

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA “GALILEO GALILEI”
CORSO DI LAUREA IN FISICA

Misura dello spettro di assorbimento dei gamma di sorgenti radioattive
in diverse configurazioni del densimetro multifasico Q-Gamma

Relatore:
Ch.mo Prof. Marcello
LUNARDON

Laureando:
Marco FERRARI

Correlatore:
Dott. Enrico
FELTRESI

Anno accademico 2017/2018

Indice

1. Introduzione

1.1.	Importanza delle misure di densità dei fluidi in estrazione.	Pag. 3
1.2.	Densimetro Quick-Gamma Pietro Fiorentini.	Pag. 3
1.2.1.	Parametri di scelta della sorgente radioattiva.	Pag. 4
1.2.2.	Differenze tra i detector impiegati.	Pag. 5
1.2.3.	Elettronica e stabilizzazione del gain.	Pag. 6
1.3.	Principi fisici.	
1.3.1.	Sorgenti radioattive utilizzate.	Pag. 7
1.3.2.	Interazione dei fotoni con la materia.	Pag. 12
1.4.	Obiettivi.	Pag. 13

2. Setup sperimentale

2.1	Hardware.	Pag. 14
2.2.	Software.	Pag. 16
2.3.	Misurazioni.	Pag. 17
2.3.1.	Configurazioni impiegate.	Pag. 17
2.3.2.	Procedura misurazione.	Pag. 17
2.3.3.	Sommario misurazioni.	Pag. 17

3. Misure e analisi dati

3.1	Analisi del guadagno del fotomoltiplicatore in funzione del rate.	Pag. 19
3.2	Verifica del reale rate d'acquisizione dati.	Pag. 21
3.3	Verifica della linearità della risposta in energia.	Pag. 22
3.4	Risoluzione in energia.	Pag. 23
3.5	Calcolo delle energie dei picchi d'emissione.	Pag. 24
3.5.1	Calibrazione in energia.	Pag. 24
3.5.2	Misure sulla stabilità del guadagno.	Pag. 26
3.6	Analisi dell'intensità dei picchi d'emissione delle sorgenti.	Pag. 28
3.6.1	Detector NaI	Pag. 28
3.6.2	Detector LYSO	Pag. 30
3.7	Verifica sull'approssimazione della geometria del setup utilizzato.	Pag. 31

4. Conclusioni

4.1.	Considerazioni sulla geometria del setup.	Pag. 34
4.2.	Possibilità di misurare la densità del fluido multifasico con molteplici energie gamma.	Pag. 34
4.3.	Considerazioni sulla stabilità energetica.	Pag. 35

Bibliografia

Capitolo 1

Introduzione

1.1. Importanza delle misure di densità dei fluidi in estrazione.

Il flusso in estrazione nei pozzi petroliferi è una miscela multifasica composta, principalmente, da petrolio, gas ed acqua. La conoscenza di questa composizione è di grande importanza per le aziende petrolifere ed il procedimento standard, che permette di stimare tale composizione, prevede l'uso di macchinari (conosciuti come separatori) in grado di separare fisicamente le diverse sostanze della miscela estratta, per poi essere misurate separatamente. Tuttavia, questi separatori hanno diversi svantaggi: un grosso ingombro, un costo elevato e non permettono una costante analisi del fluido in estrazione.

Per ovviare a tali inconvenienti, a partire dagli anni '80, sono stati introdotti i Multiphase Flow Meters (MPM): dispositivi in grado di monitorare il fluido estratto in modo continuativo e non intrusivo. La possibilità di eseguire misure senza un contatto diretto con la miscela estratta è di notevole importanza, in quanto nei fluidi estratti sono spesso presenti acidi (per esempio acido solforico) che riducono di molto la durata dei misuratori, aumentando la manutenzione richiesta [1.1.1] [1.1.2].

Per l'analisi di queste miscele trifasiche di aria, petrolio e acqua, esistono due principali tipologie di MPM. Un primo sistema prevede la misurazione delle velocità di ogni singola fase e delle relative frazioni.

Un secondo metodo è quello di misurare parametri dell'intero flusso, conoscendo come dipendono dalle diverse componenti. Esempi di tali parametri sono: l'impedenza elettrica del fluido, la sua densità e la sua pressione. Questi parametri possono variare molto velocemente durante il processo estrattivo ed è quindi fondamentale che gli strumenti di misura siano veloci e stabili.

Per rispondere a tutte queste caratteristiche, la Pietro Fiorentini (PF) ha progettato e sviluppato il densimetro Quick-Gamma, in grado di fornire una stima della densità del fluido che scorre nella condotta con campionamenti a 8 ms (da cui il nome "Quick") attraverso una misura dell'assorbimento di raggi gamma da parte del fluido. Tali raggi gamma sono prodotti da una sorgente di ^{137}Cs , posta a fianco della condotta, e rilevati da uno scintillatore posto sul lato opposto della condotta.

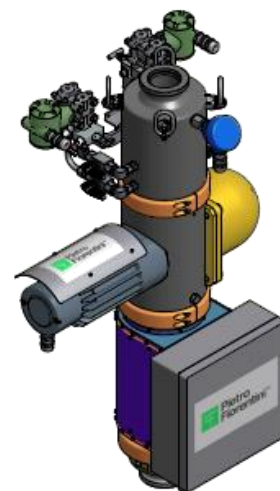


Figura 1.1.1

1.2. Densimetro Quick-Gamma Pietro Fiorentini.

Il densimetro Q-Gamma è composto da:

- Una sorgente radioattiva naturale di ^{137}Cs con un'attività di 50 mCi.

- Un detector sensibile ai fotoni di energia di 662 keV emessi dalla sorgente. È composto da un cristallo scintillatore combinato con un fotomoltiplicatore (PMT) che permette la trasformazione del segnale luminoso prodotto dall'interazione dei fotoni con lo scintillatore in un segnale elettrico.
- Elettronica in grado di elaborare il segnale del PMT, fornendo il numero di segnali con ampiezza superiore a soglie specifiche.
- Schermi al piombo che permettono di lavorare vicino al detector senza problemi radio-protezionistici.

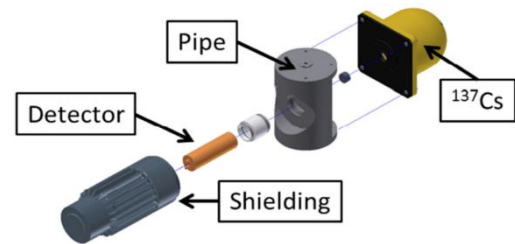


Figura 1.2.1

Le varie parti del Q-Gamma sono state predisposte in modo da poter analizzare il fluido che scorre in condotte di acciaio di diametro variabile [1.2.1].

1.2.1. Parametri di scelta della sorgente radioattiva.

La scelta del radioisotopo da utilizzare nel rivelatore Q-Gamma è stata fatta ponderando diverse caratteristiche.

- **Tempo di dimezzamento**
Il tempo di dimezzamento, o emivita, è definito come il tempo necessario affinché la sorgente dimezzi la propria attività. Nel caso del Q-Gamma all'attività della sorgente corrisponde il numero di conteggi del detector e quindi il corretto funzionamento del densimetro. La sorgente dovrà avere quindi la emivita più lunga possibile, almeno dell'ordine della decina di anni, in modo che non sia necessaria una manutenzione costante per sostituire la sorgente. Nel caso specifico del ^{137}Cs il tempo di dimezzamento è di circa 30 anni.
- **Attività della sorgente**
L'obiettivo del densimetro Q-Gamma è di fornire una misura della densità con una frequenza di almeno 125 Hz e la minor incertezza possibile. Il valore di 125 Hz è stato scelto perché vicino alla frequenza naturale del processo d'estrazione. Affinché l'incertezza sia sufficientemente bassa con misure così brevi, il numero di fotoni rilevati dal detector deve essere elevato e quindi l'attività della sorgente deve essere sufficientemente intensa. All'aumentare dell'attività della sorgente aumenta, però, anche la sua pericolosità, costringendo ad utilizzare schermi di piombo più spessi e causando, quindi, un aumento dell'ingombro e del peso del Q-Gamma. Tenendo conto di tutti questi fattori, la sorgente scelta ha un'attività di 50 mCi, ovvero $1.6 \cdot 10^9$ decadimenti al secondo. La presenza del collimatore che dirige il fascio di raggi gamma verso la tubazione, la distanza che separa la sorgente dal rivelatore, la presenza dell'acciaio della condotta e l'efficienza del detector, fanno sì che alla frequenza di 125 Hz, il numero di conteggi degli eventi superiori a 250 keV per campione, sia di circa 2000. L'incertezza sul numero di conteggi, assumendo che il processo abbia statistica Poissoniana, è del 2 %.
- **Penetrazione dei gamma attraverso il metallo**
Il fluido in estrazione scorre in tubazioni d'acciaio, lega composta principalmente da ferro ($Z = 26$) e carbonio ($Z = 6$). L'elevato numero atomico del ferro fa sì che l'attenuazione dei raggi gamma attraverso l'acciaio sia molto elevata. È stata quindi studiata la capacità d'assorbimento dell'acciaio alle diverse energie,

attraverso l'analisi della distanza che un fascio di raggi gamma, di una ben determinata energia, percorre nell'acciaio prima che risulti attenuato del 99%. Gli unici radionuclidi con picchi di emissione di raggi gamma ad energie in grado di attraversare lo spessore delle condotte impiegate nell'estrazione di petrolio, sono quelli del ^{133}Ba , ^{75}Se e ^{137}Cs . Tra questi tre radioisotopi il ^{137}Cs ha una capacità di penetrazione dell'acciaio di 80 mm, contro i 40 mm dei primi due. Questo è stato uno dei fattori principali della scelta del cesio come sorgente.

In conclusione, è stato scelto il ^{137}Cs come sorgente da utilizzare nel Q-Gamma per la sua lunga emivita e per la capacità dei gamma emessi di penetrare grandi spessori di acciaio [1.2.2].

1.2.2. Differenze tra i detector impiegati

La scelta di utilizzare, per il Q-Gamma, detector della tipologia a "cristalli scintillatori" si è basata sulla necessità di avere dei rivelatori:

- in grado di raggiungere rate di conteggi superiori ad 1 MHz, in modo da massimizzare il numero di conteggi per campione e ridurre quindi i tempi d'acquisizione;
- che abbiano un intervallo di temperatura operativa di -30°C e $+70^{\circ}\text{C}$, per poter lavorare nelle condizioni ambientali estreme dei pozzi petroliferi;
- aventi una buona efficienza di rivelazione, definita come il numero di fotoni rilevati rispetto al numero dei fotoni incidenti, intorno ai 662 keV.

La scelta, invece, del materiale che compone il cristallo è stata basata sui seguenti parametri:

- Costante di decadimento del segnale luminoso ridotta, in modo che la durata del segnale luminoso non sia superiore all'intervallo tra due segnali consecutivi.
- Densità elevata, in modo da aumentare il numero di fotoni che interagiscono rispetto al numero dei fotoni totali che investono il detector.
- Assenza di fosforescenza e radioattività intrinseca, in modo da ridurre quanto più possibile il rumore di fondo.
- Alto numero atomico Z degli atomi del cristallo, per aumentare il numero di fotoni che interagiscono tramite effetto fotoelettrico (proporzionale a Z^{+5}) rispetto al numero di fotoni che interagiscono per effetto Compton (proporzionale a Z).
- Buona risoluzione (FWHM $< 20\%$) attorno ai 662 keV.
- Indipendenza dalla temperatura ambientale.
- Costo contenuto e facile reperibilità.

In base a tali parametri i cristalli scelti per essere impiegati nel Q-Gamma sono [1.2.3]:

- **NaI(Tl)**: caratterizzato da un basso costo, un'alta efficienza e dall'assenza di radioattività intrinseca; tuttavia il suo guadagno dipende dalla temperatura ambientale.

- **LYSO:** dotato di una maggiore densità (5.37 g/cm^3 contro i 3.67 g/cm^3 del NaI), velocità di risposta più elevata (50 ns contro 250 ns del NaI) e una minore dipendenza dalla temperatura di utilizzo. Tuttavia, il suo costo è più elevato e possiede un'attività radioattiva intrinseca [1.2.4].

Entrambi questi cristalli scintillatori funzionano emettendo un segnale luminoso proporzionale all'energia che il fotone ha rilasciato nel cristallo. Per convertire questo segnale luminoso in un segnale elettrico utilizzabile dall'elettronica di controllo, vengono impiegati dei fotomoltiplicatori per la loro possibilità di essere impiegati in un range di temperature sufficientemente grande.

In particolare, il PMT impiegato nel Q-Gamma è il modello R4607A-06 prodotto dalla Hamamatsu Photonics.

1.2.3. Elettronica e stabilizzazione del gain.

Come vedremo meglio nel paragrafo 1.3.2, il densimetro Q-Gamma sfrutta il numero di conteggi del PMT per risalire alla densità del mezzo attraversato dal fascio di raggi gamma. Purtroppo, uno dei principali difetti dei PMT è la variazione del proprio guadagno al variare della temperatura e del rate con cui i fotoni colpiscono il rivelatore. Per il corretto funzionamento del densimetro è, quindi, necessario un sistema di stabilizzazione del guadagno del PMT. Nel caso del Q-Gamma tale sistema si basa sulla forma dello spettro della sorgente radioattiva, che nel paragrafo 1.3.1 vedremo essere una caratteristica univoca per ogni radionuclide. In particolare, la stabilità del guadagno è raggiunta attraverso dei comparatori presenti nella scheda elettronica di controllo. Questi comparatori confrontano l'ampiezza del segnale proveniente dal PMT con delle soglie prefissate. Se l'ampiezza del segnale è maggiore della soglia, allora il comparatore registra un conteggio. Tali soglie sono impostate in modo da suddividere lo spettro energetico in 4 regioni:

- **Soglia D:** corrispondente a circa 250 keV. Questa soglia è posta in modo da registrare i conteggi di tutti i raggi gamma appartenenti alla spalla Compton, al fotopico e ai fotoni di energia superiore.
- **Soglia C:** conta il numero di fotoni con un'energia tale da appartenere al fotopico o superiore.
- **Soglia B:** i suoi conteggi sono composti da tutti i gamma con energia superiore a 662 keV.
- **Soglia A:** conta i fotoni con energia superiore al fotopico.

