
SiPM

Esempi di utilizzo del
fotomoltiplicatore al silicio
per rilevazione di radiazioni

Sistema Theremino
Rev.3

Sommario

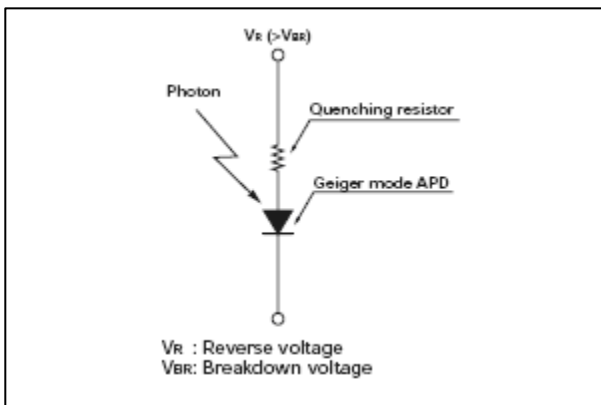
SiPM.....	3
Cristallo Scintillatore LYSO.....	5
Sonda a Scintillazione Gamma con cristallo LYSO	7
SiPM Adapter.....	8
Spettri Gamma con cristallo LYSO	11
Background.....	11
Americio ²⁴¹ Am.....	12
Sodio 22.....	13
Cesio 137	14
Sonda a Scintillazione Alfa.....	15
Americio ²⁴¹ Am con scintillatore ZnS(Ag)	15
Radio ²²⁶ Ra su vernice luminescente	17
SiPM LYSO Gamma Detector	18
Misure di Coincidenza	21
Correlazione Angolare nell'emissione Y-Y del Na22	24
Disclaimer e Avvertenze sulla Sicurezza	26
Precauzioni con Sorgenti Radioattive.....	26
Ringraziamenti.....	26

SiPM



I **SiPM**, acronimo di Silicon Photomultipliers, costituiscono la più moderna tipologia di fotorivelatori a stato solido. Sono costituiti da una matrice di fotodiodi a valanga, detti pixel, operanti in modalità Geiger e collegati in parallelo su un comune substrato di Silicio.

Un fotodiodo operante in regime Geiger `e un fotodiodo a valanga polarizzato ad una tensione inversa maggiore della tensione di breakdown. In questo modo, nella zona svuotata, si ha un forte campo elettrico tale da trasferire al singolo portatore un grandissimo valore d'energia cinetica che rende sufficiente solo una singola coppia elettrone-lacuna per innescare il processo di ionizzazione per impatto e la moltiplicazione a valanga dei portatori.



E' chiaro che un fotodiodo in cui l'arrivo di un fotone ha innescato la valanga in regime Geiger, non ha possibilità di apprezzare l'arrivo di un secondo fotone. E' necessario dunque un processo che arresti la valanga, abbassando il campo elettrico ai capi della regione di svuotamento ad un valore tale da non permettere più la moltiplicazione per impatto dei portatori. La tensione inversa di polarizzazione torna sotto il valore di breakdown per un certo periodo, detto tempo di "hold-off". Durante questo intervallo di tempo, il dispositivo non può rivelare l'arrivo di nessun fotone. Per migliorare l'efficienza del

fotodiodo `e necessario che questo tempo cieco sia il più piccolo possibile. Ciò comporta l'utilizzo di un **circuito di spegnimento** detto, in inglese, quenching circuit. Il più semplice circuito di quenching è costituito da una resistenza in serie alla giunzione del fotodiodo.

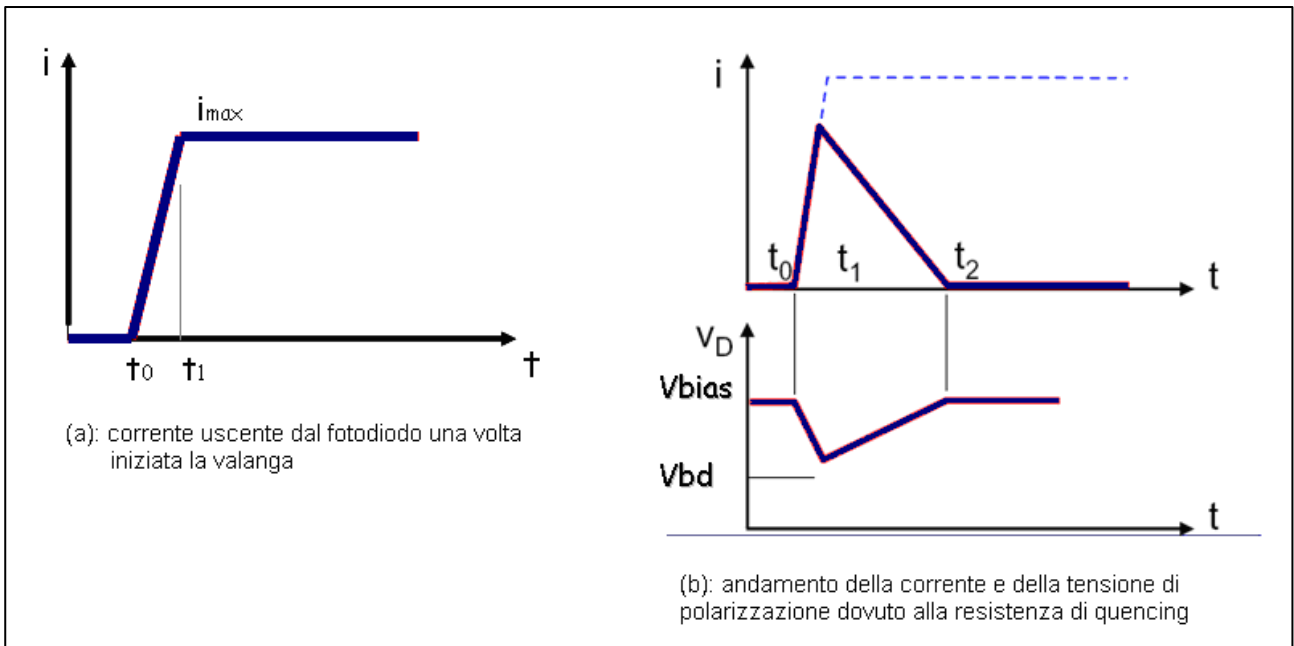
Comunemente, l'area attiva dei SiPM è di alcuni millimetri quadrati. A seconda del modello, il numero di pixel può variare tra un centinaio e qualche migliaio e ciascuno di essi è costituito da una cella quadrata di lato compreso tra i 25 μm ed i 100 μm . I vari pixel sono separati l'uno dall'altro tramite un sottile strato di materiale isolante. Considerando che in media una cella viene colpita da un singolo fotone, è possibile ricavare il numero di fotoni incidenti dal numero di celle attivate.

I SiPM possiedono vantaggi come il funzionamento a bassa tensione, l'insensibilità ai campi magnetici ed un guadagno molto elevato : $G = 100000 - 1000000$.

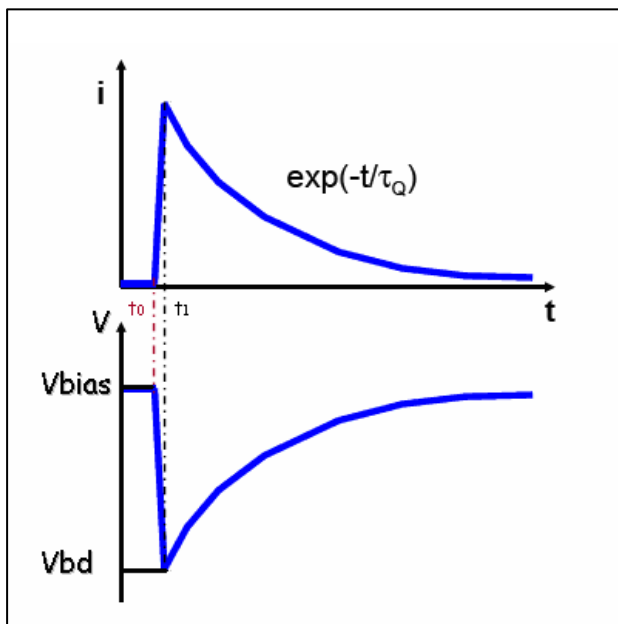


Principali Caratteristiche SiPM AdvanSiD NUV 4x4

- 4x4 mm² detection area
- 40 μm micro-cells, 60% fill-factor
- Low dark count rate
- NUV-SiPMs: 420 nm peak sensitivity
- Gain temperature stability < 1 %/°C
- MR compatible



Andamento della corrente e della tensione di polarizzazione in funzione delle resistenza di quenching



Andamento della corrente e della tensione per un impulso prodotto da un SiPM. Il fronte di salita è molto rapido, dell'ordine dei 10ns. Il fronte di discesa dipende dalla capacità della giunzione e dalla resistenza di quenching, e vale nell'ordine dei 100ns.

Il SiPM va polarizzato con una tensione **V_{bias}** maggiore della tensione **V_{bd}** (Breakdown voltage). La tensione di "overvoltage" va dai 2 ai 4 V. La **V_{bd}** ha un valore di circa 28V, ne consegue che la tensione di polarizzazione ha un valore che va dai 28V ai 32V.

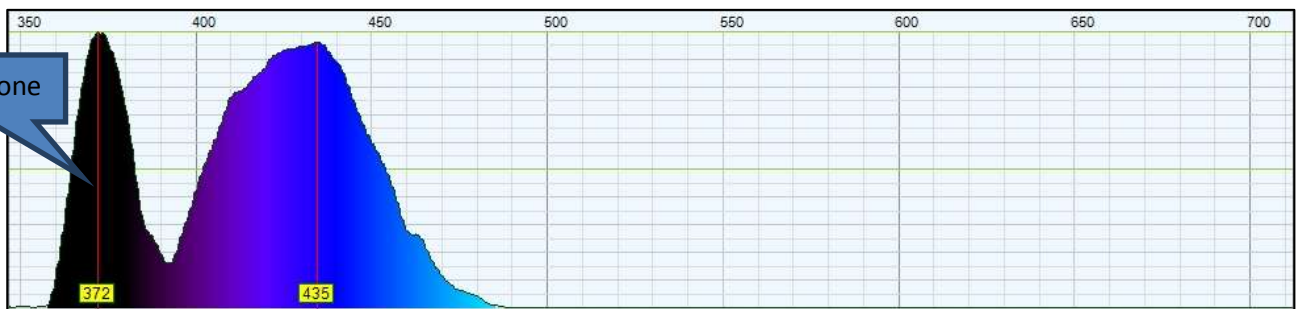
V_{bd} = 28V
V_{ov} = 2-4V
V_{bias} = 30-32V

I SiPM presentano un rumore non trascurabile, denominato "**dark current**". Il fenomeno della dark current è spiegato dalla generazione spontanea, per effetto termico, di coppie elettrone-lacuna nella regione svuotata. Questo è dovuto alla presenza di centri di generazione-ricombinazione che hanno un livello energetico posto circa a metà gap fra la banda di valenza e la banda di conduzione. La presenza dei centri di ricombinazione nasce dalle imperfezioni presenti nel reticolo cristallino che introducono livelli energetici all'interno del gap.

Cristallo Scintillatore LYSO



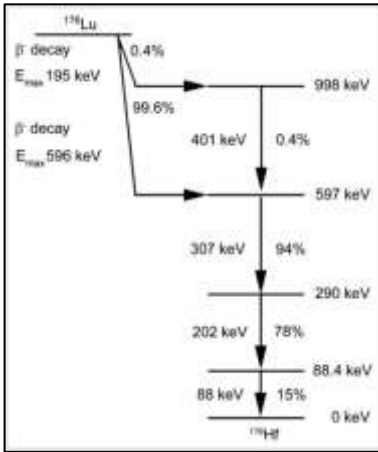
Lutetium-yttrium oxyorthosilicate, also known as **LYSO**, is an inorganic chemical compound with main use as a scintillator crystal. Its chemical formula is $\text{Lu}_2(1-x)\text{Y}_2x\text{SiO}_5$. It is commonly used to build electromagnetic calorimeters in particle physics. LYSO crystals have the advantages of high light output and density, quick decay time, excellent energy resolution.



