



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Misure di spettroscopia gamma per l’esperimento

SPES-MED

Relatore

Prof. Sandra Moretto

Correlatore

Dr. Aurora Leso

Laureando

Giulia Persi

Anno Accademico 2025/2026



# Abstract

La tesi proposta si inserisce nell'ambito del progetto SPES (Selective Production of Exotic Species) e in particolare nel progetto SPES-MED dell'INFN e ha come obiettivo la caratterizzazione di quattro rivelatori per spettroscopia gamma: un rivelatore a germanio iperpuro (HPGe), un rivelatore a ioduro di sodio drogato con tallio (NaI(Tl)), un rivelatore al bromocloruro di lantanio drogato con cerio (LBC) e un rivelatore al bromuro di lantanio drogato con cerio (LaBr).

Le misure sono state eseguite utilizzando diverse sorgenti radioattive gamma. Gli spettri acquisiti sono stati analizzati mediante il framework ROOT, con cui sono stati effettuati la calibrazione energetica dei rivelatori, l'identificazione dei fotopicchi e la determinazione della risoluzione energetica attraverso fit gaussiani. L'efficienza intrinseca è stata invece valutata mediante simulazioni Monte Carlo realizzate con la piattaforma Geant4, riproducendo il setup sperimentale impiegato durante le misure.

I risultati ottenuti hanno consentito di caratterizzare le prestazioni dei rivelatori esaminati e di confrontarne il comportamento in termini di calibrazione energetica, risoluzione ed efficienza intrinseca, fornendo un quadro complessivo delle loro caratteristiche per applicazioni di spettroscopia gamma per la misura di radionuclidi medici.

# Indice

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abstract</b>                                     | <b>2</b>  |
| <b>1 Introduzione</b>                               | <b>4</b>  |
| 1.1 SPES . . . . .                                  | 4         |
| 1.2 Rivelatori di radiazione . . . . .              | 5         |
| 1.2.1 Rivelatori a scintillazione . . . . .         | 5         |
| 1.2.2 Rivelatori a semiconduttore . . . . .         | 6         |
| <b>2 Apparato sperimentale</b>                      | <b>8</b>  |
| 2.1 Rivelatori utilizzati . . . . .                 | 8         |
| 2.1.1 Rivelatore Bromocloruro di Lantanio . . . . . | 8         |
| 2.1.2 Rivelatore Bromuro di Lantanio . . . . .      | 9         |
| 2.1.3 Rivelatore Ioduro di Sodio . . . . .          | 9         |
| 2.1.4 Rivelatore a Germanio iperpuro . . . . .      | 10        |
| 2.2 Sistema di read-out . . . . .                   | 11        |
| 2.3 Sistema di acquisizione dati . . . . .          | 11        |
| 2.4 Analisi dati . . . . .                          | 11        |
| 2.4.1 Calibrazione energetica . . . . .             | 11        |
| 2.4.2 Risoluzione . . . . .                         | 12        |
| 2.4.3 Efficienza intrinseca . . . . .               | 12        |
| <b>3 Risultati sperimentali</b>                     | <b>14</b> |
| 3.1 Calibrazione energetica . . . . .               | 14        |
| 3.1.1 Rivelatore LBC . . . . .                      | 14        |
| 3.1.2 Rivelatore LaBr . . . . .                     | 16        |
| 3.1.3 Rivelatore NaI . . . . .                      | 18        |
| 3.1.4 Rivelatore HPGe . . . . .                     | 19        |
| 3.2 Risoluzione . . . . .                           | 21        |
| 3.3 Risultati efficienza intrinseca . . . . .       | 24        |
| <b>4 Conclusioni</b>                                | <b>27</b> |
| <b>Bibliografia</b>                                 | <b>31</b> |

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 SPES

Il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*), sviluppato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (LNL-INFN), è una struttura ISOL (*Isotope Separation On-Line*) di seconda generazione dedicata alla produzione di fasci di ioni radioattivi (RIBs, Radioactive Ion Beams). [1]

La facility SPES utilizza un intenso fascio di protoni fornito dal ciclotrone BEST 70p per indurre reazioni nucleari all'interno di un bersaglio di produzione, generando radionuclidi in un intervallo di massa compreso tra 80 e 160 amu. I radionuclidi prodotti nel bersaglio vengono successivamente rilasciati attraverso processi di diffusione ed effusione, ionizzati ed estratti sotto forma di fascio ionico. Dopo una prima accelerazione, il fascio viene sottoposto a diverse fasi di separazione elettromagnetica che consentono di ottenere fasci di ioni radioattivi caratterizzati da elevata purezza isotopica. [2]

Questa tecnica, sviluppata per studi di fisica nucleare, ha trovato poi importanti applicazioni in ambito medico. In particolare, i radionuclidi prodotti possono venire poi raccolti su opportuni bersagli secondari per applicazioni di interesse medico. La tesi si inserisce proprio in questo contesto per applicazione medica.

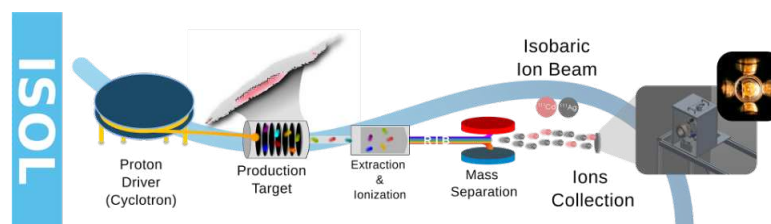


Figura 1.1: Schema del metodo ISOL

Per garantire la qualità dei radionuclidi prodotti, infatti, è necessario verificarne l'identità e la purezza radionuclidica mediante tecniche di spettroscopia gamma. In questo ambito, i rivelatori rivestono un ruolo fondamentale, poiché consentono di identificare i radionuclidi attraverso l'analisi delle energie della radiazione emessa. Oltre alla caratterizzazione dei radionuclidi prodotti, tali sistemi trovano un ampio impiego anche nelle applicazioni di medicina nucleare, dove vengono utilizzati per la caratterizzazione dei radiofarmaci, l'imaging diagnostico e il monitoraggio della radioattività. La scelta della tecnologia di rivelazione più adatta dipende dalle caratteristiche della radiazione da misurare e dalle prestazioni richieste dalla specifica applicazione. In questo contesto si inserisce il presente lavoro di tesi, il cui obiettivo è la caratterizzazione e il confronto delle prestazioni di quattro diversi rivelatori per spettroscopia gamma mediante lo studio della calibrazione energetica, della risoluzione energetica e dell'efficienza intrinseca.

## 1.2 Rivelatori di radiazione

I *rivelatori di radiazione* sono dispositivi in grado di rivelare e misurare particelle o fotoni emessi da sorgenti radioattive, convertendo l'energia depositata dalla radiazione in un segnale elettrico misurabile. Le loro prestazioni, in termini di efficienza, risoluzione energetica e risposta temporale, influenzano direttamente la qualità delle misure effettuate.

Dato che i rivelatori utilizzati per questa tesi si basano su differenti meccanismi di rivelazione, si introducono in breve i principi di funzionamento degli scintillatori e dei rivelatori a semiconduttore.

### 1.2.1 Rivelatori a scintillazione

Gli *scintillatori* sono materiali che producono scintille di luce quando assorbono energia da radiazioni ionizzanti. Generalmente, un rivelatore a scintillazione è costituito da un materiale scintillante accoppiato otticamente a un fotomoltiplicatore o a un rivelatore a stato solido, che raccoglie la luce prodotta, solitamente di bassa intensità, e la converte in un segnale elettrico.

Si distinguono due tipi di scintillatori: *organici* e *inorganici*. La differenza principale è legata al meccanismo di emissione determinato dalla diversa struttura dei livelli energetici dei materiali che li compongono.

Gli **scintillatori inorganici** sono cristalli di metalli alcalini, soprattutto ioduri alcalini, contenenti una piccola concentrazione di un'impurità detta attivatore. In questi scintillatori il meccanismo di emissione è legato alla struttura cristallina del materiale: la struttura a bande energetiche determina i livelli energetici disponibili per gli elettroni negli isolanti e semiconduttori, come mostrato in Figura 1.2. Questi materiali presentano un intervallo di energie proibite (gap) tra la banda di conduzione e quella di valenza: nella banda di valenza si trovano gli elettroni più legati all'atomo, mentre nella banda di conduzione si trovano gli elettroni che possiedono energia sufficiente per muoversi all'interno del cristallo. In un cristallo puro non sono presenti stati elettronici nel gap proibito. [3]

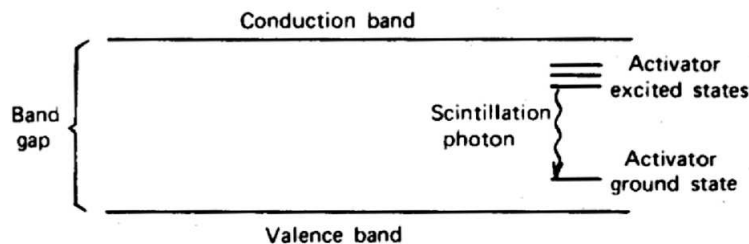


Figura 1.2: Bande di energia di un materiale inorganico con attivatore [3]

La radiazione incidente deposita energia nel materiale, promuovendo elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione e generando coppie elettrone-lacuna. Gli attivatori introducono livelli energetici all'interno del gap proibito che favoriscono la ricombinazione radiativa e l'emissione di fotoni nel visibile. I centri in cui avviene questo processo sono detti **centri di luminescenza o di ricombinazione** e determinano lo spettro di emissione del materiale. [3]

Gli **scintillatori organici** sono materiali generalmente a base di idrocarburi aromatici, cioè composti organici contenenti anelli benzenici collegati tra loro in vari modi. [3] A differenza degli scintillatori inorganici, il processo di scintillazione non è legato alla struttura a bande del materiale, ma ha origine da transizioni tra stati molecolari eccitati. Essi sono caratterizzati da tempi di diseccitazione molto brevi, dell'ordine di pochi nanosecondi, ma presentano generalmente una resa luminosa e una risoluzione energetica inferiori rispetto agli scintillatori inorganici.

## Fotomoltiplicatori

La luce emessa da uno scintillatore deve essere convertita in un segnale elettrico per poter essere acquisita e analizzata. Per far questo viene comunemente utilizzato un tubo fotomoltiplicatore (PMT): un dispositivo in grado di rilevare e amplificare la luce di scintillazione.

In generale, un fotomoltiplicatore è costituito da un tubo di vetro sotto vuoto all'interno del quale viene applicata una differenza di potenziale di alcune centinaia di Volt tra fotocatodo e anodo. La struttura interna del PMT comprende una serie di elettrodi mantenuti a potenziali crescenti. I fotoni incidenti sul fotocatodo producono fotoelettroni per effetto fotoelettrico. Gli elettroni vengono accelerati verso elettrodi successivi (dinodi), dove generano ulteriori elettroni per emissione secondaria. La ripetizione di questo processo amplifica il segnale iniziale fino a ottenere un impulso elettrico misurabile all'anodo. I fotomoltiplicatori devono essere schermati magneticamente poiché campi magnetici esterni, anche di intensità comparabile a quello terrestre, possono deviare la traiettoria degli elettroni e modificarne il guadagno. [4]

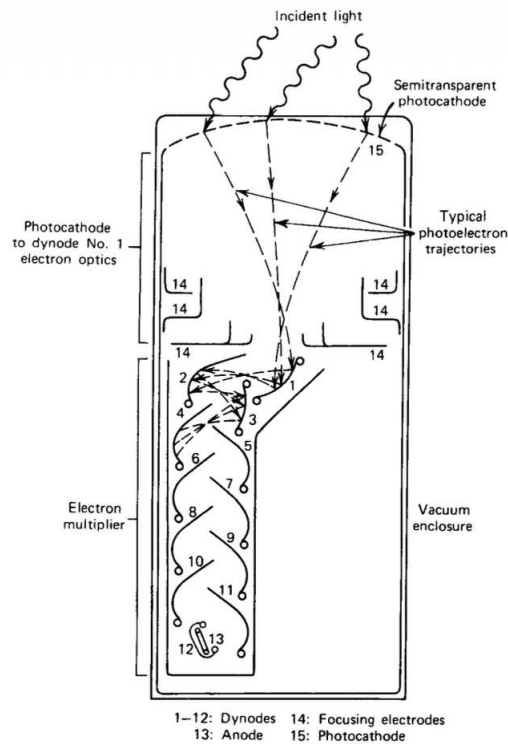


Figura 1.3: Elementi di un PMT [3]

