



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Fisica e Astronomia**

**Corso di laurea in Fisica**

**CARATTERIZZAZIONE DI UN RIVELATORE  
GAMMA A SCINTILLAZIONE DI GRANDE VOLUME  
PER IL SISTEMA DI ISPEZIONE NON DISTRUTTIVA  
CON NEUTRONI VELOCI**

**Relatore:**

Prof. Lunardon Marcello

**Correlatore:**

Dott. Stevanato Luca

**Laureando:**

Mocellin Giovanni

Anno Accademico 2014/2015



# INDICE

Introduzione .....	1
Capitolo 1. Attività sperimentale.....	3
1.1. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con elettronica analogica.....	3
1.2. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con digitizer.....	4
1.3. Rivelatore NaI(Tl) 5"x10" .....	6
Capitolo 2. Analisi dati.....	9
2.1. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con elettronica analogica.....	9
2.2. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con digitizer.....	12
2.3. Rivelatore NaI(Tl) 5"x10" .....	19
Capitolo 3. Conclusioni .....	27
Bibliografia e Sitografia .....	29

# INDICE DELLE FIGURE

<b>Figura 1.</b> Schema concettuale TNIS.....	1
<b>Figura 2.</b> Schema apparato sperimentale rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con catena elettronica analogica....	3
<b>Figura 3.</b> Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" .....	3
<b>Figura 4.</b> Crate e moduli NIM - Catena elettronica analogica .....	3
<b>Figura 5.</b> Schema apparato sperimentale rivelatore NaI(Tl) 3"x3" e rivelatore EJ228 con digitizer.....	4
<b>Figura 6.</b> Digitizer CAEN® .....	5
<b>Figura 7.</b> Esempio segnale rivelatore NaI(Tl) 3"x3" .....	5
<b>Figura 8.</b> Rivelatore NaI(Tl) 5"x10" EURITRACK.....	6
<b>Figura 9.</b> PMT HAMAMATSU R877-100.....	6
<b>Figura 10.</b> Rivelatore NaI(Tl) 5"x10" prototipo C-BORD.....	6
<b>Figura 11.</b> Configurazione apparato con rivelatori NaI(Tl) 5"x10" ed EJ228 per misure di timing .....	7
<b>Figura 12.</b> Spettro con sorgente di <sup>137</sup> Cs, rivelatore NaI(Tl) 3"x3" e catena elettronica analogica.....	9
<b>Figura 13.</b> Caratteristica Energia vs Canale del fotopicco .....	9
<b>Figura 14.</b> Caratteristica FWHM (Canali) vs $\sqrt{\text{Canale}}$ centroide fotopicco.....	10
<b>Figura 15.</b> Risoluzione vs Energia dei $\gamma$ .....	11
<b>Figura 16.</b> Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Long gate .....	12
<b>Figura 17.</b> Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT .....	12
<b>Figura 18.</b> Posizione del centroide del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT .	13
<b>Figura 19.</b> Spettro con sorgente di <sup>137</sup> Cs, rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con digitizer.....	14
<b>Figura 20.</b> Caratteristica Canale del fotopicco vs Energia dei $\gamma$ .....	14
<b>Figura 21.</b> Residui della caratteristica Canale del fotopicco vs Energia dei $\gamma$ .....	14
<b>Figura 22.</b> Caratteristica FWHM (Canali) vs $\sqrt{\text{Canale}}$ centroide fotopicco.....	15
<b>Figura 23.</b> Risoluzione vs Energia dei $\gamma$ .....	15
<b>Figura 24.</b> Confronto tra spettri dei $\gamma$ della sorgente di <sup>22</sup> Na con segnali in coincidenza o meno (rivelatore NaI(Tl) 3"x3") .....	16
<b>Figura 25.</b> Esempi di constant fraction con segnali dei rivelatori EJ228 e NaI(Tl) 3"x3".....	17
<b>Figura 26.</b> Istogramma delle differenze temporali tra gli eventi registrati nei detector EJ228 e NaI(Tl) 3"x3" .....	18

<b>Figura 27.</b> Risoluzione temporale dei detector EJ228 e NaI(Tl) 3"x3" in funzione dei parametri attenuazione e delay del constant fraction.....	18
<b>Figura 28.</b> Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT .....	19
<b>Figura 29.</b> Posizione del centroide del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT .	19
<b>Figura 30.</b> Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Long gate .....	20
<b>Figura 31.</b> Posizione del centroide del fotopicco a 662 keV vs Long gate .....	20
<b>Figura 32.</b> Spettro con sorgente di <sup>137</sup> Cs, rivelatore NaI(Tl) 5"x10" con digitizer.....	21
<b>Figura 33.</b> Caratteristica Canale del fotopicco vs Energia dei $\gamma$ .....	21
<b>Figura 34.</b> Residui della caratteristica Canale del fotopicco vs Energia dei $\gamma$ .....	21
<b>Figura 35.</b> Caratteristica FWHM (Canali) vs $\sqrt{\text{Canale}}$ centroide fotopicco.....	22
<b>Figura 36.</b> Risoluzione vs Energia dei $\gamma$ .....	22
<b>Figura 37.</b> Risoluzione temporale dei detector EJ228 e NaI(Tl) 5"x10" in funzione dei parametri attenuazione e delay del constant fraction.....	23
<b>Figura 38.</b> Istogramma delle differenze temporali tra gli eventi registrati nei detector EJ228 e NaI(Tl) 5"x10" .....	24
<b>Figura 39.</b> Risoluzione temporale detector NaI(Tl) 5"x10" in funzione della soglia sui segnali.....	24
<b>Figura 40.</b> Grafico Risoluzione del fotopicco a 1460,83 keV vs Tempo di accensione dell'apparato sperimentale .....	25
<b>Figura 41.</b> Grafico Risoluzione del fotopicco a 1460,83 keV vs Tempo di accensione dell'apparato sperimentale .....	25
<b>Figura 42.</b> Scarti tra posizione del fotopicco e fit lineare di Fig. 34, tra la 120 <sup>a</sup> e la 144 <sup>a</sup> ora di accensione dell'apparato.....	25

# INDICE DELLE TABELLE

<b>Tabella 1.</b> Caratteristiche principali cristallo NaI(Tl) .....	2
<b>Tabella 2.</b> Risultati detector NaI(Tl) 3"x3" con catena elettronica analogica .....	11
<b>Tabella 3.</b> Risultati detector NaI(Tl) 3"x3" con digitizer .....	16
<b>Tabella 4.</b> Risultati detector NaI(Tl) 5"x10" con digitizer .....	23





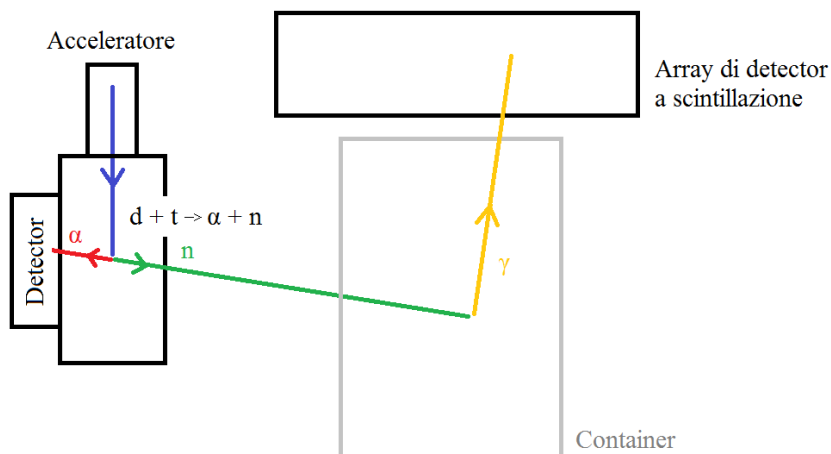


## Introduzione

Nell'anno 2014, il volume delle merci trasportate per via marittima all'interno di container è stato di oltre 150 milioni di teu (1 teu equivale ad un volume di 38,51 m<sup>3</sup>), in continuo incremento nel corso degli ultimi anni [1]. Si rende, perciò, indispensabile una procedura per l'ispezione e il controllo di ciò che viene introdotto nei paesi di destinazione senza dover aprire il container, evitando così la fuoriuscita di eventuali sostanze pericolose.

Negli scorsi anni sono state sviluppate varie tecniche per il riconoscimento degli oggetti presenti all'interno dei container, tra le quali la scansione a raggi X, le analisi chimiche delle sostanze volatili mediante evaporazione e l'ispezione TNIS (Tagged Neutron Inspection System). Quest'ultima, in particolare, è stata studiata e testata nel progetto EURITRACK svolto tra il 2004 e il 2007, al quale ha partecipato dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova.

La tecnica TNIS (esemplificata in **Fig. 1**) prevede, inizialmente, l'accelerazione di deuterio contro trizio, dalla cui reazione si ha la produzione di neutroni veloci di energia 14 MeV e particelle  $\alpha$  in maniera isotropica. Tra questi vengono considerati i neutroni per i quali i nuclei  $\alpha$  associati sono stati rivelati da un array di detector posti all'indietro rispetto alla posizione del container preso in esame. I neutroni che interagiscono con i materiali nel container possono provocare l'eccitazione dei nuclei, i quali, nel diseccitarsi, emettono dei  $\gamma$  di energie definite. Rivelando tali fotoni mediante una array di detector a scintillazione, è possibile, attraverso l'analisi degli spettri, ottenere informazioni sulla composizione dei materiali contenuti in una zona ristretta del container. La determinazione della posizione e della profondità a cui si trova il volume analizzato viene dedotta da una misura temporale e angolare della rivelazione delle particelle  $\alpha$  e da quella dei raggi  $\gamma$  [2].



*Figura 1. Schema concettuale TNIS*

In questo contesto sono particolarmente utili i rivelatori a scintillazione di grande volume, i quali verranno inseriti nell'array di detector atti alla rivelazione dei  $\gamma$  prodotti per diseccitazione dei nuclei nel progetto C-BORD (H2020 – 653323), ove il sistema TNIS sarà integrato in un complesso di rivelatori atti ad identificare le sostanze presenti nei container [3].

Quando un  $\gamma$  interagisce con uno scintillatore cristallino si possono verificare diversi fenomeni in base all'energia posseduta dal fotone. I due principali sono l'effetto Compton, per il quale il fotone interagisce con un elettrone, a cui viene ceduta parte della sua energia, e viene emesso un fotone di energia minore, e l'effetto fotoelettrico, per il quale l'elettrone assorbe totalmente l'energia del fotone incidente. L'elettrone, dopo aver ricevuto la quantità di energia cedutagli dal  $\gamma$ , la disperde eccitando il reticolo cristallino che si diseccita emettendo fotoni di energia minore del  $\gamma$ , in numero proporzionale all'energia del fotone incidente. Questo processo è detto fluorescenza.

È stato scelto per rivelare i  $\gamma$  nel sistema TNIS uno scintillatore inorganico costituito da un cristallo di ioduro di sodio drogato con tallio ( NaI(Tl) ), il quale ha le caratteristiche riassunte in **Tabella 1** [4].

*Tabella 1. Caratteristiche principali cristallo NaI(Tl)*

	Specific Gravity	Wavelength of Max. Emission	Refractive Index	Decay Time ( $\mu$ s)	Abs. Light Yield in Photons/MeV
<b>Alkali Halides</b>					
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38,000
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	0.68 (64%), 3.34 (36%)	65,000
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.46, 4.18	39,000
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11,000

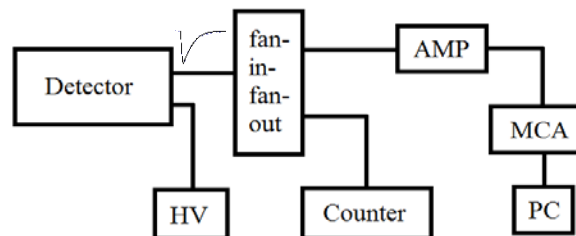
## **Obiettivo della tesi**

L'obiettivo della tesi è la caratterizzazione di due rivelatori a scintillazione con cristallo di NaI(Tl) di dimensioni 3"x3" e 5"x5"x10" (successivamente indicato come 5"x10"), identificandone linearità, risoluzione in energia, risoluzione temporale e andamento della risoluzione energetica in funzione del tempo di accensione dell'apparato sperimentale. Il rivelatore 5"x10", in particolare, rappresenta il prototipo di rivelatore  $\gamma$  che sarà montato sul sistema TNIS di C-BORD.

