del CNO, combinato con le *sezioni d'urto* di alcune reazioni, tra cui $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$

- La combustione dell'idrogeno nel sole avviene tramite la catena pp e il ciclo del CNO. La reazione $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$ è l'orologio del ciclo
- Energie solari 15-50 keV

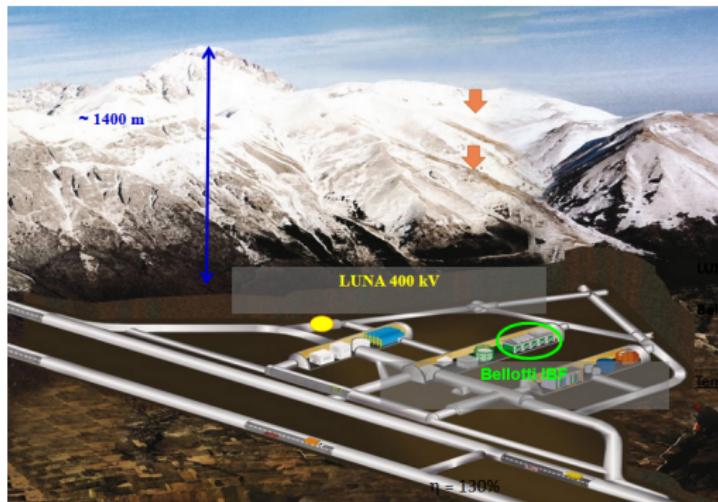
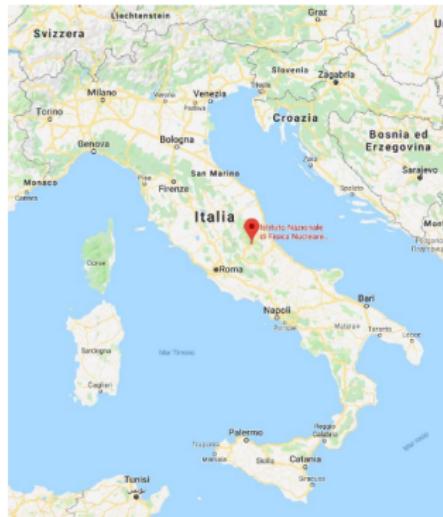


- Nelle stelle, le reazioni di fusione avvengono ad energie molto inferiori rispetto alla barriera coulombiana
- La *sezione d'urto* di una reazione nucleare è una grandezza utilizzata per descrivere la probabilità che la reazione avvenga.
- La si può calcolare sperimentalmente come:

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

Astrofisica nucleare sotterranea

- Con una $\sigma \approx 10^{-12}$ barn si ha un *reaction rate* ($N_{reaz}/\Delta t$) che vale appena $1 \div 10$ conteggi al giorno

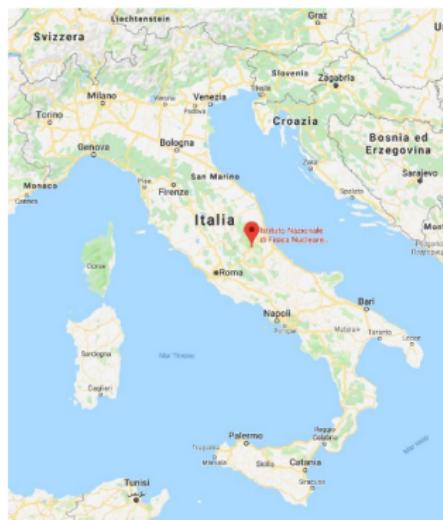


Radiazione LNGS/superficie

Muoni	10^{-6}
Neutroni	10^{-3}

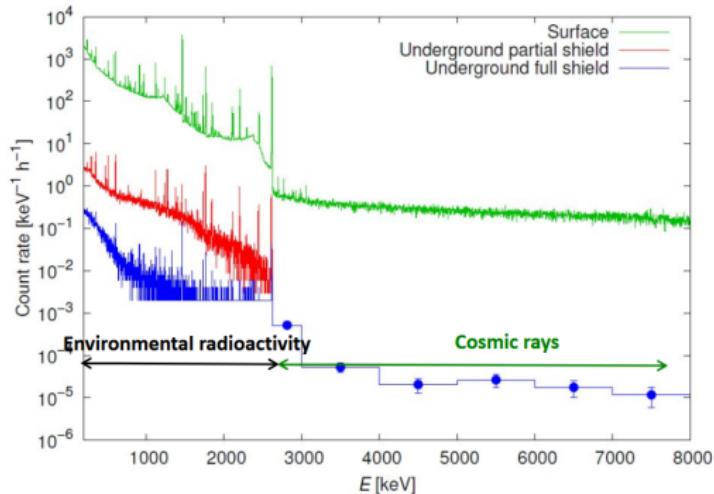
Astrofisica nucleare sotterranea

- Con una $\sigma \approx 10^{-12}$ barn si ha un *reaction rate* ($N_{reaz}/\Delta t$) che vale appena $1 \div 10$ conteggi al giorno
⇒ misure sotterranee



