



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"
Corso di Laurea in Fisica

TESI DI LAUREA

**Studio e realizzazione di un sistema di basso-fondo
per misure di attivazione**

Relatore:
Prof.ssa Sandra Moretto

Laureando:
Viola Donati

Correlatore:
Prof. Felix E. Pino A.

Anno Accademico 2017-2018

Indice

1	Introduzione	7
2	La neutron activation analysis	9
2.1	Cenni sul metodo	9
2.2	I vantaggi della INAA	10
2.3	Applicabilità del metodo	10
2.4	Attivazione	12
2.4.1	Attivazione effettuata in laboratorio	13
3	Apparato sperimentale	17
3.1	Rivelatori	17
3.1.1	Anti-Compton	17
3.1.2	Sistema a basso-fondo con rivelatore HPGe	19
3.2	Elettronica	20
3.2.1	Elettronica per misure con anti-Compton	20
3.2.2	Elettronica per misure con il sistema a basso fondo e rivelatore HPGe	24
4	Analisi dati	27
4.1	Calibrazione dell'apparato sperimentale	27
4.2	Analisi dei campioni attivati	32
4.2.1	Sistema anti-Compton	32
4.2.2	Sistema basso-fondo	39
4.3	La costante di decadimento	44
4.4	Determinazione della massa del campione attivato	46
5	Conclusioni	49

Abstract

The report is focussed on the study and the application of the non-destructive analysis with neutrons. The Neutron activation analysis (NAA) is a nuclear process used for determining the concentrations of elements in a vast amount of materials. NAA allows discrete sampling of elements as it disregards the chemical form of a sample, and focuses solely on its nucleus. The method is based on neutron activation and therefore requires a source of neutrons. The sample is bombarded with neutrons, causing the elements to form radioactive isotopes. The radioactive emissions and radioactive decay paths for each element are well known. Using this information, it is possible to study spectra of the emissions of the radioactive sample, and determine the concentrations of the elements within it. A particular advantage of this technique is that it does not destroy the sample, and thus has been used for analysis of works of art and historical artifacts. NAA can also be used to determine the activity of a radioactive sample. If NAA is conducted directly on irradiated samples it is termed Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA). The analysis of the activated elements have been performed using two different experimental systems: an Anti-Compton system and a low-background system. The Anti-Compton system was equipped with different scintillators, NaI(Tl), BGO and LaBr₃(Ce), the latter with a germanium detector, HPGE. As first, a detailed characterization of the detectors have been done. The characteristics of the method was then explored, studying spectra of the emissions of the radioactive sample. Furthermore, it has been tested the possibility to determine the concentrations of the elements within the sample. The results from the two experimental systems have been compared, focussing the attention on the the advantages and disadvantages of the two.

Sommario

Il lavoro di tesi è focalizzato sullo studio e l'applicazione dell'analisi non distruttiva con i neutroni. L'analisi di attivazione con neutroni (NAA) è un processo nucleare utilizzato per determinare le concentrazioni di elementi in una grande quantità di materiali. La NAA consente il campionamento discreto di elementi, ignorandone la forma chimica del campione e si concentra esclusivamente sul suo nucleo. Il campione viene bombardato con neutroni, causando la formazione di isotopi radioattivi. Le emissioni radioattive e i percorsi di decadimento radioattivo per ciascun elemento sono ben noti. Utilizzando queste informazioni, è possibile studiare gli spettri delle emissioni del campione radioattivo e determinare le concentrazioni degli elementi al suo interno. Un particolare vantaggio di questa tecnica è che non distrugge il campione, e quindi si utilizza per l'analisi di opere d'arte e manufatti storici. La NAA può anche essere utilizzata per determinare l'attività di un campione radioattivo. Se la NAA viene condotta direttamente su campioni irradiati, viene definita Analisi strumentale con attivazione neutronica (INAA). L'analisi degli elementi attivati è stata eseguita utilizzando due diversi sistemi sperimentali: un sistema Anti-Compton e un sistema a basso-sfondo. Il sistema Anti-Compton era formato da diversi scintillatori, NaI (Tl), BGO e LaBr₃(Ce), mentre il sistema a basso fondo con un rivelatore al germanio, HP-

GE. Per prima cosa, è stata effettuata la caratterizzazione di tutti i rivelatori in gioco. Successivamente, le caratteristiche del metodo INAA sono state esplorate, studiando gli spettri delle emissioni del campione radioattivo. Inoltre, è stata testata la possibilità di determinare le concentrazioni degli elementi all'interno del campione. I risultati dei due sistemi sperimentali sono stati poi confrontati, concentrando l'attenzione sui vantaggi e gli svantaggi dei due.

Capitolo 1

Introduzione

Dopo la scoperta del neutrone da parte di Chadwick nel 1932 e della radioattività indotta nel 1934 da Frédéric and Irène Joliot Curie sono iniziati i primi esperimenti volti a creare nuovi elementi a partire da altri, o elementi radioattivi artificiali a partire da elementi stabili, irraggiandoli ad esempio con dei neutroni. Ad oggi questa pratica viene utilizzata abitualmente in molti ambiti come la medicina, l'energia elettrica, i beni culturali, la radioprotezione, la geologia e molti altri.

Il metodo di analisi di attivazione con neutroni risulta un metodo molto comune per determinare gli elementi di un materiale basata sulla conversione di nuclei stabili in altri prevalentemente radioattivi, bombardandoli con neutroni. I prodotti della reazione che vengono misurati possono essere sia dovuti alla radiazione rilasciata quasi istantaneamente a seguito della cattura del neutrone, sia alla radioattività indotta dopo il decadimento, se i nuclei figli sono essi stessi radioattivi. In particolare nel lavoro di tesi utilizzeremo la analisi non distruttiva con neutroni, chiamata *Instrumental Neutron Activation Analysis* (INAA), che ormai da 10 anni viene riconosciuta come metodo di misura primario per l'identificazione di elementi in tracce.

A livello pratico un campione contenente elementi non noti viene sottoposto ad irraggiamento da neutroni. I nuclei del materiale ritornano poi al loro stato fondamentale emettendo radiazione gamma, che può essere facilmente rivelata con i metodi usuali di rivelazione, quali scintillatori e semiconduttori. Essendo lo spettro gamma diverso per ogni nucleo, se il rivelatore impiegato possiede delle buone caratteristiche di risoluzione ed efficienza, è possibile determinare con una certa precisione l'elemento contenuto al suo interno.

L'attività di laboratorio è stata svolta ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), dove sono stati messi a disposizione gli apparati di rivelazione, le sorgenti radioattive per la calibrazione, la sorgente di neutroni di ^{252}Cf e i campioni da attivare. In particolare i rivelatori che sono stati utilizzati per i nostri scopi sono un sistema di anti-Compton con scintillatori inorganici (NaI(Tl), BGO e LaBr₃(Cs), e un sistema di basso-fondo con rivelatore HPGe (*High Purity Germanium*).

Gli obiettivi di questa tesi sono i seguenti:

- caratterizzazione dei due apparati sperimentali (anti-Compton e basso-fondo);
- confronto tra i due diversi metodi di rivelazione;

- riconoscimento e caratterizzazione degli elementi attivati tramite energie caratteristiche dei fotoni emessi e tempo di dimezzamento;
- stima della massa attivata nei campioni sottoposti ad irraggiamento.

Nei capitoli che seguono verrà dapprima introdotta la neutron activation analysis come metodo di misura primario, i suoi vantaggi e limiti di applicabilità e il procedimento di attivazione adottato in laboratorio (Capitolo 2). Nel Capitolo 3 verranno illustrati i due apparati sperimentali di rivelazione e l'elettronica impiegata per ciascuno; infine nel Capitolo 4 verrà illustrata l'attività sperimentale e descritta l'analisi dei dati acquisiti in laboratorio.

Capitolo 2

La neutron activation analysis

2.1 Cenni sul metodo

La Neutron Activation Analysis (NAA) è un metodo per determinare gli elementi di un materiale basata sulla conversione di nuclei stabili in altri prevalentemente radioattivi, bombardandoli con neutroni. I prodotti della reazione che vengono misurati possono essere sia dovuti alla radiazione rilasciata quasi istantaneamente a seguito della cattura del neutrone, sia alla radioattività indotta dopo il decadimento, se i nuclei figli sono essi stessi radioattivi.

La NAA può essere effettuata tramite due diversi approcci

1. *Destructive o Radiochemical Neutron Activation Analysis (RNAA)*: il campione radioattivo risultante dall'attivazione viene decomposto e diviso in frazioni contenenti pochi elementi ciascuna, tramite separazione chimica;
2. *Non-destructive o Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA)*: il campione radioattivo risultante viene mantenuto intatto e gli elementi vengono determinati facendo uso delle differenze nei rapporti di decadimento, utilizzando apparati con un'alta risoluzione in energia.

L'approccio seguito in questa tesi è il secondo (INAA), caratterizzato dalle seguenti fasi: attivazione via irraggiamento con neutroni, misura della radiazione gamma dopo uno o più tempi di dimezzamento e interpretazione degli spettri gamma risultanti da questa misura in termini di radionuclidi, elementi associati e loro frazione di massa.

L'importanza di questa tecnica come metodo primario di misura (nello specifico, metodo primario di rapporto) venne ufficialmente riconosciuta nel marzo 2008 dal Comité Consultatif pour la Quantité de Matière - Métrologie en Chimie (CCQM), dal quale nel 1999 erano stati definiti un metodo di misura primario, un metodo primario diretto e un metodo primario di rapporto [6]

1. *metodo primario*: metodo avente le più alte qualità metrologiche, le quali operazioni possano essere completamente descritte e comprese e per il quale si possa scrivere un'espressione completa dell'incertezza in termini di unità SI;
2. *metodo primario diretto*: metodo primario che misura il valore di un'incognita senza riferimento ad un campione della stessa quantità;

3. *metodo primario di rapporto*: metodo primario che misura il valore di un rapporto di un'incognita rispetto ad un campione della stessa quantità; il suo svolgimento deve essere completamente descritto da una equazione di misura.

Nell'ottobre 1999, quando venne proposta la NAA come metodo primario, l'unica tecnica rilevante per la produzione di materiali di riferimento certificati per l'analisi di elementi inorganici in tracce era l'Isotope Dilution Mass Spectrometry (IDMS), che necessitava della dissoluzione dei campioni solidi prima dell'analisi, mentre la INAA era una tecnica "non distruttiva", che inoltre presentava anche le caratteristiche principali per essere riconosciuta dal CCQM. Nel 2008 venne perciò aggiunta agli altri 5 già esistenti metodi di misura primaria [7].

2.2 I vantaggi della INAA

La INAA ha trovato utilizzo in molti campi della scienza, traendo vantaggio dal fatto che elementi con basso numero atomico, come H, C, N, O e Si presenti in abbondanza in molti materiali, e alcuni elementi con alto Z , come Bi, Tl e Pb, non producono elementi radioattivi a seguito dell'attivazione, che potrebbe interferire con la determinazione delle attività degli elementi a cui si è interessati. Questi nuclei sono infatti caratterizzati da una sezione d'urto per attivazione da neutroni molto piccola, da prodotti risultanti dalla loro attivazione con una vita media molto breve, che quindi decadono in fretta in elementi stabili, e da emissione di radiazione che non viene registrata nello spettro gamma e perciò non interferisce con la misura. Ciò permette l'osservazione di tracce di elementi presenti anche in scarse quantità (ordine dei μg , ng o meno) in matrici composte da elementi a basso Z .

Tuttavia l'aspetto che rende la INAA particolarmente vantaggiosa è il suo carattere "non distruttivo", cioè la possibilità di analizzare i campioni senza bisogno di essere disciolti tramite trattamenti chimici né prima né dopo l'attivazione. In questo modo non ci sono, in linea di principio, perdite di massa legate agli effetti della dissoluzione o contaminazioni dovute ai solventi utilizzati. Essendo inoltre un fenomeno correlato alle proprietà del nucleo atomico, non è influenzata dallo stato chimico e fisico in cui si trova il materiale analizzato, poiché gli elettroni di valenza in linea di massima non sono coinvolti in questi processi. Perciò effetti di matrice chimica, noti per essere una significativa fonte di errore in alcuni tipi di analisi chimica strumentale, sono insignificanti per la NAA o comunque possono essere quantificati e corretti.

Un altro importante vantaggio della INAA è che a differenza di tecniche come analisi di fluorescenza da raggi X possiamo trarre informazioni su tutto il volume dell'oggetto, non solo sulla composizione chimica della superficie. La INAA può essere quindi utilizzata per avere informazioni sulla massa totale degli elementi del campione analizzato.

2.3 Applicabilità del metodo

La neutron activation analysis non è sempre applicabile in tutte le condizioni e a tutti i materiali possibili e come tutte le altre tecniche di analisi di elementi in

tracce presenta dei limiti.

Per prima cosa sono importanti le proprietà nucleari dell'elemento a cui si è interessati, come il rate di attivazione o le caratteristiche del decadimento dei radionuclidi prodotti (vita media, energie dei gamma...). Perciò la NAA non può essere applicata a campioni con basso Z (H, C, N, O, Si) e ad altri elementi come Tl e Bi, come già detto in precedenza. Inoltre non è applicabile ad elementi di densità troppo elevata o elevato numero atomico, in quanto si presentano fenomeni di auto-attenuazione dei gamma all'interno dello stesso materiale, né ad elementi con elevate proprietà di assorbimento di neutroni, che causerebbero auto-assorbimento dei neutroni termici all'interno del campione, risultando in una distribuzione di energia dei neutroni diversa da quella standard e una depressione del fluence rate all'esterno del campione; in aggiunta a questo, una grande quantità di elementi con forti proprietà di assorbimento di neutroni (B, Li, U) non possono essere utilizzate in questo metodo perché a seguito della cattura del neutrone emettono particelle cariche come particelle α causando un riscaldamento eccessivo durante l'irraggiamento.