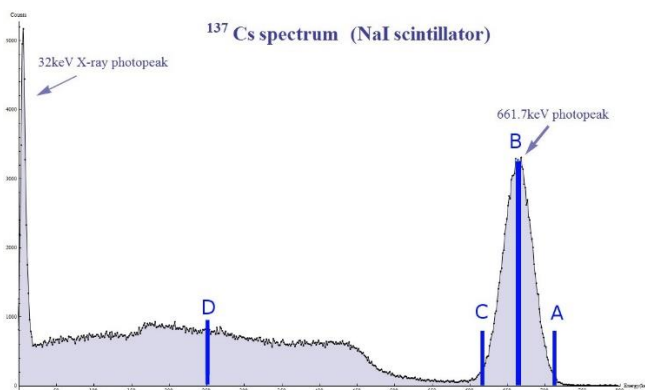


Figura 1.2.2

Dal momento che l'incertezza sul numero di conteggi è data dalla statistica Poissoniana ed è pari alla radice del numero di stesso di conteggi, la funzione della prima soglia D è quella di garantire di avere un numero di conteggi sufficientemente elevato da mantenere un'incertezza relativamente bassa.

Le altre tre soglie sono invece utilizzate per individuare il picco e compensare le variazioni nel guadagno del PMT. Infatti, essendo la forma dello spettro della sorgente radioattiva sempre la stessa, nel momento in cui la differenza del numero di conteggi tra le soglie A e B è uguale alla differenza del numero di conteggi tra le soglie B e C, la soglia B deve individuare esattamente il centroide del picco dei 662 keV. A questo punto il sistema raggiunge lo stato di "locked", ovvero è stata raggiunta la stabilità sul gain. Se il guadagno dovesse iniziare a variare, le differenze tra i conteggi A-B e B-C, varierebbero in maniera diversa (se il guadagno aumenta, diminuisce la prima e aumenta la seconda, viceversa se il guadagno del PMT cala) e la scheda di controllo è quindi in grado di aumentare o diminuire la tensione d'alimentazione del PMT per compensare questa variazione [1.2.5].

1.3. Principi fisici

1.3.1. Sorgenti radioattive utilizzate.

Nella nostra esperienza, oltre alla sorgente di ^{137}Cs , sono state utilizzate anche sorgenti di ^{22}Na e ^{60}Co .

^{137}Cs

La radiazione emessa dalla sorgente radioattiva impiegata nel Q-Gamma è del tipo di "raggi gamma", ovvero radiazioni elettromagnetiche emesse da nuclei eccitati nella transizione verso stati energetici nucleari di livello inferiore. Nel caso specifico del Q-Gamma, tali nuclei eccitati sono quelli del ^{137}Ba , prodotti dal decadimento di un altro radionuclide, il ^{137}Cs , secondo lo schema riportato nell'immagine seguente.

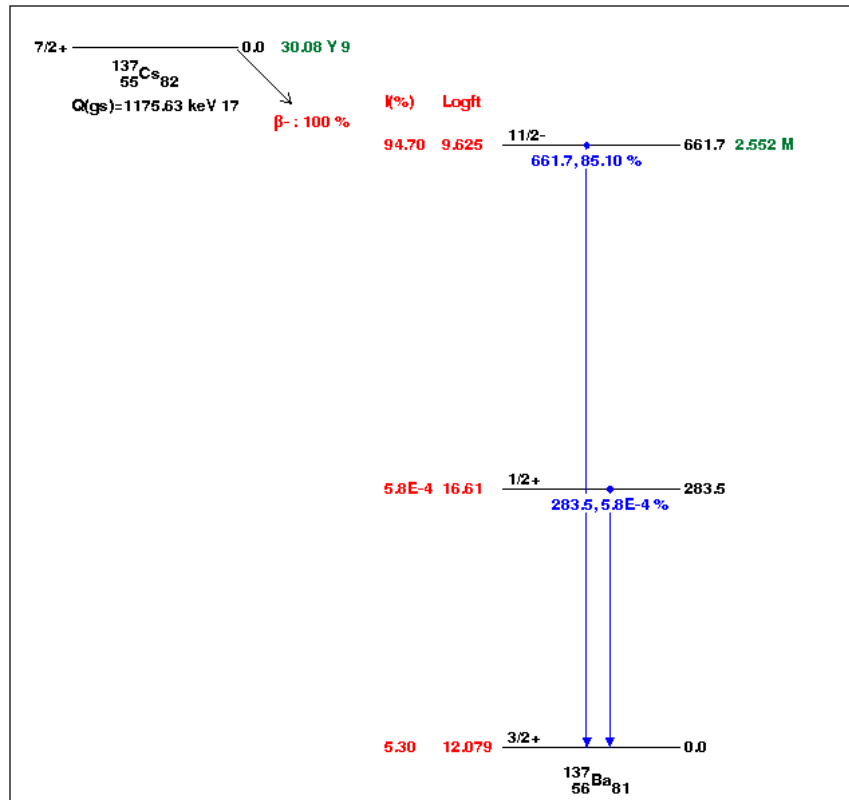
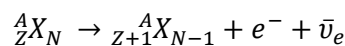


Figura 1.3.1

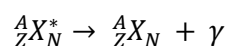
I nuclei di ^{137}Cs decadono β^- producendo nuclei figli di ^{137}Ba . Nel processo di decadimento β^- un neutrone si converte in protone, emettendo un elettrone e^- e un antineutrino $\bar{\nu}_e$ in base allo schema seguente:



Gli stati energetici del nucleo figlio sono prodotti con determinate probabilità. Il ^{137}Cs , per ogni evento, decade per il:

- 94.7 % delle volte nel livello energetico $\frac{11^-}{2}$ del ^{137}Ba ;
- $5 \cdot 10^{-4}$ % al livello energetico $\frac{1^+}{2}$;
- 5.3 % nello stato fondamentale del bario.

Gli stati eccitati decadono quindi nello stato stabile emettendo fotoni, che a queste energie sono chiamati “raggi gamma” γ , secondo lo schema seguente:



L’energia dei raggi gamma emessi è ben definita per ogni transizione, con valori – per il ^{137}Ba – di:

- 661.659 keV per transizioni dal secondo stato eccitato allo stato fondamentale
- 283.5 keV, invece, per decadimenti dal primo stato eccitato.

Tuttavia, i primi sono molto più intensi. Infatti, nell’85% dei casi vengono emessi gamma di energia 662 keV e solo nel $5.8 \cdot 10^{-4}$ gamma da 284 keV. Il secondo contributo

risulta quindi trascurabile e lo spettro energetico della sorgente di ^{137}Cs si presenta come da figura seguente.

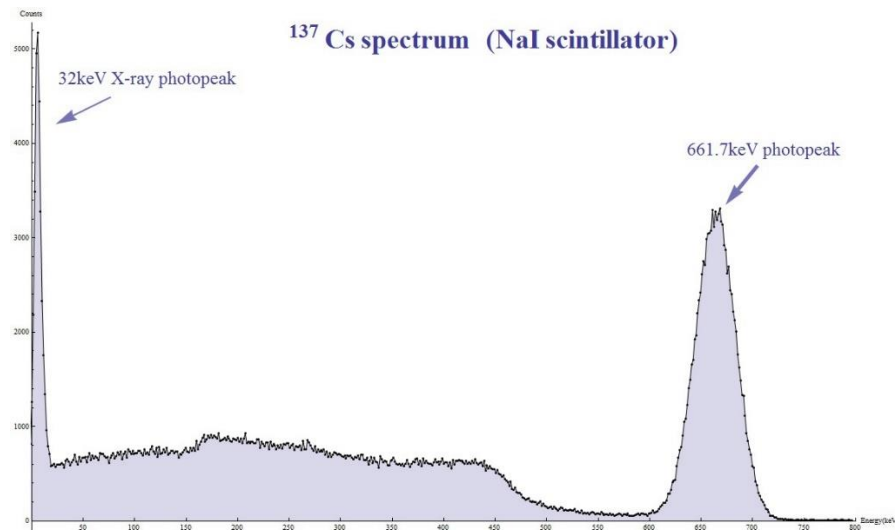


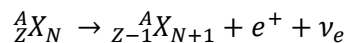
Figura 1.3.2

A 662 keV si trova il fotopicco dei raggi gamma emessi dalla sorgente, mentre a 32 keV troviamo il picco generato dai raggi X caratteristici emessi dal ^{137}Ba nel riassetto degli orbitali atomici. Tra i due picchi si trova la “spalla Compton”, dovuta ai raggi gamma che hanno interagito mediante effetto Compton perdendo energia.

Lo spettro energetico è caratteristico di ogni radionuclide e non dipende da alcun parametro. In particolare, il valore energetico sempre uguale del fotopicco del ^{137}Cs è sfruttato dal Q-Gamma per raggiungere la stabilizzazione del gain, come approfondito al paragrafo [1.2.3].

^{22}Na

Il ^{22}Na è un radionuclide con un tempo di dimezzamento relativamente basso, pari a 2.6 anni. Esso decade in ^{22}Ne tramite β^+ , un processo per cui un protone decade in una coppia neutrone-positrone e^+ più un neutrino elettronico ν_e secondo lo schema seguente:



Per ogni evento il ^{22}Na decade per il:

- 99.94 % nello stato eccitato 2^+ di energia 1274.5 keV;
- 0.056 % nello stato fondamentale.

Lo schema del processo di decadimento è riportato nella seguente figura [1.3.2].

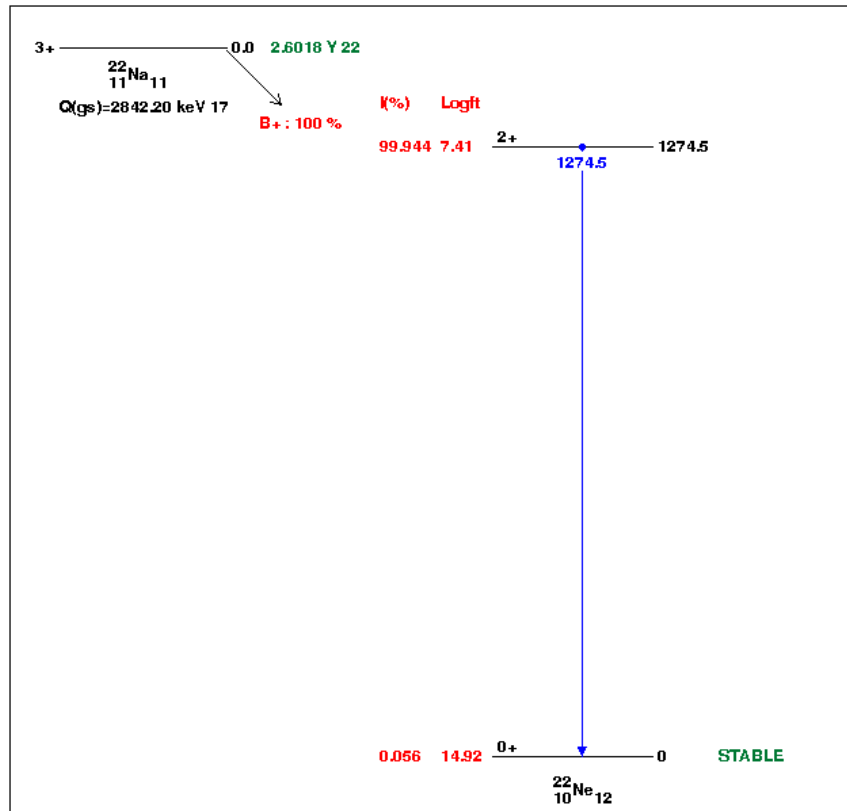


Figura 1.3.3

Lo stato eccitato 2^+ si diseccita, quindi, nello stato fondamentale emettendo un fotone di energia caratteristica di 1274.5 keV con una probabilità del 99.94 %. Tuttavia, il positrone emesso nel decadimento, può annichilire con la conseguente emissione di due fotoni di energia di 511 keV, causando un ulteriore picco energetico, particolarmente intenso, nello spettro d'emissione [1.3.3]. Un esempio di spettro energetico del nuclide ^{22}Na è riportato nella seguente figura.

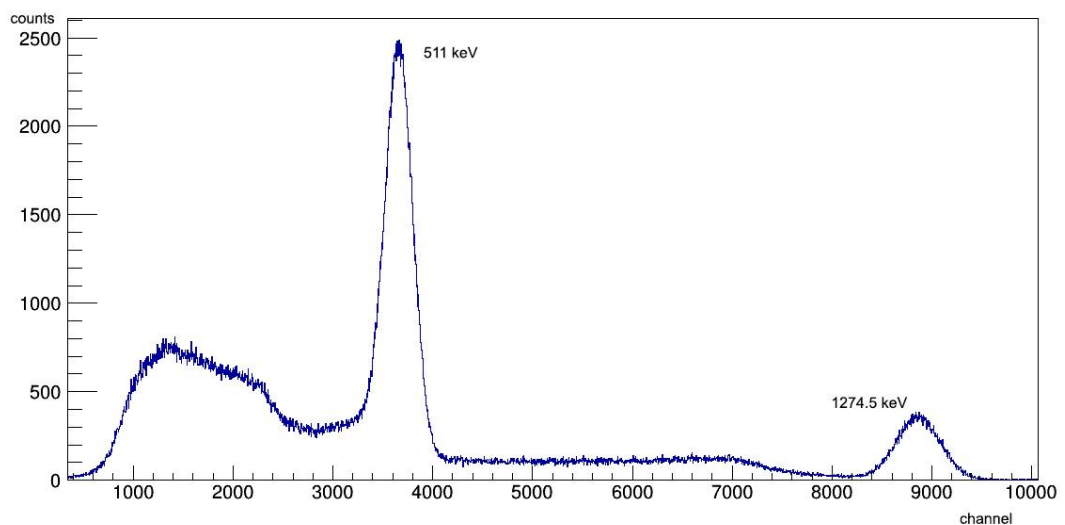


Figura 1.3.4

^{60}Co

Il ^{60}Co è un radionuclide con emivita di 5.27 anni che decade in ^{60}Ni tramite β^- . Per ogni evento, il ^{60}Co decade con il:

- 99.88 % nello stato eccitato 4^+ di energia 2505.7 keV;
- 0.12 % nello stato eccitato 2^+ di energia 1332.5 keV.

