

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**Studio preliminare della geometria per
l'accoppiamento SiPM-scintillatore per il progetto
PolarQuEEEst.**

Relatore:
Prof.ssa Gilda Scioli

Correlatore:
Dott. Rosario Nania

Presentata da:
Miriam Santoro

Alla mia famiglia.

Ama la vita più della sua logica, solo allora ne capirai il senso.

Dostojevskij

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare tutte le persone che hanno creduto in me e mi hanno sostenuta in questo percorso di studio e di vita durato tre anni.

Per prima cosa non posso che ringraziare la mia relatrice Gilda Scioli che mi ha fatta avvicinare al mondo della Fisica Nucleare e Subnucleare e durante questa esperienza è stata sempre gentile, disponibile e mi ha aiutata ogni qual volta ci fossero dei problemi e il mio correlatore Rosario Nania che mi ha coinvolta in questo importante progetto e che è stato sempre tempestivo nel risolvere ogni mio dubbio.

Inoltre, intendo ringraziare anche Daniele Cavazza per la sua pazienza e per il tempo che mi ha dedicato nella costruzione dell'apparato sperimentale e nella presa dati.

Voglio ringraziare mia madre Giuseppina, mio padre Roberto e mio fratello Valeriano per avermi sempre supportata, soprattutto nei momenti più duri e difficili e per non avermi mai fatto mancare nulla, permettendomi di essere qui oggi.

Voglio ringraziare il mio migliore amico Nicola per essere stato sempre pronto a darmi una mano, per aver condiviso con me gioie e dolori e per aver passato gran parte di questi tre anni con me, sia durante le ore di studio che quelle di svago, facendomi sentire a casa, nonostante fossi lontana dalla mia terra.

Voglio ringraziare la mia coinquilina Cristina per i weekend passati a preparare torte e pizze, a guardare la tv e a bere tisane e la mia amica Costanza per i consigli, per le giornate di studio e per i caffè.

Infine, ringrazio di cuore tutti i miei amici, chi sta entrando a fare parte della mia vita e chi ci è già dentro, sopportando, nonostante la lontananza, i tanti impegni e le mille difficoltà, il mio carattere e rendendomi partecipe delle proprie giornate.

Indice

Ringraziamenti	iii
Introduzione	1
1 Aspetti teorici	3
1.1 Raggi cosmici	3
1.1.1 Cenni storici	3
1.1.2 Definizione e classificazione	4
1.1.3 Raggi cosmici primari	4
1.1.4 Raggi cosmici secondari	6
1.1.5 Sciame di raggi cosmici	8
1.2 Progetto EEE	11
1.2.1 Il telescopio con camere MRPC	11
1.3 Progetto Polarquest2018	14
1.3.1 Nanuq	14
1.3.2 PolarQuEEEst	15
2 Setup sperimentale	17
2.1 Telescopio del progetto PolarQuEEEst	17
2.2 Silicon Photomultipliers	19
2.2.1 Fotomoltiplicatore	19
2.2.2 Silicon Photomultiplier (SiPM)	19
2.3 Rivelatore a scintillazione	22
3 Apparato sperimentale utilizzato e misure	25
3.1 Descrizione del prototipo	25
3.1.1 Scintillatore	26
3.1.2 SiPM	27
3.2 Apparato sperimentale	28
3.2.1 Alimentazione	29
3.2.2 LED	30
3.2.3 Oscilloscopio	31
3.3 Configurazioni geometriche	32
3.3.1 Configurazione 1	33
3.3.2 Configurazione 2	36
3.3.3 Configurazione 3	39
3.3.4 Configurazione 4	42
3.4 Risultati	45
Conclusioni	49
Bibliografia	51

Introduzione

La rivelazione dei raggi cosmici occupa un posto importante nella Fisica Nucleare e Subnucleare in quanto, in un'epoca in cui la tecnologia degli acceleratori non era stata ancora sviluppata, ha aiutato il perfezionamento del Modello Standard tramite la scoperta del positrone, del muone e delle particelle strane, mentre oggi ci può permettere di capire da dove questi raggi derivino e in che modo interagiscano con l'atmosfera terrestre, andando ad influenzare il clima, le precipitazioni, le telecomunicazioni tra i satelliti, o innescando nuovi meccanismi ancora inesplorati. Conciliando la volontà di diffondere la cultura scientifica riguardante la fisica particellare e la consapevolezza di creare un esperimento che coinvolga studenti e docenti degli Istituti Scolastici Superiori, CERN, INFN e MIUR nasce il progetto EEE (Extreme Energy Events) per indagare le caratteristiche e l'origine dei raggi cosmici. Quest'ultimo è il più grande esperimento per raggi cosmici in Europa e si basa sulla costruzione di rivelatori di particelle, chiamati "telescopi", fatti con i più moderni e avanzati Multi-Gap Resistive Plate Chambers (MRPC), sulla loro messa in coincidenza tramite strumentazione GPS con quelli di altre scuole, sul trasferimento in tempo reale dei dati al centro di calcolo del CNAF di Bologna e sull'analisi online in tempo reale dei dati così ottenuti. L'esperimento EEE ha raccolto fino ad ora più di 5 miliardi di muoni e coinvolge attualmente più di 100 scuole sparse su tutta la penisola.

Un suo recentissimo spin-off è il progetto PolarQuEEEst, che consiste nella costruzione di un rivelatore di piccole dimensioni da imbarcare su una barca a vela che, partendo dal Nord dell'Islanda, circumnavigherà le isole Svalbard sulle orme del percorso del dirigibile Italia nella missione del 1938. In questa spedizione scientifica sarà fondamentale la costruzione di altri due rivelatori gemelli, di cui uno in una scuola norvegese e l'altro in una italiana, con lo scopo di misurare il flusso di raggi cosmici a differenti latitudini considerando che ai poli i raggi cosmici sono maggiormente intrappolati dal campo magnetico terrestre.

L'esperimento PolarQuEEEst si basa sulla coincidenza di due piani di scintillatori. Lo scopo di questa tesi è di esaminare e confrontare quantitativamente le varie configurazioni legate all'accoppiamento fotomoltiplicatori al silicio-scintillatore affinché si possa dedurre quali tra queste sia la più efficiente e la si possa implementare all'interno del telescopio.

Capitolo 1

Aspetti teorici

1.1 Raggi cosmici

1.1.1 Cenni storici

Nella Fisica delle alte energie la ricerca dei raggi cosmici cominciò all'inizio del 1900 quando Marie e Pierre Curie, in seguito alle loro scoperte, affermarono che la scarica spontanea di un elettroscopio carico anche se perfettamente isolato, osservata già nel 1785 da Coulomb, fosse dovuta alla radioattività naturale e che quest'ultima provenisse solo dal suolo. [1]

Nel 1911, Domenico Pacini e Victor Hess dedussero separatamente e in modo diverso che la radioattività naturale traesse origini da sorgenti extraterrestri. Il primo confrontò la radioattività al di sopra del livello del mare con quella sottomarina durante un esperimento condotto presso l'Accademia Navale di Livorno e confermato successivamente nel lago di Bracciano e osservò una diminuzione della ionizzazione; il secondo, premio Nobel nel 1936, dedusse che la radiazione provenisse dall'atmosfera facendo una serie di esperimenti in mongolfiera durante cui salì fino a un'altezza di 5300 m e notò un rapido aumento del tasso di ionizzazione con l'altitudine a partire dai 3000 m. Inoltre, Hess si accorse del fatto che la radiazione non potesse essere generata unicamente dal Sole ma che dovesse giungere dallo spazio, in quanto non c'era una diminuzione del segnale durante le eclissi solari. Per questo motivo si decise di utilizzare il nome di "raggi cosmici". [2]