Spettro di fluorescenza di un cristallo scintillatore LYSO eccitato da emissione UV da lampada wood.
Picco di emissione a circa 430nm

Physical Properties Of LYSO crystal

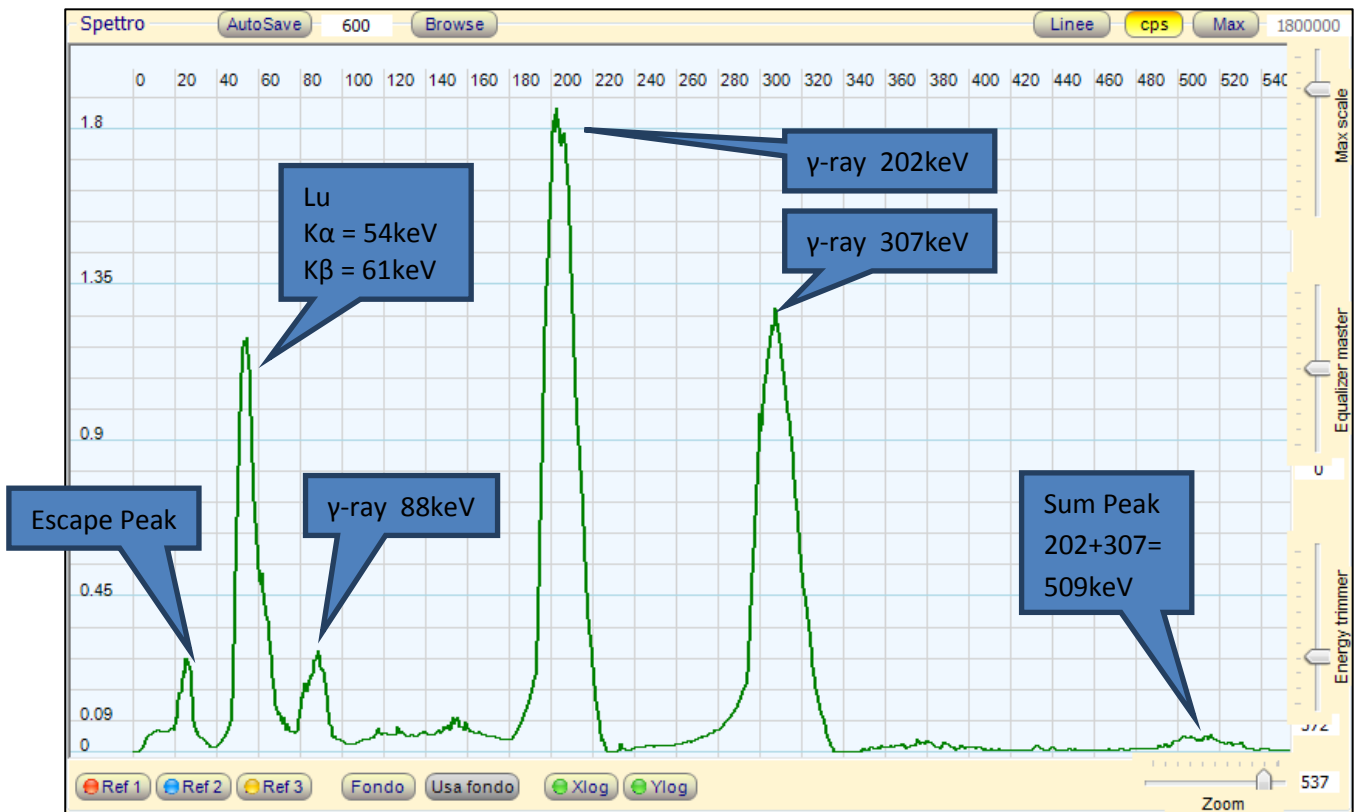
Density (g/cm ³)	7.4
Effective Atomic Number	66
Radiation Length (cm)	1.10
Decay Constant (ns)	40-44
Peak Emission (nm)	428
Light Yield (Relative BGO=100%)	190
Index of Refraction	1.82
Peak excitation (nm)	375
Radiation Hardness (rad)	>106
Melting Point (°C)	2050
Hardness (Mohs)	5.8
Cleavage	None
Hygroscopicity	No



Il cristallo LYSO contiene il **lutezio** il quale è composto di due isotopi di cui solo uno è stabile, ^{175}Lu (abbondanza naturale 97,41%) mentre l'altro, il ^{176}Lu decade beta con emivita di $3,78 \times 10^{10}$ anni (2,59% abbondanza naturale).

Nella immagine a lato si vede il campione contenente Lutezio e lo schema di decadimento beta del ^{176}Lu .

A causa del contenuto di Lutezio il cristallo LYSO risulta essere debolmente radioattivo.

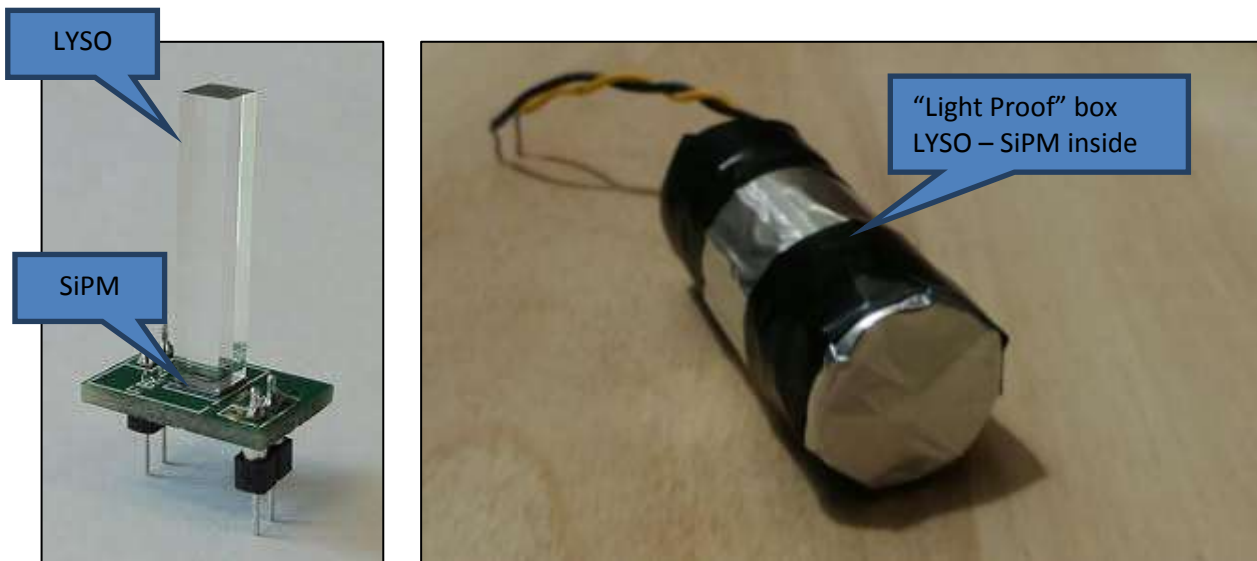


Spettro di emissione gamma di un cristallo scintillatore LYSO

Sonda a scintillazione – Cristallo NaI(Tl) 25.4x25.4mm - PMT R6095 Hamamatsu – schermato

Dallo spettro della emissione gamma sono evidenti i fotopicchi a 88keV, a 202keV ed a 307keV. Nello spettro si notano anche le emissioni X da parte del Lutezio ed il picco somma a 509keV. Questo insieme di emissioni gamma, che si estendono dai 50keV ai 500keV, producono un background non trascurabile che non è possibile schermare e rendono quindi il cristallo LYSO inadatto ad applicazioni di spettrometria gamma di sorgenti debolmente radioattive.

Sonda a Scintillazione Gamma con cristallo LYSO



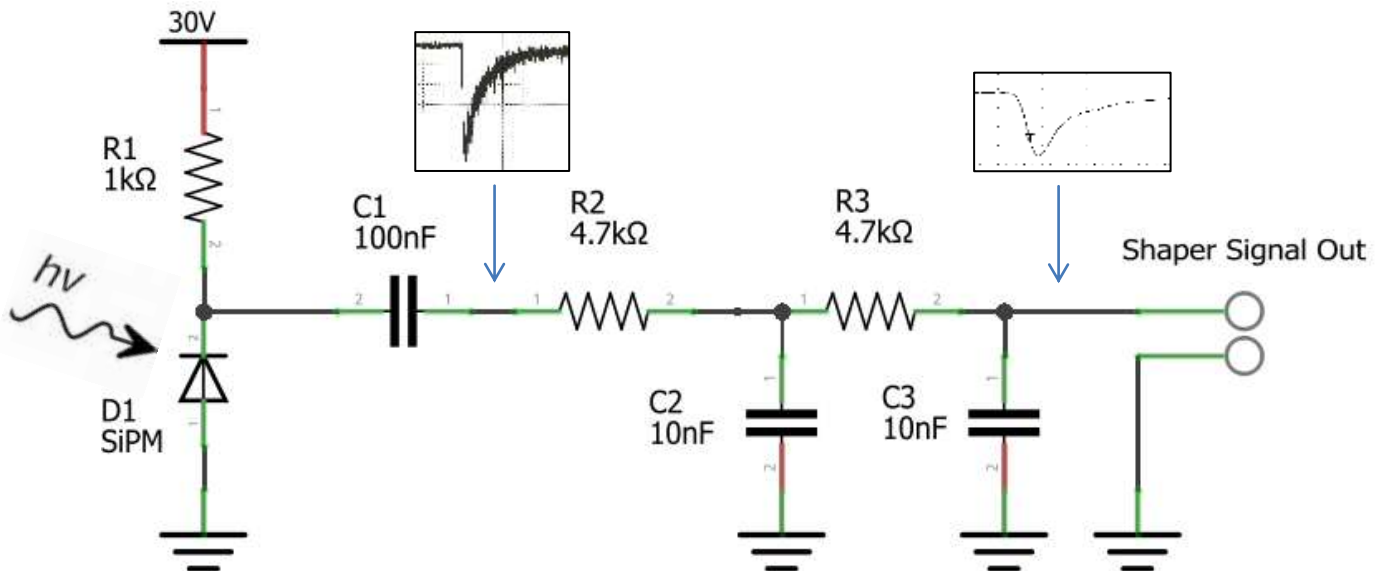
Il cristallo LYSO ed il SiPM sono stati accoppiati come si vede nella prima immagine a destra, utilizzando una colla ottica per fissare il cristallo alla superficie del sensore. Nella immagine non si vede, ma il cristallo LYSO è stato avvolto con nastro di teflon bianco (vedere immagine nelle pagine precedenti) in modo da aumentare la riflettività e quindi l'efficienza.

SiPM e LYSO sono stati poi inseriti in un tubo di plastica ricoperto con nastro adesivo e nastro di alluminio, in modo da assicurare la tenuta alla luce.

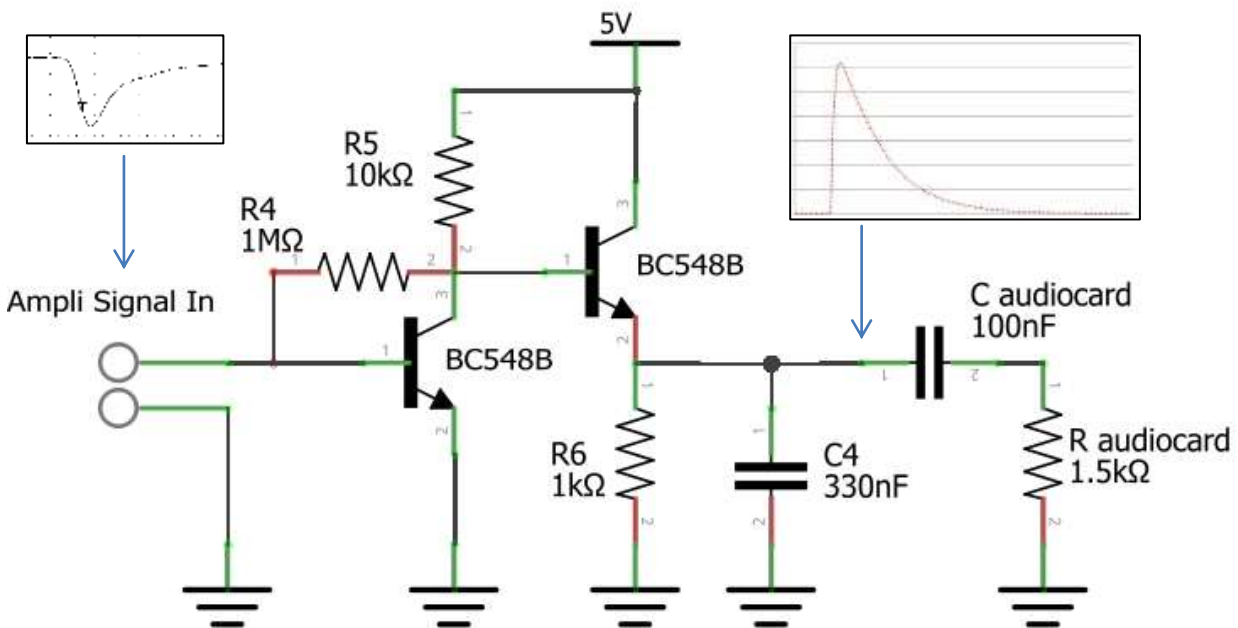
All'interno del tubo di plastica è stata inserita della gommapiuma al fine di mantenere "in battuta" il cristallo sulla finestra anteriore e proteggere il sensore da urti accidentali.