### 1.2.2 Rivelatori a semiconduttore

I *semiconduttori* sono materiali caratterizzati da una banda di valenza quasi completamente occupata e da una banda di conduzione quasi vuota, separate da un gap energetico tipicamente dell'ordine di 1 eV. In presenza di radiazione ionizzante, l'energia depositata nel materiale promuove elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione, generando coppie elettrone-lacuna. Applicando un campo elettrico, gli elettroni e le lacune migrano verso elettrodi opposti, producendo un segnale elettrico misurabile. L'ampiezza del segnale è proporzionale al numero di coppie generate e quindi all'energia depositata dalla radiazione. L'energia necessaria per creare una coppia elettrone-lacuna è di qualche eV, almeno 10 volte inferiore rispetto agli scintillatori. Questo riduce le fluttuazioni statistiche del segnale e consente di ottenere una migliore risoluzione energetica. [3] [5]

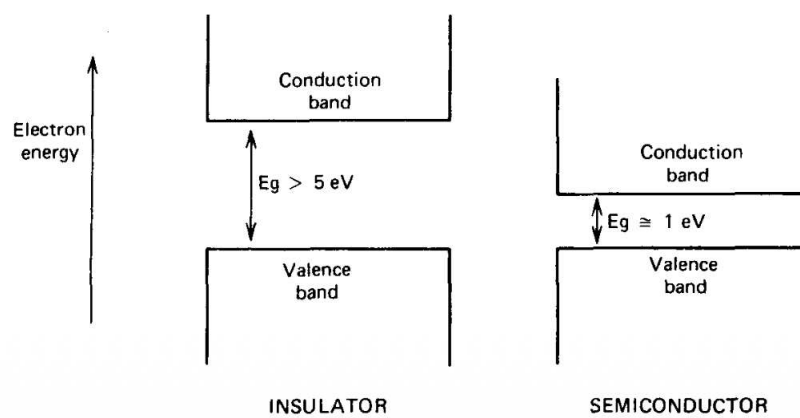


Figura 1.4: Struttura a bande delle energie degli elettroni negli isolanti e nei semiconduttori [3]

## Capitolo 2

# Apparato sperimentale

In questo lavoro sono stati utilizzati tre rivelatori a scintillazione inorganici e un rivelatore a semiconduttore.

Nei paragrafi seguenti vengono descritte le principali caratteristiche di questi rivelatori e le loro specifiche tecniche.

### 2.1 Rivelatori utilizzati

#### 2.1.1 Rivelatore Bromocloruro di Lantanio

Il **rivelatore a scintillazione Bromocloruro di Lantanio** ( $LaBr_{2.85}Cl_{0.15} : Ce$ , LBC) utilizzato in questo lavoro è prodotto da Scionix. Il detector è costituito da un cristallo scintillatore di 1.5" di diametro accoppiato otticamente a un fotomoltiplicatore (PMT: ET-9807B) e racchiuso in un rivestimento di protezione. Il PMT è a sua volta schermato per ridurre gli effetti dei campi magnetici esterni sul moto degli elettroni al suo interno.

Gli scintillatori LBC combinano buone prestazioni di rivelazione con una maggiore robustezza meccanica. In particolare, presentano una risoluzione energetica dell'ordine del 3% FWHM (*full width at half maximum*) a 662 keV. Tuttavia, il decadimento naturale dell'isotopo  $^{138}La$  presente nel cristallo produce un fondo intrinseco che contribuisce ai conteggi di fondo del rivelatore. Il  $^{138}La$  decade in uno stato eccitato del nucleo figlio, con conseguente emissione di raggi  $\gamma$  di diseccitazione: 1436 keV per il  $^{138}Ba$  decadimento  $\epsilon$  e 789 keV  $^{138}Ce$  decadimento  $\beta$  [6] [7]

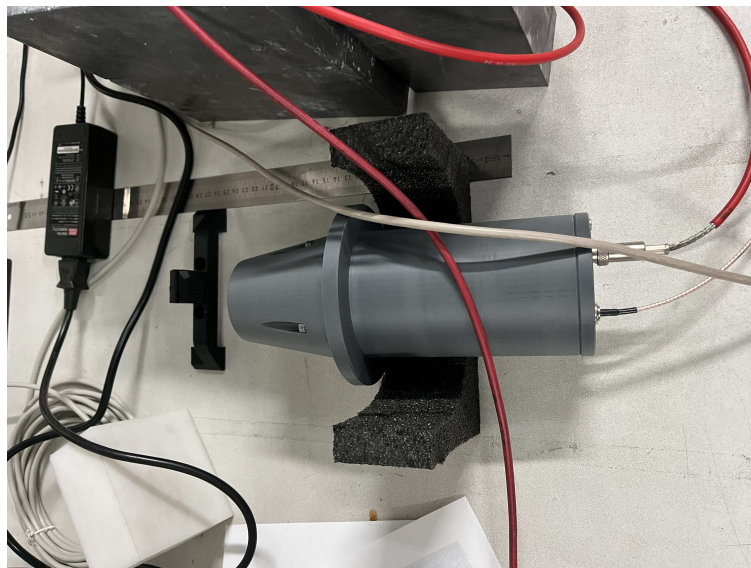


Figura 2.1: Rivelatore LBC

### 2.1.2 Rivelatore Bromuro di Lantanio

Il **rivelatore a scintillazione Bromuro di Lantanio** ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , LaBr) utilizzato è prodotto dalla ditta Saint Gobain ed è costituito da un cristallo scintillatore di 3" di bromuro di lantanio drogato con cerio, accoppiato otticamente a un fotomoltiplicatore (PMT: Hamamatsu H15265-100-0) e racchiuso in un opportuno rivestimento di protezione. [8]

Gli scintillatori LaBr sono caratterizzati da un'elevata resa luminosa e da un'ottima risoluzione energetica. Presentano una risoluzione tipica compresa tra il 2.5% e il 3.5% FWHM alla linea di 662 keV del  $^{137}\text{Cs}$ . Inoltre, il materiale presenta tempi di decadimento relativamente rapidi e una minore sensibilità alle variazioni di temperatura e umidità ambientale.

Come lo scintillatore LBC, anche il LaBr presenta un fondo intrinseco dovuto principalmente al decadimento naturale dell'isotopo  $^{138}\text{La}$ , che contribuisce allo spettro di fondo del rivelatore. .



Figura 2.2: Rivelatore LaBr

### 2.1.3 Rivelatore Ioduro di Sodio

Il **rivelatore Ioduro di Sodio** ( $\text{NaI}(\text{Tl})$ , NaI) utilizzato in questo lavoro è uno scintillatore inorganico costituito da un cristallo di ioduro di sodio drogato con tallio, accoppiato a un fotomoltiplicatore (PMT utilizzato: Hamamatsu H15265-100-01) per la conversione della luce di scintillazione in segnale elettrico. Il cristallo impiegato ha un diametro di 5 pollici.

I cristalli di NaI sono tra i materiali scintillatori più utilizzati per la rivelazione della radiazione gamma grazie alla loro elevata resa luminosa e alla buona corrispondenza tra il loro spettro di emissione e la sensibilità dei fotomoltiplicatori, caratteristiche che consentono di ottenere una buona risoluzione energetica. Il NaI è inoltre uno scintillatore relativamente economico e può essere prodotto in cristalli di grandi dimensioni. [9]

Essendo un materiale igroscopico, il rivelatore NaI deve essere racchiuso in un contenitore ermetico per evitare il deterioramento dovuto all'assorbimento di umidità. Il cristallo risulta inoltre piuttosto fragile e può essere danneggiato da shock meccanici o termici. [3]



Figura 2.3: NaI

#### 2.1.4 Rivelatore a Germanio iperpuro

Il **Germanio iperpuro, HPGe** utilizzato è un Mirion REGe GR3021 (*Reverse-Electrode Detector*). Questo rivelatore presenta una configurazione degli elettrodi invertita rispetto a quella di un rivelatore coassiale convenzionale: il contatto di tipo p, ottenuto mediante impianto ionico di boro, è posto sulla superficie esterna del cristallo, mentre il contatto di tipo n, ottenuto tramite diffusione di litio, è situato internamente. Questa configurazione offre due vantaggi principali: uno spessore ridotto del contatto esterno e una maggiore resistenza ai danni da radiazione. Lo spessore molto ridotto del contatto esterno (circa  $0,3 \mu\text{m}$ ) consente infatti una maggiore trasmissione dei fotoni a bassa energia e permette al rivelatore di operare in un ampio intervallo energetico, da circa 3 keV fino a diversi MeV.

Inoltre, nei rivelatori REGe la raccolta delle lacune avviene verso il contatto esterno; poiché la distanza media percorsa dalle cariche è minore rispetto ai rivelatori coassiali convenzionali, diminuisce la probabilità di intrappolamento dovuta ai difetti introdotti dalla radiazione. Questo rende il rivelatore più resistente al danno da radiazione rispetto alle configurazioni tradizionali.

Come gli altri rivelatori HPGe, il rivelatore deve operare a basse temperature (circa 77K) per ridurre il rumore elettronico e preservare l'elevata risoluzione energetica caratteristica dei semiconduttori al germanio. [10]



Figura 2.4: HPGe

| Rivelatore | Emissione<br>$\lambda_{max}$ (nm) | Densità<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Resa luminosa<br>(ph/MeV) | Tempo di<br>decadimento (ns) | Risoluzione a<br>662 keV (%) |
|------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
| LBC        | 350–380                           | 4.9                             | 60000                     | 35                           | 3.3–3.5                      |
| LaBr       | 358                               | 5.29                            | 60000                     | 16                           | 2.5–3.0                      |
| NaI        | 415                               | 3.67                            | 38000                     | 230                          | 6–7                          |
| HPGe       | -                                 | 5.32                            | -                         | -                            | $\simeq 0.2$                 |

Tabella 2.1: Principali caratteristiche dei rivelatori utilizzati

## 2.2 Sistema di read-out

I segnali prodotti dai rivelatori devono essere elaborati e convertiti in formato digitale prima di poter essere acquisiti e analizzati. Per questo sono stati utilizzati dei digitalizzatori (digitizer): dispositivi che campionano il segnale analogico proveniente dal rivelatore e lo trasformano in una sequenza di dati numerici. Questo processo permette di ricavare informazioni sull'energia depositata dalla radiazione e di salvare gli eventi per le successive analisi.

Per il rivelatore HPGe e per il rivelatore LBC, i segnali sono stati acquisiti tramite un digitalizzatore CAEN DT5780, mentre per i rivelatori NaI e LaBr è stato impiegato un digitalizzatore CAEN VME1730. I segnali digitalizzati sono stati successivamente inviati al sistema di acquisizione dati per la registrazione e l'elaborazione.

## 2.3 Sistema di acquisizione dati

La gestione delle acquisizioni è stata effettuata mediante due differenti sistemi DAQ (Data Acquisition System), utilizzati in funzione della catena elettronica associata ai diversi rivelatori.

Per il rivelatore HPGe e LBC è stato impiegato il software CoMPASS (*CAEN Multi-Parameter Spectroscopy Software*), sviluppato da CAEN per applicazioni di spettroscopia nucleare. [11] Il software permette la configurazione dei parametri di misura, la visualizzazione in tempo reale degli spettri e il monitoraggio delle principali grandezze dell'acquisizione. Inoltre consente il salvataggio dei dati in diversi formati, tra cui ROOT, facilitandone la successiva elaborazione offline.

Per i rivelatori NaI e LaBr è stato invece utilizzato il software ABCD. Questo è un framework di acquisizione dati sviluppato per la gestione di sistemi basati su digitalizzatori utilizzati in esperimenti di fisica nucleare. [12] La sua organizzazione in moduli indipendenti consente di separare le diverse operazioni di acquisizione, elaborazione e memorizzazione dei dati, garantendo una maggiore flessibilità del sistema. Il software supporta digitalizzatori di diversi produttori e permette il monitoraggio degli spettri e la configurazione dei parametri di acquisizione attraverso un'interfaccia web.

## 2.4 Analisi dati

Tutti i dati acquisiti sono stati successivamente elaborati mediante il framework ROOT, sviluppato dal CERN per l'analisi di grandi quantità di dati sperimentali. Questo software è stato utilizzato per la calibrazione energetica degli spettri, la determinazione delle posizioni dei fotopicchi e il calcolo della risoluzione energetica dei rivelatori.

