
SiPM & Plastic Scintillator

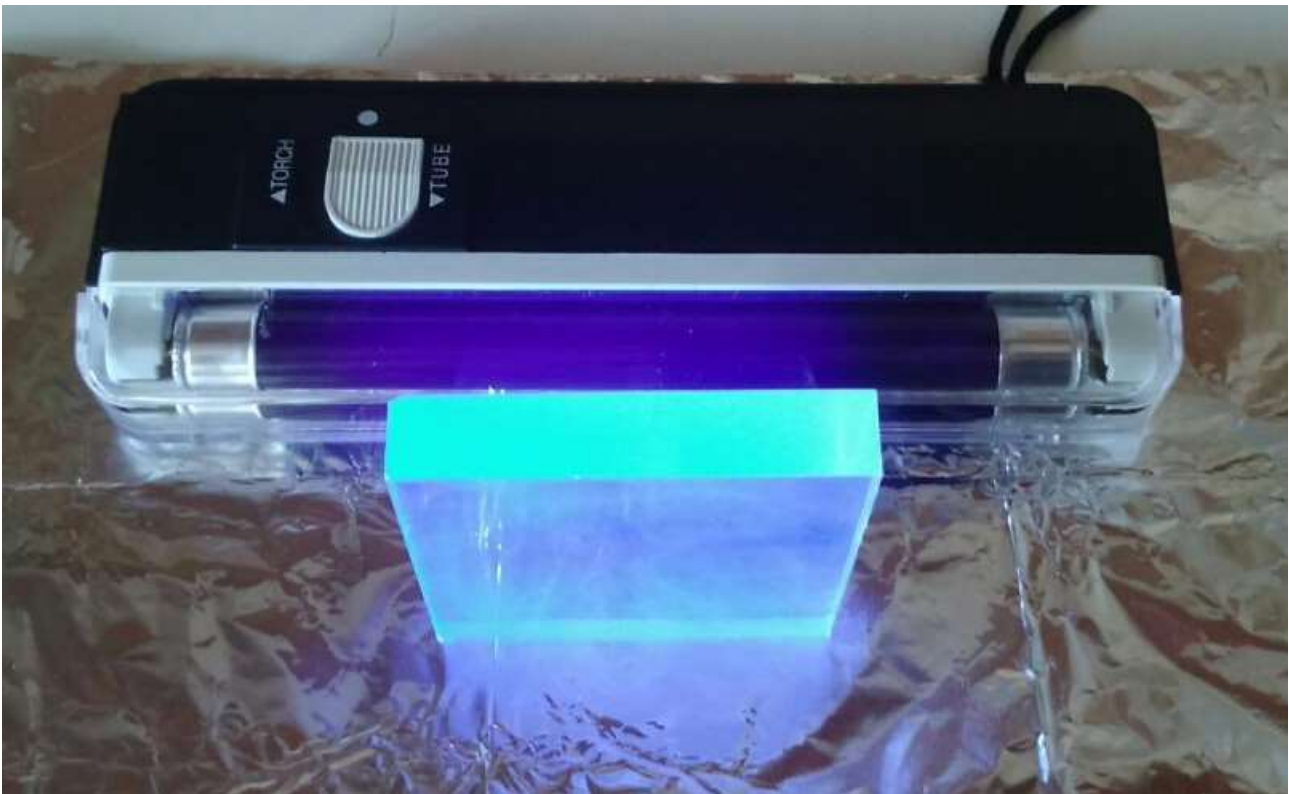
Utilizzo del fotomoltiplicatore al silicio
accoppiato con scintillatori plastici

Lodovico Lappetito

Sommario

| | |
|--|----|
| Introduzione | 3 |
| Scintillatori Plastici..... | 3 |
| Costruzione Detector..... | 4 |
| Setup sperimentale | 6 |
| Misure di Conteggio | 7 |
| Misura del Fondo..... | 8 |
| Misura di Isotopi Radioattivi..... | 9 |
| Valutazione Sensibilità alle Radiazioni Gamma..... | 11 |
| Utilizzo in Coincidenza..... | 12 |
| Risultati dei Conteggi in Coincidenza | 14 |
| Studio su Cascate Elettromagnetiche indotte da Raggi Cosmici | 15 |
| Introduzione | 15 |
| Cascate Elettromagnetiche..... | 16 |
| Cascate Elettromagnetiche nel Piombo | 17 |
| Riproduzione dell'esperimento di Rossi sulle Cascate Elettromagnetiche | 19 |
| Risultati..... | 20 |

Introduzione



In questo documento descriviamo l'utilizzo di scintillatori plastici accoppiati a SiPM per la rilevazione di particelle. Un detector di questo tipo è particolarmente sensibile alle particelle cariche e quindi può essere utilizzato per la rilevazione dei muoni cosmici e per la rilevazione degli elettroni prodotti da radioattività β .

Scintillatori Plastici

Il termine "scintillatore plastico" si riferisce tipicamente ad un materiale scintillante in cui l'emettitore fluorescente primario, chiamato fluoroforo, è sospeso in una base, una matrice polimerica solida. Mentre questa combinazione viene tipicamente realizzato attraverso la dissoluzione del fluoroforo prima della polimerizzazione, il fluoroforo è talvolta associato direttamente con il polimero, come è il caso di molti scintillatori plastici di tipo LI6. Il polietilen-naftalato è stato trovato in grado di dare scintillazione da solo senza additivi e si prevede che sostituisca molti scintillatori plastici esistenti a causa delle migliori prestazioni ed il prezzo più basso.

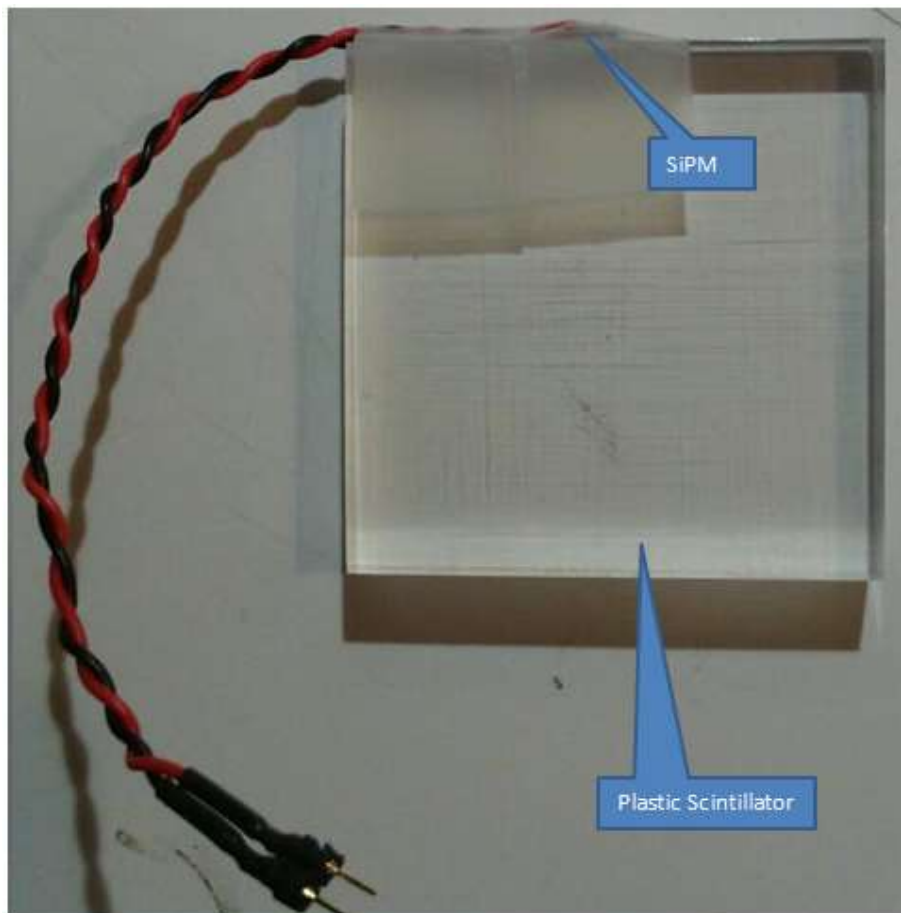
I vantaggi degli scintillatori plastici sono l'**elevata resa luminosa ed un segnale veloce, con un tempo di decadimento di 2-4 nanosecondi**, ma forse il più grande vantaggio degli scintillatori plastici è la loro **capacità di essere modellati**, attraverso l'uso di stampi o altri mezzi, in praticamente qualsiasi forma desiderata. Gli scintillatori plastica sono noti per dare saturazione quando la densità di energia in gioco è molto elevata (legge di Birks).