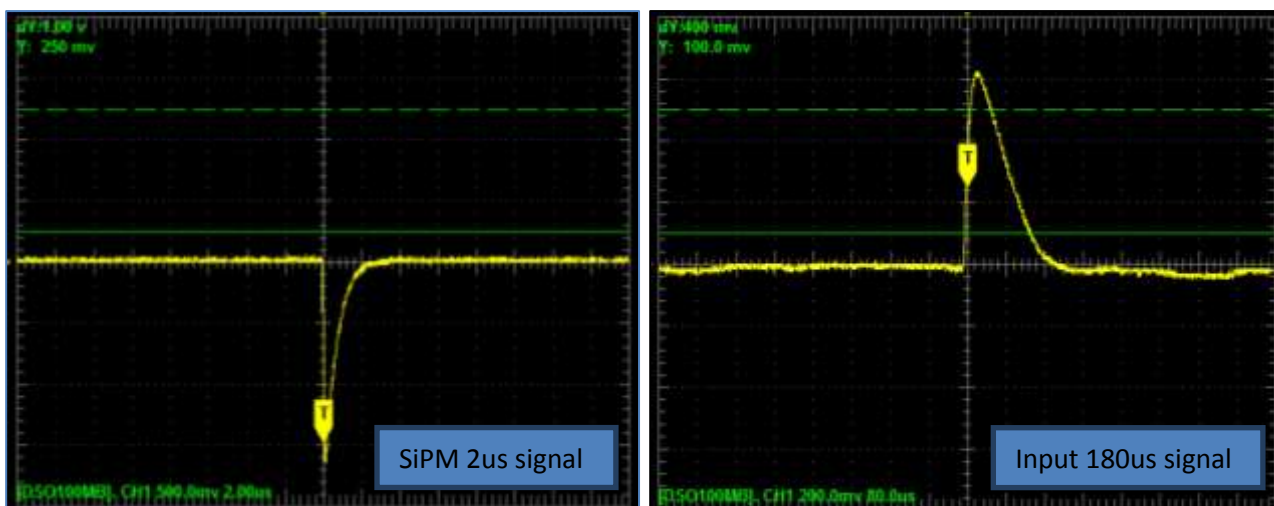
SiPM Adapter

Il segnale prodotto dal SiPM è molto breve e di ampiezza limitata (50-100mV). Per essere acquisito dalla scheda audio del Theremino MCA deve essere opportunamente sagomato e successivamente amplificato. Il primo stadio del SiPM adapter è costituito dal circuito di polarizzazione ed estrazione dell'impulso. La resistenza di carico R1 è posta verso Vbias, mentre l'anodo del SiPM è collegato a massa, questo permette di ottenere impulsi negativi, in modo che, dopo l'inversione prodotta dallo stadio di amplificazione, si ottengano impulsi positivi da inviare alla scheda audio.



Le due celle passa-basso R2C2 ed R3C3 hanno lo scopo di allungare l'impulso fino a 100-200usec ed arrotondare la punta in modo che durante il successivo campionamento dell'ADC della scheda audio sia più semplice determinare il valore di picco dell'impulso. In uscita al "shaper" l'impulso si è però molto ridotto in ampiezza e quindi è necessario inserire uno stadio di amplificazione.





Impulsi in uscita dal SiPM ed in uscita dallo stadio di amplificazione

Il valore in ampiezza ed in durata del segnale in uscita dipende da svariati fattori :

- **Vbias** : all'aumentare della Vbias (28-32V) aumenta anche l'ampiezza del segnale in uscita. Da prove effettuate si è visto che per un valore attorno ai 30V si ottengono i migliori risultati in termini di risoluzione energetica.
- **R1** : questa resistenza converte l'impulso di corrente in un impulso di tensione. Valori troppo elevati possono mandare in saturazione la catena di amplificazione. Valori bassi (50ohm) permettono di ottenere tempi di durata dell'impulso molto brevi. Nel nostro caso risulta conveniente alzare R1 proprio per allungare l'impulso.
- **C2, C3** : aumentando il valore di queste capacità l'ampiezza del segnale scende e la durata aumenta.
- **R5** : il valore di questa resistenza determina il guadagno dello stadio di amplificazione

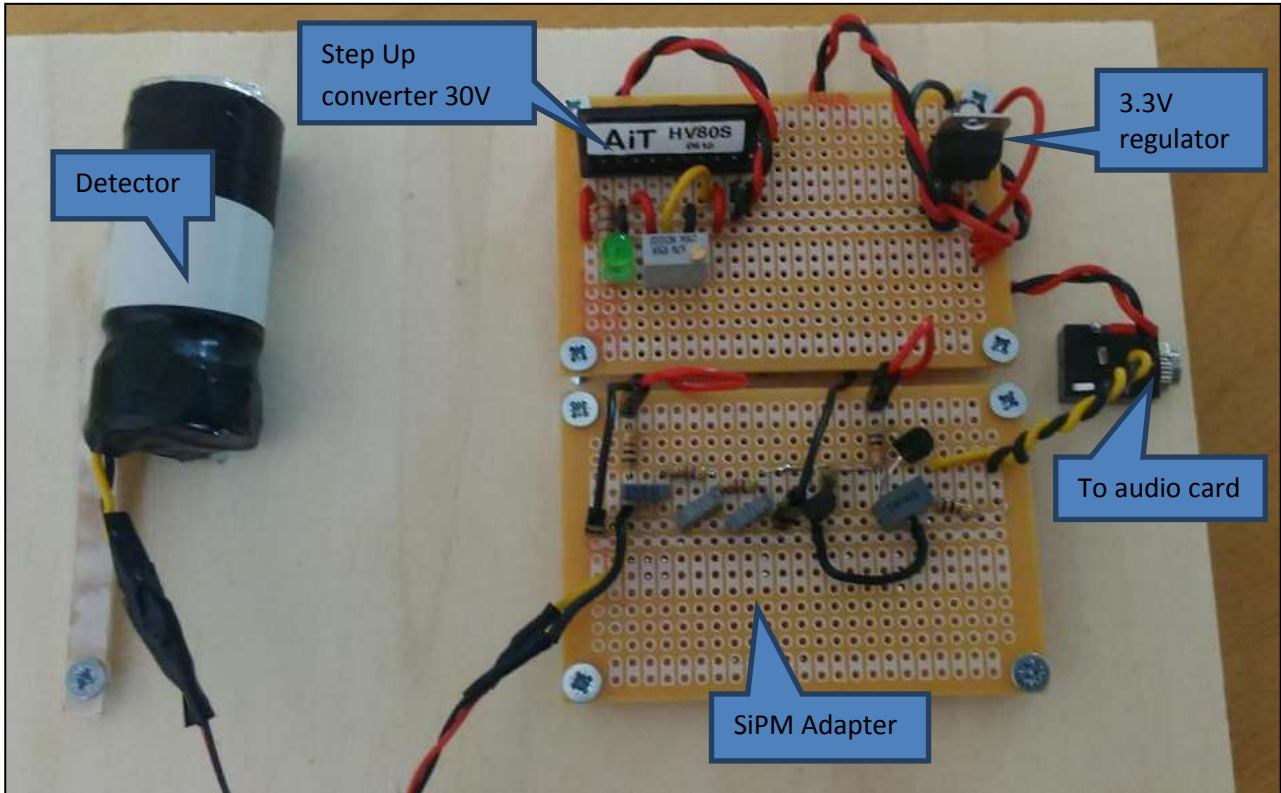
I valori dei componenti presenti negli schemi consentono di avere uno spettro gamma con le energie abbastanza corrispondenti ai valori reali.

Per la calibrazione si consiglia di variare la tensione Vbias all'interno del range 29-31V, mentre la calibrazione fine viene fatta all'interno della applicazione Theremino MCA.

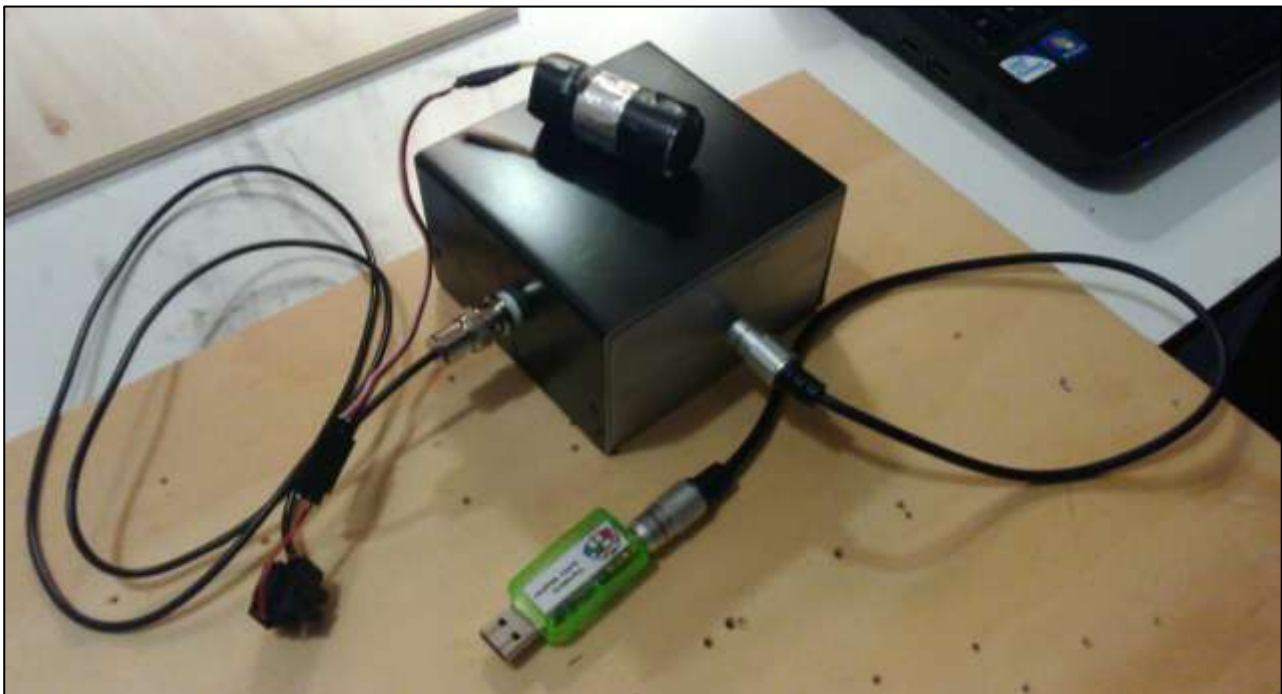
Particolare cura va fatta nel controllo del rumore / ripple presente nelle alimentazioni dello shaper (30V) e dell'amplificatore (5V). Per ottenere buoni risultati il rumore finale non dovrebbe essere superiore ad 1mv. Possono anche essere utilizzate delle batterie per ottenere le tensioni richieste.



Esempio di generatore 30V a "basso rumore" basato su batterie



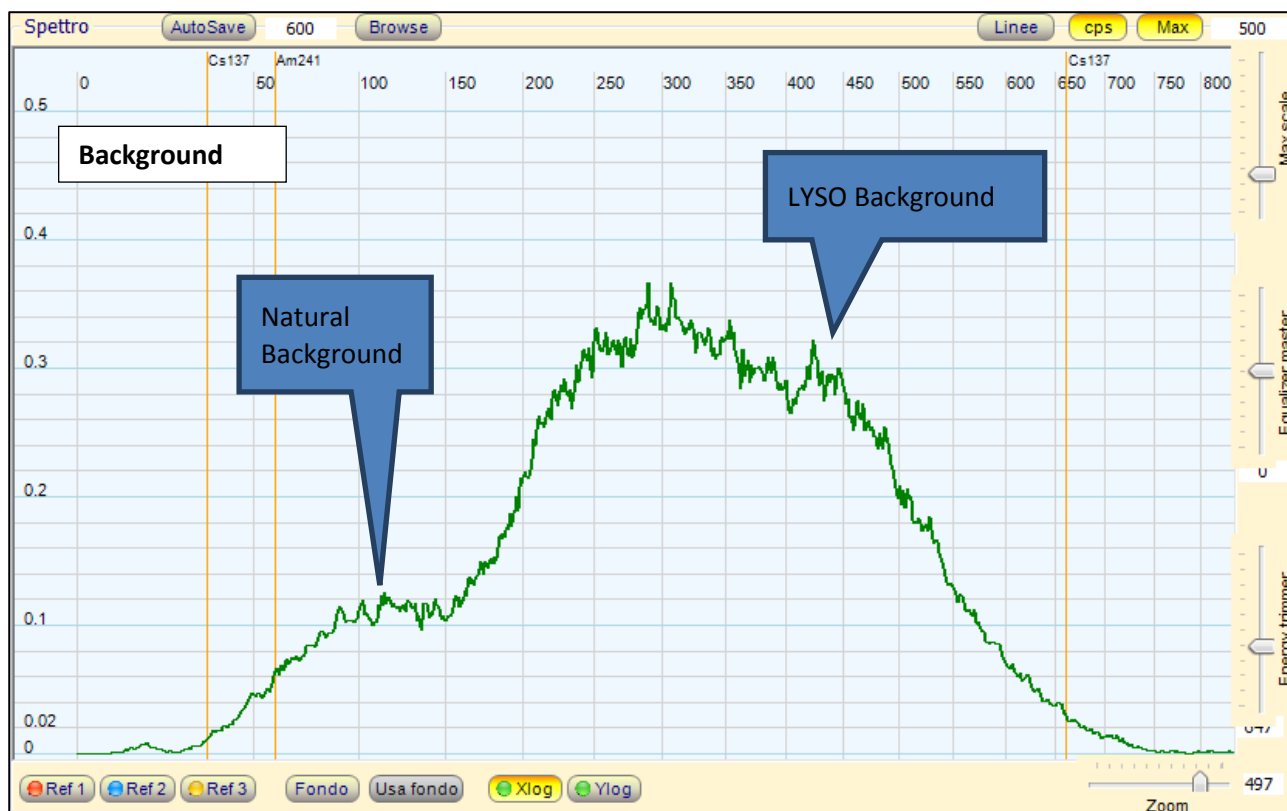
Spettrometro gamma con sonda SiPM LYSO, SiPM Adapter e sezione di alimentazione



Prototipo di spettrometro gamma basato su SiPM con scheda audio USB di acquisizione

