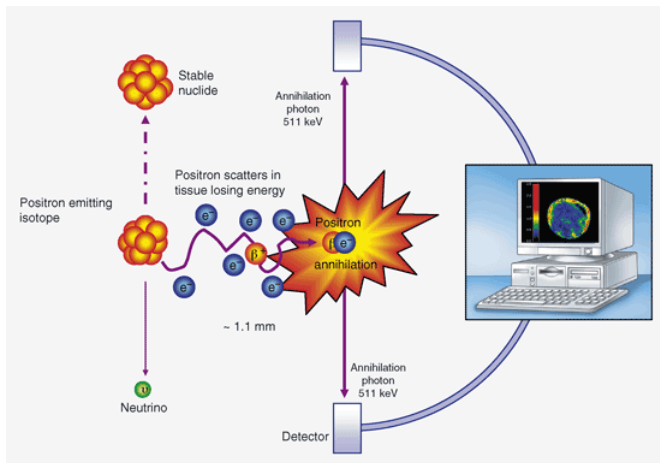


1 Introduzione

La Positron Emission Tomography (PET) è una tecnica utilizzata in medicina nucleare, prevalentemente in oncologia, per ottenere informazioni di tipo diagnostico mediante immagini funzionali della zona corporea d'interesse. Un esame PET inizia con la somministrazione al paziente per via endovenosa di una sostanza metabolicamente attiva e marcata con un radioisotopo di breve vita media.

Il composto così assunto (tipicamente uno zucchero) ha come destinazione finale l'assorbimento da parte delle cellule e l'identificazione di quelle tumorali grazie alla maggiore concentrazione della sostanza iniettata presente in quest'ultime (le zone soggette allo sviluppo di un tumore hanno un metabolismo molto accelerato rispetto alle zone circostanti).

Gli isotopi che trovano maggiore applicazione in questo ambito decadono soprattutto β^+ , dando poi luogo ad annichilazione a seguito dell'interazione con un elettrone presente nella materia. Nel processo di annichilazione vengono prodotti due fotoni, ciascuno da 511 keV di energia, emessi back-to-back per la conservazione del momento del sistema.



Tra i radioisotopi più utilizzati si trovano: il ^{11}C , l' ^{15}O , il ^{18}F e l' ^{13}N .

Data la geometria dell'evento un apparato PET richiede coppie di rivelatori in grado di coprire la maggior parte della superficie sferica centrata intorno all'emettitore.

Ogni coppia, per mezzo di un apparato di coincidenza temporale, rivela entro un intervallo di pochi nanosecondi i due fotoni emessi; in modo da poterli considerare come provenienti dalla medesima interazione.

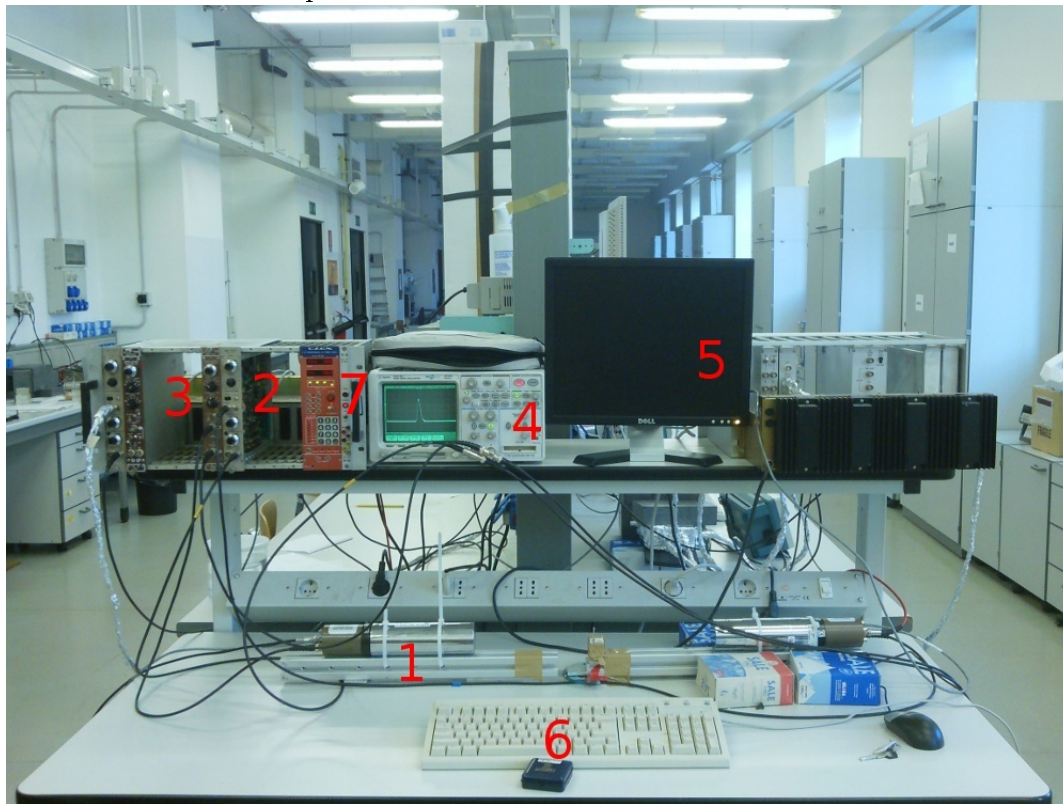
Grazie a questa serie di misurazioni è possibile ottenere un'immagine 3D della regione spaziale di interesse e, servendosi anche della tecnica dell'imaging, che sia rappresentativa anche delle varie informazioni provenienti dalle diverse coppie di rivelatori.

1.1 Scopo dell'esperienza

L'obiettivo dell'esperienza di laboratorio ha riguardato l'allestimento di un apparato PET servendosi di due scintillatori inorganici e di una strumentazione elettronica per misure di coincidenza temporale; la determinazione della posizione della sorgente tramite l'analisi degli spettri ottenuti e la verifica degli effetti di assorbimento al variare del mezzo interposto.

2 Strumentazione utilizzata

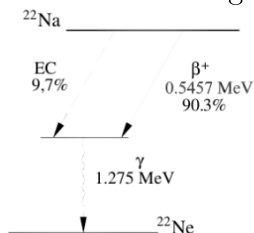
In figura è possibile osservare la strumentazione utilizzata e, di seguito, sono presentate e analizzate le diverse componenti.



- Due scintillatori inorganici ORTEC 276 a Ioduro di Sodio (NaI) da 2" (1)
- Amplificatore ORTEC 570 (AMP) (3)
- AMP-TISCA SILENA 7616 (2)
- MultiChannel Analyzer TRIUMP PCI 2K (MCA) integrato nel calcolatre (5)
- Generatore di tensione C.A.E.N. MOD. N470 (7)
- Sorgente di ^{22}Na da 370 KBq (6)
- Oscilloscopio (4)

2.1 La sorgente

Tra i due rivelatori è stata posta una sorgente radioattiva puntiforme di ^{22}Na che decade β^+ con un Branching Ratio del 90.3% con tempo di dimezzamento pari a 2.6 anni.