Costruzione Detector

Il detector è stato assemblato accoppiando un sensore SiPM con un cristallo scintillatore. I SiPM sono stati descritti in altro documento. Il sensore è un SiPM della AdvanSiD, sensibile nel vicino ultravioletto, con una area utile di 4x4mm, mostrato nella figura sotto (SiPM NUV 4x4mm) :



Il sensore SiPM è stato collocato su di un lato del cristallo scintillatore e fissato con del nastro adesivo trasparente, per aumentare l'efficienza dell'accoppiamento ottico, tra il SiPM ed il cristallo è stato steso uno strato di grasso ottico siliconico :



Il cristallo plastico con il SiPM è stato avvolto in carta di alluminio riflettente in modo da aumentare la probabilità che i fotoni prodotti nella scintillazione vengano catturati dal sensore SiPM :

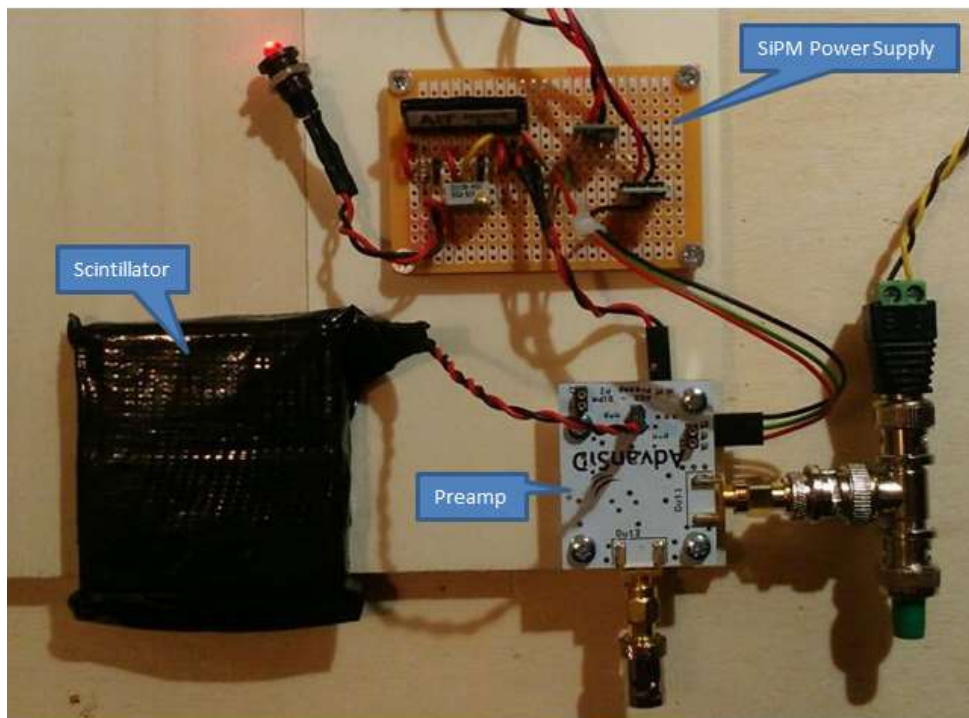


Per evitare che il SiPM possa essere raggiunto dalla luce ambientale, il tutto è stato avvolto con del nastro opaco nero :

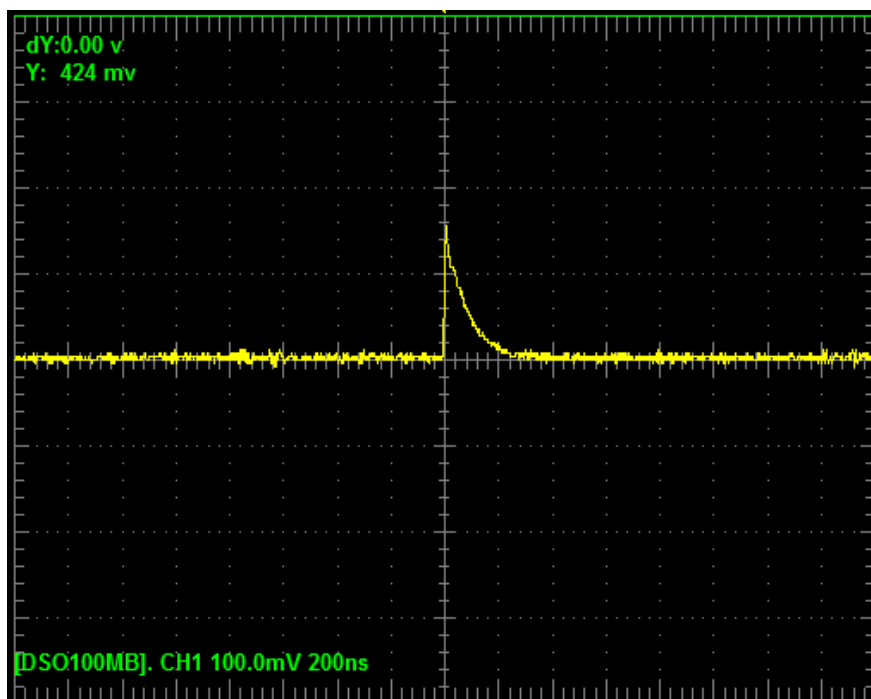


Setup sperimentale

Per le prime prove con lo scintillatore plastico accoppiato al SiPM è stato utilizzato il preamplificatore della AdvanSiD. Le immagini presenti sotto mostrano il collegamento del dispositivo :



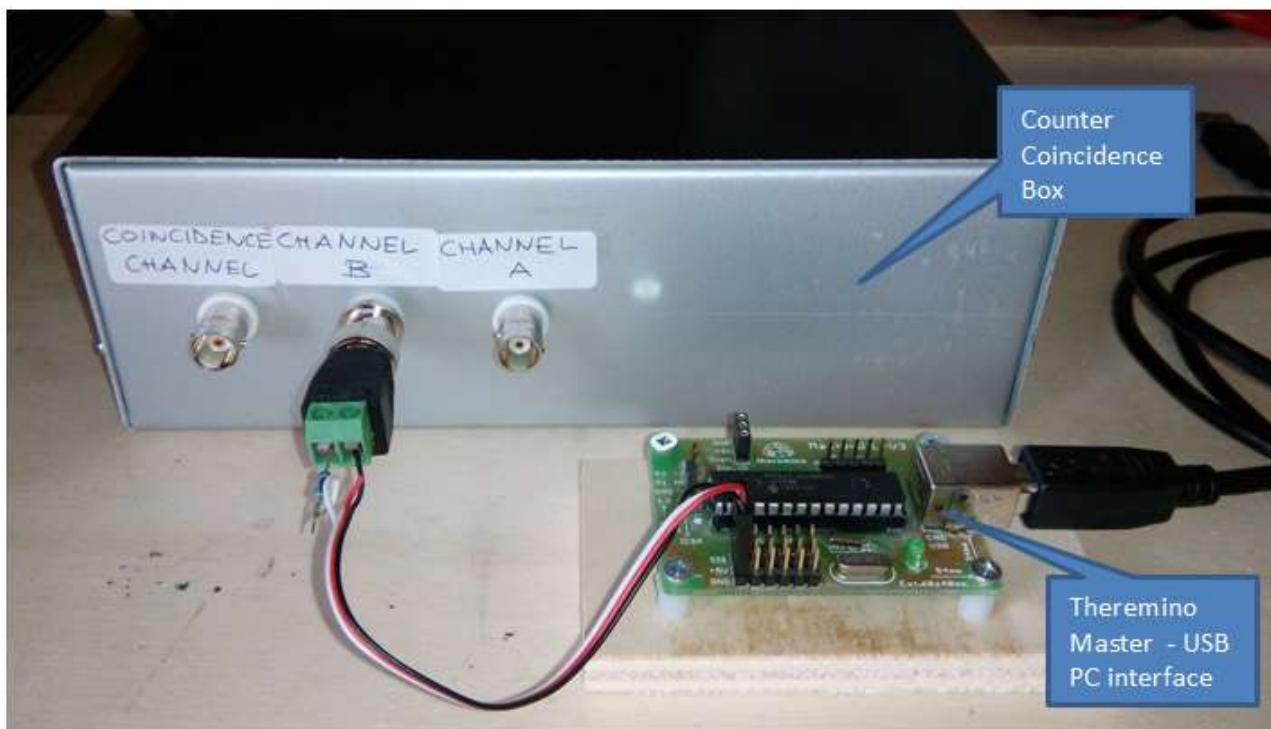
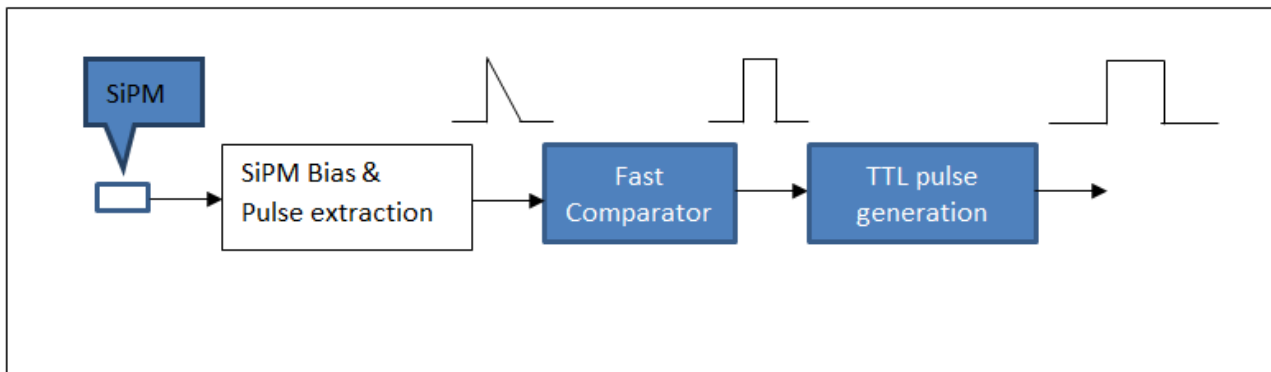
L'immagine sotto mostra la traccia di un impulso generata dallo scintillatore plastico ed acquisita con l'oscilloscopio.