Spettri Gamma con cristallo LYSO

Background

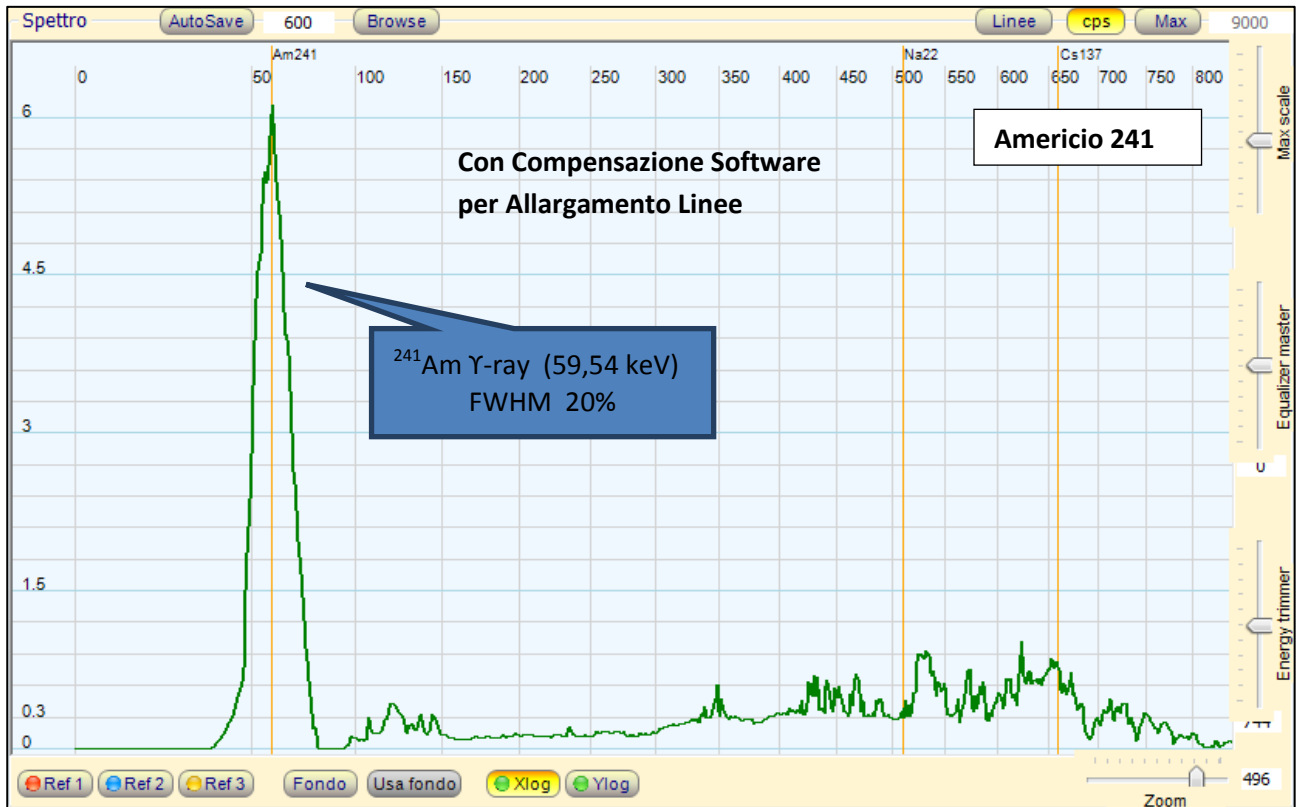
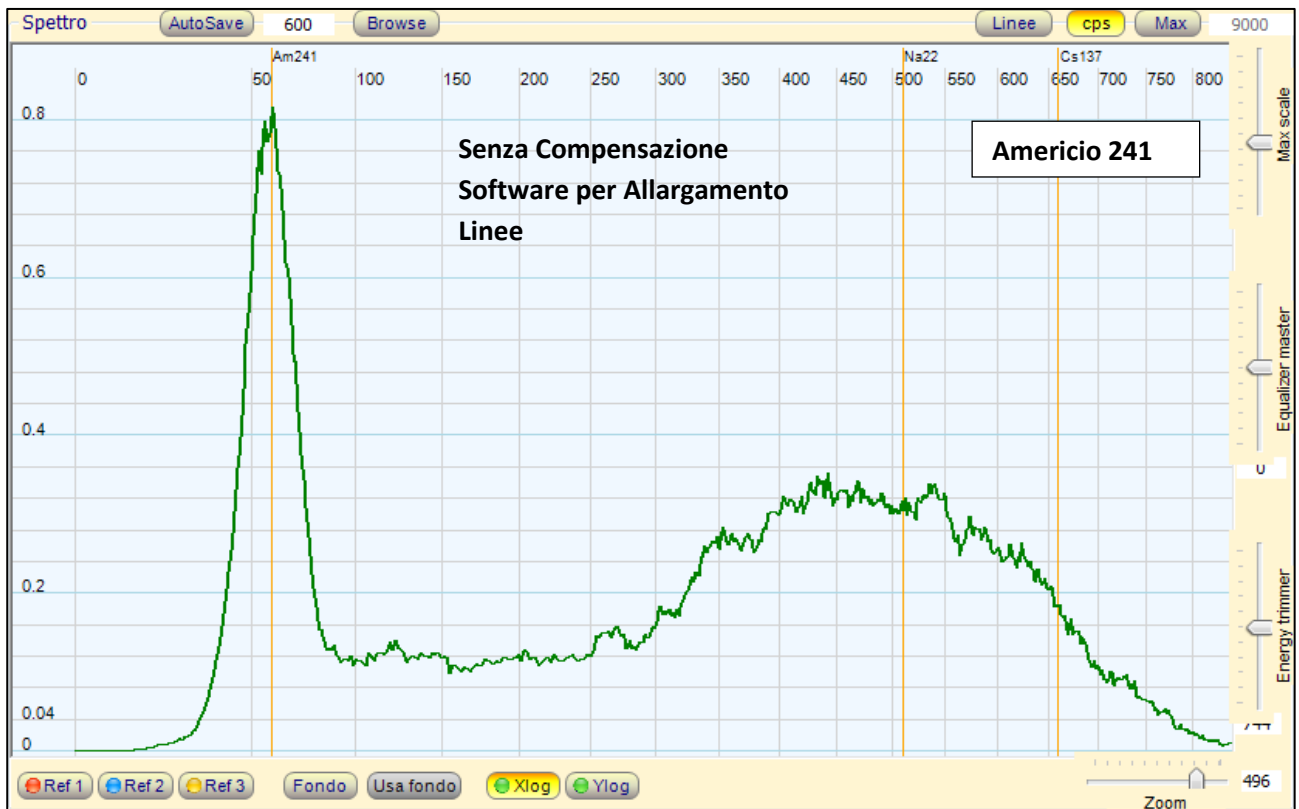


Spettro emissione Background – Acquisito con SiPM e scintillatore LYSO

Lo spettro di background comprende la radiazione naturale di fondo ed il contributo della radioattività naturale del cristallo LYSO dovuto al contenuto in Lutezio.

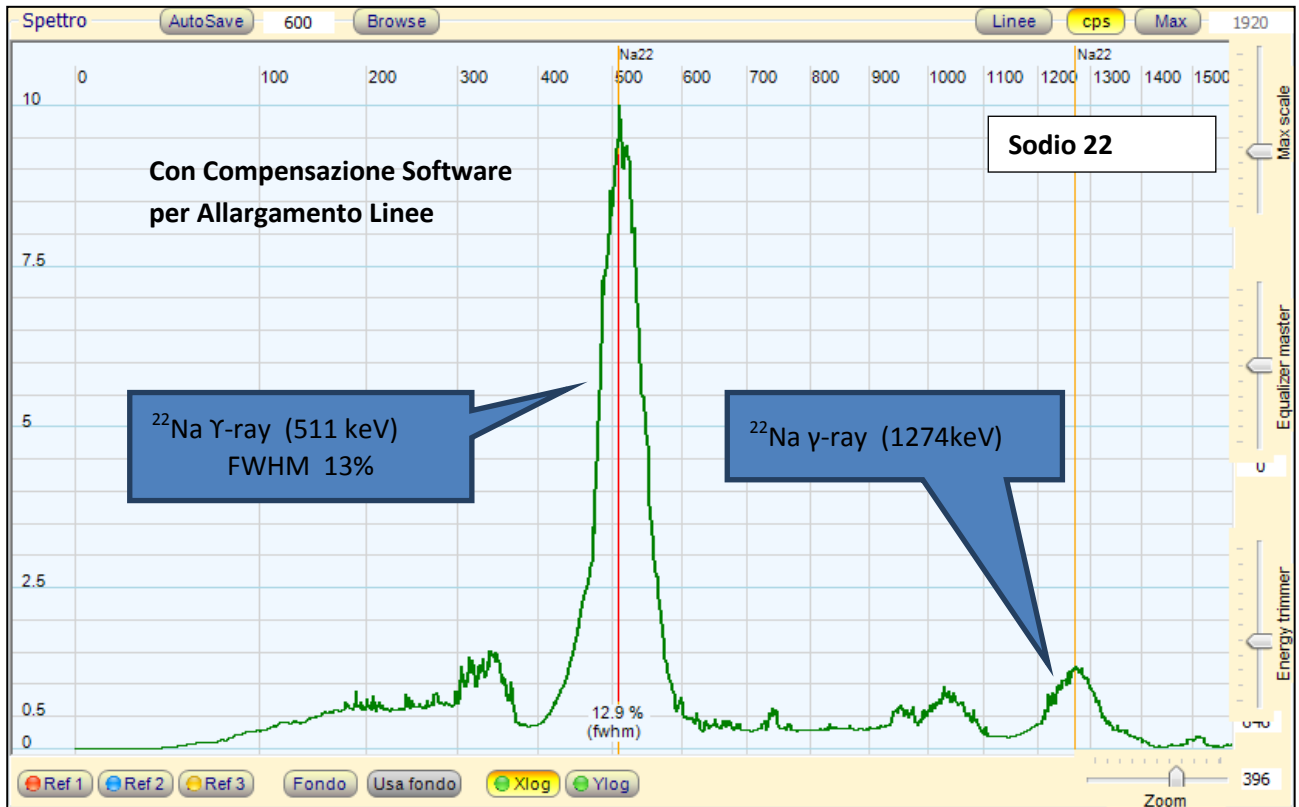
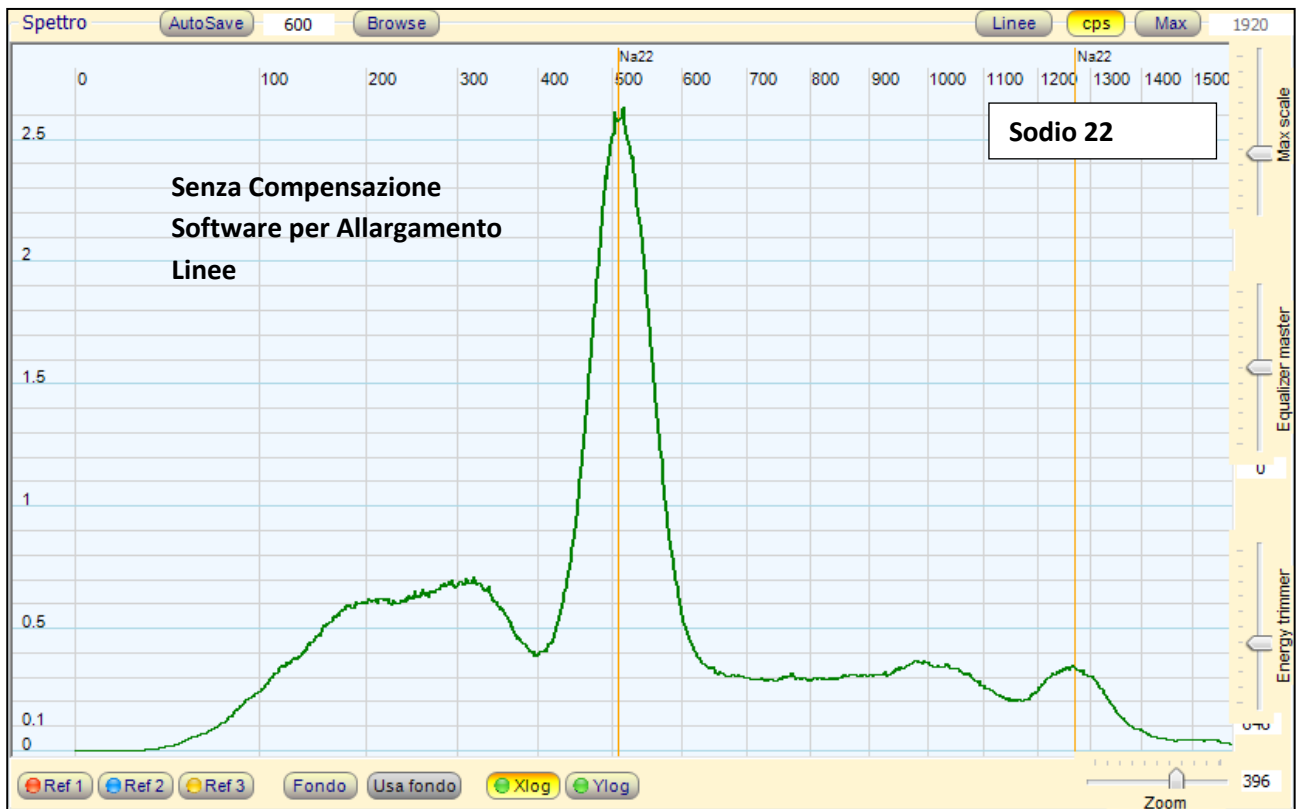
La parte della radiazione di fondo ha il suo massimo nel range tra 100 e 150keV, mentre la parte dovuto al cristallo LYSO è principalmente compresa tra 200 e 500 keV.