Radiazione LNGS/superficie

Muoni	10^{-6}
Neutroni	10^{-3}



LUNA 400 kV

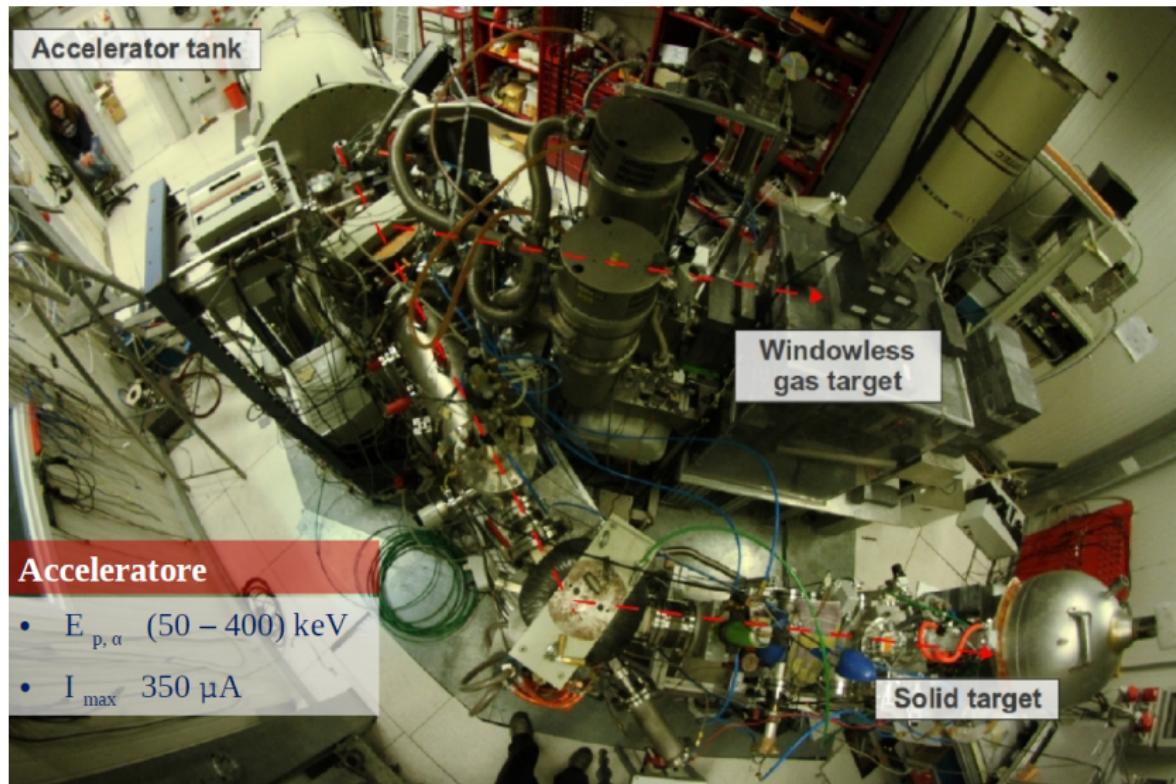
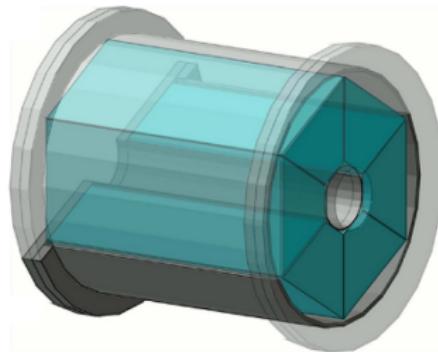


Figure: Apparato sperimentale LUNA.

Apparato sperimentale

- La sezione d'urto della $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ è troppo piccola per poterla studiare ad energie solari
- Si studia nel range 100-400 keV e si fanno estrapolazioni
- Fascio di protoni 50-400 keV
- Bersaglio solido TiN
- Rivelatore di fotoni: BGO
- Segnali in uscita letti da digitizer CAEN



Apparato sperimentale

- La sezione d'urto della $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ è troppo piccola per poterla studiare ad energie solari
- Si studia nel range 100-400 keV e si fanno estrapolazioni
- Fascio di protoni 50-400 keV
- Bersaglio solido TiN
- Rivelatore di fotoni: BGO
- Segnali in uscita letti da digitizer CAEN

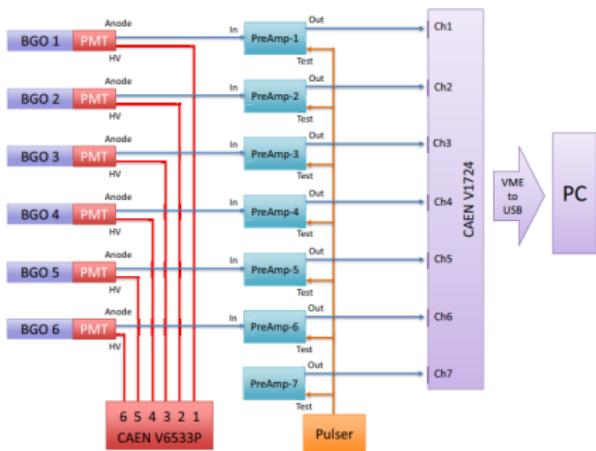
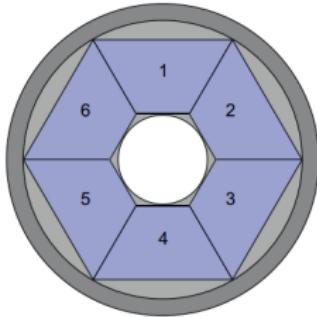


Table of Contents

1 Introduzione

2 Obiettivo della tesi

3 Calibrazione in energia

4 Efficienza

5 Simulazioni

6 Conclusione

Obiettivi della tesi

L'obiettivo della tesi è quello di caratterizzare il rivelatore BGO utilizzato per rivelare i fotoni prodotti dalla reazione $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$.