Lo scintillatore plastico è sensibile alle particelle cariche quindi gli impulsi generati da questo scintillatore sono molto probabilmente dovuti ai **muoni cosmici** che interagiscono con il cristallo. Gli impulsi di ampiezza ridotta (**10-20mV**) sono invece dovuti al rumore del sensore SiPM. Gli impulsi prodotti dal passaggio di particelle cariche attraverso il cristallo hanno ampiezza di **100-200mV**, quindi sono facilmente distinguibili dagli impulsi dovuti al rumore. Oltre agli impulsi prodotti dai raggi cosmici il cristallo scintillatore risponde anche, ma in misura molto più debole, ai raggi gamma presenti nella radiazione di fondo.

Misure di Conteggio

Per effettuare misure di conteggio è stato utilizzato un circuito che effettua la polarizzazione del SiPM e l'estrazione dell'impulso, l'impulso viene elaborato da un **comparatore veloce** con una soglia di **100mV** che produce in uscita un impulso di circa **200ns**, il quale viene ulteriormente elaborato per produrre in uscita un **impulso TTL da +5V e 10µs** di durata. Questo impulso viene inviato al "Theremino Master" che effettua il conteggio degli impulsi, che vengono poi visualizzati dal software "Theremino Geiger".





Misura del Fondo

La prima misurazione è stata quella della radiazione di fondo. Sapendo che il cristallo plastico è principalmente sensibile alle particelle cariche ci aspettiamo di ottenere una diretta misurazione del flusso di raggi cosmici sulla superficie del detector : Il flusso di particelle che raggiungono il rivelatore (al livello del mare) dovrebbe avere il seguente valore :

Area utile del cristallo scintillatore = 32,5cm²

32,5 cm² x 0,01 particelle/s cm² = 0,32 particelle/s = 0,32cps teorici

Il risultato ottenuto è mostrato nella figura sotto :



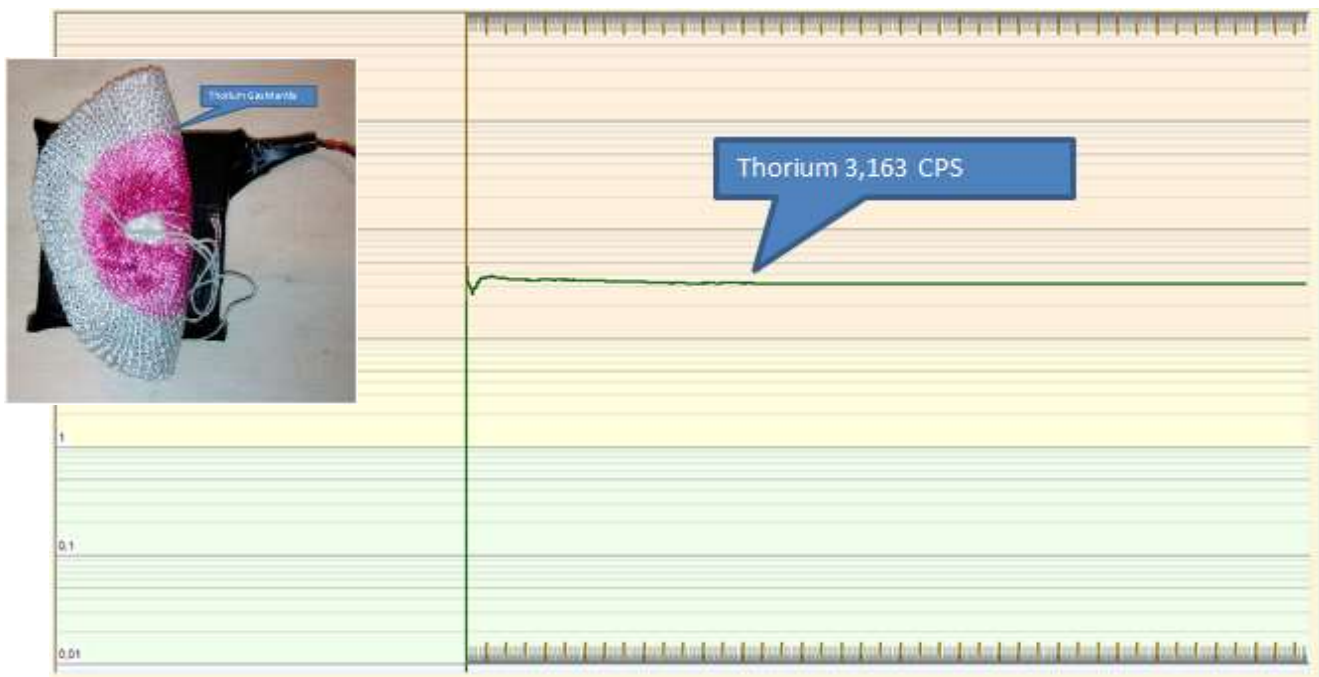
Si vede come il valore ottenuto è leggermente maggiore del valore teorico, questo può essere dovuto sia al fatto che la misurazione è stata effettuata ad una altezza di 375slm e quindi il flusso di raggi cosmici è maggiore che al livello del mare, e sia al fatto che una parte degli eventi registrati dal detector può essere dovuta alla radiazione di fondo.

Misura di Isotopi Radioattivi

Con il medesimo setup : scintillatore plastico, SiPM e counting box, sono state fatte misure di conteggio su alcuni campioni debolmente radioattivi. Le misure sono state fatte mettendo la sorgente a diretto contatto con il detector.

Torio

Come campione di Torio è stata utilizzata una reticella toriata. L'emissione comprende un discreto quantitativo di radiazione β (elettroni), facilmente rilevati dal sensore, infatti il risultato del conteggio è sensibilmente superiore al valore del fondo.



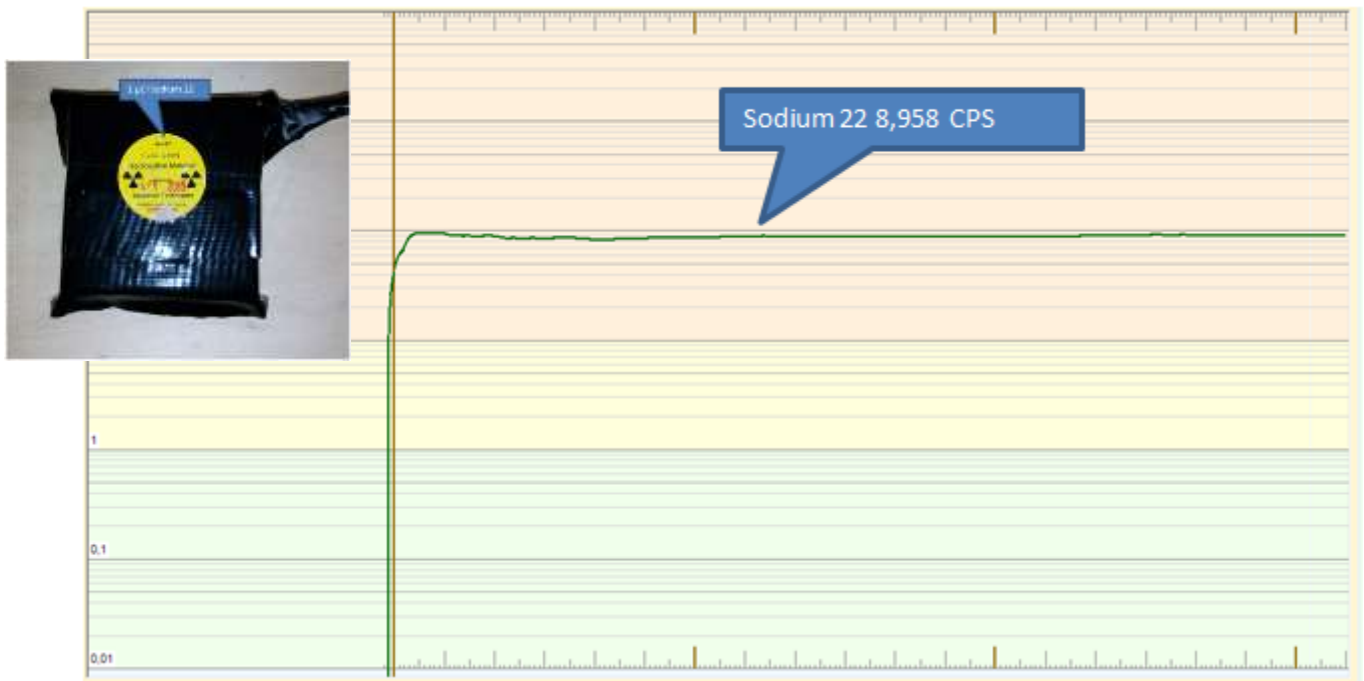
Cesio 137

Per il Cesio è stato utilizzato un campione da 0,25 μCi . L'emissione comprende un debole quantitativo di radiazione β (elettroni), che comunque sono rilevati dal sensore, infatti il risultato del conteggio è di poco superiore al valore del fondo. **La principale emissione gamma del Cesio a 662keV non viene praticamente rilevata.**