Americio 241



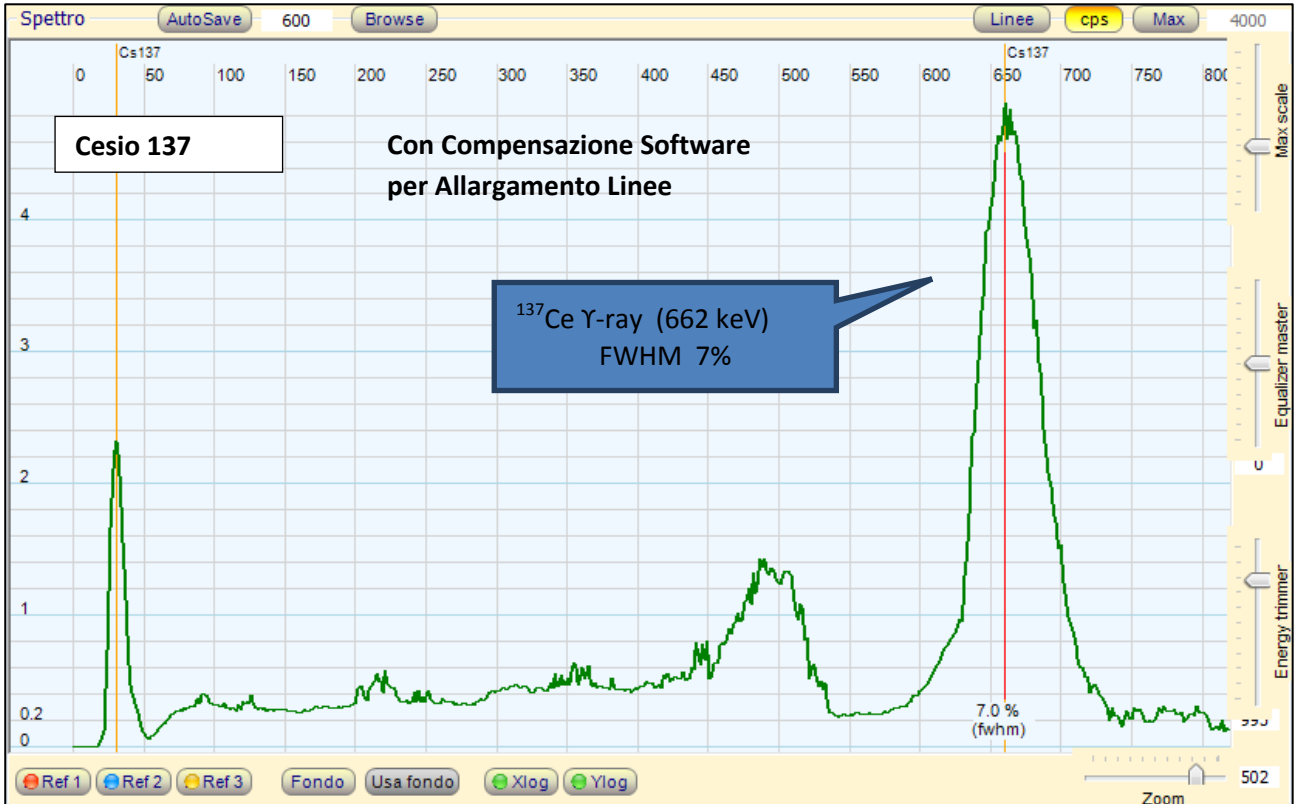
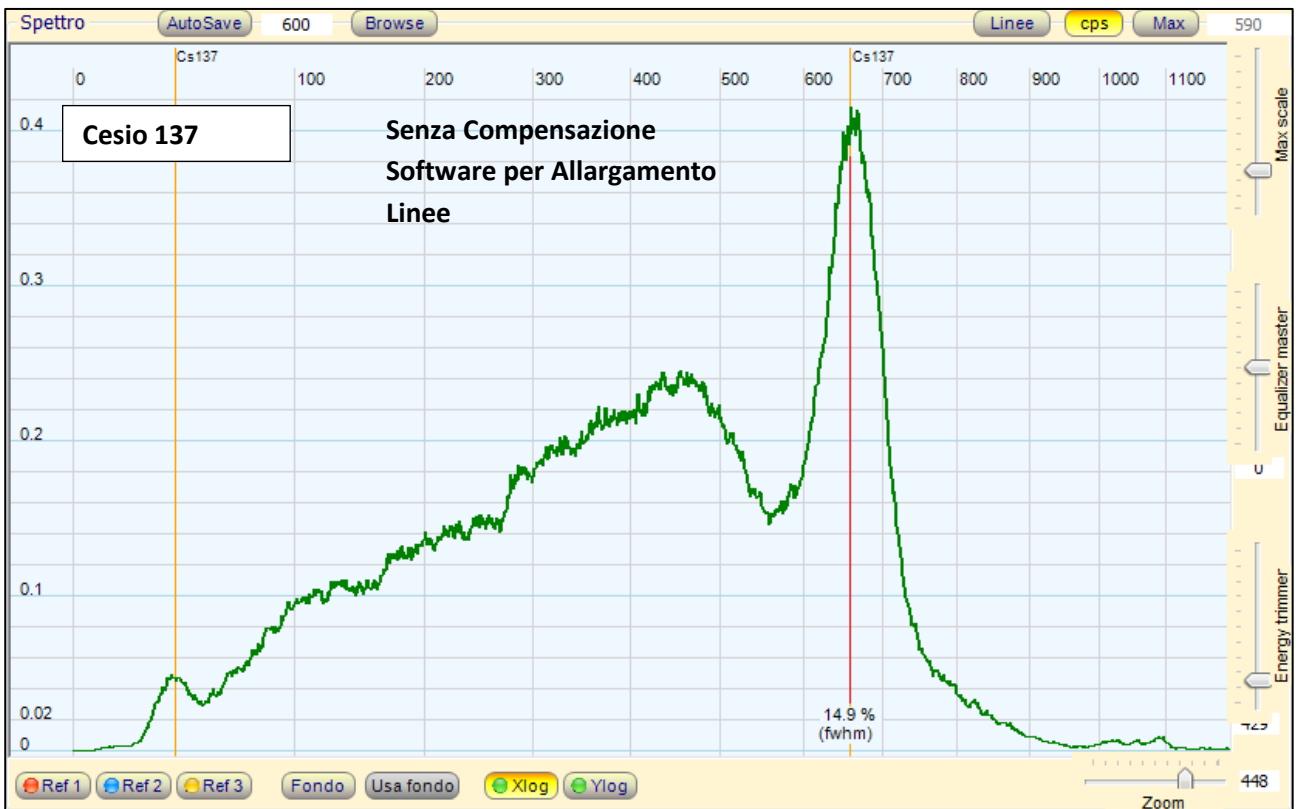
Spettro emissione gamma di ^{241}Am – Americio – Acquisito con SiPM e scintillatore LYSO

Sodio 22



Spettro emissione gamma di $1\mu\text{C}$ ^{22}Na – Acquisito con SiPM e scintillatore LYSO

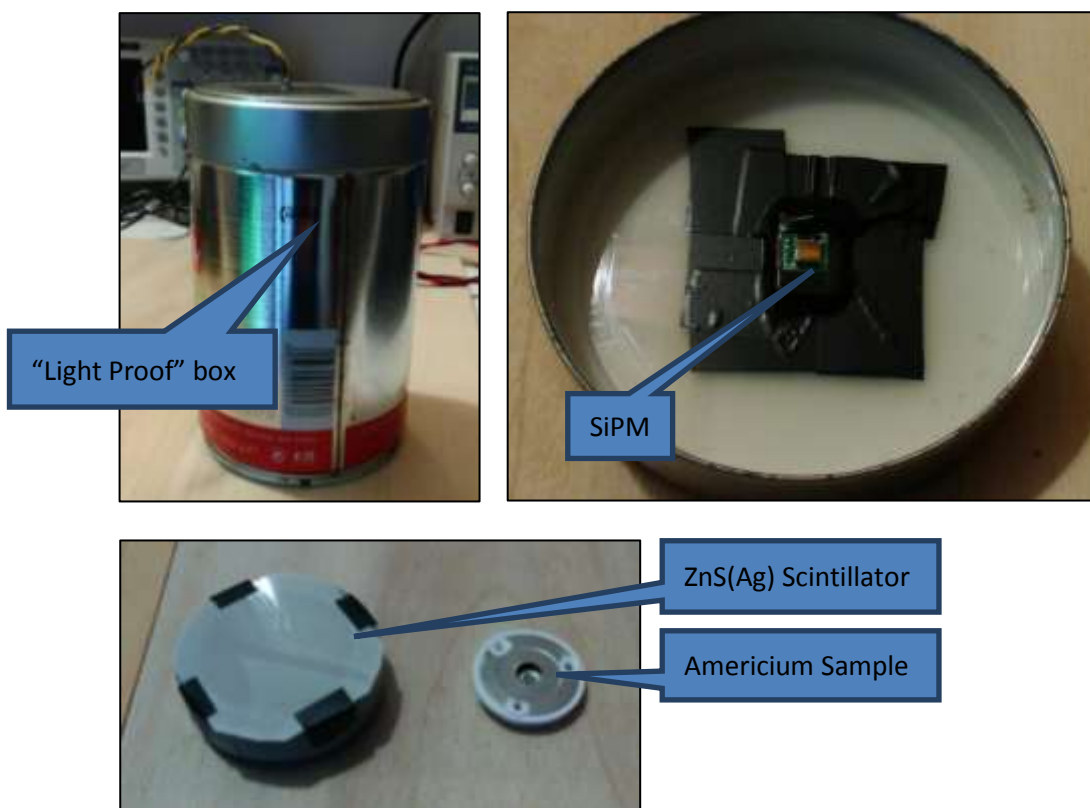
Cesio 137



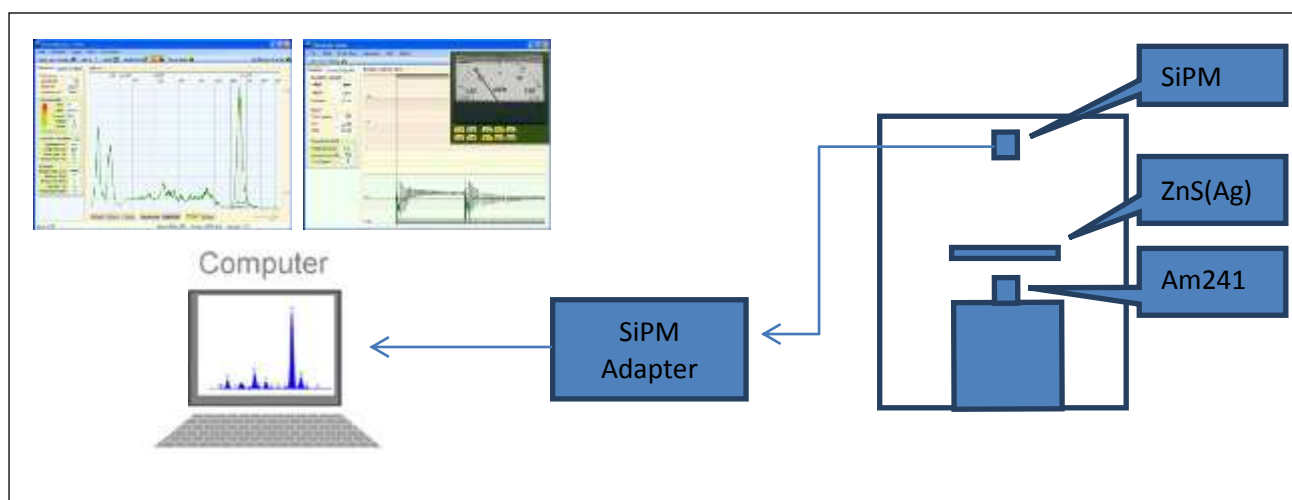
Spettro emissione gamma di 0.25 μ C ¹³⁷Ce – Cesio – Acquisito con SiPM e scintillatore LYSO

Sonda a Scintillazione Alfa

Americio ^{241}Am con scintillatore ZnS(Ag)



Come altro esempio di applicazione del SiPM è stata realizzata una semplice sonda a scintillazione alfa basata su di uno schermo di ZnS(Ag). Come sorgente alfa è stata utilizzata la classica sorgente da 0,9uCurie di ^{241}Am . Sorgente alfa e schermo scintillatore sono stati posti all’interno di una cilindro di alluminio a chiusura ermetica ed a tenuta di luce, il fotomoltiplicatore a stato solido è stato fissato sul tappo del cilindro. Il SiPM è stato collegato al SiPM adapter, già descritto in un paragrafo precedente, il segnale dell’adapter viene acquisito dalla scheda audio ed inviato al programma Theremino MCA / Theremino Geiger, che effettua le misure di conteggio.



Il segnale che viene acquisito dalla scheda audio ed inviato a Theremino MCA è molto basso in ampiezza, di poco superiore al livello del rumore, comunque è sufficiente per essere riconosciuto dal theremino MCA e conteggiato da Theremino Geiger.

Per aumentare al massimo il segnale, la sorgente alfa, lo schermo ZnS(Ag) vanno collocati il più vicino possibile ed in asse.

La tensione di polarizzazione del SiPM va poi regolata nel range 28V-32V in modo da massimizzare il rapporto segnale/rumore ed il rate di conteggio

Il risultato di conteggio che si ottiene è visibile nello screenshot di Theremino Geiger con un valore di circa **700 CPM**.