In particolare:

- **calibrare in energia** gli spettri gamma
- **caratterizzare in efficienza** i sei segmenti del BGO

Ho confrontato l'efficienza ottenuta tramite l'analisi dei dati sperimentali con simulazioni GEANT4.

Table of Contents

1 Introduzione

2 Obiettivo della tesi

3 Calibrazione in energia

4 Efficienza

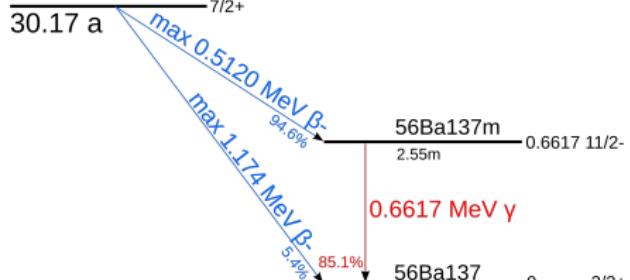
5 Simulazioni

6 Conclusione

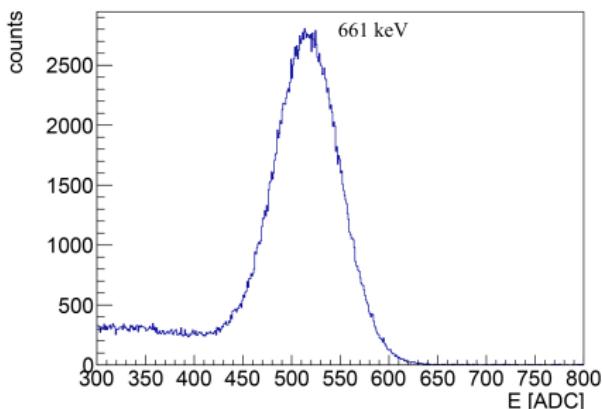
Calibrazione in energia

- Viene effettuata con due sorgenti radioattive, ^{137}Cs e ^{60}Co , di attività nota

$^{55}\text{Cs}^{137}$

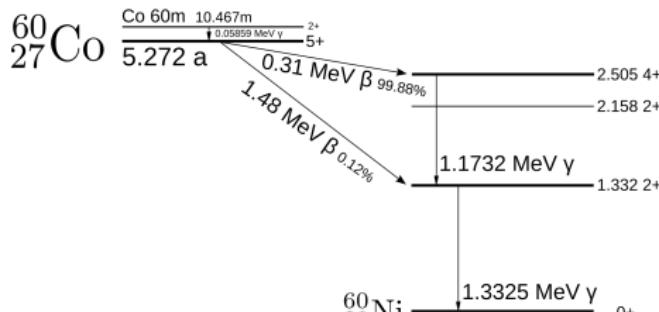


Energy spectrum - BGO 4

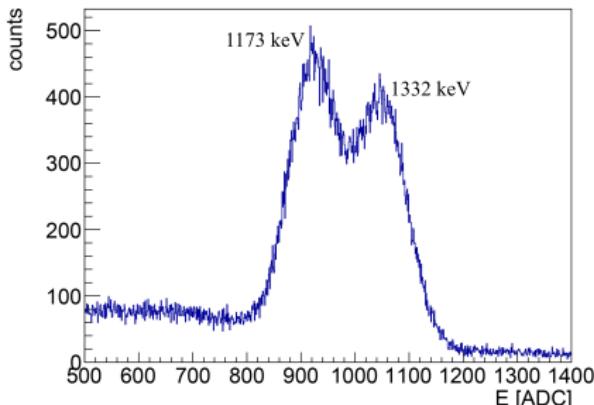


Fisica (UniTo)

$^{60}_{27}\text{Co}$

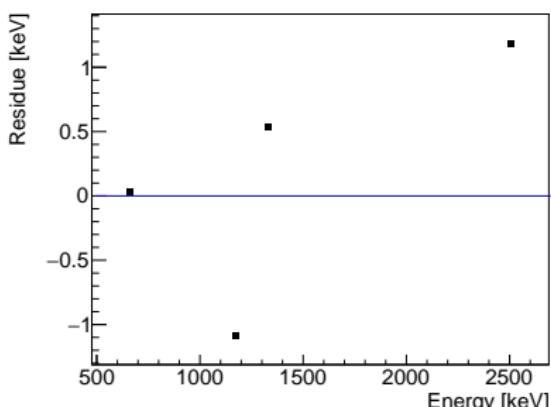
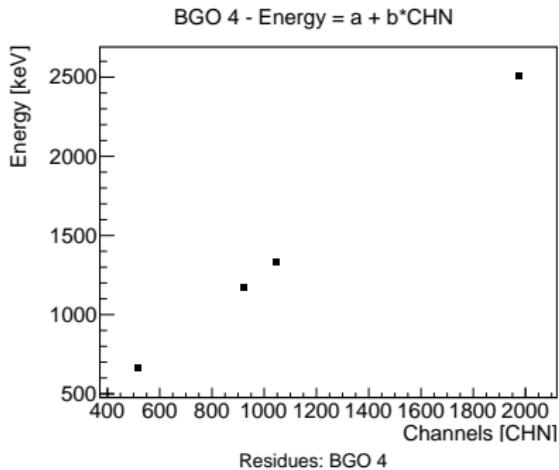
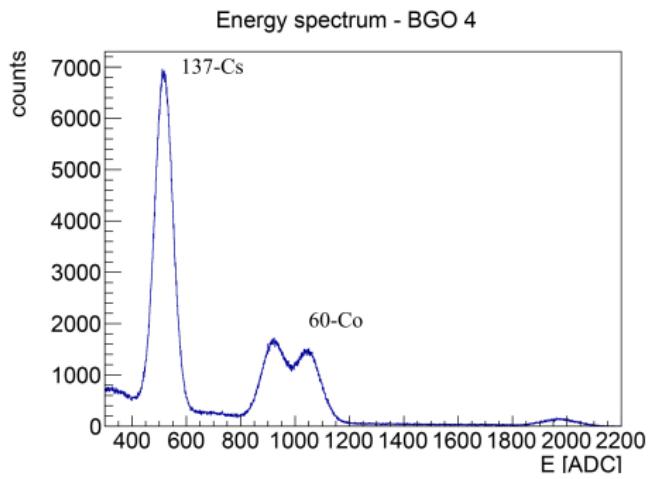