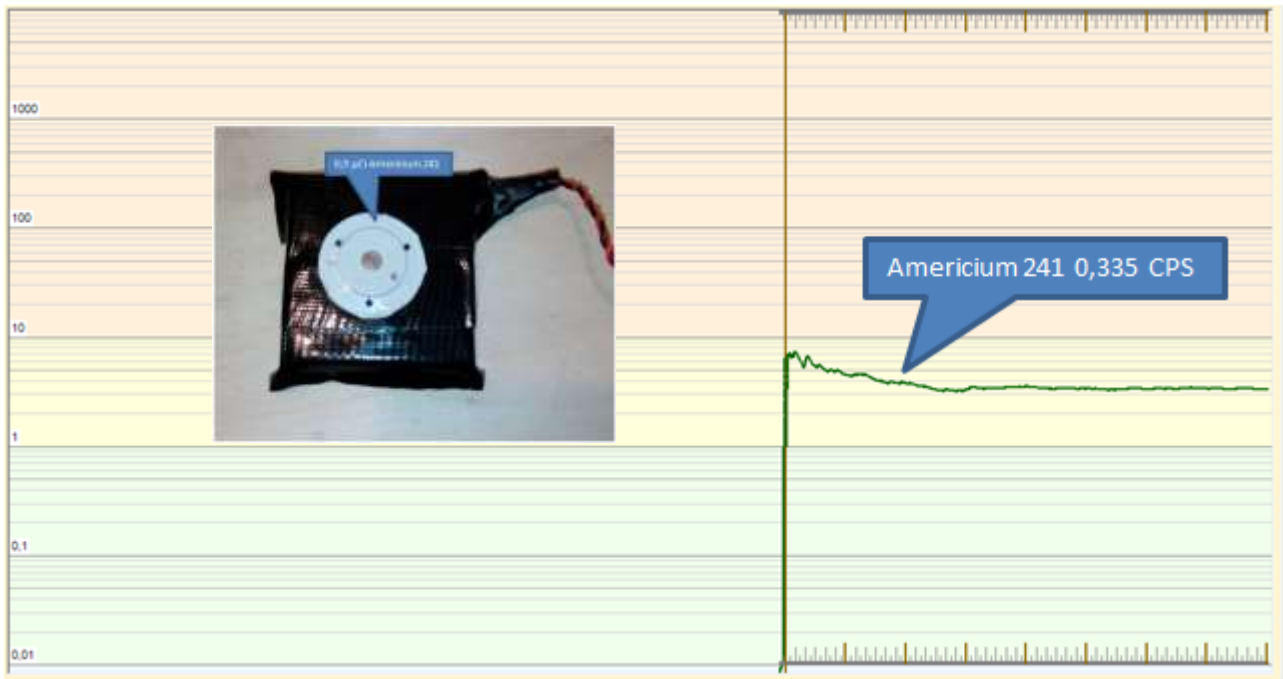
Sodio 22

Per il Sodio è stato utilizzato un campione da 1 µCi. L'emissione comprende un considerevole quantitativo di radiazione gamma e beta (positroni) rilevata dal sensore, infatti il risultato del conteggio è di molto superiore al valore del fondo.



Americio 241

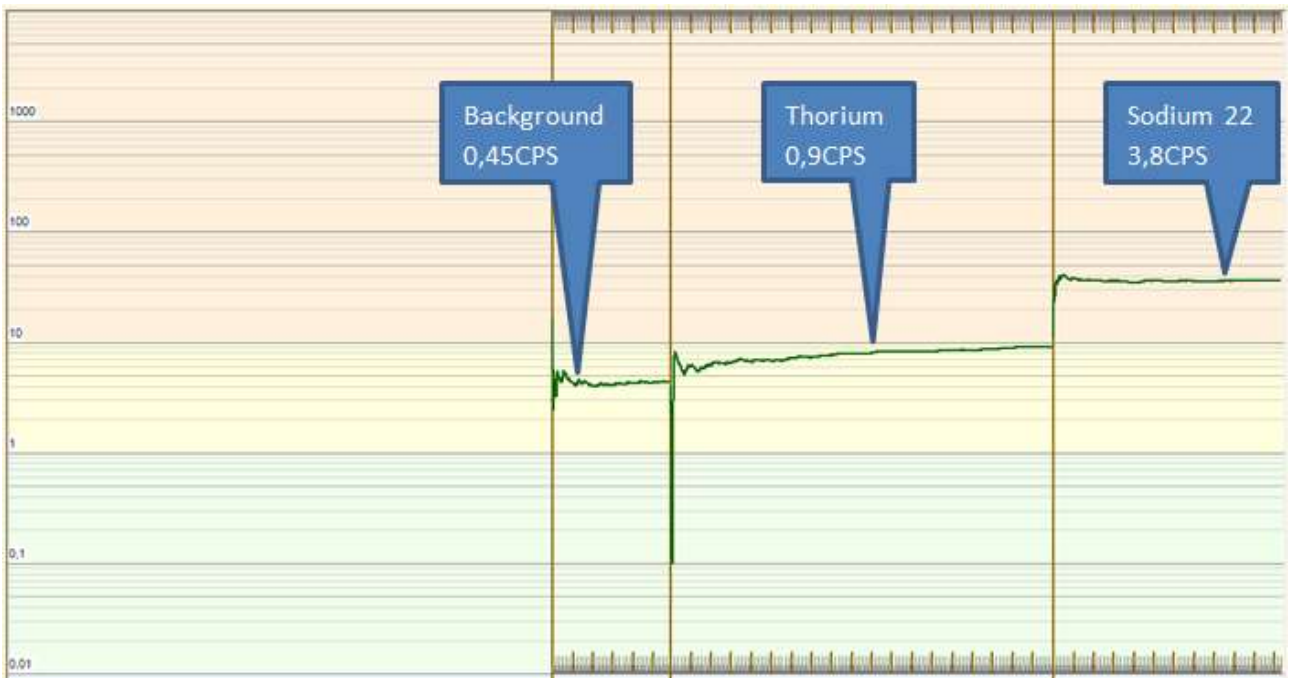
Per l'Americio è stato utilizzato un campione da 0,9 μCi . L'emissione comprende un considerevole quantitativo di radiazione α , che non possono essere rilevati dal sensore, infatti il risultato del conteggio non si discosta dal valore del fondo. **La principale emissione gamma dell'Americio a 60keV non viene praticamente rilevata.**



Valutazione Sensibilità alle Radiazioni Gamma

Per valutare la sensibilità del detector alla radiazione gamma è stata fatta una misurazione con le due sorgenti di torio e di Sodio 22 che emettono un discreto quantitativo di emissioni gamma, schermate da una lastra di alluminio che dovrebbe fermare la maggior parte della radiazione beta :

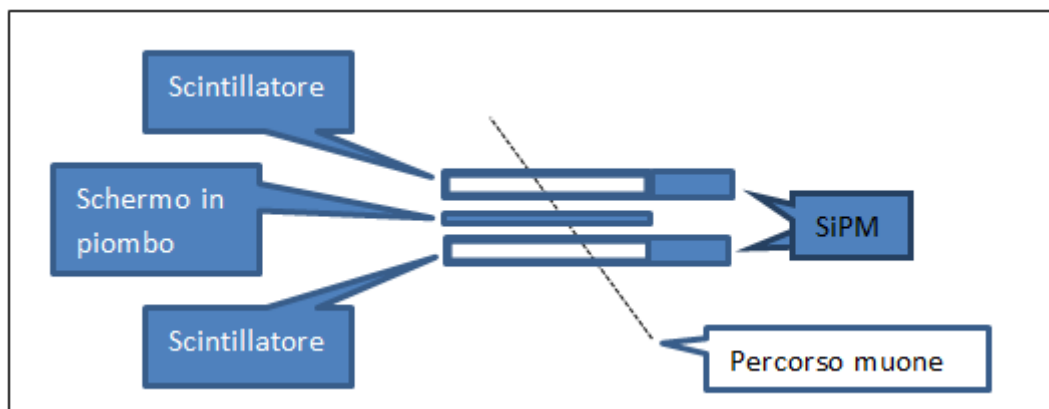




Dai risultati dei conteggi si vede che il sensore risponde in misura ridotta con la schermatura di alluminio, rimane però una **certa sensibilità anche alle radiazioni gamma**, che sono debolmente schermate dalla lastra di alluminio.