FIGURA 1.1: Raggi cosmici provenienti dall'atmosfera

1.1.2 Definizione e classificazione

I raggi cosmici possono essere definiti come particelle subatomiche provenienti dallo spazio esterno all'atmosfera terrestre e il cui numero dipende dall'energia E con cui arrivano sul nostro pianeta, che viene misurata in eV e che raggiunge un miliardo di TeV per quelli più energetici. [1]

In realtà, la radiazione cosmica permette di distinguere due contributi:

1. raggi cosmici primari che sono costituiti per il 99% da:
 - ★ protoni (nuclei di idrogeno) che danno un contributo del 90%,
 - ★ particelle alfa (nuclei di elio) che danno un contributo del 10%,
 - ★ nuclei di elementi più pesanti,
 e per il restante 1% da elettroni e fotoni.
2. raggi cosmici secondari che sono generati da un processo a cascata dovuto all'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera.

1.1.3 Raggi cosmici primari

I raggi cosmici, nell'intervallo tra i 10^9 eV e 10^{20} eV, hanno una distribuzione energetica in funzione dell'energia che può essere suddivisa secondo il seguente schema:

- High Energy Cosmic Rays (HECR): $E \sim 10^9$ eV (GeV);
- Very High Energy Cosmic Rays (VHECR): $E \sim 10^{12}$ eV (TeV);
- Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR): $E \sim 10^{15}$ eV (PeV);
- Extreme High Energy Cosmic Rays (EHECR): $E > 10^{15}$ eV (>EeV).

Inoltre, confrontando lo spettro con una funzione del tipo:

$$\phi \propto E^{-p} \quad (1.1)$$

con p indice spettrale (pendenza del grafico), è possibile notare:

- ★ per $E < 10^{10}$ eV una regione affetta da "modulazione solare" che dipende dall'attività solare;
- ★ per 10^{10} eV $< E < 10^{16}$ eV e $p = 2.7$ una regione ripida;
- ★ per 10^{16} eV $< E < 10^{18}$ eV e $p = 3$ una regione più ripida della precedente che ha inizio nel punto in cui cambia la pendenza, chiamato *ginocchio*, che si ha quando $E \approx 10^{16}$ electronvolt;
- ★ per $E > 10^{18}$ eV una regione meno ripida della precedente che ha inizio nel punto in cui cambia la pendenza, chiamato *caviglia*, che si ha quando $E \approx 10^{18}$ eV. [3]

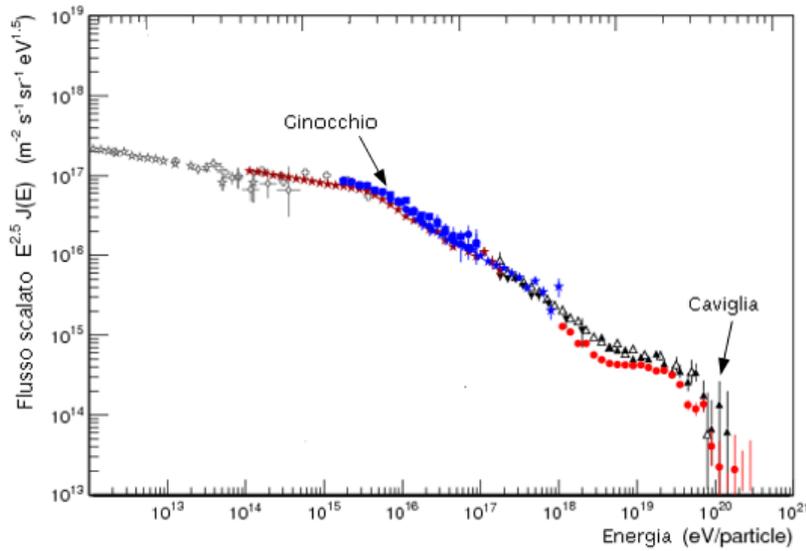


FIGURA 1.2: Flusso dei raggi cosmici primari in funzione dell'energia. Il flusso è scalato di un fattore $E^{2.5}$ per mettere in evidenza i punti in cui cambia la pendenza.

Questo andamento è mostrato in figura 1.2.

Nella prima regione, la distribuzione angolare e l'energia dei raggi cosmici primari sono molto influenzati dal vento solare e dal campo magnetico terrestre e questo comporta l'esistenza di un limite inferiore all'energia delle particelle affinché queste arrivino e interagiscano con l'atmosfera.

Approssimando il campo geomagnetico a un dipolo, si può determinare l'impulso minimo di queste particelle che risulta pari a:

$$\frac{(pc)_{min}}{z} = 56.9 r^2 \text{GeV} \quad \text{con} \quad r = \frac{\cos^2 \lambda}{1 + \sqrt{1 - \sin \theta \cos^3 \lambda}} \quad (1.2)$$

dove z è il numero atomico, r è la distanza della particella dal centro del dipolo, θ è l'angolo di incidenza rispetto alla verticale e λ è la latitudine geomagnetica.

I raggi cosmici primari risentono di due effetti dovuti all'interazione con il campo magnetico terrestre:

- **effetto latitudine** che è dovuto alla deviazione delle particelle cariche in un campo magnetico a causa della forza di Lorentz.

In particolare, nella zona equatoriale, in cui le linee di campo magnetico sono parallele alla superficie terrestre, c'è un effetto di sbarramento che causa la quasi totale assenza di particelle cosmiche a bassa energia; invece, ai poli, in cui le linee di campo magnetico sono perpendicolari alla superficie (e di conseguenza, parallele alla direzione di moto delle particelle), lo sbarramento è nullo.

Inoltre, a causa del disallineamento dell'asse del campo magnetico di circa 11 gradi rispetto all'asse di rotazione terrestre, c'è la presenza di zone variabili, chiamate isocosme, in cui la radiazione cosmica è equivalente nonostante

queste comprendano latitudini differenti.

- **effetto est-ovest** che è causato da un'asimmetria di rivelazione. Nello specifico, i raggi cosmici positivi penetrano a più bassa energia se provengono da ovest, mentre i negativi sono più facilitati se provengono da est. Siccome i raggi cosmici sono principalmente carichi positivamente vengono coinvolti in un moto a spirale in senso orario (rispetto al polo nord) e questo comporta la rivelazione di un numero maggiore di particelle provenienti da ovest. Questo risultato è stato dimostrato sperimentalmente.[4]
In particolare, per particelle provenienti dall'orizzonte est ($\lambda = 0^\circ, \theta = \frac{\pi}{2}$) si è osservato che $p_{min} = 56.9 \text{ GeV}$, invece per particelle provenienti dall'orizzonte ovest ($\lambda = 0^\circ, \theta = \frac{\pi}{2}$) si è osservato che $p_{min} = 10.2 \text{ GeV}$.