### 2.4.1 Calibrazione energetica

Per convertire i canali dell'ADC nelle corrispondenti energie è stata effettuata una calibrazione energetica usando sorgenti radioattive con energie gamma note. Sono state impiegate le sorgenti <sup>22</sup>Na, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, nel caso dell'HPGe anche <sup>241</sup>Am per estendere la calibrazione alle basse energie e nel caso dell'NaI è stata utilizzata anche la sorgente di <sup>133</sup>Ba.

Per ciascuna sorgente sono stati identificati i fotopicchi caratteristici e la loro posizione in canale (ADC) è stata determinata attraverso un fit gaussiano.

I valori dei canali ottenuti sono stati associati alle corrispondenti energie note (Tabella 2.2), costruendo così la curva di calibrazione energia-canale. I punti sperimentali sono stati interpolati mediante una funzione lineare

$$ADC = m \cdot E + q \quad (2.1)$$

dove l'energia  $E$  è misurata in keV,  $m$  è il guadagno, ADC l'energia in canali (o il numero di canali) e  $q$  l'offset.

|                   | $E_{tab}[\text{keV}]$ | $\sigma_{E_{tab}}[\text{keV}]$ |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 511.0                 | 0.2                            |
| $^{22}\text{Na}$  | 1274.537              | 0.007                          |
| $^{60}\text{Co}$  | 1173.228              | 0.003                          |
| $^{60}\text{Co}$  | 1332.492              | 0.004                          |
| $^{137}\text{Cs}$ | 661.655               | 0.003                          |
| $^{241}\text{Am}$ | 59.5409               | 0.0001                         |
| $^{133}\text{Ba}$ | 356.0129              | 0.0007                         |

Tabella 2.2: Picchi noti di energia in keV [13]

La qualità della calibrazione è stata valutata analizzando i residui del fit e le relative incertezze. Una volta determinati i parametri della retta di calibrazione, questa è stata applicata all'intero spettro per ottenere la scala energetica calibrata.

## 2.4.2 Risoluzione

Una volta completata la calibrazione energetica, è stata valutata la risoluzione energetica dei rivelatori. Per ciascun fotopicco è stato eseguito un fit gaussiano sullo spettro calibrato mediante ROOT, ottenendo i parametri di energia ( $E_{cal}$ ) e deviazione standard ( $\sigma$ ).

A partire dal valore di  $\sigma$  si è trovata la *Full Width at Half Maximum*, FWHM. La larghezza del picco rappresenta la dispersione delle misure attorno al valore medio. Una larghezza minore indica una migliore capacità del rivelatore di distinguere energie vicine. La FWHM è stata calcolata utilizzando la relazione:

$$FWHM = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \sigma \quad \Delta_{FWHM} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \Delta_{\sigma} \quad (2.2)$$

Si è poi determinata la risoluzione energetica  $R$  e la risoluzione in percentuale  $R_{\%}$  come:

$$\begin{aligned} R &= \frac{FWHM}{E_{cal}} & \Delta_R &= R \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_{E_{cal}}}{E_{cal}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{FWHM}}{FWHM}\right)^2} \\ R_{\%} &= \frac{FWHM}{E_{cal}} \cdot 100 & \Delta_{R_{\%}} &= R_{\%} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_{E_{cal}}}{E_{cal}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{FWHM}}{FWHM}\right)^2} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Le incertezze associate sono state ottenute mediante propagazione degli errori a partire dai parametri del fit.

## 2.4.3 Efficienza intrinseca

L'efficienza intrinseca, indicata con ( $\epsilon_{int}$ ), di un rivelatore rappresenta la probabilità che un fotone incidente sul volume sensibile del rivelatore produca un segnale misurabile. Nel caso di raggi gamma, essa

viene calcolata come il rapporto tra il numero di eventi registrati e il numero di fotoni effettivamente incidenti sul rivelatore:

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{numero di fotoni rivelati}}{\text{numero di fotoni incidenti sul rivelatore}} \quad (2.4)$$

dove il numeratore rappresenta il numero di eventi registrati dal rivelatore e il denominatore il numero di fotoni incidenti geometricamente sul cristallo. Se si considera l'efficienza intrinseca totale sopra soglia, essa comprende tutti gli eventi nei quali l'energia depositata nel rivelatore è maggiore della soglia energetica impostata, inclusi quindi sia gli eventi di assorbimento completo sia quelli di deposito parziale di energia.

L'efficienza di fotopicco, invece rappresenta la probabilità che un fotone incidente sul rivelatore interagisca nel cristallo depositando la propria energia e venga quindi registrato nel fotopicco. Essa può essere definita come il rapporto tra il numero di eventi rivelati nel picco di piena energia e il numero di fotoni effettivamente incidenti sul volume sensibile del rivelatore: Essa è definita come:

$$\epsilon_{fotopicco} = \frac{N_{pp}}{N_{inc}} \quad (2.5)$$

$N_{pp}$  viene determinato sperimentalmente mediante la determinazione dell'area del fotopicco, dopo la eventuale sottrazione del contributo di fondo. Il numero di fotoni incidenti  $N_{inc}$ , invece, può essere stimato a partire dall'attività della sorgente, dal tempo di acquisizione, dalla probabilità di emissione della radiazione considerata e dalla frazione di angolo solido sottesa dal rivelatore rispetto alla sorgente. [3]

L'efficienza intrinseca dipende dall'energia dei fotoni incidenti, dalle dimensioni e dalla densità del cristallo scintillatore, nonché dai processi di interazione della radiazione con la materia.

L'efficienza di fotopicco è normalmente inferiore all'efficienza intrinseca totale sopra soglia, poiché non tutti i fotoni incidenti rilasciano completamente la loro energia nel rivelatore: una parte può subire scattering Compton o fuoriuscire dal cristallo dopo aver depositato solo una frazione della propria energia.

## Geant4

Per la determinazione dell'efficienza intrinseca dei rivelatori è stata realizzata una simulazione Monte Carlo mediante Geant4, un pacchetto software open-source sviluppato dal CERN. [14] Questo software permette di simulare il trasporto e l'interazione di particelle e radiazione nella materia, definendo in modo dettagliato la geometria del sistema, i materiali costitutivi, le sorgenti radioattive e i processi fisici coinvolti. Grazie a queste caratteristiche, Geant4 permette di riprodurre numericamente la risposta dei rivelatori e di confrontare i risultati simulati con quelli ottenuti sperimentalmente. In questo lavoro, la simulazione è stata utilizzata per stimare il numero di eventi che depositano l'intera energia del fotone nel rivelatore, così da confrontare l'efficienza intrinseca simulata con quella ricavata dall'analisi degli spettri acquisiti.

## Capitolo 3

# Risultati sperimentali

Le misure sperimentali sono state effettuate presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN.

Prima dell'inizio delle misure, ciascun detector è stato alimentato alla tensione operativa prevista e lasciato stabilizzare: 1200 V per LBC e il LaBr, 4500 V per l'HPGe e 900 V per l'NaI.

Gli spettri così ottenuti sono stati successivamente utilizzati per la calibrazione energetica e per l'analisi delle prestazioni dei detector.

### 3.1 Calibrazione energetica

#### 3.1.1 Rivelatore LBC

Inizialmente sono state determinate le posizioni dei centroidi dei fotopicchi presenti negli spettri non calibrati mediante un fit gaussiano effettuato con ROOT. I valori ottenuti sono stati quindi associati alle corrispondenti energie tabulate.

Si riporta come esempio il fit gaussiano del fotopicco a 1332.5 keV del  $^{60}\text{Co}$ . Gli altri grafici sono riportati in appendice.

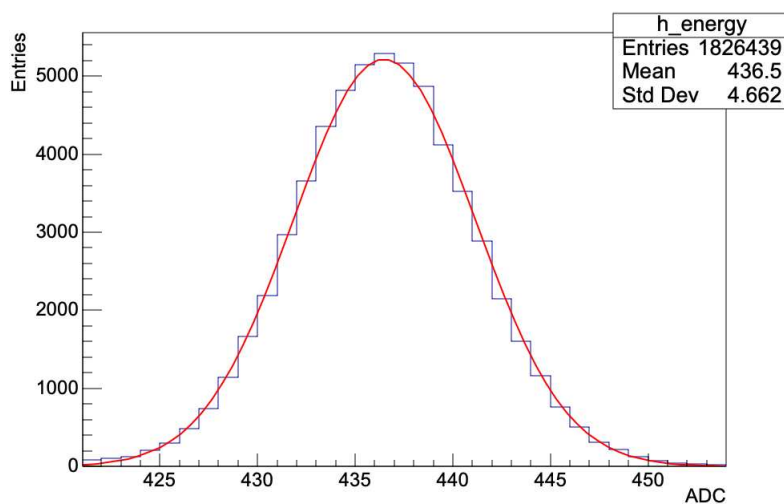


Figura 3.1: Fit gaussiano del fotopicco a 1332.5 keV del  $^{60}\text{Co}$

|                   | ADC     | $\sigma_{ADC}$ | E [keV]  | $\sigma_E$ |
|-------------------|---------|----------------|----------|------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 167.203 | 0.011          | 511.0    | 0.2        |
| $^{22}\text{Na}$  | 415.76  | 0.04           | 1274.537 | 0.007      |
| $^{60}\text{Co}$  | 384.735 | 0.017          | 1173.228 | 0.003      |
| $^{60}\text{Co}$  | 436.473 | 0.019          | 1332.492 | 0.004      |
| $^{137}\text{Cs}$ | 217.592 | 0.006          | 661.655  | 0.003      |

Tabella 3.1: Picchi in canali e i corrispondenti picchi noti in keV

I valori della tabella 3.1 sono stati adattati mediante un fit lineare con il software ROOT, ottenendo la relazione:

$$ADC = (0.32759 \pm 0.00014) \cdot E + (0.097 \pm 0.116)$$

Il valore dell'intercetta è compatibile con lo zero quindi non si osserva uno scostamento significativo dall'origine entro le incertezze.

Il fit restituisce un  $\chi^2 = 150.8$  con 3 gradi di libertà, corrispondente ad un  $\chi^2_{rid} = \frac{\chi^2}{ndf} = 50.3$ . Questo risultato è elevato rispetto al valore atteso unitario ed è attribuibile al fatto che le incertezze sui punti derivano dagli errori statistici sui centroidi dei picchi ottenuti tramite fit gaussiano e risultano essere molto piccole. Quindi il  $\chi^2$  evidenzia la presenza di errori sistematici non inclusi. Va inoltre osservato che il fit è stato eseguito su un numero limitato di punti sperimentali (N=5).

Per verificare la qualità della calibrazione è stato realizzato il grafico dei residui, ottenuti come differenza tra le energie tabulate e quelle restituite dalla retta di calibrazione.

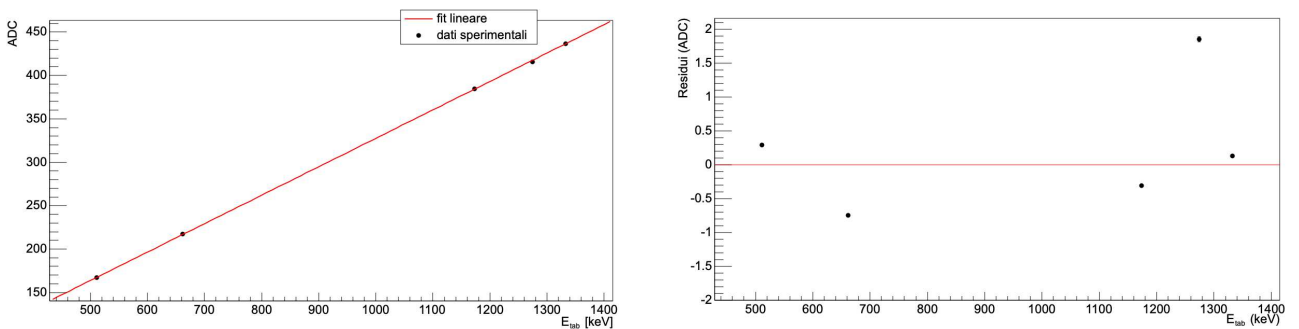


Figura 3.2: Fit lineare e grafico dei residui

I residui risultano distribuiti attorno allo zero senza andamenti sistematici, indicando che il modello lineare descrive correttamente la risposta del rivelatore.

Applicando la relazione di calibrazione, è stato possibile calibrare l'intero spettro (Figura 3.3).

