



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Caratterizzazione dei rivelatori al germanio

di nuova generazione

Relatore

Prof./Dr. Francesco Recchia

Correlatore

Dr. Rafael Escudeiro

Laureanda

Anna Togni

Anno Accademico 2022/2023



## **Sommario**

Il lavoro di tesi si focalizza sulla caratterizzazione di un rivelatore al germanio.

I rivelatori al germanio sono un importante strumento per la rivelazione dei raggi gamma. L'obiettivo principale del lavoro di tesi è comprendere come varia il comportamento del rivelatore in seguito all'irraggiamento con un fascio di neutroni. A questo scopo sono stati condotti test specifici per valutare la risoluzione energetica e la variazione dell'efficienza del rivelatore in risposta all'interazione con i neutroni.

I risultati contribuiranno a valutare le prestazioni del rivelatore al germanio nell'analisi delle radiazioni gamma in ambienti ad alta attività neutronica.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>I cristalli del prototipo dell'LNL</b>	<b>5</b>
<b>Caratterizzazione iniziale del rivelatore</b>	<b>9</b>
<b>Esperimento</b>	<b>11</b>
4.1 Apparato strumentale . . . . .	11
4.2 Raccolta ed analisi dati . . . . .	12
<b>Conclusione</b>	<b>17</b>



# Introduzione

Il nucleo atomico fu scoperto nel 1911 quando Ernest Rutherford e i suoi collaboratori osservarono che bombardando lamine sottili di varie sostanze con particelle alfa emesse da sostanze radioattive queste talvolta venivano deviate anche di angoli di  $180^\circ$ . I risultati dell'esperimento di Rutherford potevano essere spiegati solo ammettendo l'esistenza di un nucleo con raggio d'azione inferiore a quello di un atomo, dell'ordine di pochi femtometri, e carico positivamente che interagiva con le particelle alfa per repulsione elettrostatica deviando la loro traiettoria.

Nel corso del tempo, conoscere le proprietà dei nuclei, i loro stati eccitati, tempo di dimezzamento, sezione d'urto ed energie di legame nucleare è diventato molto importante per comprendere la struttura interna degli atomi e per sviluppare tecnologie in ambito medico, militare e per la produzione di energia nucleare. La spettroscopia gamma ha fornito numerosi dati sugli stati nucleari eccitati utili alla comprensione dei modelli nucleari, rendendola il principale strumento di indagine delle proprietà dei nuclei. Questo strumento ha permesso inoltre lo studio dei nuclei esotici e la mappatura delle *drip lines* della carta dei nuclidi.

La spettroscopia gamma richiede strumenti in grado di misurare le energie dei fotoni emessi dal decadimento di nuclei che si trovano in stati eccitati verso stati ad energia più bassa. Il funzionamento di questi strumenti si basa sulla conversione in segnale elettrico dell'energia trasferita dalla radiazione incidente al rivelatore[2]. Le proprietà più importanti dei rivelatori di raggi  $\gamma$  sono la risoluzione, cioè la capacità di distinguere due eventi distinti, e l'efficienza, ossia la capacità di rivelare segnali di interesse rispetto al numero totale di eventi che si verificano. Una buona risoluzione consente di misurare con precisione le energie dei raggi  $\gamma$ , permettendo una chiara distinzione tra fotoni emessi con energia simile. Un'alta efficienza invece consente di rivelare segnali deboli o eventi rari.

I primi strumenti usati per la rivelazione di raggi  $\gamma$  furono gli scintillatori inorganici. Questi rivelatori vennero introdotti intorno al 1940 e il loro funzionamento si basa sull'emissione di segnale luminoso in risposta alla radiazione  $\gamma$  incidente, che viene convertito in segnale elettrico da un fotomoltiplicatore. Un importante sviluppo nella rivelazione dei raggi  $\gamma$  ebbe luogo negli anni '60, quando vennero introdotti i primi rivelatori a semiconduttore al germanio. Questi rispondono al passaggio della radiazione promuovendo gli elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione, lasciando delle lacune nella prima[2]. Tramite l'applicazione di un campo elettrico esterno viene impedito il ricombinamento delle cariche, che si spostano sugli elettrodi dove vengono raccolte producendo un segnale proporzionale all'energia della radiazione incidente. Per garantire un'efficiente raccolta delle cariche viene quindi applicata una differenza di potenziale ai capi del rivelatore; i rivelatori al germanio solitamente operano in svuotamento completo ottenuto tramite polarizzazione inversa. Dato che i rivelatori hanno una conduttanza finita è possibile osservare una corrente indotta anche in assenza di radiazione ionizzante, ma per evitare un peggioramento della risoluzione energetica degli spettri è importante che questa non sia superiore a  $10^{-12}$  A, per questo motivo alcuni rivelatori vengono operati a tensioni inferiori a quelle che garantiscono lo svuotamento totale. È importante inoltre che la tensione sia inferiore a quella di *breakdown* per evitare il deterioramento delle proprietà del rivelatore stesso[1].

Lo spettro energetico di una sorgente di raggi  $\gamma$  ottenuto tramite un rivelatore ideale dovrebbe presentarsi con dei picchi a forma di delta di Dirac, tuttavia nella realtà si osservano delle distribuzioni di energia di larghezza finita che prendono la forma di gaussiane. La risoluzione energetica di un rivelatore viene pertanto definita in funzione della *Full Width at Half Maximum*, abbreviata FWHM,

del picco energetico, corrispondente alla larghezza della distribuzione di energia nel punto di ordinata pari a metà dell'altezza del picco[1]. La definizione formale di risoluzione energetica viene data dall'equazione (1.1), in cui  $H_0$  è la posizione del picco della distribuzione di energia, come si può osservare in figura 1.1.

$$R = \frac{\text{FWHM}}{H_0} \quad (1.1)$$

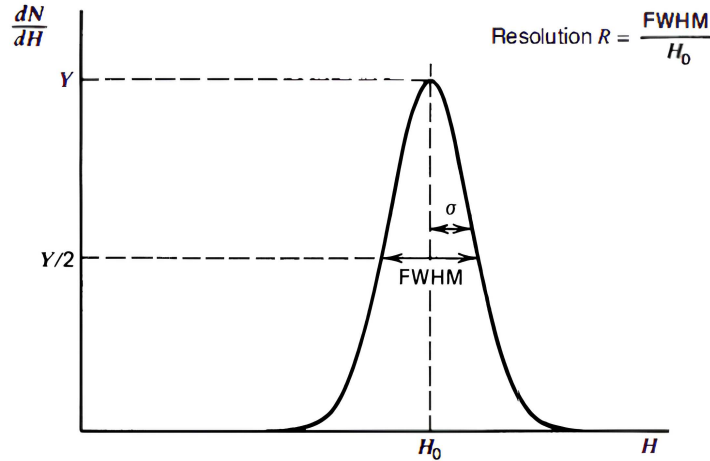


Figura 1.1: Definizione di risoluzione di un rivelatore. Presa da [1].

Per un rivelatore si possono definire due tipi di efficienza: assoluta e intrinseca. L'efficienza assoluta ( $\epsilon_{abs}$ ) è data dal rapporto tra il numero di segnali misurati e il numero totale di radiazioni emesse dalla sorgente.

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{numero di segnali misurati}}{\text{numero totale di radiazioni emesse dalla sorgente}} \quad (1.2)$$

L'efficienza intrinseca ( $\epsilon_{int}$ ) invece indica il rapporto tra il numero di segnali misurati e il numero delle radiazioni incidenti sul rivelatore[1].