Infine nonostante la INAA sia considerata un tipo di approccio non distruttivo, i materiali presi in analisi potrebbero essere danneggiati a causa del riscaldamento termico, radiolisi, scie radioattive come frammenti di fissione e particelle α .

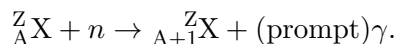
Ci sono comunque molti ambiti in cui possiamo applicare questa tecnica. I materiali adatti ad essere analizzati con la NAA possono essere individuati in tre diverse categorie:

- Materiali solidi difficili da portare completamente in soluzione:
 - terre, rocce, minerali, materiali cosmici, particolato atmosferico, zeoliti e altri materiali compositi;
 - materiali nei quali C, H, N e O sono gli elementi in quantità maggiori: piante e materiali biologici simili, plastiche.
- Materiali solidi che possono essere facilmente contaminati durante la preparazione dei campioni:
 - sostanze ultra pure: semiconduttori al silicio e fibre di carbonio;
 - quantità molto piccole: particolato d'aria e polvere cosmica;
 - tessuti biologici e fluidi: sangue, siero e urine.
- Materiali solidi che sono unici e per i quali è necessario mantenerne l'integrità:
 - materiale di interesse forense;
 - oggetti archeologici, culturali e artistici.
- Materiali solidi per i quali deve essere determinata la composizione del bulk e per i quali le tecniche di superficie come XRF e tecniche di spettroscopia dello stato solido non sono adeguate.

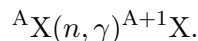
2.4 Attivazione

Nella sezione precedente è stata introdotta la neutron activation analysis come metodo di misura di elementi in traccia, alla base del quale sono presenti reazioni nucleari tra i neutroni emessi da una sorgente o da un generatore e il nucleo dell'elemento da attivare. L'obiettivo dell'attivazione dei campioni è quello di convertire alcuni dei nuclei stabili in nuclei radioattivi che possono essere utilizzati per scopi analitici. Ogni nucleo atomico può catturare un neutrone durante l'irraggiamento, da cui risulta una reazione nucleare per la quale la massa del nucleo spesso può cambiare. Se il nucleo che si forma da questo processo è instabile, inizia a decadere in uno stato stabile emettendo radiazione tramite uno o più decadimenti che possono essere di tipo α , β^+ , β^- , cattura elettronica o conversione interna. In molti casi vengono emessi anche raggi γ e raggi X.

La cattura di un neutrone da parte di un nucleo atomico può essere illustrata in maniera schematica nel modo seguente:



Nei casi presi in considerazione il nucleo figlio è radioattivo e decade β^- , e successivamente γ . La reazione può essere scritta più brevemente nel modo seguente:



I neutroni possono essere prodotti in vari modi:

- *Sorgenti isotopiche di neutroni*, come ${}^{226}\text{Ra}(\text{Be})$, ${}^{124}\text{Sb}(\text{Be})$, ${}^{241}\text{Am}(\text{Be})$, ${}^{252}\text{Cf}$. I neutroni hanno una distribuzione energetica con un massimo di 3-4 MeV.
- *Acceleratori di particelle o generatori di neutroni*. In genere si basano sull'accelerazione di ioni di deuterio contro un bersaglio contenente deuterio o trizio. Le reazioni che risultano da questa interazione sono rispettivamente ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$ e ${}^3\text{H}({}^2\text{H}, n){}_4\text{He}$. La prima reazione, tipicamente (D,D), genera neutroni monoenergetici con energie di 2.5 MeV, mentre la seconda reazione (D,T) porta alla formazione di neutroni monoenergetici di 14.7 MeV.
- *Reattori nucleari*, nei quali i neutroni prodotti hanno una distribuzione di energia che dipende dal reattore stesso e dalle sue strutture di irraggiamento.

La misura della probabilità che la reazione abbia luogo è data dalla sezione d'urto dei neutroni, σ , e può essere molto diversa a seconda del tipo di reazione, elemento o distribuzione di energia dei neutroni che producono l'attivazione.

La sezione d'urto e il fluence rate dei neutroni dipendono dall'energia dei neutroni. Possiamo individuare tre tipi diversi di neutroni, a seconda dell'energia a cui vengono emessi:

- *neutroni veloci*: hanno un'energia distribuita in un range compreso tra 100 keV e 25 MeV con un massimo intorno a 2 MeV. Sono quelli rilasciati ad esempio nel processo di fissione nucleare di ${}^{235}\text{U}$;

- *neutroni epitermici*: hanno energie comprese approssimativamente tra 0.5 e 100 keV. sono i neutroni nel processo di decelerazione tramite collisione con i nuclei del materiale moderatore;
- *neutroni termici*: neutroni in equilibrio termico con gli atomi del moderatore. Hanno una distribuzione di energia Maxwelliana, con massima probabilità corrispondente ad un'energia di 0.25 eV.

In generale, come si può osservare in Fig. 2.1 il fluence rate è maggiore per i neutroni termici rispetto ai neutroni epitermici e veloci. Per quanto riguarda la sezione d'urto, come si può vedere nel grafico di ^{27}Al in Fig. 2.3, l'andamento in funzione dell'energia dei neutroni decresce linearmente all'aumentare dell'energia, mentre nel range di energia epitermico presenta una serie di picchi di risonanza.

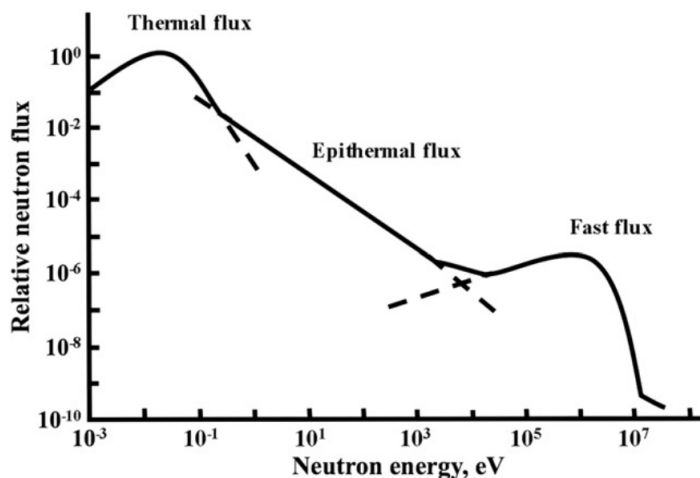


Figura 2.1: Rappresentazione schematica dello spettro del fluence rate dei neutroni in un reattore nucleare.

2.4.1 Attivazione effettuata in laboratorio

Nel caso presente l'attivazione è stata effettuata tramite una sorgente isotopica di neutroni di ^{252}Cf . La sorgente è rimasta per tutto il tempo all'interno di un contenitore di polietilene al fine di decelerare i neutroni emessi in modo da lavorare nella regione di energia termica.

All'interno di questo contenitore sono stati inseriti i campioni da attivare per un tempo variabile, in modo da avere la massima attivazione possibile, che dipende dal tempo di dimezzamento dell'elemento stesso. Un campione investito da un flusso di neutroni, dopo un certo intervallo di tempo arriva a saturazione, il che significa che non può essere attivato ulteriormente. Il tempo scelto è stato ricavato, perciò dalla definizione del *fattore di saturazione* S :

$$S = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2.1)$$

dove $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ è la costante di decadimento.

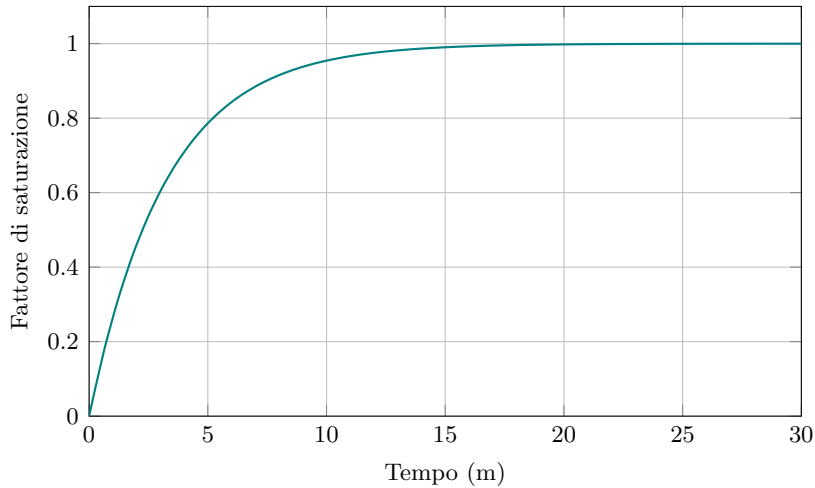


Figura 2.2: Fattore di saturazione in funzione del tempo per ^{27}Al

Ad esempio per ^{27}Al , plottando il grafico che si ottiene dall'equazione 2.1 (Fig. 2.2) si può notare che si raggiunge piena saturazione dopo circa 20 minuti dal momento in cui il campione è stato inserito nel contenitore in cui è posta la sorgente di ^{252}Cf . In generale, si è osservato che è necessario un tempo superiore a circa 5/6 volte il tempo di dimezzamento dell'elemento per arrivare ad una buona saturazione.

I campioni attivati sono poi stati spostati all'interno dell'apparato di rivelazione, dove sono stati lasciati per un tempo pari o maggiore di due volte il tempo di dimezzamento.

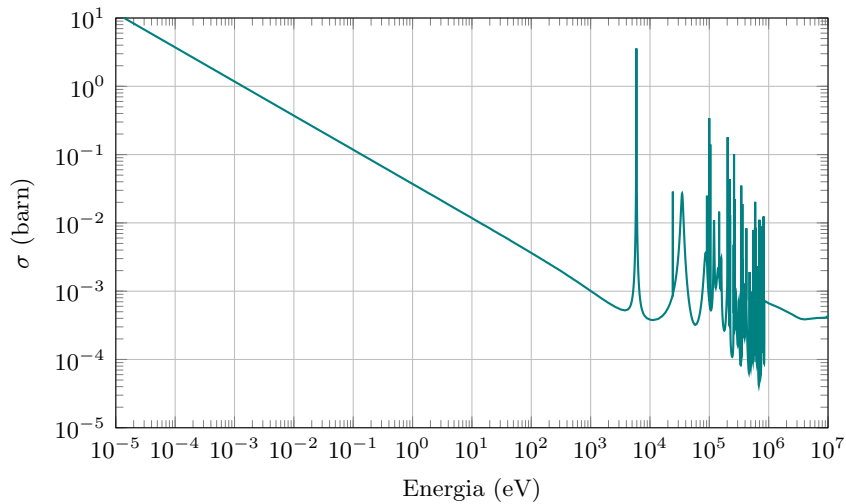


Figura 2.3: Relazione tra la sezione d'urto e l'energia dei neutroni per la reazione $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ (scala logaritmica).

I campioni da attivare sono stati scelti adottando i seguenti criteri:

- sezione d'urto per reazione (n,γ) abbastanza buona (superiore a 1 barn) per poter attivare i campioni;
- tempo di dimezzamento non troppo lungo (inferiore a 24 h) per poter attivare i campioni due volte per poterli acquisire con due diversi metodi;
- reperibilità nella giusta quantità dei materiali compatibili con i due punti precedenti. I materiali reperiti in particolare sono sia mono-elementari, quindi costituiti da un unico elemento, come i campioni di Alluminio, Tungsteno e Indio, sia contenenti più elementi, come nel caso dei campioni di NaI e CsI.

In Tab. 2.1 sono stati riportati gli elementi attivati in laboratorio con i rispettivi tempi di dimezzamento, sezioni d'urto, e energie a cui ci aspettiamo di osservare dei picchi nello spettro gamma, con la relativa intensità (<https://www.nndc.bnl.gov/>).

Elemento	Reazione	σ (barns)	$T_{1/2}$	E_γ (keV)
Alluminio	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	0.231 ± 0.003	2.245 m	1778.987 (100%)
				138.29 (3.7%)
				416.9 (27.2%)
				818.68 (12.13%)
Indio	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}$	202 ± 2	54.29 m	1097.28 (58.5%)
				1293.56 (84.8%)
				1507.59 (9.92%)
				1752.5 (2.36%)
				2112.29 (15%)
Iodio	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$	6.15 ± 0.06	24.99 m	442.901 (17%)
				526.557 (1.58%)
				969.458 (0.404%)
Tungsteno	$^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$	38.1 ± 0.5	24 h	134.247 (10.36%)
				479.53 (26.6%)
				551.55 (6.14%)
				618.37 (7.57%)
				685.81 (33.2%)
Sodio	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	0.517 ± 0.004	14.997 h	1368.626 (100%)

Tabella 2.1: Elementi attivati in laboratorio, tempi di dimezzamento, sezioni d'urto tipiche per attivazione da neutroni termici e energie dei principali gamma emessi con relative intensità .

Si è provato ad attivare altri elementi oltre a questi, quali il rame ($^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$) e il vanadio ($^{51}\text{V}(n, \gamma)^{52}\text{V}$), quest'ultimo presumibilmente contenuto negli attrezzi da lavoro presenti in laboratorio. Tuttavia, facendo una prima analisi dei dati acquisiti, non si è osservato alcun picco in corrispondenza dell'energia che ci si aspettava. Questi campioni non sono stati quindi presi in considerazione nel resto della analisi.