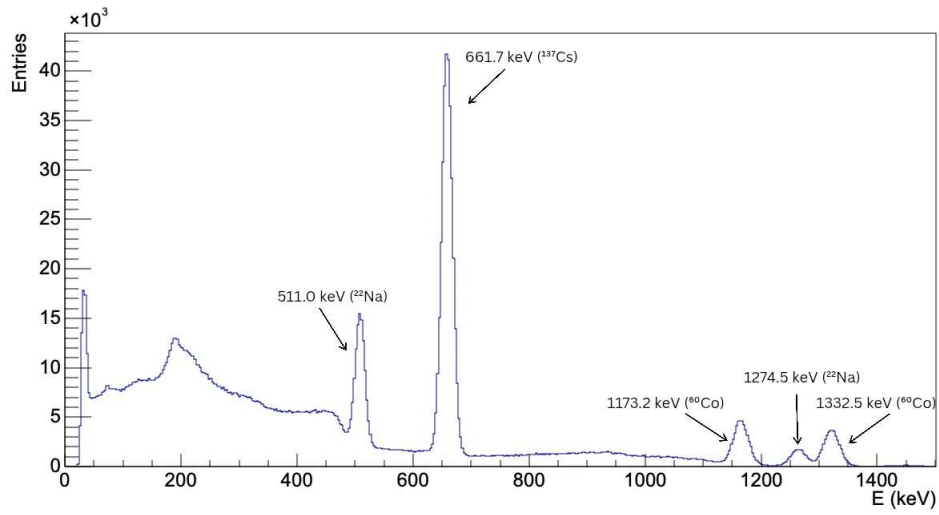


Figura 3.3: Spettro calibrato

### 3.1.2 Rivelatore LaBr

La stessa procedura descritta nel paragrafo precedente è stata applicata anche al rivelatore LaBr.

Le posizioni dei massimi di energia per le sorgenti del  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$  sono state determinate mediante fit gaussiano attraverso il software ROOT e associate ai picchi noti. In seguito si trova il grafico del fit gaussiano del fotopicco a 1274.5 keV del  $^{22}\text{Na}$ , gli altri si riportano in appendice.

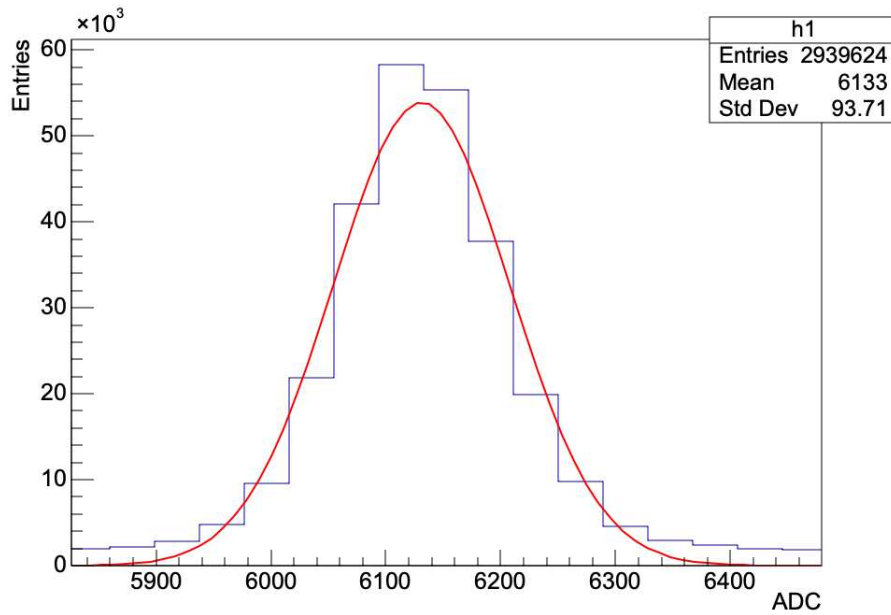


Figura 3.4: Fit gaussiano del fotopicco a 1274.5 keV del  $^{22}\text{Na}$

|                   | ADC     | $\sigma_{ADC}$ | E [keV]  | $\sigma_E$ |
|-------------------|---------|----------------|----------|------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 2470.3  | 0.05           | 511.0    | 0.2        |
| $^{22}\text{Na}$  | 6130.77 | 0.15           | 1274.537 | 0.007      |
| $^{60}\text{Co}$  | 5648.28 | 0.07           | 1173.228 | 0.003      |
| $^{60}\text{Co}$  | 6405.12 | 0.07           | 1332.492 | 0.004      |
| $^{137}\text{Cs}$ | 3209.90 | 0.02           | 661.655  | 0.003      |

Tabella 3.2: Picchi in canali e i corrispondenti picchi noti in keV

Durante la fase di calibrazione è stato osservato che il punto relativo alla linea del  $^{137}\text{Cs}$  presentava una deviazione maggiore rispetto agli altri punti sperimentali. Nonostante diversi tentativi di ridefinizione del fit del fotopicco, la posizione ottenuta risultava sostanzialmente invariata e continuava a produrre un aumento dei residui. Successivamente vengono riportati il fit lineare e il grafico dei residui considerando anche il  $^{137}\text{Cs}$ . La retta di calibrazione ottenuta considerando tutte e tre le sorgenti è:

$$\text{ADC} = (27.3 \pm 1.6) \cdot E + (4.7902 \pm 0.0019)$$

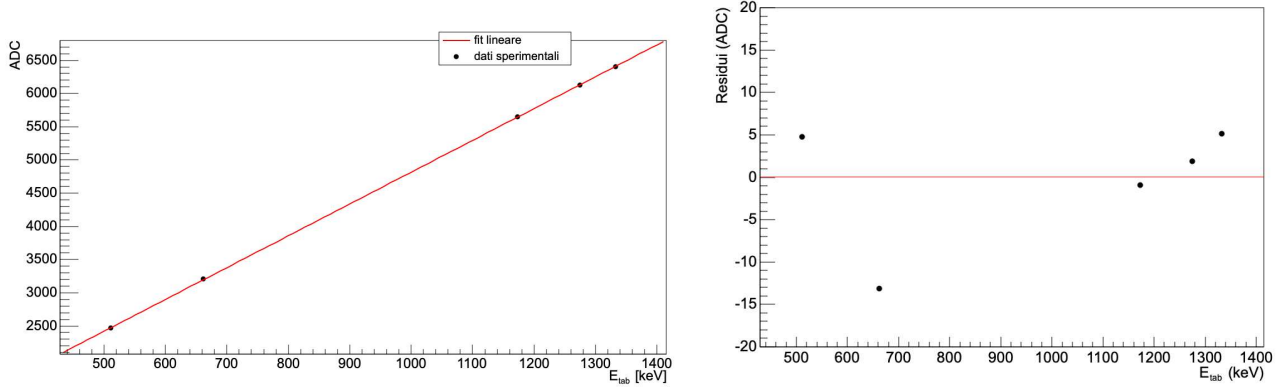


Figura 3.5: Fit lineare e grafico dei residui considerando anche il  $^{137}\text{Cs}$

Come si può notare dal grafico dei residui, il punto relativo al  $^{137}\text{Cs}$  si discosta dalla retta di calibrazione di circa  $-14$  ADC. Questo comportamento suggerisce la presenza di un punto anomalo (outlier) che influenza negativamente la qualità del fit. Infatti l'analisi del  $\chi^2$  per questo fit ha evidenziato un valore di 116, con 3 gradi di libertà.

Per questo motivo il punto del  $^{137}\text{Cs}$  è stato escluso dalla calibrazione finale. Questa scelta ha comportato una significativa riduzione del  $\chi^2$  che nella nuova analisi è risultato pari a 8, con 2 gradi di libertà, indicando una migliore descrizione dei dati da parte del modello lineare.

Con la nuova calibrazione, si è ottenuta la relazione:

$$\text{ADC} = (20.7 \pm 1.8) \cdot E + (4.794 \pm 0.002)$$

Si riportano i nuovi grafici del fit lineare e dei residui.

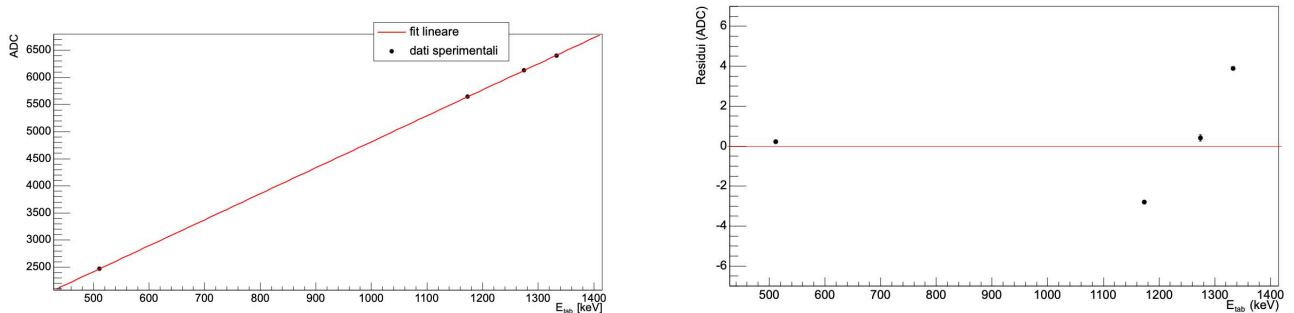


Figura 3.6: Fit lineare e grafico dei residui

La riduzione dei residui e del valore del  $\chi^2$  suggerisce che la nuova calibrazione descrive in modo più accurato la relazione tra energia e canale per il rivelatore LaBr.

Gli spettri energetici sono poi stati calibrati applicando la nuova relazione di calibrazione. In seguito si mostra lo spettro calibrato del  $^{22}\text{Na}$ .

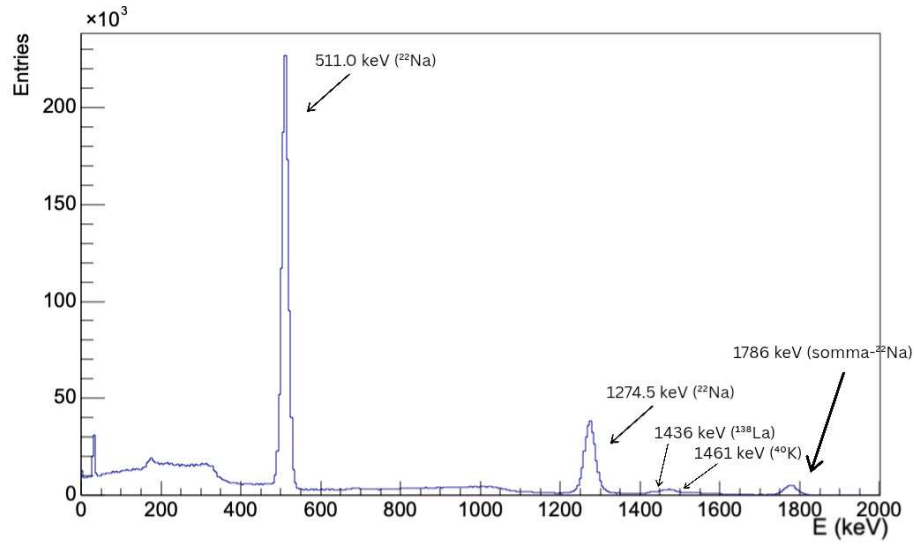


Figura 3.7: Spettro calibrato del  $^{22}\text{Na}$

### 3.1.3 Rivelatore NaI

Per la calibrazione del rivelatore NaI sono state utilizzate le sorgenti radioattive del  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$  e  $^{60}\text{Co}$ . Sono stati quindi analizzati i fotopicchi tramite fit gaussiano con ROOT.

|                   | ADC      | $\sigma_{ADC}$ | E [keV] | $\sigma_E$ |
|-------------------|----------|----------------|---------|------------|
| $^{137}\text{Cs}$ | 661.655  | 0.003          | 10890.1 | 1.5        |
| $^{133}\text{Ba}$ | 356.0129 | 0.0007         | 5968.7  | 1.6        |
| $^{60}\text{Co}$  | 1173.228 | 0.003          | 18990   | 4          |
| $^{60}\text{Co}$  | 1332.492 | 0.004          | 21507   | 4          |
| $^{22}\text{Na}$  | 511      | 0.2            | 8465.0  | 1.1        |
| $^{22}\text{Na}$  | 1274.537 | 0.007          | 20572.4 | 3.2        |

Tabella 3.3: Picchi in canali e i corrispondenti picchi noti in keV

Questi valori (Tabella 3.3) sono stati poi interpolati con i valori noti, ottenendo la retta:

$$ADC = (15.908 \pm 0.003) \cdot E + (330 \pm 2)$$

Il valore del  $\chi^2$  restituito dal fit è molto elevato. Il  $\chi^2_{rid}$  è di circa 225. Questo risultato è attribuibile al fatto che le incertezze sui punti sono sottostimate. Infatti queste non considerano eventuali errori sistematici dovuti ad esempio alla non perfetta linearità della catena di acquisizione o una sistematica sulla determinazione dei centroidi.