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{numero di segnali misurati}}{\text{numero di radiazioni incidenti sul rivelatore}} \quad (1.3)$$

L'efficienza intrinseca dipende solo dalle proprietà del rivelatore, mentre quella assoluta anche dalla sua disposizione geometrica e in particolare dalla distanza tra il rivelatore e la sorgente. Le due sono legate dalla relazione (1.4) che dipende dall'angolo solido  $\Omega$  coperto dalla superficie del rivelatore dal punto di vista della sorgente[1].

$$\epsilon_{int} = \epsilon_{abs} \cdot \frac{4\pi}{\Omega} \quad (1.4)$$

Dalla relazione (1.4) si osserva che assumendo costante l'efficienza intrinseca del rivelatore, il valore dell'efficienza assoluta è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente. L'efficienza del rivelatore dipende dall'energia dei raggi  $\gamma$ : le radiazioni ad energia maggiore sono più penetranti per cui l'efficienza diminuisce.

In figura 1.2 vengono messi a confronto gli spettri di una sorgente di  $^{60}\text{Co}$  ottenuti tramite uno scintillatore a ioduro di sodio (NaI) e un rivelatore al germanio (Ge). Si può osservare che la risoluzione dello scintillatore è peggiore rispetto a quella del rivelatore al germanio, infatti per il picco di energia 1.33 MeV la risoluzione è 8% per lo scintillatore NaI, mentre è 0.15% per il rivelatore al germanio[2].

Il trasferimento di energia dei raggi  $\gamma$  al cristallo di germanio che rende possibile la rivelazione dello spettro avviene attraverso tre meccanismi principali: l'effetto fotoelettrico, lo scattering Compton e la produzione di coppia. In figura 1.3 sono riportate le sezioni d'urto per il germanio di questi meccanismi di interazione in funzione dell'energia dei raggi  $\gamma$ , si può osservare che i fotoni di energie comprese



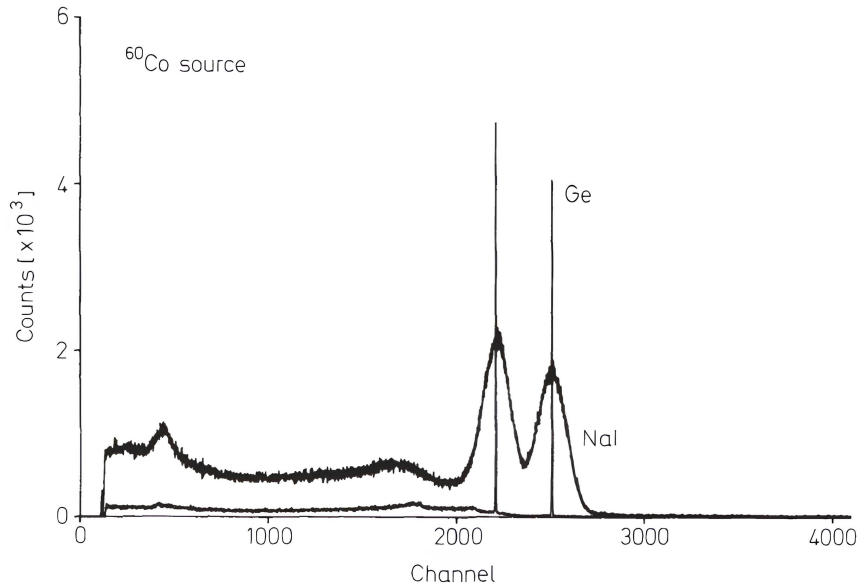


Figura 1.2: Confronto fra gli spettri ottenuti da una sorgente di  $^{60}\text{Co}$  tramite uno scintillatore a ioduro di sodio (NaI) e un rivelatore al germanio (Ge). Presa da [2].

tra 200 e 2500 keV interagiscono principalmente per effetto Compton, che deposita solo una parte dell'energia della radiazione incidente nel rivelatore, producendo nelle misure degli spettri energetici il fondo Compton. La ricerca di soluzioni per eliminare questo fondo portarono allo sviluppo di schermi anti-Compton e, più recentemente, a tecniche di tracciamento delle interazioni dei raggi  $\gamma$  all'interno dei rivelatori[6].

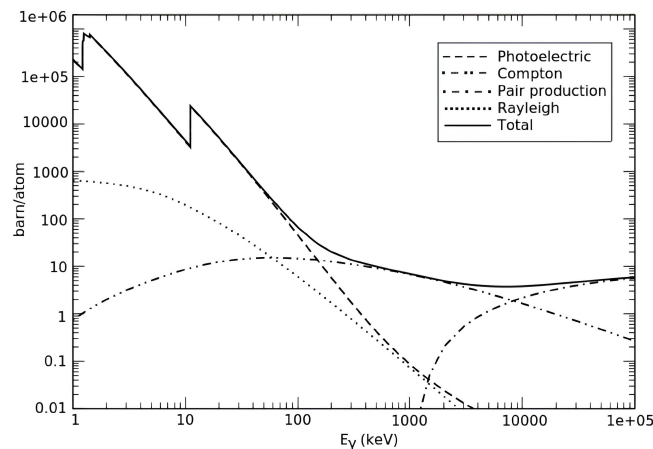


Figura 1.3: Sezione d'urto di effetto fotoelettrico, scattering Compton e produzione di coppia del germanio. Presa da [4].

Gli schermi anti-Compton sono degli scintillatori ad alta efficienza che circondano il rivelatore al germanio misurando i fotoni diffusi all'esterno di questo, ponendo un veto sugli eventi misurati in coincidenza. Negli anni '90 vennero assemblate grandi matrici di rivelatori al germanio iperpuro (HPGe) con soppressione Compton, come GASP, EUROBALL e GAMMASPHERE. Queste matrici di rivelatori permisero lo studio dei raggi  $\gamma$  emessi in coincidenza e l'osservazione di bande superdeformate grazie alla loro elevata efficienza di rivelazione. Purtroppo la presenza degli schermi anti-Compton attorno ai rivelatori limita la superficie dell'angolo solido disponibile al rivelatore HPGe.

La ricerca di soluzioni a questo problema ha portato allo sviluppo di rivelatori HPGe altamente segmentati, che riescono a ricostruire con precisione il percorso dei raggi  $\gamma$  all'interno del cristallo. La segmentazione dei cristalli di germanio, unita al miglioramento delle tecniche di analisi dei segnali di carica generati, permette di determinare la posizione e l'energia rilasciata a seguito di ciascuna

interazione dei raggi  $\gamma$  incidenti. I sistemi di tracciamento utilizzano algoritmi basati sulla posizione e sull'energia rilasciata nelle interazioni; hanno inoltre la funzione di schermo Compton in quanto registrano solo gli eventi in cui c'è accordo tra l'energia stimata dalla ricostruzione delle tracce e quella misurata dal rivelatore, rendendo superflua la presenza degli schermi anti-Compton[7].

Attualmente gli spettrometri più sviluppati di questa nuova generazione di rivelatori di raggi  $\gamma$  sono AGATA, acronimo di *Advanced GAMMA Tracking Array*, sviluppato in collaborazione tra i laboratori europei con grande partecipazione dell'INFN, e GRETA (*Gamma-Ray Energy Tracking Array*), sviluppato negli US.

Questi rivelatori vengono spesso usati in ambienti ad alta attività neutronica che danneggia i cristalli di germanio peggiorandone la risoluzione energetica e l'efficienza. La struttura dei cristalli può essere sanata tramite procedure di *annealing*, processi termici in cui i rivelatori vengono scaldati a temperature specifiche per un determinato periodo di tempo per ridurre o eliminare i difetti della struttura cristallina. La produzione di rivelatori meno soggetti al danneggiamento da neutroni permetterebbe di diminuire le spese di manutenzione di grandi matrici di rivelatori come AGATA, per questo i recenti studi si sono focalizzati nella ricerca e sperimentazione di nuovi prototipi di rivelatori HPGe altamente segmentati, come il prototipo prodotto nei *Laboratori Nazionali di Legnaro* (LNL) all'interno del progetto *Next Generation Germanium Gamma detectors* (N3G).