Energy spectrum - BGO 4

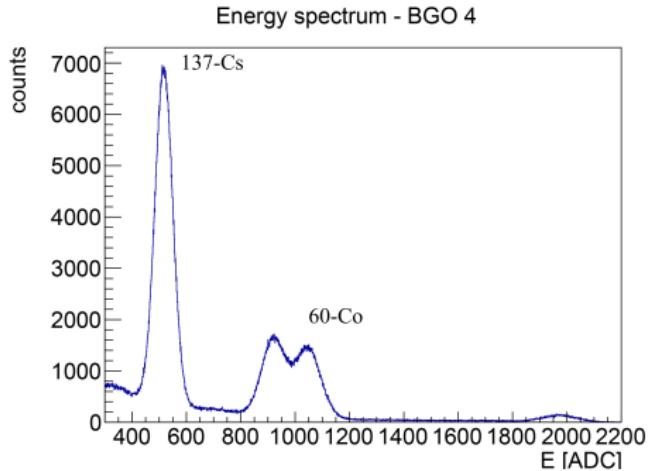


P. Pusterla

Calcolo della calibrazione



Calcolo della calibrazione



Canale	a [keV]	b [keV/CHN]
CHN4	5.83 ± 0.39	1.2676 ± 0.0006

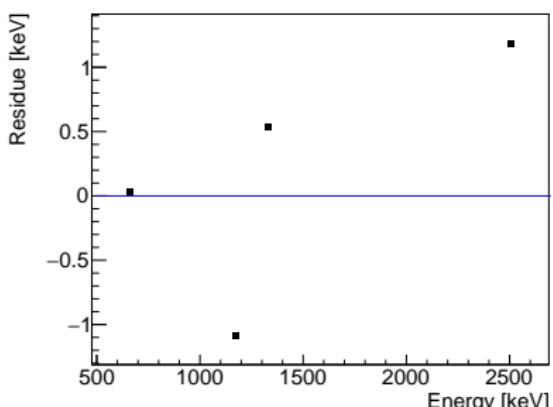
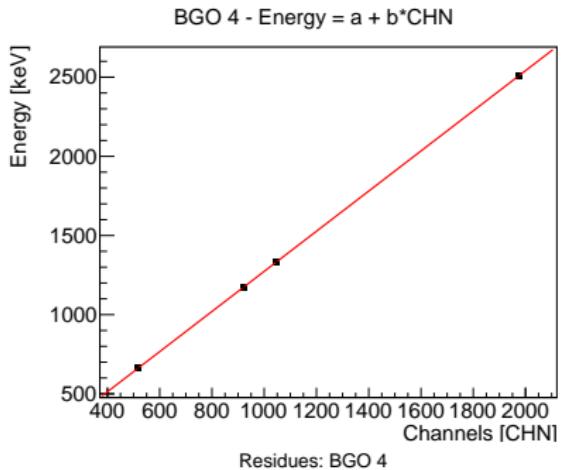


Table of Contents

1 Introduzione

2 Obiettivo della tesi

3 Calibrazione in energia

4 Efficienza

5 Simulazioni

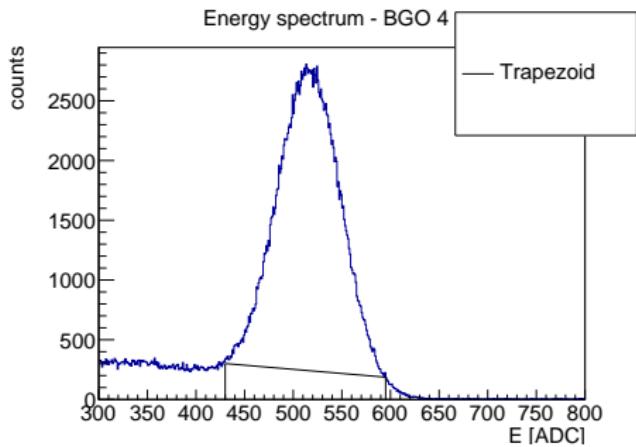
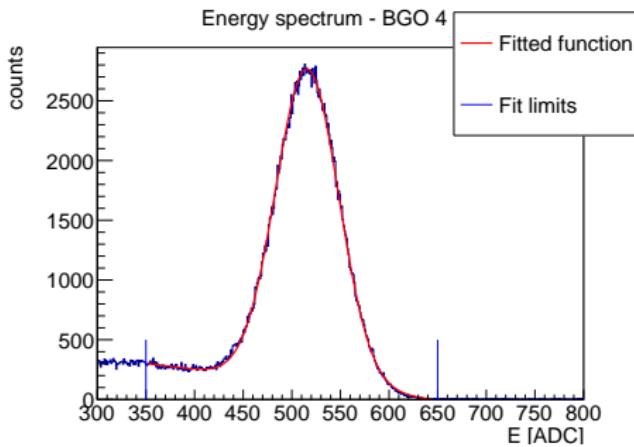
6 Conclusione

