

**Misure di coincidenza per la ricerca
della posizione di una sorgente di ^{22}Na**

Vincenzo Ciriolo
Ulisse Lorenzo Lillo
Gianluca Stringhini

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione | 3 |
| 1.1 | Positron Emission Tomography | 3 |
| 1.2 | Cenni teorici | 4 |
| 1.2.1 | Decadimento beta | 4 |
| 1.2.2 | Interazioni di particelle cariche con la materia | 5 |
| 1.2.3 | Interazioni fotoni-materia | 6 |
| 2 | Apparato strumentale | 8 |
| 2.1 | Rivelatori | 8 |
| 2.1.1 | Scintillatori | 8 |
| 2.1.2 | Fotomoltiplicatore | 9 |
| 2.1.3 | Rivelatori utilizzati | 9 |
| 2.2 | Catena elettronica di lettura | 9 |
| 2.3 | Ottimizzazione sistema di misura | 10 |
| 2.3.1 | Risoluzione energetica | 10 |
| 2.3.2 | Determinazione della tensione di bias ottimale | 11 |
| 2.3.3 | Guadagno dell'amplificatore | 14 |
| 2.3.4 | Shaping time | 15 |
| 2.3.5 | Calibrazione canale-energia | 16 |
| 2.4 | Sistema di misure in coincidenza | 17 |
| 2.4.1 | Durata gate | 18 |
| 2.4.2 | Finestra energetica TISCA | 18 |
| 2.4.3 | Acquisizione in coincidenza | 18 |
| 2.5 | Misure preliminari | 19 |
| 2.5.1 | Invarianza altezza sorgente | 19 |
| 2.5.2 | Centratura della sorgente | 19 |
| 2.5.3 | Stabilità del sistema nel tempo | 21 |
| 3 | Ricerca della posizione di una sorgente di ^{22}Na tramite misure di coincidenza | 23 |
| 3.1 | Introduzione | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2 | Ricerca della posizione di una sorgente di ^{22}Na in aria | 25 |
| 3.3 | Effetti dovuti all'attenuazione di materiale interposto tra la sorgente e il rivelatore | 28 |
| 4 | Conclusioni | 32 |

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Positron Emission Tomography

L'obiettivo di questo esperimento è la calibrazione e il settaggio di un apparato sperimentale che consenta di individuare la posizione di una particolare sorgente radioattiva, in aria o in un mezzo materiale. Il nostro esperimento è una modellizzazione bidimensionale della PET. La PET (Positron Emission Tomography) è una tecnica di diagnostica medica la quale fornisce immagini funzionali che evidenziano l'attività di un organo o di un apparato e quindi anche la presenza di uno stato patologico attraverso la modificazione di tale funzione. Poichè i cambiamenti funzionali si manifestano prima delle alterazioni della struttura, la PET ha il vantaggio di consentire una diagnosi più veloce, in particolare per alcune forme di tumore. Il procedimento inizia con l'iniezione di un isotopo con emivita breve, come ^{11}C (20 min), ^{13}N (10 min), ^{15}O (2 min) e soprattutto ^{18}F (110 min), che deve essere prodotto da un ciclotrone posizionato in prossimità della PET. Questi radionuclidi sono incorporati in composti normalmente assimilati dal corpo umano, come il glucosio, l'acqua o l'ammoniaca, e quindi usati per tracciare i luoghi in cui si distribuiscono. Quando la molecola metabolicamente attiva (spesso uno zucchero) raggiunge una determinata concentrazione all'interno dei tessuti da analizzare, il paziente viene posizionato nello scanner. L'isotopo di breve vita media decade, emettendo un positrone. Dopo un percorso che può raggiungere al massimo pochi millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di fotoni gamma emessi in direzioni opposte tra loro (fotoni back to back) di energia 511 KeV. Questi fotoni sono rilevati quando contemporaneamente raggiungono due scintillatori, posti sullo stesso asse uno di fronte all'altro, nel dispositivo di scansione. Il punto cruciale della tecnica è la **rilevazione** in

coincidenza. Le misure in coincidenza si basano sulla rivelazione di eventi contemporanei o comunque con una differenza di tempo minore della risoluzione temporale del rivelatore. Dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il rivelatore, si può ricostruire la posizione da cui sono stati emessi, permettendo la determinazione dell'attività o dell'utilizzo chimico all'interno delle parti del corpo investigate. Lo scanner utilizza la rilevazione delle coppie di fotoni per mappare la densità dell'isotopo nel corpo, sotto forma di immagini di sezioni (generalmente trasverse). La mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola campione si è maggiormente concentrata e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare al fine di determinare la diagnosi ed il conseguente trattamento.

1.2 Cenni teorici

1.2.1 Decadimento beta

Il decadimento beta è un processo di conversione di un protone in un neutrone o viceversa. Ciò che caratterizza quindi il decadimento beta è che $Z \rightarrow Z \pm 1$ e $N \rightarrow N \mp 1$ mentre $A = Z+N$ rimane costante. Il decadimento beta rende possibile a un nucleo instabile di raggiungere l'isotopo più stabile del multipletto di isobari. Questo processo può avvenire in tre diversi canali:

- $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ decadimento β^-
- $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ decadimento β^+
- $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ cattura elettronica ϵ

il Na22 decade: β^+ al 89.84 % con un energia media di 215 keV, e al 10.10 % attraverso cattura elettronica sempre sullo stato eccitato del Ne22 il quale emette un fotone da 1275 keV per passare allo stato fondamentale. C'è anche la probabilità (0.06 %) che decada β^+ sullo stato fondamentale del Ne22. Vedi Figura 1.1

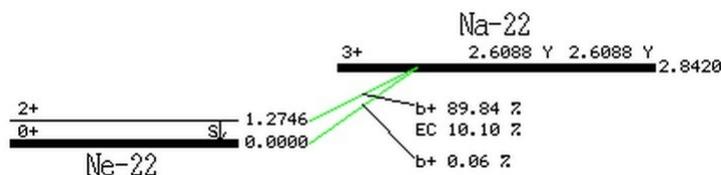


Figura 1.1: decadimento Na22

1.2.2 Interazioni di particelle cariche con la materia

Le particelle cariche interagiscono con la materia principalmente attraverso forze elettromagnetiche durante collisioni con gli elettroni orbitali. Questi ultimi possono essere portati su una nuova orbita con energia di legame minore (eccitazione), o addirittura strappati dall'atomo (ionizzazione). La perdita di energia media per unità di lunghezza dE/dx è chiamata stopping power e si esprime in MeV/cm. Per elettroni veloci la perdita di energia dovuta a collisioni è data da :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{2\pi(T + mc^2)N_0Z\rho}{mc^2\beta^2A} \left[\ln \frac{T(T + mc^2)^2\beta^2}{2I^2mc^2} + (1 - \beta^2) + \right. \\ \left. - (2\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1 - \beta^2}) \right]$$

Gli elettroni e i positroni differiscono dalle altre particelle cariche perchè possono perdere energia in processi radiativi. La perdita di energia attraverso il processo radiativo è data da:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{(T + mc^2)N_0Z^2\rho}{m^2c^4137A} \left[4 \ln \frac{2(T + mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right]$$

Osservando quest'equazione notiamo che la radiazione di frenamento è direttamente proporzionale al reciproco della massa e per questo motivo è più significativa per gli elettroni che per le particelle cariche con massa molto maggiore. I fattori E e Z^2 al numeratore mostrano che la perdita radiativa è più importante per elettroni con energia elevata e materiali assorbitori con Z grande. Lo stopping power lineare totale sarà dato quindi dai due contributi

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r$$

Queste considerazioni sono state effettuate per valutare il libero cammino medio che compie il positrone, infatti il positrone si annichila da fermo, poichè in questo modo forma uno stato legato, il positronio, che aumenta la probabilità che l'interazione elettrone-positrone porti all'annichilazione. Nella Figura 1.2 il grafico ci mostra l'andamento dello stopping power in funzione del energia cinetica dell 'elettrone per i vari materiali, e l'andamento dello stopping power in funzione del numero atomico del materiale attraversato a varie energie. come si può notare, per un positrone di 0.2 MeV (energia massima per il decadimento da Na22) il $\frac{dE}{dx} \cong 2.2 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$. La

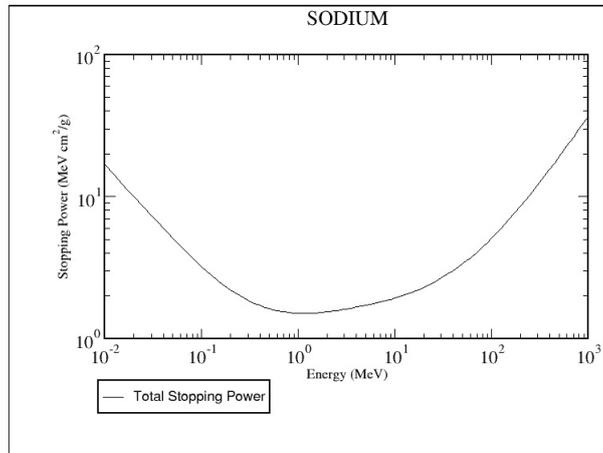


Figura 1.2: Grafico rappresentante lo stopping power

perdita di energia del beta dipenderà quindi dal materiale attraverso cui passa: sorgente, polietilene (in cui è contenuta la sorgente), aria. Notiamo che sodio e polietilene hanno densità $\cong 1$, dunque il calcolo della distanza media percorsa dal positrone prima di annichilire sarà:

$$\frac{0.2 \text{ MeV}}{2.2 \text{ MeV cm}^2/\text{g}} = 0.09 \text{ g/cm}^2 \quad \frac{0.09 \text{ g/cm}^2}{1 \text{ g/cm}^3} = 0.09 \text{ cm}$$

Dato che l'energia media del beta è 215 KeV, è lecito supporre che la maggior parte dei positroni si annichilano nella sorgente stessa.