# Capitolo 1. Attività sperimentale

## 1.1. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con elettronica analogica

La prima fase dell'attività sperimentale è stata svolta presso un laboratorio del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova (polo didattico). Durante questa fase, per comprendere il funzionamento dei rivelatori a scintillazione, si è preso in esame un detector costituito da un cristallo (cilindrico) di ioduro di sodio di dimensioni 3"x3" accoppiato ad un fotomoltiplicatore (PMT), prodotto da Saint-Gobain Crystals® - crismatec® mod. 76S76. Esso è stato collegato a una catena elettronica analogica per la lettura dei segnali, come mostrato in *Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4.*



*Figura 2. Schema apparato sperimentale rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con catena elettronica analogica*



*Figura 3. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3"*



*Figura 4. Crate e moduli NIM - Catena elettronica analogica*

Avendo come obiettivo la determinazione delle caratteristiche del detector nel rivelare fotoni  $\gamma$ , sono state impiegate delle sorgenti radioattive, le quali nel processo di decadimento emettono fotoni  $\gamma$  a causa della diseccitazione dei nuclei figli. In particolare, sono state usate sorgenti di  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$  e  $^{241}\text{Am}$  poste a pochi centimetri dalla faccia del rivelatore.

Per mantenere i fotoni generati per fluorescenza all'interno del rivelatore e per non far entrare luce dall'esterno, alla fabbricazione, il cristallo è stato isolato con del materiale riflettente.

Questi fotoni, infine, interagendo con il fotocatodo del PMT producono, con una certa probabilità determinata dall'efficienza quantica, dei fotoelettroni, che poi vengono moltiplicati nei dinodi presenti all'interno del tubo a vuoto del fotomoltiplicatore. Per evitare interazioni tra

gli elettroni ed eventuali campi magnetici, il PMT è inserito in un involucro di metallo, detto  $\mu$ -metal.

L'alimentazione del fotomoltiplicatore è stata fornita da un generatore HV impostato alla tensione di 1,41 kV.

Il segnale anodico generato è stato quindi fatto transire per un fan-in-fan-out di produzione CAEN<sup>®</sup>, dal quale si hanno in output più segnali, identici a quelli in input. Ad esso sono stati collegati un amplificatore e un quad counter/timer di produzione ORTEC<sup>®</sup>, l'uno atto all'amplificazione del segnale anodico e alla sua formazione (shaper) e l'altro al conteggio del numero dei segnali generati.

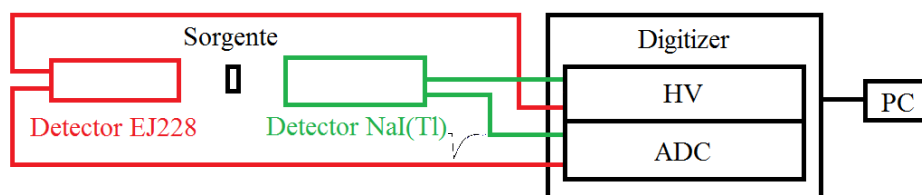
L'output dell'amplificatore è stato collegato quindi ad un MCA per la conversione dei segnali da analogici a digitali, il cui massimo risulta proporzionale all'energia del  $\gamma$  interagente, a sua volta collegato al pc; la registrazione dei dati raccolti è stata effettuata tramite programma MCA. Non tutti i segnali sono stati registrati: è stata impostata una soglia minima per l'altezza del segnale, così da far convertire al MCA il minor numero possibile di segnali di rumore.

Raccogliendo i dati per un tempo di 10 min per ciascuna delle sorgenti e per il fondo, sono stati ottenuti gli spettri caratteristici in energia dei fotoni  $\gamma$  emessi.

## 1.2. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con digitizer

Così come la prima fase dell'attività sperimentale, anche la seconda è stata svolta presso un laboratorio afferente al polo didattico del Dipartimento di Fisica e Astronomia, utilizzando il medesimo rivelatore con cristallo di NaI(Tl) 3"x3".

In questa fase, tuttavia, la catena elettronica analogica è stata sostituita con una digitale di produzione CAEN<sup>®</sup> (Crate mod. VME8004, HV Power Supply mod. V6533M, ADC mod. V1720) (**Fig. 6**). Le caratteristiche principali del digitizer sono: risoluzione a 12 bit, bandwidth di 125 MHz, 250 MS/s [8]. Quest'ultimo, collegato al pc tramite cavo USB, permette congiuntamente il controllo della tensione di alimentazione del fotomoltiplicatore e la digitalizzazione del segnale proveniente dal detector. La registrazione dei dati è avvenuta mediante il programma VERDI.



*Figura 5. Schema apparato sperimentale rivelatore NaI(Tl) 3"x3" e rivelatore EJ228 con digitizer*



Figura 6. Digitizer CAEN®

Per ogni evento che valicasse la soglia impostata per ridurre al minimo l'acquisizione del rumore, sono stati registrati il tempo relativo a cui è avvenuto, la forma, la baseline e il modulo dell'integrale del segnale rispetto alla baseline (**Fig. 7**). L'integrale del segnale risulta essere direttamente proporzionale al valore dell'energia dei  $\gamma$  interagenti con il rivelatore [4].

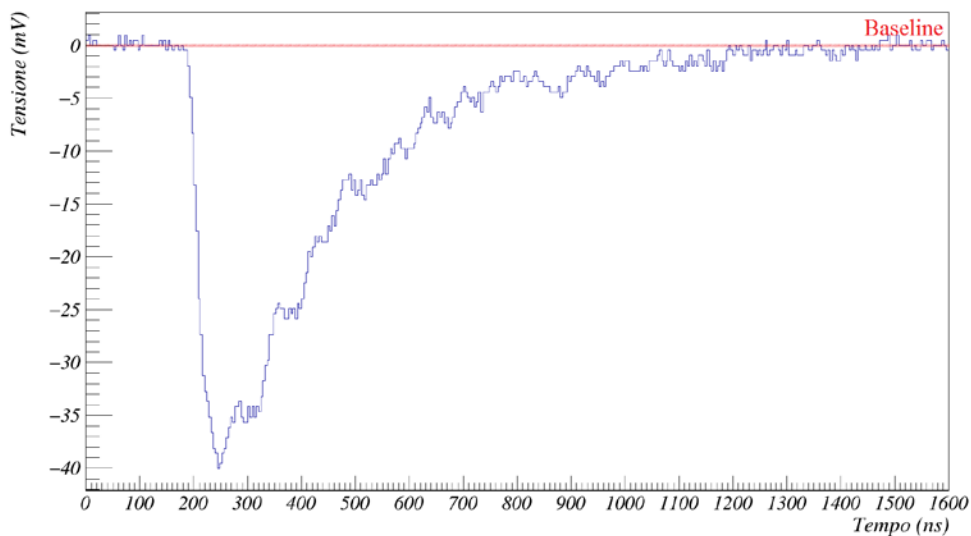


Figura 7. Esempio segnale rivelatore NaI(Tl) 3"x3"

Inizialmente, con tale apparato (parte verde **Fig. 5**), sono state effettuate misure preliminari atte a definire il settaggio ottimale per ottenere le migliori prestazioni del detector. Utilizzando la sorgente  $^{137}\text{Cs}$  e variando prima la tensione di alimentazione del PMT (2 min di raccolta dei dati per ciascuna impostazione), poi l'intervallo di integrazione dei segnali (15 min totali di raccolta dati), sono stati definiti e impostati i migliori valori ottenuti.

Con questo settaggio dell'apparato sono stati raccolti, quindi, gli spettri caratteristici in energia dei fotoni emessi dalle sorgenti radioattive  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$  e il fondo, per un tempo di 3 min ciascuno, analizzando gli integrali dei segnali registrati.

In seguito, è stato utilizzato un secondo rivelatore per effettuare misure di risoluzione temporale. Il rivelatore adottato è un detector a scintillazione plastico veloce EJ228, impostato alla tensione di alimentazione ottimale di 1700V [5]. Posti i due rivelatori l'uno di fronte all'altro (**Fig. 5**), con al centro una sorgente radioattiva di  $^{22}\text{Na}$ , la quale emette due  $\gamma$

antiparalleli a seguito del decadimento del positronio, sono stati raccolti e registrati i segnali provenienti dai due detectors per circa 15 minuti, in seguito analizzati per le misure di timing.

### 1.3. Rivelatore NaI(Tl) 5"x10"

Nell'ultima fase dell'attività sperimentale le misure sono state svolte presso laboratori dell'INFN a Legnaro (PD), prendendo in esame il rivelatore prototipo del progetto C-BORD. Esso era costituito di un cristallo di NaI(Tl) di misure 5"x10" accoppiato ad un fotomoltiplicatore (*Fig. 8*) di produzione Saint-Gobain Crystals® - BICRON® provenienti da un utilizzo precedente nel progetto EURITRACK, ove era impiegato per la rivelazione di  $\gamma$ . Data l'usura del PMT, si è deciso di sostituire il vecchio PMT con uno nuovo di produzione HAMAMATSU® (mod. R877-100) con fotocatodo di tipo bialcalino di 133 mm di diametro, con risposta nello spettro tra i 300 e i 650 nm [6] (*Fig. 10*).



*Figura 8. Rivelatore NaI(Tl) 5"x10" EURITRACK*



*Figura 9. PMT HAMAMATSU R877-100*



*Figura 10. Rivelatore NaI(Tl) 5"x10" prototipo C-BORD*

Il detector è stato chiuso con il  $\mu$ -metal appartenente al rivelatore di EURITRACK, con l'accortezza di sigillarlo per non far filtrare la luce proveniente dall'esterno.

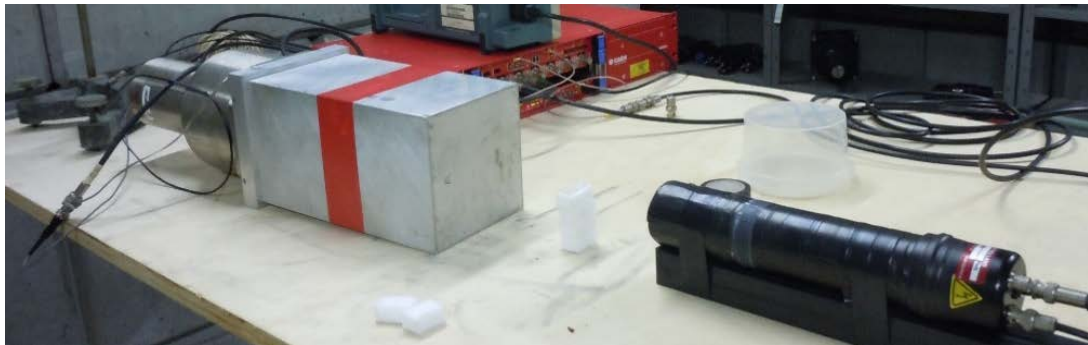
Per quanto concerne l'elettronica di lettura, è stato impiegato il medesimo digitizer CAEN® utilizzato nella seconda fase dell'attività sperimentale.



Come per il rivelatore NaI(Tl) 3"x3" analizzato in precedenza, anche per il prototipo del progetto C-BORD sono state inizialmente effettuate delle misure per trovare i valori dei parametri che avrebbero permesso le migliori prestazioni del rivelatore.

I dati sono stati raccolti per un tempo di 1 min per ogni impostazione della tensione di alimentazione del PMT e per 5 min per trovare il miglior tempo di integrazione dei segnali. Dopo aver impostato i valori migliori dei parametri ottenuti, sono stati raccolti gli spettri in energia dei fotoni  $\gamma$  provenienti da sorgenti di  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  (1 o 2 min ciascuno), poste a pochi centimetri dalla faccia del rivelatore, e il fondo ambiente.

In seguito, utilizzando il rivelatore plastico EJ228 (con le stesse impostazioni usate in precedenza) posto di fronte al rivelatore NaI(Tl) preso in esame, e messa tra i due una sorgente di  $^{22}\text{Na}$  (**Fig. 11**), sono stati registrati per circa 35 min i segnali provenienti dai due detector per essere poi analizzate per misure di timing.



*Figura 11. Configurazione apparato con rivelatori NaI(Tl) 5"x10" ed EJ228 per misure di timing*

Infine, è stata effettuata una misura del fondo (ove si riscontra un picco corrispondente al  $^{40}\text{K}$ , largamente presente in natura) per oltre 10 giorni, così da poter analizzare l'andamento delle prestazioni del detector per lunghi tempi di accensione.





## Capitolo 2. Analisi dati

I dati raccolti sono stati analizzati in ambiente ROOT (ver. 6.02.05).

### 2.1. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con elettronica analogica

I dati raccolti sono stati analizzati e sono stati ottenuti gli spettri in energia dei fotoni  $\gamma$  emessi dalle differenti sorgenti, dai quali è stato sottratto il fondo ambiente. In **Fig. 12** ne viene fornito un esempio.