Lo schema del decadimento è riportato nella seguente figura [1.3.4].

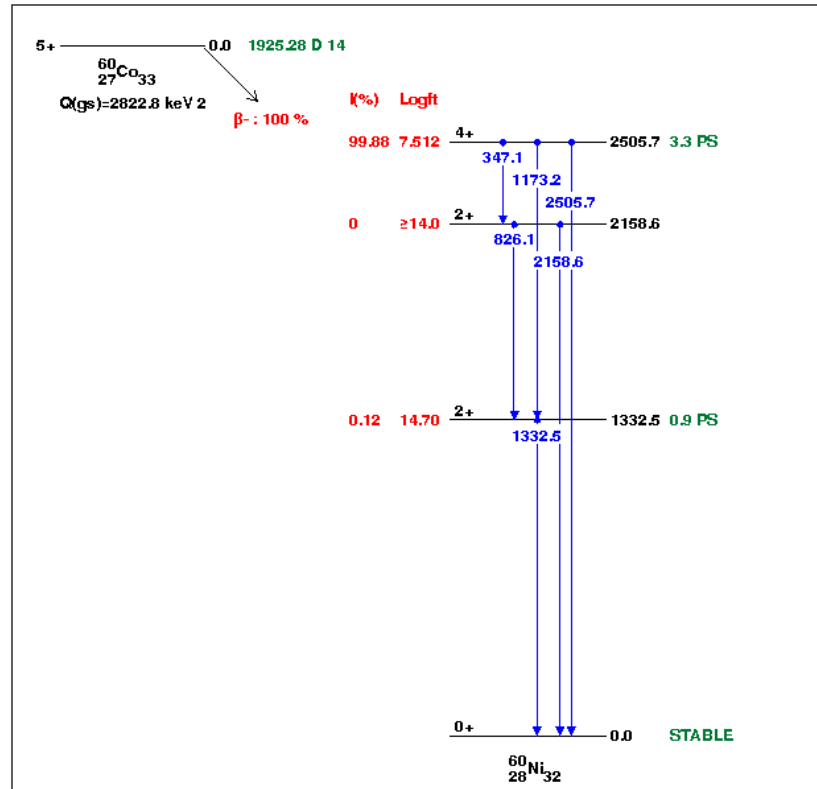


Figura 1.3.5

Lo stato eccitato 4^+ si diseccita poi nello stato 2^+ emettendo un fotone di energia di 1173.2 keV. A sua volta lo stato 2^+ si diseccita nello stato fondamentale emettendo un fotone di energia di 1332.5 keV [1.3.5]. Lo spettro energetico presenta quindi due picchi, come si può vedere nella seguente figura.

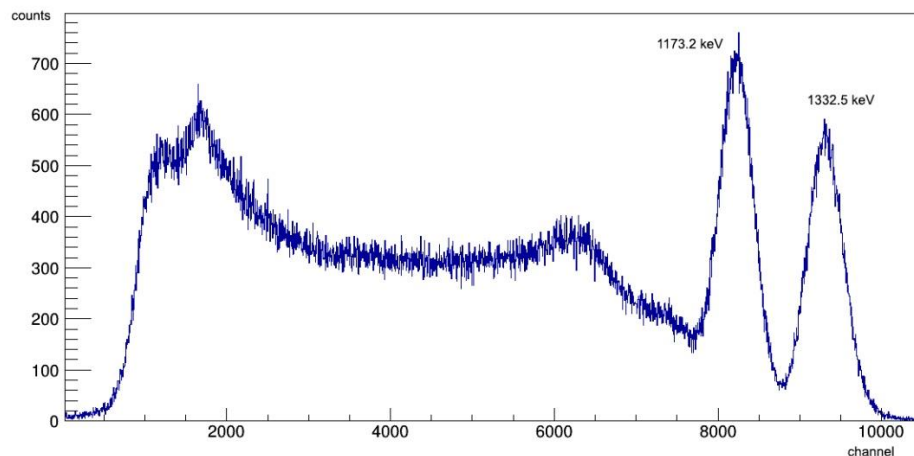


Figura 1.3.6

1.3.2. Interazione dei fotoni con la materia.

Il densimetro Q-Gamma, per misurare la densità del fluido nella condotta, sfrutta il principio fisico per cui l'assorbimento di raggi gamma da parte del fluido dipende dalla sua densità e della natura stessa della sostanza che compone il fluido.

I raggi gamma, interagendo con la materia, possono essere completamente assorbiti, tramite "effetto fotoelettrico" o tramite "produzione di coppia", oppure possono essere assorbiti e riemessi con direzioni differenti ed energia inferiore, tramite "scattering Compton"[1.3.6].

Come già detto, le principali sostanze che attraversano la condotta durante l'estrazione sono aria, petrolio e acqua. Esse sono composte principalmente da atomi di idrogeno, ossigeno e carbonio, caratterizzati da un basso numero atomico (rispettivamente $Z = 1$, $Z = 8$ e $Z = 14$). Dalla figura 1.3.7 si evince che in tale condizione, per il range d'energia studiato, il principale effetto d'interazione dei gamma con la materia è lo scattering Compton, seguito dalla produzione di coppie per le misurazioni alle energie più elevate.

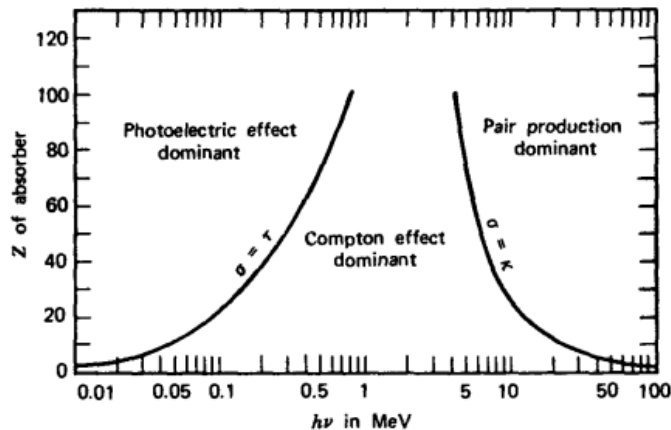


Figura 1.3.7

Legge di assorbimento

L'equazione dell'attenuazione dell'intensità di un fascio di raggi gamma a causa di uno spessore di massa x di un materiale con densità ρ e coefficiente d'assorbimento di massa μ è la seguente:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot x}$$

Dove I_0 è l'intensità in assenza del mezzo e I è, invece, quella in presenza del mezzo [1.3.7].

Nel caso particolare del Q-Gamma, la stessa relazione è espressa in funzione del numero di conteggi fornito dal rivelatore in un dato intervallo di tempo, con e senza fluido nella condotta [1.3.8].

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot x}$$

Dove N_0 è il numero di conteggi in assenza del fluido e N è, invece, quello in presenza del fluido. N_0 è ricavato tramite una misurazione di calibrazione, mentre x è dato dalla geometria del Q-Gamma e μ dalla letteratura.

La stima della densità è quindi data dalla formula inversa

$$\rho = -\frac{1}{\mu \cdot x} \cdot \ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$$

L'incertezza sulla densità è quindi

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{N_0}{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)} \cdot \frac{dN}{N}$$

1.4. Obiettivi

Lo scopo di questa tesi è lo studio e la caratterizzazione dello spettro di energia come rivelato dal detector del misuratore Q-Gamma. In particolare:

- Confronto dello spettro in presenza di acqua, olio motore e aria.
- Valutare i vantaggi e gli svantaggi nell'utilizzo di una o più sorgenti alternative al ^{137}Cs per un'analisi di assorbimento differenziale tra raggi gamma di energie differenti.

Capitolo 2

Setup sperimentale

Le sorgenti radioattive utilizzate in questa esperienza sono di proprietà dell'Università degli Studi di Padova e possiedono un'attività molto bassa (circa 10^3 volte inferiore alla sorgente impiegata nel Q-Gamma), pertanto l'intensità dei raggi gamma non è sufficiente a penetrare le condotte in acciaio del setup del misuratore della PF. È stata quindi costruita un'apposita struttura in plastica per mantenere in posizione il detector, con tubi in PVC a tenuta stagna per simulare la condotta. I fluidi impiegati sono, invece, acqua di rubinetto, olio motore e aria.

2.1 Hardware

La parte hardware è composta dalla struttura in plastica necessaria a mantenere in posizione il rivelatore e i tubi in PVC, dalla sorgente con un collimatore in piombo, necessario ad indirizzare il fascio verso il rivelatore, da un modulo per l'alimentazione ad alto voltaggio dei PMT dei detector e un modulo per l'acquisizione dei segnali in uscita dal PMT.

Lo schema a blocchi rappresentativo dell'elettronica è riportato nella figura seguente.

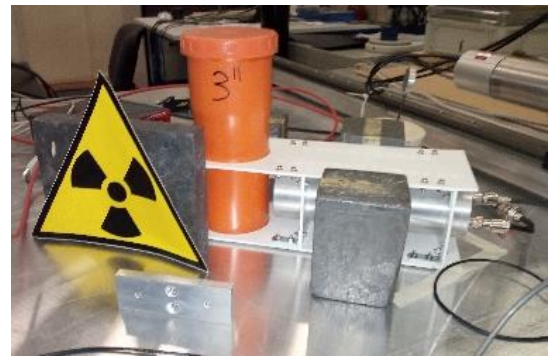
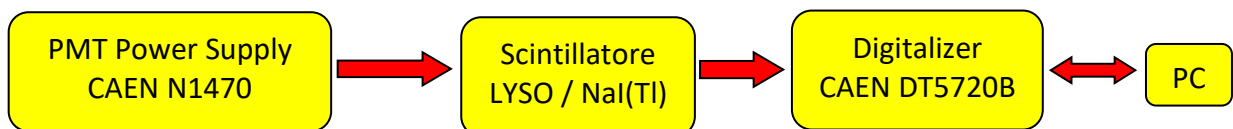


Figura 2.1.1



In particolare, il setup è costituito da:

Chassis

- Tubi in PVC da 3" e 2" di diametro esterno con spessore di 3 mm (figura 2.1.2).
- Supporto per scintillatore e condotta.
- Guida in PVC per l'allineamento del tubo da 2" quando viene inserito nel tubo da 3".
- Adattatori per l'inserimento dei tubi da 2" nel supporto.
- Spessore di 10 mm per definire la distanza condotta-detector.
- Collimatore in piombo da 20 mm di diametro e 75 mm di lunghezza.

Elettronica

- Alimentatore per il PMT, marca: CAEN, modello: N1470.
- Digitalizer CAEN a 12 bit, 250 MS/s, modello DT5720B.

Scintillatori e fotomoltiplicatori

- PMT, marca: Hamamatsu, modello: R4607A-06.
- Scintillatore NaI(Tl), marca: Scionix Holland, modello: SN-S2AA5244.
- Scintillatore LYSO, marca: Proteus, modello: SN-121817,

entrambi da 2", con fotomoltiplicatore incorporato e assemblati dalla Scionix Holland (figura 2.1.8).

Sorgenti

- ^{137}Cs (P.O. 2) da 1318 kBq (agg. Ott. 2017),
- ^{60}Co (P.O. 143) da 304,8 kBq (agg. Ott. 2017),
- ^{22}Na (P.O. 144) da 270,6 kBq (agg. Ott. 2017).

Supporto per scintillatore e condotta

Il supporto presenta due fori guida (da 50 mm di diametro) per la tubazione, necessari a mantenere il tubo stesso in verticale e perfettamente ortogonale al sensore, e due guide verticali che mantengono in posizione lo scintillatore lasciandolo libero di scorrere in modo da posizionarlo sempre alla stessa distanza di 10 mm dal tubo tramite l'apposito spessore da inserire tra scintillatore e tubazione (figura 2.1.3 e figura 2.1.4)



Figura 2.1.2

Guida di allineamento coassiale per il tubo da 2"

Una guida in PVC permette di mantenere il tubo da 2" coassiale al tubo da 3" quando il primo è inserito in quest'ultimo, come si vede in figura 2.1.5

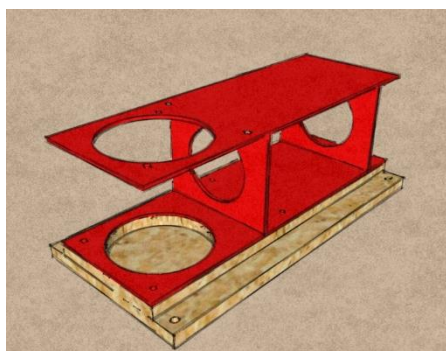


Figura 2.1.3

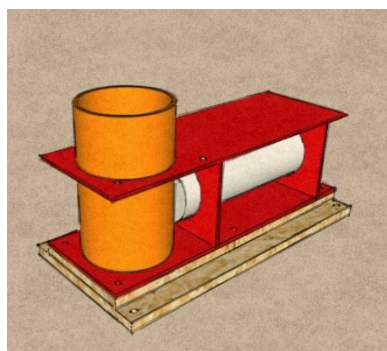


Figura 2.1.4



Figura 2.1.5

CAEN Power Supply Module

Alimentatore HV, modello N1470 (figura 2.1.6), necessario per l'alimentazione dei PMT dei due scintillatori. Le tensioni utilizzate nel nostro setup sono:

- 1300 V (negativi) per lo scintillatore LYSO.
- 1500 V (negativi) per lo scintillatore NaI(Tl).

CAEN Desktop Digitalizer

Digitizer a 12 bit, modello DT5720B (figura 2.1.7), con frequenza di campionamento di 250 MS/s, firmware DPP-PSD per l'integrazione dei segnali di carica in tempo reale nell'FPGA embedded. Nel setup impiegato, il digitizer riceve in ingresso il segnale proveniente direttamente dallo scintillatore.