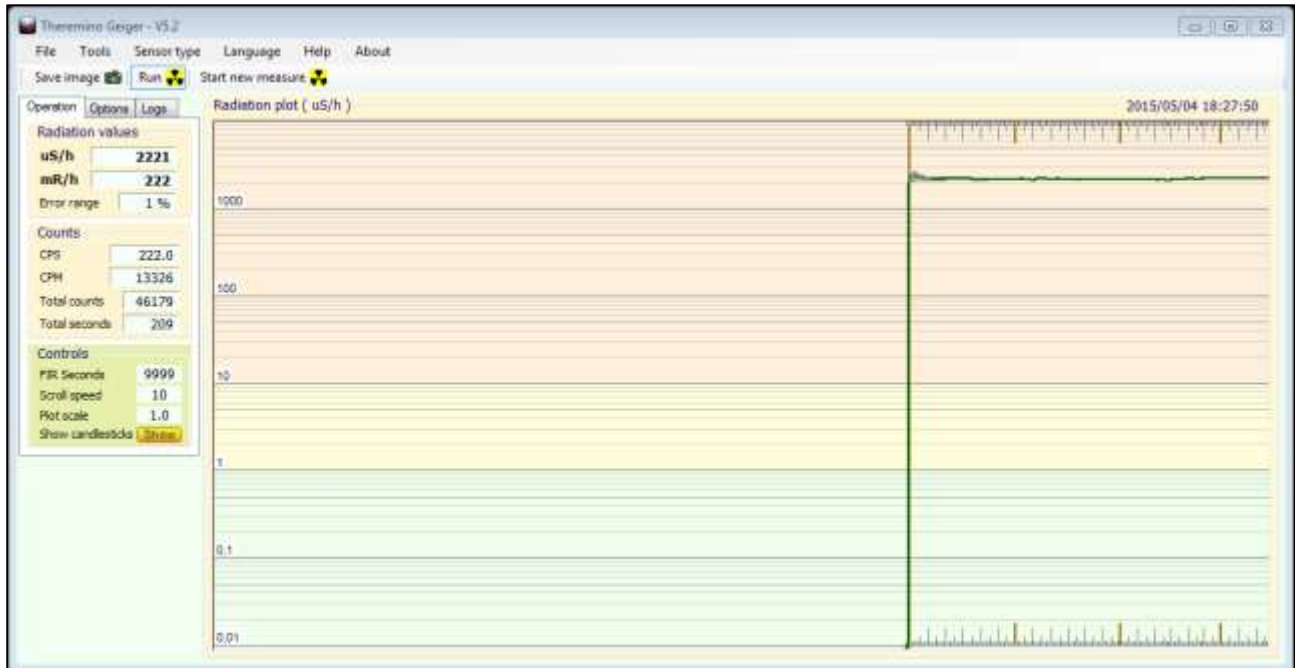
Radio ^{226}Ra su vernice luminescente



Le lancette d'orologio contengono sulla superficie una vernice luminescente a base di radio e solfuro di zinco che funge da scintillatore.

La sonda a scintillazione alfa basata sul SiPM può essere utilizzata per effettuare il conteggio degli eventi di scintillazione che si verificano sulla superficie delle lancette d'orologio. Il contenitore con le lancette d'orologio viene posto all'interno del contenitore, in prossimità del sensore SiPM.

Il risultato di conteggio che si ottiene è visibile nello screenshot di Theremino Geiger con un valore di oltre **13000 CPM**.



SiPM LYSO Gamma Detector

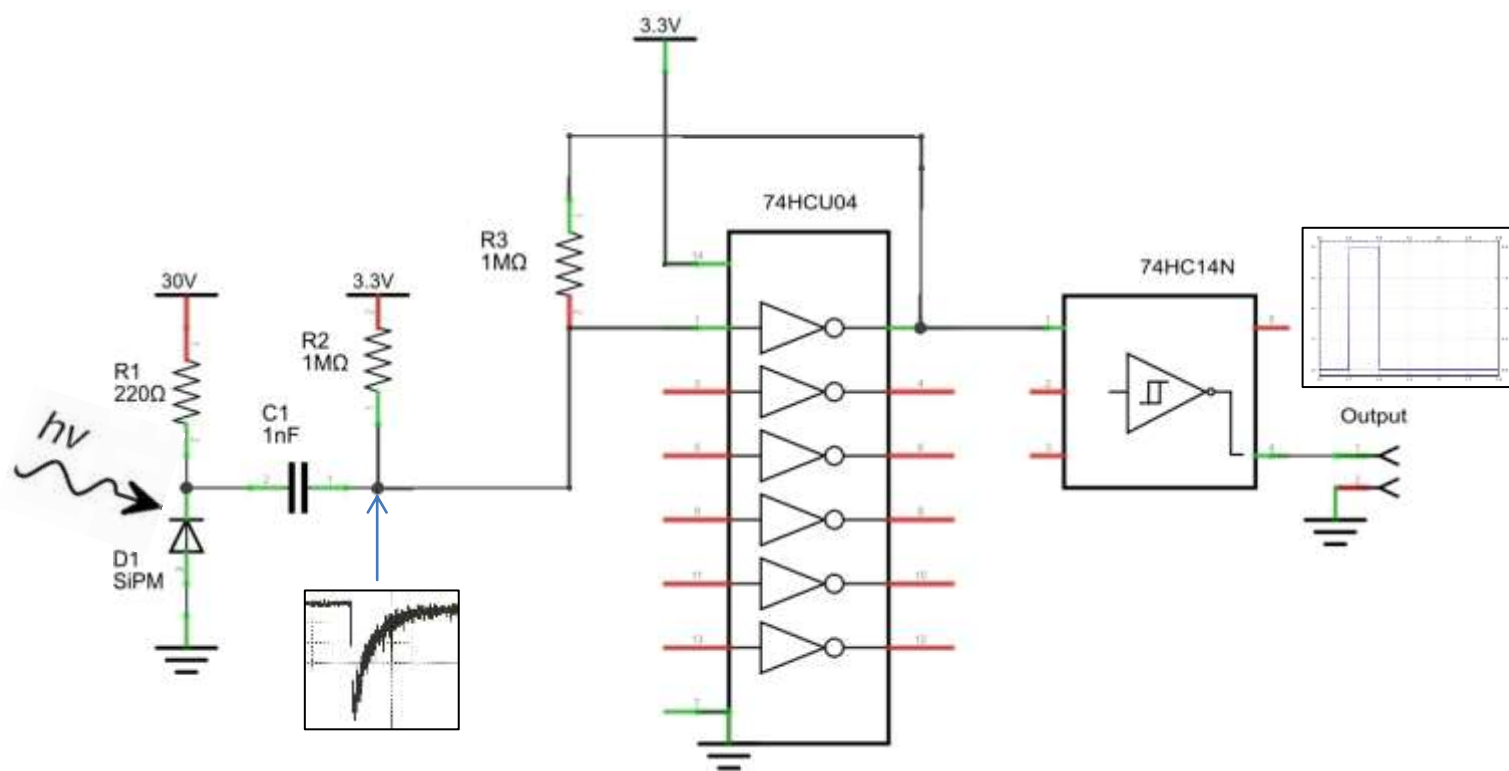
Per utilizzare il SiPM + LYSO come gamma detector è conveniente mantenere il segnale di breve durata. Una resistenza serie da 220ohm ed un condensatore di estrazione del segnale da 1nF costituiscono un buon compromesso che permette di ottenere impulsi di circa 200mV con durata di circa 200ns.

Questi impulsi vengono amplificati da un inverter CMOS non bufferato retro azionato con una resistenza da 1Mohm. Il segnale amplificato viene successivamente squadrato da un altro inverter trigger di schmitt.

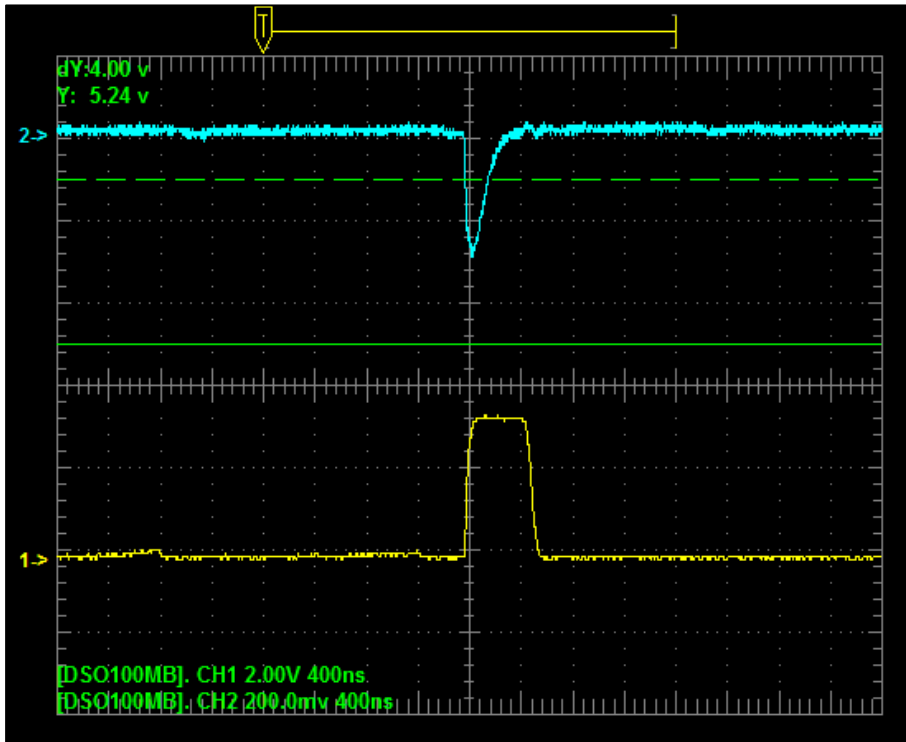
Si ottiene in output un segnale logico positivo CMOS da 3,3V di durata di circa 400ns.

E' stato scelto l'utilizzo degli inverter CMOS perché sono molto più veloci rispetto ad amplificatori operazionali standard e non necessitano di tensioni di alimentazione particolari o sdoppiate.

Il circuito è predisposto per gestire una coppia di gamma detector.

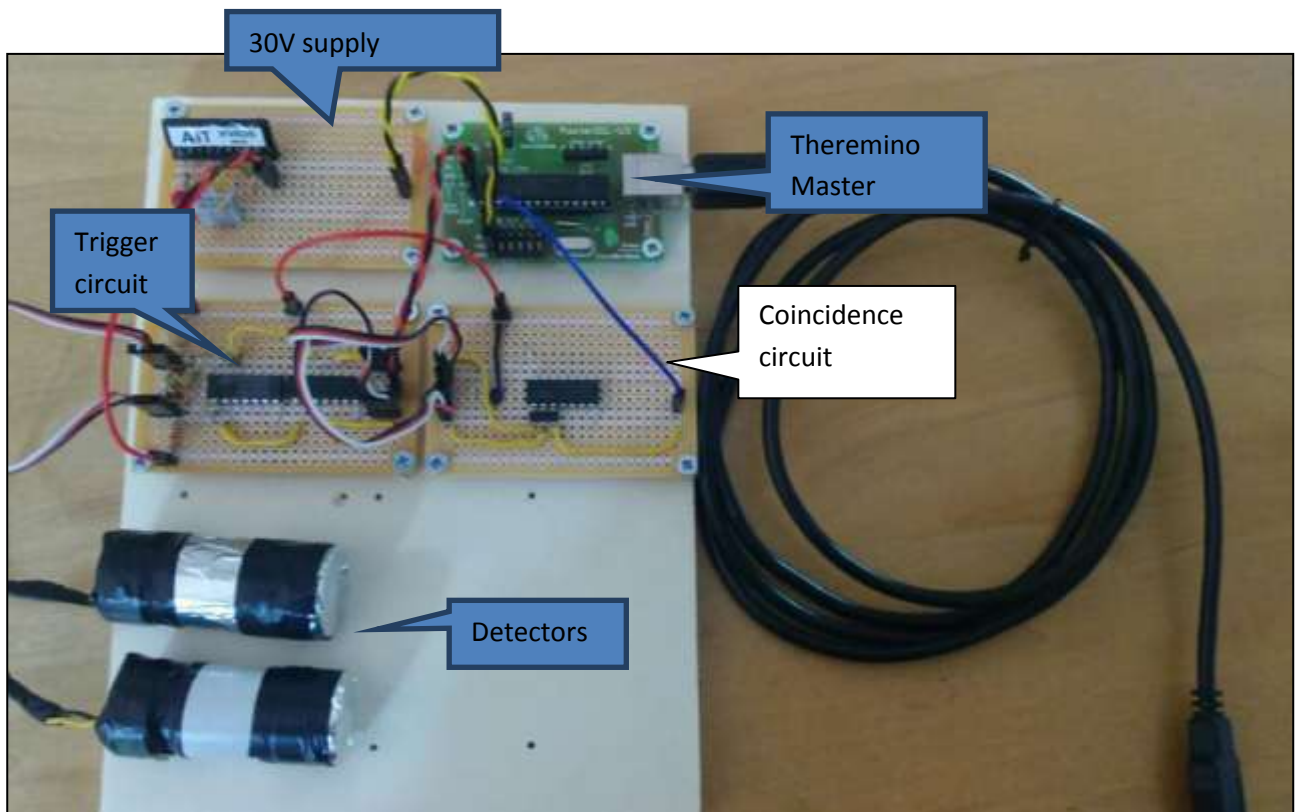


Gli impulsi in uscita vengono inviati ad un modulo Theremino Master su di un PIN configurato come "Fast Counter" per effettuare le operazioni di conteggio.