2.2 Gli Scintillatori

Uno scintillatore è un rivelatore di particelle ionizzanti basato sulla conversione dell'energia del quanto rivelato in un fotone.

Un rivelatore di questo tipo presenta una scarsa risoluzione rispetto ai rivelatori a stato solido, ma è vantaggioso per quanto riguarda la velocità di risposta e l'alta efficienza di rivelazione. Vi sono due tipologie di scintillatori, organici e inorganici, in relazione alla natura dell'elemento chiave dell'apparato di rivelazione utilizzato.

I primi sono costituiti da molecole aromatiche in cui la radiazione incidente eccita gli stati rotazionali o vibrazionali.

Trovano impiego prevalentemente nella Spettroscopia Beta e nella rivelazione dei neutroni veloci, grazie all'elevata velocità di risposta (dell'ordine dei nanosecondi).

Gli scintillatori inorganici sono invece più lenti, con un tempo di raccolta dell'ordine delle centinaia di nanosecondi, e si distinguono positivamente dai precedenti per un elevato stopping power, in grado di favorire la completa raccolta e rivelazione della carica deposta.

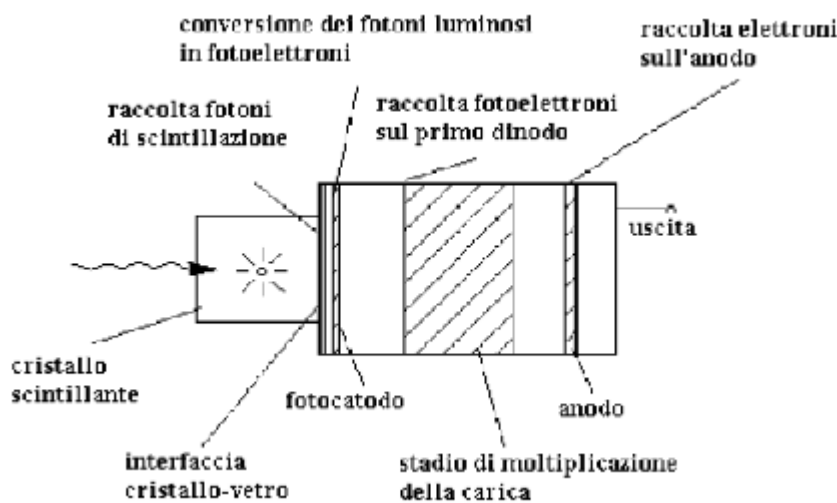
Il meccanismo di scintillazione dipende dai livelli energetici discreti, determinati dalla struttura cristallina del materiale, sui quali gli elettroni possono transire.

Di norma si utilizzano semiconduttori i cui cristalli sono sovente drogati per aumentare l'efficienza di scintillazione e ridurre così l'autoassorbimento.

2.3 Il Fotomoltiplicatore

L'interazione fotoelettrica del fotone con il cristallo porta all'emissione isotropa di luce di scintillazione in proporzione all'energia del fotone incidente e all'efficienza di scintillazione del cristallo.

La luce così prodotta deve essere convertita in un segnale che sia utile a un apparato elettronico di misura ed è in questo step fondamentale che entra in gioco il fotomoltiplicatore.



Un generico fotomoltiplicatore è composto da un fotocatodo e da un tubo di moltiplicazione.

Il fotocatodo ha il compito di convertire i fotoni di luce incidente in elettroni di bassa energia attraverso 3 step:

- Assorbimento del fotone incidente e trasferimento dell'energia ad un elettrone
- Migrazione dell'elettrone verso la superficie del fotocatodo
- Fuga dell'elettrone dal fotocatodo, con una energia di circa 1-2 eV

Affinché la radiazione trasmessa al fotocatodo sia massima è importante che l'accoppiamento ottico tra cristallo e vetro venga ottimizzato, minimizzando così le perdite per riflessione sulle pareti laterali del cristallo e quelle per autoassorbimento.

Gli elettroni ottenuti tramite il fotocatodo non sono però sufficienti a comporre un segnale utile per una attività di misura.

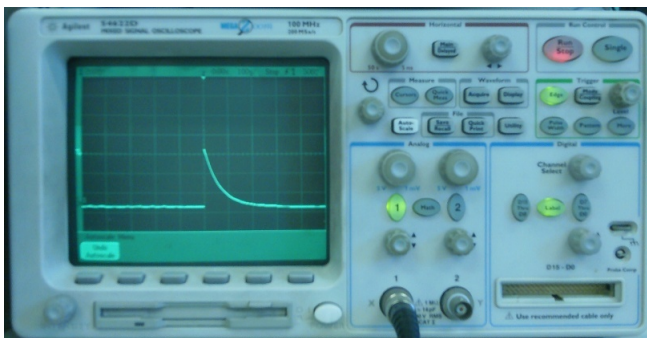
Diventa fondamentale utilizzare uno strumento in grado di ampliare il loro numero, rendendolo così funzionale alla creazione di un segnale adeguato.

L'apparato dedicato al compito appena descritto è il fotomoltiplicatore. Gli elettroni in migrazione dal fotocatodo vengono moltiplicati da una serie di dinodi, al cui termine vi è un anodo; dove avviene la raccolta della carica prodotta e lo sviluppo del segnale.

Ad ogni interazione di un quanto di radiazione si ottiene un segnale in tensione con ampiezza proporzionale all'energia del fotone incidente.

2.4 Formatura e amplificazione dell'impulso

La carica raccolta all'anodo non è però sufficiente per l'attività di misura. Il preamplificatore, e l'amplificatore poi, ha il compito di amplificare e formare il segnale in relazione alla richiesta della specifica attività sperimentale.



Segnale in uscita al preamplificatore

Il preamplificatore è tipicamente posto il più vicino possibile al rivelatore stesso, con lo scopo di minimizzare ogni fonte di rumore in grado di sporcare il segnale non ancora amplificato.

2.5 L'apparato di coincidenza

Arrivati a questo punto è possibile dividere il sistema in due rami operativi, ciascuno caratterizzato dalla presenza di uno scintillatore con una differente funzione.