1.2.3 Interazioni fotoni-materia

I raggi gamma interagiscono con la materia principalmente attraverso tre processi.

- Effetto Fotoelettrico: un fotone viene assorbito da un atomo e quest'ultimo rilascia un elettrone chiamato in questo caso fotoelettrone.
- Effetto Compton: il fotone con energia $h\nu$ colpisce un elettrone cedendogli parte della sua energia, verranno diffusi un fotone di energia $h\nu'$ e l'elettrone bersaglio
- Produzione di coppie: nella quale un fotone crea una coppia elettrone-positrone.

Quando un fascio di fotoni attraversa un materiale di spessore t uno dei fotoni può subire: effetto fotoelettrico, produzione di coppia, scattering Compton, passaggio attraverso il materiale senza interagire, oppure una combinazione dei fenomeni. La probabilità totale per unità di lunghezza μ per la rimozione di un fotone dal fascio è chiamato coefficiente di attenuazione lineare ed è la somma delle rispettive probabilità per l'assorbimento fotoelettrico τ ,

scattering Compton σ e la produzione di coppie κ :

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

La frazione di intensità persa durante l'attraversamento di un materiale di spessore dx è

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad \text{e quindi} \quad I = I_0 e^{-\mu t}$$

Come si vede in Figura 1.3, nel nostro caso con energie di 511 KeV e numero atomico basso, il coefficiente di attenuazione lineare sarà dominato dalla componente Compton. I raggi gamma possono anche essere caratterizzati dal loro libero cammino medio λ , definita come la distanza media percorsa nell'assorbitore prima che avvenga un'interazione, e questo è il reciproco del coefficiente di attenuazione. λ nei solidi assume valori compresi tra i pochi millimetri e decine di cm. Il coefficiente di attenuazione varia con la densità dell'assorbitore, è allora conveniente definire il coefficiente di attenuazione di massa, dato dal rapporto tra il coefficiente di attenuazione lineare e la densità del materiale.

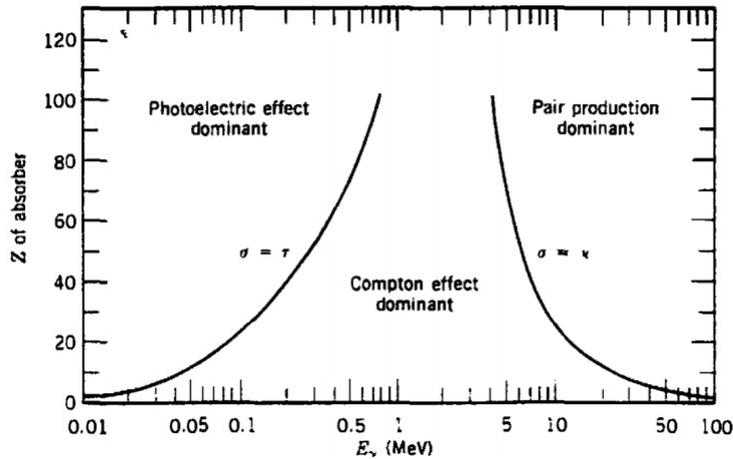


Figura 1.3: Andamento della sezione d'urto

Capitolo 2

Apparato strumentale

L'apparato di misura utilizzato è costituito da due scintillatori inorganici allo ioduro di sodio, fissati su due bracci rigidi che possono ruotare attorno a un punto comune. Gli scintillatori sono **corredati da fototubi necessari per la rivelazione** e sono provvisti di preamplificatore. La catena elettronica necessaria per eseguire misure in coincidenza è formata da: amplificatore, SCA (Single Channel Analyzer) ed MCA, l'interfaccia software utilizzata è *Maestro*.

2.1 Rivelatori

2.1.1 Scintillatori

Gli scintillatori sono dei rivelatori basati sull'emissione di fotoni causata dall'interazione tra la radiazione incidente e il materiale. Esistono due categorie di scintillatori, caratterizzate da due meccanismi di scintillazione differenti:

Inorganici: questo tipo di scintillatori ha una buona resa in luce, ma è più lento di quelli organici. La radiazione incidente cede abbastanza energia ad un elettrone in banda di valenza da farlo passare in banda di conduzione, successivamente esso ritorna in banda di valenza emettendo un fotone di lunghezza d'onda caratteristica.

Al materiale vengono aggiunte delle impurezze in modo da rendere più efficiente questo meccanismo e limitare l'autoassorbimento.

Esistono due tempi caratteristici di ricombinazione: ricombinazione veloce dell'ordine di $\sim 100ns$ e ricombinazione lenta dell'ordine di $\sim \mu s$.

Organici: più veloci degli inorganici, con tempi dell'ordine μns , ma con una resa in luce minore.

Il meccanismo di scintillazione si basa sull'eccitazione degli elettroni sugli orbitali π molecolari.

Oltre all'emissione veloce, è presente anche un'emissione ritardata dovuta al fenomeno della fosforescenza.

2.1.2 Fotomoltiplicatore

La luce emessa dallo scintillatore dev'essere moltiplicata e trasformata in un segnale elettrico che possa essere letto con una catena elettronica di lettura. Il fotomoltiplicatore è un tubo di vetro, in cui è realizzato il vuoto, all'interno del quale è presente un anodo e diversi elettrodi, che costituiscono i dinodi. I fotoni prodotti dall'interazione della radiazione incidente col materiale vengono guidati sul fotocatodo, ricoperto da un materiale che favorisce l'effetto fotoelettrico. Gli elettroni così prodotti sono convogliati su una serie di dinodi, ognuno dei quali a potenziale maggiore del precedente. Le collisioni con i dinodi produce la moltiplicazione degli elettroni. Il guadagno complessivo raggiunge 10^8 . Il segnale in uscita dal fototubo è dell'ordine dei millivolt e può già essere misurabile.

2.1.3 Rivelatori utilizzati

I rivelatori impiegati nella misura sono due scintillatori ORTEC 905 NaI(Tl) (ioduro di sodio drogato con tallio), di dimensioni $2'' \times 2''$, ciascuno accoppiato con un modulo, composto da fotomoltiplicatore e preamplificatore, ORTEC 276. Il guadagno complessivo di moltiplicazione è 10^6 , cosicché il tipico segnale in uscita corrispondente ad un fotone di energia 511 keV è $\sim 250mV$. Il preamplificatore rende il segnale positivo e gli conferisce una prima formatura con rise time dipendente dalle caratteristiche dello scintillatore e decay time pari a $50\mu s$. Oltre al segnale in uscita dal preamplificatore, è possibile prelevare il segnale anodico, il quale è negativo, veloce e non formato.

2.2 Catena elettronica di lettura



Il segnale elettrico in uscita dal preamplificatore incluso nel fototubo, deve passare attraverso una catena elettronica di trattamento e lettura del segnale.

Elementi della catena

Amplificatore: l'amplificatore utilizzato, modello ORTEC 570, è caratterizzato un guadagno aggiustabile in modo continuo compreso tra 1 e 1500, e la possibilità di impostare 6 valori di shaping time diversi: $0.5\mu s$, $1\mu s$, $2\mu s$, $3\mu s$, $6\mu s$, $10\mu s$.

SCA (Single Channel Analyzer): il modello utilizzato, SILENA 7616, ha una duplice funzione: apre un gate logico di durata fissata se il segnale in ingresso è compreso in una certa finestra energetica, oppure oltre una soglia, e può anche semplicemente selezionare segnali all'interno di un certo intervallo di energie. La durata del gate può essere impostata in un range che va da $0.5\mu s$ a $5\mu s$.
Lo stesso modulo funge anche da amplificatore con un range di guadagno che va da 12 a 1280, e solo due possibili opzioni per lo shaping time: $0.5\mu s$ oppure $2\mu s$.