In questo lavoro di tesi viene valutato il comportamento delle proprietà di questo prototipo dell'LNL in funzione del flusso di neutroni con cui viene danneggiato. La risoluzione energetica del prototipo viene studiata tramite l'osservazione della variazione della FWHM del picco energetico preso in esame. Il comportamento dell'efficienza invece viene studiato valutando il numero di eventi che corrispondono alla rivelazione di raggi  $\gamma$  di energia di interesse, questo numero viene stimato calcolando l'area sottostante la distribuzione di energia dello spettro, come viene mostrato in figura 1.4, ed è direttamente proporzionale al valore dell'efficienza del rivelatore.

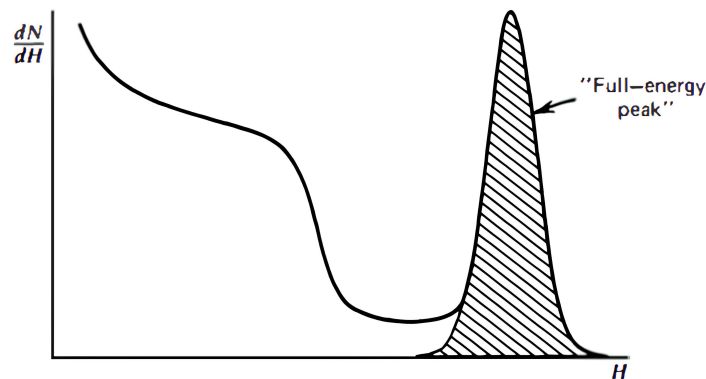


Figura 1.4: Esempio di come viene valutata l'efficienza di un picco energetico di una sorgente di raggi  $\gamma$ . Presa da [1].

# I cristalli del prototipo dell'LNL

I cristalli di germanio iperpuro usati per la costruzione dei rivelatori di raggi  $\gamma$  presentano una concentrazione di impurezze prossima a  $10^{10}$  atomi/cm<sup>2</sup>[5]; se le impurezze sono in prevalenza dei donatori i cristalli saranno dei semiconduttori di tipo  $p$ , invece, se sono per lo più accettori saranno di tipo  $n$ . La raccolta dei segnali generati dalle interazioni dei raggi  $\gamma$  con il cristallo avviene in corrispondenza dei contatti, che possono essere di due tipi: di tipo  $n^+$ , dove si ha la raccolta degli elettroni, e di tipo  $p^+$ , dove vengono raccolte le lacune. I contatti possono essere costruiti tramite diverse tecniche, ma solo poche di queste permettono di preservare la purezza del cristallo di germanio. I contatti di tipo  $p^+$  vengono solitamente realizzati tramite l'impianto di ioni di boro (B) a temperatura ambiente, mentre quelli di tipo  $n^+$  tramite la diffusione di litio (Li) a temperature attorno ai 300°C. L'alta diffusività del litio nel germanio rende i contatti  $n^+$  molto spessi (mediamente hanno una larghezza di 0.6 mm) per cui sono inadatti alla segmentazione e dato che nello spessore del contatto non si ha raccolta di cariche diminuisce l'efficienza per i raggi  $\gamma$  di basse energie essendo questi meno penetranti. Inoltre, i contatti di tipo  $n^+$  non sono stabili durante le procedure di *annealing* necessarie a sanare i danni della struttura cristallina del germanio a causa dell'alta diffusività del litio. I contatti di tipo  $p^+$  invece hanno uno spessore di circa  $0.3\ \mu\text{m}$ , vantaggioso per l'analisi di raggi  $\gamma$  di basse energie, e risultano essere facilmente divisibili in contatti isolati per cui sono adatti per essere segmentati[5,9].

La segmentazione dei contatti dove si ha la raccolta del segnale è alla base delle tecniche di tracciamento dei raggi  $\gamma$ , infatti analizzando la forma del segnale raccolto sui singoli segmenti è possibile determinare la posizione e l'energia depositata nell'interazione dei raggi  $\gamma$  con il cristallo. È quindi importante progettare i rivelatori in modo da favorire i segnali raccolti nei contatti segmentati, che per le esigenze costruttive analizzate in precedenza risultano essere quelli di tipo  $p^+$ , questi contatti però risultano essere quelli maggiormente soggetti al danneggiamento da neutroni veloci.

I neutroni vengono emessi in molte reazioni nucleari di interesse e danneggiano la struttura cristallina del germanio generando principalmente dei centri di cattura per le lacune. Questi riducono l'efficienza della raccolta del segnale delle lacune portando alla formazione di una coda a bassa energia e a una maggiore dispersione della distribuzione energetica dei picchi dello spettro energetico dei raggi  $\gamma$  rivelati, come si può osservare in figura 2.5 dove vengono messi a confronto lo spettro energetico di un rivelatore sano (blu) e uno danneggiato (rosso)[11].

La perdita di segnale a causa della cattura delle lacune nei contatti segmentati di tipo  $p^+$  dipende dalla distanza percorsa dalle lacune e dalla geometria del cristallo del rivelatore.

Per i rivelatori coassiali la maggior parte delle interazioni con i raggi  $\gamma$  avviene nella parte più esterna al cristallo, pertanto, facendo riferimento alla figura 2.6, si osserva che i rivelatori con cristalli di tipo  $n$ , in cui le lacune vengono raccolte nel contatto più esterno per cui devono percorrere solo una breve distanza per raggiungere il contatto  $p^+$  di raccolta, sono più resistenti al danneggiamento da neutroni. Infatti, nei rivelatori con cristalli di tipo  $p$  le lacune vengono raccolte nel contatto centrale e devono percorrere una distanza più lunga[11].

Sebbene l'uso di cristalli di tipo  $n$  limiti la perdita di segnale contenendo la diminuzione della risoluzione e dell'efficienza dei rivelatori, questi necessitano di essere sottoposti periodicamente a procedure di *annealing* per sanare il reticolo cristallino del germanio. Per ridurre i costi di manutenzione delle matrici di rivelatori HPGe come AGATA sarebbe opportuno realizzare rivelatori in cui il tracciamento dei raggi  $\gamma$  si basi sulle informazioni trasmesse dai segnali degli elettroni, ovvero tramite rivelatori

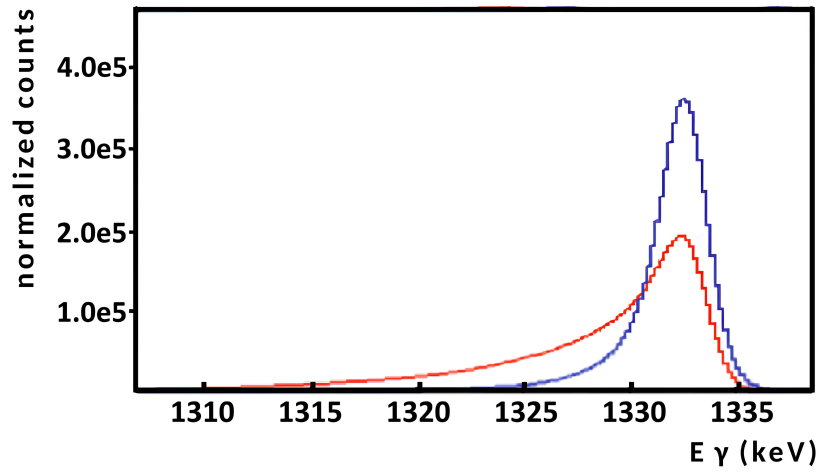


Figura 2.5: Spettro energetico prodotto da un rivelatore di raggi  $\gamma$  prima del danneggiamento da neutroni in blu e lo spettro alla stessa energia in seguito al danneggiamento da neutroni in rosso. Adattata da [14].