Figura 2.1.6



Figura 2.1.7



Figura 2.1.8

2.2 Software

I segnali in tensione prodotti dal fotomoltiplicatore sono negativi e dell'ordine delle decine di mV. In figura 2.2.1 si riporta un esempio di segnale rilevato in ingresso del digitalizer. Il software di controllo del digitalizer permette di integrare tali segnali, ottenendo un valore corrispondente alla carica accumulata sull'anodo del fotomoltiplicatore, che è proporzionale all'energia che il fotone ha rilasciato nello scintillatore. I parametri fondamentali per l'analisi di questi segnali sono la tensione di soglia e l'intervallo d'integrazione.

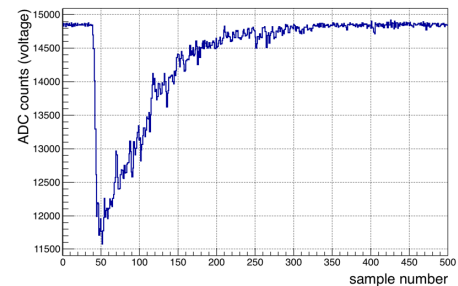


Figura 2.2.1

Tensione di soglia

Il fotomoltiplicatore converte il segnale luminoso dei fotoni che hanno interagito con lo scintillatore in un segnale in corrente (negativo): più è intenso il segnale luminoso più è grande il segnale, che in seguito, convertito in tensione, viene inviato all'ingresso del digitalizer che li converte in canali grazie ad un convertitore analogico-digitale (ADC) a 12 bit. Dal momento che il range in tensione accettato in ingresso dal modulo CAEN è di 2 V, ad ogni canale corrisponde una tensione di

$$\frac{2V}{4096} = 0,5 \text{ mV}$$

Quindi, ad ogni unità di threshold corrisponde una tensione di 0,5 mV, dove con il termine "threshold" si è indicato la soglia in tensione sotto la quale i segnali non vengono processati dal digitalizer.

Andando ad agire su tale parametro si ha quindi la duplice funzionalità di separare i segnali, di un'effettiva interazione dei raggi gamma con lo scintillatore, dal rumore elettrico e limitare il numero di segnali che il digitalizer deve processare, evitando così che i suoi buffer si riempiano causando un malfunzionamento del modulo con la conseguente perdita di dati.

Il valore di threshold impostato per le misurazioni è di 10, corrispondente a 5 mV.

Intervallo d'integrazione

I segnali che hanno una tensione superiore al valore di soglia sono quindi integrati in un intervallo impostato pari a 100 divisioni temporali, ovvero 400 ns, per le misure con lo scintillatore NaI e 80 per lo scintillatore LYSO, avendo questi tempi di risposta più veloci. L'istante in cui d'inizio integrazione è stato impostato a 10 divisioni temporali precedenti al segnale di trigger, fissato a 50 divisioni temporali.

2.3 Misurazioni

2.3.1 Configurazioni impiegate

Le misurazioni sono state suddivise in due set in base allo scintillatore impiegato (NaI o LYSO). Il primo set è composto dalle misurazioni eseguite con lo scintillatore NaI ed è suddiviso in tre campioni, uno per ciascuna sorgente radioattiva utilizzata (^{22}Na , ^{137}Cs e ^{60}Co). Il secondo set è costituito, invece, dalle misurazioni fatte con lo scintillatore LYSO ed è formato dal solo campione con la sorgente di sodio. Ciascun campione è composto poi da nove misurazioni (ad eccezione del campione del sodio misurato con lo scintillatore NaI) che si distinguono in base alla configurazione di tubi e fluidi utilizzati, più una misurazione del fondo, acquisita in assenza di sorgente e indicata con "background". I fluidi impiegati sono tre: acqua di rubinetto, olio motore e aria, rispettivamente indicati con le lettere W, O, V.

Data la possibilità di inserire il tubo da 2" all'interno del tubo da 3", verrà usata la seguente notazione:

- **3X + 2Y**: per le misure con il tubo da 2", riempito dal fluido X, inserito nel tubo da 3" a sua volta riempito con il fluido Y.
- **3X**: per le misure con il solo tubo da 3" riempito con il fluido X.

Di tutte le possibili combinazioni sono state escluse, essendo poco rilevanti, quelle che possiedono la stessa combinazione ma in ordine opposto (es: 3V + 2O e 3O + 2V) e quelle con singolo tubo da 2".

2.3.2 Procedura

Per l'operazione di misurazione si è per prima cosa collocato lo scintillatore all'interno dell'apposito supporto e successivamente si è collegato lo scintillatore stesso ai moduli d'alimentazione e di lettura del segnale. A questo punto si è portata gradualmente la tensione d'alimentazione del PMT al valore desiderato (-1500 V per le misure con l'NaI, -1300 V per le misure con il LYSO). È stata quindi posizionata la sorgente con il proprio collimatore in piombo frontalmente allo scintillatore. Si è poi inserito il tubo da 3" e riposizionato lo scintillatore ad una distanza di 10 mm dal tubo stesso, grazie ad un apposito spessore poi rimosso. Si sono quindi prese le varie misurazioni, della durata di 300 s circa ciascuna, cambiando di volta in volta il tubo e quindi la relativa configurazione di fluidi esaminata.

2.3.3 Sommario misure

Tutte le misurazioni eseguite sono riportate nella tabella seguente, in cui vengono riportati anche le durate delle acquisizioni, il numero di eventi rilevati dal fotomoltiplicatore e il relativo rate medio.

Scintillatore	Sorgente	Configurazione	Durata Acquisizione s	Num. Eventi	Rate Medio s ⁻¹
NaI (1500 V)	²² Na	Background	300.7	72 896	242.4
		3V	300.4	895 104	2 980.1
		3V + 2V	300.6	882 944	2 937.7
		3V + 2W	300.3	703 616	2 342.7
		3V + 2O	300.2	705 024	2 348.3
		3W	300.2	623 104	2 075.6
		3W + 2V	301.1	793 600	2 635.6
		3W + 2W	300.3	623 296	2 075.8
		3W + 2O	300.7	633 088	2 105.7
		3O	300.2	653 824	2 178.0
		3O + 2O	300.8	645 376	2 145.7
	¹³⁷ Cs	Background	300.6	68 224	226.9
		3V	301.1	1 560 000	5 181.7
		3V + 2V	300.1	1 501 632	5 003.6
		3V + 2W	300.1	1 167 168	3 889.2
		3V + 2O	300.9	1 199 872	3 988.0
		3W	302.4	1 033 984	3 419.1
		3W + 2W	299.3	1 025 600	3 426.1
		3W + 2O	300.7	1 044 352	3 472.7
		3O	301.0	1 086 080	3 608.5
		3O + 2O	301.1	1 070 208	3 554.7
	⁶⁰ Co	Background	300.0	68 654	246.1
		3V	300.2	792 000	2 638.3
		3V + 2V	300.9	782 272	2 599.5
		3V + 2W	300.3	665 472	2 216.3
		3V + 2O	300.4	673 920	2 243.5
		3W	300.5	627 520	2 088.6
		3W + 2W	301.8	629 696	2 086.4
		3W + 2O	300.3	639 808	2 130.7
3O		300.9	642 624	2 135.7	
3O + 2O		300.5	641 728	2 135.9	
LYSO (1300 V)	²² Na	Background	300.5	7 712 448	25 661.2
		3V	300.6	8 748 288	29 101.0
		3V + 2V	300.5	8 706 880	28 973.9
		3V + 2W	300.6	8 483 968	28 224.2
		3V + 2O	300.3	8 479 104	28 235.1
		3W	300.6	8 387 968	27 907.8
		3W + 2W	300.2	8 383 808	27 930.4
		3W + 2O	300.6	8 396 800	27 931.7
		3O	300.1	8 412 096	28 027.6
		3O + 2O	300.4	8 404 352	27 976.1

Capitolo 3

Analisi dati

La prima parte dell'analisi è consistita nella caratterizzazione della risposta del sensore per i fotoni (ovvero il sistema detector-PMT).

3.1 Analisi del guadagno del PMT in funzione del rate

Al fine di valutare la dipendenza del guadagno del PMT dal rate d'acquisizione, si è eseguito la misurazione dello spettro energetico della sorgente di ^{137}Cs con la sorgente posizionata a distanze differenti dal rivelatore (NaI alimentato a -1500 V). Avvicinando la sorgente, il rate per ciascun canale aumenta e il picco si sposta ad energie maggiori.

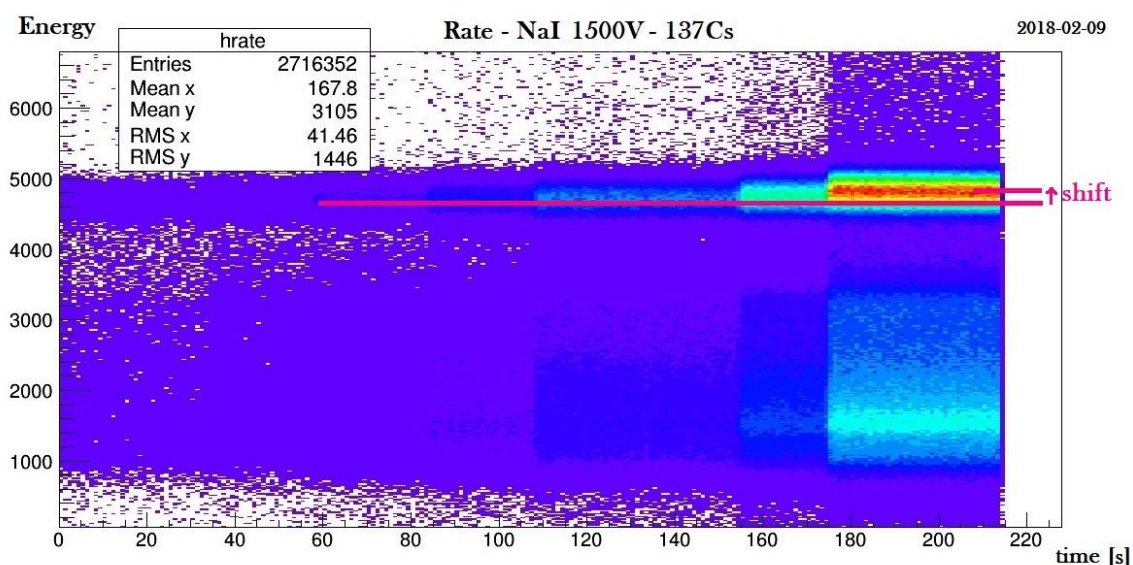


Figura 3.1.1

Facendo la proiezione del grafico precedente lungo l'asse del tempo, si possono osservare gli scalini dei vari step di avvicinamento della sorgente allo scintillatore e il relativo rate dei conteggi:

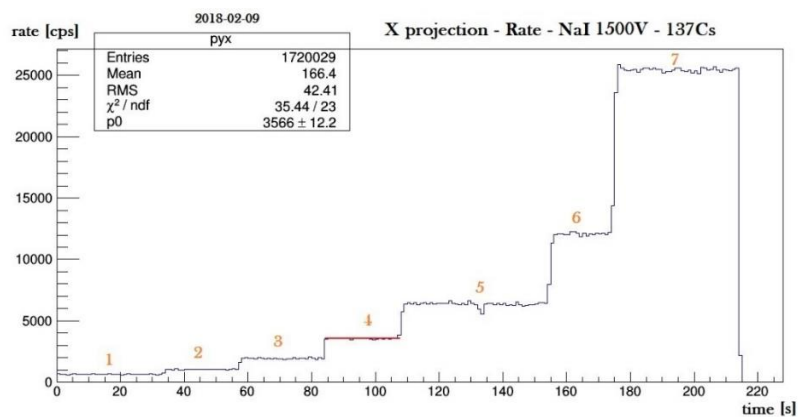


Figura 3.1.2

Eseguendo, invece, una proiezione lungo l'asse delle energie, si ottiene la distribuzione dei conteggi nell'intervallo temporale scelto. Per esempio, facendo la proiezione lungo y dello **step 4**, si ottiene:

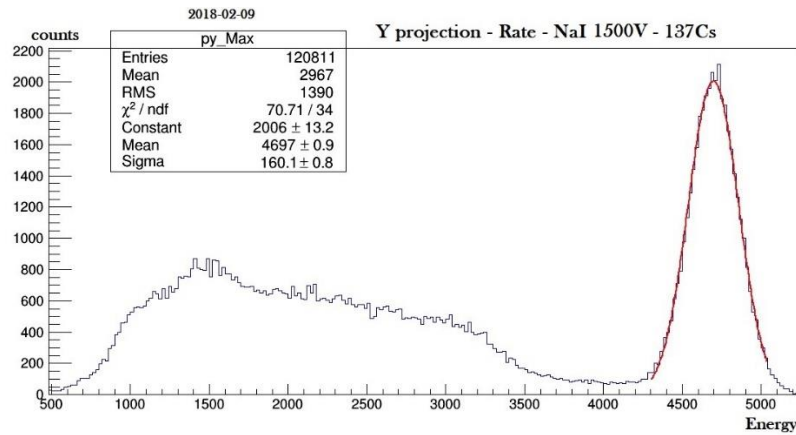


Figura 3.1.3

Andando a rappresentare i centroidi del picco dei 662 keV del ^{137}Cs per ogni step, in funzione del relativo rate (ricavato da un fit lineare), si può osservare lo spostamento del canale corrispondente a tale picco in funzione del rate.