Capitolo 3

Apparato sperimentale

3.1 Rivelatori

Per la rivelazione dei γ emessi dai campioni attivati si è scelto di utilizzare e confrontare due approcci diversi con due diversi sistemi di rivelazione:

- Sistema anti-Compton, per il quale sono stati impiegati vari scintillatori inorganici, quali NaI(Tl), BGO e LaBr₃(Ce) [9];
- Sistema a basso-fondo con rivelatore HPGe;

3.1.1 Anti-Compton

Un problema per la rivelazione di elementi con una scarsa attività, i cui picchi sono, quindi, poco intensi, è che il picco di un gamma di bassa energia può cadere nello spettro Compton di un altro fotone con energia superiore.

Un modo per diminuire il contributo Compton in un rivelatore è quello di circondarlo con uno o più rivelatori, chiamati *guard detectors*. Lo scopo dei guard detectors è quello di rivelare tutti gli eventi gamma che hanno avuto una interazione Compton nel rivelatore principale. In questo modo eliminano tutti gli eventi in coincidenza tra il rivelatore principale e i *guard detectors* si migliora il limite di rivelazione e anche il *peak to total ratio*.

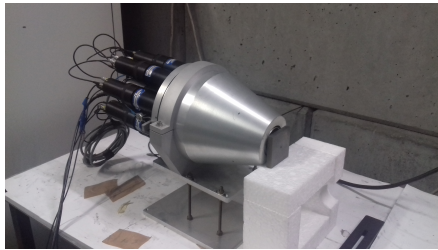
Le configurazioni che si possono adottare sono molteplici e dipendono in particolare da che tipo di spettro si vuole ottenere. Abbiamo adottato due diverse configurazioni: *annular guard*, dove il guard detector è formato da un rivelatore a forma di anello che circonda il rivelatore principale, e *annular guard/plug*, simile all'altra configurazione, con la differenza che dalla parte opposta del rivelatore principale è posto un secondo guard detector che ha lo scopo di rivelare gli eventi diffusi a 180 gradi dal rivelatore principale.

I rivelatori che vengono solitamente impiegati come rivelatori principali devono avere una buona risoluzione energetica, mentre per i cosiddetti detector guards si utilizzano materiali con elevata densità ed elevato Z, in modo da bloccare la maggior parte della radiazione che sfugge al primo rivelatore. I più utilizzati sono NaI(Tl) e BGO, ma il secondo viene preferito al primo a causa della maggiore densità (7.13 g/cc rispetto a 3.67 g/cc del NaI(Tl)); questo porta ad un coefficiente di attenuazione lineare a 500 keV di 0.944/cm contro 0.343/cm del

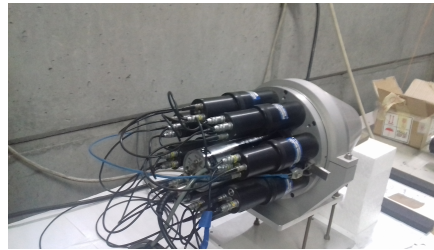
NaI(Tl). Non essendo importante avere un'alta risoluzione, ma avere maggiore attenuazione in un volume minore, il BGO viene solitamente preferito al NaI(Tl).

Gli scintillatori utilizzati in laboratorio sono:

- NaI(Tl): rivelatore principale, posto al centro dell'anello per l'anti-Compton. E' formato da un unico cristallo di ioduro di sodio drogato con tallio, di 3" di diametro. Quest'ultimo è collegato ad un fotomoltiplicatore (PMT).
- BGO: guard detector a forma di anello; è inserito all'interno di una struttura in alluminio con un foro centrale in cui inserire il rivelatore NaI(Tl). (Fig. 3.1(b)). Nella parte posteriore sono collegati 8 PMT equidistanti tra loro, come si può vedere in Fig. 3.1(a).
- LaBr: rivelatore utilizzato come guard detector per diffusione a 180°, posto quindi dalla parte opposta rispetto al NaI (Fig. 3.1(c)). E' uno scintillatore di 3" di diametro, anche questo accoppiato ad un opportuno PMT. Il bromuro di lantanio è un rivelatore con buone caratteristiche di scintillazione, risoluzione ed efficienza paragonabili o superiori a quelle del NaI.



(a) Parte anteriore anti-Compton con BGO e NaI con campione di tungsteno.



(b) Parte posteriore anti-Compton con BGO e NaI.



(c) Anti-Compton con BGO, LaBr e NaI.

Figura 3.1: Configurazioni anti-Compton utilizzate in laboratorio

Viste le caratteristiche del $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, soprattutto dal punto di vista di luce emessa e di risoluzione energetica sarebbe stato più opportuno adottare una diversa configurazione con il $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ come rivelatore principale, al centro dell'anello di BGO, e l'NaI come guard detector per i gamma riflessi. Il motivo per cui è stata adottata la configurazione descritta sopra è principalmente di natura pratica, dovuta alle dimensioni degli apparati disponibili nel laboratorio. Il $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, avendo dimensioni maggiori del diametro interno del BGO non poteva essere impiegato come rivelatore principale dell'esperimento.

3.1.2 Sistema a basso-fondo con rivelatore HPGe

Il secondo apparato di rivelazione utilizzato è un rivelatore al Ge a basso-fondo. Questo tipo di apparato consente di eliminare in buona parte la radiazione di fondo tramite un basso-fondo in piombo e, accoppiato ad un HPGe (*High-purity Germanium*, di avere dei picchi con una risoluzione particolarmente elevata (inferiore al 1%).

La radiazione gamma che segue l'attivazione da neutroni potrebbe avere un'attività bassa con uno spettro denotato da picchi poco intensi dello stesso ordine di grandezza della radiazione di fondo. Quest'ultima è composta principalmente da raggi cosmici, isotopi naturali e contaminazione radioattiva del materiale di schermaggio. Di queste, oltre ai raggi gamma emessi da radionuclidi naturali, una componente significativa del fondo è formata dall'interazione dei neutroni provenienti da due principali sorgenti: radioattività locale dovuta alla fissione spontanea di isotopi radioattivi di U e Th per via (n,α) e interazione dei raggi cosmici con il materiale che circonda il rivelatore. L'attività gamma può essere quindi indotta da cattura neutronica, scattering elastico e inelastico dei neutroni

Per schermare la radiazione di fondo è stato impiegato uno schermaggio di forma cilindrica in piombo, in modo tale da avere una sezione d'urto per effetto fotoelettrico predominante per raggi gamma con energie fino a 0.5 MeV, a causa dall'elevato Z; in questo modo anche fotoni con energie relativamente alte, come i gamma emessi dal ^{40}K (1.46 MeV), possono essere efficientemente assorbiti.



(a) Interno del basso-fondo con il rivelatore inserito.



(b) Esterno del basso-fondo.

Figura 3.2: Sistema a basso-fondo con rivelatore HPGe

All'interno del basso-fondo è stato inserito il rivelatore HPGe, caratterizzato, a differenza degli scintillatori descritti nella sezione precedente, da una elevata risoluzione energetica (migliore di almeno un ordine di grandezza), ma avente una scarsa efficienza.

Questo tipo di rivelatore per poter lavorare in condizioni ottimali ha bisogno di essere mantenuto a temperature molto basse (circa 77 K); è quindi a contatto

con un dewar riempito con azoto liquido. Il detector deve essere posizionato in un criostato con pareti a vuoto per inibire la conducibilità termica del cristallo con l'ambiente esterno.

Il detector, in particolare, è un HPGe (*High-Purity Germanium*) coassiale p-type. Da un lato del cristallo, lungo l'asse del cilindro è praticato un foro all'interno del quale è applicato uno degli elettrodi. L'altro è applicato sulla superficie esterna del cilindro, opposta alla cavità, che sarà quella più vicina al campione, collocata a qualche millimetro dalla capsula che lo contiene (Fig. 3.3). Il cristallo è inserito in una capsula fissata al criostato in modo da non poterne essere separata. Questo perché in questo tipo di sistema la capsula contenente il rivelatore e il criostato condividono lo stesso vuoto.

Questo tipo di rivelatore è progettato appositamente per rivelare fotoni gamma con energie comprese tra ~ 40 keV fino a ~ 10 MeV.

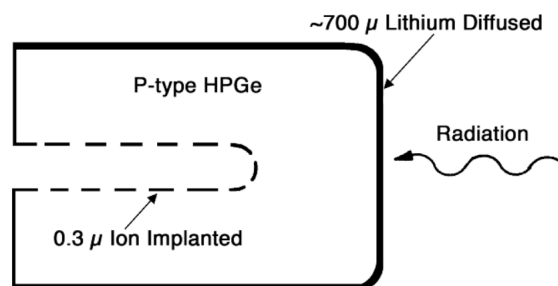


Figura 3.3: Configurazione del cristallo di Ge [10].

3.2 Elettronica

Nella sezione precedente sono stati introdotti i due sistemi di rivelazione, che vanno poi accoppiati ad un'adeguata elettronica per poter convertire i segnali emessi dai rivelatori in segnali elettrici e successivamente digitalizzarli. Poiché disponiamo di due apparati sperimentali differenti, anche l'elettronica e i sistemi di acquisizione saranno diversi ed adeguati a questi.

3.2.1 Elettronica per misure con anti-Compton

Nel caso dell'anti-Compton il sistema è formato da più scintillatori. Ogni scintillatore è accoppiato ad uno o più fotomoltiplicatori (PMT) preceduti da un fotocatodo, che converte i fotoni incidenti in fotoelettroni, in numero proporzionale alla quantità di luce stessa. All'interno del PMT i fotoelettroni vengono accelerati tra i dinodi e moltiplicati. Infine la carica finale viene raccolta dall'anodo, in modo da produrre un segnale elettrico. I segnali elettrici vengono poi digitalizzati dalla strumentazione elettronica, che consente di salvarli in un supporto informatico. Questo procedimento è noto come *Digital Pulse Processing* (DPP).

La strumentazione elettronica utilizzata nel caso dell'anti-Compton è composta da un *mini-crate* CAEN VME8004, configurato per ospitare le seguenti unità:

- *USB Bridge*, modello CAEN V1718, oppure un *PCI Optical Link Bridge*, modello CAEN V2710;
- *digitizer*, modello CAEN V1730 oppure V1720;
- alimentatore programmabile di alta tensione(HV), modello CAEN V6533.

Di seguito verranno descritte brevemente le caratteristiche principali di ogni componente elettronica appena elencata .

VME mini-crate Si basa sull'architettura VMEbus, uno standard ampiamente utilizzato in applicazioni fisiche e in informatica. Consente la comunicazione diretta tra le diverse schede ospitate nello stesso rack, ognuna delle quali è identificata da un indirizzo logico. Lo slot inferiore è quello adibito al controllo del flusso di dati ed è quello connesso, tramite l'USB Bridge, al computer.

Struttura	Case VME 19", 4 slot 6U, schede VME 160mm
Dimensioni	Larghezza 19", altezza 2U
Pannello posteriore	VME64 J1/J2, 4 slot, <i>daisy chain</i> automatico
Input principali	Auto range: 90 ÷ 264 Vac, 47 ÷ 63 Hz
Potenza output	250 W @ 110 ÷ 264 Vac
Corrente massima	25 A @ +5 V, 16 A @ +12 V, 1A @ -12 V
	< 60 mVpp @ +5 V
Rumore e ripple	< 160 mVpp @ +12 V
	< 250 mVpp @ -12 V
Temperatura operativa	0 ÷ 50° C
Raffreddamento	Ventilazione 66 m ³ /ora

Tabella 3.1: Caratteristiche principali del mini-crate CAEN VME8004

Bridge L'USB Bridge CAEN V1718 fornisce una connessione standard con il computer, consentendo il trasferimento dei dati fino a 30 MB/s. E' posto nella posizione 1 del crate VME, normalmente adibita al controllo del flusso dei dati.

Packaging	Modulo VME, 1 unità di larghezza e 6U in altezza
Interfaccia PC	USB 2.0
Velocità di trasferimento	30 Mb/s
Outputs	5 NIM/TTL, programmabile
Inputs	2 NIM/TTL, programmabile

Tabella 3.2: Caratteristiche dell'USB Bridge CAEN V1718

Alimentatore HV L'alta tensione necessaria per il funzionamento dei PMT viene erogata dal modulo programmabile di alimentazione, modello CAEN V6533, provvisto di 6 canali di alta tensione, fino a 4 kV, 3mA (massimo 9 W), delle quali tre positive e tre negative. I valori della tensione per ogni canale possono essere impostati direttamente dal software di acquisizione dati. Il modello è dotato, inoltre, di un sensore di temperatura per ogni canale, che consente di controllare pericolosi aumenti di temperatura all'interno del crate.