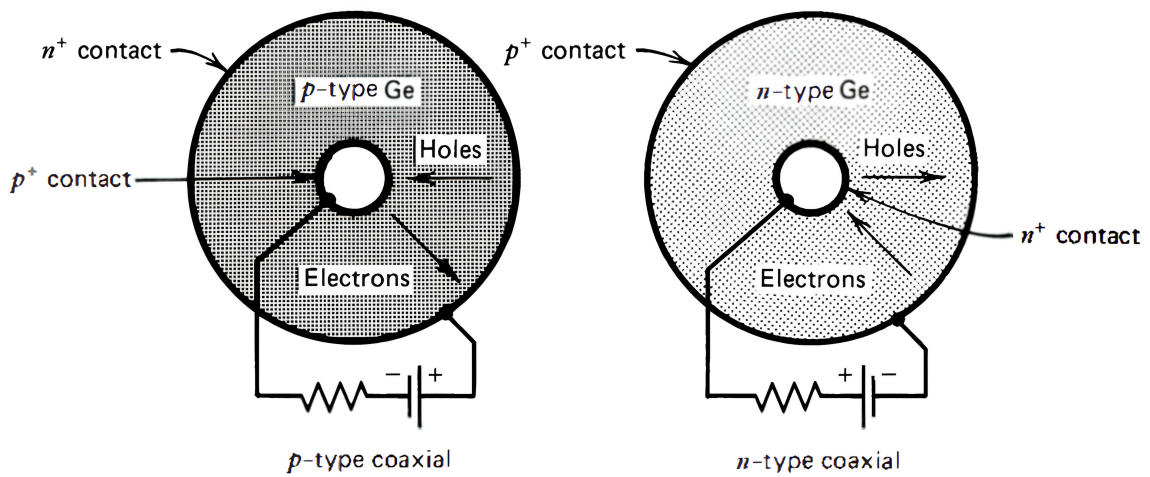


Figura 2.6: Sezioni trasversali di un cristallo coassiale di germanio ti tipo *n* e di tipo *p*. Adattata da [1].

con cristalli di tipo  $p$  in cui i contatti segmentati esterni sono di tipo  $n^+$ [5]. È importante quindi sviluppare nuove tecniche per la produzione di contatti di tipo  $n^+$  che siano fisicamente stabili, in modo da poter sottoporre i cristalli a procedure di *annealing*, e più sottili, perché possano essere segmentati finemente.

Negli ultimi anni la collaborazione internazionale N3G a *leadership* italiana ha lavorato nell'implementazione di tecniche di *pulse laser melting* (PLM), i contatti realizzati tramite questa tecnica sono più sottili e adatti ai processi di segmentazione. Questa tecnica sfrutta impulsi di laser ad alta densità energetica per fondere la strato superficiale del cristallo mantenendone il corpo a temperatura ambiente prevenendo la diffusione di contaminazioni al suo interno. In questo modo è possibile realizzare contatti di tipo  $n^+$  tramite l'impianto di ioni di antimonio (Sb) nello strato superficiale fuso e contatti di tipo  $p^+$  con l'impianto di ioni di boro (B) o alternativamente alluminio (Al)[5,10].

Il prototipo costruito nei laboratori dell'LNL che viene analizzato nel lavoro di tesi è costituito da un cristallo di germanio planare di tipo  $p$  con un contatto esterno segmentato di tipo  $n^+$  e uno comune (il *core*) di tipo  $p^+$ . I contatti sono realizzati tramite queste nuove tecniche di PLM: il contatto di tipo  $n^+$  viene prodotto tramite l'impianto di ioni di antimonio (Sb), mentre quello di tipo  $p^+$  con ioni di alluminio (Al).

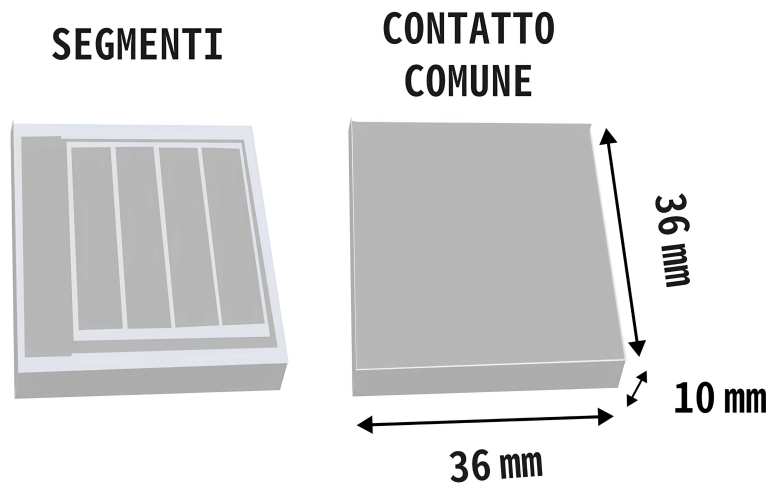


Figura 2.7: Schema del cristallo del prototipo.

Il rivelatore viene costruito a partire da un prisma quadrato di germanio iperpuro delle dimensioni  $36 \times 36 \times 10 \text{ mm}^3$ . Come si può osservare dallo schema del prototipo riportato in figura 2.7 il contatto  $n^+$  viene diviso in 4 segmenti delle dimensioni di  $5 \times 20 \text{ mm}$  distanziati di circa  $0.5 \text{ mm}$  circondati da un anello di protezione realizzato da un sottile strato  $n^+$ .

Nella raccolta e analisi dei dati ottenuti dell'esperimento i segmenti esterni sono stati nominati segmenti 1 e 10, mentre quelli interni sono i segmenti 2 e 9.



# Caratterizzazione iniziale del rivelatore

Prima del danneggiamento con irradiazione di neutroni il rivelatore è stato caratterizzato tramite l'analisi di spettri ottenuti da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$ . Gli esperimenti di caratterizzazione del rivelatore mostrano che il segnale in uscita dal preamplificatore dei contatti segmentati è migliore di quello raccolto dal contatto comune come si può vedere dalle figure 3.8 e 3.9, dove si osserva che la linea di base del segnale del *core* è molto oscillante. L'indagine delle cause di questa instabilità necessita di studi più approfonditi ma si ipotizza che possano essere dovute al rumore prodotto dalle vibrazioni dei cavi di alimentazione dell'alta tensione legati al *core* e dalle correnti parassite generate nell'anello di protezione che circonda i segmenti del contatto  $n^+$ .

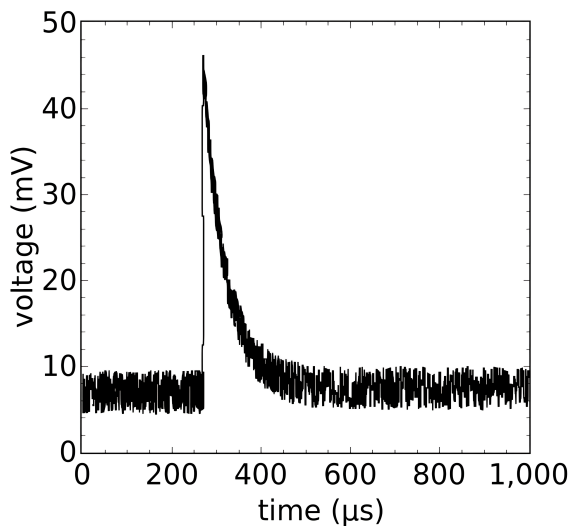


Figura 3.8: Segnale in tensione generato da un raggio  $\gamma$  di energia 59.5 keV emesso da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  raccolto da un segmento.

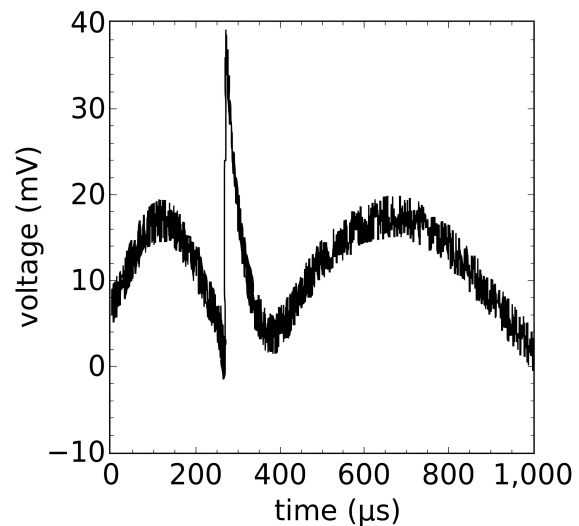


Figura 3.9: Segnale in tensione generato da un raggio  $\gamma$  di energia 59.5 keV emesso da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  raccolto dal *core*.