Di seguito si riporta la retta di calibrazione e il suo grafico dei residui.

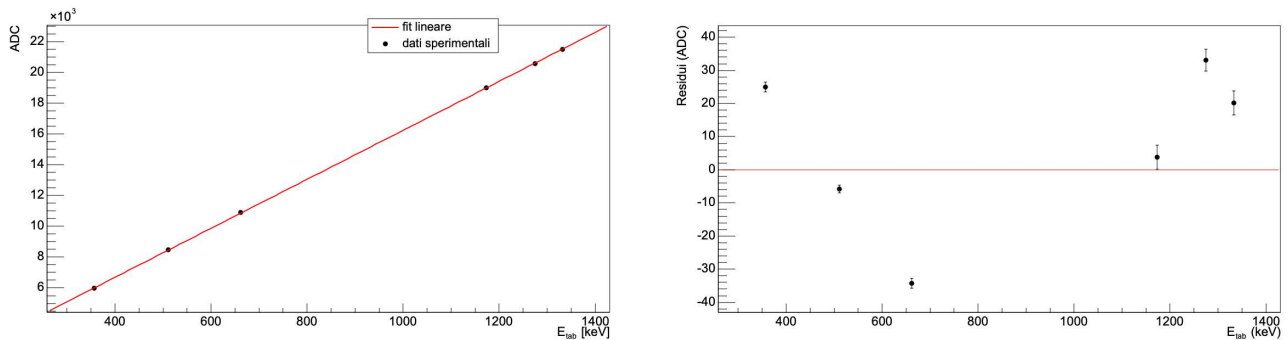


Figura 3.8: Fit lineare e grafico dei residui

I residui della calibrazione risultano complessivamente contenuti e non mostrano scostamenti tali da compromettere la validità del fit lineare. Le differenze osservate possono essere ricondotte alle incertezze sperimentali nella determinazione dei centroidi dei fotopicchi e a lievi imperfezioni della risposta della catena di acquisizione. La calibrazione ottenuta può quindi essere considerata adeguata per le successive fasi dell'analisi.

Gli spettri sono stati calibrati attraverso la retta di calibrazione. A seguire, il grafico dello spettro del  $^{60}\text{Co}$  calibrato.

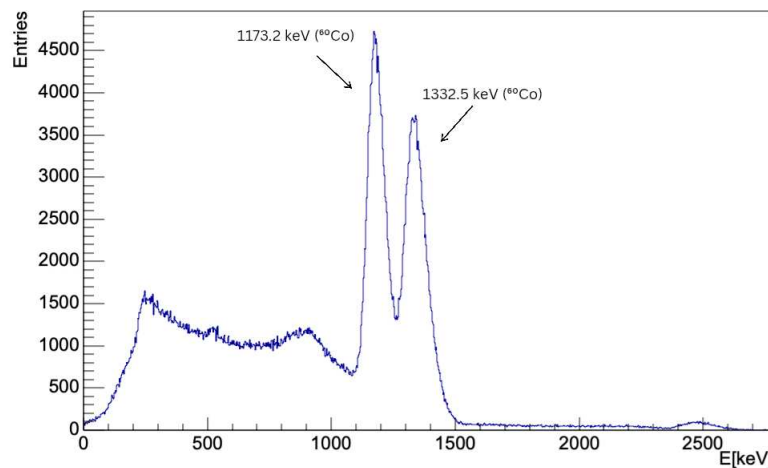


Figura 3.9: Spettro calibrato rivelatore NaI con la sorgente di  $^{60}\text{Co}$

### 3.1.4 Rivelatore HPGe

La medesima metodologia è stata eseguita per calibrare il rivelatore HPGe. Oltre alle sorgenti  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , è stata utilizzata una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  per estendere la calibrazione alle basse energie.

Tramite il software ROOT sono state effettuati i fit gaussiani per determinare le posizioni dei massimi presenti nello spettro. Si riporta l'esempio del fit gaussiano nel caso dell' $^{241}\text{Am}$ . In tabella 3.4 sono riportati i risultati di tutti i fit, mentre i restanti grafici si trovano in appendice.

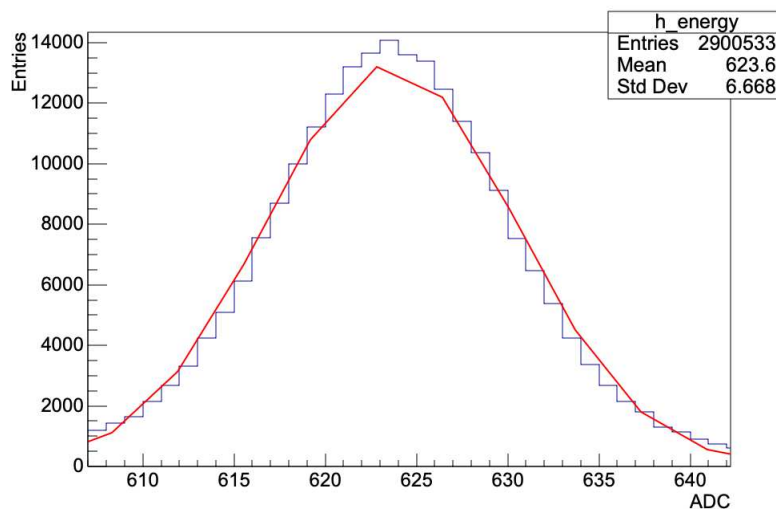


Figura 3.10: Fit gaussiano per il fotopicco del  $^{241}\text{Am}$

|                   | ADC      | $\sigma_{ADC}$ | E [keV]  | $\sigma_E$ |
|-------------------|----------|----------------|----------|------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 5352.85  | 0.10           | 511.0    | 0.2        |
| $^{22}\text{Na}$  | 13351.70 | 0.14           | 1274.537 | 0.007      |
| $^{60}\text{Co}$  | 12290.00 | 0.06           | 1173.228 | 0.003      |
| $^{60}\text{Co}$  | 13958.70 | 0.07           | 1332.492 | 0.004      |
| $^{137}\text{Cs}$ | 6930.95  | 0.03           | 661.655  | 0.003      |
| $^{241}\text{Am}$ | 623.184  | 0.015          | 59.5409  | 0.0001     |

Tabella 3.4: Picchi in canali e i corrispondenti picchi noti in keV

Dopo aver trovato i valori dei centroidi, questi sono stati interpolati con i corrispondenti valori noti delle energie mediante un fit lineare, trovando come relazione:

$$ADC = (10.476 \pm 0.002) \cdot E + (-0.56 \pm 1.07)$$

Il fit restituisce un valore del  $\chi^2$  pari a 0.0108, con 4 gradi di libertà, trovando quindi un  $\chi^2_{rid} = 0.0027$ . Questo valore molto piccolo indica una dispersione dei punti rispetto alla retta estremamente piccola e quindi un'ottima linearità. Ciò è compatibile con l'elevata linearità della catena di acquisizione e del rivelatore HPGe nell'intervallo energetico considerato.

Lo stesso si può notare nel grafico dei residui riportato in seguito, dove i dati si distribuiscono molto vicino allo zero.

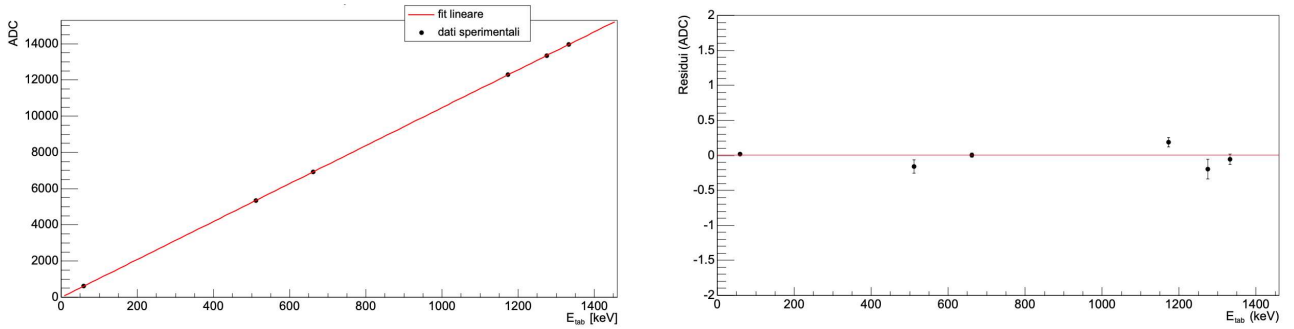


Figura 3.11: Fit lineare e grafico dei residui

Infine, attraverso l'equazione di calibrazione trovata si è calibrato lo spettro di energia.

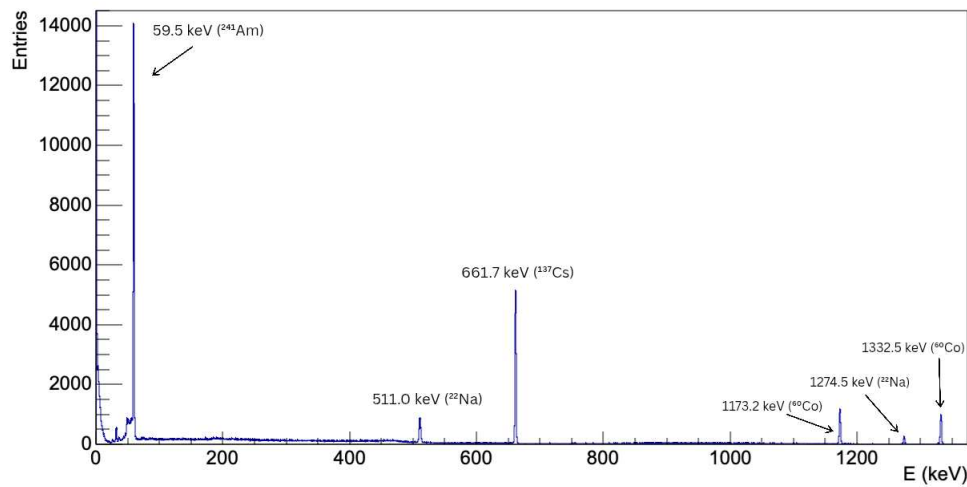


Figura 3.12: Spettro calibrato

## 3.2 Risoluzione

### Rivelatore LBC 1.5

Per il rivelatore LBC da 1.5" sono stati analizzati i fotopicchi calibrati relativi alle sorgenti di  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$ . I valori di FWHM e della risoluzione sono riportati in tabella 3.5.

|                   | FWHM[keV] | $\Delta_{FWHM}$ [keV] | R       | $\Delta_R$ | $R_{\%}$ | $\Delta_{R_{\%}}$ |
|-------------------|-----------|-----------------------|---------|------------|----------|-------------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 20.64     | 0.07                  | 0.04047 | 0.00013    | 4.047    | 0.013             |
| $^{22}\text{Na}$  | 33.3      | 0.2                   | 0.02623 | 0.00018    | 2.623    | 0.018             |
| $^{60}\text{Co}$  | 34.51     | 0.12                  | 0.02940 | 0.00010    | 2.940    | 0.010             |
| $^{60}\text{Co}$  | 33.47     | 0.11                  | 0.02513 | 0.00008    | 2.513    | 0.008             |
| $^{137}\text{Cs}$ | 24.23     | 0.04                  | 0.03649 | 0.00006    | 3.649    | 0.006             |

Tabella 3.5: FWHM e risoluzione LBC 1.5"

Questo rivelatore presenta valori di risoluzione compresi tra circa il 2.5% e il 4.0%. Il valore peggiore si osserva alla linea di annichilazione del  $^{22}\text{Na}$  a 511 keV, mentre alle energie superiori a 1 MeV la risoluzione si mantiene intorno al 2.5–3%. Tali risultati sono compatibili con le prestazioni tipiche degli scintillatori a base di lantanio, confermando la buona capacità del cristallo di distinguere la radiazione gamma ad energie differenti.