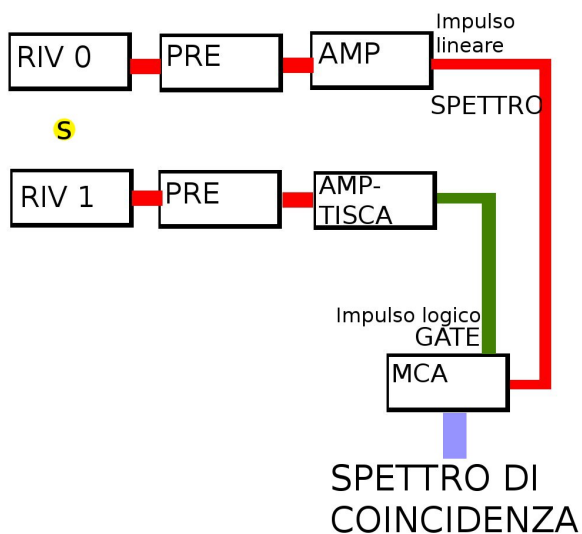
Il primo di questi è collegato all'amplificatore lineare al fine di aumentare, con un opportuno guadagno, il segnale in entrata.

L'uscita dell'amplificatore è collegata ad un Multi Channel Analyzer (MCA) integrato nel calcolatore, con il compito di andare a comporre lo spettro differenziale.

Il secondo scintillatore, associato al secondo ramo, è collegato ad un AMP-TISCA, che amplifica il segnale proveniente dal PRE-AMP e, tramite il Single Channel Analyzer (SCA) che permette di impostare un low level (LL) e un intervallo in energia (ΔE) definito a partire dalla soglia inferiore, genera un'onda quadra ogni volta che l'impulso in input abbia una ampiezza compresa tra due livelli selezionati, ovvero quando venga rivelato un fotone di una energia compresa fra due determinati livelli energetici.

Questa uscita, portandola in entrata all'MCA nella funzione GATE, fa sì che lo spettro sia composto solo da conteggi appartenenti alla finestra selezionata.

Lo spettro di coincidenza viene ottenuto operando su MAESTRO, il software presente sul calcolatore associato all'MCA, affinché registri solo e unicamente i conteggi presi in coincidenza temporale.



In figura è riassunta la configurazione dell'apparato sperimentale

3 Calibrazione apparato strumentale

Nell'ottica di ottenere spettri che diano informazioni utili per la ricostruzione della posizione della sorgente è fondamentale che i rivelatori, così come le altre componenti dell'apparato sperimentale, siano messi in condizione di ottimo operativo.

3.1 Caratterizzazione rivelatori

Risulta fondamentale impostare i parametri di lavoro quali la tensione operativa del rivelatore, il guadagno e la formatura del segnale.

Il parametro che viene preso come rappresentativo della condizione di lavoro in cui un rivelatore è posto è la risoluzione energetica.

Viene definita come $R = \frac{FWHM}{E}$ dove con la FWHM (Full Width Half Maximum) si intende la larghezza a metà altezza del picco energetico in esame e con E il valore dell'energia del picco.

Nell'ottica di ottenere misure il più precise possibile e data la non idealità del rivelatore è necessario porsi nelle condizioni di migliore risoluzione disponibile.

L'allargamento dei picchi osservati è causato principalmente dal rumore statistico e dal rumore elettronico. Il fatto che la risoluzione energetica sia influenzata dal rumore statistico deriva dalla natura discreta della carica generata all'interno del rivelatore.

Utilizzando la statistica di Poisson si arriva a una relazione fondamentale tra la risoluzione R e il numero dei portatori di carica generati N :

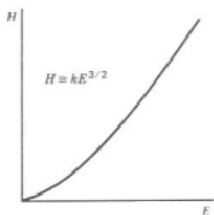
$$R = \frac{2,35}{\sqrt{N}}$$

Questa trova diretto utilizzo nel processo di ottimizzazione della tensione descritta nel prossimo paragrafo; ottimizzando la tensione e quindi il fattore di moltiplicazione dei dinodi si aumenta il numero N di portatori di carica e, di conseguenza, si migliora la risoluzione.

3.1.1 Determinazione della tensione di lavoro

Per ottenere il valore ottimale di tensione, questa è stata fatta variare da 500V a 900V con step di 50V.

Ad ogni passo è stato modificato il guadagno dell'amplificatore in modo tale che il picco energetico d'interesse, rappresentativo del 511 keV, fosse posto circa a metà spettro in modo da poter considerare il più lineare possibile la risposta dello scintillatore ($H = kE^{3/2}$).



Risposta dello scintillatore

Si sottolinea che, avendo come scopo l'ottenimento della maggiore linearità possibile, sarebbe stato superfluo effettuare una calibrazione energetica dello spettro.

Di conseguenza, per il calcolo della risoluzione si è diviso il valore della FWHM, anziché per l'energia, per il valore del canale corrispondente alla centroide del picco.

L'analisi e il fit degli spettri ottenuti è stata svolta con un programma sviluppato in ROOT in grado di fittare una gaussiana su fondo quadratico, estraendone così il valore della FWHM (in allegato il codice).

Di seguito si riportano i valori ottenuti di risoluzione al variare della tensione per entrambi i rivelatori.

Tensione	Risoluzione %
500	11,39
550	10,64
600	10,16
650	7,82
700	7,51
750	7,50
800	7,38
850	7,40
900	7,52

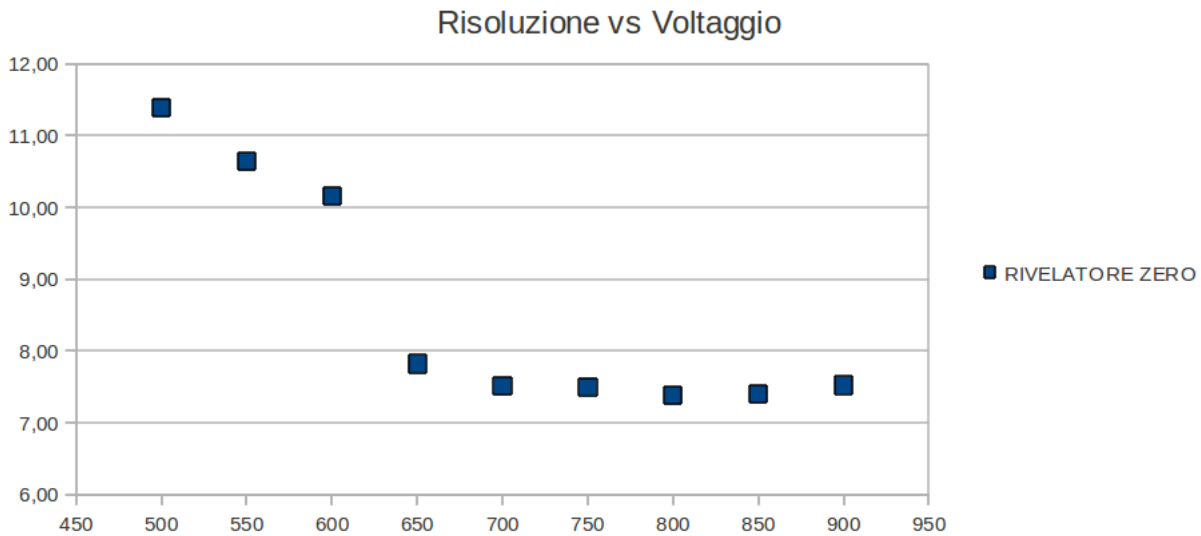
Determinazione della tensione di lavoro per il rivelatore 0