Dallo studio degli spettri ottenuti a seguito dell'elaborazione dei segnali si stima che il valore della risoluzione energetica del rivelatore alla tensione operativa per raggi  $\gamma$  emessi da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  con un'energia di 59.5 keV è attorno a 1.0 e 1.2 keV per i contatti segmentati, mentre per il contatto comune risulta essere al meglio 6.4 keV.

Dai dati ottenuti nelle misure di caratterizzazione al variare della tensione è stato possibile anche determinare il valore della tensione operativa del prototipo. In figura 3.10 e 3.11 vengono mostrate l'evoluzione della FWHM e dell'efficienza assoluta del picco della distribuzione energetica dei raggi  $\gamma$  emessi da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  in funzione della tensione applicata al rivelatore.

Tramite *Finite Difference Method* (FDM) è stato stimato che lo svuotamento totale del rivelatore si ottiene per tensioni attorno ai 400 V. Tuttavia, non è possibile lavorare a tensioni così alte senza peggiorare la risoluzione del rivelatore, infatti, facendo riferimento al grafico in figura 3.10 è evidente che la risoluzione peggiora per tensioni che superano i 150 V a causa dell'aumento delle correnti indotte nel rivelatore. Per questo motivo è stato deciso di osservare il comportamento delle proprietà del prototipo alle tensioni di 80 V, 120 V e 160 V.

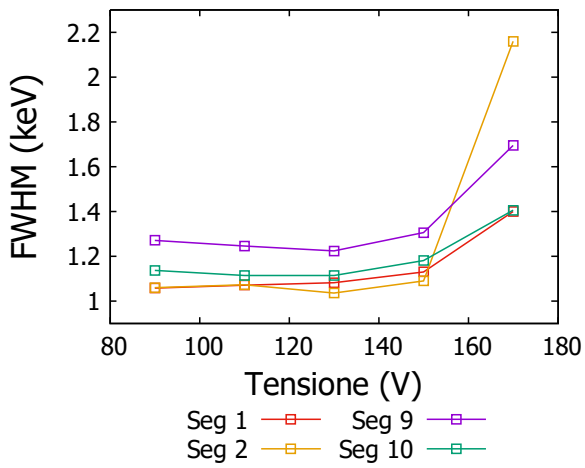


Figura 3.10: Risoluzione energetica di un picco energetico a 59.9 keV emesso da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  al variare della tensione.

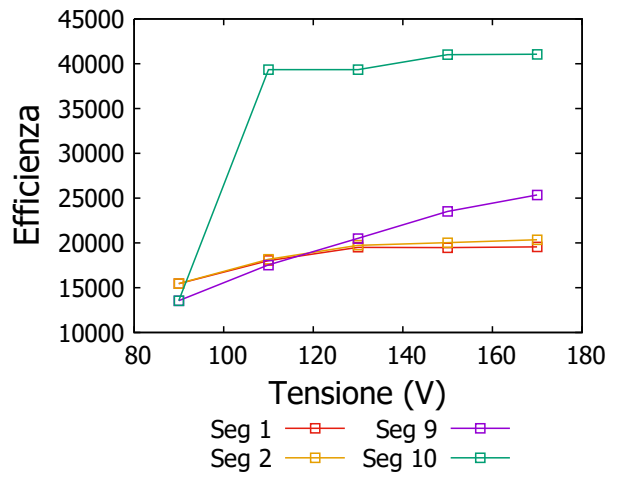


Figura 3.11: Efficienza assoluta di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  al variare della tensione.



# Esperimento

## 4.1 Apparato strumentale

A seguito delle misure di caratterizzazione il prototipo è stato sottoposto a un flusso controllato di neutroni prodotto dalla collisione di un fascio di protoni generato dall'acceleratore CN nei laboratori dell'LNL all'energia di 4 MeV su un bersaglio di  $100\ \mu\text{m}$  di  ${}^7\text{Li}$ . La reazione nucleare utilizzata è stata  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  con una corrente di fascio di circa 380 nA. Il controllo dell'intensità del fascio di neutroni prodotti richiede l'uso di altri spettrometri di controllo; in questo esperimento sono stati usati un rivelatore di GASP e due scintillatori CLYC.

Il conteggio del numero di neutroni prodotti nella reazione è stato effettuato analizzando lo spettro dei raggi  $\gamma$  ottenuto con il rivelatore GASP. Il  ${}^7\text{Be}$  prodotto nella reazione nucleare decade emettendo un raggio  $\gamma$  di energia 477.6 keV, essendo questa l'unica modalità di decadimento del  ${}^7\text{Be}$  si ha che il numero di neutroni prodotti coincide con il numero di raggi  $\gamma$  emessi con energia pari a 477.6 keV. Questo valore è misurabile moltiplicando il numero di eventi registrati da GASP corrispondenti alla rivelazione di raggi  $\gamma$  di energia pari a 477.6 keV per il fattore di efficienza del rivelatore, che è stato stimato dall'analisi di spettri di sorgenti radioattive di attività nota.

I dati registrati dai due scintillatori CLYC non sono ancora stati analizzati, ma serviranno per determinare con maggiore precisione il numero di neutroni prodotti nella reazione  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  tramite tecniche di *Pulse Shape Discrimination*.

In figura 4.12 viene riportata la disposizione spaziale degli apparati strumentali.

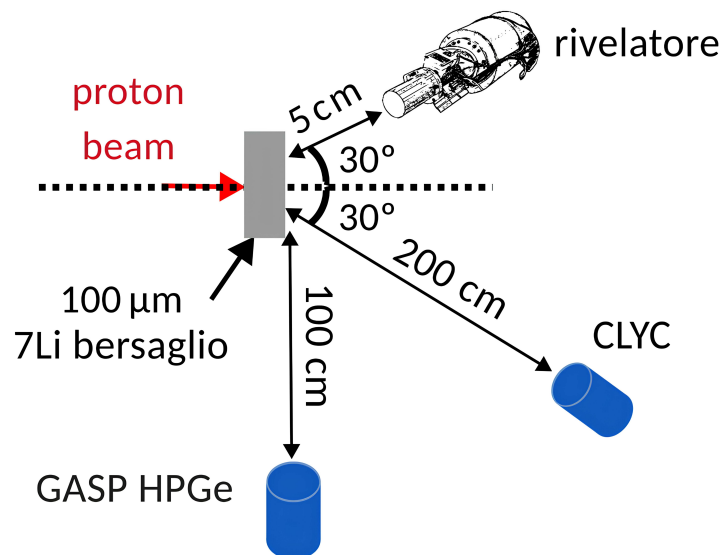


Figura 4.12: *Set up* sperimentale.

Il prototipo è stato posizionato ad un angolo di  $30^\circ$  dalla direzione del fascio e a 5 cm di distanza dalla sorgente di neutroni. Il rivelatore di GASP invece è stato disposto in modo da non essere colpito direttamente dal fascio di neutroni per minimizzare il deterioramento delle sue proprietà e in

particolare per contenere le fluttuazioni del fattore di efficienza necessario al calcolo del numero di raggi  $\gamma$  emessi nel decadimento del  $^7\text{Be}$ . I due scintillatori invece sono stati disposti nella direzione simmetrica rispetto a quella del prototipo e ad una distanza di 200 cm dalla sorgente dei neutroni.

## 4.2 Raccolta ed analisi dati

Sono stati portati a termine due esperimenti per osservare il comportamento delle proprietà del rivelatore in seguito all'irraggiamento con un fascio di neutroni. Nel primo il prototipo è stato irradiato dal flusso di neutroni in intervalli della durata di 20 minuti. Negli intervalli tra le fasi di irraggiamento sono state eseguite le *run* di misurazione con una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  alle tre diverse tensioni per valutare le proprietà del prototipo. I tempi di irraggiamento usati nel primo esperimento sono stati troppo lunghi e non hanno permesso di osservare dettagliatamente l'andamento del deterioramento della risoluzione e dell'efficienza del prototipo, però i risultati ottenuti sono serviti a determinare i parametri da usare per il secondo esperimento.