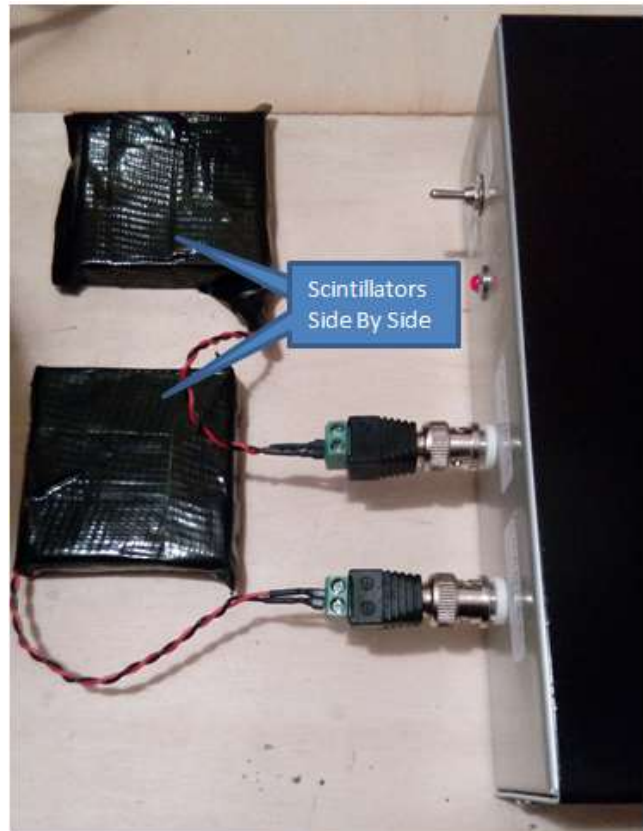
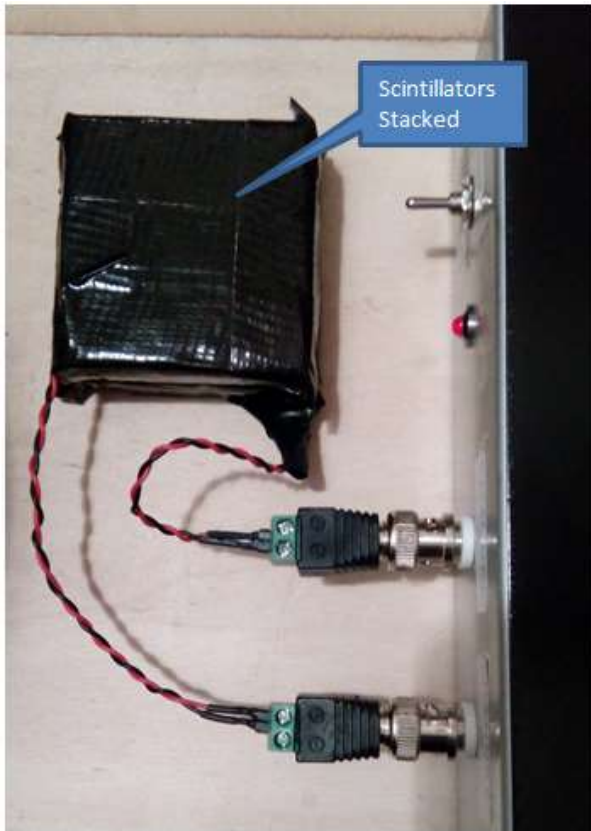
Utilizzo in Coincidenza

Per aumentare la sicurezza che gli eventi registrati siano effettivamente dovuti ai raggi cosmici si è scelto di utilizzare due detector uguali sovrapposti uno all'altro e collegati ad un circuito di coincidenza.

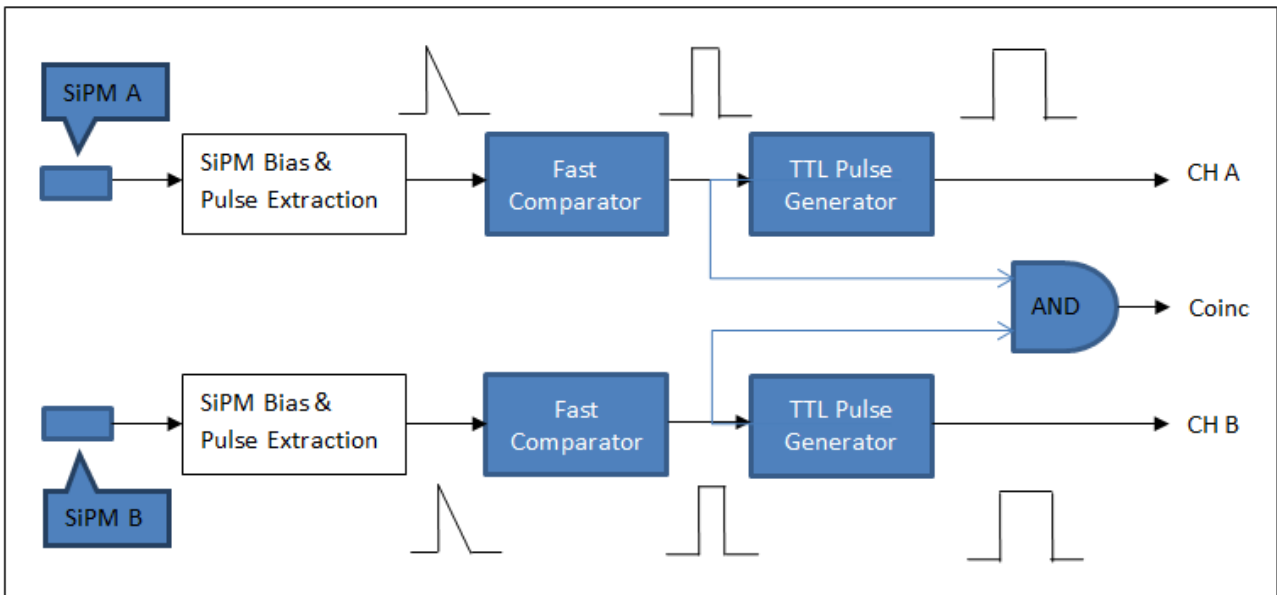


Come si vede nella figura sopra i due cristalli plastici scintillatori sono stati posti uno sopra l'altro e separati da uno schermo di piombo per fermare la radiazione ambientale.

Nelle immagini sotto si vedono i detector nella posizione sovrapposta per le misurazioni in coincidenza e nella posizione affiancata, utilizzata per valutare le coincidenze casuali dovute ad eventi spuri o radiazione di fondo.



Gli impulsi prodotti dai SiPM vengono inviati ad una apparecchiatura elettronica che effettua la formatura degli impulsi e produce l'impulso di coincidenza con una porta logica AND :