Nella traccia superiore si vede l'impulso del SiPM di circa 200ns.

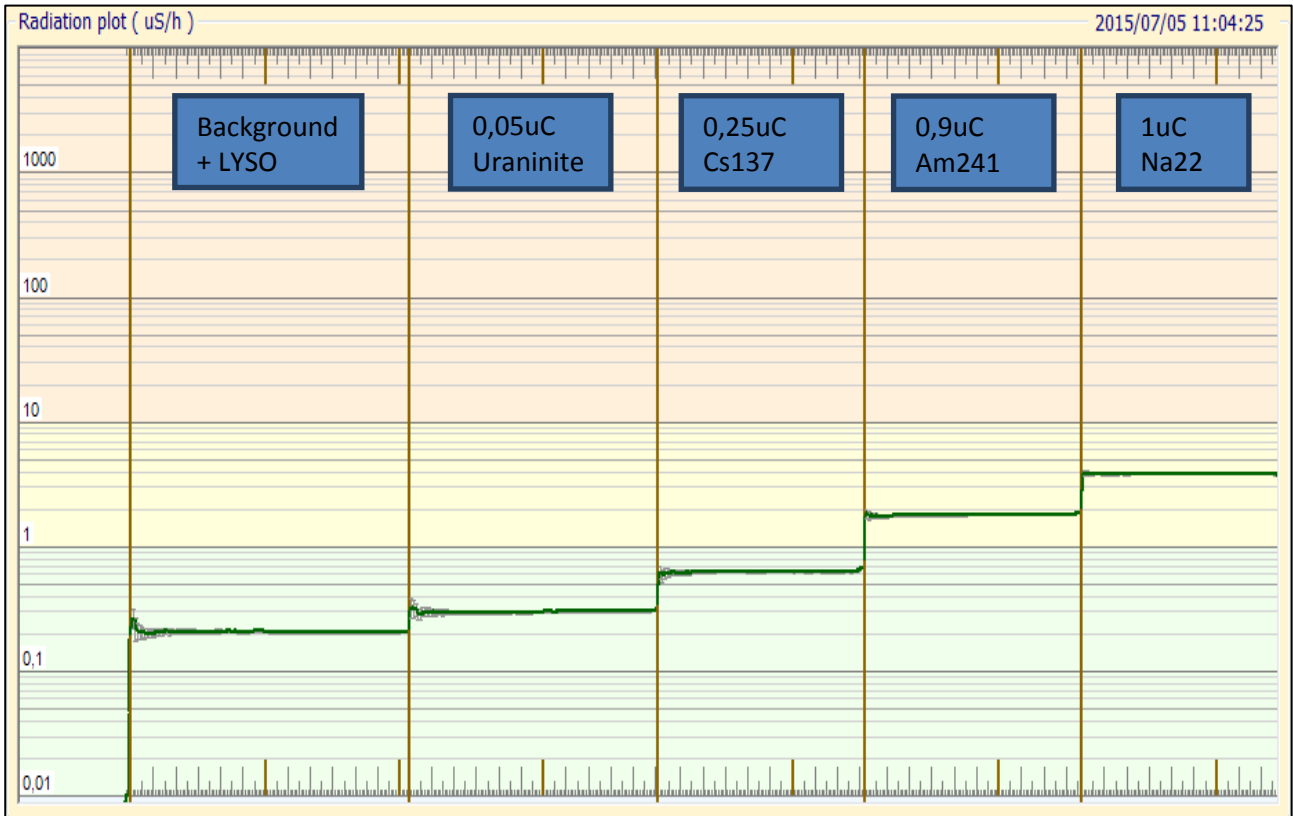
Nella traccia inferiore si vede l'impulso da 3,3V con durata 400ns prodotto dalla catena degli inverter.



Gamma Detector con due sonde SiPM / LYSO, la sezione di alimentazione 30V, la basetta con il collegamento delle sonde ed il circuito di amplificazione e squadratura. Sulla destra in alto c'è il modulo Theremino Master al quale sono inviati gli impulsi per le operazioni di conteggio.

Regolando in Theremino Geiger la sensibilità ed i conteggi di background del detector basato su SiPM e LYSO si possono fare delle misure di radioattività ed ottenere buoni risultati. In particolare il sensore è caratterizzato da una sensibilità molto elevata. Un difetto, di cui però si può in certa misura tenere conto, è l'elevato conteggio che viene registrato a vuoto, circa 100CPS, legato alla radioattività del cristallo LYSO dovuta al contenuto in lutezio.

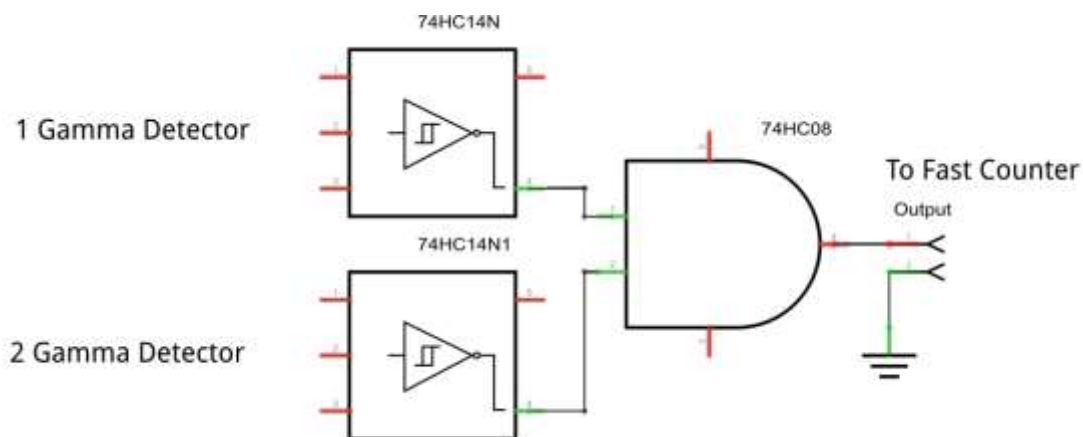
Nel grafico sotto sono riportate le misure effettuate con diverse sorgenti campione di attività nota.



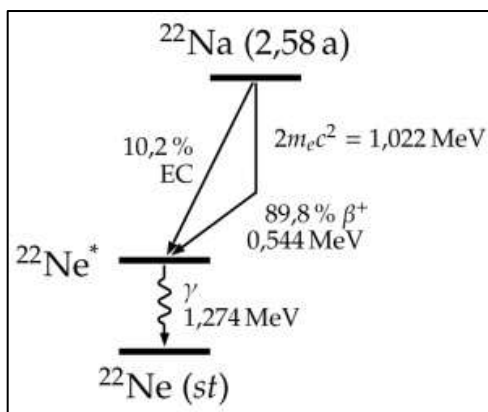
Misure di radioattività fatte con Theremino Geiger ed il gamma detector

Misure di Coincidenza

Le ottime proprietà di timing del SiPM vengono sfruttate per effettuare precise misurazioni di eventi di coincidenza. I test sono stati fatti utilizzando due SiPM gamma detector (vedi paragrafo precedente), le cui uscite logiche vengono inviate ad una logica di AND. In questo modo si ottiene un impulso in uscita soltanto quando i due detector producono un impulso allo stesso istante.

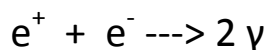


Come sorgente è stata utilizzata una pastiglia di 1 μC di Na22 che presenta una emissione $\gamma - \gamma$ dovuta alla annichilazione del positrone emesso nel decadimento β . I due fotoni gamma di 511keV vengono emessi in direzioni diametralmente opposte a causa del principio di conservazione della quantità di moto.

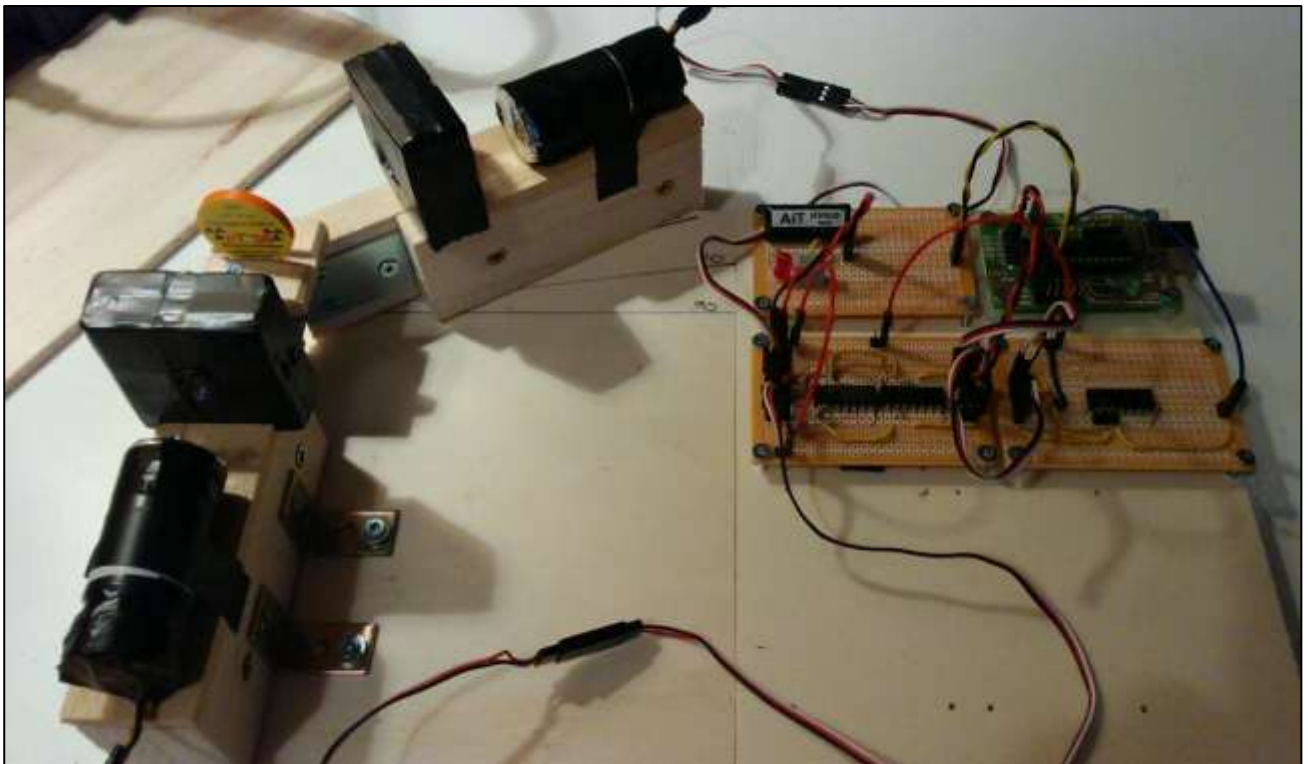
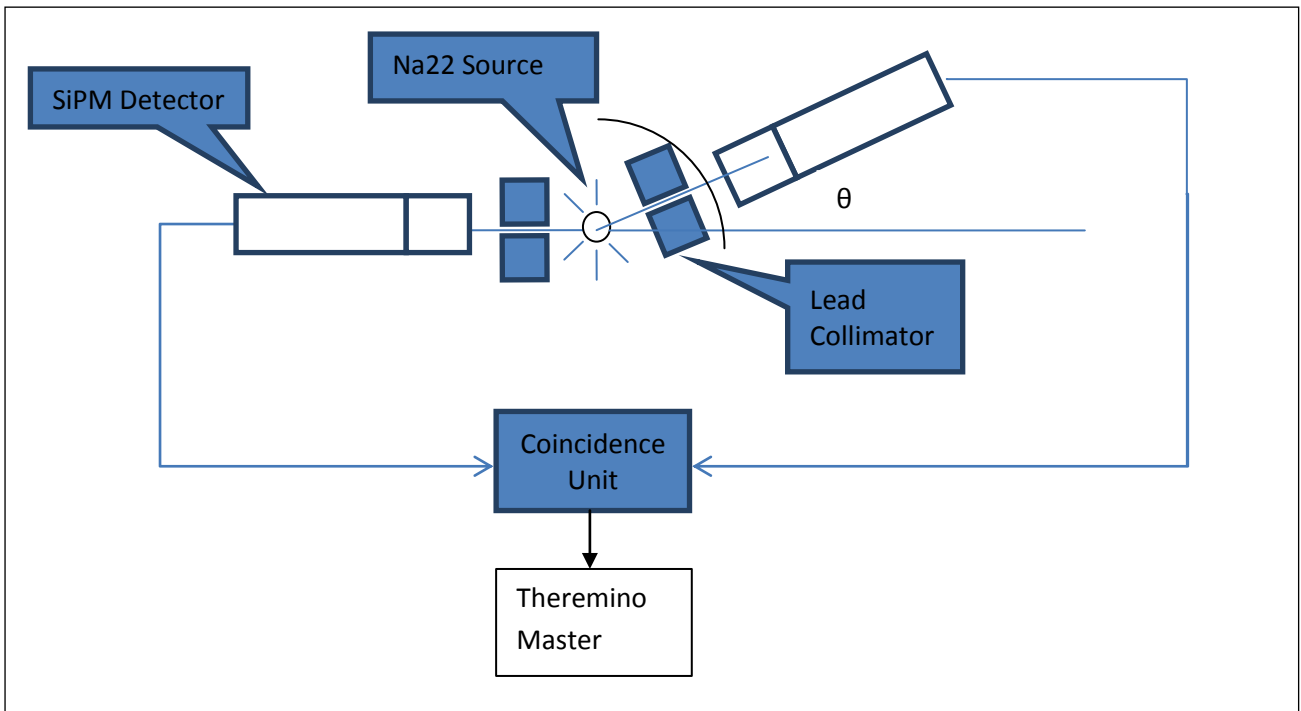