Tra i due esperimenti il prototipo è stato sottoposto a procedure di *annealing*, seguite da nuove misurazioni di caratterizzazione per garantire che le condizioni iniziali del prototipo per il secondo esperimento fossero quanto più simili a quelle che aveva prima dell'irraggiamento con il flusso di neutroni.

Nel secondo esperimento il prototipo è stato irradiato in intervalli di tempo della durata inizialmente di 20 minuti che si sono accorciati al peggiorare delle proprietà del prototipo, in particolare le ultime *run* di misurazione sono state effettuate a seguito di intervalli di irraggiamento di soli 2 minuti.

In figura 4.13, 4.15 e 4.17 viene riportata l'evoluzione della FWHM del picco a 59.5 keV del  $^{241}\text{Am}$  degli spettri ottenuti dai segnali raccolti nei contatti segmentati e nel *core*. In figura 4.14, 4.16 e 4.18 vengono riportati i grafici del numero degli eventi corrispondenti alla rivelazione di raggi  $\gamma$  di energia 59.5 keV. Non sono stati costruiti i grafici con il valore dell'efficienza non essendo ancora stato stimato il valore del fattore di efficienza del prototipo.

Dai grafici è possibile osservare l'andamento del peggioramento delle proprietà del prototipo all'aumentare del numero di neutroni con cui è stato irradiato il cristallo; si può notare che il peggioramento è molto graduale fino a un punto dopo il quale diventa molto veloce, come se ci fosse un effetto soglia.

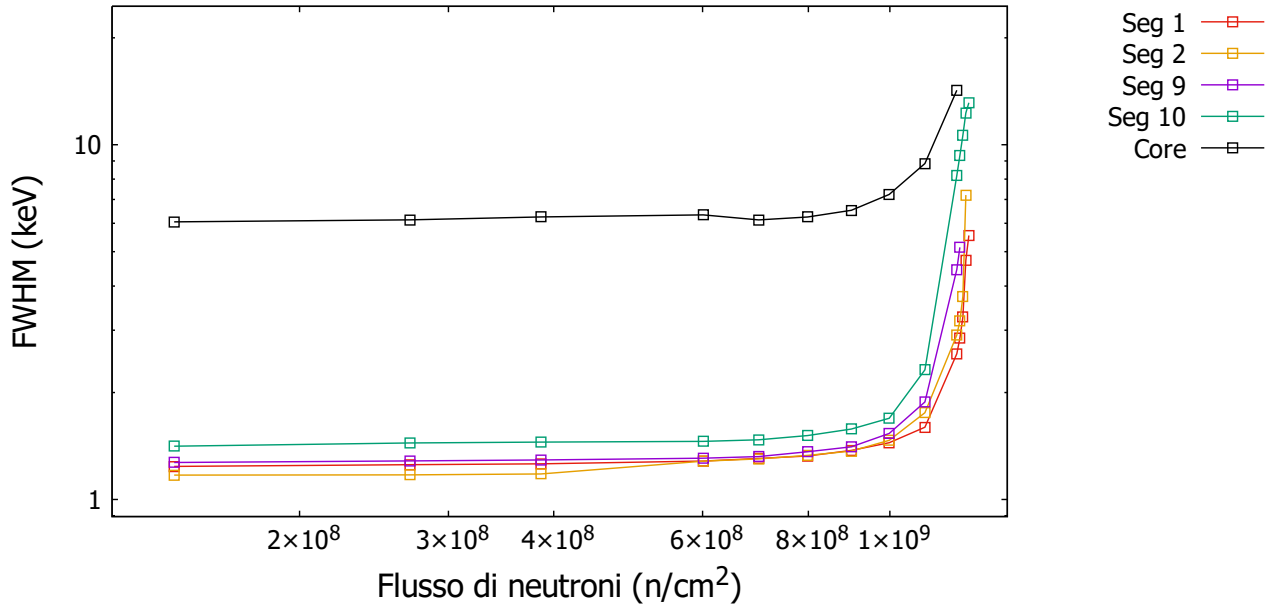


Figura 4.13: Risoluzione (FWHM) alla tensione di 80 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di <sup>241</sup>Am al variare del flusso di neutroni.

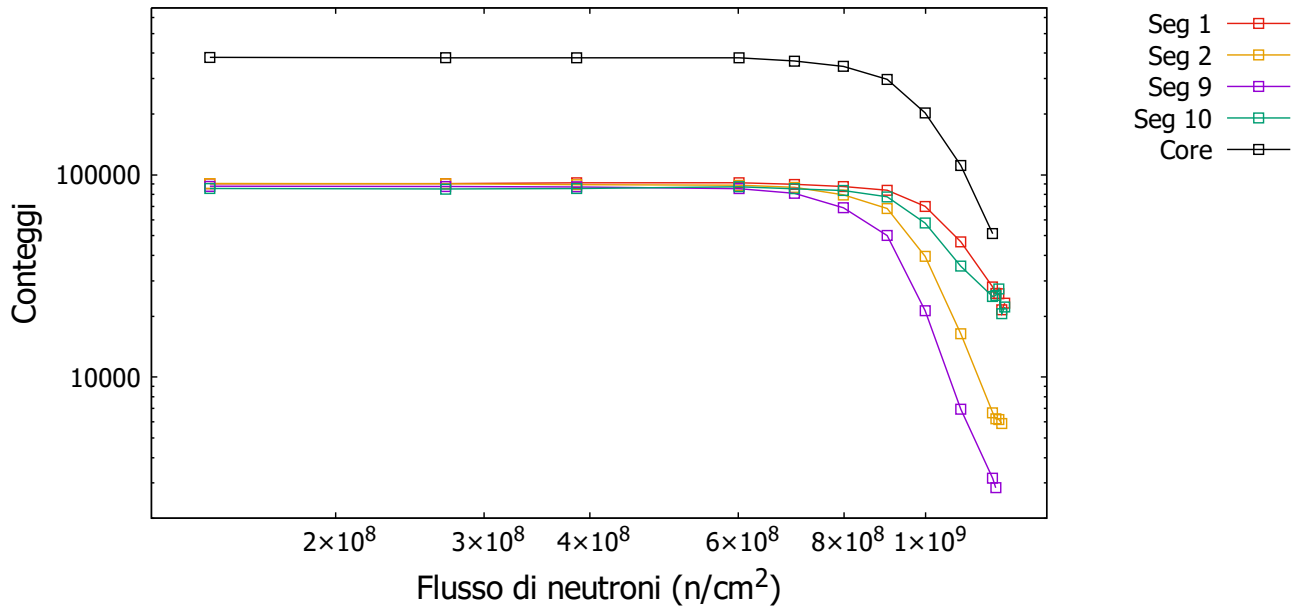


Figura 4.14: Efficienza assoluta alla tensione di 80 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di <sup>241</sup>Am al variare del flusso di neutroni.