I raggi cosmici primari colpiscono la terra in modo più o meno isotropo e interagiscono con l'atmosfera con una lunghezza di interazione pari a:

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma_{nucleo}} = \frac{A}{N\rho} \frac{1}{\pi R_0^2 A^{\frac{2}{3}}} \simeq 34 \text{ g cm}^{-2} \times \frac{A^{\frac{1}{3}}}{\rho} \quad (1.3)$$

Per l'azoto e una densità media dell'atmosfera pari a $\rho \simeq 2 \times 10^{-4} \text{ gcm}^{-3}$, si ha una lunghezza di interazione pari a $\lambda \simeq 4 \text{ km}$. Questo valore porta a pensare che tutti i raggi cosmici primari producano a loro volta raggi cosmici secondari.

1.1.4 Raggi cosmici secondari

La diversa interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera dipende dalla loro energia e dalla loro carica.

Ad esempio, i protoni interagiscono con le molecole dell'atmosfera (in particolare con l'azoto e l'ossigeno) solo nei primi istanti ad altissima quota poichè da queste interazioni primarie vengono prodotti sciami adronici composti per lo più da pioni, come è possibile vedere in figura 1.3.

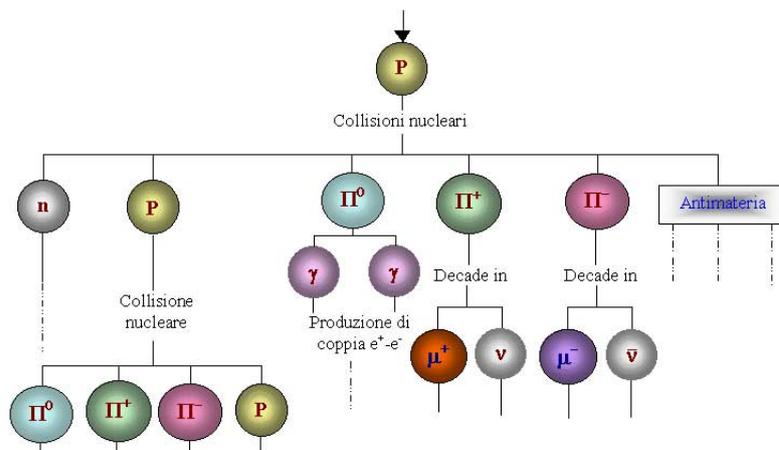
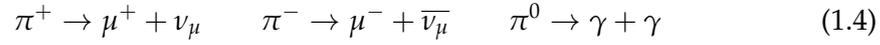


FIGURA 1.3: Schema dei raggi cosmici secondari prodotti dall'interazione dei protoni con l'atmosfera

Quasi tutti i pioni decadono in volo prima di giungere sulla superficie terrestre. I pioni sono particelle subatomiche, in particolare mesoni instabili, che esistono in tre stati di carica (π^+ , π^- , π^0) e che a causa della loro instabilità decadono o in particelle cariche più leggere, chiamate muoni, con una vita media pari a $\tau = 26$ ns o in radiazione elettromagnetica con una vita media pari a $\tau = 8.4 \times 10^{-17}$ s.

I decadimenti dei pioni sono mostrati di seguito:



Per i raggi cosmici secondari, come è mostrato in figura 1.4, posso distinguere due componenti fondamentali:

- **Componente molle (o soft).** Questa:

- ★ costituisce circa il 30% della radiazione,
- ★ è dovuta alla cascata elettromagnetica a sua volta formata da elettroni, fotoni e in minima parte da protoni, kaoni e nuclei,
- ★ riesce a penetrare solo pochi millimetri o centimetri di materiale assorbitore,
- ★ trasporta la maggior parte dell'energia del primario che l'ha generata.

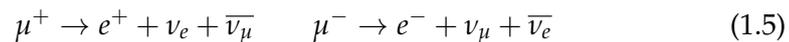
In particolare questa componente deriva dalla radiazione di Brehmsstrahlung che viene emessa quando i prodotti γ del decadimento di un pione π^0 abbastanza energetico creano uno sciame elettromagnetico tramite le coppie e^+e^- .

- **Componente dura (o hard).** Questa:

- ★ costituisce circa il 70% della radiazione,
- ★ è dovuta alla cascata adronica a sua volta formata da muoni,
- ★ riesce a penetrare oltre un metro di materiale assorbitore.

Inoltre, i muoni sono particelle instabili che hanno una lunghezza di decadimento pari a $\lambda \simeq 6.6$ km e un'energia media di ≈ 4 GeV e la possibilità di raggiungere il livello del mare in quanto, interagendo poco con la materia, sono capaci di attraversare lunghe distanze prima di decadere (per ionizzazione). Per questo motivo i muoni costituiscono la maggior parte delle particelle che si riescono ad osservare sulla Terra.

I decadimenti dei muoni sono i seguenti:



Il flusso medio delle particelle che compongono la radiazione secondaria, cioè il numero di particelle che nell'unità di tempo e nell'unità di superficie raggiungono il livello del mare, per particelle di energia dell'ordine del GeV, è stimato essere:

$$10000 \times \frac{\text{particelle}}{m^2s} \approx 1 \frac{\text{particelle}}{cm^2s} \quad (1.6)$$

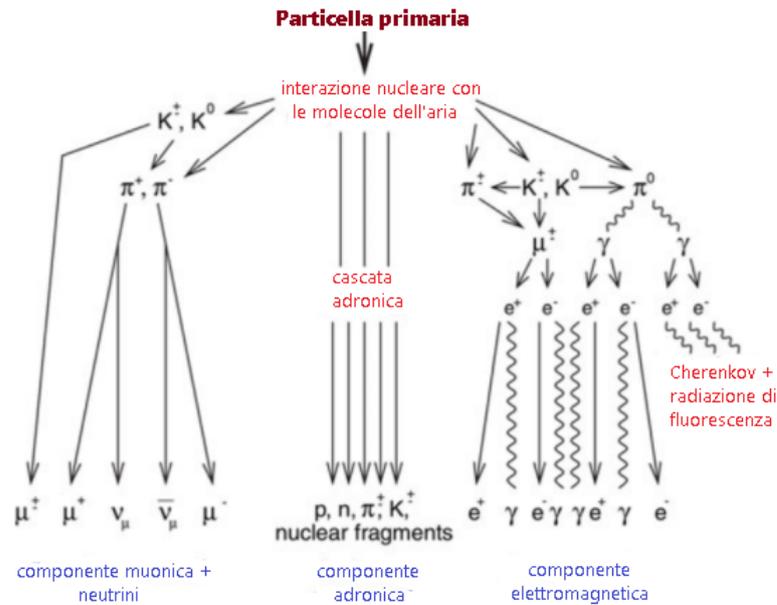


FIGURA 1.4: Componenti dei raggi cosmici secondari a partire dall'interazione primaria

1.1.5 Sciami di raggi cosmici

Per i raggi cosmici più energetici (EHECR) la cascata, innescata nell'atmosfera, è abbastanza densa da arrivare sulla Terra e da poter essere rivelata da più telescopi contemporaneamente e in maniera coerente. In questo caso si parla di formazione di sciami atmosferici estesi (*Extensive Air Shower*). La loro prima scoperta è da attribuire a Pierre Auger e Roland Maze che, nel 1938, notarono che dei contatori Geiger-Muller posti a diversi metri tra di loro registravano contemporaneamente l'arrivo di raggi cosmici, indicando, quindi, particelle secondarie provenienti dalla stessa sorgente.

Una rappresentazione di questi sciami è mostrata in figura 1.5.