MCA (Multichannel Analyzer) modello ORTEC TRIUMPH PCI 2K, integrato nel calcolatore, con 4096 canali e un range dinamico da 0V a 10V. Il software utilizzato per visualizzare lo spettro è MAESTRO,

2.3 Ottimizzazione sistema di misura

Gli strumenti facenti parte della catena di lettura elettronica sono stati ottimizzati in base alle caratteristiche dei rivelatori utilizzati e alle misure fatte.

Il fine di questa fase è ottenere la miglior risoluzione possibile all'energia di interesse.

Per far questo è necessario ridurre al minimo il rumore, che può essere di due tipi: rumore in serie e rumore in parallelo.

I parametri principali che sono stati analizzati sono:

- Tensione di bias
- Guadagno dell'amplificatore
- Shaping time

2.3.1 Risoluzione energetica

La *risoluzione energetica* è la proprietà di un rivelatore di risolvere due impulsi di energia vicina.

Si definisce *FWHM* (*Full width at half maximum*) la larghezza della curva misurata ad un'ordinata pari alla metà dell'altezza massima del picco. Essa

riflette le fluttuazioni statistiche dovute al processo di formazione delle cariche all'interno, del rumore all'interno del rivelatore e della catena elettronica, delle fluttuazioni dovute alla natura discreta del segnale rivelato.

La *risoluzione* è definita come il rapporto tra la FWHM e l'energia rilasciata nel rivelatore dalla radiazione incidente E_0

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \quad (2.1)$$

Minore è la FWHM maggiore è la risoluzione poichè si hanno picchi più stretti e alti centrati sull'energia della radiazione incidente rendendo possibile distinguere due picchi relativi a radiazioni incidenti di energia vicina.

Le fluttuazioni statistiche possono essere stimate assumendo che i processi di formazione delle cariche siano descrivibili dalla distribuzione di probabilità di Poisson. Sotto tale assunzione, posto N il numero medio di cariche formate, la deviazione standard, che caratterizza la fluttuazione statistica, è pari a \sqrt{N} .

Poichè il numero di conteggi N è molto elevato, la distribuzione poissoniana tende ad una distribuzione gaussiana e la deviazione standard è proporzionale alla FWHM:

$$FWHM = 2.35\sigma \quad (2.2)$$

L'altezza dell'impulso emesso dal rivelatore è pressochè proporzionale al numero di cariche create

$$E_0 = KN \quad (2.3)$$

con K costante di proporzionalità, di conseguenza la deviazione standard è $K\sqrt{N}$ e la $FWHM = 2.35K\sqrt{N}$.

La risoluzione limite dovuta solo a fluttuazione statistiche nella creazione della cariche è:

$$R = \frac{FWHM}{E_0} = \frac{2.35K\sqrt{N}}{KN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \quad (2.4)$$

Se esistono diverse sorgenti di fluttuazione, tutte simmetriche e indipendenti, allora la teoria statistica predice che la funziona di risposta totale sarà ancora gaussiana e la FWHM totale sarà uguale alla somma in quadratura delle singole FWHM:

$$(FWHM)^2 = (FWHM_{statistica})^2 + (FWHM_{rumore})^2 + (FWHM_{deriva})^2 + \dots \quad (2.5)$$

2.3.2 Determinazione della tensione di bias ottimale

La tensione di bias a cui alimentare i rivelatori è un parametro fondamentale in quanto influisce sul numero di cariche generate e quindi

sulla risoluzione del sistema (par 2.3.1). Tuttavia un valore troppo elevato determina l'aumento del rumore dovuto alla corrente di buio causando un peggioramento della risoluzione. Per determinare la tensione di bias ottimale, per ogni singolo rivelatore, sono state eseguite misure al variare della tensione di alimentazione e a shaping time fissato: ($0.5\mu s$). **Il guadagno dell'amplificatore è stato cambiato in modo da ottenere il picco sempre nella zona centrale dello spettro.** Per ogni tensione è stata calcolata la risoluzione al picco corrispondente all'energia 511 keV. I valori della risoluzione ottenuti per ogni tensione applicata sono riportati nelle tabelle 1 e 2.

| Tensione bias (V) | Risoluzione (%) |
|-------------------|-----------------|
| 400 | 8.55 |
| 450 | 8.38 |
| 500 | 8.02 |
| 550 | 8.08 |
| 600 | 7.98 |
| 650 | 7.88 |
| 700 | 7.86 |
| 750 | 7.90 |
| 800 | 7.80 |
| 850 | 7.91 |
| 900 | 7.97 |

| Tensione bias (V) | Risoluzione (%) |
|-------------------|-----------------|
| 400 | 9.22 |
| 450 | 8.23 |
| 500 | 7.96 |
| 550 | 7.71 |
| 600 | 7.77 |
| 650 | 7.59 |
| 700 | 7.67 |
| 750 | 7.54 |
| 800 | 7.68 |
| 850 | 7.60 |
| 900 | 7.46 |

Nei grafici 2.1 e 2.2 è riportata la risoluzione al picco in funzione della tensione di bias. L'andamento è quello aspettato, ovvero a tensioni molto basse una risoluzione scadente dovuta alla mancata raccolta completa delle cariche create, successivamente un miglioramento della risoluzione per tensioni

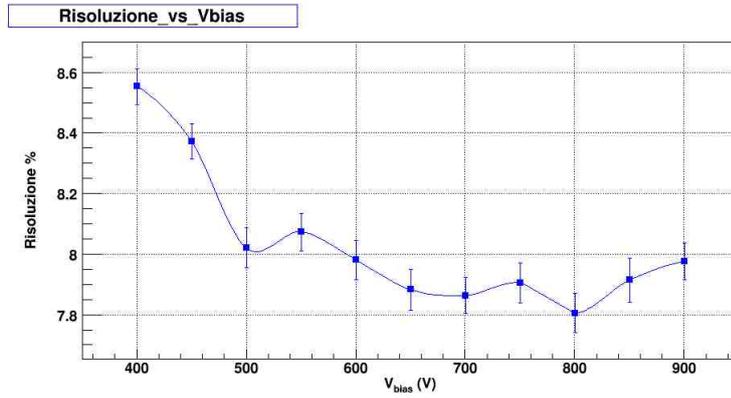


Figura 2.1: Risoluzione in funzione della tensione di bias riv1

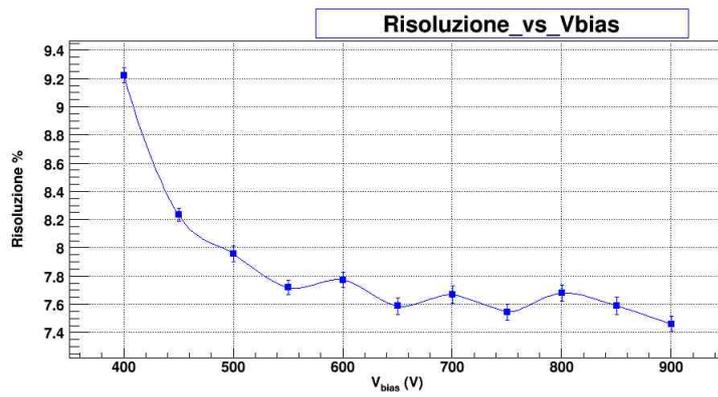


Figura 2.2: Risoluzione in funzione della tensione di bias riv2

crescenti fino a raggiungere un minimo dopo il quale si vede nuovamente un peggioramento dovuto alla crescente importanza del rumore in serie.