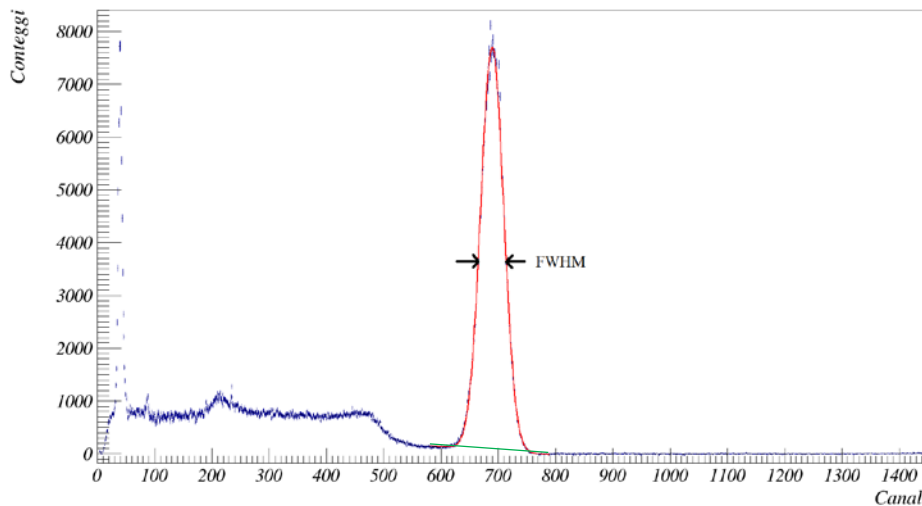


Figura 12. Spettro con sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ , rivelatore NaI(Tl) 3"x3" e catena elettronica analogica

Per valutare le caratteristiche del rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con catena elettronica analogica per la lettura dei segnali, è stata presa in esame anzitutto la linearità nella risposta del detector ai  $\gamma$  interagenti.

È stato ottenuto il seguente grafico (**Fig. 13**), da cui è stata valutata la linearità tra l'energia dei fotoni emessi dalle sorgenti radioattive (**Tabella 2**) e il canale a cui è stato registrato il centroide del fotopicco ricavato mediante fit gaussiano sovrapposto ad un fondo lineare.

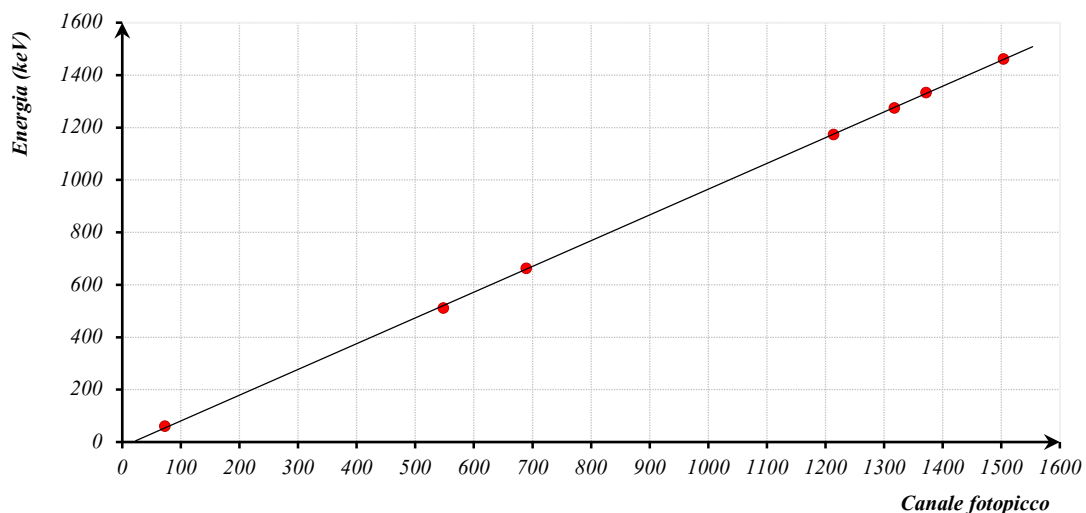


Figura 13. Caratteristica Energia vs Canale del fotopicco

Ne è stato ricavato, quindi, il fit lineare dei dati, risultando:

$$m = 0,982 \pm 0,004 \text{ keV/Canali}$$

$$q = -18 \pm 4 \text{ keV}$$

$$\rho = 0,9999$$

ove  $m$  rappresenta il coefficiente angolare,  $q$  l'intercetta della retta con cui è stato effettuato il fit e  $\rho$  il coefficiente di correlazione tra i dati.

Si può notare dunque la linearità dal valore molto prossimo ad 1 del coefficiente di correlazione.

Dalla precedente analisi è risultato un rapporto tra l'integrale del fotopicco e l'integrale totale (peak to total ratio) del 45% con la sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ .

Dai fit gaussiani effettuati sui fotopicchi degli spettri ottenuti, è stata ricavata, inoltre, la larghezza a metà altezza (FWHM), da cui si è ottenuta la risoluzione ( $R$ ) dell'apparato, definita come il rapporto tra FWHM e posizione del centroide [4]; in formule:

$$R = \frac{\text{FWHM}}{\text{Canale del centroide}} \quad (2.1.1)$$

Considerando che la statistica poissoniana è predominante sia nell'interazione tra i  $\gamma$ , sia nella formazione del segnale, si ricava che la FWHM è direttamente proporzionale alla radice quadrata della posizione del centroide del fotopicco [4], in formule:

$$\text{FWHM} = k \sqrt{\text{Canale centroide}} + k' \quad (2.1.2)$$

Dai risultati dell'analisi dei dati sperimentali, si ottiene il seguente grafico:

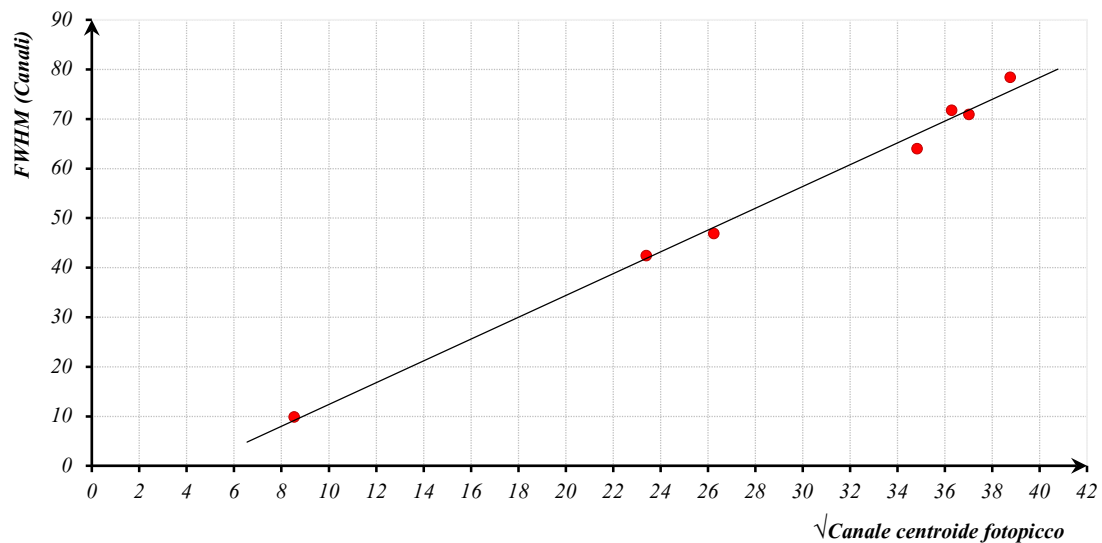
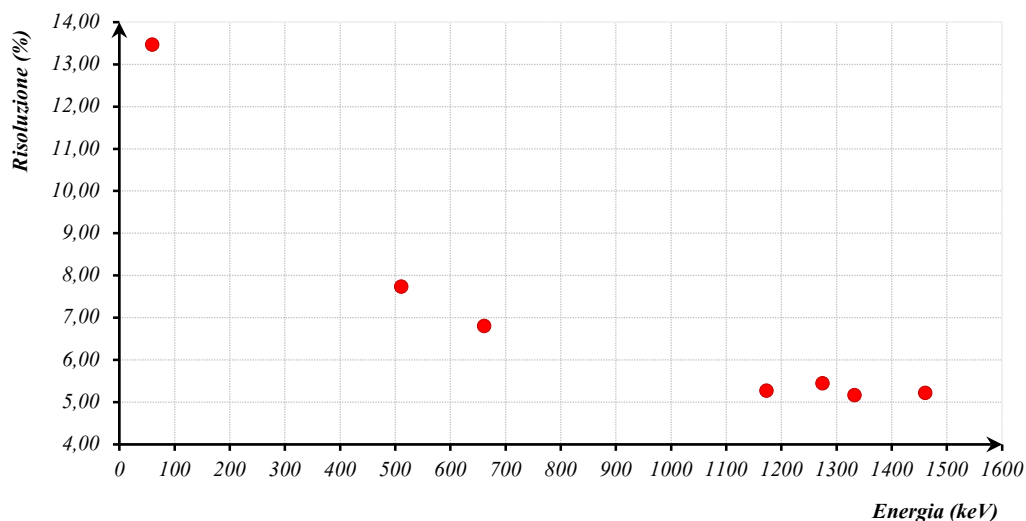


Figura 14. Caratteristica FWHM (Canali) vs  $\sqrt{\text{Canale centroide fotopicco}}$

È possibile notare dal grafico in **Fig. 14** un buon accordo tra la teoria e la disposizione dei punti sperimentali.

In **Fig. 15** è rappresentato l'andamento della risoluzione percentuale in funzione dell'energia dei  $\gamma$ , dal quale si ricava che la risoluzione diminuisce al crescere del canale del centroide del fotopicco, e quindi all'aumentare dell'energia dei fotoni  $\gamma$  interagenti col rivelatore (come ci si aspetta dalla sostituzione della formula 2.1.2 nella formula 2.1.1).



**Figura 15.** Risoluzione vs Energia dei  $\gamma$

Infine, è stata considerata la rapidità di conversione dei segnali dell'ADC, confrontando il numero di segnali raccolti dal programma MCA formanti lo spettro in energia e il numero di segnali provenienti dal rivelatore contati dal quad counter. Si è ottenuto che l'ADC non riesce a convertire tutti i segnali che provengono dal rivelatore, mantenendo però un rapporto sempre superiore al 50% tra segnali convertiti e segnali generati nel detector.

In **Tabella 2** sono stati riportati i risultati ottenuti:

**Tabella 2.** Risultati detector NaI(Tl) 3"x3" con catena elettronica analogica

Elemento	Energia letteratura (keV) [7]	Canale fotopicco (keV)	FWHM (keV)	Risoluzione (%)
<sup>137</sup> Cs	661,657	659,46	46,05	6,8
<sup>22</sup> Na	511	520,75	41,63	7,7
	1274,53	1276,37	70,44	5,4
<sup>60</sup> Co	1173,237	1174,23	62,84	5,3
	1332,501	1329,38	69,61	5,2
<sup>40</sup> K	1460,83	1458,98	77,02	5,2
<sup>241</sup> Am	59,5412	54,13	9,66	13,5

## 2.2. Rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con digitizer

Le misure preliminari effettuate con il rivelatore NaI(Tl) 3"x3" hanno permesso di determinare le condizioni ottimali di lavoro rispetto alla risoluzione.

Il parametro inizialmente considerato per ottenere le prestazioni migliori del detector è stato l'intervallo temporale di integrazione del segnale. Utilizzando la sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ , impostando la tensione di alimentazione del fotomoltiplicatore a 1400 V e mantenendo fisso l'estremo d'integrazione sinistro (sullo zero), è stato variato quello destro (long gate), ottenendo così i diversi spettri in energia per i  $\gamma$  a seconda del valore di tale parametro. Da ciascuno di essi è stata ricavata la risoluzione del fotopicco a 662 keV e ne è stato fatto il grafico rispetto alla posizione del secondo estremo di integrazione (*Fig. 16*).

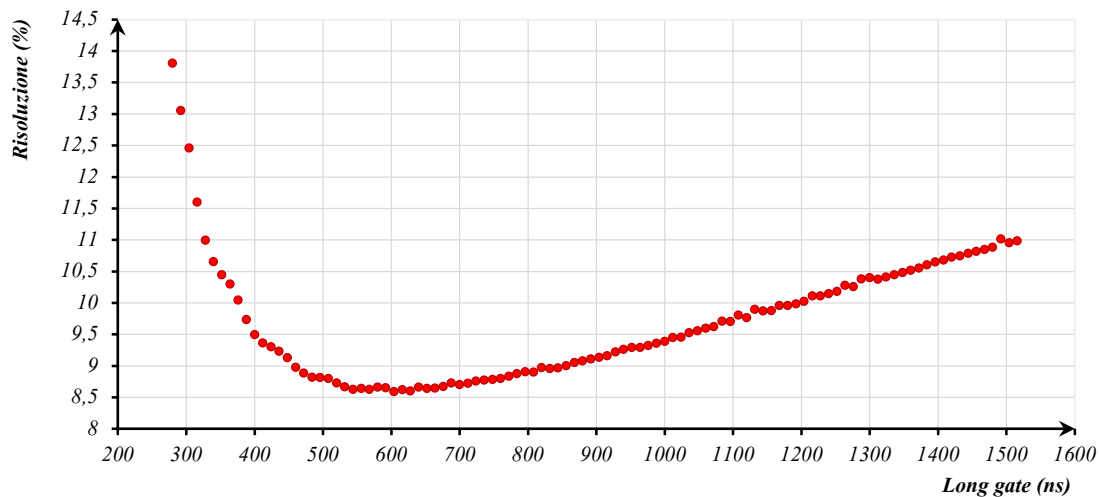


Figura 16. Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Long gate

Successivamente, sono state analizzate le prestazioni del detector in funzione della tensione di alimentazione del PMT. È stata considerata, quindi, la risoluzione del fotopicco a 662 keV dello spettro in energia dei  $\gamma$  in funzione dell'HV, ottenendo il grafico in *Fig. 17*.