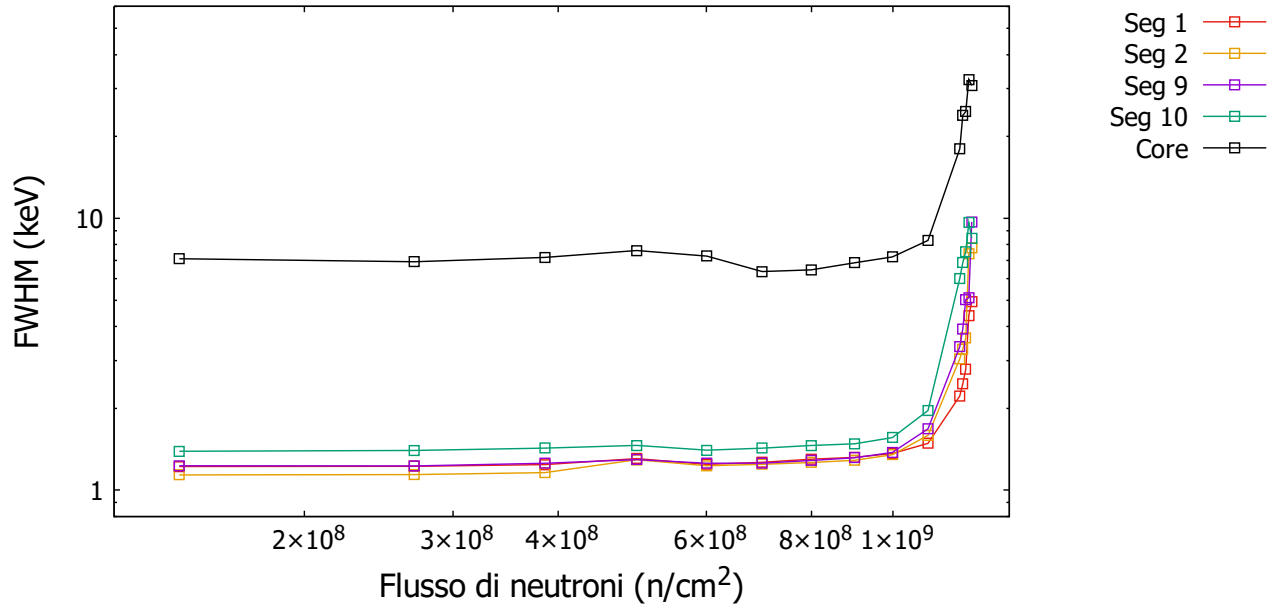


Figura 4.15: Risoluzione (FWHM) alla tensione di 120 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  al variare del flusso di neutroni.

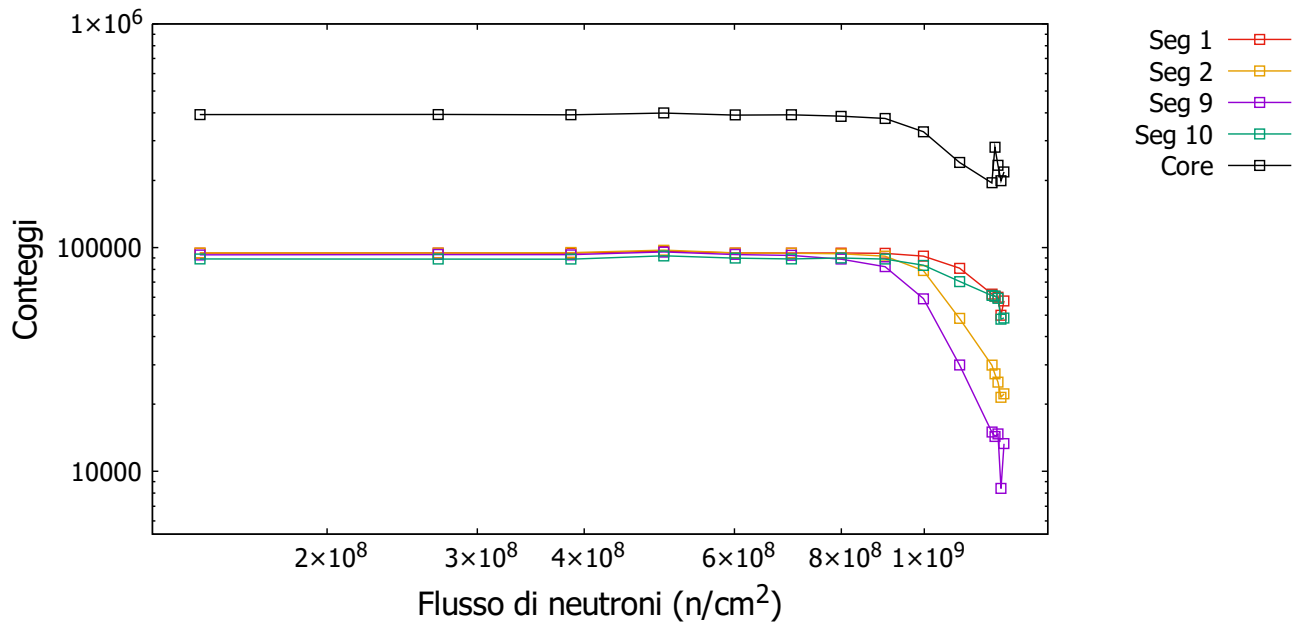


Figura 4.16: Efficienza assoluta alla tensione di 120 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  al variare del flusso di neutroni.

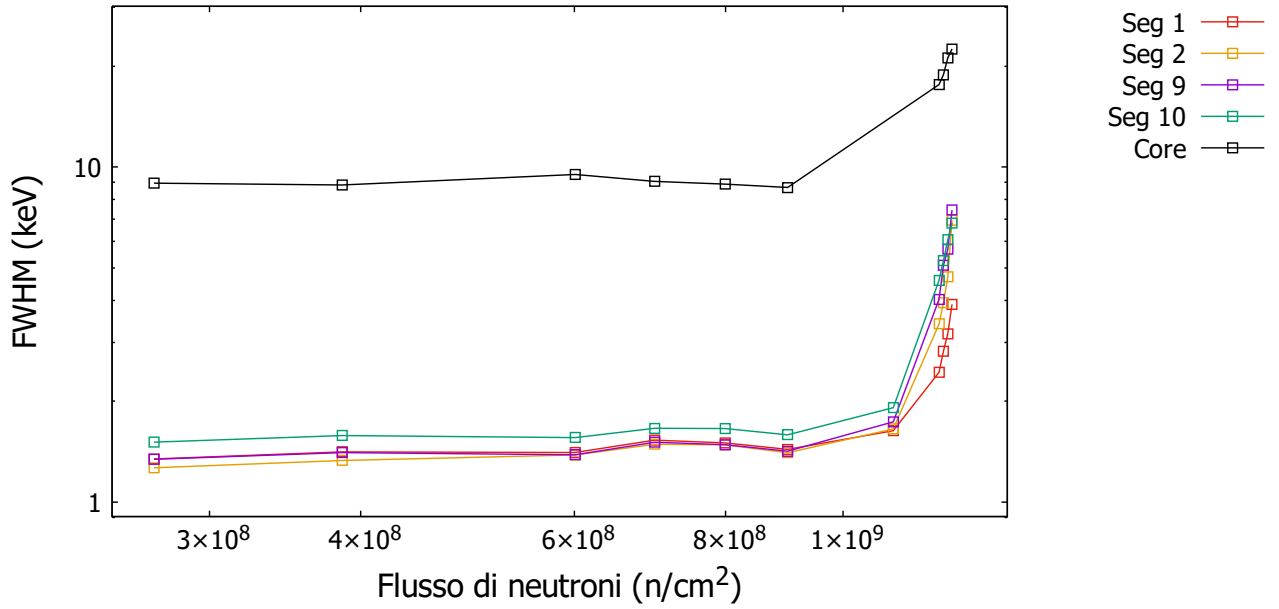


Figura 4.17: Risoluzione (FWHM) alla tensione di 160 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di <sup>241</sup>Am al variare del flusso di neutroni.