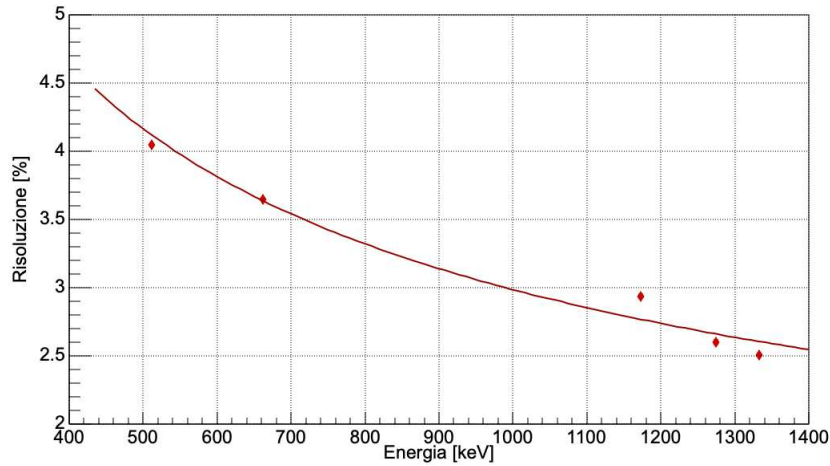


Figura 3.13: Risoluzione e energia e relativo fit

### Rivelatore LaBr

Sebbene la linea del  $^{137}\text{Cs}$  non sia stata utilizzata nella calibrazione finale, è stata comunque inclusa nello studio della risoluzione energetica. L'analisi della risoluzione è riportata in tabella 3.6.

|                   | FWHM[keV] | $\Delta_{FWHM}$ [keV] | R       | $\Delta_R$ | $R_{\%}$ | $\Delta_{R_{\%}}$ |
|-------------------|-----------|-----------------------|---------|------------|----------|-------------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 21.50     | 0.02                  | 0.04208 | 0.00004    | 4.208    | 0.004             |
| $^{22}\text{Na}$  | 37.35     | 0.07                  | 0.02931 | 0.00006    | 2.931    | 0.006             |
| $^{60}\text{Co}$  | 36.09     | 0.03                  | 0.03074 | 0.00003    | 3.074    | 0.003             |
| $^{60}\text{Co}$  | 36.91     | 0.03                  | 0.02772 | 0.00002    | 2.772    | 0.002             |
| $^{137}\text{Cs}$ | 23.962    | 0.017                 | 0.03595 | 0.00003    | 3.595    | 0.003             |

Tabella 3.6: FWHM e risoluzione  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

Il rivelatore LaBr mostra un andamento analogo a quello osservato per il rivelatore LBC. La risoluzione varia tra circa il 2.8% e il 4.2%, con i valori migliori alle energie più elevate.

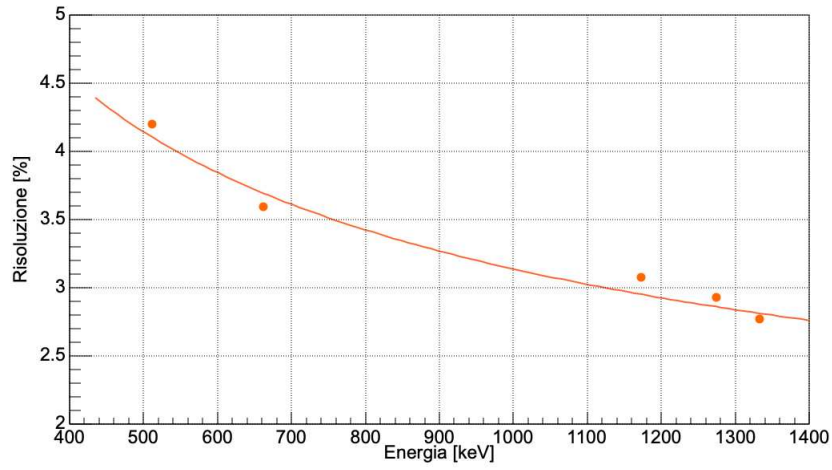


Figura 3.14: Risoluzione e energia e relativo fit

## Rivelatore NaI

La tabella 3.7 mostra i risultati dell'analisi della FWHM e della risoluzione.

|                   | FWHM[keV] | $\Delta_{FWHM}$ [keV] | R      | $\Delta_R$ | $R_{\%}$ | $\Delta_{R_{\%}}$ |
|-------------------|-----------|-----------------------|--------|------------|----------|-------------------|
| $^{137}\text{Cs}$ | 46.01     | 0.18                  | 0.0693 | 0.0003     | 6.93     | 0.03              |
| $^{133}\text{Ba}$ | 37.8      | 0.2                   | 0.1067 | 0.0006     | 10.67    | 0.06              |
| $^{60}\text{Co}$  | 64.6      | 0.6                   | 0.0551 | 0.0005     | 5.51     | 0.05              |
| $^{60}\text{Co}$  | 68.3      | 0.5                   | 0.0513 | 0.0004     | 5.13     | 0.04              |
| $^{22}\text{Na}$  | 41.39     | 0.14                  | 0.0809 | 0.0003     | 8.09     | 0.03              |
| $^{22}\text{Na}$  | 66.2      | 0.4                   | 0.0520 | 0.0003     | 5.20     | 0.03              |

Tabella 3.7: FWHM e risoluzione NaI

I valori ottenuti evidenziano il comportamento atteso del rivelatore NaI. La FWHM aumenta all'aumentare dell'energia dei fotopicchi, passando da circa 38 keV per il  $^{133}\text{Ba}$  a oltre 68 keV per il fotopicco di energia maggiore del  $^{60}\text{Co}$ .

Considerando invece la risoluzione energetica, si osserva l'andamento previsto in letteratura. In generale, migliora, cioè diventa più piccola, all'aumentare dell'energia della radiazione incidente. Questa relazione è descritta matematicamente dal seguente andamento:

$$R(E) \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (3.1)$$

E con un valore riportato di circa 6.5% a 7.5% per l'energia del  $^{137}\text{Cs}$ .

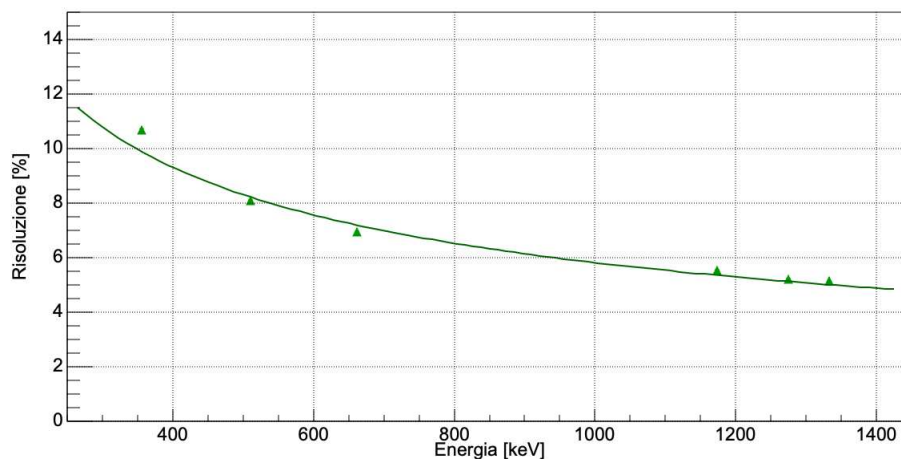


Figura 3.15: Risoluzione e energia e relativo fit

### Rivelatore HPGe

La stessa procedura è stata applicata anche al rivelatore HPGe. I risultati dell'analisi della risoluzione sono riportati in tabella 3.8.

|                   | FWHM[keV] | $\Delta_{FWHM}$ [keV] | R        | $\Delta_R$ | $R_{\%}$ | $\Delta_{R_{\%}}$ |
|-------------------|-----------|-----------------------|----------|------------|----------|-------------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 3.98      | 0.03                  | 0.00777  | 0.00005    | 0.777    | 0.005             |
| $^{22}\text{Na}$  | 2.51      | 0.03                  | 0.00197  | 0.00002    | 0.197    | 0.002             |
| $^{60}\text{Co}$  | 2.412     | 0.013                 | 0.002054 | 0.000011   | 0.2054   | 0.0011            |
| $^{60}\text{Co}$  | 2.476     | 0.013                 | 0.001858 | 0.000010   | 0.1858   | 0.0010            |
| $^{137}\text{Cs}$ | 1.999     | 0.005                 | 0.003017 | 0.000008   | 0.3017   | 0.0008            |
| $^{241}\text{Am}$ | 1.619     | 0.003                 | 0.02714  | 0.00005    | 2.714    | 0.005             |

Tabella 3.8: FWHM e risoluzione HPGe

Il rivelatore HPGe presenta le migliori prestazioni tra tutti i detector analizzati. Nell'intervallo energetico compreso tra 511 keV e 1332 keV la risoluzione risulta inferiore all'1%, raggiungendo valori prossimi allo 0.2% alle energie più elevate. Questi risultati confermano l'eccellente capacità dei rivelatori al germanio di distinguere linee energetiche molto vicine tra loro.

Per la linea a 59.5 keV dell'  $^{241}\text{Am}$  si osserva invece una risoluzione percentuale di circa 2.7%, significativamente maggiore. Questo risultato è dovuto alla bassa energia del fotone: infatti, pur essendo la FWHM assoluta molto piccola (circa 1.6 keV), il rapporto FWHM/E aumenta sensibilmente.

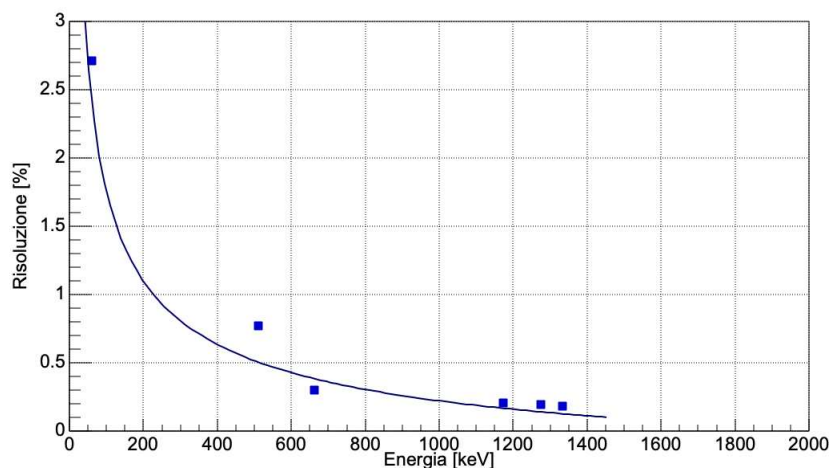


Figura 3.16: Risoluzione e energia e relativo fit

### 3.3 Risultati efficienza intrinseca

Nel presente lavoro sono state valutate l'efficienza intrinseca totale sopra soglia e l'efficienza intrinseca di fotopicco per i rivelatori NaI e LaBr da 5", utilizzando una sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ . Tale sorgente è caratterizzata dall'emissione di fotoni di energia pari a 662 keV.

La sorgente è stata posta a una distanza di 25 cm dal rivelatore, in corrispondenza del centro della faccia frontale del cristallo. La stessa configurazione geometrica è stata riprodotta nella simulazione Monte Carlo realizzata con Geant4, come mostrato in figura 3.17.

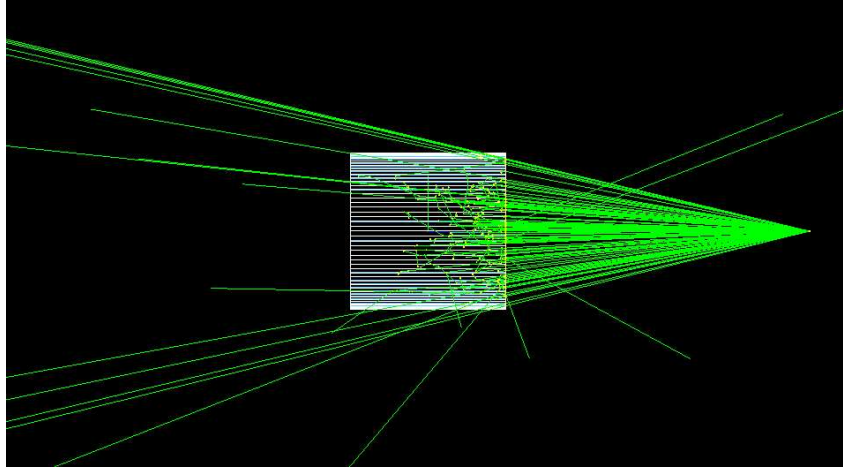


Figura 3.17: Geometria implementata in Geant4 per la simulazione della sorgente di  $^{137}\text{Cs}$  posta a 25 cm dal rivelatore. Le linee verdi rappresentano le tracce dei fotoni generati dalla sorgente e incidenti sullo scintillatore.