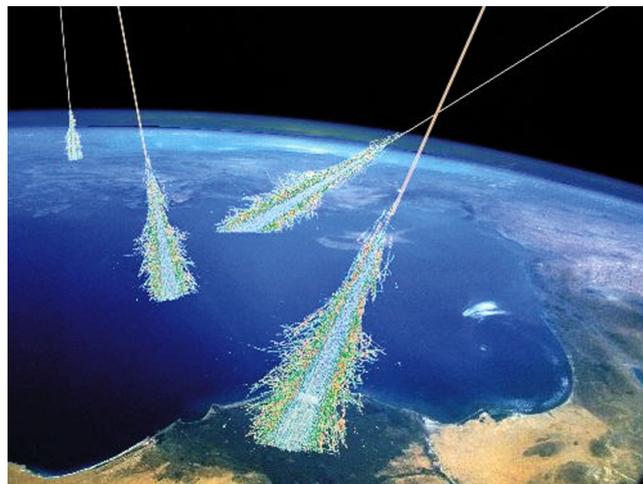


FIGURA 1.5: Sciami atmosferici estesi dovuti ai raggi cosmici

Gli sciami atmosferici estesi sono formati da un core adronico circondato da cascate elettromagnetiche che vengono alimentate continuamente da pioni neutri. La dimensione laterale complessiva dello sciame dipende dall'energia del raggio primario e per un intervallo energetico che va dai 10^{13} eV ai 10^{19} eV ha un'estensione che va dai 3 km ai 10 km di raggio.

Gli sciami adronici ed elettromagnetici, a loro volta, hanno delle componenti che permettono la loro distinzione e sono:

- **Sviluppo longitudinale:** numero di particelle che compongono lo sciame a una certa profondità atmosferica. Questo aumenta fino a un certo valore x_{max} dopo cui diventa dominante l'assorbimento delle particelle ad opera dell'atmosfera stessa.
- **Sviluppo laterale:** densità delle particelle in funzione della distanza dall'asse dello sciame. Questa è massima in prossimità del core dello sciame.

L'andamento dei due sciami è riportato in figura 1.6 per le diverse componenti.

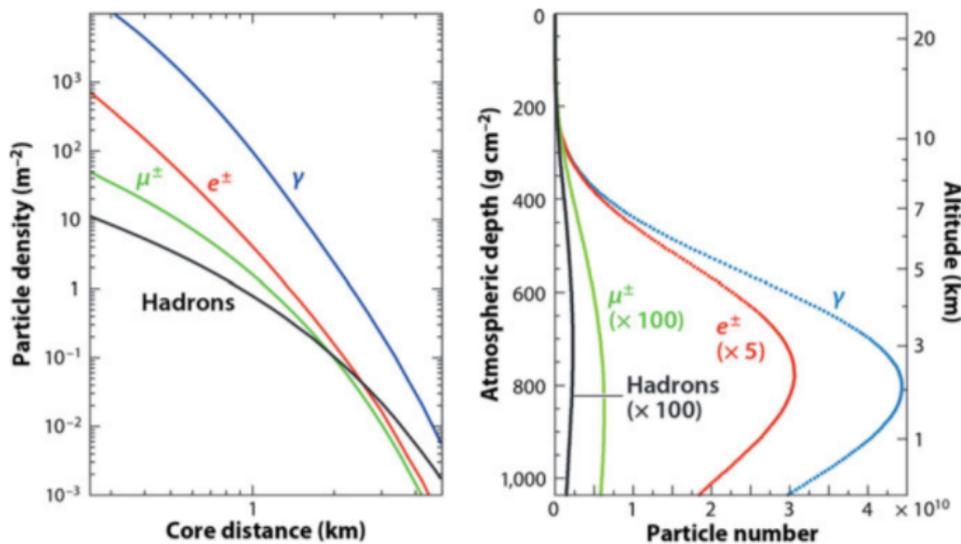


FIGURA 1.6: Profili laterali (sinistra) e longitudinali (destra) di sciami verticali causati da protoni di energia 10^{19} eV

Componente elettromagnetica Gli sciami elettromagnetici hanno uno sviluppo longitudinale e laterale ridotto rispetto quelli adronici.

L'andamento e le caratteristiche della componente longitudinale elettromagnetica sono descritti dall' **Heitler Branching Model**. [5]

In questo modello, come si può vedere in figura 1.7, è assunto che ogni riga rappresenti un elettrone che ha energia iniziale E_0 e che, dopo una lunghezza di radiazione λ , subisce un processo di ramificazione al cui vertice, a causa dell'emissione per Bremsstrahlung di un fotone, l'energia si divide in due. Di conseguenza, dopo $n = \frac{x}{\lambda}$ passi, il numero di segmenti e l'energia per particella è dato da:

$$N(X) = 2^{\frac{x}{\lambda}} \quad E(X) = \frac{E_0}{N(X)} \quad (1.7)$$

Questo processo di splitting e moltiplicazione continua fin quando non si raggiunge un'energia critica E_C il cui valore per le cascate elettromagnetiche è di circa $E_C \approx 87$ MeV.

Per energie più basse di questo valore le perdite di energia di ionizzazione diventano dominanti rispetto all'irraggiamento o alla produzione di coppie quindi le particelle perdono l'energia, vengono assorbite o decadono.

Questo modello permette di ricavare i parametri caratteristici di uno sciame, ovvero il massimo sviluppo longitudinale e il numero di particelle in sua corrispondenza dati da:

$$X_{max} = \lambda \frac{\ln(\frac{E_0}{E_C})}{\ln 2} \quad N(X_{max}) = \frac{E_0}{E_C} \quad (1.8)$$

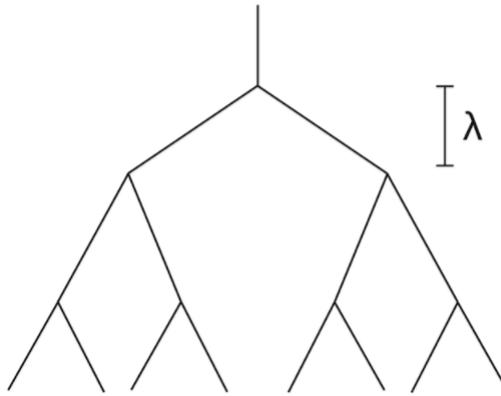


FIGURA 1.7: Schema dell'Heitler Branching Model.

Lo sviluppo laterale è dovuto principalmente allo scattering coulombiano multiplo, descritto dalla teoria di **Molière**, che subiscono gli elettroni nel campo elettrico generato dai nuclei. [6] In questo caso è considerata trascurabile la deflessione dovuta al potenziale coulombiano generato dagli elettroni atomici.

Componente adronica Questa componente, come già affermato prima, ha un maggiore sviluppo laterale rispetto a quello della componente elettromagnetica e questa caratteristica è dovuta al fatto che gli adroni della cascata hanno un impulso laterale maggiore rispetto a quello dell'altra componente.[6]

Inoltre, la componente adronica può propagarsi per diverse lunghezze d'interazione λ perdendo una frazione inferiore al 25% della sua energia.

Il numero di particelle dello sciame a una fissata profondità x è dato dalla formula di Graisser-Hillas ed è:

$$N(x) = N_{max} \left(\frac{x - x_0}{x_{max} - x_0} \right)^{\frac{x_{max} - x_0}{\lambda}} e^{-\frac{x_{max} - x}{\lambda}} \quad (1.9)$$

dove N_{max} è il numero di particelle al massimo sviluppo dello sciame alla profondità x_{max} e x_0 è il punto di origine dello sciame che dipende dall'energia del raggio primario che lo ha generato e che è soggetto a fluttuazioni statistiche.