Efficienza

- L'efficienza è un fattore fondamentale per ricavare la sezione d'urto.
- Si può calcolare dall'espressione:

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

- L'attività è calcolata al momento della misurazione (sorgenti radioattive di attività nota con precisione del 0.5%)



Tempo morto

- Il pulser ha frequenza nota e serve per stimare il tempo morto dell'elettronica
- Viene collegato con ciascun segmento del BGO
- Il segnale del pulser in ciascun segmento viene confrontato con quello a frequenza nota
- Il tempo morto di ciascun segmento è circa l'1%

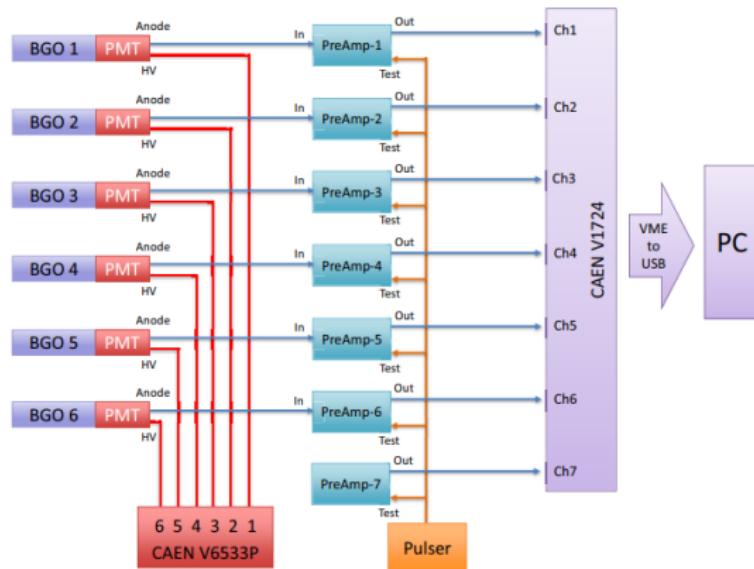


Table of Contents

1 Introduzione

2 Obiettivo della tesi

3 Calibrazione in energia

4 Efficienza

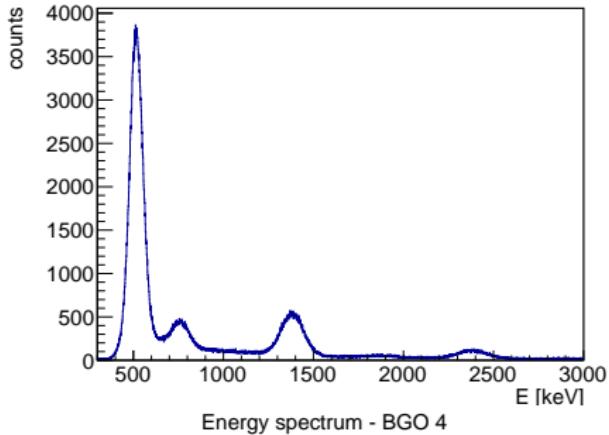
5 Simulazioni

6 Conclusione

- Il setup sperimentale, le sorgenti radioattive e la reazione $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ sono stati simulati in GEANT4
- Gli spettri ottenuti con queste simulazioni sono a risoluzione energetica infinita
- Agli spettri simulati deve essere applicata la risoluzione energetica ottenuta dagli spettri sperimentali