VMAX hardware	0 ÷ 4 kV, comune a tutti i canali della scheda
Polarità	Positiva o negativa; ritorno comune <i>floating</i>
Corrente max. output	3mA (max 9 W)
Set tensione/risoluzione monitor	100 mV
Set corrente/risoluzione monitor	50 ns
Precisione VMAX hardware	2% FSR
VMAX software	0 ÷ 4 kV selezionabile per ogni canale
Risoluzione VMAX software	100 mV
Ripple tensione	1 kV/500 μ A: 3 mV tipico/5 mV max 4 kV/2 mA: 12 mV tipico/20 mV max 3 kV/3 mA: 10 mV tipico/20 mV max
Ramp Up/Down	1 ÷ 500 V/s, step 1 V/s

Tabella 3.3: Caratteristiche del modulo di alimentazione HV CAEN V1718

Digitizer Il digitizer CAEN V1730 è lo strumento che si occupa della misura dei segnali provenienti dal PMT digitalizzandoli per consentirne l'analisi. E' dotato di 16 canali in ingresso e flash ADC con risoluzione 14 bit e velocità di campionamento pari a 500 MS/s. Questo tipo di digitizer, a differenza di altri, dispongono di FPGA programmabili, due per canale, nel caso del modello utilizzato in laboratorio, uno per canale nel caso del V1720. In esse possono essere implementati differenti firmware, dedicati a specifiche funzioni avanzate che, in questo caso, si occupano dell'elaborazione di segnali digitali fornendo le seguenti funzionalità per ogni evento registrato:

- *time stamp*: riferimento temporale rispetto all'inizio della misura;
- integrazione parziale e totale dei segnali, utilizzate per la PSD online, cioè elaborata in fase di acquisizione;
- salvataggio di una parte selezionata del segnale digitalizzato, necessaria per l'analisi offline.

Il campionamento del segnale è personalizzabile in diversi modi, dalla scelta del trigger al numero di campionamenti del segnale da salvare ed ogni canale ha la sua configurazione indipendente.

Input analogico	16 canali, single ended Range di input: $0.5 \div 2 V_{pp}$, programmabile Bandwidth: 250 MHz
Conversione	Risoluzione: 14 bit Campionamento: 500 MS/s su ogni canale
Memory Buffer	640 kS/ch o 5.12 MS/ch Buffer Multi Event Divisibile in $1 \div 1024$ buffer Dim. evento programmabile Pre-post trigger Accesso indipendente lettura-scrittura
Trigger	External Software Self-trigger
Interfaccia comunicazione	VME64X, Transfer mode: LT32, MBLT (70 MB/s con bridge CAEN), CBLT32/64, 2eVME, 2eSST (fino a 200 MB/s) Link ottico: fino a 80 MB/s

Tabella 3.4: Caratteristiche principali digitizer CAEN V1730

DAQ Il segnale analogico, opportunamente adattato all'intervallo dinamico del digitizer, viene campionato da un flash ADC e salvato in un buffer di memoria circolare, di dimensioni programmabili. All'arrivo del segnale di trigger, il buffer viene bloccato e reso disponibile per la lettura mentre l'acquisizione continua in un'altra memoria. Il vantaggio di questo sistema, a differenza dell'elettronica analogica è che è possibile accettare segnali di trigger molto vicini tra loro, in modo tale da non avere tempi morti, almeno finché la velocità media con cui la memoria viene liberata è maggiore di quella con cui viene scritta.

Al digitizer sono poi incorporate delle FPGA per algoritmi di Digital Pulse Processing for Pulse Shape Discrimination (DPP-PSD). In questo modo è possibile eseguire l'elaborazione online dei segnali digitalizzati, calcolando quantità fisiche (come la carica totale, misure di PSD, ecc.) effettuando in questo modo una prima analisi delle forme d'onda provenienti dall'ADC, in modo da ridurre il flusso di dati in uscita e massimizzare l'efficienza del sistema di acquisizione.

Il meccanismo di acquisizione è regolato dal digitizer, che converte continuamente i segnali di input in segnali digitali, sovrascrivendo i valori nella memoria di buffer. La condizione di trigger avviene quando la differenza tra la *baseline* e il segnale digitale è superiore ad un certo valore di soglia, chiamato *threshold*; in questo caso l'FPGA permette di scorrere all'indietro la memoria fino ad un valore di *pre trigger* e di aprire la finestra di acquisizione, creando così un evento per un totale di valori pari a n *samples*.

I parametri impostati sono:

- *pre gate*: punto di inizio integrazione del segnale;

- *long gate*: numero di passi utilizzati per l'integrazione totale;
- *short gate*: numero di passi utilizzati per l'integrazione parziale del segnale.

L'FPGA fornisce quindi i seguenti valori, dei quali i primi due sono il risultato delle integrazioni, evento per evento, nominate sopra:

- *qlong*: fornisce una stima dell'ampiezza del segnale;
- *qshort*: fornisce una stima dell'ampiezza della componente veloce dell'impulso;
- *time stamp*: tempo trascorso dall'inizio dell'acquisizione, in unità di campionamento; il tempo di campionamento del digitizer utilizzato è 2 ns;
- *baseline*: media del segnale digitale per un numero di campioni fissato in assenza di trigger

Il software di acquisizione utilizzato in laboratorio è chiamato ABCD ed è un sistema progettato prevalentemente per acquisire dati in esperimenti di fisica nucleare. E' composto da un set di server che scambiano informazioni attraverso appositi sockets. Supporta l'acquisizione dalla maggior parte dei digitizer CAEN (come V1730, DT5730, ...), con i firmware standard o DPP-PSD, e la connessione tramite USB e OpticalLink. L'interfaccia di ABCD è implementata come web-service ed è accessibile tramite browser.

Time stamp	64 bit integer
Qshort	16 bit integer
Qlong	16 bit integer
Baseline	16 bit integer
Channel number	8 bit integer
PUR flag	8 bit integer, unused

Tabella 3.5: Struttura dati di un segnale campionato dal digitizer e salvato tramite il software di acquisizione ABCD (PSD protocol).

I file possono essere salvati in tre diversi formati (Events, Waveforms e Row files) a seconda dell'uso che se ne deve fare. In questo caso i dati sono stati salvati come file di eventi, in cui ogni evento PSD è un numero in binario di 16 byte distribuiti come in Tab. 3.5.

Tramite questo sistema, inoltre, possono essere impostati i parametri di acquisizione (pre gate, long gate, short gate, ecc.) tra cui anche la tensione di alimentazione dei PMT.

3.2.2 Elettronica per misure con il sistema a basso fondo e rivelatore HPGe

L'elettronica del sistema a basso fondo, a differenza di quella utilizzata per il sistema anti-Compton, è di tipo analogico. Il segnale uscente dal rivelatore è già preamplificato, quindi l'elettronica a disposizione per questo esperimento è

costituita da uno shaping amplifier e un multicanale (MCA). Il primo trasforma i segnali provenienti dal detector in segnali con forma simil-Gaussiana, avente l'ampiezza proporzionale all'energia rilasciata dalla particella, mentre il secondo cambia il segnale analogico proveniente dall'amplificatore in segnale digitale. Il segnale uscente dal MCA viene poi trasmesso tramite cavo USB al computer su cui è installato il software per l'acquisizione.

MCA

Il multicanale utilizzato è l'EASY-MCA della ORTEC. EASY-MCA permette di trasformare i segnali analogici provenienti dall'amplificatore in segnali digitali così da riempire l'istogramma dello spettro di energia della radiazione rivelata. Oltre ai segnali provenienti dallo shaping amplifier per Pulse Height Analysis (PHA) può ricevere in input anche segnali in ADC GATE, Pile-Up Rejection (PUR) e BUSY, che vengono utilizzati per correzioni live-time al circuito. E' provvisto di un unico output che collega l'MCA a PC tramite USB-2.0.

In Fig. 3.4 è schematizzata la struttura del MCA, mentre in Tab. 3.6 sono riportate le caratteristiche principali.

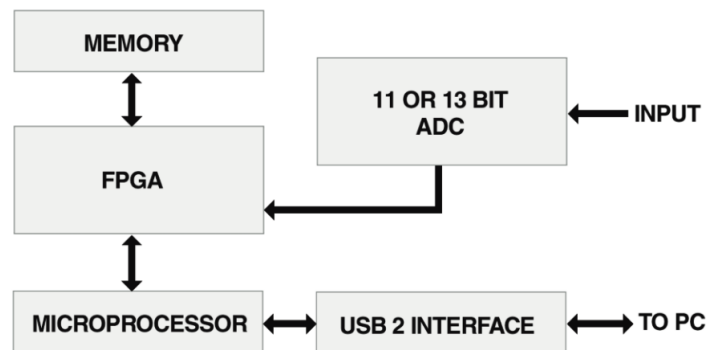


Figura 3.4: Diagramma semplificato di EASY-MCA.

ADC	sliding scale linearization e tempo morto $< 2 \mu s$
Integral non-linearity	$\leq \pm 0.025\%$ sul 99% del range dinamico
Differential non-linearity	$\leq \pm 1\%$ sul 99% del range dinamico
Gain instability	$\leq \pm 50 ppm/^{\circ}C$
Dead time correction	Correzione live-time estesa in accordo con il metodo di Gedcke-Hale
Interfaccia USB	velocità di trasferimento fino ad un max di 480 Mbps

Tabella 3.6: Caratteristiche principali EASY-MCA.

Software per MCA

Per poter acquisire i dati trasmessi dal MCA, ORTEC EASY-MCA fornisce un software apposito chiamato MAESTRO. E' un programma provvisto di un'interfaccia grafica abbastanza intuitiva che permette di semplificare il controllo dell'hardware.

Durante l'acquisizione è possibile visualizzare simultaneamente lo spettro completo e la versione ingrandita attorno alla regione di interesse, nella quale si possono selezionare i singoli picchi per leggere le caratteristiche in tempo reale.

I dati acquisiti vengono salvati in un file di testo in cui sono riportati tutti i parametri dell'acquisizione, tra cui il tempo di acquisizione totale e reale (tempo totale a cui viene sottratto il tempo morto) e il numero di canali dell'istogramma (8192), e lo spettro acquisito, in un'unica colonna corrispondente alle frequenze dell'istogramma, mentre il canale è un numero intero che va da 0 (min) a 8191 (max).

Capitolo 4

Analisi dati

L'analisi dei dati acquisiti con la strumentazione precedentemente descritta è stata effettuata utilizzando principalmente due programmi di analisi: Fityk e ROOT.

Il primo è un programma con interfaccia grafica per processare dati ed interpolare curve non lineari. È stato utilizzato per analizzare gli spettri dei campioni attivati e degli elementi radioattivi utilizzati nella calibrazione dell'apparato, in particolare per effettuare semplici fit gaussiani dei picchi di interesse.

ROOT, invece, è un pacchetto software di analisi dati, orientato ad oggetti, sviluppato dal CERN e composto da diverse librerie scritte in C++. Sono state perciò implementate delle macro per poter processare i dati: una prima macro per i fit lineari utilizzati per le calibrazioni e una seconda per fare l'anti-Compton dello spettro dei campioni attivati. Quest'ultima permette di trovare i segnali in coincidenza tra i rivelatori e sottrarli dallo spettro totale del rivelatore principale. Lamacro sviluppata permette inoltre di salvare in un file gli spettri e di disegnarne l'istogramma.

4.1 Calibrazione dell'apparato sperimentale

Ogni rivelatore impiegato durante il lavoro di tesi è stato caratterizzato. Per prima cosa, per poter individuare con correttezza l'energia corrispondente ai picchi dei campioni attivati è stato necessario ottenere una conversione tra il canale del sistema di acquisizione e l'energia corrispondente, ovvero ottenere una calibrazione in energia del sistema.

Supponendo che questa relazione sia lineare, possiamo ricavare l'energia a partire dal canale conoscendo i parametri a e b dall'equazione seguente:

$$E_\gamma = a + bN_{ch} \quad (4.1)$$

Dove E_γ è l'energia del fotone incidente e N_{ch} il canale corrispondente al centroide del picco rivelato. In particolare, utilizzando Fityk, sono stati individuati i picchi relativi alle energie note e sono stati fittati con delle Gaussiane, ricavandone centroide e FWHM. Quindi i canali così ottenuti e i valori noti delle energie dei raggi gamma caratteristici elencati in Tab. 4.1 sono stati interpolati linearmente. Per ogni rivelatore la calibrazione è stata effettuata con tutte le sorgenti a disposizione nella prima giornata di laboratorio e poi solo verificata

nelle giornate successive, in modo da poter correggere piccole variazioni dovute alla temperatura, alla tensione dei PMT, ecc.

Calibrazione del sistema anti-Compton

In Tab. 4.1 sono riportate le sorgenti radioattive utilizzate per calibrare i tre scintillatori: NaI(Tl), BGO e LaBr₃(Ce).

Elemento	Energie (keV)
⁶⁰ Co	1173.228, 1332.492
¹³⁷ Cs	661.657
²² Na	511.0, 1274.537
⁸⁸ Y	898.042, 1836.063
⁵⁴ Mn	834.848

Tabella 4.1: Elementi radioattivi utilizzati per la calibrazione dell'apparato.

Per quanto riguarda l'NaI(Tl) il procedimento di calibrazione è stato ripetuto ogni volta, in quanto i dati acquisiti con questo rivelatore sono i più significativi ai fini della misura che verrà eseguita. Nella Tab. 4.2 sono state messe a confronto le calibrazioni fatte nei diversi giorni; si può osservare come effettivamente sia il coefficiente angolare che l'intercetta della siano sempre compatibili tra loro e rientrino perfettamente all'interno dell'errore di misura. Si è scelto, quindi, di adottare la prima calibrazione effettuata, perché si disponeva di una maggiore quantità di punti da poter interpolare. La retta di calibrazione in questione è mostrata in Fig. ??.