Step	Rate s^{-1}	Centroide picco 662 keV
1	642.6 ± 4.5	4671 ± 2
2	1 019 ± 6.7	4681 ± 1.8
3	1 871 ± 8.2	4688 ± 1.4
4	3 566 ± 12.2	4697 ± 0.9
5	6 357 ± 12	4712 ± 0.5
6	1 2050 ± 25.9	4742 ± 0.5
7	25 450 ± 25.9	4807 ± 0.3

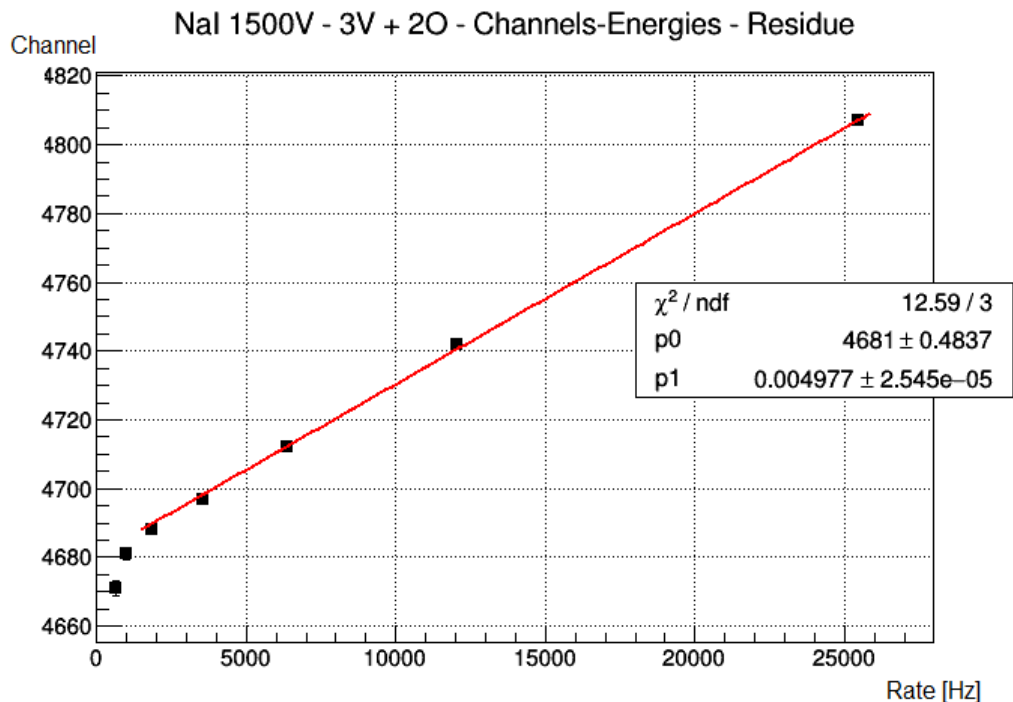


Figura 3.1.4

Tale spostamento mostra come il guadagno del PMT vari al variare del rate dei fotoni che colpiscono lo scintillatore. In particolare, l'ultimo grafico mostra che tale fattore di guadagno, nella zona a più alto rate dove sarà poi impiegato il setup, aumenta proporzionalmente con il rate con un tasso di circa + 0.5 %.

Ad esempio, la differenza tra i rate delle misurazioni delle configurazioni 3V e 3V + 2W, per la sorgente ^{137}Cs , è di circa 1293 Hz. In base al tasso di guadagno dello 0.5% trovato, ci si aspetta uno spostamento, del picco dei 662 keV dello spettro della sorgente meno densa (3V), di circa 6.4 canali nel verso crescente dell'asse dei canali. Andando a fare le differenze tra i centroidi dei picchi per le due configurazioni, si trova effettivamente uno spostamento del picco della configurazione 3V in tale direzione, ma l'entità di tale spostamento è molto maggiore dei 6.4 canali previsti. Questo indica che la sola differenza di rate tra le varie misurazioni non è sufficiente a spiegare lo spostamento dei fotopicchi, ma entrano in gioco fattori sulla geometria del setup che saranno discussi nei paragrafi successivi.

Detector	Sorgente	Config.	Centroide	Rate s^{-1}
NaI (1500 V)	^{137}Cs	3V	$4\,722.3 \pm 0.3$	$5\,181.7 \pm 4.2$
		3V + 2W	$4\,707.5 \pm 0.4$	$3\,889.2 \pm 3.6$
Diff:			14.8 ± 0.5	$1\,292.5 \pm 5.5$

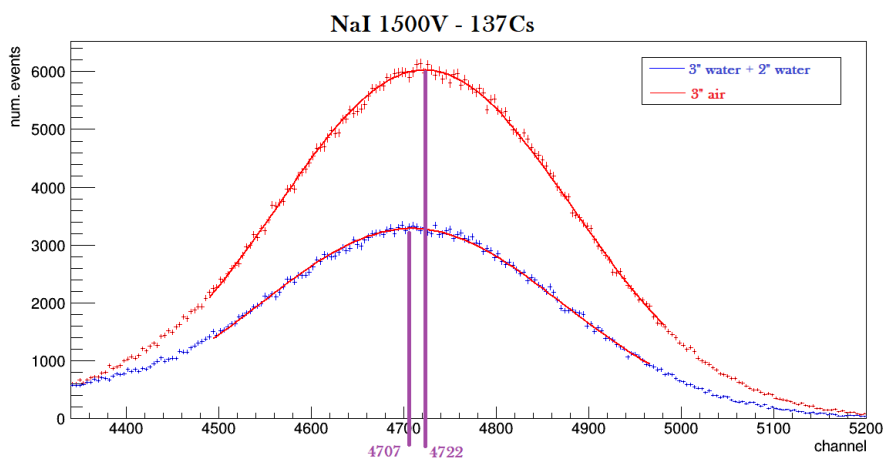


Figura 3.1.5

3.2 Verifica del rate reale d'acquisizione dati

Come visto nel paragrafo precedente, le misure devono essere normalizzate rispetto al rate, onde evitare spostamenti dei picchi d'energia, ed è quindi necessario conoscere tale valore. Dal momento che il rate reale d'acquisizione dati può differire dal rate indicato dal software di controllo del digitalizer, qualora la capacità di eventi superasse la frequenza massima d'acquisizione del digitalizer dovuta al limite nella banda di trasferimento dei dati attraverso l'interfaccia USB 2.0 (esempio in figura 3.2.1), si è calcolato il rate reale medio d'acquisizione per ciascuna misurazione. La procedura utilizzata è la seguente.

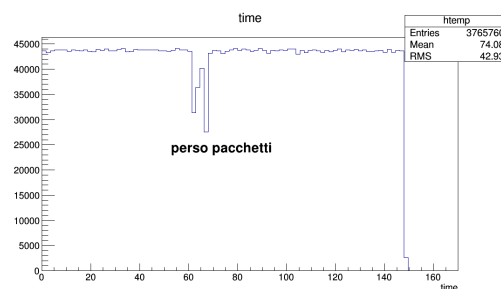


Figura 3.2.1

Per prima cosa si è calcolato il valor medio reale del rate con cui vengono acquisiti i dati tramite un fit lineare del grafico rate-tempo in regioni in cui non c'è stata perdita di pacchetti di dati (in figura 3.2.1 si riporta, come esempio, il grafico rate-tempo per la configurazione 3V per il ^{22}Na misurata con il detector LYSO). Si è quindi calcolato il numero di conteggi totali moltiplicando il rate reale per il tempo d'acquisizione. L'errore sul numero di conteggi è stato preso pari alla radice del numero di conteggi stesso, considerando Poissoniana la loro distribuzione, mentre il tempo d'acquisizione è stato considerato privo di errore. Si è poi determinato il fattore di riscaldamento, f , dividendo il numero totale di eventi realmente contati per il numero di entrate del grafico rate-tempo. I fattori f trovati per la configurazione 3V per il ^{22}Na misurato con il detector LYSO, ad esempio, sono:

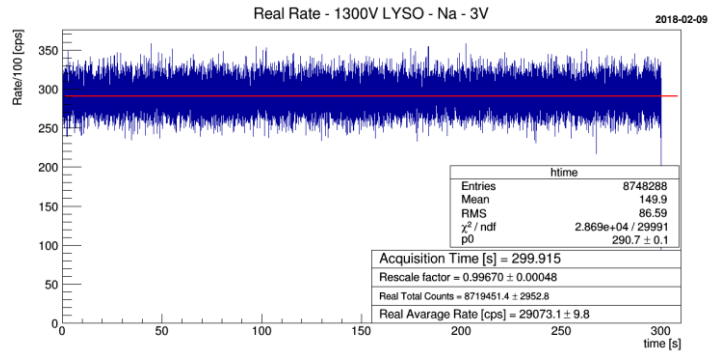


Figura 3.2.2

- 0.99621 ± 0.00051 per il fondo
- 0.99670 ± 0.00048 per l'acquisizione con sorgente

I valori sono praticamente prossimi all'unità, segno che, in questo esempio, non ci sono state perdite di dati rilevanti. Tale correzione è necessaria soprattutto nelle misure con lo scintillatore LYSO che, a causa dell'elevata attività radioattiva interna, presenta un elevato rate di conteggi anche in assenza della sorgente.

Per le misure con lo scintillatore NaI, per il quale i conteggi rilevati sono molto minori rispetto allo scintillatore LYSO, data l'assenza di attività radioattiva intrinseca, si è considerate il rate d'acquisizione come rate reale.

3.3 Verifica della linearità della risposta in energia

Per la verifica della linearità della relazione tra canali ed energie si riportano, per la stessa configurazione 3V + 2V acquisita con il rivelatore NaI, i canali dei fotopicchi e le relative energie nominali. Per tenere in considerazione l'aumento del guadagno del PMT al variare del rate, ai canali dei fotopicchi è stato sommato lo spostamento, *Shift*, dovuto al diverso rate d'acquisizione rispetto alla misurazione con la sorgente ^{137}Cs . Tale spostamento è stato calcolato come:

$$Shift = (Rate_{661.7 \text{ keV}} - Rate_i) \cdot G$$

Dove G è il coefficiente di valore $(0.4977 \pm 0.0025) \%$ calcolato al paragrafo 3.1.

Detector	Config.	Canale	Energie nominali keV
NaI (1500 V)	3V + 2V	3668.25 ± 0.44	511.0
		4715.14 ± 0.38	661.7
		8219.1 ± 1.1	1173.2
		8881.6 ± 1.6	1274.5
		9308.4 ± 1.4	1332.5

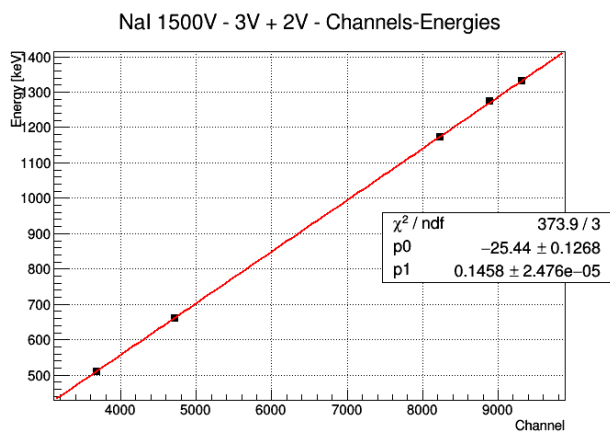


Figura 3.3.1

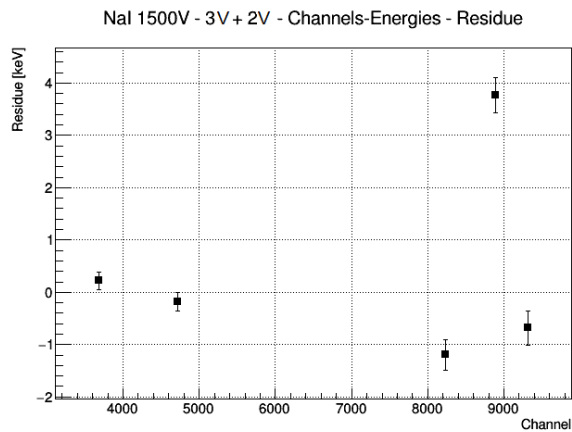


Figura 3.3.2

Il comportamento dello scintillatore NaI(Tl) nel range di energie utilizzate appare sufficientemente lineare, ad eccezione del del picco a 11275 keV del ^{22}Na che presenta una distanza significativa dalla posizione aspettata.

3.4 Risoluzione in energia

La risoluzione in energia di un detector indica la bontà con cui tale detector è in grado di distinguere fotoni gamma con energie simili. La risoluzione, R , è definita come l'intera larghezza a metà altezza, $FWHM(E)$, del picco energetico in esame. È più comunemente espressa in percentuale come rapporto tra la $FWHM(E)$ e l'energia stessa, E [3.4.1].

$$R = \frac{FWHM(E)}{E}$$

Il cui errore è dato dalla relazione:

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{1}{E}\right)^2 \cdot \sigma_{FWHM(E)}^2 + \left(\frac{FWHM(E)}{E^2}\right)^2 \cdot \sigma_E^2}$$

Dove la $FWHM(E)$ è stata calcolata moltiplicando la $FWHM(Ch)$, data dai fit dei picchi degli spettri e quindi in funzione dei canali, per la costante di proporzionalità, p_1 , che lega l'energia al numero di canali (la derivazione di p_1 è riportata nel paragrafo 3.7).

$$FWHM(E) = FWHM(Ch) \cdot p_1$$

L'errore associato è il seguente:

$$\sigma_{FWHM(E)} = \sqrt{(p_1 \cdot \sigma_{FWHM(Ch)})^2 + (FWHM(Ch) \cdot \sigma_{p_1})^2}$$

Dal momento che il picco in energia contiene un numero sufficientemente elevato di eventi, la sua forma è gaussiana [3.4.2]. La larghezza a metà altezza, $FWHM(Ch)$, è quindi legata alla deviazione standard dalla relazione:

$$FWHM(Ch) = 2.35 \cdot \sigma$$

Per la configurazione 3V + 2O, ad esempio, le risoluzioni dei due rivelatori alle diverse energie sono riportate nelle tabelle seguenti.

Detector	Config.	p_1 keV	Energie nominali keV	Risoluzione %
NaI (1500 V)	3V + 2O	0.147647 ± 0.000034	511	9.909 ± 0.049
			661.7	8.475 ± 0.036
			1173.2	6.804 ± 0.046
			1274.5	5.991 ± 0.067
			1332.5	5.855 ± 0.057

Detector	Config.	p_1 keV	Energie nominali keV	Risoluzione %
LYSO (1300 V)	3V + 2O	0.73431 ± 0.00043	511	21.58 ± 0.15
			1274.5	11.77 ± 0.13

La risoluzione a 662 keV dichiarata dal costruttore del detector NaI è del 6.7% contro l'8.5% ricavato sperimentalmente. Tale variazione della risoluzione è dovuta principalmente al PMT e al setup geometrico della misura [3.4.3].