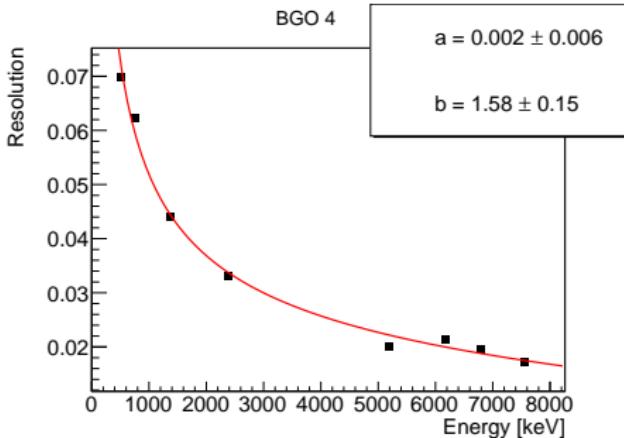
Risoluzione energetica

Energy spectrum - BGO 4

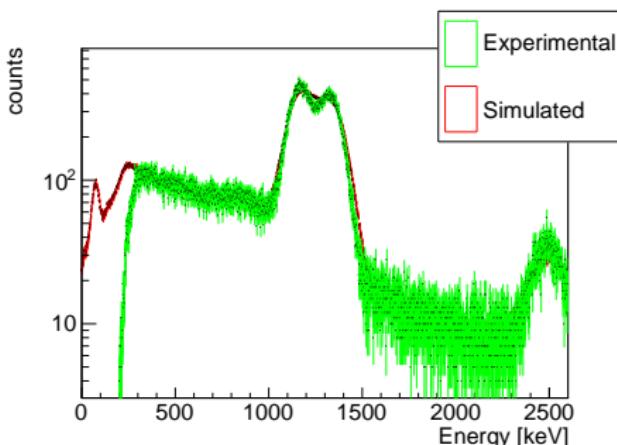
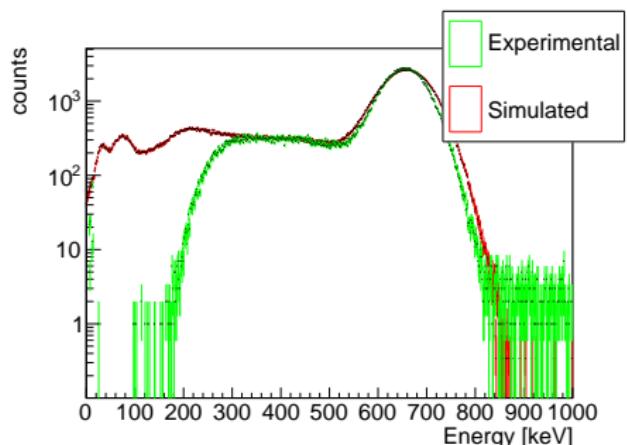


- Per trovare la risoluzione energetica si fitta la funzione:

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



Simulazioni



CHN4	Efficienza % (sim.)	Efficienza % (exp.)
^{137}Cs (661 keV)	10.8 ± 0.5	10.2 ± 0.5
^{60}Co (1173 keV)	7.9 ± 0.4	8.1 ± 0.4
^{60}Co (1332 keV)	7.8 ± 0.4	7.5 ± 0.4

Table of Contents

1 Introduzione

2 Obiettivo della tesi

3 Calibrazione in energia

4 Efficienza

5 Simulazioni

6 Conclusione

- Durante la tesi mi sono occupato della caratterizzazione di uno scintillatore BGO usato per lo studio della reazione $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$
- Ho calibrato in energia gli spettri dei sei segmenti del rivelatore BGO e calcolato l'efficienza di rivelazione gamma
- Ho analizzato le simulazioni Monte Carlo e le ho confrontate con gli spettri sperimentali

- Durante la tesi mi sono occupato della caratterizzazione di uno scintillatore BGO usato per lo studio della reazione $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$
- Ho calibrato in energia gli spettri dei sei segmenti del rivelatore BGO e calcolato l'efficienza di rivelazione gamma
- Ho analizzato le simulazioni Monte Carlo e le ho confrontate con gli spettri sperimentali

Grazie per l'attenzione.

Slide di backup

- 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

- 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 $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$ 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 $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$ 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.

- 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 $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$ 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.
- La tesi ha come obiettivo contribuire alla determinazione della sezione d'urto ad energie 50-370 keV.

Proposta dell'esperimento

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

Proposta dell'esperimento

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

Proposta dell'esperimento

- 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.

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

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

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

Località

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



Radiazione LNGS/superficie

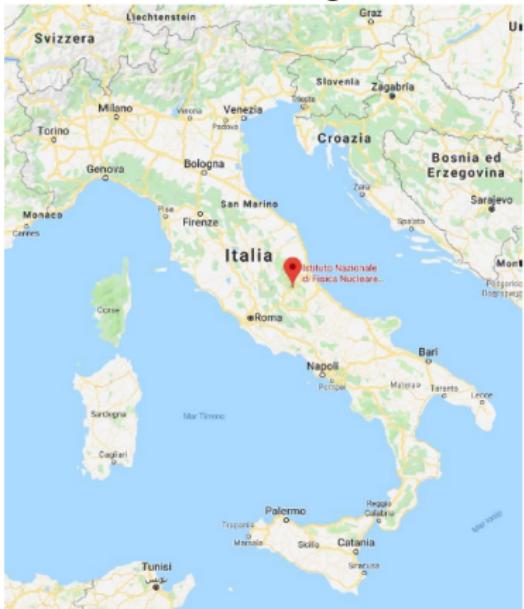
Muoni 10^{-6}

Neutroni 10^{-3}

Figure: LNGS, Assergi, AQ.

Località

tenere immagine



- 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.

Località

tenere immagine



- 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, che permette di concentrare fasci ionici molto intensi e stabili.

Radiazione LNGS/superficie

Muoni	10^{-6}
Neutroni	10^{-3}

Figure: LNGS, Assergi, AQ.

Il rivelatore 4π

- 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

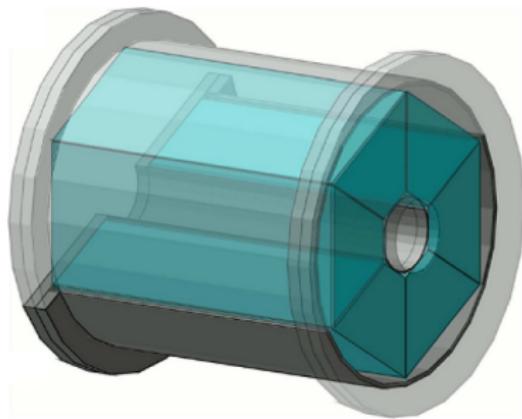


Figure: Rappresentazione 3D del rivelatore BGO.