La tensione di lavoro da noi scelta per entrambi i rivelatori è 750 V. Poichè il segnale in uscita da uno dei due rivelatori dev'essere mandato al TISCA, è stata effettuata la stessa misura anche utilizzando l'amplificatore incluso in questo modulo (figura 2.3 e tabella).

| Tensione bias (V) | Risoluzione (%) |
|-------------------|-----------------|
| 450 | 8.48 |
| 500 | 8.53 |
| 550 | 8.49 |
| 600 | 8.25 |
| 650 | 8.30 |
| 700 | 8.44 |
| 750 | 8.26 |
| 800 | 8.20 |
| 850 | 8.19 |
| 900 | 8.24 |

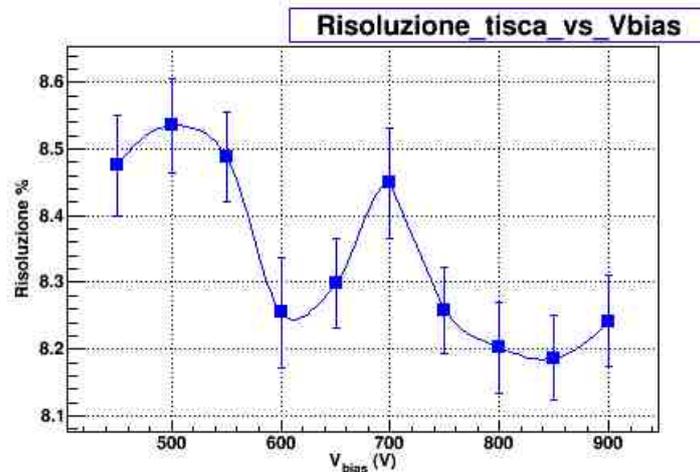


Figura 2.3: Risoluzione in funzione della tensione di bias riv2 con TISCA

2.3.3 Guadagno dell'amplificatore

Il guadagno è il parametro che determina l'ampiezza del segnale in uscita dall'amplificatore, esso verrà successivamente digitalizzato, quindi praticamente determinerà la zona dello spettro entro la quale apparirà il

picco di interesse. Poichè il guadagno non influenza significativamente la risoluzione dell'apparato, per questioni legate alla linearità dell'MCA, abbiamo scelto un guadagno tale da ottenere il picco relativo ad un fotone da 511 keV, nella zona centrale dello spettro. Il guadagno scelto è 20×0.842 .



2.3.4 Shaping time

Lo shaping time è il tempo di formatura del segnale. Esso è uno dei parametri che hanno maggiore importanza nell'ottimizzazione del sistema, poichè esso influenza in maniera importante il rumore: il rumore in parallelo, dovuto ad esempio a perdite di corrente all'interno del rivelatore stesso, aumenta all'aumentare dello shaping time, mentre quello in serie, dovuto principalmente alla corrente termica, diminuisce. Il tempo di formatura del segnale deve anche tenere conto di effetti come il deficit balistico, causato dalla mancata raccolta completa delle cariche, che richiederebbero tempi più lunghi, e l'insorgenza del pile-up, che diventa non trascurabile per tempi maggiori. Inoltre nel caso di misure in coincidenza, esso assume un ruolo importante anche per quanto riguarda il centramento del segnale all'interno del gate. L'amplificatore usato consente di impostare diversi valori di shaping time, in un range che va da $0.5 \mu s$ a $10 \mu s$, tuttavia il modulo tisca, necessario nella misura in coincidenza è dotato solo di due possibili tempi: $0.5 \mu s$ e $2 \mu s$. Sono state effettuate misure a tensione di bias e guadagno fissato ai valori scelti nei paragrafi 2.3.1 e 2.3.2 e shaping time variabile. I dati sono riportati nelle tabelle 3 e 4 e la risoluzione al picco in funzione dello shaping time è rappresentato nel grafico 1.4 e 1.5.

| Shaping time (μs) | Risoluzione (%) |
|--------------------------|-----------------|
| 0.5 | 7.96 |
| 1 | 8.01 |
| 2 | 7.90 |
| 3 | 7.97 |
| 6 | 8.04 |
| 10 | 8.05 |

| Shaping time (μs) | Risoluzione (%) |
|--------------------------|-----------------|
| 0.5 | 7.79 |
| 1 | 7.57 |
| 2 | 7.54 |
| 3 | 7.59 |
| 6 | 7.61 |
| 10 | 7.77 |

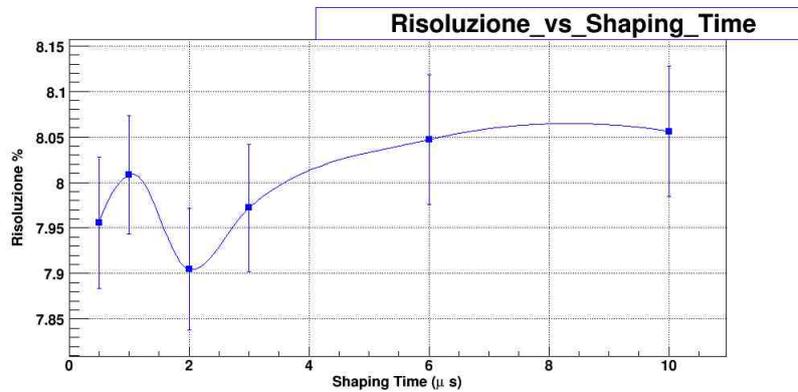


Figura 2.4: Risoluzione in funzione dello shaping time riv1

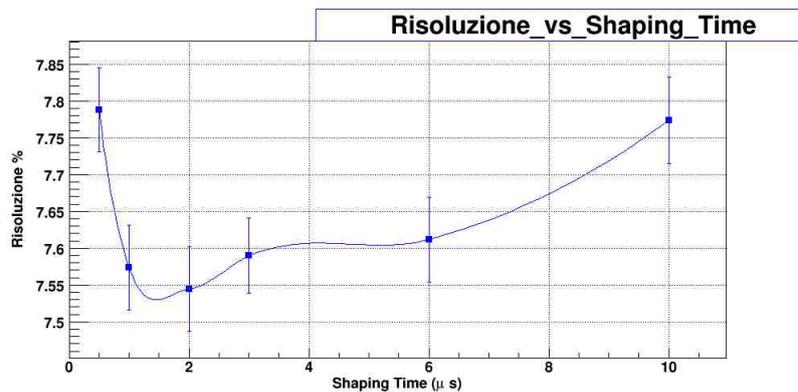


Figura 2.5: Risoluzione in funzione dello shaping time riv2

La risoluzione migliore è ottenuta per un valore dello shaping time pari a $2\mu s$. In realtà i valori di shaping time saranno settati in base al gate delle misure in coincidenza. Nonostante ciò dai grafici si può notare come la risoluzione non varia molto per i valori di shaping time studiati.

2.3.5 Calibrazione canale-energia

L'MCA presente all'interno del pc digitalizza il segnale in ingresso e lo inserisce nei canali in modo proporzionale all'ampiezza del segnale in ingresso. Per associare un picco in un determinato canale ad un picco dovuto a fotoni di una certa energia, è necessario effettuare una calibrazione canale-energia.

| Sorgente | Energia(keV) |
|-------------------------|--------------|
| ^{57}Co | 122,06 |
| | 136,5 |
| ^{60}Co | 1173,2 |
| | 1332,5 |
| ^{228}Th | 238,6 |
| | 583,2 |
| X del ^{228}Th | 93,3 |
| | 105,6 |
| ^{22}Na | 511 |
| | 1274,5 |
| ^{212}Bi | 727,33 |
| ^{208}Tl | 860,57 |
| ^{40}K | 1461 |

Abbiamo usato diverse sorgenti note, riportate in tabella, in modo da avere picchi in ogni zona dello spettro così da poter tenere in conto eventuali non linearità dell'MCA, specialmente nelle zone più esterne. 

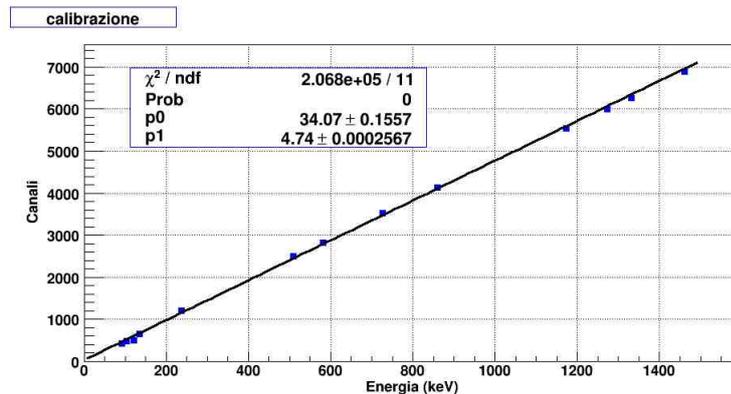


Figura 2.6

2.4 Sistema di misure in coincidenza

La misura di coincidenza è un metodo di reiezione del fondo molto efficace. Esso consiste nell'acquisire un segnale solo se ricade all'interno di una finestra temporale aperta dall'arrivo di un altro segnale. Nel nostro caso si sfrutta il fatto che i fotoni di annichilazione vengano emessi back-to-back per implementare un sistema di coincidenze che permette di ricostruire la posizione della sorgente.