Tensione	Risoluzione %
500	7,43
550	7,26
600	7,25
650	7,27
700	7,25
750	7,23
800	7,14
850	7,18
900	7,19

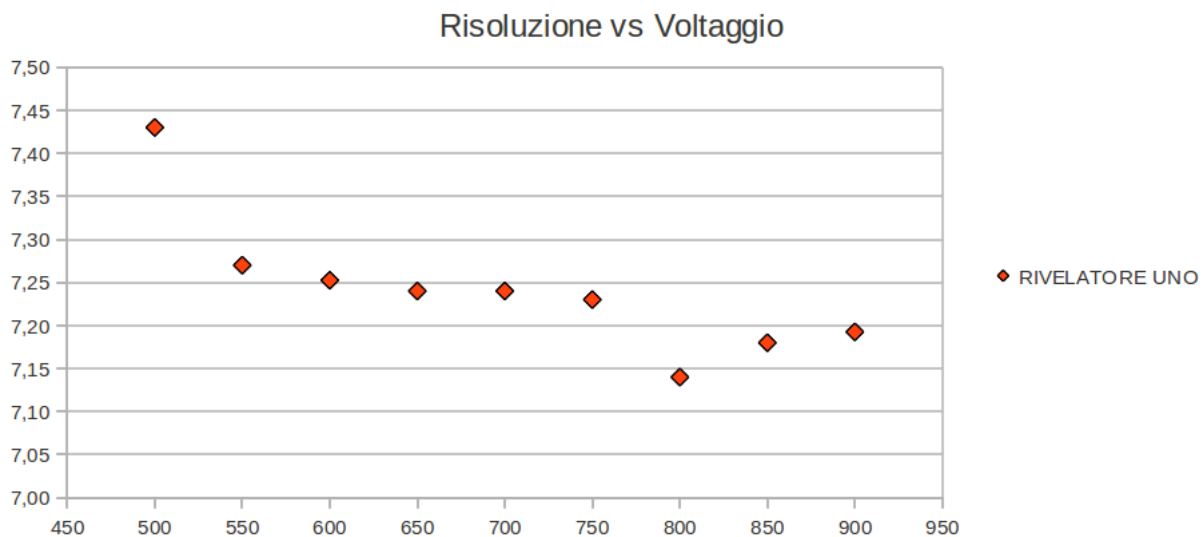
Determinazione della tensione di lavoro per il rivelatore 1

Date le informazioni ottenute è stata fissata a 800 V la tensione di lavoro di entrambi gli scintillatori.

Dati questi risultati si è deciso di affidare la funzione di gate al rivelatore 1 (migliore risoluzione), per ottenere maggiore efficienza nelle successive misure di coincidenza.



Risoluzione in funzione della tensione applicata per il rivelatore 0 SPETTRO



Risoluzione in funzione della tensione applicata per il rivelatore 1 GATE

3.1.2 Determinazione dello Shaping Time

Fissati i valori della tensione di lavoro si è proceduto alla determinazione dello shaping time, parametro che riguarda il tempo di formatura del segnale durante il processo di preamplificazione.

In generale con un basso shaping time si osserva un allargamento del picco a sinistra, conseguenza della raccolta incompleta della carica, mentre per shaping time alti la risoluzione migliora, incrementando il rischio di pile-up.

Nella scelta del tempo di formatura entra in gioco anche la componente di rumore dovuta all'elettronica, dove per rumore si intende qualsiasi fluttuazione indesiderata che si sovrapponga al segnale della sorgente.

Il rumore elettronico viene identificato generalmente come in serie, dato dal moto termico dei portatori, o come rumore in parallelo, dovuto alla corrente di buio (corrente che passa all'anodo anche quando il fotocatodo non è illuminato).

Ad un maggiore tempo di formatura corrisponde un'aumento della componente in parallelo e diminuisce quella in serie, viceversa abbassandolo.

Di seguito si riportano i valori della risoluzione al variare dello shaping time, a tensione di lavoro ottimale già fissata.

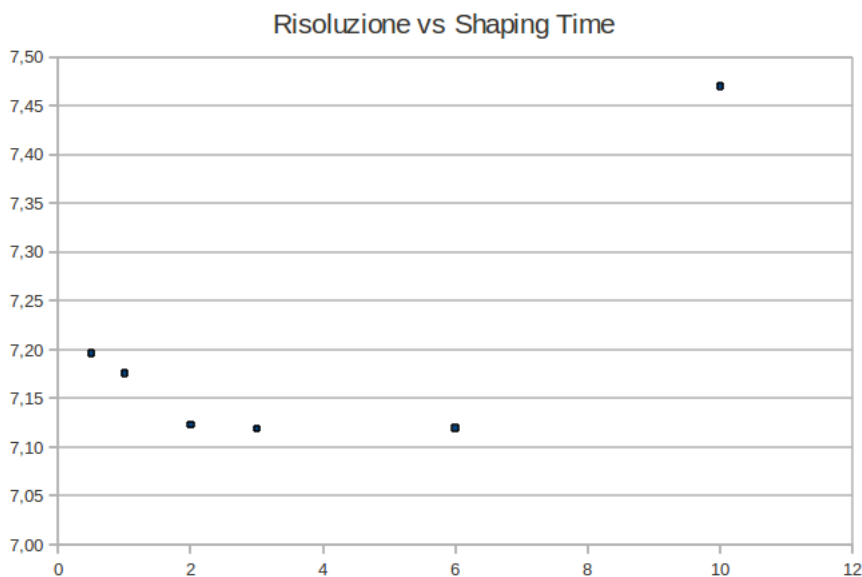
Shaping Time (us)	Risoluzione %
0,5	7,38
1	7,20
2	7,18
3	7,18
6	7,20
10	7,47

Determinazione dello Shaping time per il rivelatore 0

Shaping Time (us)	Risoluzione %
0,5	7,14
2	7,11

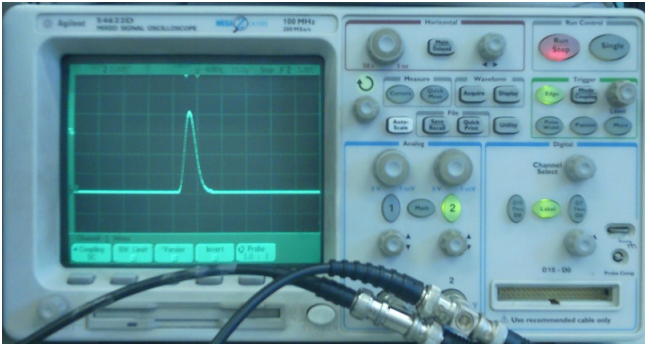
Determinazione dello Shaping time per il rivelatore 1

Per il rivelatore 0 si è deciso di scegliere come Shaping Time 2 us mentre per il rivelatore 1 la scelta era vincolata dalle due possibili opzioni offerte dal modulo AMP-SCA.