Risultati dei Conteggi in Coincidenza

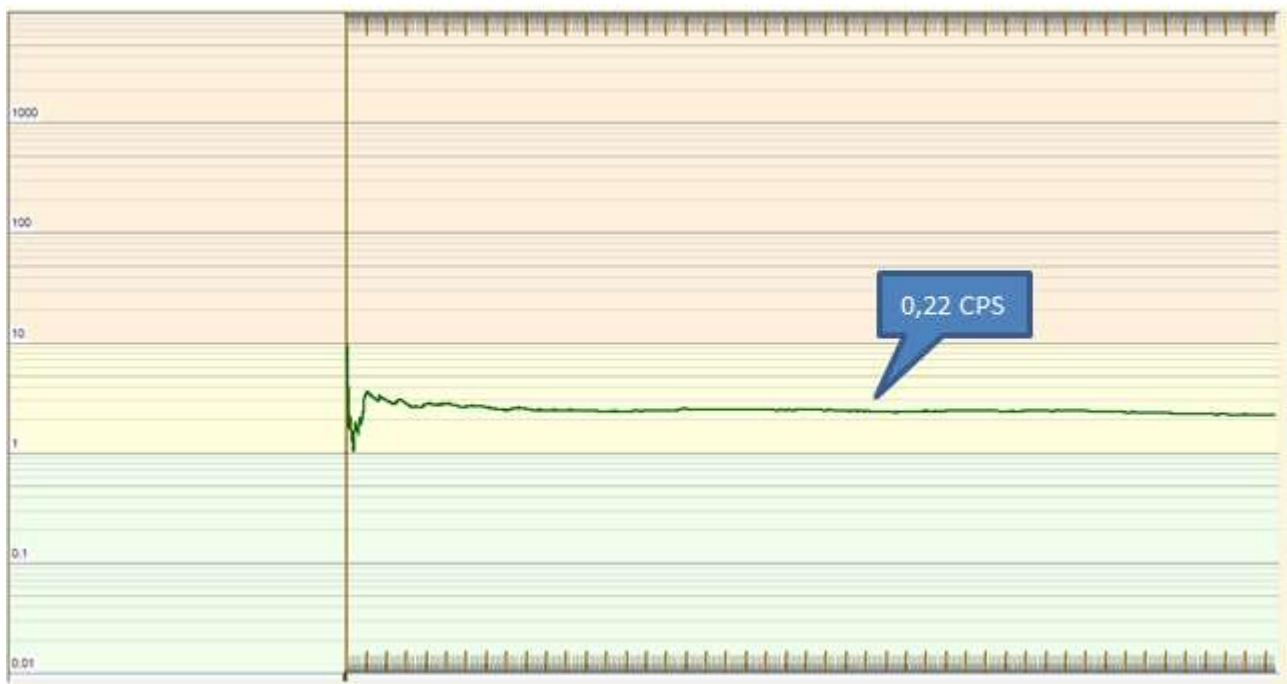
Posizionando i cristalli scintillatori fianco a fianco, il risultato dei conteggi è praticamente nullo, segno della buona "risoluzione" temporale del circuito di coincidenza, infatti gli impulsi prodotti dal fast comparator, ed utilizzati per la logica di coincidenza, hanno una durata di soli circa 200ns; la probabilità di false coincidenze è quindi molto bassa.

Posizionando i cristalli scintillatori uno sopra l'altro si ottiene invece un valore di conteggio che è vicino al valore teorico previsto per il flusso di raggi cosmici sulla superficie del detector.

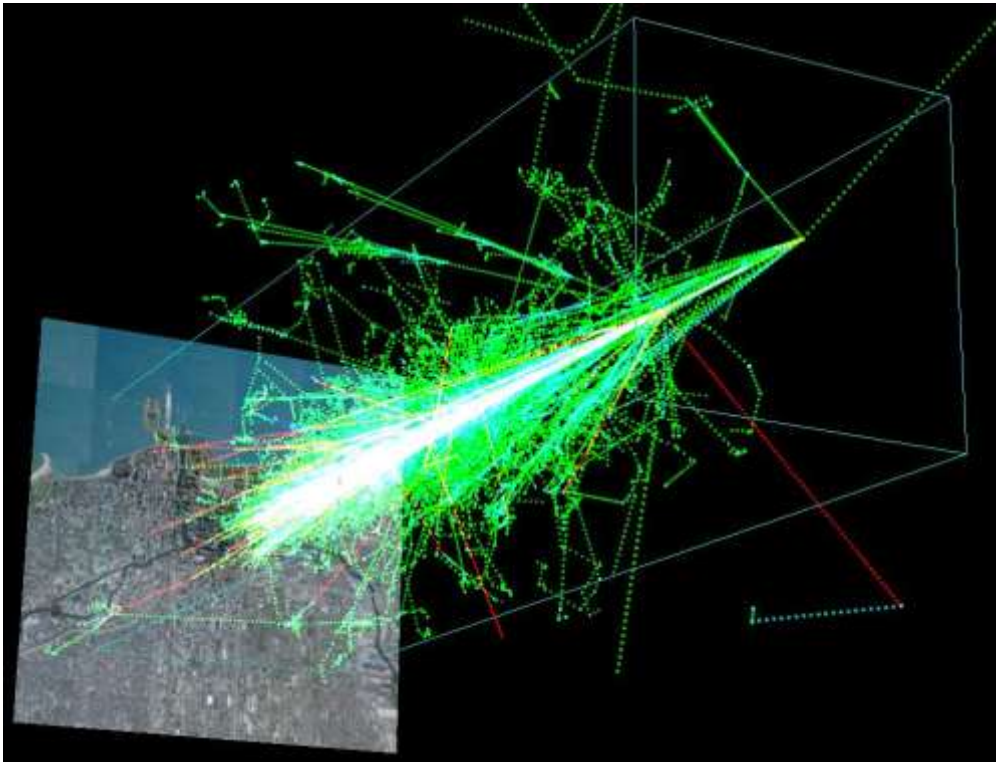
Il flusso di particelle che raggiungono il rivelatore (al livello del mare) dovrebbe avere il seguente valore :

Area utile del cristallo scintillatore = 32,5cm²

32,5cm² x 0,01 particelle/s cm² = 0,32 particelle/s = 0,32cps teorici



Studio su Cascate Elettromagnetiche indotte da Raggi Cosmici



Introduzione

La Terra è continuamente bombardata da particelle ad alta energia provenienti dallo spazio profondo. Le particelle sono principalmente protoni altamente energetici insieme con una piccola componente di nuclei di elio, nuclei più pesanti ed elettroni. L'intervallo di energia è enorme con alcune particelle che raggiungono energie dell'ordine di 10^{20} eV.

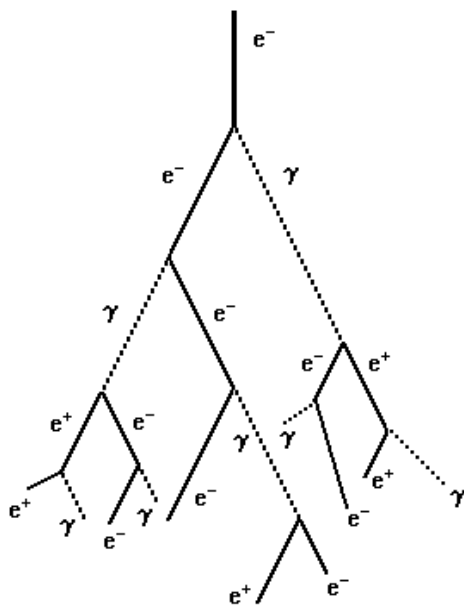
La Terra viene continuamente colpita da questi raggi cosmici primari ad un rate di circa una particella per centimetro quadrato per secondo. Collidono con gli atomi nell'atmosfera e producono estesi sciami di particelle secondarie la cui progenie può essere rilevata a livello del suolo. Le interazioni iniziali nell'atmosfera superiore producono un gran numero di pioni carichi e pioni neutri. Il pione carico decade in muoni e neutrini muonici, mentre i **pioni neutri decadono in coppie di fotoni ad alta energia che diventano i punti di partenza degli estesi sciami di elettroni, positroni e raggi gamma**. Il flusso risultante di particelle a livello del suolo consiste principalmente di questi muoni ed elettroni / positroni nella proporzione di circa il 75 al 25 per cento.

I muoni perdono la loro energia gradualmente per ionizzazione del materiale attraverso il quale passano. Dato che hanno elevata energia iniziale hanno la capacità di ionizzare molti atomi prima che la loro energia si esaurisca. Inoltre, mentre viaggiano quasi alla velocità della luce, tendono a non ionizzare molto efficientemente e quindi possono percorrere lunghezze notevoli nella materia, alcuni metri di piombo, prima di essere fermati.

Il processo è un po' diverso per gli elettroni. La teoria dimostra che la ionizzazione del mezzo non è il meccanismo di perdita di energia predominante per gli elettroni relativistici, gli elettroni ad alta energia perdono energia in maniera più efficiente attraverso l'emissione di radiazioni elettromagnetiche quando vengono frenati in presenza di materia. Se la ionizzazione fosse stato il principale meccanismo di rallentamento degli elettroni, allora avrebbero avuto proprietà penetranti paragonabili a quelle dei muoni, ma il meccanismo di perdita di energia radiativa assicura che circa 15 cm di piombo sono sufficienti per fermarli.

I diversi meccanismi di perdita di energia fanno sì che il flusso di particelle a livello del mare venga diviso in due componenti principali. La parte muonica penetrante del flusso è indicata come componente 'hard' mentre la parte elettronica facilmente assorbita è chiamata componente 'soft'.