2.4.1 Durata gate

Nell'implementare un sistema di misura in coincidenza, la determinazione del tempo di apertura del gate riveste un ruolo fondamentale: esso influisce sul rate di spurie acquisite e sul rate di segnale perso. Per determinarne la durata ottimale, il segnale in uscita dal rivelatore è stato sdoppiato: una parte è stata portata all'amplificatore e l'altra al TISCA. Il gate in uscita dal TISCA e il segnale in uscita dall'amplificatore sono stati osservati su un oscilloscopio. Dall'osservazione diretta si è stabilito il tempo di apertura del gate in modo tale che il picco del segnale amplificato sia ben centrato all'interno del gate, facendo attenzione a non impostare un tempo così lungo da rendere il rate di spurie non trascurabile. Il tempo di apertura del gate è stato impostato a $5.6\mu s$. Inoltre in questa stessa fase si è definitivamente impostato lo shaping time, del tisca, al valore di $0.5\mu s$.

2.4.2 Finestra energetica TISCA

La nostra misura è finalizzata alla rivelazione in coincidenza dei due fotoni di annichilazione di energia 511 keV, pertanto il modulo TISCA è stato utilizzato settando una finestra energetica intorno a tale valore. La determinazione dell'ampiezza ottimale di tale finestra è un elemento cruciale della misura. Per stabilire la condizione migliore, le soglie sono state modificate manualmente osservando gli effetti di tali variazioni sullo spettro e impostate in modo tale da includere il picco nella sua interezza, facendo attenzione a non tagliare le code poiché questo comporterebbe una perdita di dati e quindi una peggior risoluzione.

2.4.3 Acquisizione in coincidenza

Il rivelatore 1, caratterizzato da una peggior risoluzione, è collegato al TISCA ed è utilizzato per aprire il gate. La scelta è ricaduta su questo rivelatore poiché la miglior risoluzione dell'altro sarebbe stata degradata dalle peggiori performance del TISCA. Il segnale in uscita dal preamplificatore accoppiato al rivelatore 1 viene mandato al tisca, che lo amplifica e, se esso è all'interno della finestra energetica settata, apre un gate di durata fissata. L'altro scintillatore, caratterizzato da una migliore risoluzione, è collegato all'amplificatore. Il segnale dovuto ad un fotone incidente su questo rivelatore è acquisito solo se cade all'interno del gate temporale aperto dal tisca, dovuto alla rivelazione di un fotone incidente sull'altro rivelatore. Poiché i fotoni di annichilazione sono emessi sempre back-to-back, in questo modo si riescono a selezionare i fotoni di annichilazione del positrone emesso nel decadimento β^+

del ^{22}Na .

2.5 Misure preliminari

Prima di procedere con le misure finalizzate a ricostruire la posizione della sorgente, è stato necessario eseguire alcune misure volte a testare le prestazioni dell'apparato di misura e la sua stabilità.

2.5.1 Invarianza altezza sorgente

La prima misura effettuata è stata quella volta a indagare la dipendenza delle misure dall'altezza della sorgente sul piano individuato dai rivelatori. Sono state eseguite delle misure ponendo la sorgente alla stessa distanza longitudinale e ad altezze differenti.

Nel grafico seguente sono riportati gli spettri ad altezze differenti.

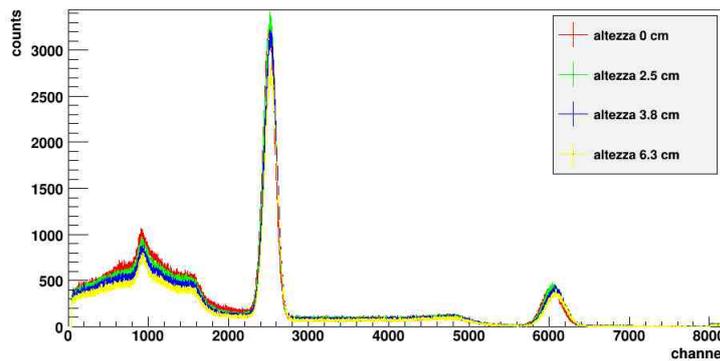


Figura 2.7: Spettri ad altezze diverse della sorgente

Dal grafico si evince che l'altezza della sorgente non influenza significativamente lo spettro e che per altezze minori o uguali a 2.5 cm il rate di conteggio è invariante. Per altezze superiori il numero di conteggi diminuisce maggiormente.

2.5.2 Centrazione della sorgente

Prima di procedere alla ricerca della posizione di una sorgente si è reso necessario trovare il centro del sistema dei due rivelatori e l'angolo zero, cioè quello in cui i rivelatori risultano essere collineari. Per fare questo si è per prima cosa allineato meccanicamente i due rivelatori con l'utilizzo di una riga,

quindi sono state effettuate misure in coincidenza modificando la posizione della sorgente e assumendo come posizione zero la posizione l'estremo del rivelatore, come mostrato in figura 2.8.

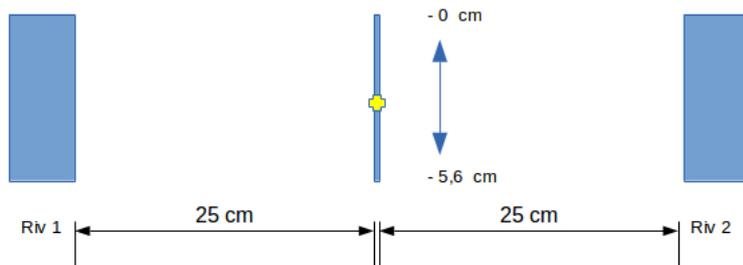


Figura 2.8: Disposizione dei rivelatori per le misure di centratura

Per ogni posizione differente sono state prese misure in coincidenza. La posizione massimizzante i conteggi rappresenta il centro dei rivelatori ed è stata da noi considerata come posizione zero di riferimento. I risultati sono proposti nel grafico 2.9.

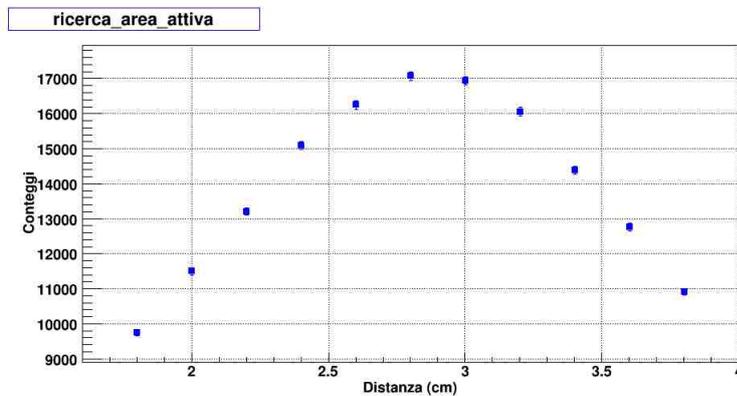


Figura 2.9: Risultati delle misure di centratura



La posizione centrale trovata è stata 2,8 cm. La misura successiva è stata una misura di centratura angolare con il duplice scopo, oltre a verificare il corretto allineamento dei rivelatori, di potere dare un valore di risoluzione angolare del sistema di misura, cioè se misure corrispondenti ad angoli con differenze piccole (circa un grado) erano discriminabili. I risultati sono riassunti ed esplicitati nel grafico 2.10.

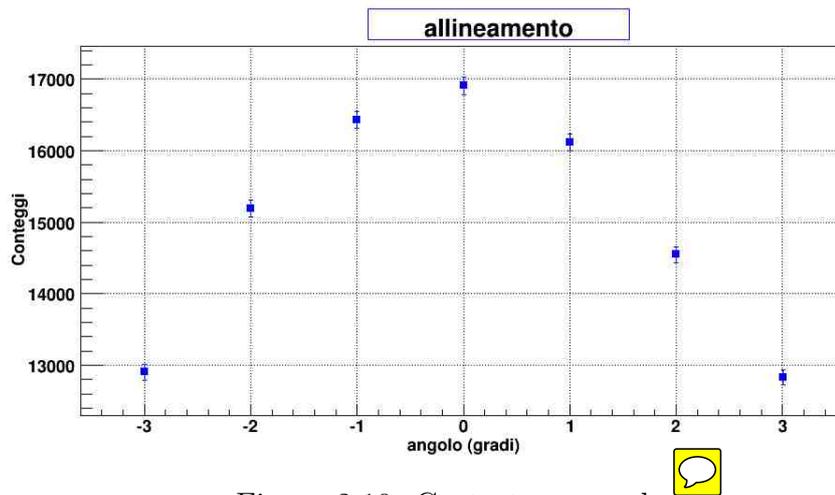


Figura 2.10: Centratatura angolare

Le misure hanno quindi confermato un corretto allineamento dei due rivelatori e ci hanno permesso di poter introdurre un'incertezza dovuta alla risoluzione angolare di $\pm 0.5^\circ$.