Rivelatore	Calibrazione	Elementi	Parametri retta (keV)
NaI(Tl)	1	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ²² Na ⁸⁸ Y, ⁵⁴ Mn	a = -6 ± 26 b = 0.228 ± 0.006
	2	¹³⁷ Cs, ²² Na, ⁸⁸ Y	a = 2 ± 26 b = 0.226 ± 0.006
	3	⁶⁰ Co, ⁵⁴ Mn	a = -15 ± 82 b = 0.22 ± 0.02

Tabella 4.2: Parametri delle rette di calibrazione del NaI(Tl), con i relativi elementi utilizzati per calibrare l'apparato.

Nel caso del BGO, a differenza dell'NaI(Tl), la calibrazione è stata effettuata una volta soltanto, il primo giorno. Il motivo di questa scelta è che la calibrazione del BGO non è strettamente necessaria ai fini dell'esperimento, in quanto questo rivelatore è servito in pratica da veto sugli eventi corrispondenti all'interazione Compton nel NaI(Tl). A causa della sua scarsa risoluzione in energia, non si sono potute utilizzare, ad esempio, tutte le sorgenti elencate in Tab. 4.1, ma solo quelle che presentano un picco o due picchi molto distanti in energia, così da poterle discriminare.

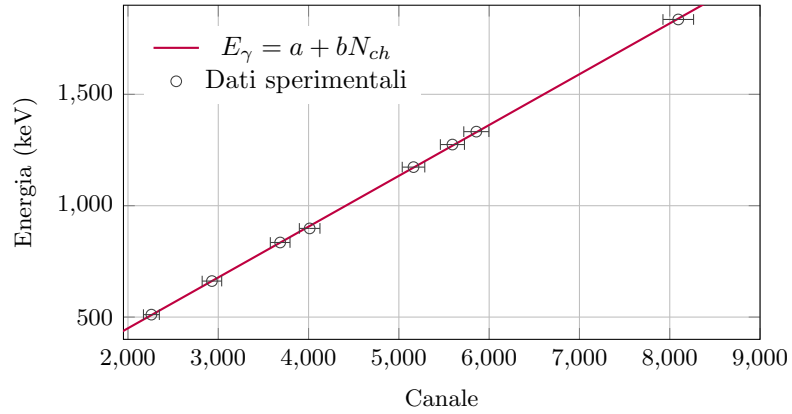


Figura 4.1: Retta di calibrazione del NaI utilizzando tutte le sorgenti (Calibrazione 1 in Tab. ??)

Rivelatore	Elementi	Parametri retta (keV)
BGO	^{22}Na , ^{54}Mn , ^{88}Y	$a = 77 \pm 295$ $b = 2.938 \pm 0.3255$

Tabella 4.3: Parametri ricavati dalla retta di calibrazione del BGO, con i relativi elementi utilizzati

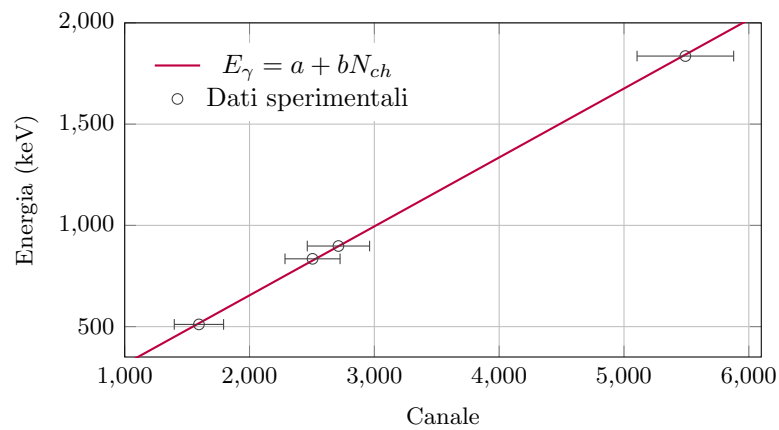


Figura 4.2: Retta di calibrazione del BGO

Anche per il $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ si dispone di un'unica calibrazione (Fig. 4.3). In questo caso però il motivo è dovuto al fatto che il $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ è stato utilizzato in un'unica giornata, solo per due misure di attivazione. Avendo una risoluzione in energia migliore rispetto ad $\text{NaI}(\text{Tl})$ e BGO si può notare come l'errore sulla posizione del centroide sia molto minore.

Rivelatore	Elementi	Parametri retta (keV)
LaBr	^{60}Co , ^{54}Mn , ^{88}Y	$a = -13 \pm 20$ $b = 0.277 \pm 0.005$

Tabella 4.4: Parametri ricavati dalla retta di calibrazione del $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, con i relativi elementi utilizzati.

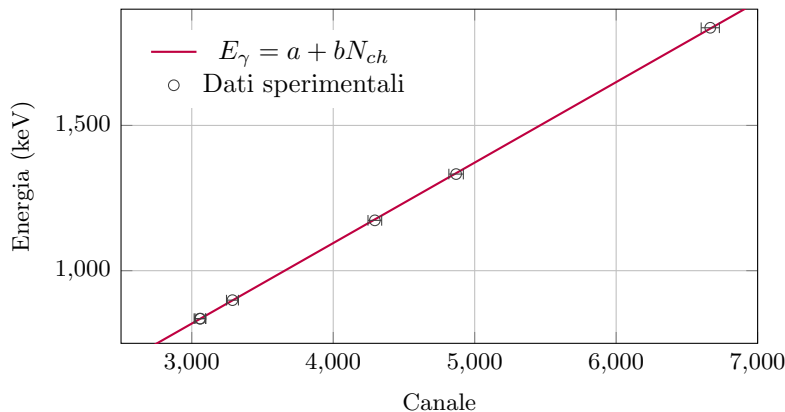


Figura 4.3: Retta di calibrazione del LaBr_3

In tutte le tabelle (??, 4.3, 4.4) in cui sono riportati i parametri dei fit sono elencati anche le sorgenti impiegate per la calibrazione.

Calibrazione basso-fondo

La calibrazione del germanio è più delicata rispetto alla calibrazione degli scintillatori visti fino ad ora, a causa della sua'elevata risoluzione in energia, tipicamente 2 keV all'energia gamma di 1.33 MeV

In questo caso sono state utilizzate per la prima calibrazione una sorgente di ^{152}Eu . Per la calibrazione di verifica, invece, sono state utilizzate una sorgente di ^{88}Y e una di ^{133}Ba .

Dalla Tab. 4.6 si può osservare come la calibrazione non sia variata da un giorno all'altro, nei limiti dell'errore sperimentale. D'ora in poi la calibrazione che verrà utilizzata nelle conversioni tra canale ed energia dei campioni attivati sarà la prima, ovvero quella effettuata con la sorgente di ^{152}Eu .

Riportiamo in Fig. 4.4 il grafico relativo all'interpolazione lineare dei dati acquisiti con basso fondo e sorgente di Europeo.

Elemento	Energie (keV)
^{152}Eu	121.7817, 244.6974, 344.2785, 411.1165 443.9606, 778.9045, 867.38, 964.057 1089.737, 1112.076, 1408.013
^{88}Y	898.042, 1836.063, 2734.0
^{133}Ba	80.9979, 160.6120, 223.2368, 276.3989 302.8508, 383.8485

Tabella 4.5: Elementi radioattivi disponibili in laboratorio utilizzati per la calibrazione dell'apparato.

Calibrazione	Elementi	Parametri retta (keV)
1	^{152}Eu	$a = 0.5 \pm 0.4$ $b = 0.3603 \pm 0.0002$
2	$^{88}\text{Y}, ^{133}\text{Ba}$	$a = 0.8 \pm 0.4$ $b = 0.3604 \pm 0.0001$

Tabella 4.6: Parametri della retta di calibrazione del HPGe relativi alle due diverse calibrazioni.

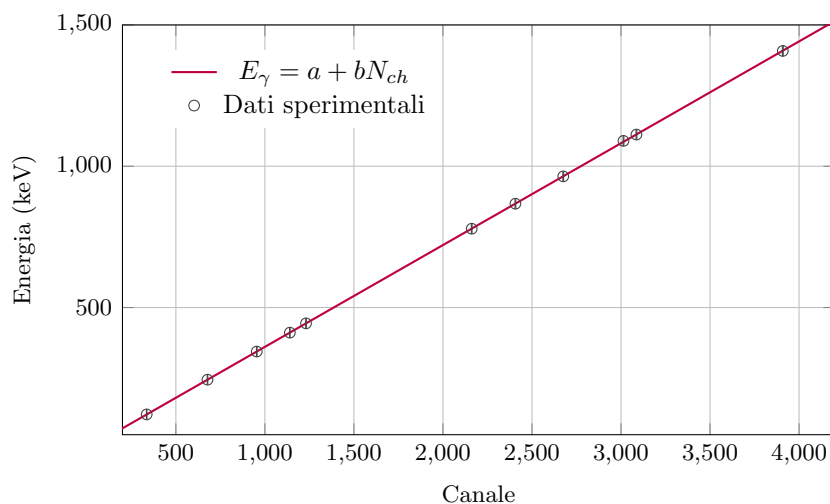


Figura 4.4: Retta di calibrazione del HPGe con sorgente di ^{152}Eu .

4.2 Analisi dei campioni attivati

La procedura seguita con entrambi i sistemi per l'attivazione e successiva misura dei campioni attivati, in generale, è stata caratterizzata:

- attivazione dei campioni con neutroni termici;
- acquisizione degli spettri dei campioni attivati per un tempo pari ad almeno due tempi di dimezzamento (ad eccezione del Tungsteno che, avendo un tempo di dimezzamento di 24 ore, è stato sottoposto a rivelazione per circa 1/8 del suo tempo di dimezzamento);
- identificazione degli elementi attivati, tramite analisi di energia, tempo di dimezzamento e massa.

Questi dati, oltre a permettere la caratterizzazione e il riconoscimento degli elementi presi in esame, sono stati utilizzati per calcolare la risoluzione in energia dei vari rivelatori come:

$$R = \frac{FWHM}{E_{picco}} 100\%. \quad (4.2)$$

Nei paragrafi successivi verranno delineate le assi delle analisi per i due sistemi di misura.

4.2.1 Sistema anti-Compton

L'analisi degli spettri acquisiti con il sistema dell'anti-Compton è quella che ha richiesto maggior lavoro.

Poiché questo tipo di apparato strumentale non è fornito, come il basso-fondo, di un sistema di schermaggio che protegga i rivelatori dalla radiazione di fondo dell'ambiente, come prima cosa è stato necessario acquisire una misura del fondo con tutti i rivelatori a disposizione (BGO, NaI(Tl) e LaBr₃(Ce)). In particolare dal fondo del NaI(Tl) si può individuare molto bene il picco relativo al ⁴⁰K contenuto nel calcestruzzo del bunker dove sono state effettuate le misure.

In Fig. 4.5 si possono individuare il picco del ⁴⁰K (1460 keV).

Il LaBr₃(Ce) invece è caratterizzato esso stesso da una radioattività interna non trascurabile, ma che può essere facilmente eliminata sottraendola dallo spettro a cui si è interessati. In Fig. 4.6 si osservano diversi picchi, tra cui, come per lo Ioduro di Sodio il picco del ⁴⁰K, che ha un peso decisamente più importante rispetto al resto dei picchi relativi all'attività interna del rivelatore.

Per quanto riguarda lo spettro del BGO non sono distinguibili i picchi dei diversi elementi radioattivi dell'ambiente, come per esempio nel NaI(Tl) o nel LaBr₃(Ce), a causa della sua scarsa risoluzione. Per via del suo elevato Z, tuttavia riesce a rivelare molti più eventi rispetto al NaI(Tl), che anzi viene anche schermato dall'anello di BGO che lo circonda. Questo è visibile nel grafico in Fig. 4.7, in cui sono state messe a confronto le acquisizioni del fondo con i tre diversi scintillatori.

Da qui in avanti, tutti gli spettri considerati saranno con il fondo sottratto. Nella prima fase i rivelatori sono stati posizionati in configurazione *annular guard*, facendo uso solo del NaI(Tl) e del BGO. In questa configurazione sono stati acquisiti gli spettri dei campioni attivati di Alluminio e Indio.

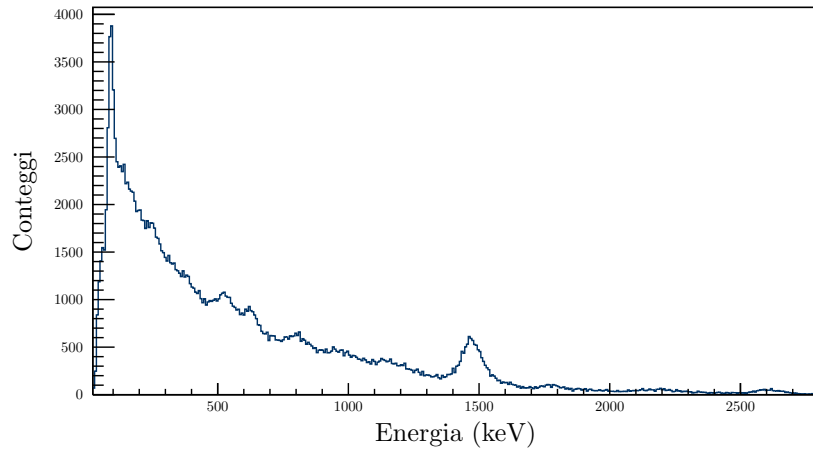


Figura 4.5: Fondo acquisito con NaI, in scala logaritmica.