Nella figura sono visibili la faccia del rivelatore e le tracce dei fotoni generati dalla sorgente, diretti verso lo scintillatore. La simulazione è stata effettuata generando  $10^6$  eventi per ciascun rivelatore e valutando il numero di eventi rivelati al variare della soglia energetica impostata. I risultati ottenuti per i rivelatori NaI e LaBr da 5" sono riportati in Tabella 3.9 e 3.10.

| Soglia [keV] | Eventi rivelati | Efficienza intrinseca |
|--------------|-----------------|-----------------------|
| 50           | 779832          | 0.779832              |
| 75           | 768937          | 0.768937              |
| 100          | 757482          | 0.757482              |

Tabella 3.9: Efficienza intrinseca simulata con Geant4 per il rivelatore NaI da 5"

| Soglia [keV] | Eventi rivelati | Efficienza intrinseca |
|--------------|-----------------|-----------------------|
| 50           | 829561          | 0.829561              |
| 75           | 820881          | 0.820881              |
| 100          | 811731          | 0.811731              |

Tabella 3.10: Efficienza intrinseca simulata con Geant4 per il rivelatore LaBr da 5"

I risultati della simulazione mostrano che, a parità di soglia energetica, il rivelatore LaBr presenta un'efficienza intrinseca maggiore rispetto al NaI. Inoltre, per entrambi i rivelatori si osserva una diminuzione dell'efficienza all'aumentare della soglia energetica. Questo andamento è dovuto al fatto che, aumentando la soglia, vengono esclusi dal conteggio gli eventi nei quali l'energia depositata nel cristallo è inferiore al valore impostato.

Per la caratterizzazione sperimentale dell'efficienza del rivelatore NaI è stata acquisita una misura con una sorgente di  $^{137}\text{Cs}$  posta a una distanza di 25 cm dal cristallo. In figura 3.18 è riportato

lo spettro in conteggi al secondo in funzione dell'energia, confrontato con due misure di fondo: una effettuata nelle normali condizioni di laboratorio e una con il rivelatore schermato all'interno di un pozzetto di piombo. Lo spettro del cesio mostra chiaramente il picco fotoelettrico a circa 662 keV, caratteristico dell'emissione gamma del  $^{137}\text{Cs}$ , oltre al continuo Compton alle energie inferiori. Il fondo ambientale risulta più evidente soprattutto nella regione a bassa energia e in corrispondenza di alcune strutture dovute alla radioattività naturale. La schermatura in piombo riduce sensibilmente tale contributo, permettendo una stima più pulita del fondo da sottrarre alla misura della sorgente. Questa procedura consente quindi un confronto più affidabile tra i dati sperimentali e l'efficienza ottenuta tramite simulazione Monte Carlo con Geant4.

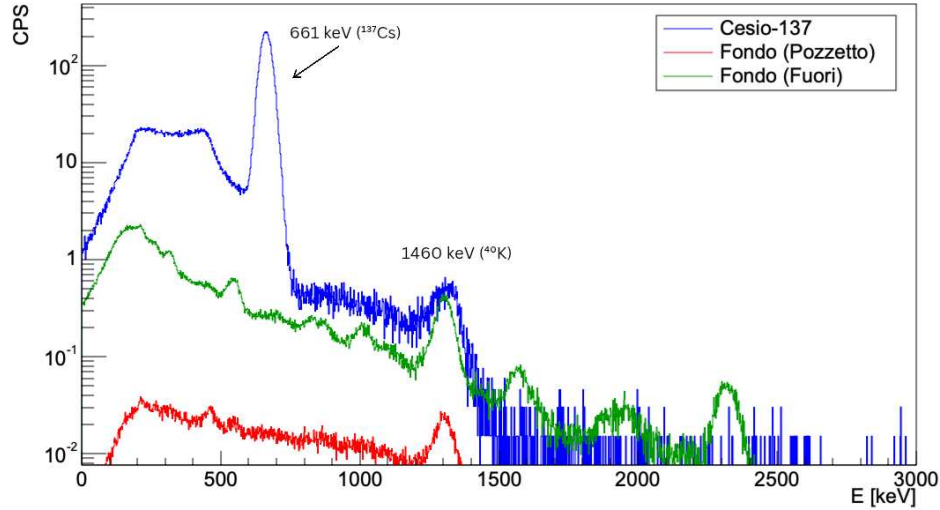


Figura 3.18: Spettro del  $^{137}\text{Cs}$  e dei fondi

L'attività attuale della sorgente è stata calcolata tenendo conto del decadimento radioattivo a partire dall'attività iniziale  $A_0 = 386$  kBq, riferita al 1 giugno 2015. Considerando come data della misura il 17 giugno 2026, il tempo trascorso risulta pari a 4034 giorni, cioè  $t = 11.044$  anni. Utilizzando il tempo di dimezzamento del  $^{137}\text{Cs}$ ,  $T_{1/2} = 30.05$  anni, l'attività residua è stata calcolata mediante la relazione:

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{(-t/T_{1/2})} \quad (3.2)$$

ottenendo un valore pari a circa 299 kBq.

Tenendo conto della probabilità di emissione del fotone da 662 keV,  $I_\gamma = 0.851$ , si ottiene un rate di emissione pari a circa  $2.55 \cdot 10^5 \gamma/s$ . Per un rivelatore cilindrico da 5", con diametro  $D = 12.7$  cm e raggio  $r = 6.35$  cm, posto a una distanza di 25 cm dalla sorgente, la frazione geometrica di angolo solido sottesa dal rivelatore è pari a circa 1.54%. L'efficienza intrinseca sperimentale è stata quindi calcolata riferendo i conteggi misurati ai soli fotoni che incidono geometricamente sul rivelatore.

Dalla misura sperimentale, effettuata con soglia pari a 100 keV, sono stati ottenuti un rate totale sopra soglia pari a 3147.6 cps e un rate nel fotopicco pari a 1987.87 cps. Da questi valori si ricava un'efficienza intrinseca totale sopra soglia pari a:

$$\epsilon_{int100keV} = (80.3 \pm 0.06)\%$$

e un'efficienza intrinseca di fotopicco pari a:

$$\epsilon_{fotopicco} = (50.7 \pm 0.05)\%$$

Il valore sperimentale dell'efficienza intrinseca totale sopra soglia risulta leggermente superiore rispetto a quello ottenuto tramite simulazione Geant4 per il rivelatore NaI, pari a circa 75.7% per una soglia di 100 keV. Un accordo migliore si osserva invece confrontando l'efficienza intrinseca di fotopicco sperimentale, pari a  $(50.7 \pm 0.05)\%$ , con il valore calcolato a partire dal rapporto tra i conteggi nel fotopicco a 662 keV e il numero di fotoni incidenti sulla faccia del cristallo, pari a 0.5069. Questo risultato indica che la descrizione del fotopicco è coerente con la misura sperimentale e che le principali discrepanze riguardano soprattutto il conteggio totale degli eventi sopra soglia, maggiormente sensibile ai contributi di fondo, agli eventi di scattering e alla modellizzazione dell'ambiente circostante.

## Capitolo 4

# Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è inserito nell'ambito del progetto SPES dell'INFN, il cui obiettivo è la produzione di radionuclidi ad elevata purezza destinati ad applicazioni scientifiche e mediche. In tale contesto, è stata effettuata la caratterizzazione di quattro rivelatori per spettroscopia gamma: un rivelatore HPGe, un NaI, un LBC e un LaBr. Per ciascun rivelatore sono state effettuate la calibrazione energetica e la determinazione della risoluzione energetica, mentre per i rivelatori NaI e LaBr da 5" è stata inoltre valutata l'efficienza intrinseca mediante simulazioni Monte Carlo realizzate con Geant4.

Le calibrazioni energetiche hanno evidenziato una risposta lineare per tutti i rivelatori nell'intervallo energetico considerato. Per quanto riguarda la risoluzione energetica, i risultati sperimentali ottenuti sono risultati in buon accordo con i valori riportati in letteratura e con le specifiche dei costruttori dei rivelatori. In particolare, il rivelatore HPGe ha evidenziato le migliori prestazioni, confermando la superiore capacità dei rivelatori a semiconduttore di discriminare fotopicchi energeticamente molto vicini. I valori ottenuti risultano compatibili con le specifiche del rivelatore utilizzato, che riportano una larghezza del fotopicco (FWHM) di circa 2.1 keV alla linea di 1332 keV del  $^{60}\text{Co}$ , corrispondente a una risoluzione energetica di circa lo 0.16%. Tra gli scintillatori, il LaBr ha mostrato la migliore risoluzione energetica, con valori in buon accordo con quelli riportati in letteratura, generalmente compresi tra il 2.5% e il 3.5% alla linea di 662 keV del  $^{137}\text{Cs}$ . Per il rivelatore NaI, alla linea di 662 keV del  $^{137}\text{Cs}$  è stata misurata una risoluzione pari al 6.93%, valore pienamente compatibile con quello riportato in letteratura generalmente compreso tra il 6% e il 7% alla stessa energia.

Lo studio dell'efficienza intrinseca ha mostrato che il rivelatore LaBr presenta valori di efficienza superiori rispetto al rivelatore NaI a parità di soglia energetica, mentre per entrambi i rivelatori l'efficienza diminuisce all'aumentare della soglia di acquisizione, come previsto. Il confronto tra simulazioni Monte Carlo e misure sperimentali effettuato sul rivelatore NaI ha evidenziato un buon accordo per quanto riguarda l'efficienza intrinseca di fotopicco, mentre l'efficienza totale sopra soglia è risultata leggermente superiore rispetto al valore simulato. Tale differenza può essere attribuita principalmente a effetti sistematici legati sia alla misura sperimentale sia alla modellizzazione della geometria nella simulazione. In particolare, piccole incertezze sull'attività della sorgente, sulla distanza sorgente-rivelatore e sulla frazione di angolo solido possono influenzare il valore dell'efficienza sperimentale. Un ulteriore contributo può derivare dalla radiazione diffusa nell'ambiente sperimentale, dovuta alla presenza di supporti, tavolo, pareti o altri materiali circostanti, non necessariamente inclusi nel modello Geant4. Questi contributi possono aumentare il numero di eventi misurati sopra soglia, rendendo l'efficienza sperimentale totale leggermente più alta rispetto a quella simulata.

Nel complesso, i risultati ottenuti confermano il compromesso tipico tra rivelatori scintillatori e rivelatori a semiconduttore. I primi offrono una buona efficienza di rivelazione, tempi di risposta rapidi e una maggiore semplicità di utilizzo, mentre il rivelatore HPGe garantisce una risoluzione energetica significativamente superiore, a fronte della necessità di operare a basse temperature e di una gestione sperimentale più complessa.