2.5.3 Stabilità del sistema nel tempo

Le condizioni atmosferiche come ad esempio la temperatura possono influire sia sulle prestazioni **sia sul fondo di misura.** Perciò è stato necessario effettuare delle misure volte ad investigare l'eventuale presenza di queste fluttuazioni ed eventualmente quantificarle. Per fare ciò abbiamo impostato un ciclo di 30 misure di durata 300 secondi a distanza di 2 ore. Il ciclo è durati diversi giorni in modo da poter includere diverse condizioni ambientali. I risultati hanno indicato una sostanziale invarianza

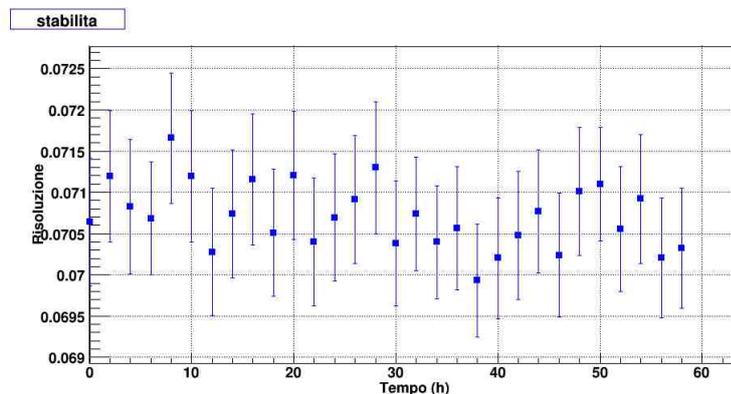


Figura 2.11: Stabilità dell'apparato

negli spettri acquisiti, così abbiamo potuto concludere che le variazioni delle condizioni atmosferiche e ambientali non influenzano in maniera significativa il nostro apparato di misura.

Capitolo 3

Ricerca della posizione di una sorgente di ^{22}Na tramite misure di coincidenza

3.1 Introduzione

La posizione di una sorgente di ^{22}Na può essere ricostruita mediante la rivelazione in coincidenza dei due fotoni "back-to-back" di energia 511 keV prodotti dall'annichilazione del positrone derivante dal decadimento β^+ del ^{22}Na . Ciò è possibile attraverso misure in coincidenza effettuate mediante l'utilizzo di due rivelatori, uno con la funzione di aprire un gate di acquisizione e l'altro con la funzione di effettuare misure di spettroscopia. Il primo rivelatore, collegato ad un TISCA, apre un gate temporale di $5,6 \mu\text{s}$ ogni qualvolta rivela un fotone di energia 511 keV. Questo gate fornisce al secondo rivelatore un intervallo temporale durante il quale effettuare misure di spettroscopia. In questo modo si è in grado di rivelare i due fotoni emessi "back-to-back" in coincidenza.

La configurazione dell'apparato di misura da noi utilizzato è presentata in figura 3.1. I due rivelatori sono stati posti ad una distanza di 50 cm l'uno dall'altro. **La posizione della sorgente era variabile sull'asse trasverso passante per il centro della congiungente dei due rivelatori.**

Le misure in coincidenza sono state effettuate mantenendo un rivelatore fisso e ruotando il secondo. L'angolo che massimizza il numero di conteggi in coincidenza corrisponde alla situazione in cui la sorgente si trova sulla congiungente dei due rivelatori.

Noto l'angolo che massimizza il numero di conteggi in coincidenza e utilizzando la formula si è in grado di risalire alla posizione della sorgente



sull'asse centrale tra i due rivelatori.

$$x = r \tan \frac{\beta}{2}$$

dove β rappresenta l'angolo che massimizza i conteggi di coincidenza, r rappresenta il raggio della circonferenza descritta dal rivelatore mobile, nel nostro caso é uguale a 25 cm e x rappresenta la posizione della sorgente, come mostrato in figura.

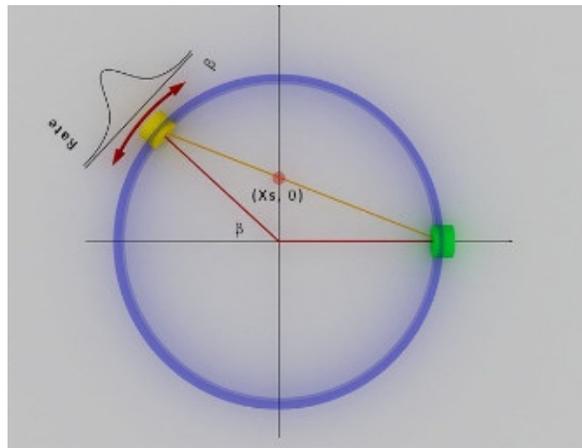


Figura 3.1: Configurazione dei rivelatori per misure in coincidenza

3.2 Ricerca della posizione di una sorgente di ^{22}Na in aria

Le misure effettuate hanno avuto come scopo la determinazione della posizione della sorgente di ^{22}Na posta in differenti punti sull'asse centrale e trasverso tra i rivelatori. Nel nostro studio le differenti posizioni della sorgente sono state:

| misura | posizione |
|--------|-------------------------|
| 1 | (0.0300 ± 0.0005) m |
| 2 | (0.0490 ± 0.0005) m |
| 3 | (0.0690 ± 0.0005) m |
| 4 | (0.0820 ± 0.0005) m |
| 5 | (0.0940 ± 0.0005) m |
| 6 | (0.1070 ± 0.0005) m |
| 7 | (0.1180 ± 0.0005) m |

In questa prima analisi non é stato interposto alcun materiale particolare tra la sorgente e il rivelatore. La radiazione emessa dalla sorgente attraversava esclusivamente l'aria presente tra essa e i rivelatori.

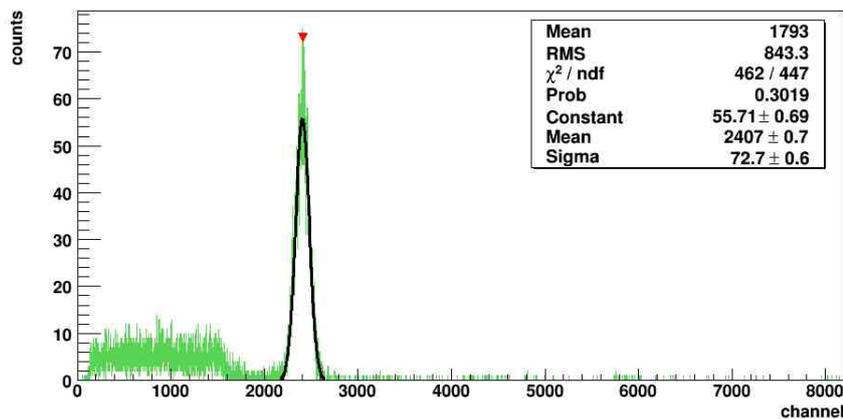


Figura 3.2: Esempio di fit sul picco di conteggi in coincidenza

Il procedimento da noi utilizzato nelle misure é stato il seguente. Una volta posizionata la sorgente, abbiamo effettuato delle misure di coincidenza ad angoli differenti e per ogni angolo abbiamo calcolato il numero di conteggi in

coincidenza in corrispondenza dei fotoni da 511 keV. Questo é stato possibile utilizzando un fit gaussiano sullo spettro ottenuto (vedi figura 3.2).

Ripetendo questa operazione per diversi angoli é stato possibile, interpolando i risultati ottenuti, determinare l'angolo che massimizzava il numero di conteggi in coincidenza come visibile nel grafico 3.3.