1 μC isotopo ^{22}Na e relativo schema di decadimento

L'isotopo Na 22 decade (nel 99.95% dei casi) con emivita di 2,6 anni, per emissione di positroni o cattura elettronica verso il primo stato eccitato del ^{22}Ne a 1.274 MeV (il quale successivamente si rilassa per emissione di fotone gamma). I positroni emessi dalla sorgente si annichilano nel materiale che fa da supporto alla sorgente, producendo 2 gamma di energia 0.511 MeV ciascuno, secondo il processo :

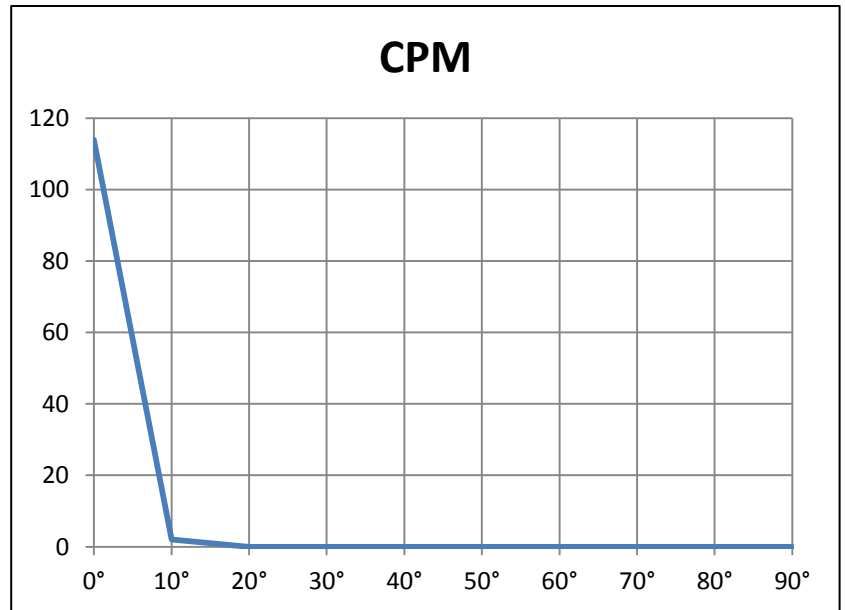


I due fotoni gamma a 0.511MeV vengono emessi a 180 gradi l'uno dall'altro. Questo permette di effettuare misure di correlazione e coincidenza.



Schema e foto del setup sperimentale

θ	CPM
0°	114
10°	2
20°	0.5
30°	0.5
40°	0.5
50°	0.5
60°	0.5
70°	0.5
80°	0.5
90°	0.5



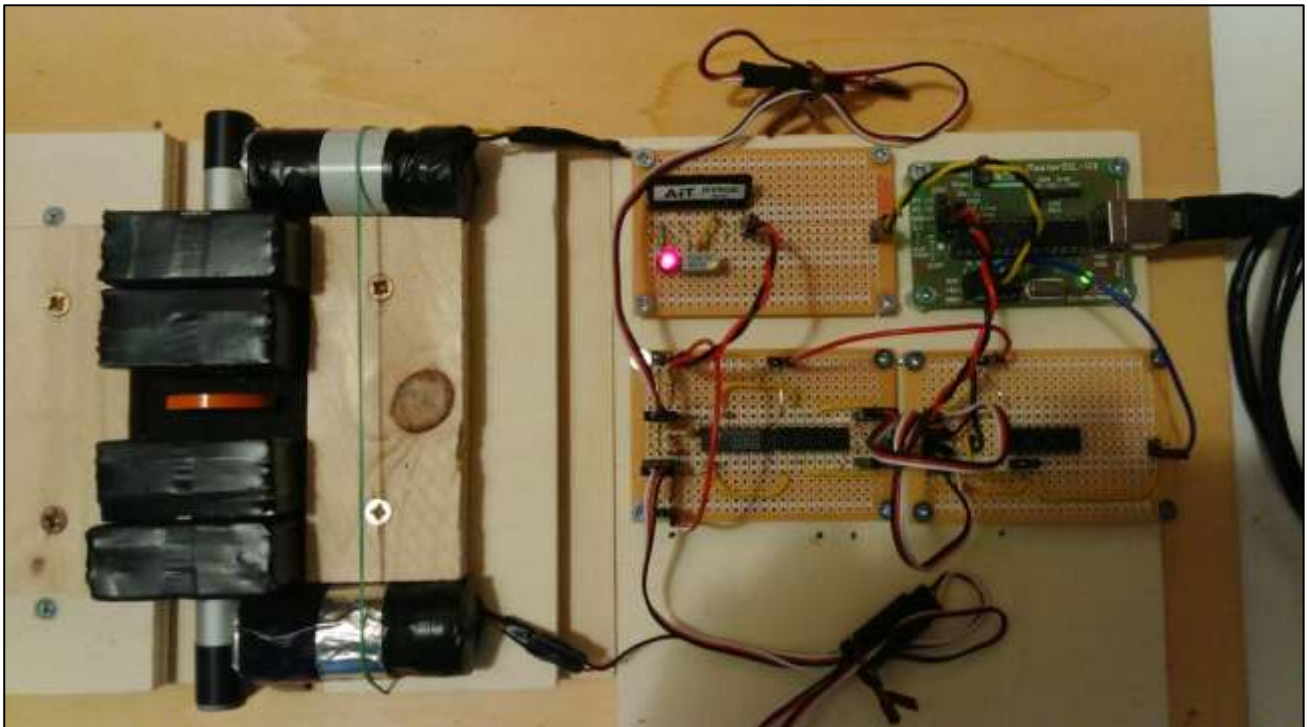
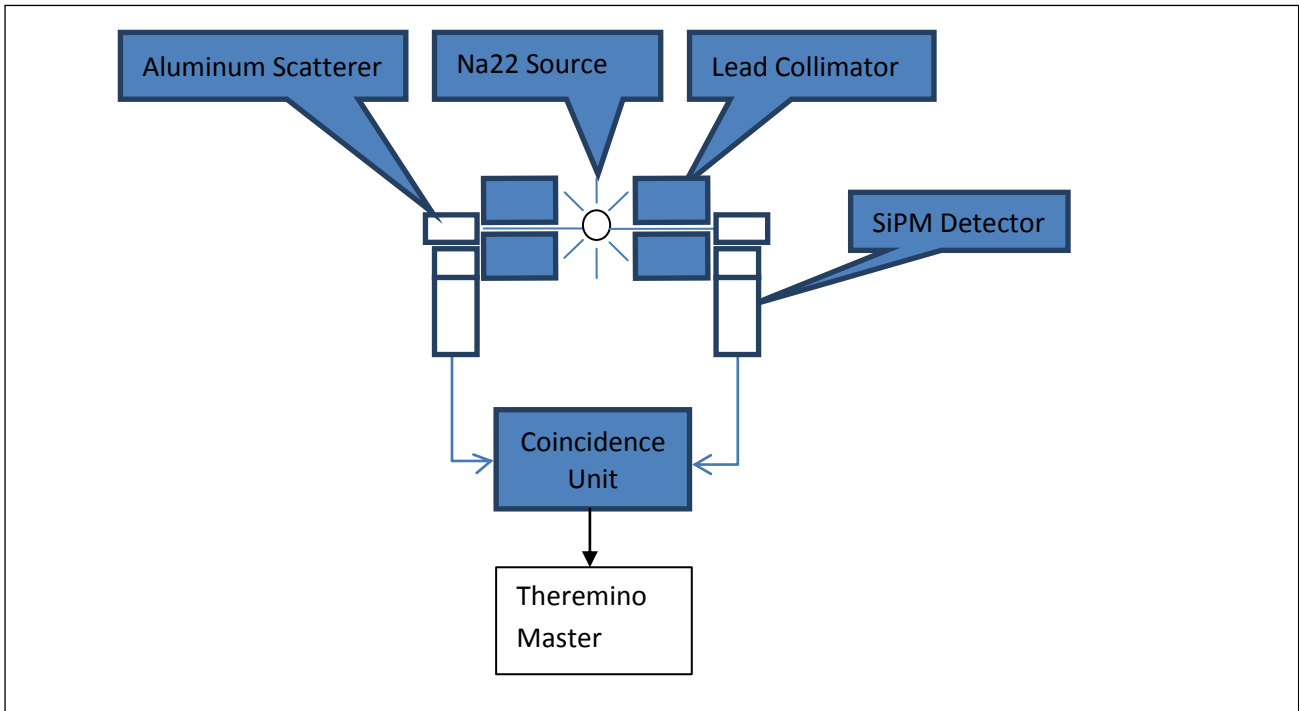
Nella tabella sono mostrati i risultati delle misurazioni (ratemeter) al variare dell'angolo di inclinazione dei due SiPM gamma detector. Le misure sono state fatte su di un tempo di integrazione di 200s.

Il valore di 0.5CPM è il valore di background che si misura " a vuoto" ed è dovuto ad eventi spuri ed a coincidenze casuali che si verificano nei detector, soprattutto a causa della radioattività residua presente nel cristallo LYSO.

Come si può vedere il picco si ottiene quando i due detector sono allineati, all'aumentare dell'angolo di inclinazione il rateo di conteggio si azzerava rapidamente.

Correlazione Angolare nell'emissione Y-Y del Na22

I due SiPM detector in coincidenza sono stati utilizzati per fare delle misure qualitative sulla correlazione angolare dei fotoni gamma emessi nella annichilazione del positrone emesso nel decadimento β dell'isotopo Na22.



Schema e foto del setup sperimentale

Sorgente 1 μ C Na22 – Diffusori Compton da 12mm – Collimatori in piombo da 40 mm con foro da 10mm

Le misure sono state fatte ponendo i detector nelle seguenti due posizioni relative :

- Detector paralleli
- Detector ortogonali



Detector paralleli



Detector ortogonali

Misura (tempo misura 9999s)	CPM
Background senza sorgente Na22	0.50
Background con sorgente Na22 senza compton scatterer	1.30
Detector paralleli	1.68
Detector ortogonali	1.90

Sottraendo il background che si misura senza compton scatterer si ottengono i seguenti valori :

Detector \parallel = 0.38 CPM

Detector \perp = 0.60 CPM

Questi valori sono compatibili con le previsioni teoriche (e le verifiche sperimentali fatte ad esempio nell'esperimento di Wu-Shaknov) che stabiliscono un rateo di conteggio maggiore nel caso in cui i detector sono ortogonali.

Questo viene considerato una conferma che i fotoni gamma emessi sono polarizzati su piani sfasati di 90°.

Questo risultato è compatibile con l'ipotesi che i due fotoni gamma siano entangled.

Disclaimer e Avvertenze sulla Sicurezza

- **Prima di utilizzare qualsiasi sorgente radioattive:** i regolamenti locali, nazionali e internazionali possono limitare l'acquisto, lo stoccaggio, il trasporto, l'uso o lo smaltimento di sorgenti radioattive. Si prega di consultare le normative locali per garantire piena conformità prima di gestire qualsiasi sorgente radioattiva, anche se di piccola intensità.
- **Mai manomettere** un rivelatore di fumo a ionizzazione o tentare di rimuovere la sorgente radioattiva. Non rimuovere il materiale radioattivo da un qualsiasi oggetto.
- Gli esperimenti riportati in questo documento sono destinati a scopi **didattici** e con il fine di **testare** gli strumenti di misura e non dovrebbe **mai essere replicati** senza adeguate conoscenze e senza il pieno rispetto delle normative.

Precauzioni con Sorgenti Radioattive

Tempo: Il modo più semplice per ridurre l'esposizione è quello di mantenere minimo il tempo speso nelle vicinanze di una sorgente radioattiva. Se il tempo è ridotto a metà, così sarà l'esposizione, mantenendo costanti tutti gli altri fattori.

Distanza: la distanza è un altro mezzo efficace per ridurre l'esposizione alle radiazioni. Una formula nota come "legge dell'inverso del quadrato" mette in relazione il tasso di esposizione alla distanza. Il raddoppio della distanza da una sorgente radioattiva riduce l'esposizione a un quarto del valore originale. Se la distanza è triplicato, l'esposizione è ridotta di un fattore nove.

Schermatura: La schermatura è costituita da un qualsiasi materiale utilizzato per ridurre le radiazioni che raggiungono l'utente. Mentre un singolo foglio di carta può bloccare alcuni tipi di radiazioni come le particelle alfa, altra radiazione come neutroni e fotoni gamma richiedono molta più schermatura. Materiali densi, quali piombo o acciaio, sono usati per proteggersi dai fotoni gamma. Materiali contenenti grandi quantità di idrogeno, come polietilene, vengono utilizzati per proteggersi dai neutroni.

Nessun alimento o bevanda è in assoluto ammesso in un laboratorio con sorgenti radioattive.

Ringraziamenti

Si ringrazia la **AdvanSiD**, in particolare Claudio ed Alessandro, per aver fornito i moduli SiPM utilizzati nelle prove effettuate.