1.2 Progetto EEE

Il progetto EEE (Extreme Energy Events) ha inizio nel 2004 da un'idea del fisico A. Zichichi con lo scopo di indagare la Fisica inesplorata dei raggi cosmici, legata alla loro origine e al loro effetto sul nostro pianeta. Per fare questo è necessario lo studio e la rivelazione dei raggi cosmici ad elevate energie (da qui il nome stesso del progetto).[7]

Per ottenere questo è necessario avere rivelatori sparsi su un'area molto estesa che possano essere messi in coincidenza tra loro per individuare, tramite la presenza o meno di anisotropia nella direzione di arrivo, sciame di dimensioni maggiori correlati a raggi cosmici primari di più alta energia.

Quindi questo esperimento si basa su un network che copre tutta l'Italia in quanto coinvolge 47 scuole superiori aventi un telescopio che prende dati di giorno e di notte, 6 stazioni sparse tra dipartimenti di Fisica universitari, sezioni dell'INFN e CERN e altri 50 istituti che lavorano all'analisi dati grazie a un sistema GPS e una piattaforma online in grado di collegare gli istituti tra di loro e di avere misurazioni facilmente accessibili in tempo reale. (Figura 1.8)

Ogni scuola in cui è presente un telescopio si occupa non solo di costruirlo nelle varie componenti ma anche di prendere ed elaborare misurazioni, di correggere i parametri legati a un suo eventuale malfunzionamento e addirittura di aggiustarlo con l'aiuto e il supporto di un referente locale, ovvero un ricercatore esperto.

A proposito dei telescopi, questi vengono costantemente monitorati online tramite il Data Quality Monitor (DQM) che fornisce un continuo feedback sul loro stato.

Per quanto riguarda i dati raccolti, che possono essere scaricati ed elaborati dagli studenti stessi tramite strumenti di calcolo come Excel, questi vengono trasmessi al CNAF, il più grande centro per il calcolo scientifico in Italia, consentendo il loro sfruttamento per analisi di alto livello.

Questo progetto grazie al coinvolgimento quotidiano degli studenti nella costruzione, manutenzione e monitoraggio di questi strumenti avanzati ha un grande impatto nell'ottica della diffusione della cultura scientifica tra gli studenti e rappresenta un modo di inserirli in un vero esperimento di fisica delle particelle.[8]

1.2.1 Il telescopio con camere MRPC

Nel progetto EEE si utilizzano dei telescopi costituiti da camere MRPC (Multigap Resistive Plate Chambers) che sono rivelatori a gas progettati e usati per la prima volta nell'esperimento ALICE al CERN dal gruppo TOF (Time of Flight) di Bologna.[9] Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che le MRPC sono tali da soddisfare le richieste del sistema di tempo di volo riguardanti l'ottima risoluzione temporale e l'ampia superficie di rivelazione.

Le camere MRPC, in questo contesto, sono state pensate in modo da permettere il loro utilizzo su larga scala in quanto consentono di ottenere una buona identificazione del punto di passaggio dei muoni contenendo i costi e la difficoltà di costruzione. Il fatto che i materiali siano facilmente reperibili e semplici da assemblare è molto importante poichè gli studenti sono direttamente coinvolti nella costruzione dei rivelatori e questo permette loro di sentirsi parte di un ampio e importante network in cui si comincia da materie semplici e si arriva ad assemblare dei prodotti che sono essenziali per creare strumenti complessi.

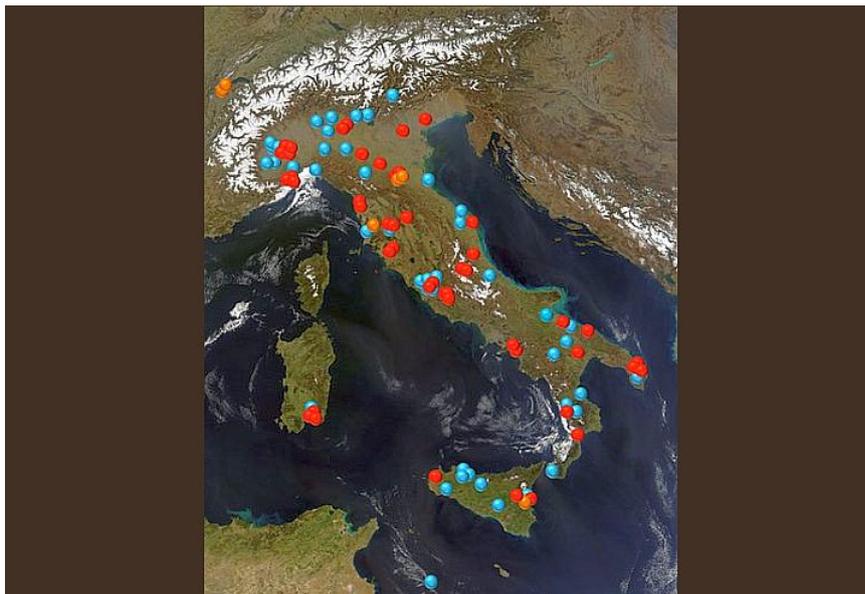


FIGURA 1.8: Rete dei telescopi EEE sul suolo italiano.

In questa immagine i pallini rossi rappresentano stazioni della rete ospitate presso istituti scolastici; i pallini arancioni stazioni presso Dipartimenti di Fisica, Sezioni INFN o il CERN e i pallini celesti scuole aderenti al progetto coinvolte nel monitoraggio della rete e nell'analisi dati.

Il telescopio è costituito da tre piani di camere MRPC (figura 1.9). Ognuno di questi piani è capace di misurare il punto d'impatto della particella cosmica incidente e il suo tempo di attraversamento. Quindi, mettendo insieme le misure dei tre punti d'impatto (uno per piano) è possibile ricostruire la traiettoria della particella e, misurando il tempo di volo tra due piani successivi, si può conoscere anche il verso di percorrenza.

Per leggere ed acquisire dati, ad ogni telescopio sono associati:

- ★ un sistema per l'amplificazione dei segnali che provengono dagli elettrodi degli MRPC;
- ★ un sistema di conversione per la digitalizzazione delle informazioni ottenute;
- ★ un sistema di trigger per la selezione delle particelle.

Le camere MRPC sono lo sviluppo delle RPC (Resistive Plate Chamber) e sono costruite intervallando queste ultime con piani intermedi elettricamente liberi ad elevata resistività, come è possibile vedere in figura 1.10.

Le RPC sono formate da due piani di elettrodi tra cui c'è una miscela di gas e il loro funzionamento si basa sul fatto che una particella carica che attraversa lo spazio tra gli elettrodi, collide con il gas e lo ionizza provocando la formazione di coppie primarie elettrone-ione positivo. Gli elettroni di deriva, così creati, a causa dell'elevata differenza di potenziale vengono accelerati e danno origine a coppie secondarie elettrone-ione positivo, provocando un effetto a valanga.