Risoluzione in funzione dello Shaping Time per il rivelatore 0

Per ques'ultimo, dato che la risoluzione energetica nei due casi variava di qualche centesimo di percentuale è stato scelto uno shaping time di $0,5\mu s$ in quanto più adatto alle misure in coincidenza successivamente descritte.



Segnale formato in uscita all'amplificatore

3.2 Configurazione del sistema di coincidenza

In questa fase dell'attività di laboratorio ci si è concentrati sul realizzare la coincidenza tra il segnale proveniente dal rivelatore 1 (GATE) e il segnale proveniente dal rivelatore 0 (SPET-TRO) in modo tale che l'MCA possa accettare solo i segnali utili all'attività sperimentale.

Per ottenere un sistema che lavorasse in coincidenza è innanzitutto necessario impostare la finestra energetica centrata sull'energia di interesse (Lower Level e ΔE), nel nostro caso il picco di 511 keV , a questo scopo si è proceduto nel seguente modo.

La strada che si presentava come più intuitiva per la messa a punto dell'apparato consisteva nel lavorare in autocoincidenza con il rivelatore 1 utilizzando le due uscite del modulo AMP-TISCA (uscita *gate* e uscita *amp*), strada che si è dovuta abbandonare in quanto l'uscita *gate* si presentava in anticipo di 200 ns rispetto all'uscita *amp*.

In un primo momento si è pensato di utilizzare dei moduli di ritardo che potessero in qualche modo intervenire ma l'idea è stata scartata in favore della seguente.

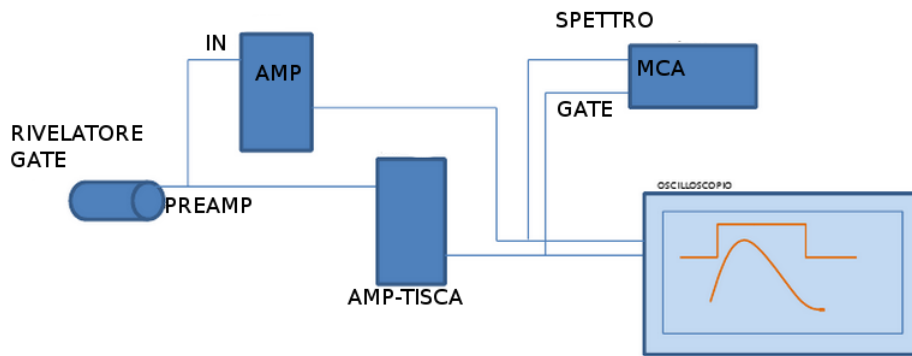
Si è provato ad utilizzare la velocità del segnale anodico del rivelatore GATE per ovviare al problema dei 200 ns ; incappando però nella problematica relativa alla negatività di questo segnale, incompatibile con la SCA.

La soluzione è consistita nello sdoppiare il segnale proveniente dal preamplificatore del rivelatore 1 (GATE) e indirizzare uno dei due rami al modulo AMP-TISCA utilizzando l'uscita *gate* di questo con l'ingresso Gate dell'MCA e il secondo al modulo AMP portando l'uscita di quest'ultimo all'ingresso Spettro dell'MCA.

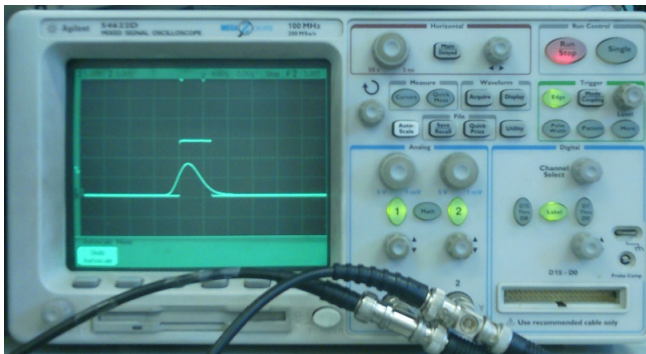
In questo modo non si è riscontrato ritardo fra i due segnali ed è stato possibile, dopo una opportuna regolazione della larghezza dell'impulso logico di *gate* a $6\text{ }\mu s$ tramite un regolatore interno, impostare la finestra energetica in modo opportuno.

In definitiva, il sistema di misura si presenta con i seguenti settaggi:

- Rivelatore 0 (SPETTRO) -> Gain: 20 - Shaping Time: 2 us
- Rivelatore 1 (GATE) -> Gain: 16,16 (4 x 4,04) - Shaping Time: 0,5 us - LLD: 3,52 - ΔE : 2,18



Configurazione utilizzata per impostare i due livelli della finestra dello SCA



Segnale di gate all'oscilloscopio

3.3 Determinazione della distanza ottimale della sorgente

L'ultimo passo nella messa a punto del sistema di misura consiste nel determinare la posizione intermedia fra i due rivelatori della sorgente, nell'ottica di massimizzare il numero di conteggi ottenibili.

Si è proceduto ad una serie di misure muovendo un rivelatore lungo la verticale per ottenere l'andamento dei conteggi in funzione della distanza della sorgente.

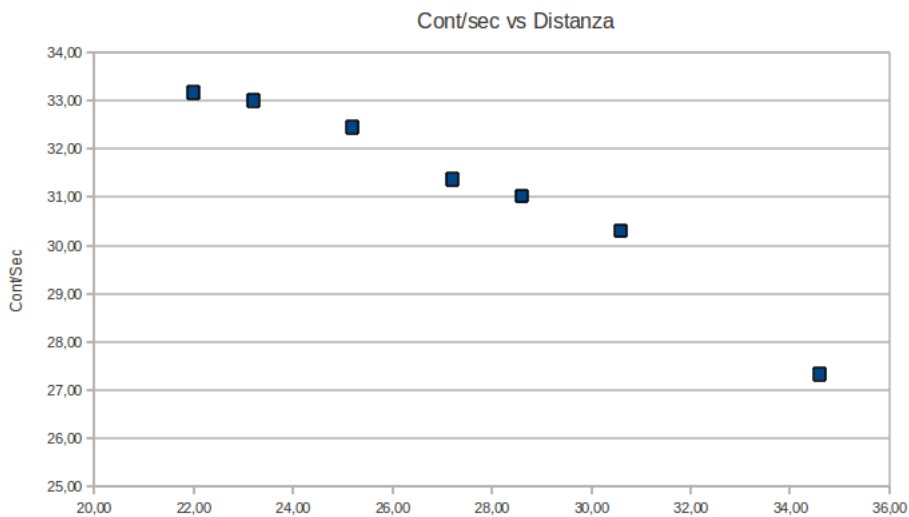
Di seguito i risultati ottenuti (la sorgente utilizzata durante questa operazione non ha la stessa attività di quella utilizzata in tutto il resto della attività di laboratorio).