# Appendice

## Rivelatore LBC

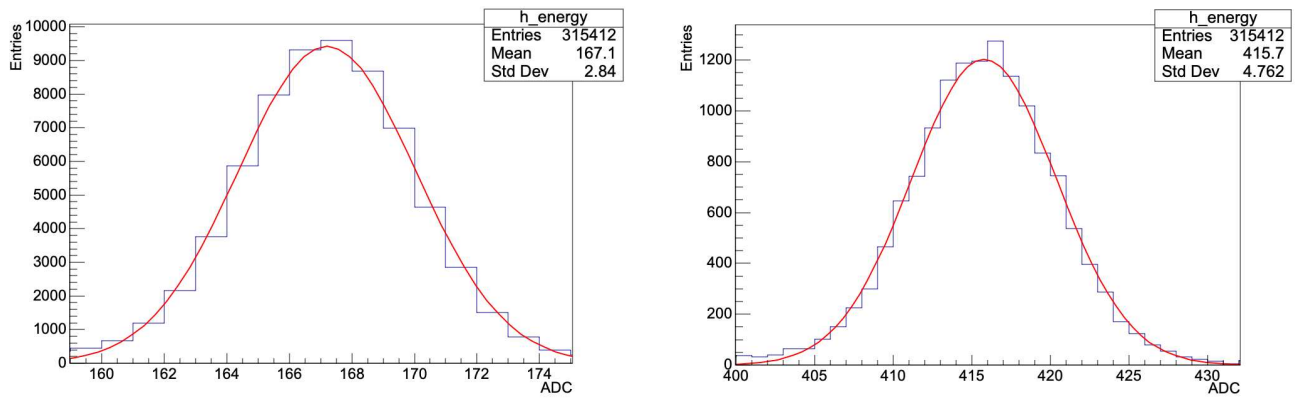


Figura 4.1: Fit gaussiani rispettivamente del picco basso e alto del  $^{22}\text{Na}$

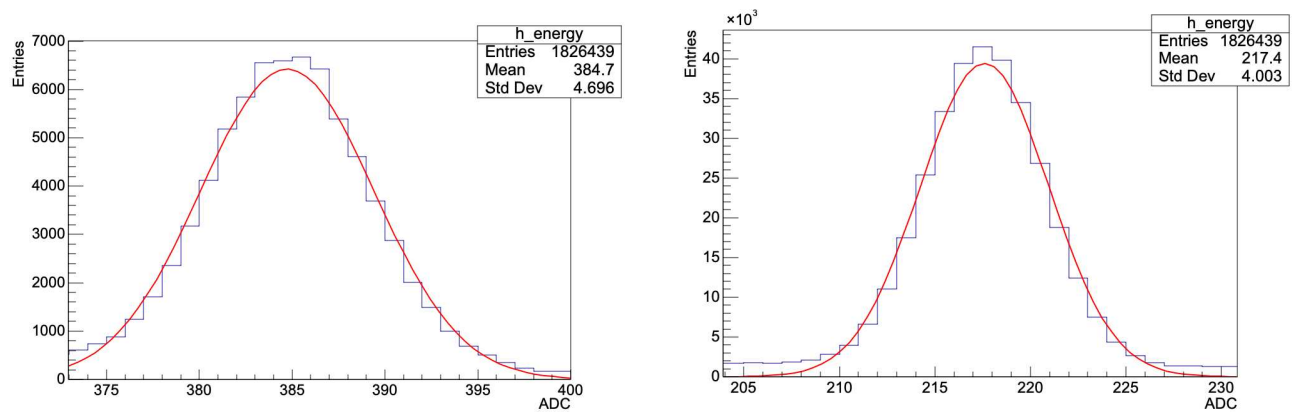


Figura 4.2: Fit gaussiani rispettivamente del picco basso del  $^{60}\text{Co}$  e del picco  $^{137}\text{Cs}$

## Rivelatore LaBr

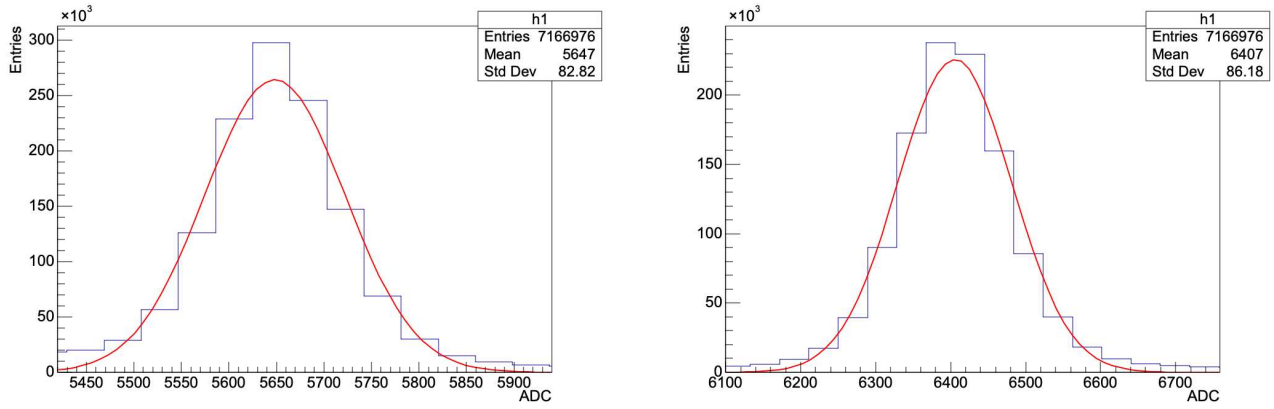


Figura 4.3: Fit gaussiani rispettivamente del picco basso e alto del  $^{60}\text{Co}$

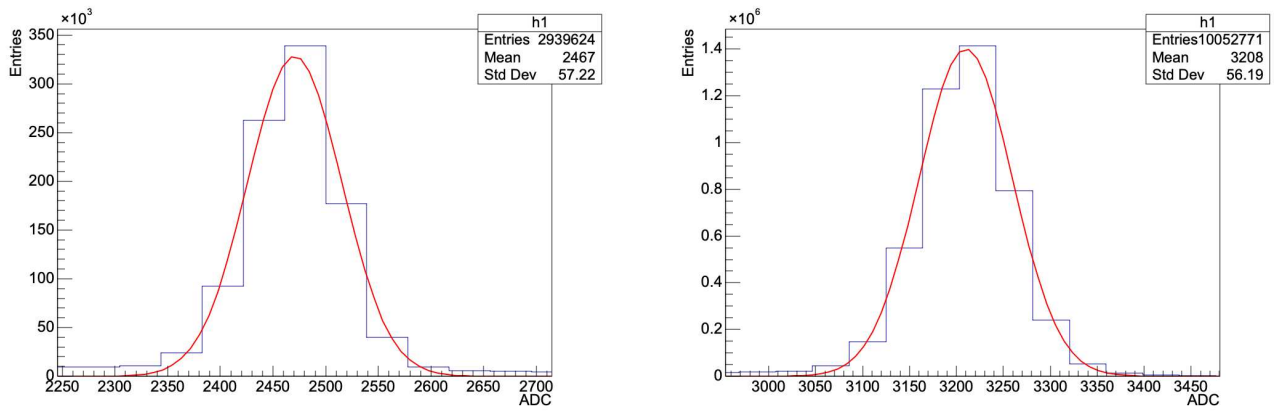


Figura 4.4: Fit gaussiani rispettivamente del picco basso del  $^{22}\text{Na}$  e del picco  $^{137}\text{Cs}$

## Rivelatore NaI

## Rivelatore HPGe

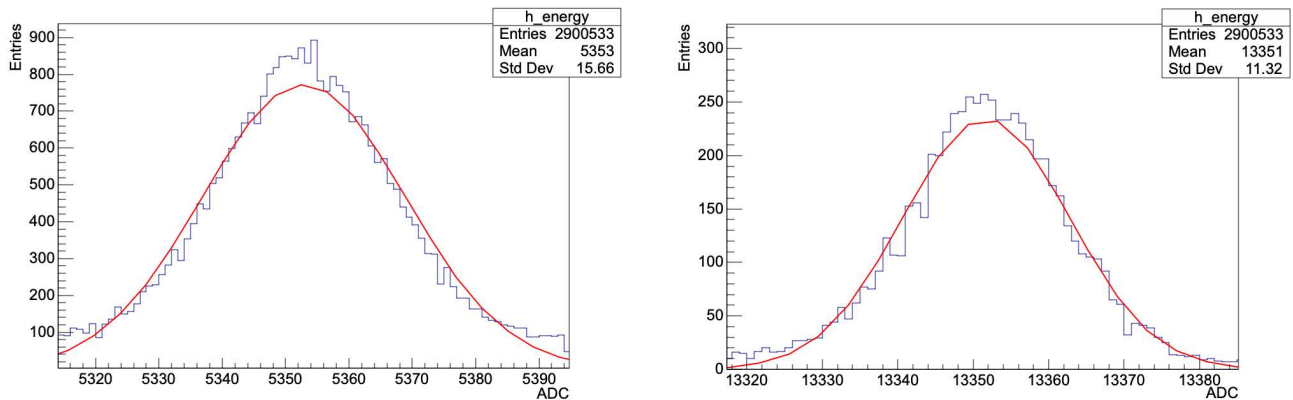


Figura 4.5: Fit gaussiani rispettivamente del picco basso e alto del  $^{22}\text{Na}$

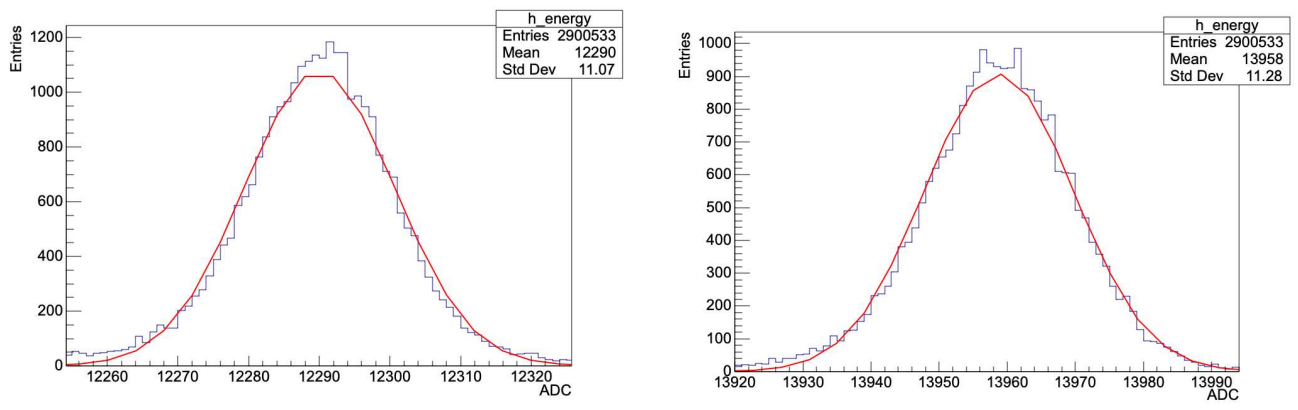


Figura 4.6: Fit gaussiani rispettivamente del picco basso e alto del  $^{60}\text{Co}$

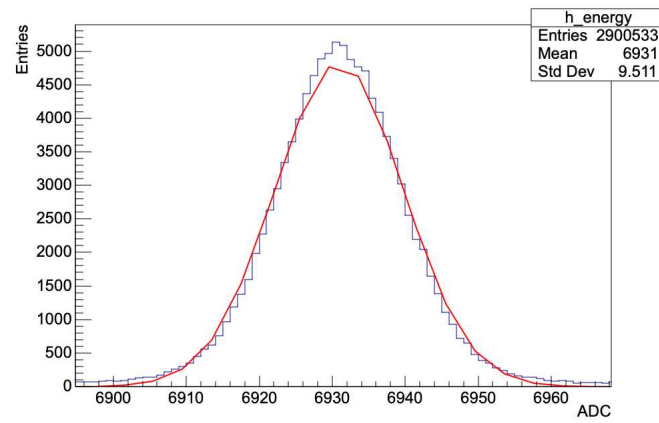


Figura 4.7: Fit gaussiano del picco del  $^{137}\text{Cs}$

# Bibliografia

- [1] M. V. M. C. F. B. E. V. S. C. L. Z. M. S. M. V. M. A. G. M. F. M. V. D. M. D. M. A. B. A. M. A. Q. A. Z. P. P. N. R. A. A. Michele Ballan, Marianna Tosato, “Preliminary evaluation of the production of non-carrier added Ag-111 as core of a therapeutic radiopharmaceutical in the framework of ISOLPHARM-Ag experiment.”
- [2] D. S. A. L. M. G. M. A. A. M. B. A. D. A. M. A. M. M. L. E. M. A. A. Daiyuan Chen, Stefano Corradetti, “SPES low-energy beamline status and development of ISOLPHARM Radionuclide Implantation Station (IRIS).”
- [3] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*. Wiley, 1999.
- [4] INFN, “Fotomoltiplicatore.”
- [5] INFN, “Rivelatori a semiconduttore.”
- [6] L. Mattavelli, “Scintillatore LBC.”
- [7] S. Holland, “Scintillatore LBC.”
- [8] maxfomitchev, “Saint Gobain Enhanced Lanthanum Bromide Detector.”
- [9] P. Schotanus, “Scintillatore NaI(Tl).”
- [10] Mirion, “Reverse Electrode Coaxial Germanium Detectors.”
- [11] C. Group, “ComPASS Multiparametric DAQ Software for Physics Applications.”
- [12] C. L. Fontana, “ABCD Documentation.”
- [13] L. N. H. Becquerel, “Atomic and nuclear data.”
- [14] Cern, “Introduction to Geant4.”