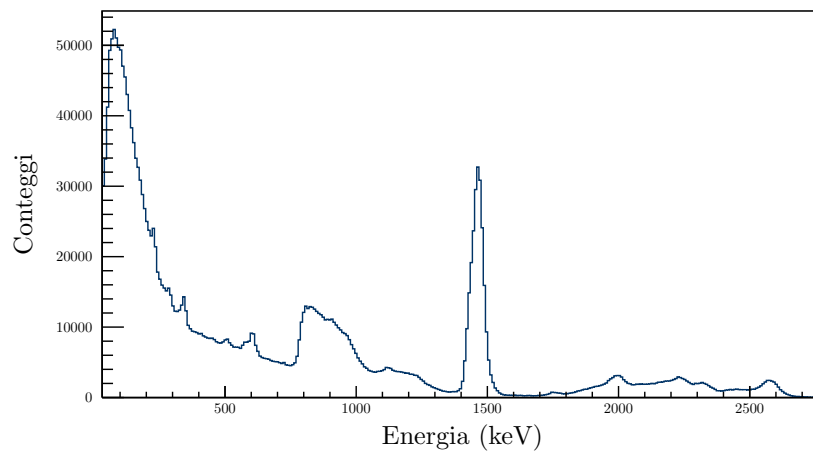


Figura 4.6: Fondo acquisito con LaBr.

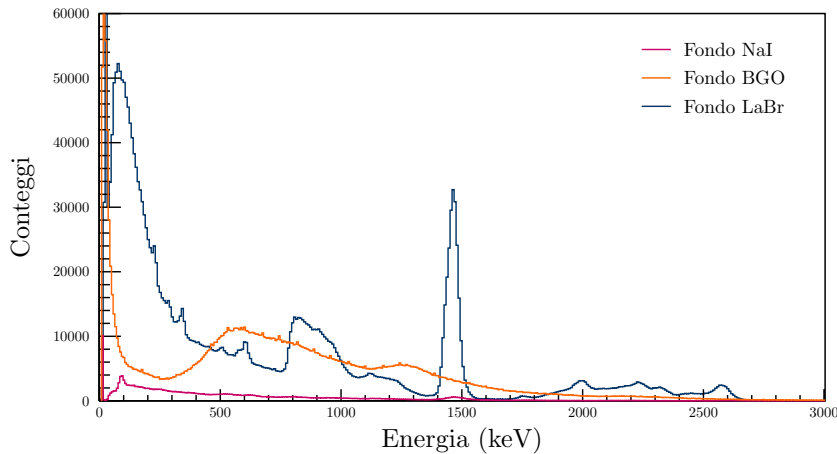


Figura 4.7: Confronto tra i background acquisiti con i tre rivelatori.

Si è successivamente cambiata la configurazione (*annular guard/plug*), posizionando il $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ nel lato scoperto, in posizione opposta agli altri due rivelatori. In questa configurazione sono stati acquisiti, invece lo spettro dello Ioduro di Sodio e del Tungsteno.

Per analizzare i dati è stata implementata una macro che permettesse di sottrarre la componente Compton dallo spettro del $\text{NaI}(\text{Tl})$ e analizzare gli spettri ottenuti:

- I dati contenuti dal software di acquisizione sono stati ordinati in modo da avere, per ciascun rivelatore l'informazione delle energie dei fotoni e il tempo ad essa associata (timestamp, in unità di 2 ns).
- E' stato riempito un istogramma per ciascun rivelatore, contenente lo spettro in energia, con gli eventi contenuti in ciascun vettore.
- In seguito sono state cercate le coincidenze tra $\text{NaI}(\text{Tl})$ e BGO e tra $\text{NaI}(\text{Tl})$ e $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Gli eventi in coincidenza sono stati scelti in modo tale che la differenza di tempo tra un evento nel $\text{NaI}(\text{Tl})$ e uno nel guard detector fosse minore di un certo intervallo temporale fissato. Quest'ultimo è stato scelto osservando le differenze di tempo degli eventi in coincidenza. In Fig. 4.8 si può osservare lo spettro temporale delle coincidenze tra $\text{NaI}(\text{Tl})$ e BGO nel caso del campione attivato di Indio. Il picco rappresenta proprio la finestra temporale all'interno della quale due eventi sono coincidenti, mentre al di fuori di questa la coincidenza è solo un evento statistico. Nel caso delle coincidenze tra $\text{NaI}(\text{Tl})$ e BGO la finestra temporale è stata impostata a 60 ns, mentre per le coincidenze tra $\text{NaI}(\text{Tl})$ e $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ si sono osservate coincidenze all'interno di un intervallo di 200 ns.
- Gli eventi trovati in coincidenza tra $\text{NaI}(\text{Tl})$ e guard detectors vanno poi a riempire degli istogrammi, che quindi contengono la componente Compton dello spettro.

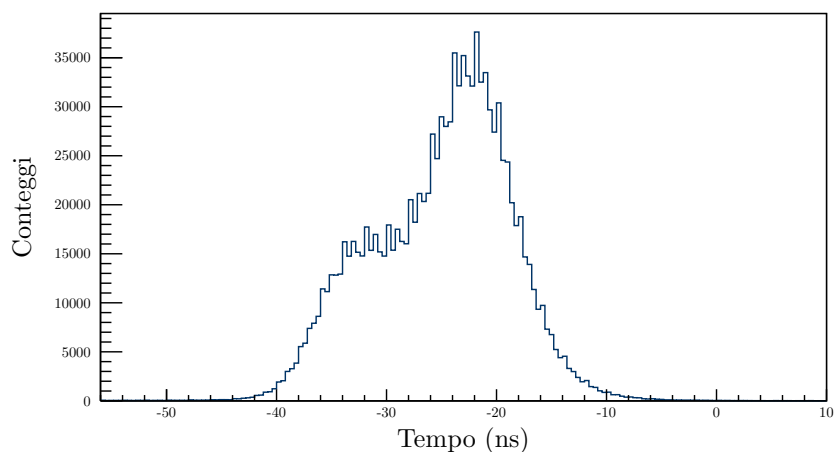


Figura 4.8: Spettro temporale delle coincidenze tra NaI e BGO con campione di Indio.

- Lo spettro Compton così ottenuto è stato poi sottratto allo spettro del rivelatore NaI(Tl) ottenendo così l'anti-Compton.

In Fig.4.9 si presenta tutta la procedura dell'analisi per il caso dell'Indio: in nero lo spettro totale del rivelatore principale, in rosso lo spettro di coincidenza tra BGO ed NaI(Tl) (eventi Compton), in azzurro lo spettro di fondo, in blu lo spettro del rivelatore principale con il filtro anti-compton ma senza fondo sottratto e in verde lo spettro finale con filtro anti-compton e fondo sottratto.

Nel sistema anti-Compton con il $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, si sono cercate le coincidenze in maniera separata tra NaI(Tl)-BGO e a NaI(Tl)-LaBr, poi unite in un unico spettro (nel caso di Tungsteno e Ioduro di Sodio, per i quali sono stati utilizzati entrambi i guard detectors). Di seguito si presentano gli spettri ottenuti per i vari elementi attivati, rispettivamente, in Fig. 4.10 l'alluminio, in Fig. 4.12 si presenta il risultato dell'attivazione del tungsteno, in Fig. 4.11 lo Iodio. Dall'analisi degli elementi attivati, risulta evidente che il sistema Anti-Compton funziona molto bene per medio-basse energie dei campioni attivati, mentre risulta meno significativa ad energie alte. Nel caso dell'alluminio, con emissione a 1773 KeV, non si hanno significativi contributi compton da altre righe.

Maggiori effetti sugli spettri acquisiti si possono osservare sui campioni di Indio e Alluminio. Il primo presenta ancora un fondo molto alto, che però viene diminuito notevolmente dall'anti-Compton. Per quanto riguarda lo spettro dell'Indio, invece, quello che si osserva è un generale miglioramento dello spettro, anche se l'elevata attività indotta nel campione fa sì che tra le coincidenze "vere" di effetto Compton tra i due rivelatori vengano contate anche delle coincidenze puramente statistiche in corrispondenza dei picchi. Il miglioramento si nota comunque nell'abbassamento generale del contributo Compton che conferisce ai picchi una forma maggiormente più simmetrica. (soprattutto a basse energie, Fig. ??).

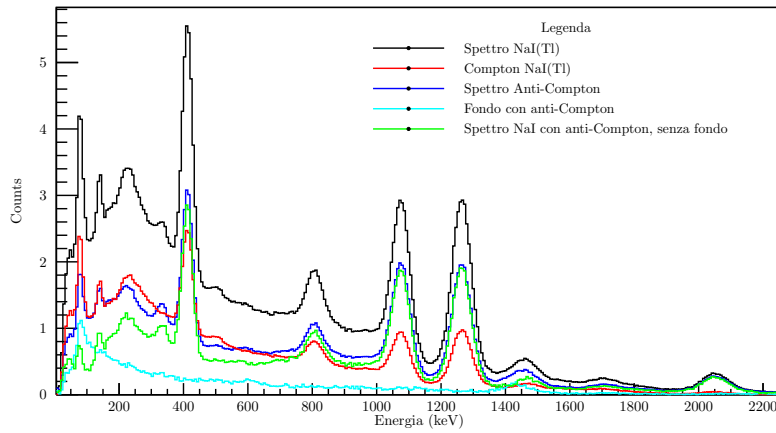


Figura 4.9: procedura dell'analisi per il caso dell'Indio: in nero lo spettro totale del rivelatore principale, in rosso lo spettro di coincidenza tra BGO ed NaI(Tl) (eventi Compton), in azzurro lo spettro di fondo, in blu lo spettro del rivelatore principale con il filtro anti-compton ma senza fondo fondo sottratto e in verde lo spettro finale con filtro anti-compton e fondo sottratto.

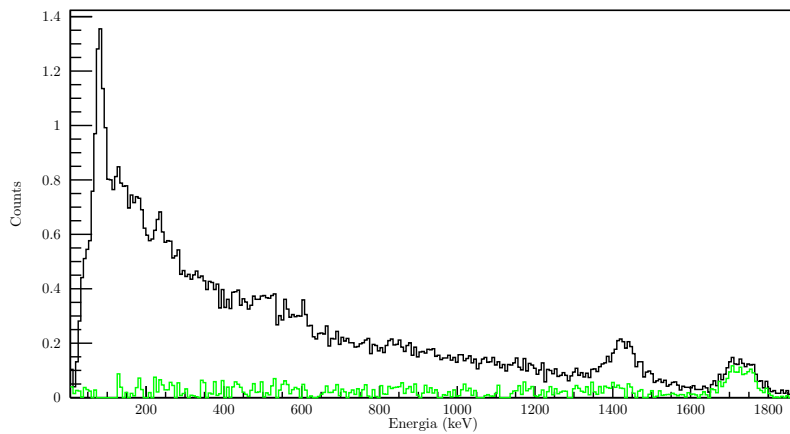


Figura 4.10: Spettro con e senza l'applicazione di anti-Compton del campione di ^{28}Al .

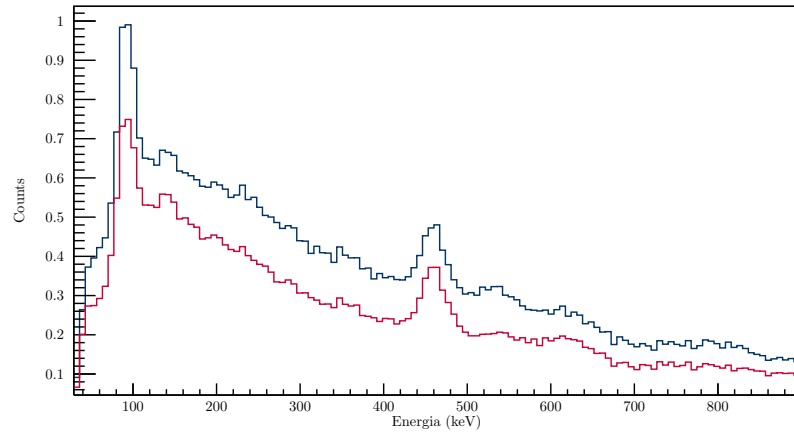


Figura 4.11: Spettro con e senza l'applicazione di anti-Compton del campione di NaI.

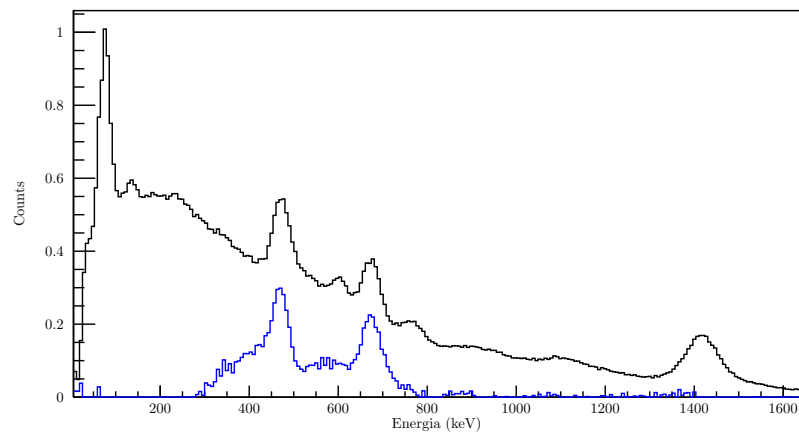


Figura 4.12: Spettro con e senza l'applicazione di anti-Compton del campione di W.

I risultati di tutti i valori di energia misurati sono riportate in Tab. 4.12 e confrontati con i risultati ottenuti con il sistema di basso-fondo con HPGe.