Distanza (cm)	Conteggi al secondo
22,00	33,17
23,20	33,01
25,20	32,45
27,20	31,37
28,60	31,02
30,60	30,30
34,60	27,33
55,5	7,39

Conteggi al secondo in funzione della distanza

La distanza riportata in tabella è intesa come lo spazio compreso fra la posizione della sorgente e il fronte del rivelatore spostato.

Come naturale, data la geometria del sistema, i conteggi diminuiscono allontanandosi dalla sorgente. Si è scelto di continuare le misure fino a 22cm, posizione poi scelta come definitiva per il rivelatore in quanto identica alla distanza dell'altro rivelatore dalla sorgente (una buona simmetria, anche numerica, facilita le operazioni di parametrizzazione durante l'attività di programmazione del calcolatore al fine di simulare l'esperimento).



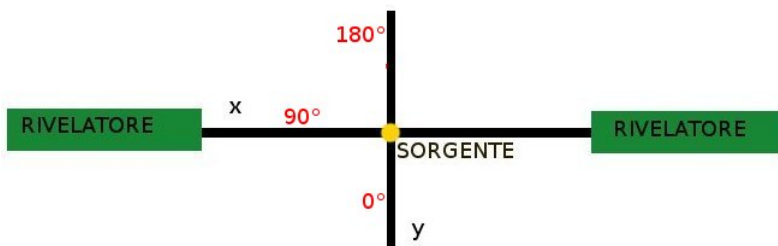
Conteggi al secondo in funzione della distanza

4 Determinazione della posizione della sorgente

La scelta dell'utilizzo di un apparato PET risiede principalmente nella possibilità offerta da questa tecnica di localizzare, con un certo grado di precisione, la massa tumorale attraverso la conoscenza della posizione del radionuclide assorbito da quest'ultima.

Nell'ambito di questa esperienza di laboratorio, una volta che i rivelatori siano stati posti nelle migliori condizioni di lavoro attraverso il processo di ottimizzazione descritto nei paragrafi precedenti, grande parte del lavoro si è incentrata sulla localizzazione della posizione della sorgente.

Per arrivare alla conoscenza delle coordinate spaziali del radionuclide si è deciso di svolgere una serie di misure al fine di ottenere la distribuzione del rate di conteggio delle coincidenze al variare dell'angolo, fissato un certo posizionamento della sorgente lungo l'asse delle y .



La distribuzione così ottenuta, supponendo di non conoscere la reale posizione della sorgente, è stata confrontata con una distribuzione teorica.

Infine, attraverso il test del Chi-Quadro, si è risaliti alla localizzazione della sorgente; riuscendo inoltre a quantificare l'incertezza associata alla localizzazione di quest'ultima.

4.1 Scelta del metodo di determinazione della posizione

Al fine di conoscere le coordinate spaziali della sorgente è necessario scegliere l'approccio operativo più efficace e con il minore numero di difficoltà dal punto di vista della parametrizzazione del sistema.

Fra le diverse soluzioni prese in esame vi era la possibilità di utilizzare un approccio al problema di tipo analitico; consistente nel ricavare una funzione in grado di descrivere l'andamento del rate di conteggi al variare dell'angolo da confrontare con la distribuzioni sperimentali.

In alternativa si presentava anche la possibilità di implementare al calcolatore un codice Monte Carlo che riproducesse, in modo più efficace possibile, il sistema di misura e la fisica dell'esperimento.

Si è scelto di sviluppare lo studio della determinazione della posizione della sorgente percorrendo la seconda strada, descritta in ogni suo passo nei paragrafi che seguono.

4.2 Simulazione Monte Carlo

I Metodi Monte Carlo fanno parte della famiglia dei metodi statistici non parametrici e trovano numerose applicazioni nel superare i problemi computazionali legati ai test esatti.

Vengono tipicamente utilizzati per trarre stime attraverso simulazioni, basandosi su algoritmi che generano una serie di numeri tra loro scorrelati, ma con una distribuzione analoga a quella del fenomeno in studio.

4.3 Descrizione del programma di simulazione

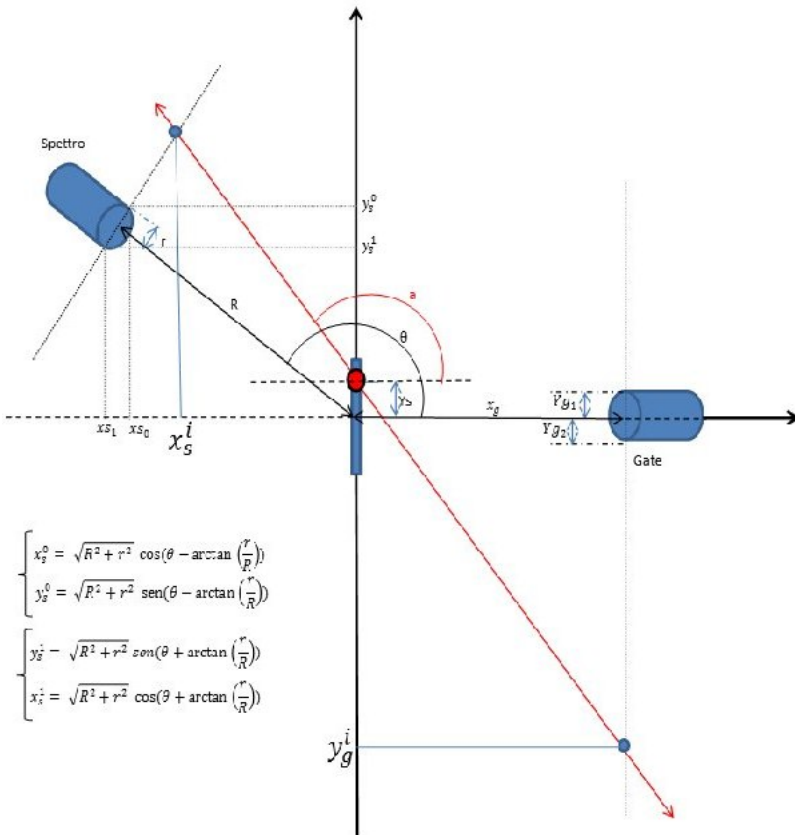
Il primo passo nella creazione di un algoritmo in grado di riprodurre la fisica e la geometria di un sistema di misura consiste nello svolgere un efficace lavoro di parametrizzazione.