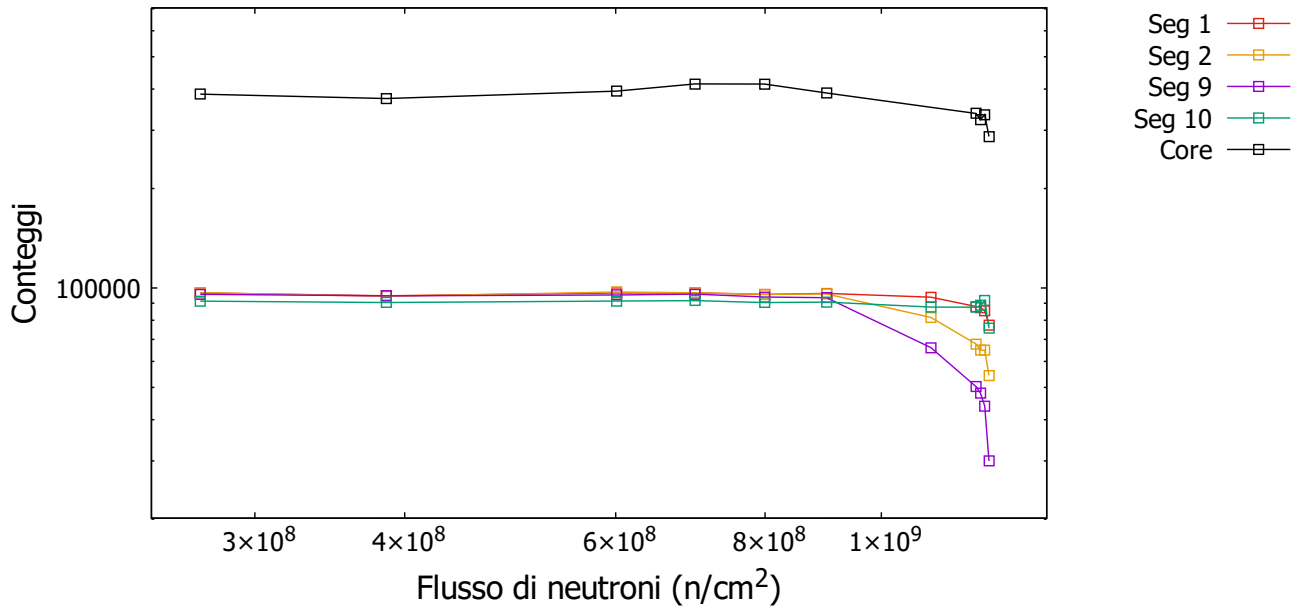


Figura 4.18: Efficienza assoluta alla tensione di 160 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di <sup>241</sup>Am al variare del flusso di neutroni.



# Conclusione

Gli spettrometri composti da rivelatori al germanio a tracciamento gamma rappresentano un grande sviluppo nell'ambito della spettroscopia gamma ad alta risoluzione. Questi rivelatori hanno permesso lo studio di eventi molto rari anche grazie all'ampiezza dell'angolo solido che riescono a coprire data l'assenza degli scudi anti-Compton che invece caratterizzavano i rivelatori della generazione precedente. Ad oggi i rivelatori come AGATA sono costruiti da cristalli coassiali di tipo  $n$  con contatti esterni segmentati  $p^+$  e contatti centrali  $n^+$ . Questi rivelatori sono soggetti al danneggiamento da neutroni veloci che vengono prodotti nelle reazioni nucleari e di conseguenza necessitano di essere sottoposti periodicamente a procedure di *annealing*. Al fine di limitare i costi di manutenzioni dei rivelatori altamente segmentati sono state sviluppate nuove tecniche per la produzione di contatti sottili che permetteranno la realizzazione di rivelatori HPGe di tipo  $p$  con contatti esterni segmentati  $n^+$  e contatti comuni  $p^+$ .

Nel lavoro di tesi è stato osservato il comportamento delle proprietà di un prototipo di rivelatore realizzato con un cristallo planare di tipo  $p$  prodotto nei *Laboratori Nazionali di Legnaro* (LNL) all'interno del progetto *Next Generation Germanium Gamma detectors* (N3G) in seguito all'irraggiamento con un fascio di neutroni. I grafici costruiti dai dati ottenuti negli esperimenti mostrano che il deterioramento del prototipo avviene in maniera molto graduale fino al raggiungimento di un punto di soglia oltre il quale la risoluzione e l'efficienza peggiorano molto velocemente.

Gli esperimenti finora eseguiti con il prototipo sono stati solo preliminari alle future attività di ricerca che hanno come obiettivo la realizzazione di grandi spettrometri composti da rivelatori altamente segmentati con cristalli di tipo  $p$ .





# Elenco delle figure

1.1	Definizione di risoluzione di un rivelatore. Presa da [1]. . . . .	2
1.2	Confronto fra gli spettri ottenuti da una sorgente di $^{60}\text{Co}$ tramite uno scintillatore a ioduro di sodio (NaI) e un rivelatore al germanio (Ge). Presa da [2]. . . . .	3
1.3	Sezione d'urto di effetto fotoelettrico, scattering Compton e produzione di coppia del germanio. Presa da [4]. . . . .	3
1.4	Esempio di come viene valutata l'efficienza di un picco energetico di una sorgente di raggi $\gamma$ . Presa da [1]. . . . .	4
2.5	Spettro energetico prodotto da un rivelatore di raggi $\gamma$ prima del danneggiamento da neutroni in blu e lo spettro alla stessa energia in seguito al danneggiamento da neutroni in rosso. Adattata da [14]. . . . .	6
2.6	Sezioni trasversali di un cristallo coassiale di germanio di tipo $n$ e di tipo $p$ . Adattata da [1]. . . . .	6
2.7	Schema del cristallo del prototipo. . . . .	7
3.8	Segnale in tensione generato da un raggio $\gamma$ di energia 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ raccolto da un segmento. . . . .	9
3.9	Segnale in tensione generato da un raggio $\gamma$ di energia 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ raccolto dal <i>core</i> . . . . .	9
3.10	Risoluzione energetica di un picco energetico a 59.9 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare della tensione. . . . .	10
3.11	Efficienza assoluta di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare della tensione. . . . .	10
4.12	<i>Set up</i> sperimentale. . . . .	11
4.13	Risoluzione (FWHM) alla tensione di 80 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare del flusso di neutroni. . . . .	13
4.14	Efficienza assoluta alla tensione di 80 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare del flusso di neutroni. . . . .	13
4.15	Risoluzione (FWHM) alla tensione di 120 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare del flusso di neutroni. . . . .	14
4.16	Efficienza assoluta alla tensione di 120 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare del flusso di neutroni. . . . .	14
4.17	Risoluzione (FWHM) alla tensione di 160 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare del flusso di neutroni. . . . .	15
4.18	Efficienza assoluta alla tensione di 160 V di un picco energetico a 59.5 keV emesso da una sorgente di $^{241}\text{Am}$ al variare del flusso di neutroni. . . . .	15



# Bibliografia

- [1] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurements*. Jhon Wiley & Sons, 1989.
- [2] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, 1987.
- [3] G. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectrometry*. Jhon Wiley & Sons, 2008.
- [4] F. Recchia, *In-beam test and imaging capabilities of the AGATA prototype detector*. PhD Thesis, Università degli Studi di Padova, 2008.
- [5] J. Eberth e Altri, *Agata detector technology: recent progress and future developments*. The European Physical Journal A, 2023.
- [6] R. Escudeiro, *Lifetime measurements with the gamma-ray tracking array AGATA*. PhD Thesis, Università di San Paolo, 2020.
- [7] S. Akkoyum e Altri, *AGATA - Advanced GAMMA Tracking Array*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 668, pp 26-58, 2012.
- [8] S. Alessi, *Realization methods of hyperpure germanium detectors with pulsed laser junction*. Tesi magistrale, Università di Padova, 2020.
- [9] J. Eberth e J. Simpson, *From Ge(Li) detectors to gamma-ray tracking arrays - 50 years of gamma spectroscopy with germanium detectors*. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2008.
- [10] S. Bertold e Altri, *New method for the production of thin and stable, segmented n+ contacts in HPGe detectors*. The European Journal A, 2021.
- [11] M. Descovich e Altri, *Effects of neutron damage on the performance of large volume segmentedgermanium detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol.545, pp 199-209, 2005.
- [12] W. Raudorf e H. Pehl, *Effect of charge carrier trapping on germanium coaxial detector line shapes*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol.255, pp 538-551, 1987.
- [13] S. Darken e Altri, *Mechanism for fast neutron damage of Ge(HP) detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol.171, pp 49-59, 1980.
- [14] B. Bruyneel e Altri, *Correction for hole trapping in AGATA detectors using pulse shape analysis*. The European Journal A, 2013.