Il rivelatore 4π

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

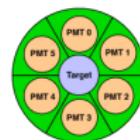
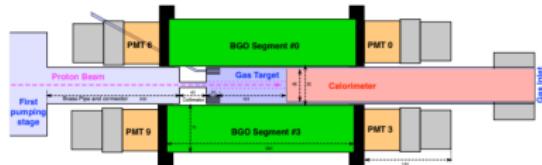


Figure: Rappresentazione schematica del rivelatore BGO. In alto una sezione sagittale, in basso una sezione trasversale.

- L'efficienza di uno scintillatore è il rapporto tra il numero di conteggi prodotti da esso e il numero di conteggi prodotti dalla sorgente:

$$\varepsilon = \frac{N_\gamma}{N_{int}} \quad (3)$$

- Si tratta pertanto di quanti fotoni lo strumento "vede" rispetto al totale
- Invertendo l'equazione possiamo ricavare N_{int} , per poi trovare la sezione d'urto

- 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 verrano 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*.

Risultati del fit

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 .

^{60}Co

- 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.

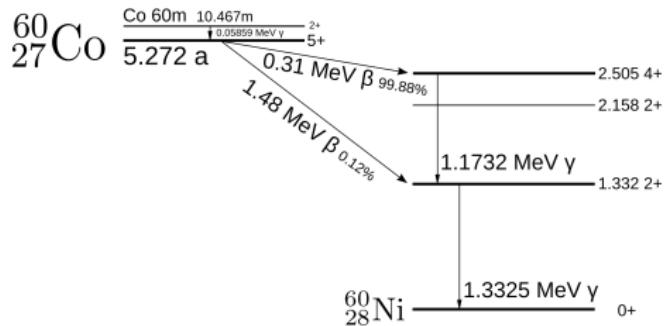


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

^{60}Co

- 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.

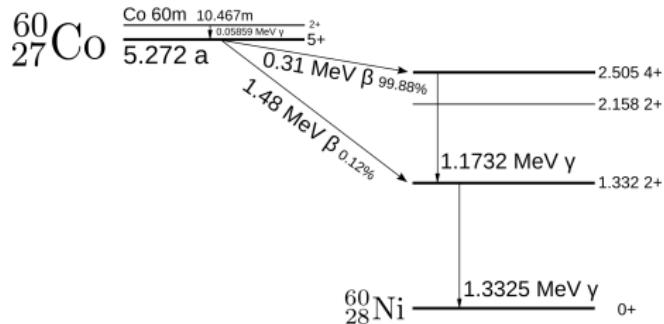


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

^{60}Co

- 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.

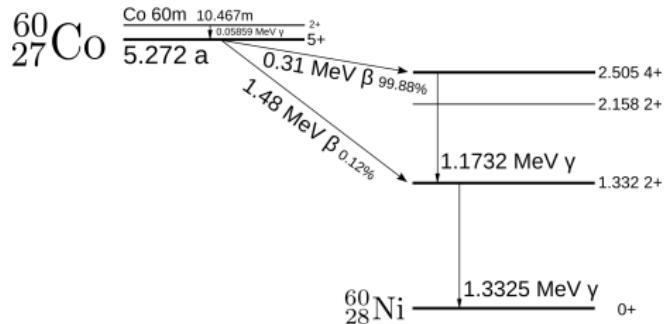


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

^{137}Cs

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

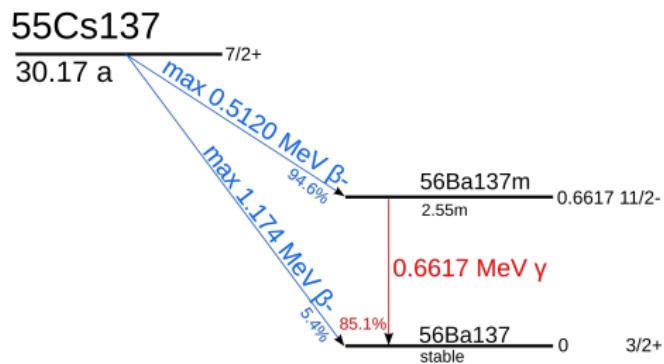


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

^{137}Cs

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

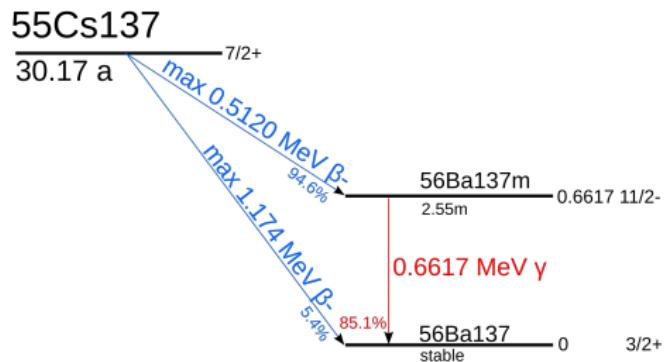


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

^{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).