Data la simmetria per rotazioni lungo l'asse del piano in cui giacciono i due rivelatori, si è riusciti a semplificare il problema portando da tre a due dimensioni lo spazio di lavoro. In figura è rappresentato il sistema secondo la schematizzazione adottata nell'attività di programmazione.

Di seguito si illustra brevemente il funzionamento del programma di simulazione.

Una volta che il calcolatore riceve in input la posizione della sorgente il rivelatore Spettro viene spostato, con un passo di 1° , dalla posizione $\vartheta = 90^\circ$ a $\vartheta = 270^\circ$ gradi.

Per ogni movimento vengono definite delle rette, giacenti sul piano individuato dalla sorgente e dai due rivelatori, rappresentanti l'emissione isotropa dei quanti di radiazione.



Parametrizzazione utilizzata per la costruzione del programma di simulazione

Per ciascuna retta (rappresentante, come sopra, l'emissione gamma) viene calcolata la coordinata x (X_s^i) del punto di intersezione con la retta individuata dal fronte del rivelatore Spettro e la coordinata y (Y_g^i) del punto di intersezione con la retta corrispondente al fronte del rivelatore Gate.

Ogni volta che, sia X_s^i che Y_g^i siano compresi, rispettivamente tra X_s^0 e X_s^1 e tra Y_g^0 e Y_g^1 , viene aggiunto un conteggio in memoria, andando così a comporre la distribuzione degli eventi simulata da utilizzare come confronto con i dati sperimentali.

I valori R, X_g, Y_{g1} e Y_{g2} sono costanti e pari a $R = 22cm$, $X_g = 22cm$, $Y_{g1} = 2,54cm$ e $Y_{g2} = -2,54cm$.

In allegato è possibile trovare il codice utilizzato.

4.4 Campagne di misura

Per valutare il funzionamento del programma di simulazione e ottenerne la risoluzione spaziale si è deciso di svolgere tre campagne di misura, ciascuna associata a una posizione diversa della sorgente.

La sorgente è stata collocata in posizione centrale, a 2 cm e a 4 cm dal centro.

Per ogni posizione sono state effettuate 30 misure per ogni angolo, della durata di 300 secondi. In tabella e in grafico si osservano, rispettivamente, i risultati delle tre campagne e la distribuzione angolare ottenuta.

Angolo	Conteggi	Errore
80	1892	43
82	5492	74
84	11648	108
86	18614	136
88	24654	157
90	26264	162
92	22662	151
94	16196	127
96	9784	99
98	3820	62
100	936	31

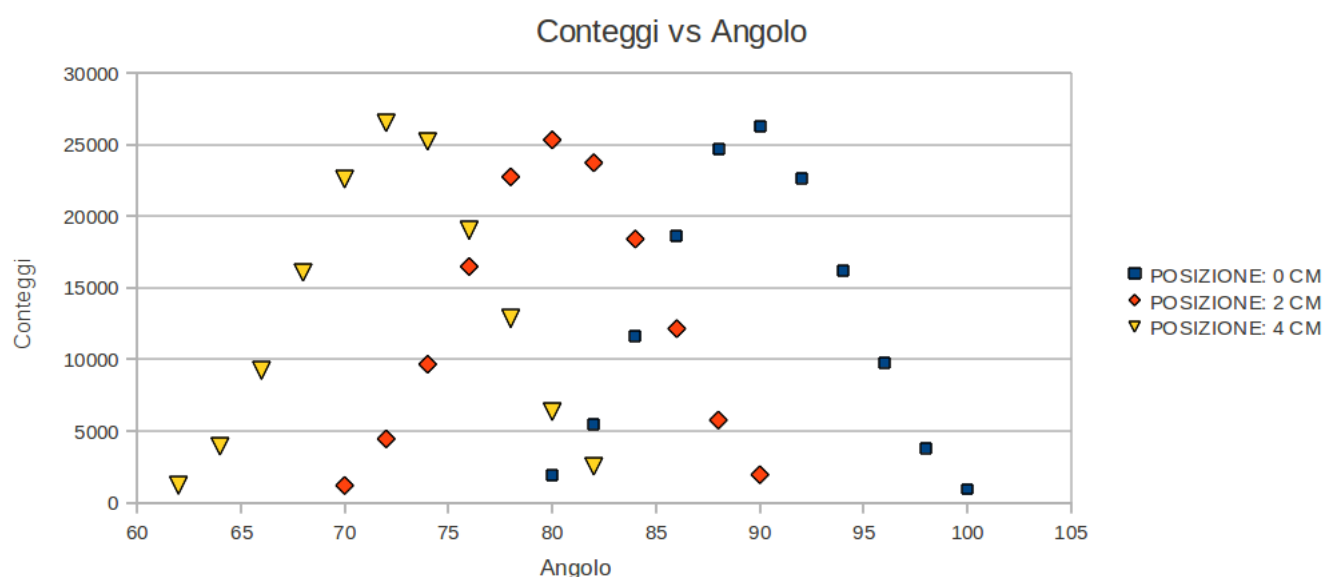
Conteggi in funzione dell'angolo per la posizione 0 cm

Angolo	Conteggi	Errore
70	1189	34
72	4445	67
74	9653	98
76	16480	128
78	22741	151
80	25316	159
82	23722	154
84	18396	136
86	12140	110
88	5753	76
90	1944	44

Conteggi in funzione dell'angolo per la posizione 2 cm

Angolo	Conteggi	Errore
62	1199	35
64	3930	63
66	9220	96
68	16075	127
70	22581	150
72	26512	163
74	25228	159
76	18989	138
78	12829	113
80	6348	80
82	2535	50

Conteggi in funzione dell'angolo per la posizione 4 cm



Conteggi in funzione dell'angolo per le 3 posizioni

4.5 Determinazione della posizione

Per testare l'efficienza del programma di simulazione nella determinazione della posizione della sorgente e valutare l'incertezza associata alla posizione, si sono confrontati attraverso il test del Chi Quadro le distribuzioni sperimentali e le diverse distribuzioni generate al calcolatore.

Per calcolare il Chi Quadro ridotto associato a ogni singolo confronto fra simulazioni e misurazione si è ritenuto opportuno creare un programma che gestisse queste operazioni; in allegato è possibile trovare il codice utilizzato.

Di seguito si presentano i risultati dei confronti.