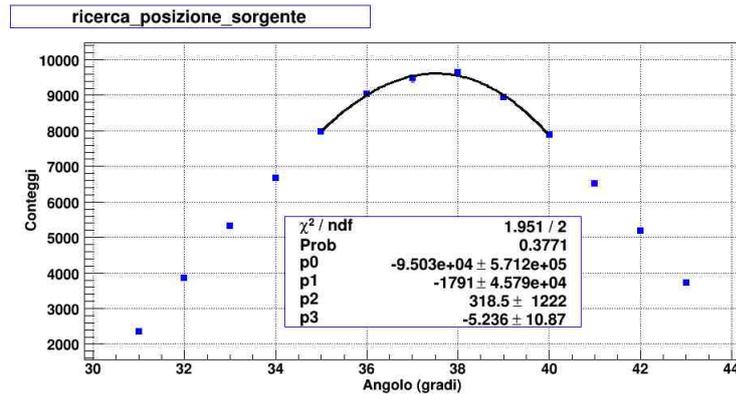


Figura 3.3: Esempio di interpolazione al fine di ottenere l'angolo che massimizza il numero di conteggi

L'interpolazione é stata effettuata eseguendo un fit nella regione di interesse con una funzione polinomiale di terzo grado, in quanto l'andamento dei punti non era noto e non seguiva una funzione particolare. Dai parametri di quest'ultima si é ricavato la misura dell'angolo. Si puó notare che **gli errori sui parametri sono dello stesso ordine di grandezza del valore dei parametri stessi.** Questo é dato dal fatto che, eseguendo un fit su un numero basso di punti con una funzione di terzo grado le incertezze siano inevitabilmente alte. Queste incertezze, derivanti esclusivamente dal calcolo numerico, non sono state tenute in considerazione e sono state sostituite da un'incertezza dovuta alla parte strumentale sulla determinazione dell'angolo di $\pm 0,5$ gradi. Una volta ottenuto il valore dell'angolo é stato possibile risalire alla posizione della sorgente utilizzando la formula precedentemente enunciata. Lo stesso procedimento é stato utilizzato spostando la sorgente in posizioni differenti lungo l'asse e i risultati ottenuti sono riassunti nella seguente tabella.



| posizione reale | posizione ottenuta | angolo |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| (0.0300 ± 0.0005) m | (0.0321 ± 0.0011) m | $(14.5 \pm 0.5)^\circ$ |
| (0.0490 ± 0.0005) m | (0.0499 ± 0.0011) m | $(23.0 \pm 0.5)^\circ$ |
| (0.0690 ± 0.0005) m | (0.0656 ± 0.0012) m | $(29.5 \pm 0.5)^\circ$ |
| (0.0820 ± 0.0005) m | (0.0767 ± 0.0012) m | $(34.0 \pm 0.5)^\circ$ |
| (0.0940 ± 0.0005) m | (0.0885 ± 0.0012) m | $(39.0 \pm 0.5)^\circ$ |
| (0.1070 ± 0.0005) m | (0.1000 ± 0.0013) m | $(43.5 \pm 0.5)^\circ$ |
| (0.1180 ± 0.0005) m | (0.1116 ± 0.0013) m | $(48.0 \pm 0.5)^\circ$ |

Dai risultati ottenuti si può notare come la risposta del sistema di misura sia precisa per angoli minori di 30° mentre peggiore ad angoli superiori. Per riassumere i risultati ottenuti e rendere evidente la risposta dell'apparato di rivelazione è stato effettuato un grafico (vedi grafico 3.4) in cui sull'asse delle ascisse è stato messo il valore reale della posizione e sull'asse delle ordinate il valore della posizione ottenuta dall'apparato sperimentale.

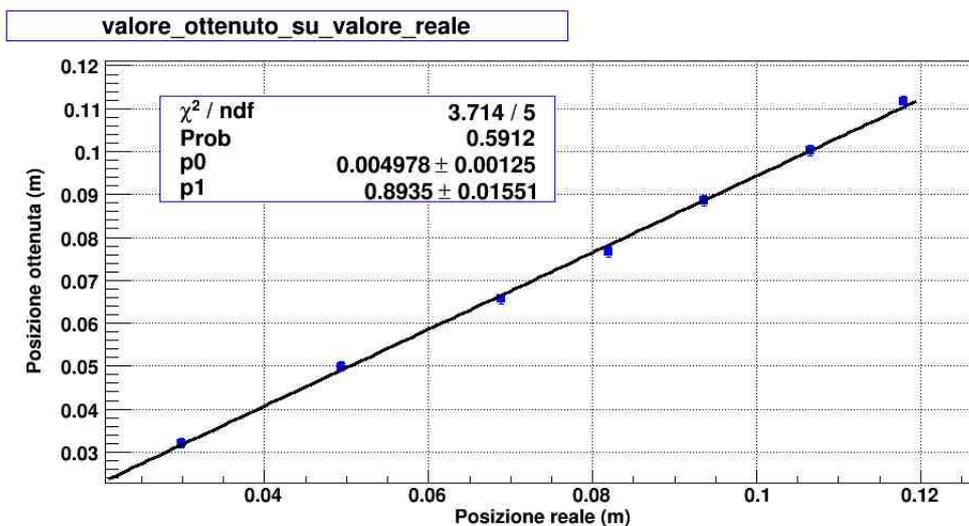


Figura 3.4: Grafico riassuntivo sulla ricerca della posizione della sorgente

Se le misure reali e quelle ottenute coincidessero l'interpolazione darebbe come risultato una retta con coefficiente angolare uguale a uno e intercetta nulla. I risultati da noi ottenuti, considerando le incertezze sperimentali, non si discostano molto da questa situazione ideale. **L'andamento lineare dei punti dimostra la linearità della risposta del rivelatore.** Tuttavia il valore più basso del coefficiente angolare della retta può rappresentare la presenza di una sistematica legata alla strumentazione.



3.3 Effetti dovuti all'attenuazione di materiale interposto tra la sorgente e il rivelatore

Nelle misure successive é stato interposto del materiale tra la sorgente e il rivelatore attraverso l'utilizzo di un contenitore Marinelli. I materiali utilizzati sono stati acqua, riso e sale. Per la valutazione dell'attenuazione di questi materiali é stata posta la sorgente al centro dell'area attiva dei rivelatori, cioé a 2.8 cm, e i rivelatori sono stati posizionati collinearmente. Sono state prese delle misure della stessa durata e sono stati confrontati i conteggi in coincidenza. Nel grafico 3.5 si possono vedere i risultati del confronto delle attenuazioni dei differenti materiali.

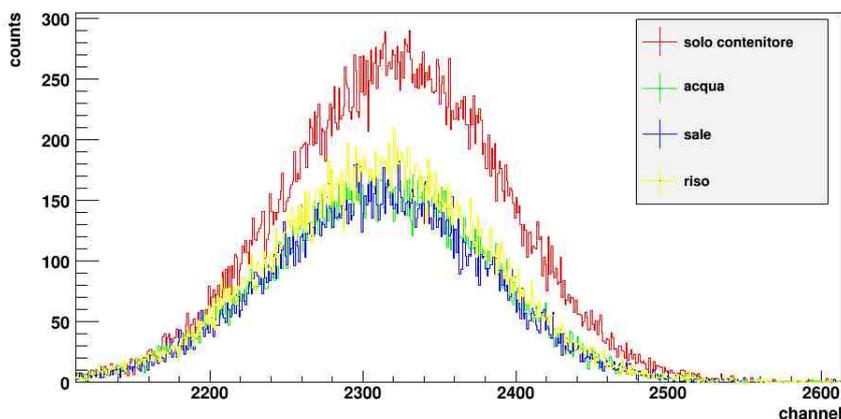


Figura 3.5: Attenuazione dei diversi materiali utilizzati

Il passo successivo é stato quello di ripetere le misure di ricerca della posizione della sorgente, precedentemente svolte in aria, con materiale interposto tra la sorgente e il rivelatore. Lo scopo é stato di valutare gli effetti prodotti dalla presenza di materiale interposto sulla precisione dell'apparato di misura per la ricerca della posizione. Il procedimento é stato del tutto analogo a quello seguito nel paragrafo precedente. Le prime misurazioni sono state effettuate utilizzando l'acqua come materiale attenuante. I risultati sono riportati nella tabella seguente.

| acqua | | |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| posizione reale | posizione ottenuta | angolo |
| $(0.0300 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0335 \pm 0.0011)\text{m}$ | $(15.3 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.0490 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0502 \pm 0.0011)\text{m}$ | $(22.7 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.0690 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0663 \pm 0.0011)\text{m}$ | $(29.7 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.0940 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0893 \pm 0.0012)\text{m}$ | $(39.2 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.1070 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.1016 \pm 0.0013)\text{m}$ | $(44.2 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.1180 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.1107 \pm 0.0013)\text{m}$ | $(47.8 \pm 0.5)^\circ$ |

I valori delle posizioni ottenute sono stato plottati sui valori della posizione reale per valutare la precisione dell'apparato di misura come era stato fatto per i valori ottenuti avendo come unico materiale tra la sorgente e il rivelatore l'aria.