Per il picco di Iodio, calcoliamo anche il peak to total parameter, per dare una stima del miglioramento del filtro anti-Compton:

$$\text{Peaktototalarea} = \frac{\text{areapicco}}{\text{areatotale}}. \quad (4.3)$$

In Tab. 4.9 si può osservare che la risoluzione migliora anche di due punti percentuale per i picchi meno intensi.

I risultati di tutti i valori di energia misurati sono riportate in Tab. 4.12 e confrontati con i risultati ottenuti con il sistema di basso-fondo con HPGe.

Per stimare il miglioramento del sistema con l'uso dell'anti-Compton, possiamo stimare il cosiddetto peak to total parameter per lo spettro dello Iodio:

$$\text{Peaktototal} = \frac{\text{areadelpicco}}{\text{areatotale}}. \quad (4.4)$$

	Area picco (keV/s)	Area fondo (keV/s)	Peak to total
Totale	2.82 ± 1.67	4.5	0.4 ± 0.1
Anti-Compton	3.09 ± 1.75	3.3	0.5 ± 0.1

Tabella 4.7: Peak to total area parameter per lo Iodio

Quindi in realtà quindi si osserva un miglioramento del 25%

	E_γ teorica (keV)	$E_{\gamma,\text{NaI}}$ (keV)	$E_{\gamma,\text{BGO}}$ (keV)	$E_{\gamma,\text{LaBr}}$ (keV)	$E_{\gamma,\text{CS,tot}}$ (keV)
NaI	442.901	458 ± 15	459 ± 15	459 ± 15	458 ± 15
W	479.53	490 ± 18	491 ± 17	491 ± 17	491 ± 19
	685.81	699 ± 20	700 ± 20	699 ± 20	699 ± 21

Tabella 4.8: Energie misurate sottraendo i vari contributi Compton relativi ai rivelatori utilizzati, nel caso di NaI e W.

	$E_{\gamma,th}$ (keV)	R_{NaI} (%)	R_{BGO} (%)
Al	1778.987	5.3	4.7
	138.29	12.1	12.4
	336.241	11.4	9.1
	416.9	9.0	9.3
	818.68	8.0	8.4
In	1097.28	5.9	6.2
	1293.56	5.1	5.2
	1507.59	3.5	3.4
	1752.5	6.4	5.3
	2112.29	4.7	5.6

Tabella 4.9: Confronto tra le risoluzioni energetiche di In e Al con e senza applicazione dell'anti-Compton.

	$E_{\gamma,th}$ (keV)	R_{NaI} (%)	R_{BGO} (%)	R_{LaBr} (%)	$R_{CS,tot}$ (%)
NaI	442.901	7.8	7.5	7.9	7.9
W	479.53	8.7	8.3	8.2	8.9
	685.81	6.6	6.8	6.8	7.1

Tabella 4.10: Confronto tra le risoluzioni energetiche di NaI e W con e senza applicazione dell'anti-Compton.

4.2.2 Sistema basso-fondo

Come già illustrato nel capitolo precedente, il rivelatore al germanio è inserito all'interno di un basso-fondo di piombo che ha la funzione di schermare la radiazione di fondo dell'ambiente, in modo da permettere l'individuazione anche dei picchi meno intensi, in modo da caratterizzare ancora meglio gli elementi contenuti all'interno dei campioni attivati.

L'analisi si è svolta in modo molto semplice: come nel caso dell'anti-Compton è stato sottratto il fondo allo spettro dell'elemento attivato. In quest'ultimo sono stati poi individuati i picchi dell'elemento e fittati con delle gaussiane, estrapolando centroide, FWHM e area del picco. Centroide e FWHM sono stati poi convertiti da canale ad energia utilizzando la calibrazione nota.

Nelle figure che seguono sono riportati gli spettri acquisiti con il sistema a basso-fondo. Rispetto ai grafici ottenuti con l'anti-Compton si nota un notevole miglioramento nella risoluzione, come riportato anche in Tab. 4.11, ma una perdita in fatto di efficienza (almeno di un fattore 10). Tuttavia anche con una scarsa efficienza, poiché il basso-fondo scherma la maggior parte della radiazione ambientale, si riescono ad individuare anche dei picchi con intensità inferiore al 1%.

Per il campione di NaI-CsI attivato, unico campione non costituito da un elemento, era stato scelto per misurare unicamente l'attività dello Iodio che lo costituisce, avendo un tempo di dimezzamento non troppo elevato (25 minuti), mentre il Sodio ha un tempo di dimezzamento molto maggiore (14 ore) quindi sarebbe dovuto rimanere in attivazione per un tempo molto più lungo. Tuttavia a causa dell'ottima risoluzione del Germanio e dell'elevato schermaggio da parte del basso-fondo, è stato rivelato, il picco del 1368.626 keV del Sodio, grazie anche al fatto che questo picco si presenta con un'intensità del 100%. In Fig. 4.13 è riportato l'ingrandimento attorno ai picchi a più bassa intensità dello spettro del campione attivato di NaI. Attorno a 1370 si può osservare il picco del Sodio.

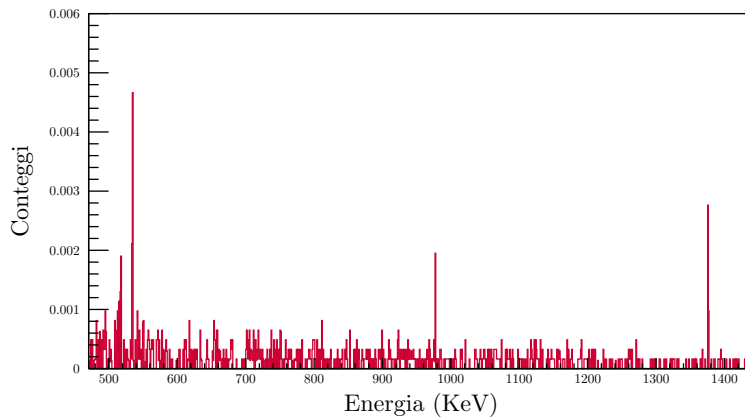


Figura 4.13: Ingrandimento dello spettro rivelato con il sistema a basso-fondo del NaI attorno ai picchi a più bassa intensità.

Anche nel caso del Tungsteno, che è stato sottoposto a misura per un tempo molto inferiore al suo tempo di dimezzamento, si possono osservare molti più picchi oltre ai due rivelati con anti-Compton, anche questi con una buona risoluzione.

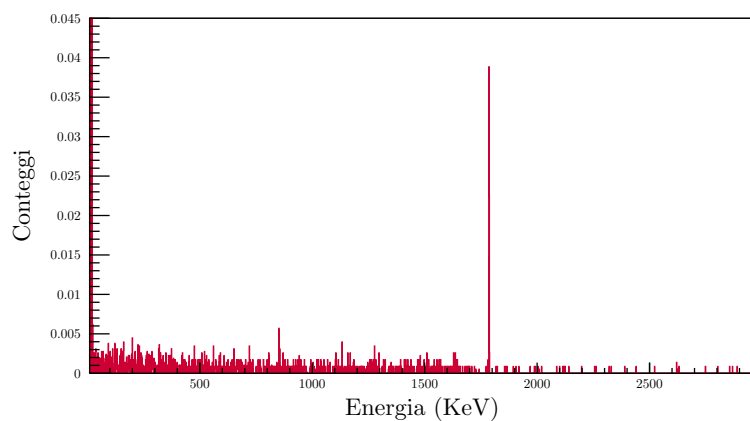


Figura 4.14: Spettro ^{28}Al misurato con il sistema a basso-fondo.

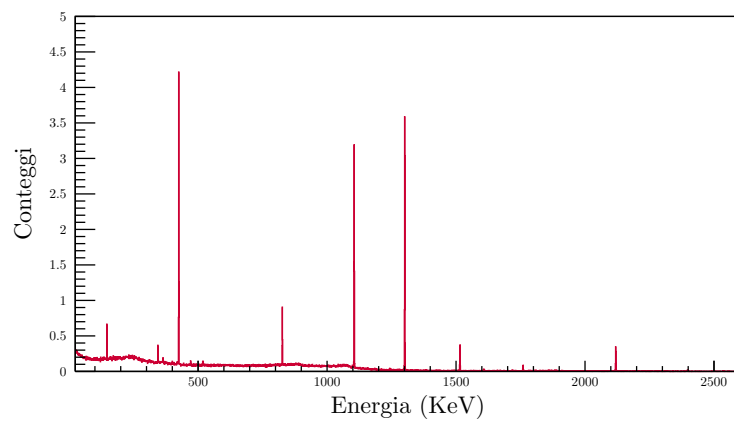


Figura 4.15: Spettro ^{116}In misurato con il sistema a basso-fondo.

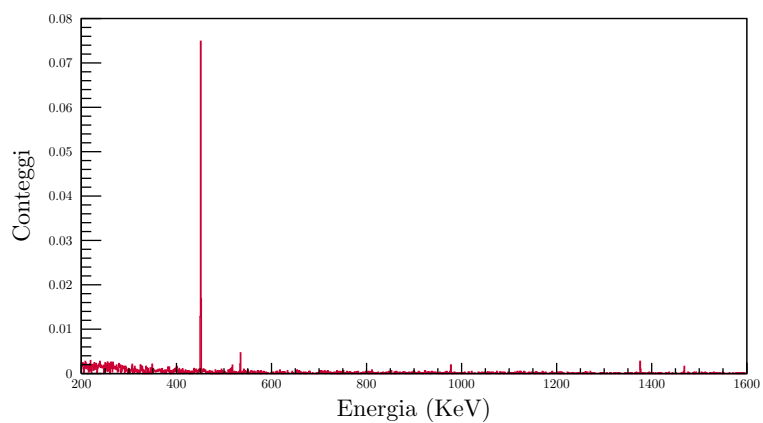


Figura 4.16: Spettro NaI misurato con il sistema a basso-fondo.

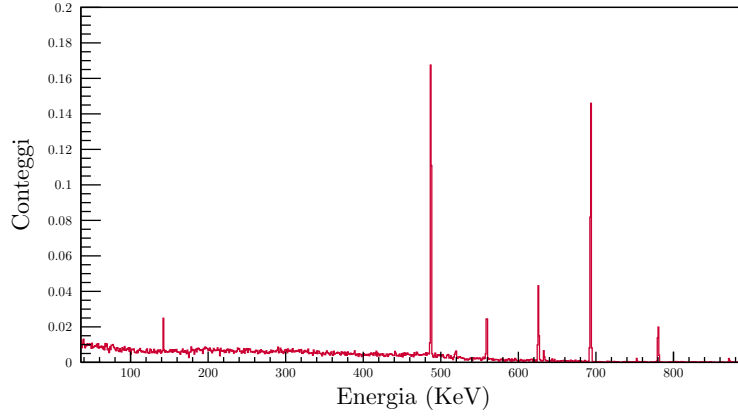


Figura 4.17: Spettro ^{187}W misurato con il sistema a basso-fondo.

	$E_{\gamma,th}$ (keV)	R_{HPGe}		$E_{\gamma,th}$ (keV)	R_{HPGe}
Al	1778.987	0.1	NaI	442.901	0.4
	138.29	2.5		526.557	0.2
336.241	0.6	969.458		0.1	
355.4	0.4	1368.626		0.1	
In	416.9	0.4	W	134.247	1.0
	463.21	0.3		479.53	0.3
	818.68	0.6		551.55	0.3
	1097.28	0.2		618.37	0.3
	1293.56	0.2		625.52	0.3
	1507.59	0.2		685.81	0.3
	1752.5	0.2		754.21	0.2
	2112.29	0.1		772.87	0.2
			864.55	0.2	

Tabella 4.11: Risoluzioni in energia dei fotopicchi per il sistema di basso-fondo con HPGe.

	E_γ teorica (keV)	$E_{\gamma,\text{NaI}}$ (keV)	$E_{\gamma,\text{anti-Compton}}$ (keV)	$E_{\gamma,\text{HPGe}}$ (keV)
Al	1778.987	1764 ± 39	1763 ± 35	1780 ± 1
	138.29	139 ± 7	138 ± 7	138 ± 1
	336.241	341 ± 17	339 ± 13	336.3 ± 0.8
	355.4	—	—	355.3 ± 0.7
	416.9	419 ± 16	418 ± 17	416.9 ± 0.8
	463.21	—	—	463.2 ± 0.6
In	818.68	822 ± 28	822 ± 29	819.0 ± 0.8
	1097.28	1095 ± 27	1095 ± 28	1097.7 ± 0.9
	1293.56	1291 ± 28	1290 ± 29	1294.2 ± 0.9
	1507.59	1505 ± 22	1504 ± 22	1508 ± 1
	1752.5	1751 ± 48	1748 ± 40	1753 ± 1
	2112.29	2093 ± 42	2097 ± 50	2113 ± 1
	442.901	458 ± 15	458 ± 15	442.8 ± 0.7
NaI	526.557	—	—	526.5 ± 0.6
	969.458	—	—	969.8 ± 0.5
	1368.626	—	—	1369.2 ± 0.7
	134.247	—	—	133.8 ± 0.5
	479.53	490 ± 18	491 ± 19	479.2 ± 0.7
	551.55	—	—	551.2 ± 0.7
	618.37	—	—	618.0 ± 0.8
W	625.52	—	—	625.2 ± 0.8
	685.81	699 ± 20	699 ± 21	685.4 ± 0.8
	754.21	—	—	744.9 ± 0.7
	772.87	—	—	772.5 ± 0.8
	864.55	—	—	864.2 ± 0.8

Tabella 4.12: Energie dei picchi misurate in laboratorio confrontate tra loro e con i valori tabulati .