Cascate Elettromagnetiche



Il decadimento di un pione neutro in una coppia di raggi gamma ad alta energia è il punto di partenza di una valanga di elettroni, positroni e ulteriori raggi gamma. Questa valanga è nota come una cascata elettromagnetica. Il processo inizia quando uno dei raggi gamma passa vicino al nucleo di un atomo. Anche se il raggio gamma non trasporta carica elettrica la sua natura elettromagnetica gli **permette di interagire con il forte campo elettrico del nucleo causando la materializzazione di una coppia elettrone-positrone**. L'energia necessaria per la creazione della coppia è di circa 1 MeV, i raggi gamma possono avere energia mille volte superiore, quindi la coppia elettrone-positrone prodotta acquista quasi tutta l'energia del raggio gamma iniziale. Se questi elettroni e positroni in rapido movimento continuano a passare vicino ad altri nuclei subiranno accelerazioni a causa della carica positiva dei protoni. Una particella carica accelerata emette radiazione

elettromagnetica. Le accelerazioni intense possono produrre ulteriori raggi gamma in grado di produrre ulteriori coppie elettrone-positrone. Il ciclo di produzione di coppie e generazione di raggi gamma continua fino a che l'energia iniziale dei raggi gamma si è trasformata, in maniera casuale, in molte particelle. Il processo è mostrato schematicamente nella figura a lato.

La generazione a cascata cessa quando i livelli di energia diventano sufficientemente piccoli da far sì che gli elettroni non siano più in grado di irradiare in modo efficiente; gli elettroni, muovendosi relativamente lenti vengono portati a riposo da ordinari processi di ionizzazione. L'energia degli elettroni per i quali la perdita di energia principale cambia dal meccanismo di irradiazione al meccanismo di ionizzazione è nota come l'energia critica E_c . **L'energia critica per gli elettroni in piombo è di circa 7,6 MeV.**

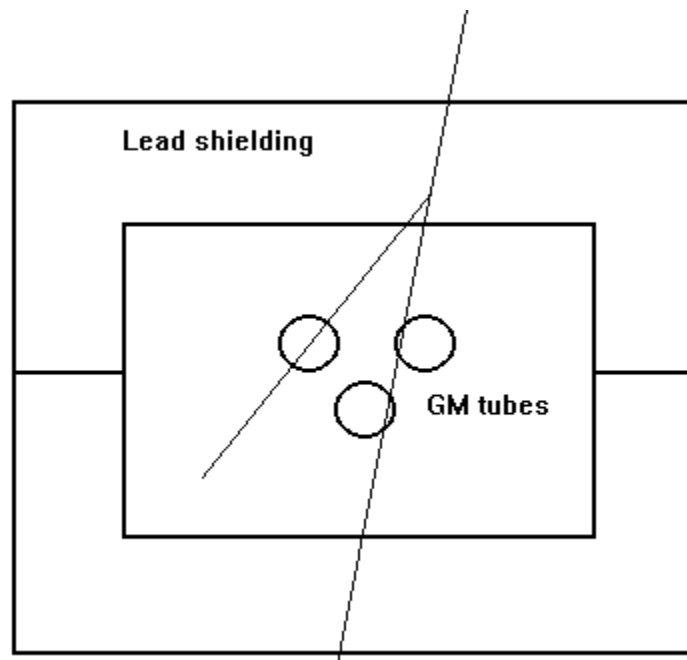
Mentre la cascata elettromagnetica può estendersi in aria su una grande distanza, essa rimane confinata in regioni molto più piccole nei solidi in cui il numero di atomi per centimetro è maggiore. Se il materiale è costituito inoltre da atomi con un numero atomico alto la carica nucleare maggiore può

portare a produrre maggiori accelerazioni e così il processo a cascata si può sviluppare più facilmente di quanto succederebbe in un materiale più leggero.

Cascate Elettromagnetiche nel Piombo

Nel suo resoconto del 1964 sullo sviluppo storico della comprensione della natura della radiazione cosmica, Bruno Rossi descrive gli esperimenti cruciali che hanno portato alla comprensione odierna. Egli racconta come nel 1930, ha costruito i propri contatori Geiger – Mueller e sviluppato l'elettronica di coincidenza per permettergli di utilizzare i gruppi di tubi GM in un'indagine sulla penetrazione dei raggi cosmici in materiali densi. Ha scoperto che una parte sostanziale della radiazione cosmica rilevata a livello del mare può penetrare spessori di oltre 1m di piombo .

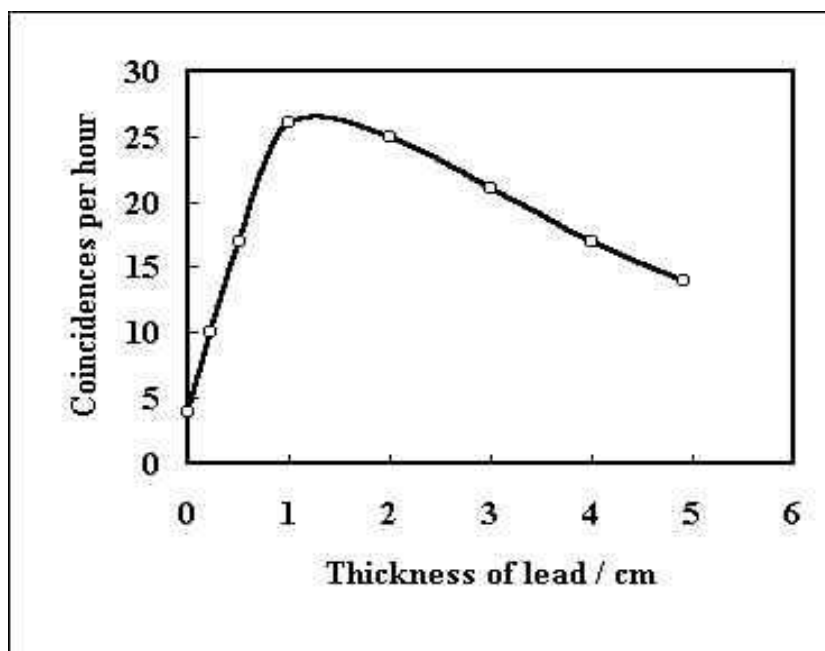
All'incirca nello stesso periodo, i ricercatori che utilizzavano le camere a nebbia hanno segnalato osservazioni di più tracce associate con l'apparente generazione di particelle secondarie vicino alle pareti della camera. Rossi ha studiato questo fenomeno utilizzando una disposizione di tre tubi GM in coincidenza in una matrice triangolare all'interno di un involucro cavo al fine di registrare la generazione di gruppi di particelle. La disposizione è mostrata nella figura seguente.



E' stata utilizzata una disposizione triangolare per escludere la possibilità che una singola particella attivi tutti i contatori contemporaneamente. Fu sorpreso di registrare un **alto tasso di coincidenze**, fino a 35 all'ora in alcuni casi. Quando la parte superiore della schermatura di piombo viene rimossa il tasso coincidenza scende a circa 2 coincidenze all'ora. Anche questo tasso di coincidenza era sorprendente, dal momento che la statistica delle coincidenze casuali prevede un valore molto più basso. **Il tasso di fondo può essere compresa in termini di sciame di particelle prodotte in aria al di sopra dei contatori.**

Sono state sviluppate indagini per vedere come il tasso di coincidenza varia al variare dello spessore del piombo posto sopra i contatori. Si è constatato che il tasso aumenta costantemente con lo spessore di

piombo, raggiungendo un massimo tra 1 e 2 cm per poi scendere costantemente a circa la metà del valore di picco quando lo spessore dello strato di piombo viene aumentato a circa 5cm :