$Sim(cm)$	-4	-2	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4
χ^2	>20	>20	>20	18,4	15,9	7,1	3,9	1,5	0,4	0,6	1,7	4,3	10	>20	>20

Chi Quadri ridotti calcolati per la posizione 0 cm

$Sim(cm)$	0	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	4
χ^2	>20	>20	>20	>20	9,1	6,2	1,4	0,8	0,4	1,7	5,8	8,4	>20	>20	>20

Chi Quadri ridotti calcolati per la posizione 2 cm

$Sim(cm)$	0	2	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8	5	6	7
χ^2	>20	>20	8,9	6,3	0,8	0,8	1,5	2,6	18,2	>20	>20	>20	>20	>20	>20

Chi Quadri ridotti calcolati per la posizione 4 cm

Si osservi come, per le 3 posizioni scelte per la sorgente, il programma di simulazione produca Chi Quadri ridotti accettabili in un intervallo prossimo alla reale posizione dell'emettitore.

Risulta interessante notare come questo intervallo (evidenziato in rosso in tabella) sia sempre pari a 0,6 cm; valore che può quindi essere considerato come il range complessivo di incertezza associato alla localizzazione della sorgente da parte del calcolatore.

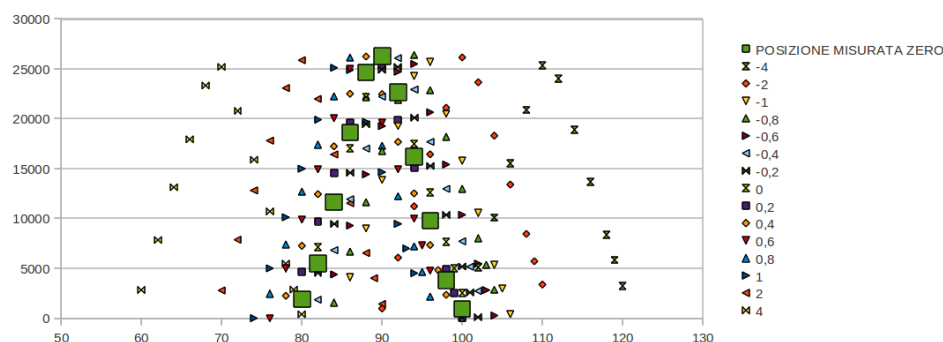
Per la posizione 0 cm, 2 cm e 4 cm; la localizzazione eseguita dal programma di simulazione ha ottenuto i risultati riportati di seguito in tabella.

Pos. misurata	Incertezza	Pos. calcolata	Incertezza
0,0 cm	$\pm 0,1$	0,3 cm	$\pm 0,3$
2,0 cm	$\pm 0,1$	2,1 cm	$\pm 0,3$
4,0 cm	$\pm 0,1$	3,7 cm	$\pm 0,3$

Confronto fra posizione misurata e calcolata

I valori riportati in tabella evidenziano il successo del programma di simulazione nel distinguere, con una precisione di 0,3 cm, tre differenti posizioni del radionuclide in uso.

I risultati sono da considerarsi più che accettabili in quanto, oltre all'ineliminabile incertezza associata alla conoscenza esatta della reale posizione della sorgente tramite un righello, il programma di simulazione non considera l'intera profondità dei rivelatori come porzione utile per la rivelazione dei quanti; ma solo ed esclusivamente la loro larghezza.



Confronto grafico fra posizione misurata e diverse simulazioni centrate intorno a 0 cm

5 Misure con mezzo interposto

Nell'ottica di simulare un esame PET è fondamentale capire come la presenza di materiali interposti (atti a simulare il corpo del paziente) fra l'emettitore e i rivelatori influenzi i conteggi sia in termini di assorbimento che di diffusione.

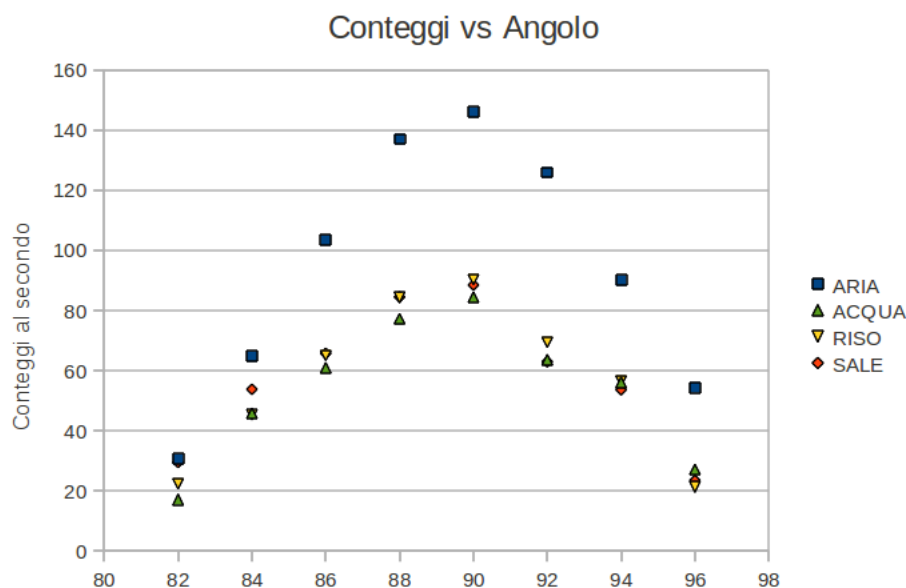
A questo scopo si presenta di seguito il risultato dei diversi confronti.

Per questa serie di misure è stato utilizzato un Marinelli (particolare becker che permette di porre al centro la sorgente, circondandola completamente del materiale prescelto) e sono state svolte 20 misure da 300 secondi per ogni angolo.

I mezzi interposti scelti comprendono del sale grosso da cucina, del riso e dell'acqua.

Angolo	Aria	Riso	Sale	Acqua
82	30,51	22,37	29,43	17,13
84	64,71	45,31	53,75	45,77
86	103,41	65,12	65,69	60,93
88	136,97	84,23	84,48	77,18
90	145,91	90,37	88,43	84,43
92	125,90	69,46	62,92	63,61
94	89,98	56,60	53,59	56,09
96	54,36	21,23	23,45	27,07

I valori riportati in tabella sono i conteggi al secondo per ogni materiale utilizzato



Confronto in termini di conteggi al secondo fra diversi mezzi interposti

I risultati delle misure mostrano che, ignorando il valore numerico dei conteggi, l'andamento delle distribuzioni rimane pressoché invariata nelle quattro situazioni.

Ciò suggerisce che, anche se non è stato effettivamente verificato, il programma di simulazione dovrebbe essere in grado di continuare a dare risultati corretti semplicemente aggiungendo al codice utilizzato un fattore di attenuazione delle emissioni prodotte concorde allo spessore di materiale utilizzato e al relativo coefficiente di attenuazione.