4.3 La costante di decadimento

Per caratterizzare ulteriormente i campioni attivati, oltre allo spettro di emissione della radiazione gamma è possibile misurare il tempo di dimezzamento e confrontarlo con i dati tabulati.

Nell'analisi con il sistema anti-Compton è stato possibile estrapolare il rate di emissione in funzione del tempo di acquisizione e dell'energia di interesse.

I dati sperimentali dovrebbero seguire la legge del decadimento radioattivo:

$$n = n_0 e^{-\lambda t}, \quad (4.5)$$

dove $n_0 = \frac{N_0}{t}$ e $n = \frac{N}{t}$ sono rispettivamente il numero di particelle iniziale e finale in unità di tempo (rate di particelle che decadono). Tuttavia, per eventuali errori sistematici di offset i dati sono stati interpolati con la seguente funzione:

$$n = n_0 e^{-\lambda t} + c \quad (4.6)$$

Dai grafici in Fig. 4.18, 4.19 e 4.20 si può notare che, mentre per l'indio il tempo di acquisizione è stato sufficiente ad ottenere una buona statistica e un risultato accettabile per lo scopo, per gli altri campioni non è lo stesso. Nei campioni di (Al e I la statistica acquisita non è sufficiente per determinare con precisione adeguata la costante di decadimento dell'elemento.

In tabella e tra i grafici non compare la costante di decadimento del tungsteno perché non sono stati raccolti abbastanza dati per ricavare questa misura. Il tempo di dimezzamento del ^{187}W è di 24 ore, mentre l'acquisizione di questo campione è durata solo 3 ore (1/8 del tempo di dimezzamento). Provando ad interpolare i dati si ottengono dei risultati non compatibili con il valore teorico, la dispersione è molto alta e la statistica troppo bassa per poter avere dei risultati accettabili.

Elemento	$\lambda_{\text{teorica}} (\times 10^{-4} \text{ s}^{-1})$	$\lambda_{\text{misurata}} (\times 10^{-4} \text{ s}^{-1})$
Al	51.34	62 ± 9
In	2.13	2.11 ± 0.07
I	4.62	6 ± 2

Tabella 4.13: Confronto tra le costanti di decadimento teoriche e quelle misurate sperimentalmente.

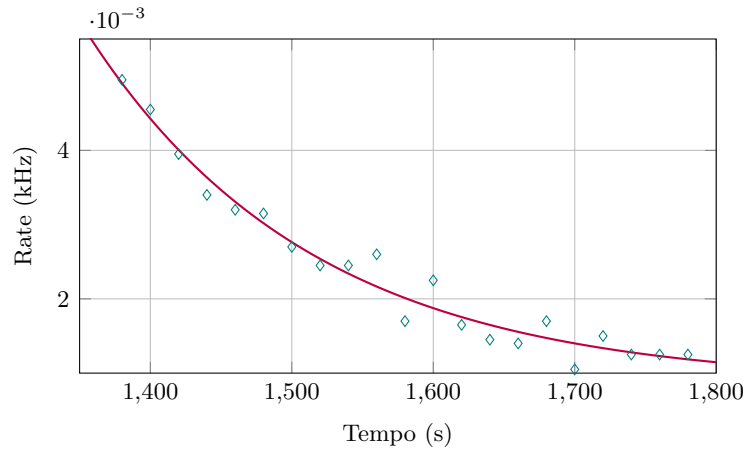


Figura 4.18: Legge di decadimento esponenziale per ^{28}Al

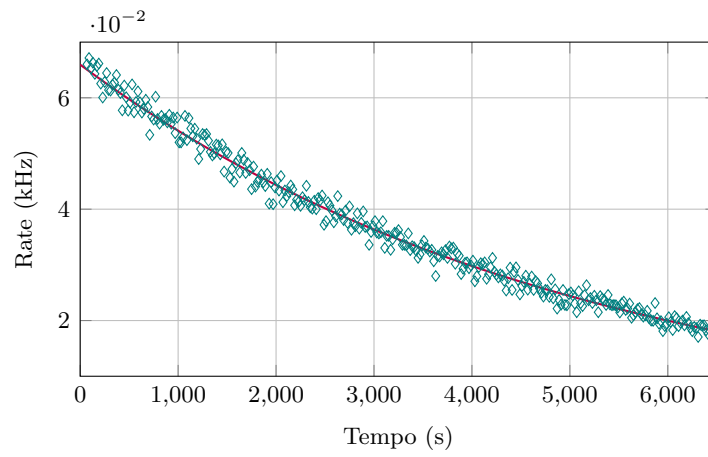


Figura 4.19: Legge di decadimento esponenziale per ^{116}In

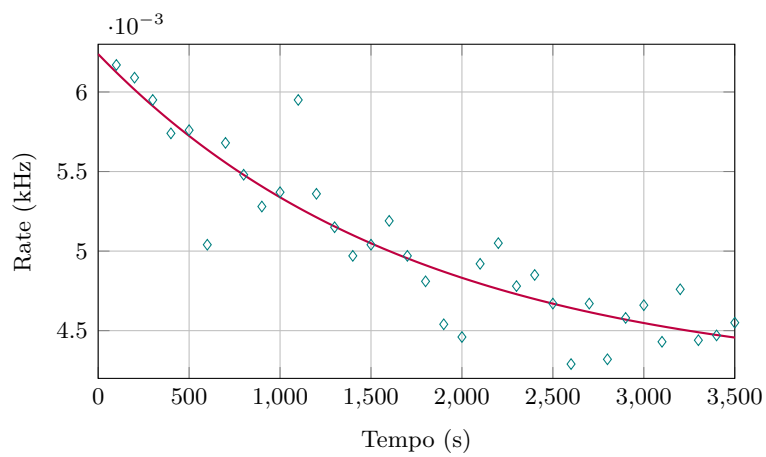


Figura 4.20: Legge di decadimento esponenziale per ^{128}I .

4.4 Determinazione della massa del campione attivato

A partire dai dati acquisiti può essere data anche una stima approssimativa della massa di campione che è stata attivata dal flusso di neutroni. Per far ciò è stato utilizzato l'apparato sperimentale dell'anti-Compton e il campione di Alluminio, unico campione avente un unico isotopo stabile, quindi con 100% di abbondanza, e con un tempo di dimezzamento abbastanza breve. Conoscendo questi elementi è possibile ricavare il flusso di neutroni e successivamente una stima della massa attivata nel campione di Indio, per il quale si possedeva una statistica abbastanza elevata.

La relazione utilizzata è la seguente:

$$R = \frac{m_{Al} \phi \sigma \alpha N_A}{A}, \quad (4.7)$$

dove m_{Al} è la massa del campione di alluminio, ϕ il flusso di neutroni, σ la sezione d'urto per (n,γ) , N_A il numero di Avogadro, A la massa atomica.

Il rate di attivazione si stima sperimentalmente dall'area del picco di interesse, pesato dallo yield del picco. Va corretto anche per l'efficienza del rivelatore, che dipende anche dalla distanza relativa campione-rivelatore.

Inoltre il rate deve essere pesato anche per l'attenuazione della radiazione gamma all'interno del campione stesso $1 - e^{(-\mu/\rho)(x\rho)}$, dove ρ la densità del materiale e μ il coefficiente di attenuazione lineare, che dipende dall'energia del materiale e può essere ricavato a partire dai dati tabulati (<https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z49.html>).

m_{Al} (g)	193
A_{Al}	27
Area (keV/s)	7.96
σ_{Al} (b)	0.231
ε	0.1
α	1
γ	1

Tabella 4.14: Dati utilizzati per stimare il flusso di neutroni.

Il flusso di neutroni stimato in maniera grossolana utilizzando il campione di Alluminio è:

$$\phi = \frac{\text{Area} \cdot A_{Al}}{N_A m_{Al} \sigma_{Al} \alpha \varepsilon \gamma} = 8 \text{ n}/(\text{s cm}^2) \quad (4.8)$$

per una sorgente che emette circa 7×10^4 n/s.

Da questo risultato è possibile risalire alla massa del campione di Indio che è stata attivata il risultato ottenuto è pari a

$$m_{In} = 54 \pm 10 \text{ g.}$$

La massa reale del campione era 166 g (un fattore 3 di differenza).

Questo calcolo è fortemente legato alla geometria del campione, alla configurazione di irraggiamento e alla geometria di misura (posizionamento del campione

nel sistema di rivelazione NaI + anti-Compton). Se si utilizza la tecnica della INAA per la misura indiretta della massa attivata, tutti i parametri utilizzati devono essere stimati sperimentalmente o con simulazione Monte Carlo.

Capitolo 5

Conclusioni

Riassumiamo di seguito i risultati ottenuti a seguito dell'analisi dati. I campioni attivati sono stati tutti identificati tramite l'analisi dello spettro gamma rivelato con entrambi gli apparati di rivelazione, in modo particolare con il sistema di basso-fondo con HPGe, che grazie alla sua elevata risoluzione ha permesso di identificare i picchi con un errore inferiore al 1%, anche per i campioni che non sono stati attivati per un tempo abbastanza lungo da indurre un'attività sufficiente per essere rivelati dal sistema con anti-Compton. A conferma dell'identificazione degli elementi attivati è stata calcolata la costante di decadimento (tutti tranne il Tungsteno, che era stato sottoposto a rivelazione solo per circa 1/8 del suo tempo di dimezzamento). I risultati ottenuti per i tre campioni analizzati sono stati completamente soddisfacenti. Nel caso dell'Indio si è ottenuto un valore di costante di decadimento con un'incertezza dell'ordine del 3% e compatibile con il valore teorico della costante di decadimento, che, come è stato ripetuto più volte, è quello con il quale è stata ottenuta una statistica sufficiente per avere fluttuazioni minori. Per gli altri due campioni (NaI e Al) la costante di decadimento compatibile con il valore teorico ha con un'incertezza dell'ordine del 10% (sale al 33% nel caso dello Iodio).

Per quanto riguarda il metodo di rivelazione, si è osservato che il metodo sicuramente migliore che permette di rivelare con un'incertezza minore e con picchi con un'ottima risoluzione è il basso-fondo. Nonostante ci sia una perdita in efficienza, il guadagno in risoluzione è tale da permettere delle buone misure con incertezza sulla posizione del centroide e una risoluzione entrambe minori dell'1%.

Il sistema con anti-Compton si è rivelato vantaggioso nei casi come l'Indio e l'Alluminio, ma le correzioni sono risultate meno significative per gli altri due campioni (Tungsteno e NaI). Nello specifico la correzione applicata solo con l'anello di BGO è stata vantaggiosa per tutti i campioni, perché ha permesso di migliorare la risoluzione in energia. La correzione effettuata utilizzando anche il Bromuro di Lantanio porta ad un miglioramento nel peak to total parameter: tra lo spettro rivelato con anti-Compton totale (BGO + LaBr) e lo spettro a cui non viene applicato anti-Compton si osserva un aumento del rapporto del 25%.

Infine come esempio reale di applicabilità del metodo INAA, si è provato a ricavare una stima della massa attivata del campione di Indio, a partire dal flusso di neutroni calcolato sulla base delle rivelazioni fatte con il campione di Alluminio.

La stima ottenuta differisce dalla massa totale misurata di un fattore 3. Questo risultato tuttavia dipende da molti fattori tra cui la geometria dell'oggetto, la posizione rispetto alla sorgente di neutroni e la geometria di rivelazione. Avendo il campione una forma piuttosto allungata, o comunque non sferica, non si può dare per scontata l'isotropia spaziale dell'emissione gamma e dell'attivazione, perciò la stima senza tenere conto di questi aspetti non è completamente veritiera.

Bibliografia

- [1] *Berkeley Nucleonics Corporation. Compton suppression spectrometry.*
- [2] Isacco Bonesso. «Studio di un prototipo di rivelatore per neutroni termici e veloci per applicazioni in ambito ambientale e di sicurezza». In: (2015).
- [3] CAEN. *Application Note AN2508, CAEN Digital Pulse Height Analyser - a digital approach to Radiation Spectroscopy.* 2011. URL: www.caentechnologies.com.
- [4] CAEN. *DPP-PSD, Digital Pulse Processing for Pulse Shape Discrimination.* 2016. URL: www.caentechnologies.com.
- [5] CANBERRA. *Compton Suppression... Made it easy.*
- [6] *Consultative Committee for Amount of Substance (CCQM).* 1999.
- [7] Robert R Greenberg, Peter Bode e Elisabete A De Nadai Fernandes. «Neutron activation analysis: a primary method of measurement». In: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 66.3-4 (2011), pp. 193–241.
- [8] Nikola Jovančević e Midrag Krmar. «Analysis of Neutron Induced Gamma Activity in Lowbackground Ge-Spectroscopy Systems». In: *Physics Procedia* 31 (2012), pp. 93–98.
- [9] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement.* John Wiley & Sons, 2010.
- [10] ORTEC. *GEM Series Coaxial HPGe Detector Product Configuration Guide.* 2018. URL: <https://www.ortec-online.com/>.
- [11] ORTEC. *MAESTRO, Multichannel Analyzer (MCA) application software.* 7th edition. URL: <https://www.ortec-online.com/>.
- [12] ORTEC. *Gamma-Ray Spectroscopy Using NaI(Tl).*
- [13] ORTEC. *High-Resolution Gamma-Ray Spectroscopy.*
- [14] ORTEC. *Neutron Activation Analysis (slow neutrons).*