3.5 Calcolo delle energie dei picchi d'emissione.

3.5.1 Calibrazione in energia

Detector LYSO

Per le misurazioni con lo scintillatore LYSO, gli istogrammi delle energie sono stati prima riscaldati tramite il fattore f , definito al paragrafo 3.1 e poi normalizzati rispetto alla durata delle acquisizioni, a cui è stato poi sottratto il fondo (anche lui riscaldato per f e poi normalizzato rispetto alla durata dell'acquisizione) ottenendo il risultato di figura 3.5.1.

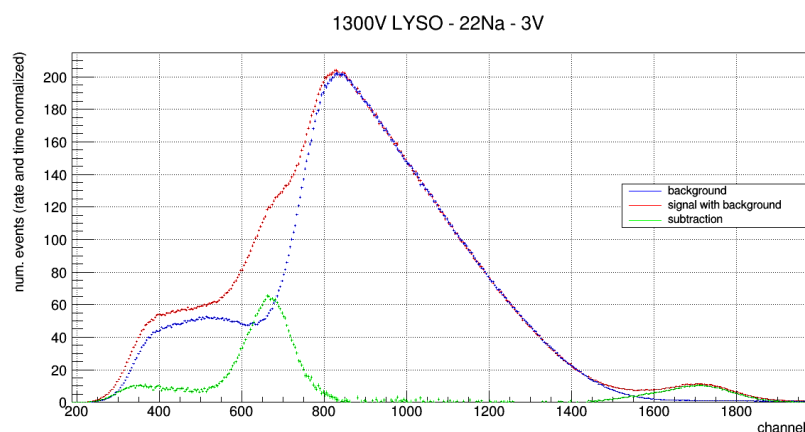


Figura 3.5.1

Come si vede chiaramente dalla figura 3.5.1, il fondo di radioattività intrinseca del LYSO è dominante nello spettro di energia rispetto al segnale della sorgente debole del laboratorio fino a circa 1 MeV. L'estrazione del segnale netto, in particolare il picco da 511 keV, è quindi soggetta a possibili consistenti incertezze sistematiche.

In figura 3.5.2 e 3.5.3 sono rappresentati rispettivamente i fit dei picchi dei 511 keV e 1275 keV del ^{22}Na per la configurazione 3V del LYSO.

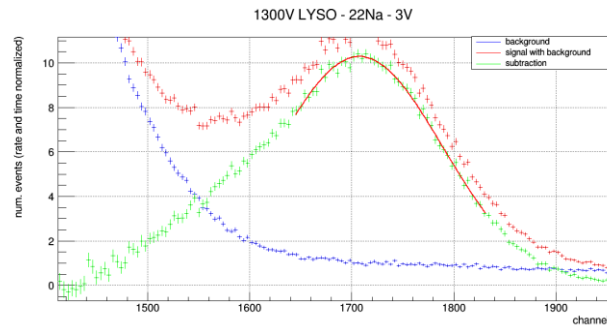


Figura 3.5.2

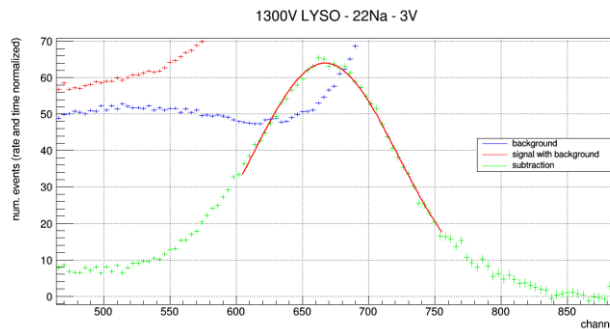


Figura 3.5.3

Nella tabella seguente sono riportati i valori dell'energia dei picchi (dati dalla letteratura) e il canale corrispondente dato dal fit.

	Energia keV	Centroide	
E_1	511	667.13 ± 0.24	Ch_1
E_2	1 274.537	$1 707.37 \pm 0.65$	Ch_2

Andando a fare il grafico di questi risultati e facendone poi un fit lineare, si ricavano i parametri riportati nella tabella seguente:

p_0 keV	21.33 ± 0.42
p_1 keV	0.73400 ± 0.00049

Detector NaI

Per l'analisi dei dati con lo scintillatore NaI, lo spettro del segnale di fondo, prima di essere sottratto al segnale con sorgente radioattiva attiva, è stato ogni volta riscaldato proporzionalmente alla durata dell'acquisizione con la sorgente attiva. Gli spettri sottratti così ottenuti sono stati elaborati alla stessa maniera degli spettri acquisiti con il LYSO, utilizzando come calibrazione la configurazione 3V con la sorgente ^{22}Na . I coefficienti trovati sono i seguenti

p_0 [keV]	$- 26.22 \pm 0.15$
p_1 [keV]	0.147647 ± 0.000034

3.5.2 Misure sulla stabilità del guadagno dei detector.

Nel paragrafo 3.1 si è trovato, sperimentalmente, che una variazione sul rate d'acquisizione comporta un spostamento nei canali. Tale spostamento è risultato essere, limitatamente al range di rate con cui sono state acquisite le misurazioni, proporzionale e con costante di proporzionalità, G , pari a 0.004977 ± 0.000025 . Ad un aumento unitario del rate, corrisponderà quindi un aumento del numero di canale di 0.004977. Per tenere in considerazione tale effetto, si sono calcolati gli spostamenti in canale, $Shift$, dovuti al diverso rate d'acquisizione delle varie configurazioni rispetto alla configurazione di calibrazione, 3V del ^{22}Na , tramite la seguente formula:

$$Shift = (Rate_{Conf. \ i-esima} - Rate_{Conf.3V}) \cdot G$$

Con un errore dato da:

$$\sigma_{Shift} = \sqrt{G^2 \cdot \sigma_{Rate_i}^2 + G^2 \cdot \sigma_{Rate_{3V}}^2 + (Rate_i - Rate_{3V})^2 \cdot \sigma_G^2}$$

Dove gli errori sui rate:

- Per le misurazioni tramite NaI, sono stati calcolati come il rapporto della radice del numero totale di eventi rilevati per il tempo d'acquisizione della misurazione.
- Per le misurazioni tramite LYSO: sono stati presi così come calcolati al paragrafo 3.2

I parametri p_0 e p_1 , calcolati nella calibrazione del paragrafo precedente, sono stati, quindi, utilizzati per convertire i canali dei centroidi dei picchi degli spettri in energia, tramite la formula:

$$E_p = p_1 \cdot (Ch_p + Shift) + p_0$$

Con un errore dato da:

$$\sigma_{E_p} = \sqrt{p_1^2 \cdot \sigma_{Ch_p}^2 + (Ch_p + Shift)^2 \cdot \sigma_{p_1}^2 + \sigma_{p_0}^2 + p_1^2 \cdot \sigma_{Shift}^2}$$

Dove σ_{Ch_p} è l'errore sul canale dato dal fit.

Le energie trovare, per ogni configurazione sono riportate nelle tabelle e grafici seguenti.

Detector	Config.		Energia	
			511 keV	1275 keV
LYSO (1300 V)	1	3V	510.75 ± 0.56	1274.0 ± 1.0
	2	3V + 2V	510.57 ± 0.57	1272.0 ± 1.1
	3	3V + 2W	507.95 ± 0.60	1268.8 ± 1.1
	4	3V + 2O	508.00 ± 0.59	1266.4 ± 1.1
	5	3W	505.86 ± 0.62	1268.9 ± 1.1
	6	3W + 2W	504.85 ± 0.62	1272.5 ± 1.1
	7	3W + 2O	509.22 ± 0.64	1263.2 ± 1.2
	8	3O	505.25 ± 0.61	1270.8 ± 1.1

	9	3O + 2O	509.10 ± 0.64	1262.5 ± 1.1
--	---	---------	---------------	--------------

Detector	Config.	Energia					
		511 keV	662 keV	1173 keV	1275 keV	1333 keV	
NaI (1500 V)	1	3V	511.00 ± 0.20	671.06 ± 0.22	1187.94 ± 0.38	1274.50 ± 0.38	1348.19 ± 0.40
	2	3V + 2V	515.33 ± 0.20	669.68 ± 0.22	1187.58 ± 0.38	1285.03 ± 0.41	1348.04 ± 0.41
	3	3V + 2W	513.94 ± 0.21	667.92 ± 0.23	1187.00 ± 0.41	1284.48 ± 0.42	1347.87 ± 0.42
	4	3V + 2O	513.50 ± 0.21	668.57 ± 0.23	1186.48 ± 0.41	1282.61 ± 0.43	1347.34 ± 0.42
	5	3W	513.16 ± 0.21	668.26 ± 0.23	1185.77 ± 0.43	1285.50 ± 0.43	1346.60 ± 0.43
	6	3W + 2W	513.54 ± 0.22	667.69 ± 0.23	1186.77 ± 0.42	1284.29 ± 0.45	1346.68 ± 0.43
	7	3W + 2O	513.66 ± 0.22	667.10 ± 0.23	1186.05 ± 0.43	1283.99 ± 0.44	1346.31 ± 0.42
	8	3O	514.24 ± 0.21	669.32 ± 0.23	1185.59 ± 0.42	1286.22 ± 0.44	1345.90 ± 0.42
	9	3O + 2O	511.16 ± 0.22	668.12 ± 0.23	1187.66 ± 0.42	1277.80 ± 0.47	1347.94 ± 0.43

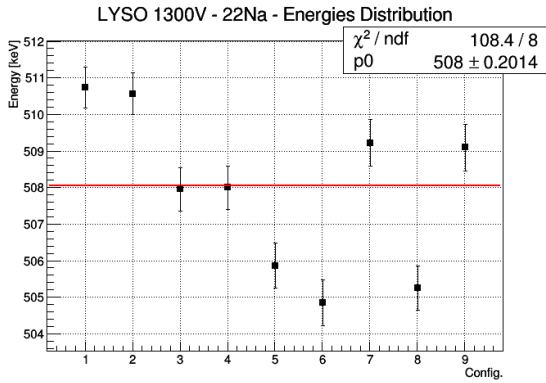


Figura 3.5.6

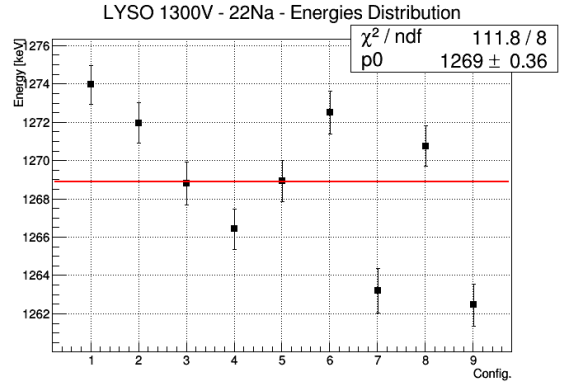


Figura 3.5.7

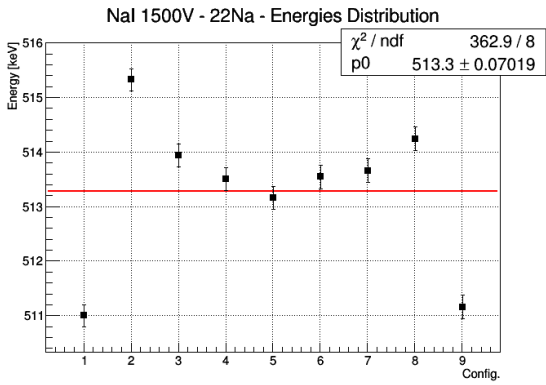


Figura 3.5.8

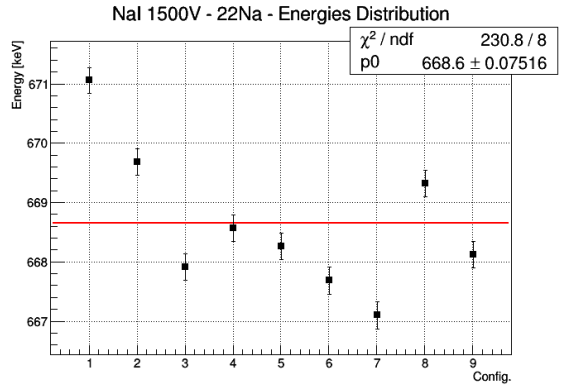


Figura 3.5.9

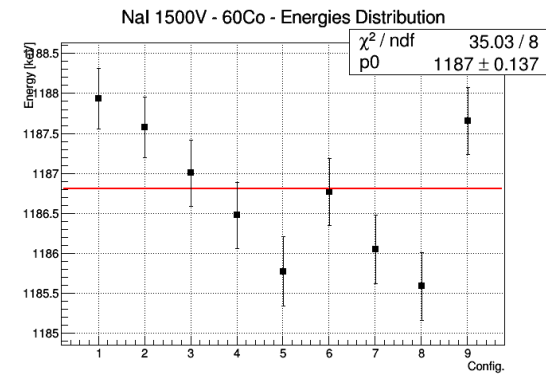


Figura 3.5.10

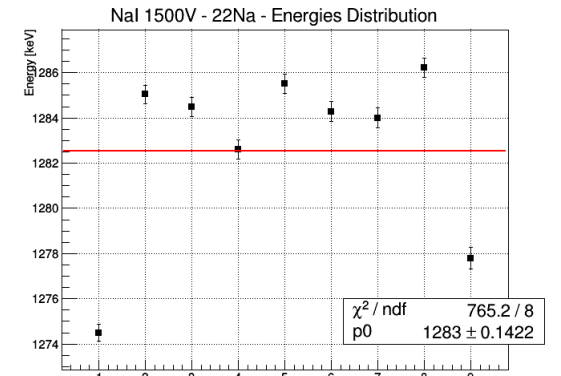


Figura 3.5.11

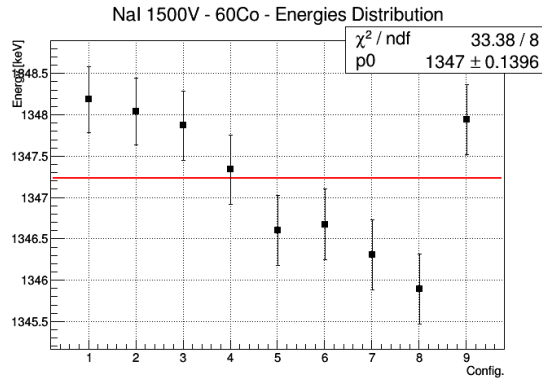


Figura 3.5.12

Nel grafico 3.5.8 si vede che le energie delle configurazioni 3V e 3O + 2O per il ^{22}Na sono molto distanti dagli altri valori. L'ipotesi più probabile a spiegazione di ciò è che la tensione di alimentazione del PMT abbia subito un calo anomalo durante l'acquisizione con queste due configurazioni.