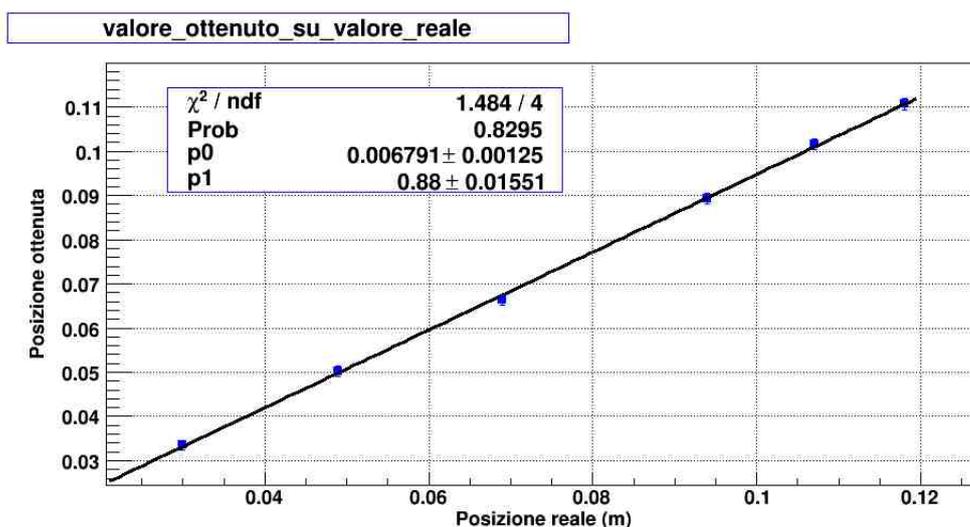


Figura 3.6: Grafico riassuntivo sulla ricerca della posizione con acqua come materiale attenuatore

Le stesse misure sono state ripetute utilizzando come materiale interposto tra la sorgente e il rivelatore il sale. Il procedimento é stato del tutto analoga a quello precedentemente descritto per l'acqua e i risultati sono riassunti nella seguente tabella.

| sale | | |
|-------------------|--------------------|-------------|
| posizione reale | posizione ottenuta | angolo |
| (0.0300±0.0005) m | (0.0340±0.0011) m | (15.5±0.5)° |
| (0.0490±0.0005) m | (0.0506±0.0011) m | (22.9±0.5)° |
| (0.0690±0.0005) m | (0.0650±0.0012) m | (29.2±0.5)° |
| (0.0940±0.0005) m | (0.0890±0.0012) m | (39.2±0.5)° |
| (0.1070±0.0005) m | (0.0986±0.0013) m | (43.1±0.5)° |
| (0.1180±0.0005) m | (0.1087±0.0013) m | (46.9±0.5)° |

Di nuovo é stato plottato il valore ottenuto sperimentalmente in funzione della posizione in cui era stata posta la sorgente.

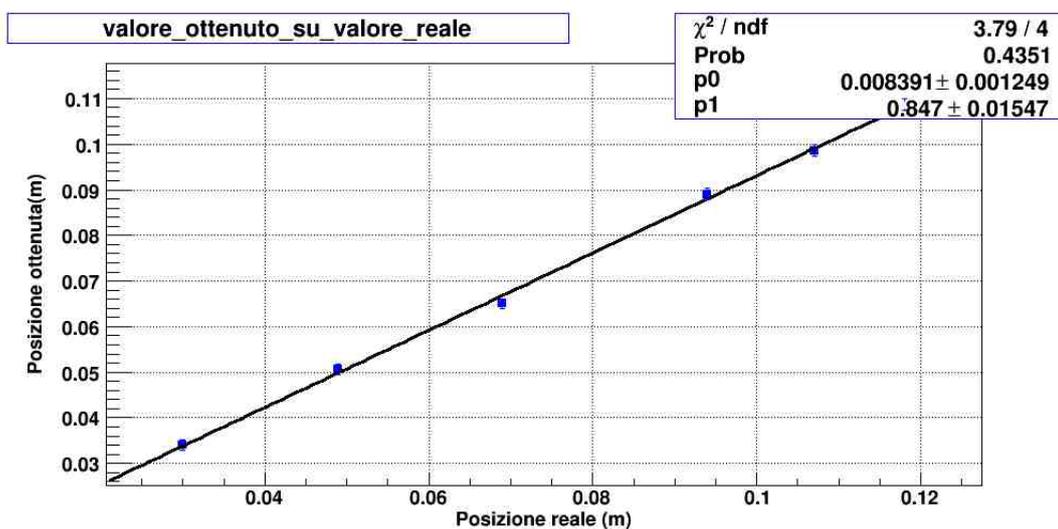


Figura 3.7: Grafico riassuntivo sulla ricerca della posizione della sorgente con sale interposto tra il rivelatore e la sorgente stessa

Come ultima misura, si é voluto studiare l'effetto di attenuazione del riso interposto tra la sorgente e il rivelatore. Le misure sono state effettuate con il procedimento utilizzato sia per l'acqua che per il sale. La tabella con i risultati ottenuti con il riso é qui riportata.

| riso | | |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| posizione reale | posizione ottenuta | angolo |
| $(0.0300 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0299 \pm 0.0011)\text{m}$ | $(13.7 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.0490 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0480 \pm 0.0011)\text{m}$ | $(21.8 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.0690 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0666 \pm 0.0012)\text{m}$ | $(29.8 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.0940 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.0874 \pm 0.0012)\text{m}$ | $(38.6 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.1070 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.1001 \pm 0.0013)\text{m}$ | $(43.6 \pm 0.5)^\circ$ |
| $(0.1180 \pm 0.0005)\text{m}$ | $(0.1099 \pm 0.0013)\text{m}$ | $(47.5 \pm 0.5)^\circ$ |

Anche in questo caso i risultati sono stati riassunti nel grafico 3.8 dove sono stati plottati la posizione ottenuta in funzione di quella reale.

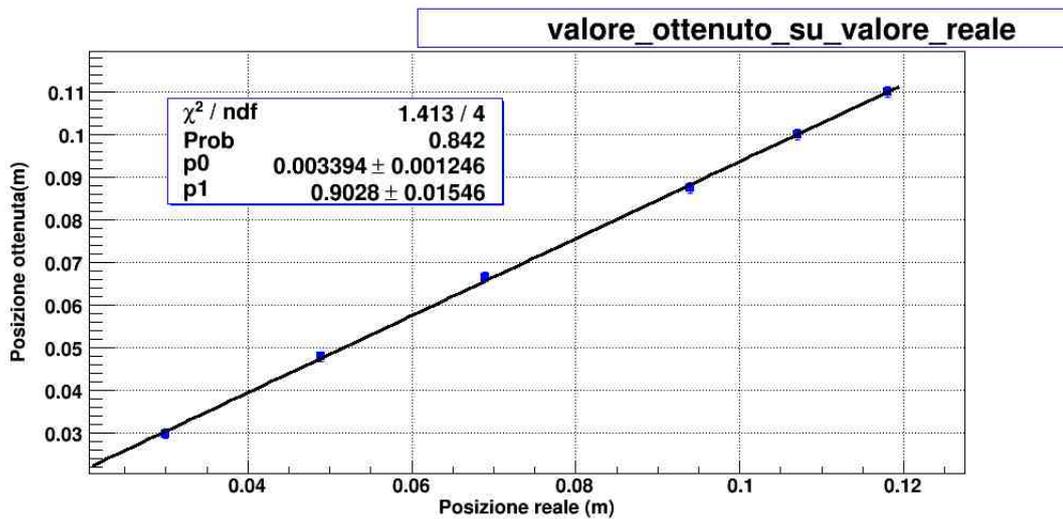


Figura 3.8: Grafico riassuntivo sulla ricerca della posizione della sorgente con riso interposto tra il rivelatore e la sorgente stessa

Capitolo 4

Conclusioni

Il fine dell'esperimento è quello di riprodurre la PET (Positron Emission Tomography), ovvero ricostruire la posizione ignota di una sorgente radioattiva. Tuttavia le condizioni sperimentali dell'esame medico e quelle in laboratorio si discostano significativamente sia negli strumenti utilizzati sia nelle dimensioni e caratteristiche della sorgente radioattiva. La catena elettronica di lettura è stata ottimizzata al fine di ottenere la miglior risoluzione energetica possibile ed è stata costruita un sistema di misura in coincidenza. Sono state effettuate sia misura in cui era presente solo aria sia interponendo tra sorgente e rivelatori diversi materiali: acqua, riso e sale. La presenza del materiale causa un'attenuazione del numero di conteggi, **il quale diminuisce di circa un fattore 3. La precisione** delle misure volte a ricostruire la posizione **non è modificata** dal materiale interposto, questo è molto importante nell'ottica dell'esame medico, in cui il radionuclide è all'interno del corpo umano e quindi circondato da diversi tipi di materiale. La posizione della sorgente è stata ricostruita a partire dall'angolo per il quale si è ottenuto il numero di conteggi massimo. I risultati ottenuti per angoli minori di 30° sono compatibili con la posizione "reale" all'interno degli errori sperimentali. Per angoli maggiori la discrepanza tra il valore ottenuto e quello reale è maggiore, **questo è dovuto alla carenza dell'apparato sperimentale (goniometro) nella determinazione dell'angolo**, ciò implica che non è stato possibile eseguire misure ad angoli distanti meno di un grado, risultando in un esiguo numero di punti nelle vicinanze del massimo e quindi in un fit dei dati peggiore.