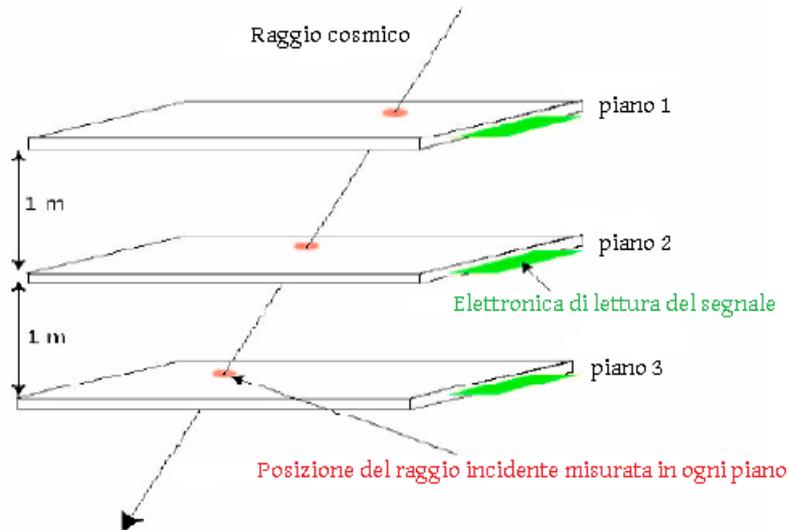


FIGURA 1.9: Telescopio EEE con camere MRPC

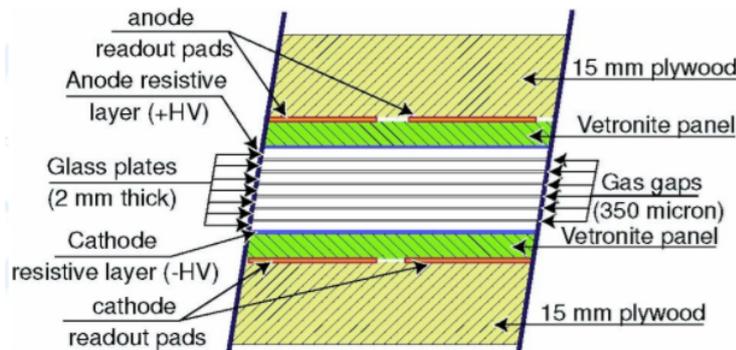


FIGURA 1.10: Sezione trasversale di un MRPC

Il guadagno G dei portatori di carica nella valanga, all'interno di un campo elettrico omogeneo E_0 (con $E_0 = \frac{V_0}{d}$, dove V_0 è la tensione applicata tra gli elettrodi e d è la distanza tra questi), è dato da:

$$G = \frac{N}{N_0} = e^{\alpha d} \quad (1.10)$$

dove N è il numero di elettroni alla distanza d , N_0 è il numero di elettroni primari e α è il coefficiente di Townsend che rappresenta il numero di coppie elettrone-ione positivo prodotte da un elettrone per unità di lunghezza di deriva. Inoltre α definisce il libero cammino medio per ionizzazione (λ) ovvero la distanza media di volo di un elettrone prima di provocare il processo di ionizzazione.

I vantaggi delle MRPC rispetto alle più classiche RPC risiedono:

- ★ nell'aver un segnale maggiore (dato dalla somma di più gap) dovuto all'inserimento di piani intermedi e alla riduzione del gap tra gli elettrodi.
- ★ nella riduzione del guadagno che permette di avere un segnale più stabile.
- ★ nella migliore risoluzione temporale per gap molto piccoli.

1.3 Progetto Polarquest2018

Il progetto Polarquest2018 [10] è un'iniziativa che mette insieme e coniuga:

- un'avventura estrema in quanto segue il percorso del dirigibile Italia nel 90esimo anniversario dell'incidente che fece la storia dell'esplorazione polare;
- un'esplorazione estrema in quanto prevede la completa circumnavigazione dell'arcipelago Svalbard con una barca a vela;
- una scienza estrema in quanto un team internazionale di ricercatori farà misure scientifiche legate alle origini di raggi cosmici di elevata energia e al cambiamento climatico che verrà indagato considerando l'impatto dell'inquinamento umano a latitudini estreme e le rilevazioni riguardanti la presenza di sostanze micro-plastiche e nano-plastiche nell'Oceano Artico;
- un messaggio per il pianeta in quanto è un viaggio verso l'ultima intoccata natura selvaggia sulla terra e mira a trasmettere l'importanza dell'Artide nel nostro futuro sostenibile.

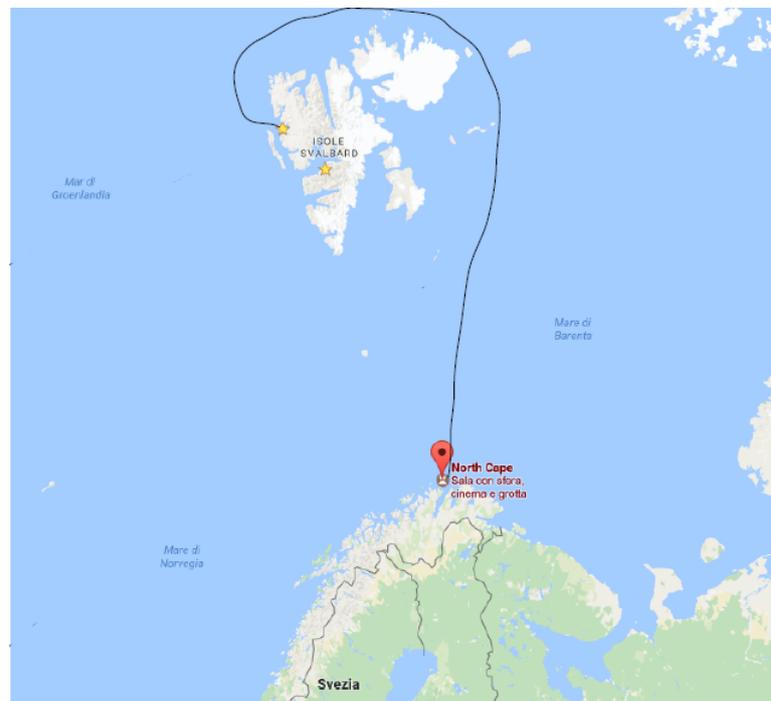


FIGURA 1.11: Percorso della nave Nanuq

1.3.1 Nanuq

Nanuq (che significa orso polare nella lingua inuit) è una barca a vela di circa 18 metri disegnata, costruita e guidata dall'architetto genovese Pietro Gallinelli. Questa è stata utilizzata per navigare nella regione polare e resistere all'inverno in un modo auto-sufficiente, cioè usando solo energie rinnovabili (sole, vento, calore ambientale). Tutto questo è stato possibile grazie alla sua innovativa isolamento termica e tramite un sistema di recupero di calore, accoppiato con un sistema di gestione energetica ottimizzata.

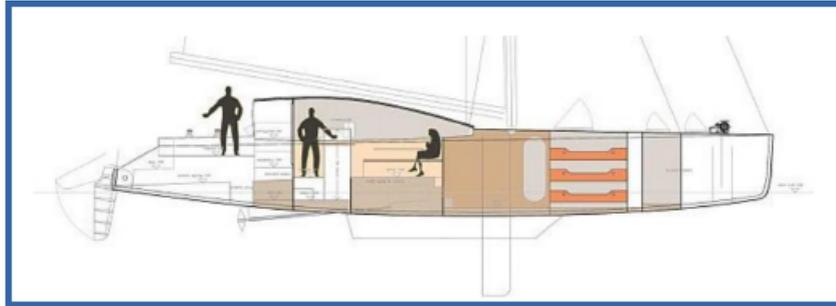


FIGURA 1.12: Struttura interna della barca Nanuq



FIGURA 1.13: Barca Nanuq vista dall'esterno

1.3.2 PolarQuEEEst

Nell'ambito del progetto Polarquest2018 c'è un sotto progetto chiamato PolarQuEEEst che coinvolge strettamente la fisica, nasce come estensione del progetto EEE e prevede lo studio dei raggi cosmici, andando a focalizzare l'attenzione su due argomenti: la loro rivelazione a latitudini ancora inesplorate e la possibile correlazione con misure equivalenti a diverse latitudini.