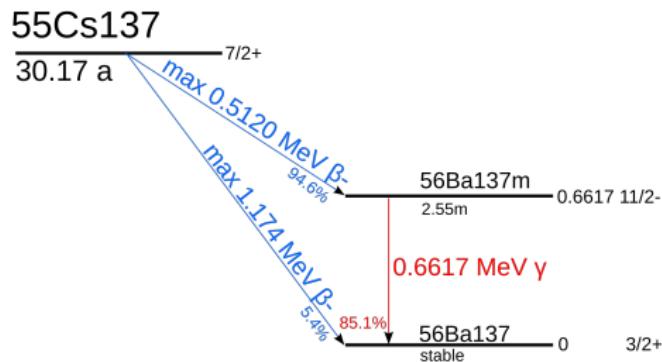


Figure: Schema di decadimento del ^{137}Cs .

- 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

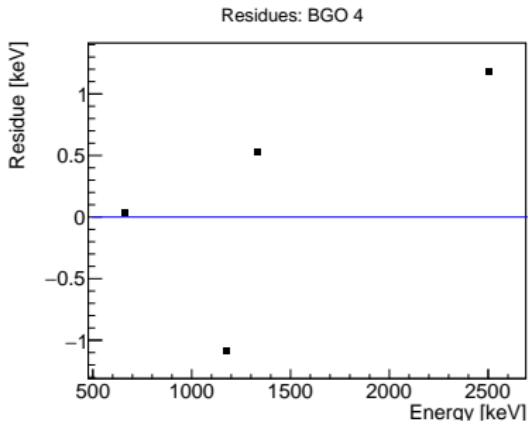
- I dati ricavati sono contenuti in file .root
- Ogni file .root contiene 8 istogrammi, con indici da 0 a 7, di conteggi
- L'istogramma 0 contiene il pulser, utilizzato per calcolare il tempo vivo dello scintillatore
- Gli istogrammi da 1 a 6 sono i singoli spicchi del BGO
- L'istogramma 7 è la corrente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

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

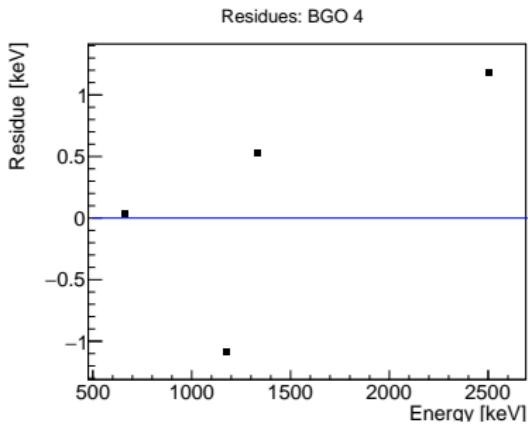
Residui

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



Residui

- 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

- L'efficienza è un fattore fondamentale per ricavare la sezione d'urto

- L'efficienza è un fattore fondamentale per ricavare la sezione d'urto
- Si può stimare dalla formula:

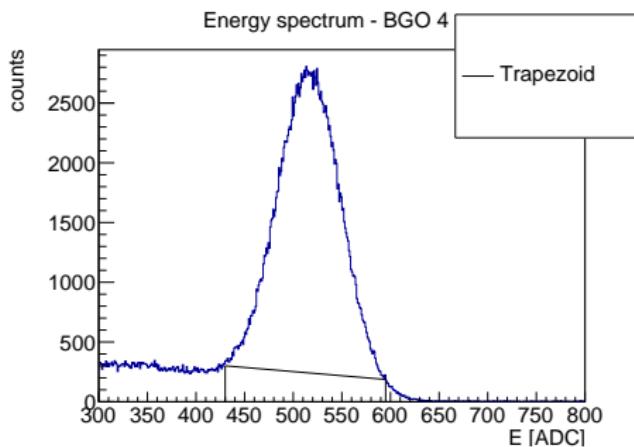
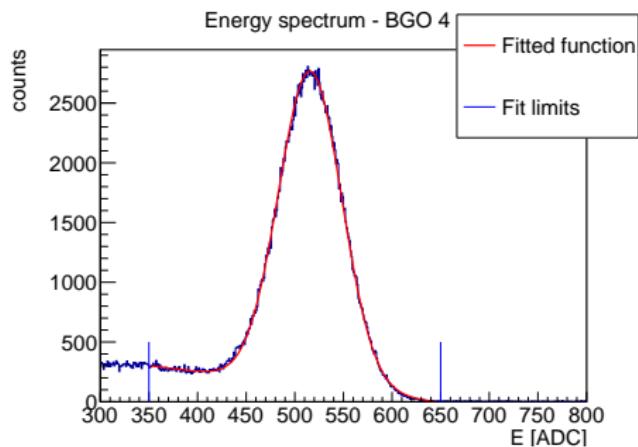
$$\varepsilon = \frac{N_{cont.}}{A(t^*)\Delta t} \quad (4)$$

- L'efficienza è un fattore fondamentale per ricavare la sezione d'urto
- Si può stimare dalla formula:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{cont.}}}{A(t^*) \Delta t} \quad (4)$$

- L'attività è calcolata al momento della misurazione.

Calcolo dell'efficienza



- La calibrazione viene effettuata sul file `run1775_coinc.root`, con entrambe le sorgenti.
- *Calibrare* uno scintillatore significa trovare il fattore di conversione da canali a energia.
- Per ogni spicchio del BGO si esegue un fit per trovare il valore dei picchi caratteristici e del picco somma in canali.

- 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, fissandovi una funzione:

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

EnergyADC/h_EBGO_ADC_4 coinc