3.6 Calcolo dell'intensità dei picchi di emissione

3.6.1 Detector NaI

Per il calcolo dell'intensità dei picchi, per esempio del ^{22}Na , si è proceduto nel modo seguente: si è calcolato lo spettro del solo segnale (linea verde nelle figure 3.6.1 e 3.6.2) come differenza tra gli spettri del segnale con fondo incluso (linea rossa nelle figure 3.6.1 e 3.6.2) e il segnale rilevato in assenza della sorgente radioattiva (linea blu nella figura 3.6.1). Il segnale risultante è stato quindi fittato con una funzione a 5 parametri liberi, composta dalla somma di un polinomio di primo grado e di una gaussiana. In questo modo è stato possibile eseguire il fit del solo fotopicco, escludendo il segnale di fondo, principalmente dovuto a raggi gamma di energie superiori che hanno interagito con effetto Compton con il cristallo dello scintillatore. In figura 3.6.2, a titolo d'esempio, si riporta (linea rossa) il fit così ottenuto per il picco dei 511 keV della sorgente ^{22}Na .

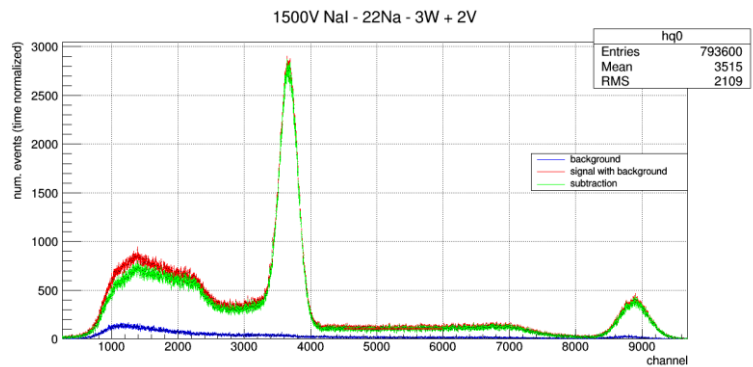


Figura 3.6.1

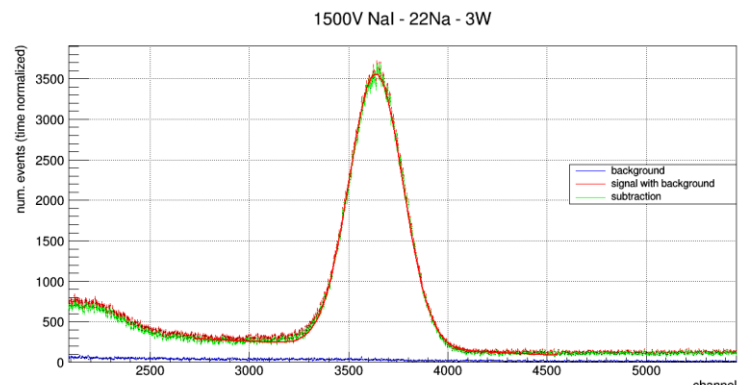


Figura 3.6.2

L'area della gaussiana è stata quindi considerata come l'intensità del fotopicco e calcolata con la seguente formula:

$$I_{picco} = c \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}$$

Dove c è l'ampiezza della gaussiana e σ la sua deviazione standard.

L'incertezza sull'intensità, essendo questa corrispondente al numero di conteggi rivelati per il fotopicco dei gamma, i quali possiedono statistica poissoniana, è stata presa pari alla radice dell'intensità stessa.

Tale procedimento è stato ripetuto per tutti i picchi di tutte le configurazioni ad eccezione del picco dei 1173 keV del ^{60}Co . Le intensità dei vari picchi energetici per ogni configurazione, sono riportate nelle seguenti tabelle.

Detector	Config.		$I_{picco} \cdot 10^5$			
			Picco 511 keV	Picco 662 keV	Picco 1275 keV	Picco 1333 keV
NaI (1500 V)	1	3V	2.8717 ± 0.0054	5.6935 ± 0.0076	0.5737 ± 0.0024	0.7212 ± 0.0027
	2	3W	1.4945 ± 0.0039	3.0840 ± 0.0056	0.3560 ± 0.0019	0.4589 ± 0.0021
	3	3O	1.6301 ± 0.0040	3.3261 ± 0.0058	0.3804 ± 0.0020	0.4858 ± 0.0022

Detector	Config.		$I_{picco} \cdot 10^5$			
			Picco 511 keV	Picco 662 keV	Picco 1275 keV	Picco 1333 keV
NaI (1500 V)	4	3V + 2V	2.7690 ± 0.0053	5.3867 ± 0.0073	0.5639 ± 0.0024	0.7009 ± 0.0027
	5	3V + 2W	1.9065 ± 0.0044	3.8288 ± 0.0062	0.4293 ± 0.0021	0.5444 ± 0.0023
	6	3V + 2O	1.9560 ± 0.0044	3.9660 ± 0.0063	0.4324 ± 0.0021	0.5416 ± 0.0023
	7	3W + 2W	1.4837 ± 0.0039	3.0469 ± 0.0055	0.3572 ± 0.0019	0.4516 ± 0.0021
	8	3W + 2O	1.5320 ± 0.0039	3.1240 ± 0.0056	0.3625 ± 0.0019	0.4724 ± 0.0022
	9	3O + 2O	1.5849 ± 0.0040	3.2300 ± 0.0057	0.3718 ± 0.0019	0.4785 ± 0.0022

Nella tabella seguente vengono riportate, per le configurazioni con il solo tubo da 3", le intensità normalizzate rispetto le rispettive intensità (I_0) delle configurazioni con il tubo vuoto (3V).

Detector	Config.		I/I_0			
			Picco 511 keV	Picco 662 keV	Picco 1275 keV	Picco 1333 keV
NaI (1500 V)	1	3V	1	1	1	1
	2	3W	0.5204 ± 0.0014	0.54168 ± 0.00098	0.6205 ± 0.0033	0.6363 ± 0.0030
	3	3O	0.5677 ± 0.0014	0.5842 ± 0.0010	0.6631 ± 0.0034	0.6736 ± 0.0031

Nella tabella seguente, invece, vengono riportate, per le configurazioni con entrambi i tubi inseriti, le intensità normalizzate rispetto le rispettive intensità (I_0) delle configurazioni con entrambi i tubi vuoti (3V + 2V).

Detector	Config.		I/I_0			
			Picco 511 keV	Picco 662 keV	Picco 1275 keV	Picco 1333 keV
NaI (1500 V)	4	3V + 2V	1	1	1	1
	5	3V + 2W	0.6885 ± 0.0016	0.7108 ± 0.0012	0.7612 ± 0.0037	0.7767 ± 0.0033
	6	3V + 2O	0.7064 ± 0.0016	0.7362 ± 0.0012	0.7668 ± 0.0037	0.7727 ± 0.0033
	7	3W + 2W	0.5358 ± 0.0014	0.5656 ± 0.0010	0.6334 ± 0.0034	0.6443 ± 0.0030
	8	3W + 2O	0.5533 ± 0.0014	0.5800 ± 0.0010	0.6428 ± 0.0034	0.6740 ± 0.0031
	9	3O + 2O	0.5724 ± 0.0014	0.6033 ± 0.0011	0.6594 ± 0.0034	0.6827 ± 0.0031

Si riportano quindi i grafici di tali rapporti per le varie configurazioni.

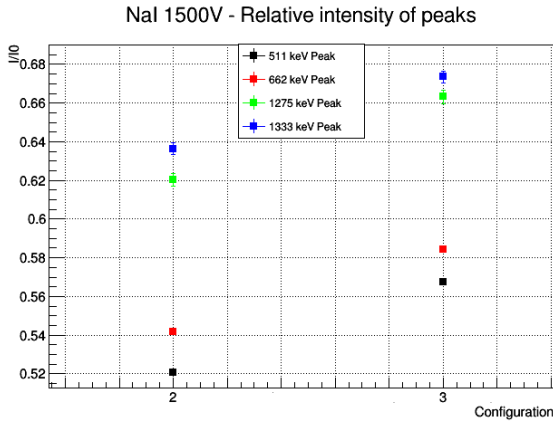


Figura 3.6.3

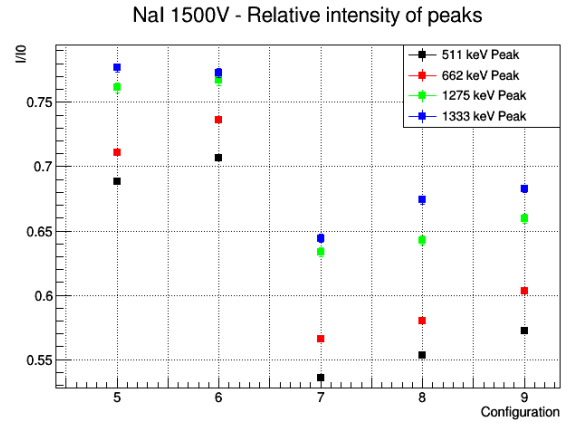


Figura 3.6.4

Una prima analisi qualitativa dei grafici 3.6.3 e 3.6.4 conferma, come atteso, il maggior assorbimento dei gamma di bassa energia rispetto a quelli di alta energia per tutte le configurazioni studiate.

3.6.2 Detector LYSO

Per le misurazioni con il detector LYSO si trovano, tramite la stessa analisi fatta per il detector NaI, le seguenti intensità dei picchi dello spettro del sodio

Detector	Config.		$I_{picco} \cdot 10^5$	
			Picco 511 keV	Picco 1275 keV
LYSO (1300 V)	1	3V	6.0772 ± 0.0078	1.7394 ± 0.0042
	2	3W	3.5177 ± 0.0059	1.1331 ± 0.0034
	3	3O	3.5329 ± 0.0059	1.1708 ± 0.0034

Detector	Config.		$I_{picco} \cdot 10^5$	
			Picco 511 keV	Picco 1275 keV
LYSO (1300 V)	4	3V + 2V	5.8322 ± 0.0076	1.6755 ± 0.0041
	5	3V + 2W	4.3912 ± 0.0066	1.3176 ± 0.0036
	6	3V + 2O	4.7136 ± 0.0069	1.3487 ± 0.0037
	7	3W + 2W	3.2409 ± 0.0057	1.1212 ± 0.0034
	8	3W + 2O	4.1629 ± 0.0065	1.1612 ± 0.0034
	9	3O + 2O	4.2895 ± 0.0066	1.2014 ± 0.0035

Le intensità relative, calcolate come per il detector NaI, sono riportate di seguito

Detector	Config.		I/I_0	
			Picco 511 keV	Picco 1275 keV
LYSO (1300 V)	1	3V	1	1
	2	3W	0.57884 ± 0.00098	0.6515 ± 0.0019
	3	3O	0.58134 ± 0.00098	0.6731 ± 0.0020

Detector	Config.		I/I_0	
			Picco 511 keV	Picco 1275 keV
LYSO (1300 V)	4	3V + 2V	1	1
	5	3V + 2W	0.7529 ± 0.0011	0.7864 ± 0.0022
	6	3V + 2O	0.8082 ± 0.0012	0.8049 ± 0.0022
	7	3W + 2W	0.5557 ± 0.0010	0.6691 ± 0.0020
	8	3W + 2O	0.7138 ± 0.0011	0.6930 ± 0.0020
	9	3O + 2O	0.7355 ± 0.0011	0.7170 ± 0.0021

Si riportano quindi i grafici di tali rapporti per le varie configurazioni

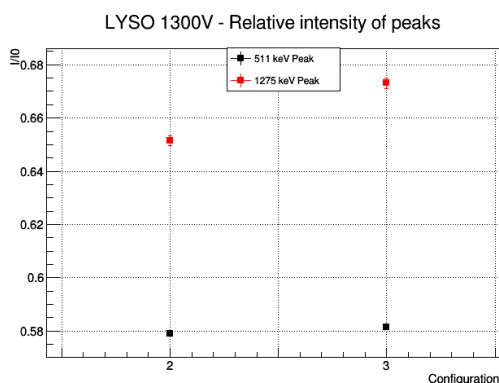


Figura 3.6.5

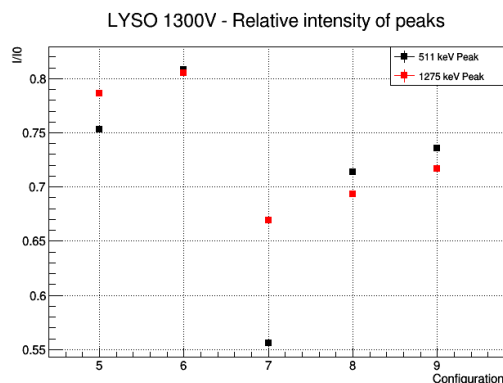


Figura 3.6.6

Anche in questo caso osserviamo il maggior assorbimento del gamma da 511 keV rispetto al gamma da 1275 keV.

3.7 Verifica dell'approssimazione sulla geometria dell'apparato

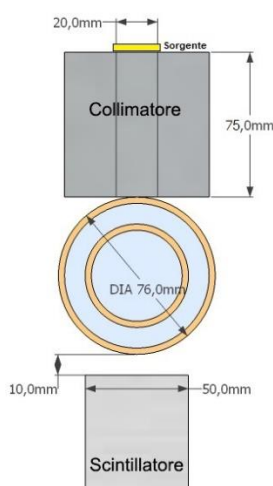


Figura 3.7.1

Nell'analisi dati si è approssimata la geometria del setup a quella di una sorgente puntiforme che emette fascio di fotoni lungo una sola direzione, il quale incontra spessori rettangolari di materiali diversi. Si è quindi trascurata la forma cilindrica dei mezzi interposti e l'angolo di emissione della sorgente. Per verificare la bontà di tale approssimazione, si è stimato lo spessore efficace x , per la configurazione 3W, prima in modo diretto e successivamente come somma degli spessori di massa delle configurazioni 3V + 2W e 3V + 2V.