Questo progetto prevede la costruzione di tre speciali telescopi. I rivelatori saranno costruiti al CERN da studenti delle scuole superiori provenienti da Svizzera, Italia, Islanda e Norvegia e saranno posizionati a diverse latitudini: due di essi saranno installati rispettivamente in una scuola italiana e in una norvegese mentre l'altro sarà a bordo della Nanuq. I loro dati, grazie ad un GPS si aggiungeranno a quelli degli altri telescopi del progetto EEE e saranno disponibili per le analisi.

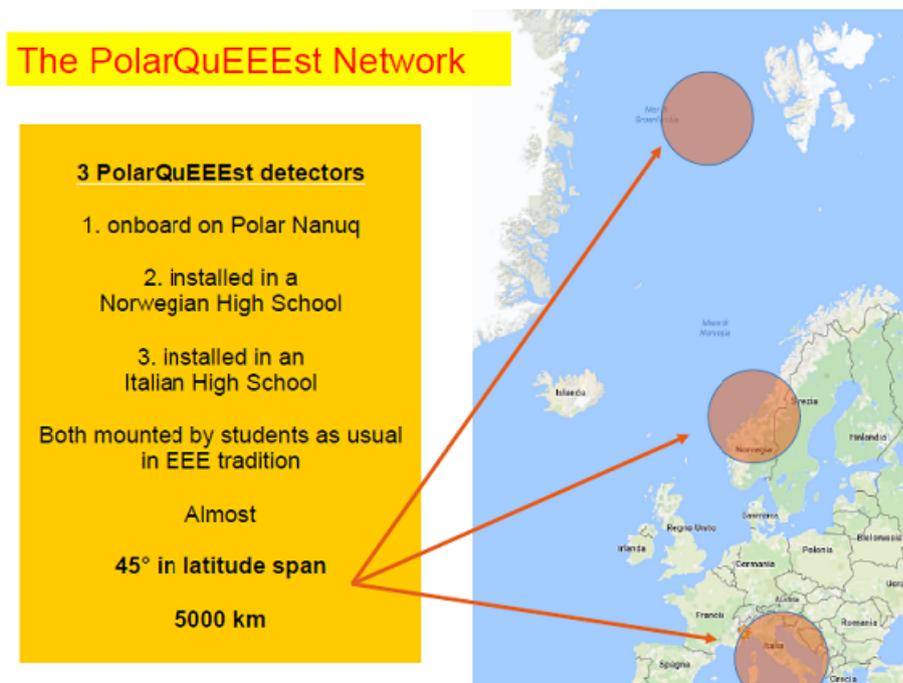


FIGURA 1.14: Posizione dei telescopi nel progetto PolarQuEEEst

Capitolo 2

Setup sperimentale

2.1 Telescopio del progetto PolarQuEEEst

Il telescopio di questo progetto, riportato in figura 2.1 , è formato da 2 piani aventi 4 scintillatori ciascuno, ognuno dei quali è accoppiato a 2 fotomoltiplicatori al silicio al fine di ridurre il falso campionamento di particelle e di eliminare il rumore. Per quanto riguarda le dimensioni i piani sono distanziati tra di loro da una distanza di 150 mm e hanno una grandezza di 60x60 cm, invece gli scintillatori hanno una grandezza di 25x25 cm. [11]

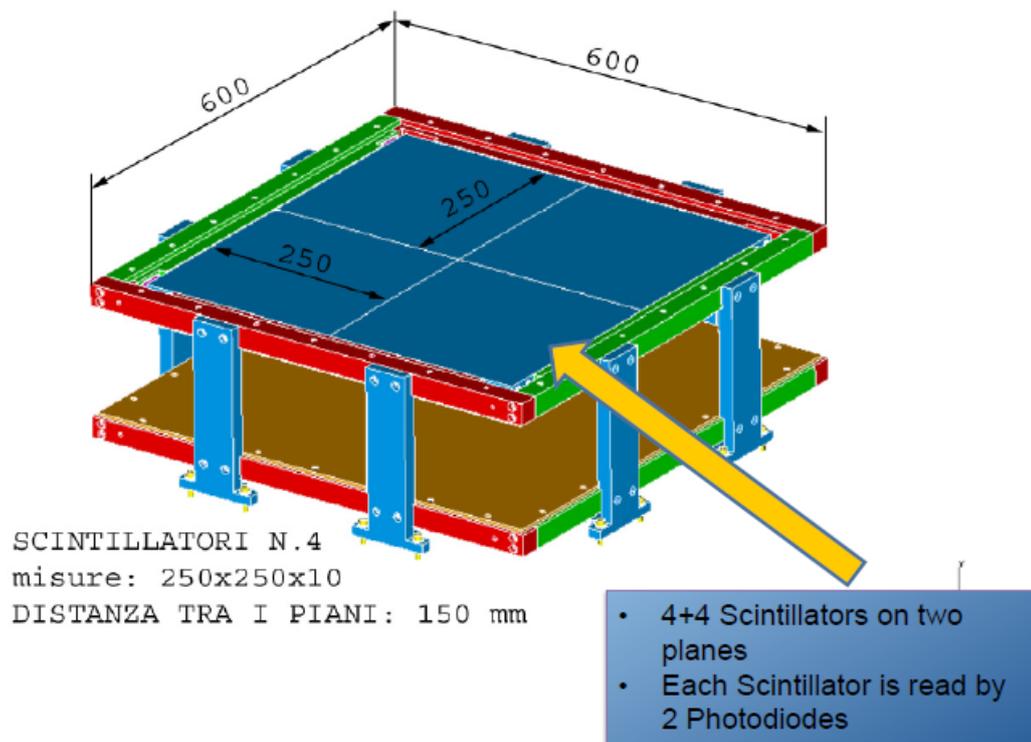


FIGURA 2.1: Posizione degli scintillatori nel telescopio

La struttura di scintillatori e fotomoltiplicatori è chiusa all'interno di un box di 67x67 cm, è appoggiata su un piano 75x75 cm e è associata con il readout box. Quest'ultimo è una scatola che contiene l'elettronica necessaria per i rivelatori ed è posizionata esternamente, come è possibile notare in figura 2.3, per non contribuire al riscaldamento interno.

Il redout box contiene:

- * discriminatori per separare segnali aventi caratteristiche diverse e dispositivi per la digitalizzazione;
- * un'unità di coincidenza;
- * un processore di segnale analogico P/T/U;
- * moduli GPS;
- * un SSD disk per la conservazione dei dati.

Inoltre, può essere supportata da un dedicato pannello di cablaggio fotovoltaico.