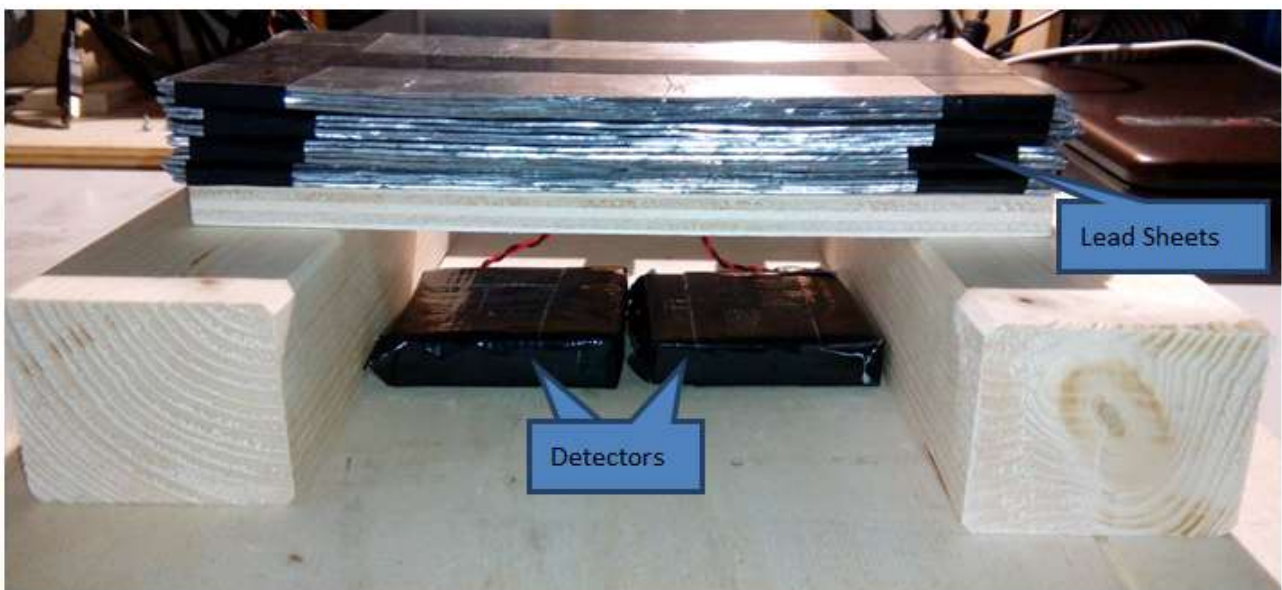
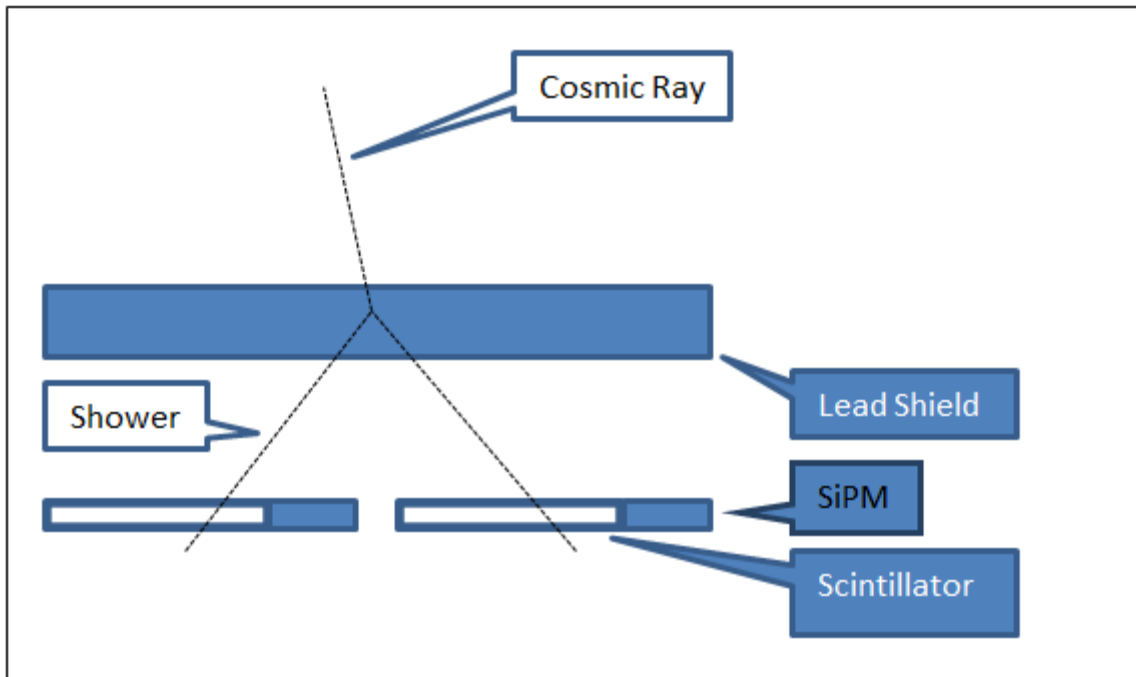
La rapida diminuzione del tasso di coincidenza oltre il picco della curva ha chiarito che le particelle responsabili della produzione dei gruppi di particelle non erano uguali a quelle in grado di penetrare con facilità spessori di 1m di piombo.

La spiegazione dei processi coinvolti nelle cascate elettromagnetiche furono sviluppate negli anni che seguirono. Dirac aveva già predetto l'esistenza dei positroni e Carl Anderson li visualizzò nella camera a nebbia. Nel 1934, Hans Bethe e W. Heitler, spiegano nel dettaglio cosa accade quando una particella carica passa attraverso il forte campo elettrico di un nucleo atomico. Essi hanno scoperto che, alle alte energie, la particella è in grado di rilasciare una grande frazione della sua energia come un fotone. L'immagine della decelerazione con emissione indotta di raggi gamma ad alta energia (chiamati bremsstrahlung – o radiazioni frenamento) e la successiva materializzazione di una coppia elettrone-positrone (produzione di coppie) ha iniziato a svilupparsi. La teoria ha permesso di calcolare i valori tipici di elettroni e positroni che possono emergere da un dato spessore di piombo quando una particella carica relativistica o raggio gamma ad alta energia incide dall'alto.

L'analisi di molti dati sperimentali ha mostrato che la teoria sulla cascata elettromagnetica spiega adeguatamente le caratteristiche di questi sciami di particelle.

Riproduzione dell'esperimento di Rossi sulle Cascate Elettromagnetiche

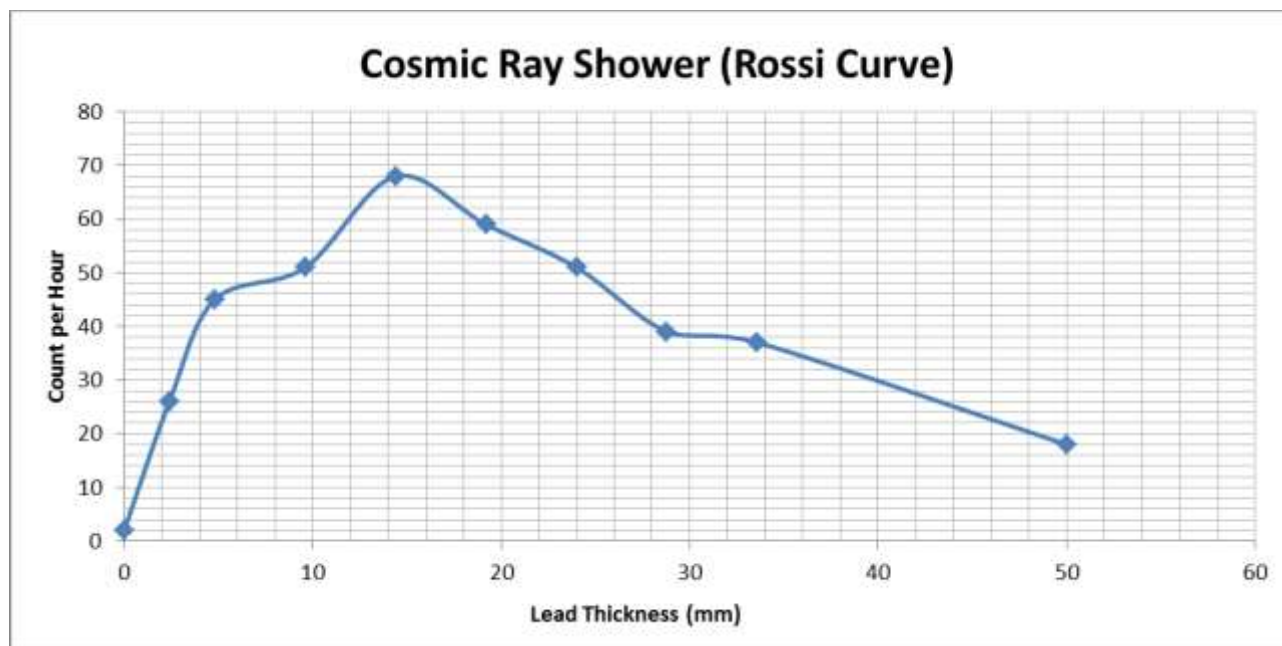
Utilizzando due scintillatori plastici accoppiati al fotomoltiplicatore al silicio (SiPM) ed il circuito di coincidenza abbiamo provato a riprodurre l'esperimento di Rossi sulle cascate elettromagnetiche. Gli scintillatori plastici vengono posti fianco a fianco, al di sopra viene posto uno schermo di piombo costituito da un certo numero di lamine dallo spessore di 1,2mm, le lamine sono state raggruppate in gruppi da 4 in modo da avere degli schermi di piombo con spessore di 4,8mm. Il disegno e le immagini riportate sotto descrivono questo setup.



Gli impulsi prodotti dai SiPM vengono inviati ad una apparecchiatura elettronica che effettua la formatura degli impulsi e produce l'impulso di coincidenza con una porta logica AND.

Risultati

Il conteggio degli impulsi di coincidenza è stato fatto variando lo spessore dello schermo di piombo da 0 a 50mm. La curva ottenuta è riportata nella figura sotto :



Come si vede l'accordo con la curva di Rossi è ottimo ed il massimo del conteggio si ottiene per uno spessore di circa 15mm, il valore di fondo è basso ma non nullo a causa degli sciami cosmici prodotti in atmosfera.

Usando il modello teorico di questa interazione (che non riportiamo) si può ricavare l'energia media delle particelle incidenti che danno luogo alla cascata elettromagnetica.

Dai dati sperimentali ottenuti sopra si ottiene un valore di circa **70MeV**.