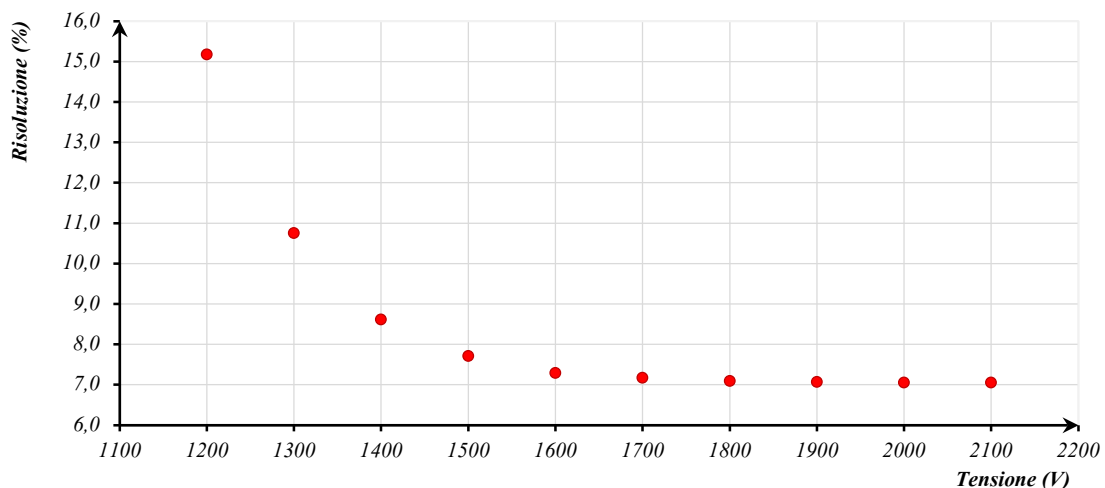
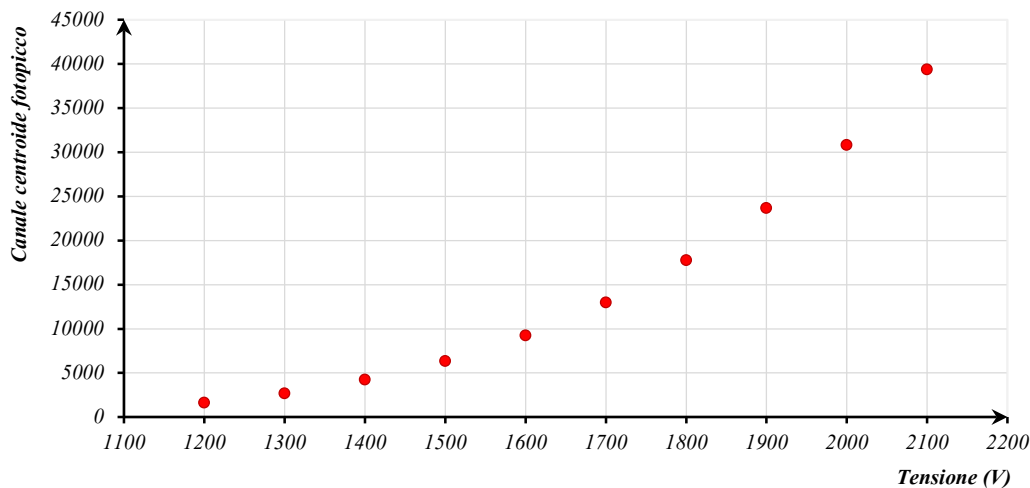


Figura 17. Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT

Per queste misure è stata considerata anche la posizione del centroide del fotopicco in funzione della tensione di alimentazione del PMT, ottenendo l'andamento di una potenza come mostrato in **Fig. 18**. Questo è dovuto al fatto che negli  $n$  dinodi del PMT la moltiplicazione degli elettroni segue la legge [4]:

$$\text{Gain} = k V^\beta \quad , \quad \beta = \alpha n \quad (2.2.1)$$



**Figura 18.** Posizione del centroide del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT

È stata di conseguenza scelta la tensione di alimentazione ottimale di 1800 V, la minore per la quale la risoluzione si stabilizza attorno al 7,1% (valore tipico per questo tipo di detector [9]); è stato impostato, inoltre, il long gate ad un valore pari a 600 ns, che equivale al minimo della curva ottenuta in **Fig. 16**.

Una volta ottenuti e settati i parametri di cui sopra, sono stati registrati gli spettri in energia dei  $\gamma$  emessi dalle differenti sorgenti e ne è stato sottratto il fondo. Ne viene fornito un esempio in **Fig. 19**.

Alla stessa stregua di quanto fatto per l'analisi dei dati acquisiti con il rivelatore NaI(Tl) 3''x3'' con catena elettronica analogica, dagli spettri è stata ottenuta la posizione dei fotopicchi e ne è stata valutata la linearità in funzione dell'energia dei fotoni (**Fig. 20**). Ne è stato poi eseguito il fit lineare ottenendo i valori:

$$m = 5,63 \pm 0,09 \text{ Canali/keV}$$

$$q = 281 \pm 100 \text{ Canali}$$

$$\rho = 0,999$$

ove  $m$  rappresenta il coefficiente angolare della retta interpolante,  $q$  l'intercetta e  $\rho$  il coefficiente di correlazione dei dati.

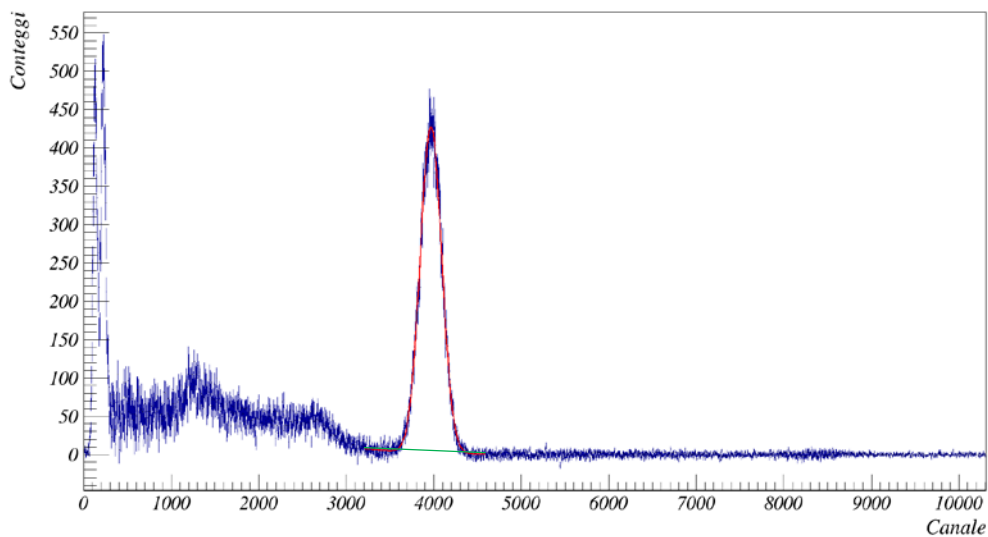


Figura 19. Spettro con sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ , rivelatore NaI(Tl) 3"x3" con digitizer

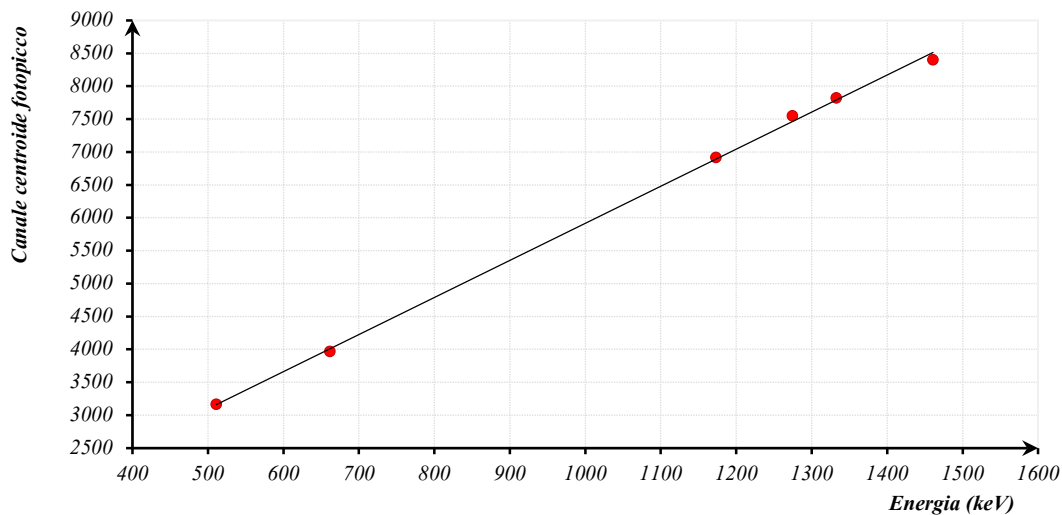


Figura 20. Caratteristica Canale del fotopico vs Energia dei  $\gamma$

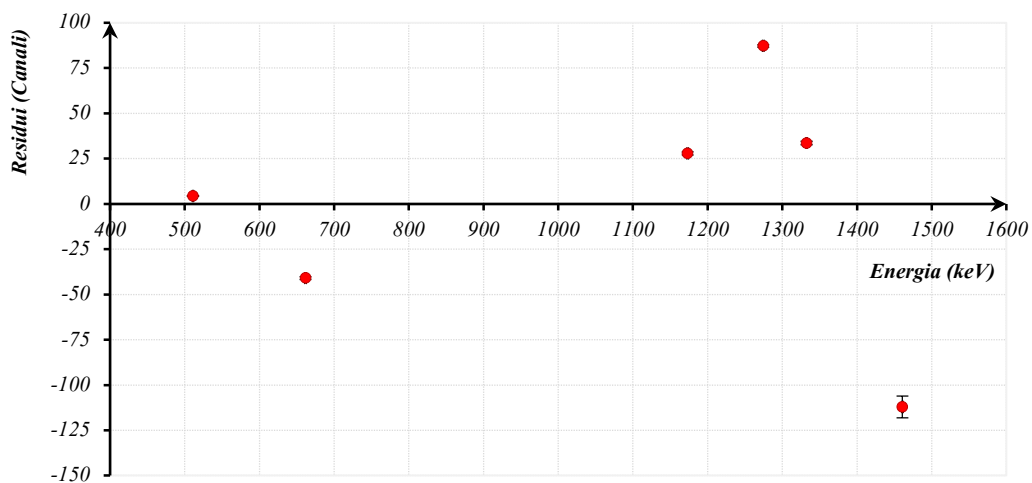


Figura 21. Residui della caratteristica Canale del fotopico vs Energia dei  $\gamma$

L'andamento tra l'energia dei  $\gamma$  e la posizione del centroide del fotopicco risulta quindi lineare. Dalla precedente analisi è risultato un rapporto Peak to Total del 37% con la sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ . Si è presa in considerazione, successivamente, la linearità della FWHM in funzione della radice quadrata della posizione del centroide del fotopicco (**Fig. 22**). Infine, è stata calcolata la risoluzione del detector in funzione dell'energia dei  $\gamma$  interagenti con il cristallo di NaI(Tl), risultandone il grafico in **Fig. 23**.