L'equazione che dell'attenuazione dell'intensità di un fascio di raggi gamma a causa di uno spessore di massa x di un materiale con densità ρ e coefficiente d'assorbimento di massa μ è la seguente [3.7.1]:

$$x = -\frac{1}{\rho \cdot \mu} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Dove le intensità sono calcolate come descritto nel paragrafo precedente. I coefficienti ρ e μ sono stati considerati privi di errore, mentre l'incertezza sulle intensità sono state trattate con statistica Poissoniana e prese, quindi, come la radice dell'intensità stessa. In particolare, l'incertezza di I_0 , grandezza comune per tutte le misurazioni, è stata considerata come errore sistematico e trattato di conseguenza.

Per il calcolo **indiretto** dello spessore di massa:

- I è l'intensità dei picchi per la configurazione 3W + 2V (e per 3V + 2W).
- I_0 è l'intensità dei picchi per la configurazione a vuoto 3V + 2V.

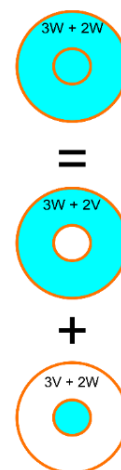


Figura 3.7.2

Mentre per il calcolo **diretto** dello spessore di massa:

- I è l'intensità dei picchi per la configurazione 3W + 2W.
- I_0 è l'intensità dei picchi per la configurazione a vuoto 3V + 2V.

Il mezzo che determina la variazione di assorbimento tra le varie configurazioni è, in questo caso, l'acqua. Il cui rapporto μ/ρ alle energie dei picchi del ^{22}Na è calcolato come

$$\mu/\rho = E_p \cdot p_1 + p_0$$

Dove

- con E_p l'energia teorica del picco del ^{22}Na in esame.
- p_0 e p_1 sono i parametri del fit lineare costruito partendo dai valori di μ/ρ riportati nel database del NIST per la prima energia inferiore e la prima energia superiore all'energia del picco del ^{22}Na .

	Energia			
	511 keV	662 keV	1275 keV	1333 keV
ρ g/cm ³	1.000			
p_0 cm ² /g	0.13342	0.1223	0.09168	0.09168
p_1 cm ² /(g·MeV)	- 0.0731	- 0.05455	- 0.02276	- 0.02276
μ/ρ cm ² /g	0.0960659	0.0861779	0.0626724	0.0613409

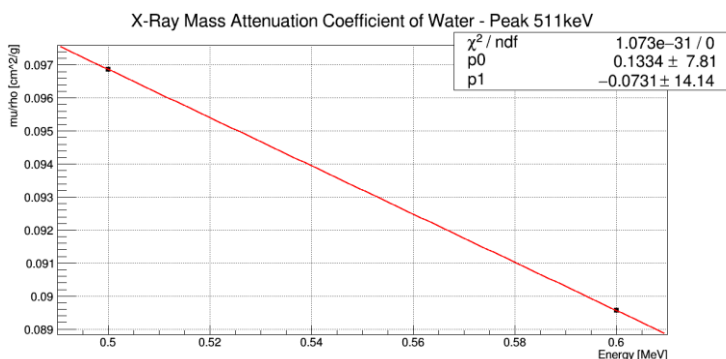


Figura 3.7.3

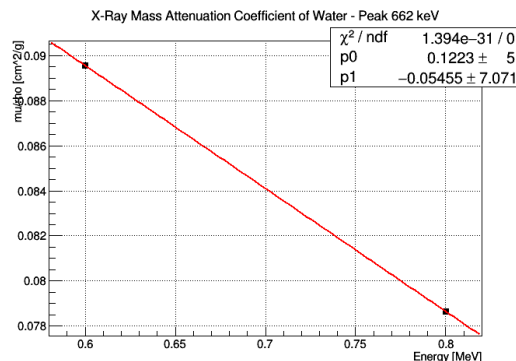


Figura 3.7.4

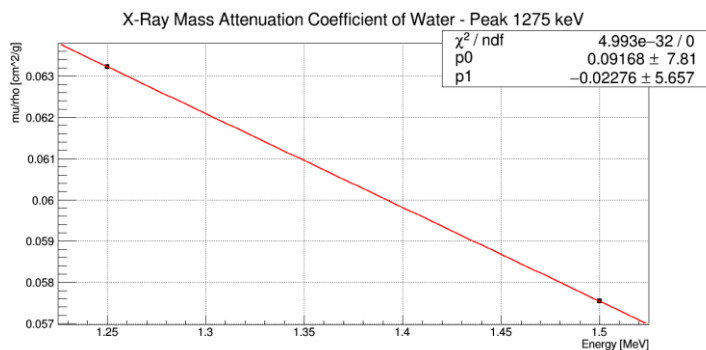


Figura 3.7.5

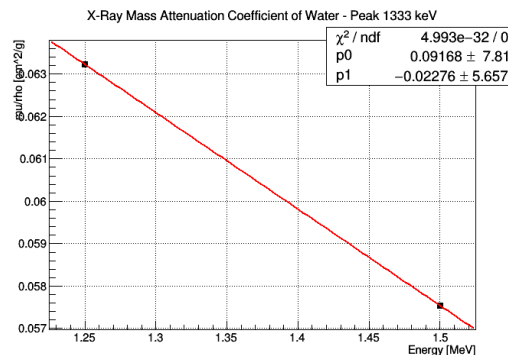


Figura 3.7.6

Detector	Sorgente	Config.	I/I_0		Spessore di Massa g/cm ²	
			511 keV	1275 keV	511 keV	1275 keV
NaI (1500 V)	²² Na	3W + 2W	0.5358 ± 0.0014	0.6334 ± 0.0034	6.496 ± 0.076	7.286 ± 0.24
		3V + 2W	0.6885 ± 0.0016	0.7612 ± 0.0037	3.885 ± 0.048	4.35 ± 0.28
		3W + 2V	0.7962 ± 0.0015	0.8497 ± 0.0035	2.372 ± 0.047	2.60 ± 0.11
$x_{3V+2W} + x_{3W+2V} =$					6.258 ± 0.067	6.95 ± 0.31

Si sono poi calcolati gli spessori di massa nel metodo “diretto” per le configurazioni con acqua

Detector	Config.	Spessore di Massa g/cm ²			
		511 keV	662 keV	1275 keV	1333 keV
NaI (1500 V)	3W	6.799 ± 0.075	7.114 ± 0.034	7.62 ± 0.12	7.370 ± 0.32
	3W + 2W	6.496 ± 0.076	6.613 ± 0.035	7.27 ± 0.24	7.166 ± 0.44
LYSO (1300 V)	3W	5.691 ± 0.054	/	6.837 ± 0.062	/
	3W + 2W	6.116 ± 0.054		6.411 ± 0.081	

I risultati ottenuti risultano essere in buon accordo con lo spessore di liquido dato dalla geometria del sistema e schematizzata in figura 3.7.1.

Capitolo 4

Conclusioni

4.1 Considerazioni sulla geometria del setup

Si riportano per comodità gli spessori di massa calcolati al paragrafo 3.7.

Detector	Config.	Spessore di Massa g/cm ²			
		511 keV	662 keV	1275 keV	1333 keV
NaI (1500 V)	3W	6.799 ± 0.075	7.114 ± 0.034	7.62 ± 0.12	7.370 ± 0.32
	3W + 2W	6.496 ± 0.076	6.613 ± 0.035	7.27 ± 0.24	7.166 ± 0.44
LYSO (1300 V)	3W	5.691 ± 0.054	/	6.837 ± 0.062	/
	3W + 2W	6.116 ± 0.054	/	6.411 ± 0.081	/

Ricordando che questi risultati sono calcolati a partire dal rapporto tra l'intensità del fascio rilevato con il tubo pieno d'acqua e il tubo vuoto ed essendo la densità dell'acqua pari 1 g/cm³, ci si aspetta che tali valori corrispondano alla distanza percorsa nell'acqua dai raggi gamma, circa 76 mm. Tuttavia, si ottengono spessori leggermente diversi da quanto atteso, in particolare si trova che aumentano leggermente all'aumentare dell'energia. Tali deviazioni permettono di concludere che:

- a basse energie l'effetto di "build-up" dello scattering Compton a piccoli angoli all'interno del materiale attraversato incrementa la resa all'interno del fotopicco rispetto a quanto atteso per un assorbimento ideale. Questo effetto può essere descritto attraverso una simulazione dettagliata del setup sperimentale e non può, invece, essere ricostruito attraverso la sola analisi delle aree dei fotopicchi. Tuttavia, tale simulazione va oltre gli obiettivi di questa tesi e sarà sviluppata in futuro in un diverso contesto.
- A 1333 keV l'effetto dell'interazione dei fotoni tramite produzione di coppie, non sia trascurabile.

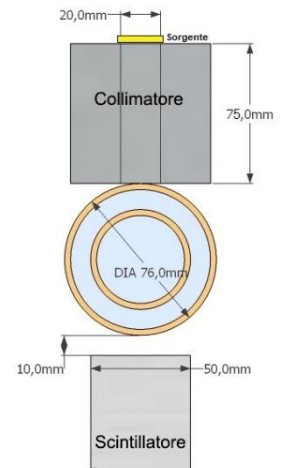


Figura 4.1

4.2 Possibilità di misurare la densità del fluido multifasico con molteplici energie gamma

Si riporta per comodità il grafico delle intensità relative per le misure con entrambi i tubi con il detector NaI.

5. 3V + 2W
6. 3V + 2O
7. 3W + 2W
8. 3W + 2O
9. 3O + 2O

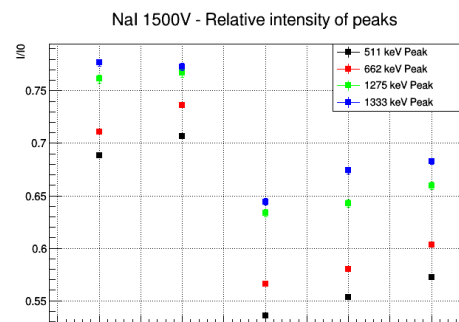


Figura 4.2

Dal grafico si evince che all'aumentare della densità del fluido, l'intensità dei picchi diminuisce a tutte le energie ma con un effetto tanto minore quanto maggiore è l'energia del picco.

L'obiettivo finale di questo lavoro è infatti vedere se è possibile sfruttare utilmente la differenza di assorbimento di gamma di energia diversa per ottenere un'informazione più precisa sul fluido multifasico all'interno della tubatura. La non perfetta congruenza degli spessori ricavati nelle misure di assorbimento rispetto a quelli attesi indica però la necessità di simulazioni dettagliate della geometria reale dell'apparato per avere un controllo quantitativo degli assorbimenti, e poter quindi inferire delle informazioni affidabili delle misure dirette. Tale lavoro va oltre gli obiettivi di questa tesi e sarà portato avanti nel prossimo futuro in altri contesti.

4.3 Considerazioni sulla stabilità energetica

Dai grafici 3.5.6 – 3.5.11, risulta che i valori in energia dei picchi degli spettri delle varie sorgenti variano in modo non trascurabile rispetto alle relative incertezze sperimentali, al variare del mezzo che i raggi gamma attraversano prima di essere rilevati. La correzione del guadagno del PMT per effetto del rate non è sufficiente a compensare le variazioni osservate. Ciò suggerisce ancora una volta che gli effetti della geometria reale anche sulla posizione dei fopicchi non sono trascurabili e dovrebbero essere studiati attraverso la simulazione.

Bibliografia

- [1.1.1] Blaney S., *Gamma Radiation Methods for Clamp-On Multiphase Flow Metering*, Phd thesis, Supervisor: Dr. H. Yeung, February 2008.
- [1.1.2] Falcone G., Hewitt G. F., Alimonti C., *Multiphase Flow Metering: principles and application*, in “Developments in Petroleum Science”, Vol. 54, London, Elsevier, 2013.
- [1.2.1] [1.2.2] [1.2.3] Fortescue T. R., *Quick-Gamma Densitometer Design Report*, Pietro Fiorentini, 2010.
- [1.2.4] Saeterstol J., *Characterization of Scintillation Crystals for Positron Emission Tomography*, Master of Science Thesis, Supervisor: Assoc. Prof. E. R. Gruner
- [1.2.5] Fortescue T. R., *Quick-Gamma Densitometer Design Report*, Pietro Fiorentini, 2010.
- [1.3.1] Helmer R. G., Chechev V.P., LNE - LNHB / CEA *Table de Radionucléides* http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Cs-137_tables.pdf in data 5/09/2016.
- [1.3.2] Shamsuzzoha Basunia M., *Nuclear Data Sheets 127*, 69 (2015).
- [1.3.3] Hino Y., Kawada Y. *Absolute ^{22}Na Radioactivity measurement by gamma efficiency variation of $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence method*
- [1.3.4] E. Browne, J. K. Tuli, *Nuclear Data Sheets 114*, 1849 (2013).
- [1.3.5] [1.3.6] Knoll G. F., *Radiation Detection and Measurement*, 3rd edition, New York, John Wiley and Sons, Inc, 1999.
- [1.3.7] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer. *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest*.
- [1.3.8] Fortescue T. R., *Quick-Gamma Densitometer Design Report*, Pietro Fiorentini, 2010.
- [3.4.1] Saeterstol J., *Characterization of Scintillation Crystals for Positron Emission Tomography*, Master of Science Thesis, Supervisor: Assoc. Prof. E. R. Gruner
- [3.4.2] Johansen GA, Jackson P. *Radioisotope Gauges for Industrial Process Measurements*. John Wiley & Sons, Ltd., New York. 2004.
- [3.4.3] Kuntner C, Aiginger H, Auffray E, Glodo J, Kapusta M, Lecoq P, Moszynski M, Schneegans M, Szupryczynski P, Wojtowicz A J. *Scintillation properties and mechanism in Lu_{0.8}Y_{0.2}AlO₃:Ce*. Nucl Instrum Methods Phys Res A. 2002; 486: 176–80

[3.7.1] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer. *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest.*