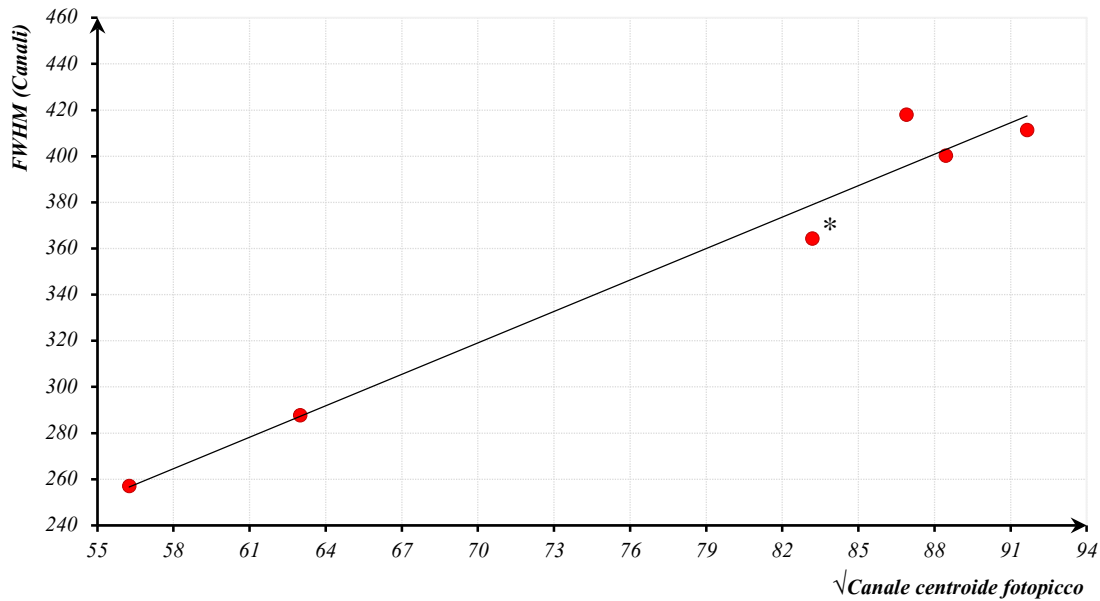


Figura 22. Caratteristica FWHM (Canali) vs  $\sqrt{\text{Canale centroide fotopicco}}$

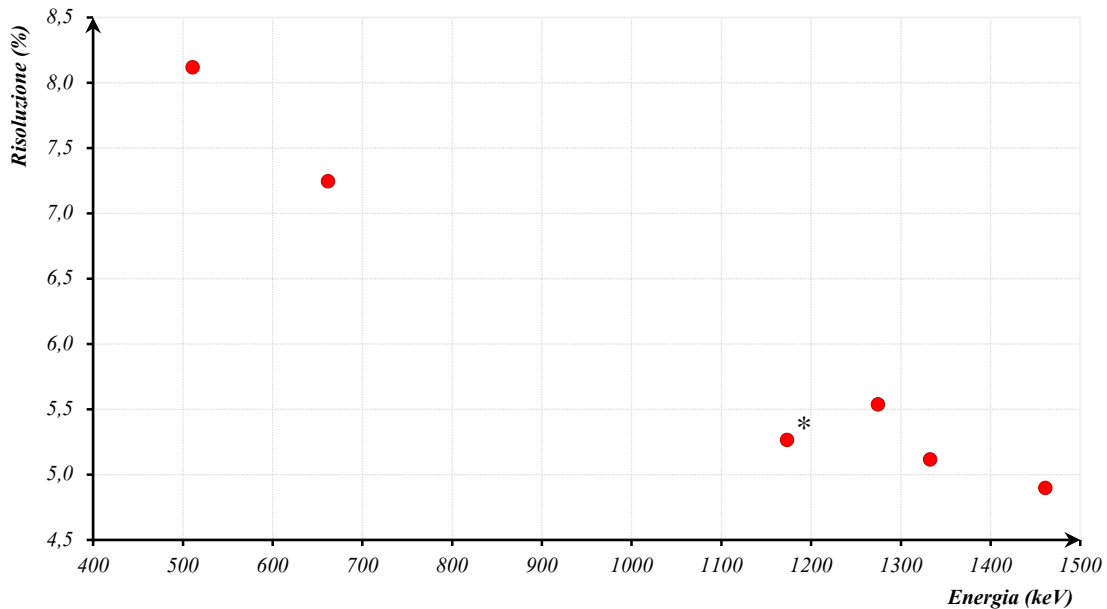


Figura 23. Risoluzione vs Energia dei  $\gamma$

\*: I punti contrassegnati appartengono alla sorgente di  $^{60}\text{Co}$ , la quale presenta due picchi ravvicinati, le cui code vanno ad influenzare reciprocamente la bontà dei fit gaussiani.

Tabella 3. Risultati detector NaI(Tl) 3"x3" con digitizer

Elemento	Energia letteratura (keV)	Canale fotopicco (keV)	FWHM (canali)	Risoluzione (%)
$^{137}\text{Cs}$	661,66	654,39	51,06	7,2
$^{22}\text{Na}$	511,00	511,77	45,61	8,1
	1274,53	1290,01	74,20	5,5
$^{60}\text{Co}$	1173,24	1178,18	64,67	5,3
	1332,50	1338,47	71,05	5,1
$^{40}\text{K}$	1460,83	1440,93	73,03	5,5

Successivamente, è stata analizzata la risoluzione temporale del detector NaI(Tl) 3"x3".

Per fare questo è stato impiegato un apparato come in **Fig. 4**, utilizzando una sorgente di  $^{22}\text{Na}$  e due differenti tipologie di scintillatori; sia il rivelatore NaI(Tl) 3"x3", che quello plastico EJ228. Nel decadere, il positronio creato dal decadimento del sodio, emette due  $\gamma$  da 511 keV antiparalleli. In questo modo, si avranno i fotoni che interagiscono con entrambi i detector quasi in contemporanea. I segnali generati nei due rivelatori sono stati, quindi, analizzati e sono stati selezionati gli eventi con una differenza temporale di registrazione minore di 400 ns, cioè quelli appartenenti al medesimo decadimento, detti in coincidenza. Con gli eventi di questo tipo appartenenti al rivelatore NaI(Tl) è stato ottenuto lo spettro in energia dei fotoni. Da **Fig. 24**, confrontando i due grafici, è possibile apprezzare come, una volta selezionati solamente gli eventi in coincidenza, rimangono quasi unicamente il fotopicco e il plateau dovuto all'effetto Compton dei  $\gamma$  di energia 511 keV.

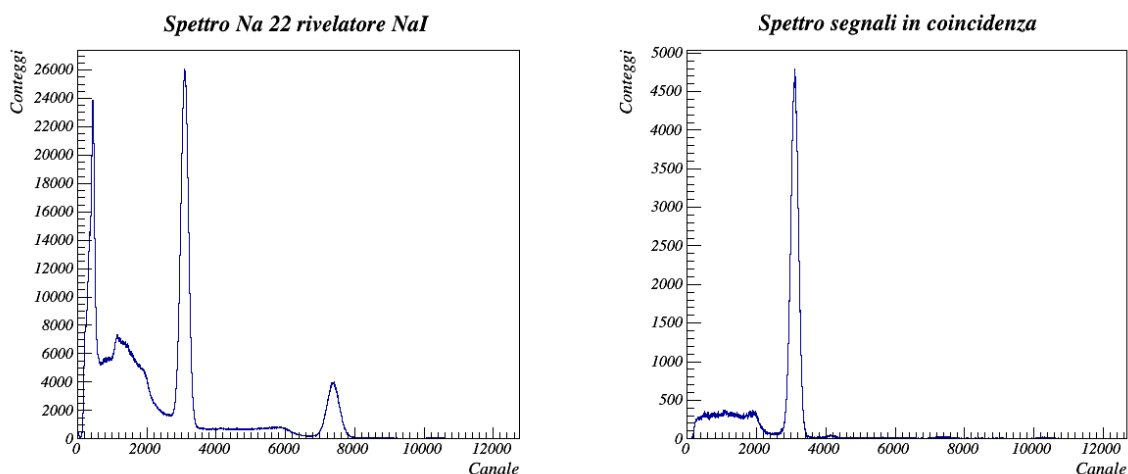


Figura 24. Confronto tra spettri dei  $\gamma$  della sorgente di  $^{22}\text{Na}$  con segnali in coincidenza o meno (rivelatore NaI(Tl) 3"x3")



Per valutare la risoluzione temporale del detector, tuttavia, non è possibile utilizzare solamente le informazioni date dalle differenze temporali nella registrazione dei segnali in coincidenza. Questo è dovuto al fatto che i segnali, per venire registrati, devono oltrepassare una soglia impostata nel digitizer, altrimenti vengono riconosciuti come rumore e scartati. In quel punto viene determinato il tempo a cui è avvenuto l'evento. Avendo segnali di ampiezze diverse, però, l'istante in cui esso supera la soglia non è sempre lo stesso, provocando una conseguente valutazione erronea della differenza dei tempi di registrazione dei segnali in coincidenza. È stata quindi applicata la tecnica del constant fraction. Esso consiste nello sdoppiare il segnale registrato, trovare l'opposto e attenuare la prima delle due copie e applicare un delay temporale alla seconda. I due segnali modificati vengono poi sommati ottenendo un'unica curva (**Fig. 25**). Da questa viene ricavato il punto in cui interseca la baseline, che nel caso in esame corrisponde allo zero, il quale verrà identificato come CF [4].

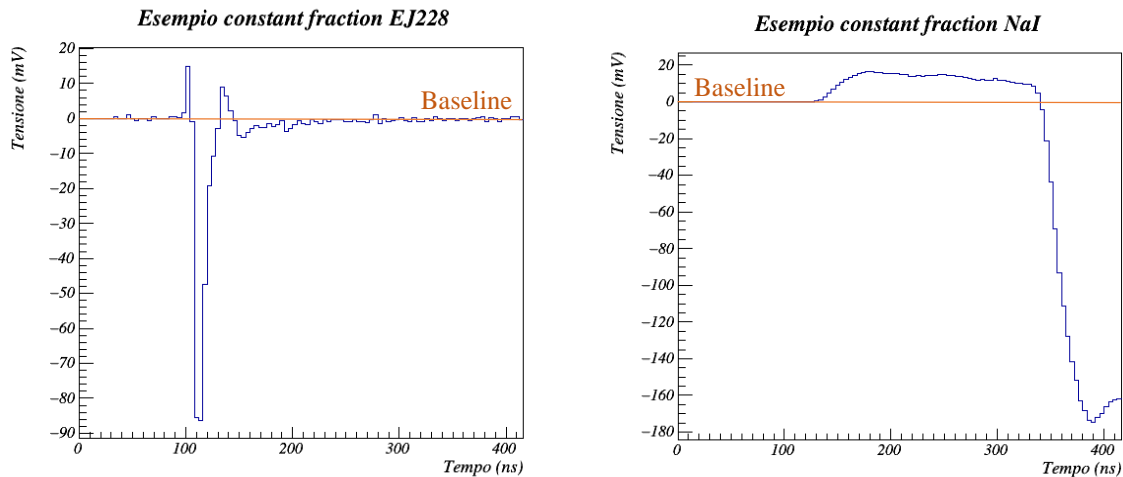


Figura 25. Esempi di constant fraction con segnali dei rivelatori EJ228 e NaI(Tl) 3"x3"

Il tempo ottenuto in questo modo è stato poi sommato al tempo di registrazione del segnale ottenendo  $t' = t + CF$ . La differenza tra gli istanti temporali dei segnali in coincidenza diventa perciò:

$$dt = (t^{NaI(Tl)} + CF^{NaI(Tl)}) - (t^{EJ228} + CF^{EJ228}) \quad (2.2.3)$$

dalla quale si ottiene l'istogramma in **Fig. 26**. Da questo, mediante fit gaussiano, è stata ricavata la FWHM del picco, la quale rappresenta la radice della somma quadratica della risoluzione temporale dei due rivelatori.

Per ottenere la miglior risoluzione temporale, il processo è stato eseguito variando prima il parametro di attenuazione di uno dei due segnali, poi il delay dell'altro, ottenendo i grafici in **Fig. 27**.

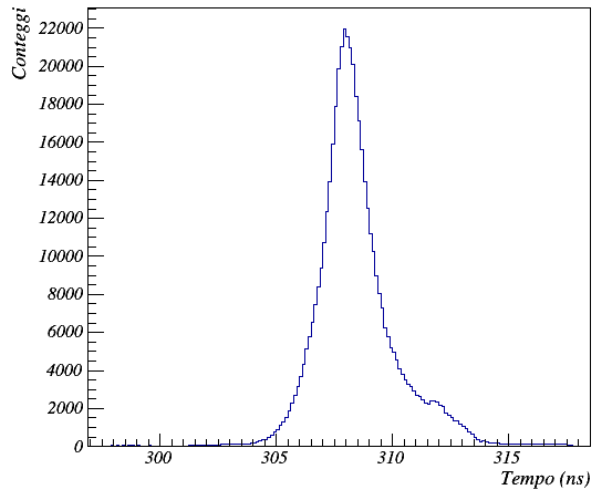


Figura 26. Istogramma delle differenze temporali tra gli eventi registrati nei detector EJ228 e NaI(Tl) 3''x3''

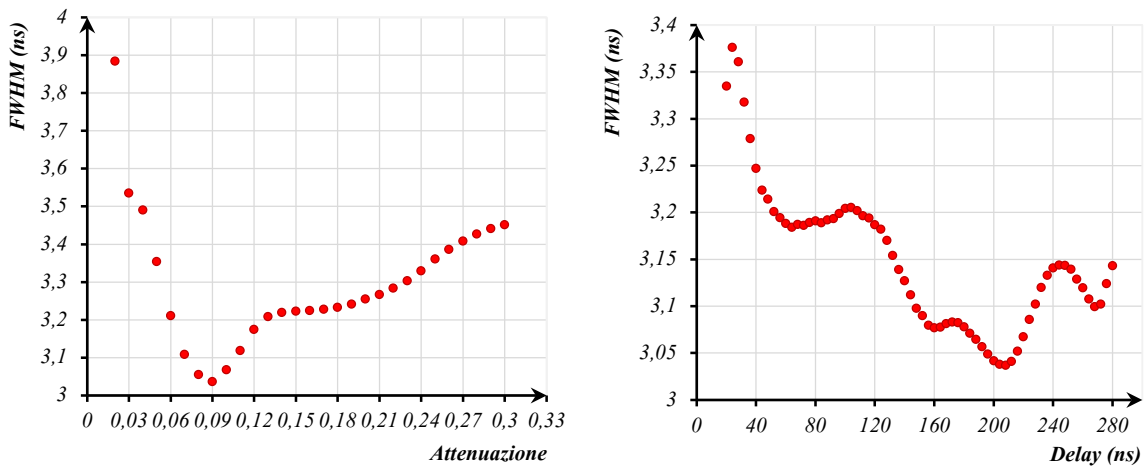


Figura 27. Risoluzione temporale dei detector EJ228 e NaI(Tl) 3''x3'' in funzione dei parametri attenuazione e delay del constant fraction

Impostando il valore dell'attenuazione al 9% e del delay di 208 ns, la risoluzione temporale totale per i due detector è risultata essere di 2,71 ns.

Considerando la risoluzione temporale del rivelatore plastico EJ228 pari a 0,65 ns, è stata ricavata la risoluzione temporale del rivelatore NaI(Tl) 3''x3'' risultando pari a 2,63 ns.

### 2.3. Rivelatore NaI(Tl) 5"x10"

Con il rivelatore NaI(Tl) 5"x10", l'analisi dati è stata condotta alla stessa stregua di quella fatta per il rivelatore NaI(Tl) 3"x3".

Inizialmente, sono stati ottenuti i valori della tensione di alimentazione del PMT e del long gate (estremo destro di integrazione dei segnali) per i quali la risoluzione risultava migliore, utilizzando la sorgente di  $^{137}\text{Cs}$  e analizzandone il fotopicco. Sono stati ottenuti i grafici della risoluzione in funzione dell'HV (*Fig. 28*) e del long gate (*Fig. 30*), e del canale del centroide del fotopicco in funzione della tensione di alimentazione del PMT (*Fig. 29*) e del long gate (*Fig. 31*).

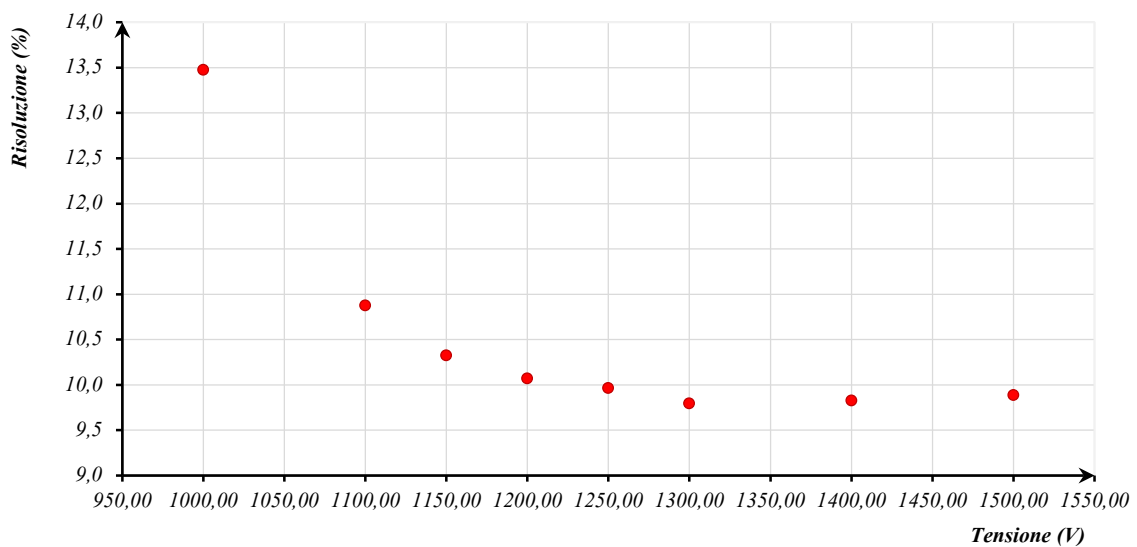


Figura 28. Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT

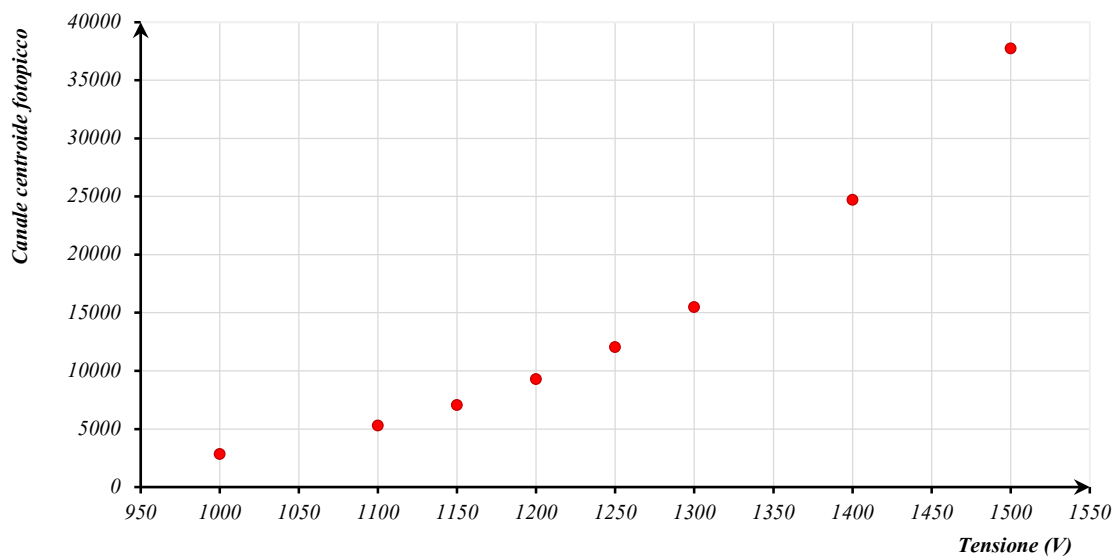


Figura 29. Posizione del centroide del fotopicco a 662 keV vs Tensione di alimentazione del PMT

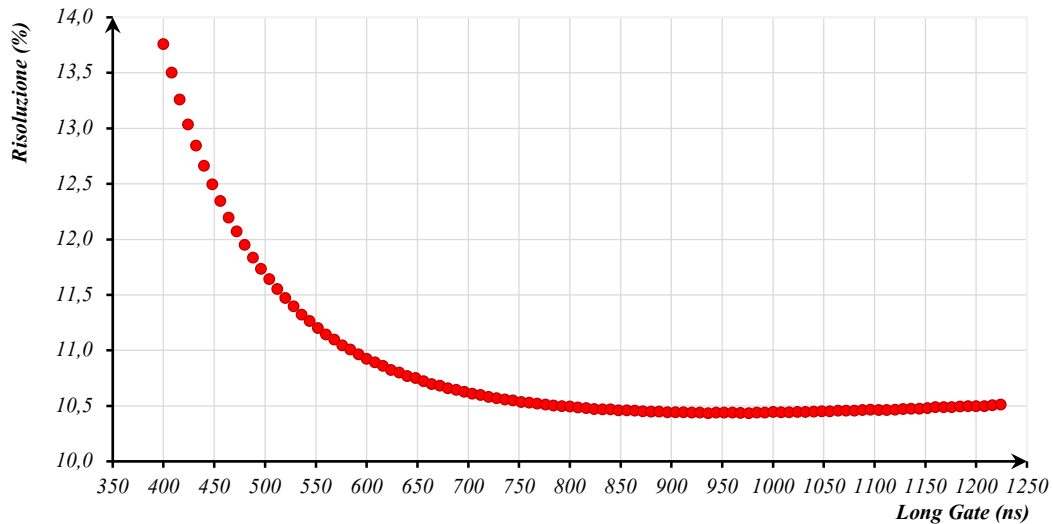


Figura 30. Risoluzione del fotopicco a 662 keV vs Long gate

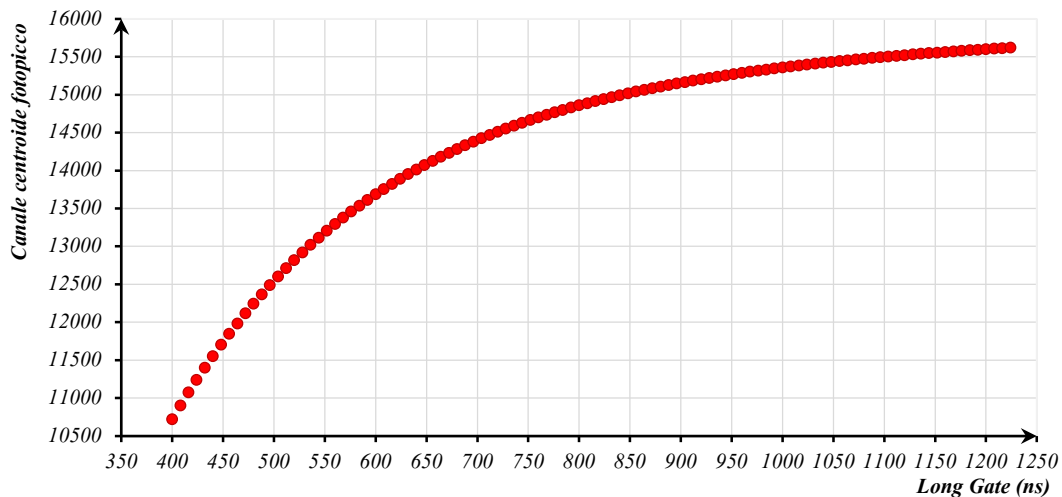


Figura 31. Posizione del centroide del fotopicco a 662 keV vs Long gate

Sono stati, quindi, scelti e impostati i valori di 1300 V per la tensione di alimentazione del PMT e di 1  $\mu$ s per il long gate, per i quali si ricava una risoluzione del 9,8%. Quest'ultima risulta superiore a quanto trovato per il rivelatore NaI(Tl) 3"x3", poiché le dimensioni del cristallo sono maggiori [10].

Successivamente sono stati analizzati i dati relativi alle diverse sorgenti utilizzate e sono stati ottenuti gli spettri a cui è stato sottratto il fondo. Ne viene fornito un esempio in **Fig. 32**.

Da questi, mediante fit gaussiano sovrapposto ad un fondo lineare, è stata ricavata la posizione dei centroidi dei fotopicchi e la loro FWHM. Si è presa in esame, di conseguenza, la linearità della posizione dei centroidi dei fotopicchi rispetto all'energia dei  $\gamma$  interagenti con il rivelatore, ottenendo il grafico in **Fig. 33**. Ne è stata fatta la regressione lineare pesata, ottenendo i valori:

$$m = 5,7553 \pm 0,0007 \text{ Canali/keV}$$

$$q = 53,4 \pm 0,1 \text{ Canali}$$

$$\rho = 0,99997 .$$

ove  $m$  rappresenta il coefficiente angolare della retta interpolante,  $q$  l'intercetta e  $\rho$  il coefficiente di correlazione dei dati.

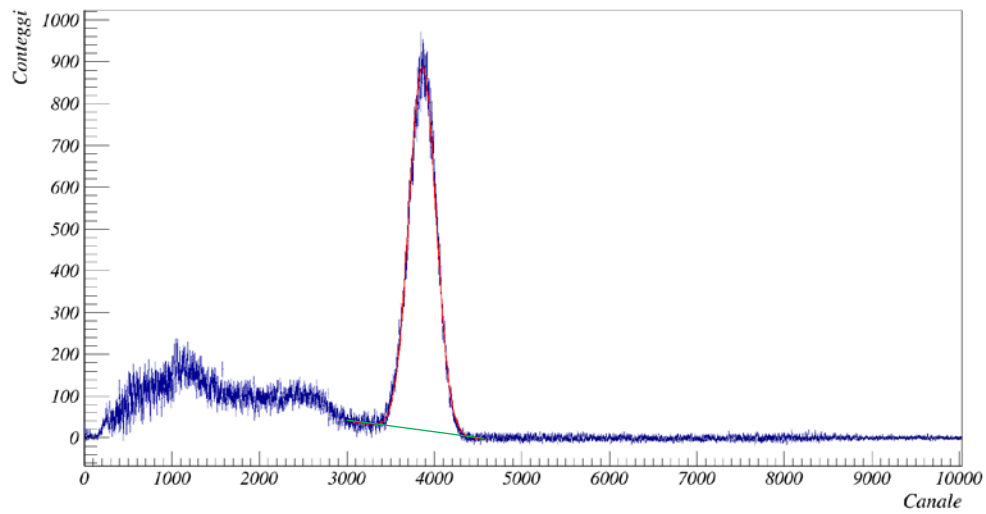


Figura 32. Spettro con sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ , rivelatore  $\text{NaI(Tl)}$  5"x10" con digitizer

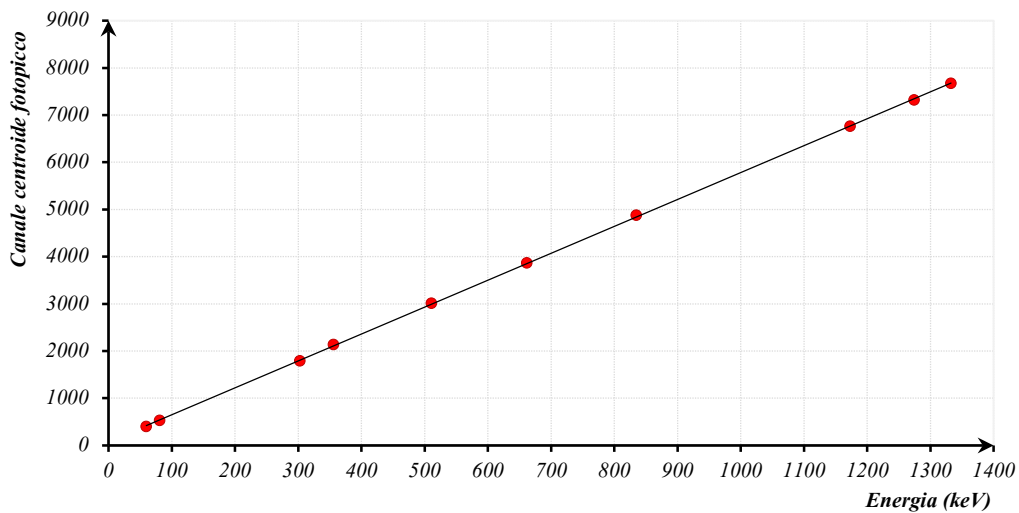


Figura 33. Caratteristica Canale del fotopicco vs Energia dei  $\gamma$

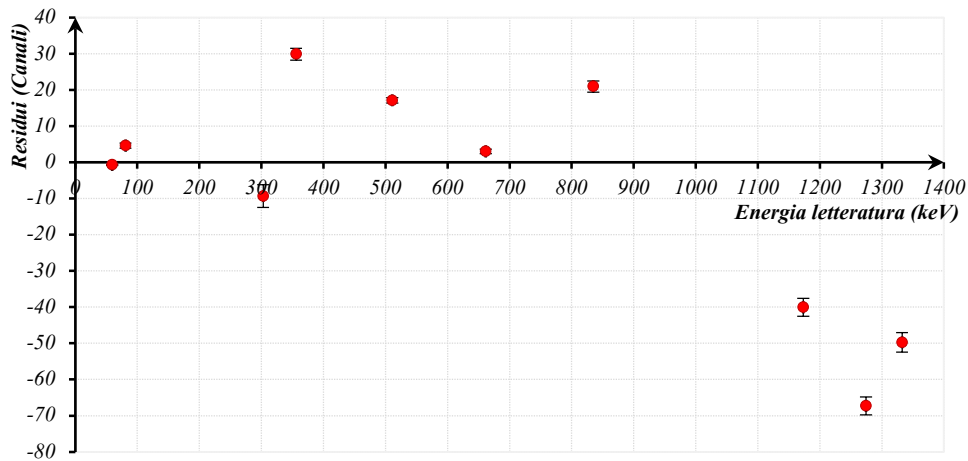


Figura 34. Residui della caratteristica Canale del fotopicco vs Energia dei  $\gamma$

I residui in **Fig. 34** suggeriscono un andamento quadratico, seppur lieve, della disposizione dei punti del grafico ‘Canale del fotopicco vs Energia dei  $\gamma$ ’ (**Fig. 33**). L’andamento tra l’energia dei  $\gamma$  e la posizione del centroide del fotopicco risulta, comunque, sostanzialmente lineare. Dalla precedente analisi è risultato un rapporto Peak to Total del 52% con la sorgente di  $^{137}\text{Cs}$ . Si è presa in considerazione, successivamente, la linearità della FWHM in funzione della radice quadrata della posizione del centroide del fotopicco (**Fig. 35**), la quale non è totalmente verificata. Infine, è stata calcolata la risoluzione del detector in funzione dell’energia dei  $\gamma$  interagenti con il rivelatore (**Fig. 36**).

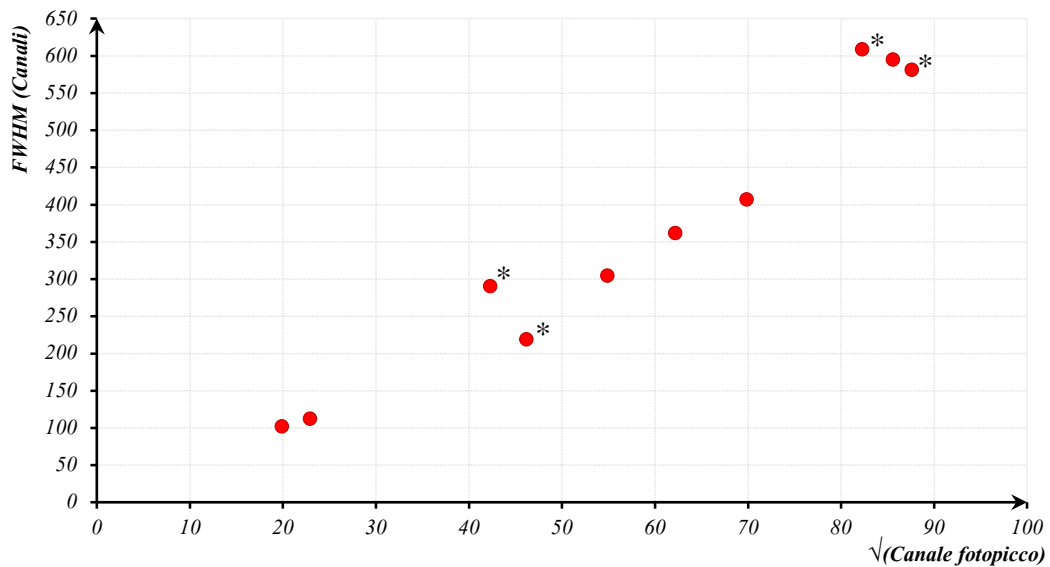


Figura 35. Caratteristica FWHM (Canali) vs  $\sqrt{\text{Canale centroide fotopicco}}$

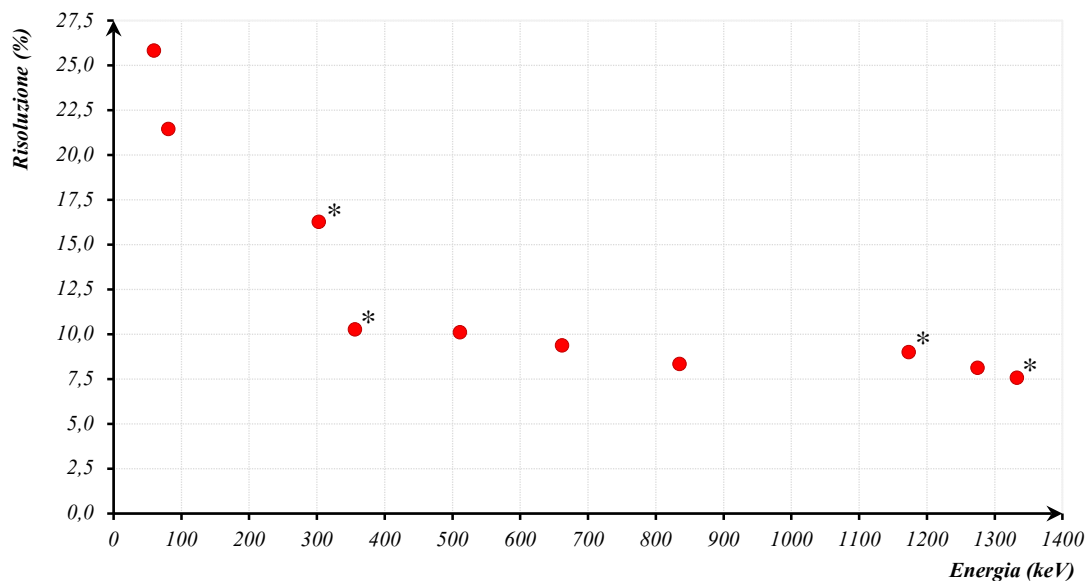


Figura 36. Risoluzione vs Energia dei  $\gamma$

\* : I punti contrassegnati appartengono alle sorgenti di  $^{60}\text{Co}$   $^{133}\text{Ba}$ , la quale presenta due picchi ravvicinati, le cui code vanno ad influenzare reciprocamente la bontà dei fit gaussiani.

Tabella 4. Risultati detector NaI(Tl) 5"x10" con digitizer

Elemento	Energia letteratura (keV)	Canale fotopicco (keV)	FWHM (keV)	Risoluzione (%)
<sup>137</sup> Cs	661,66	662,18	62,91	9,4
<sup>22</sup> Na	511,00	513,97	52,94	10,1
	1274,53	1262,84	103,41	8,1
<sup>60</sup> Co	1173,24	1166,28	105,77	9,0
	1332,50	1323,86	100,99	7,6
<sup>241</sup> Am	59,50	59,37	17,73	25,8
<sup>54</sup> Mn	834,85	838,49	70,72	8,3
<sup>133</sup> Ba	81,00	81,80	19,55	21,5
	302,85	301,23	50,51	16,3
	356,02	361,21	38,07	10,3

Per quanto riguarda la risoluzione temporale, è stata effettuata la medesima procedura di quella per il rivelatore NaI(Tl) 3"x3". Inizialmente, sono stati cercati i valori migliori dei parametri di attenuazione e delay del constant fraction per ottenere la risoluzione temporale migliore, dai quali sono stati ottenuti i grafici in **Fig. 37**.

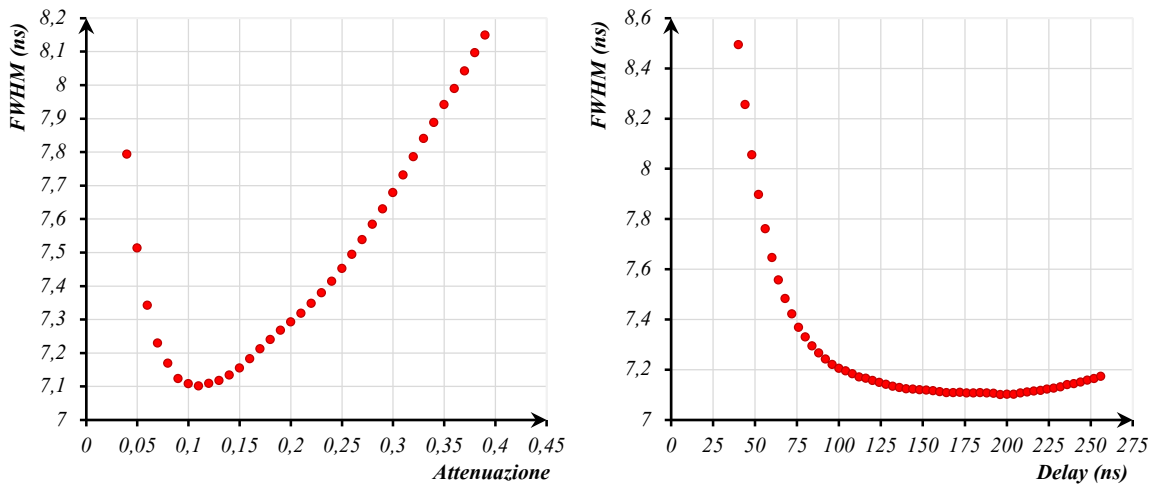


Figura 37. Risoluzione temporale dei detector EJ228 e NaI(Tl) 5"x10" in funzione dei parametri attenuazione e delay del constant fraction

Impostando nell'analisi dei dati i valori di 0,11 per l'attenuazione e di 180 ns per il delay, è stata ottenuta una risoluzione totale dell'apparato, costituito da entrambi i rivelatori, di 7,1 ns (**Fig. 38**).

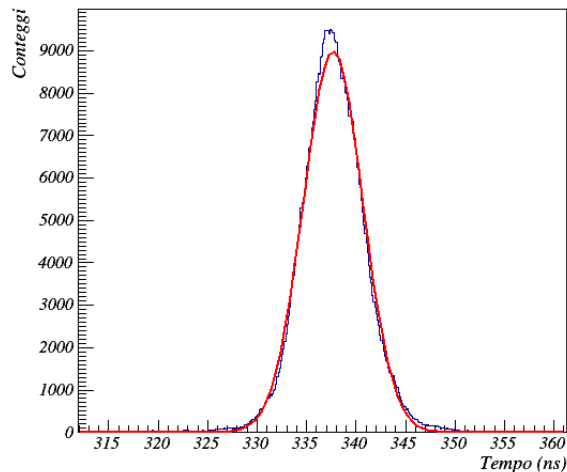


Figura 38. Istogramma delle differenze temporali tra gli eventi registrati nei detector EJ228 e NaI(Tl) 5''x10''

Data la risoluzione temporale del detector platico EJ228 di 0,65 ns [5], è stata calcolata una risoluzione temporale per il rivelatore NaI(Tl) 5''x10'' di 7,07 ns, con soglia pari a circa 25 keV. È stata svolta, inoltre, un'analisi dei dati in coincidenza valutando la risoluzione temporale in funzione della soglia impostata sull'ampiezza dei segnali del rivelatore, ottenendo il grafico in **Fig. 39**.

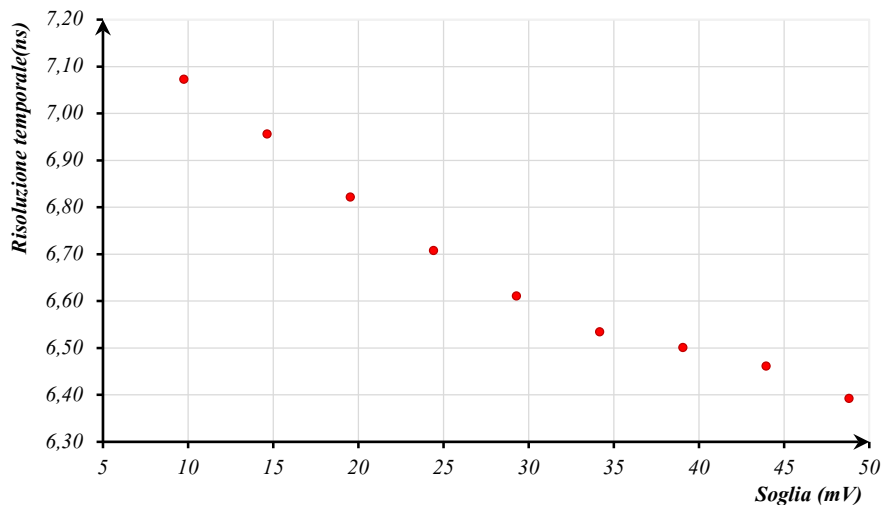


Figura 39. Risoluzione temporale detector NaI(Tl) 5''x10'' in funzione della soglia sui segnali

Infine, sono stati analizzati i dati dei segnali del fondo raccolti per dieci giorni dal rivelatore NaI(Tl) 5''x10'', per ricavare l'andamento della risoluzione in funzione del tempo di accensione dell'apparato di rivelazione.

Sono stati ottenuti i grafici degli spettri in energia dei  $\gamma$ , integrando i segnali raccolti in intervalli di 10 min ciascuno. Da questi è stata ricavata la risoluzione del fotopicco di energia 1460,83 keV, la quale è stata successivamente plottata in funzione del tempo, ottenendo il grafico in **Fig. 40**. Da questo è possibile notare come la risoluzione percentuale in energia del rivelatore vari poco più dell' 1% dopo 10 giorni di accensione dell'apparato.



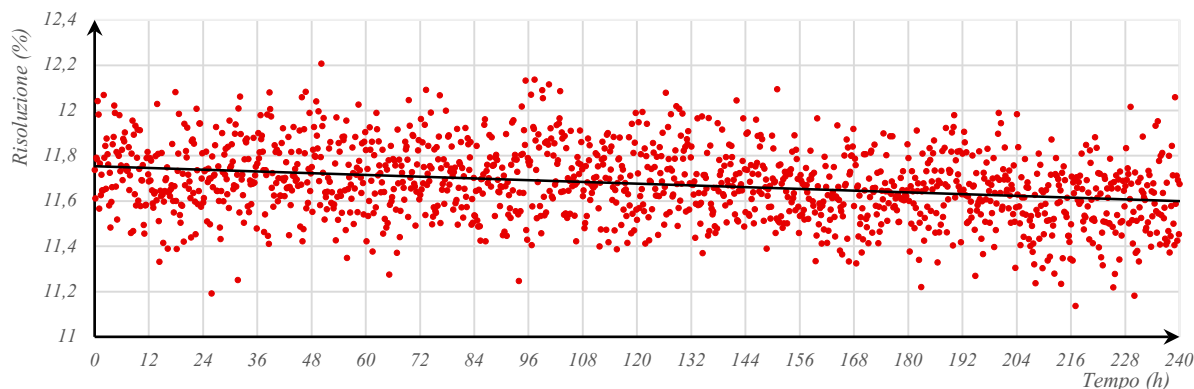


Figura 40. Grafico Risoluzione del fotopicco a 1460,83 keV vs Tempo di accensione dell'apparato sperimentale

La posizione del centroide del fotopicco nei dieci giorni di accensione dell'apparato ha subito una variazione di 1,5% e ha andamento mostrato in **Fig. 41**.

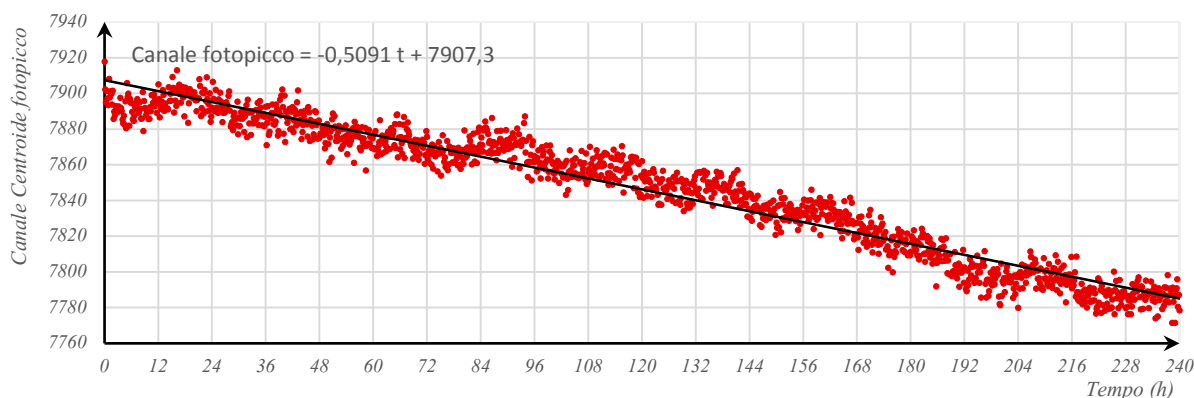


Figura 41. Grafico Risoluzione del fotopicco a 1460,83 keV vs Tempo di accensione dell'apparato sperimentale

Entrambi i fenomeni registrati sono per la maggior parte dovuti ad una variazione della moltiplicazione degli elettroni da parte dei dinodi del PMT al passare del tempo [11].

Dal precedente grafico è stata selezionata una regione di tempo tra le ore 18:00 del quarto giorno e le 18:00 del giorno successivo (ore 120-144) e sono state considerate le differenze dei valori rispetto alla retta interpolante i dati del grafico in **Fig. 41**, ottenendone l'andamento in funzione del tempo (**Fig. 42**). Da questi è possibile notare un andamento regolare, il quale è imputabile alle variazioni di temperatura del laboratorio e, di conseguenza, dell'apparato sperimentale [12].

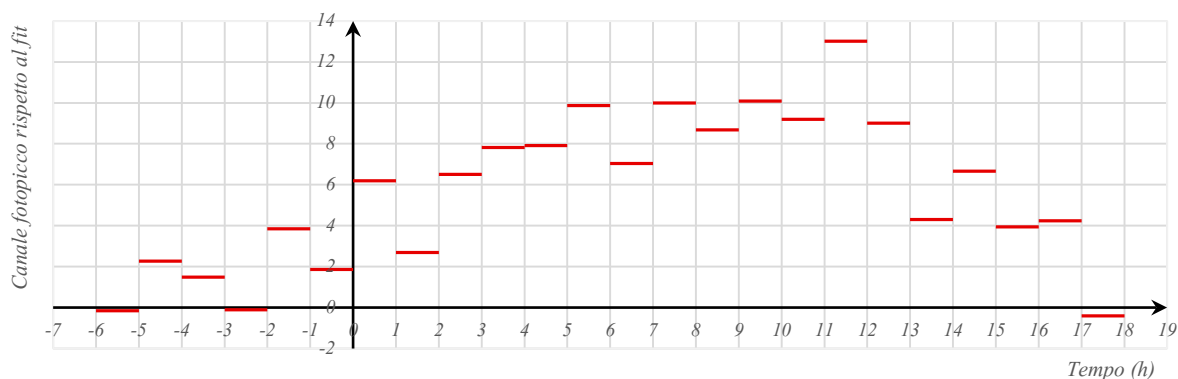


Figura 42. Scarti tra posizione del fotopicco e fit lineare di Fig. 34, tra la 120<sup>a</sup> e la 144<sup>a</sup> ora di accensione dell'apparato



## Capitolo 3. Conclusioni

Nella tesi sono state determinate le caratteristiche principali del rivelatore a scintillazione con cristallo di NaI(Tl) 3"x3" sia con catena elettronica, sia con digitizer per la lettura dei segnali. Si è ottenuta una buona linearità della posizione del centroide dei fotopicchi rispetto all'energia dei  $\gamma$  interagenti con il rivelatore. La risoluzione in energia del fotopicco a 662 keV è risultata essere attorno al 7%, pari a quella aspettata per un rivelatore a scintillazione di questo tipo [9]. La risoluzione temporale è stata stimata essere di 2,63 ns.

È stato, inoltre, caratterizzato il rivelatore a scintillazione con cristallo di NaI(Tl) 5"x10" con digitizer per la lettura dei segnali. È stata ottenuta una buona linearità della posizione del centroide dei fotopicchi in relazione all'energia dei  $\gamma$ . La risoluzione in energia del fotopicco a 662 keV è risultata essere pari al 9,4%, mentre la risoluzione temporale ottenuta è di 7,07 ns.

È stata analizzata la risoluzione temporale in funzione della soglia e del tempo di accensione dell'apparato, ottenendone un miglioramento all'aumentare della soglia e una variazione di circa 1% in 10 giorni.

È stata, infine, analizzata la posizione del centroide del fotopicco a 1460,83 keV in funzione del tempo, ottenendone una variazione di 1,5% in 10 giorni, dipendente anche dalle variazioni di temperatura nel periodo di acquisizione dei dati.



## Bibliografia e Sitografia

- [1] Centro studi Fedespedi, *Fedespedi Economic Outlook*. 5, Quadrimestrale di informazione economica, Milano, gennaio 2015
- [2] Carasco C. et Al. (2008), “In-field tests of the EURITRACK tagged neutron inspection system”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 588, 397-405
- [3] Proposal progetto C-BORD
- [4] Knoll G. F. (2010), *Radiation detection and measurement*, Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken (USA)
- [5] Stevanato L. et Al. (2011), “Light output of EJ228 scintillation neutron detectors”, *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 369-372
- [6] <http://www.hamamatsu.com/us/en/R877-100.html>
- [7] <http://ie.lbl.gov/toi/radSearch.asp>
- [8] <http://www.caen.it/jsp/Template2/ProductList.jsp?Type=Product&parent=2>
- [9] Akkurt I. et Al. (2014), “Detection Efficiency of NaI(Tl) Detector in 511–1332 keV Energy Range”, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Volume 2014
- [10] Moszynski M. et Al. (2002), “Intrinsic energy resolution of NaI(Tl)”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 484, 259-269
- [11] HAMAMATSU, “PMT handbook”, 3rd version, 2007
- [12] Saint-Gobain Crystals, “NaI(Tl) data sheets”, Giugno 2014