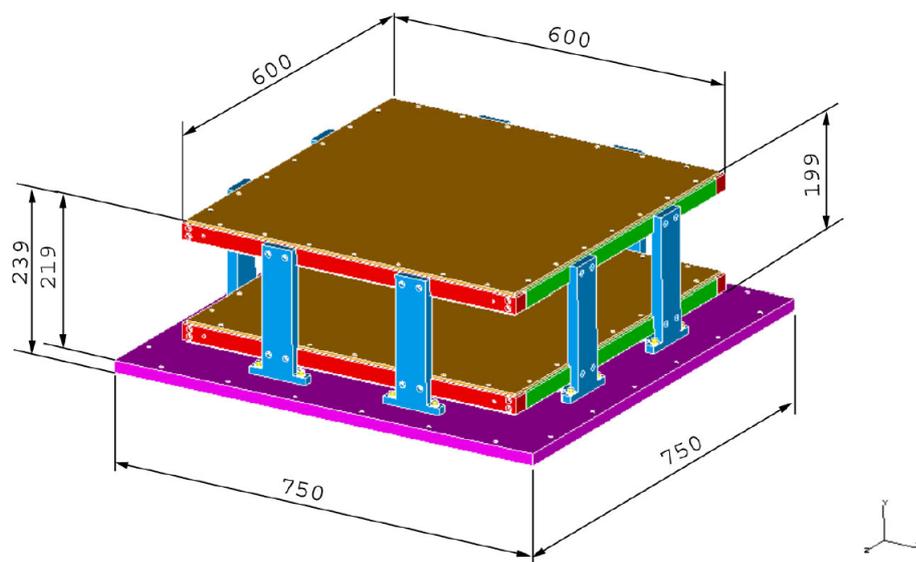


FIGURA 2.2: Struttura con fotomoltiplicatori e scintillatore sul supporto

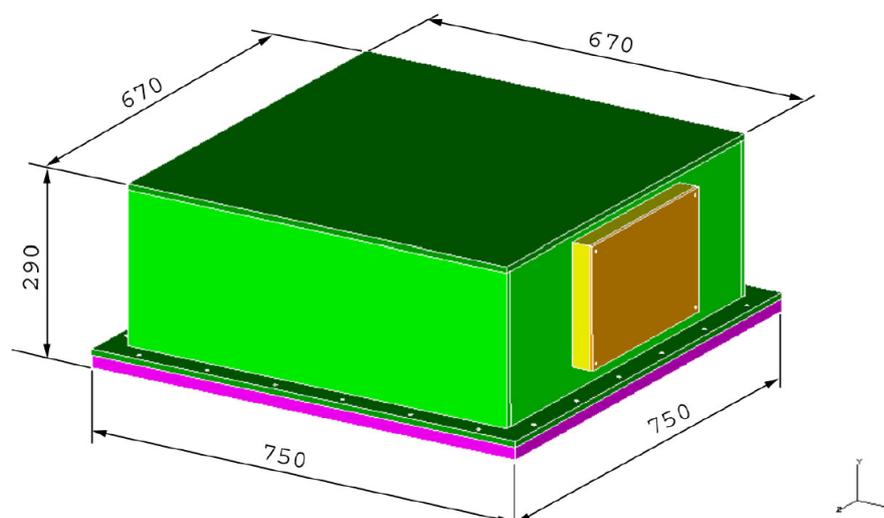


FIGURA 2.3: Struttura con box contenente l'elettronica

2.2 Silicon Photomultipliers

2.2.1 Fotomoltiplicatore

I fotomoltiplicatori sono dei rivelatori elettronici in grado di convertire un segnale luminoso in corrente elettrica poichè il loro funzionamento si basa su due fenomeni: l'effetto fotoelettrico e l'elettromoltiplicazione.

Questi rivelatori sono formati da un tubo a vuoto in cui ci sono un catodo e un anodo tra cui c'è una differenza di potenziale. Il catodo è costituito da un materiale fotosensibile, cioè per effetto fotoelettrico emette elettroni (in particolare, fotoelettroni) una volta colpito da radiazione, ed è collegato a una sezione di elettromoltiplicazione. In essa i fotoelettroni, dopo essere stati focalizzati e dopo essere stati accelerati dalla differenza di potenziale, subiscono una moltiplicazione a valanga a causa di elettrodi, chiamati dinodi, che sono responsabili dell'emissione secondaria. Infine, l'anodo raccoglie gli elettroni moltiplicati e trasmette il segnale.

Se il catodo e la sezione con i dinodi sono lineari, la corrente in uscita dai fotomoltiplicatori sarà direttamente proporzionale al numero di fotoni incidenti.

I fotomoltiplicatori possono essere associati agli scintillatori che producono fotoni in maniera proporzionale all'energia depositata su se stessi.

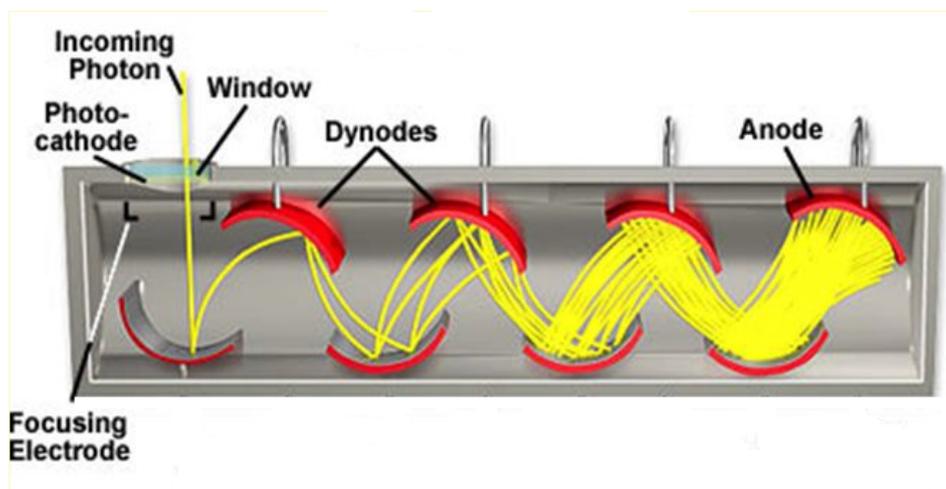


FIGURA 2.4: Struttura di un fotomoltiplicatore

2.2.2 Silicon Photomultiplier (SiPM)

I SiPM sono fotomoltiplicatori al silicio e in Italia sono stati prodotti a partire dal 2005 dall'Istituto per la Ricerca Scientifica e Tecnologica (ITC-irst) di Trento e dalla STMicroelectronics di Catania in collaborazione con l'INFN.

Questi rivelatori sono costituiti da un substrato di silicio su cui è impiantata una matrice di SPAD (*Single Photon Avalanche Diode*), ovvero fotodiodi multipixel a semiconduttore che sfruttano l'effetto valanga. Tipicamente si hanno $(10-10000) \text{ pixel/mm}^2$. Ogni SPAD lavora in modalità Geiger, cioè funge da contatore binario che rivela o meno solo il passaggio della singola particella (in questo caso del singolo fotone), ed è in serie a una resistenza in polisilicio (*quenching resistor*) che è percorsa da corrente e questo produce una caduta di tensione tale da rendere la tensione effettiva minore di quella di breakdown e spegnere la valanga la corrente di valanga. Nonostante il SiPM funzioni in modo digitale, la lettura in parallelo degli SPAD (figura 2.5) rende

il fotomoltiplicatore un dispositivo analogico poichè permette di ottenere l'informazione riguardante il numero di fotoni incidenti. [12]

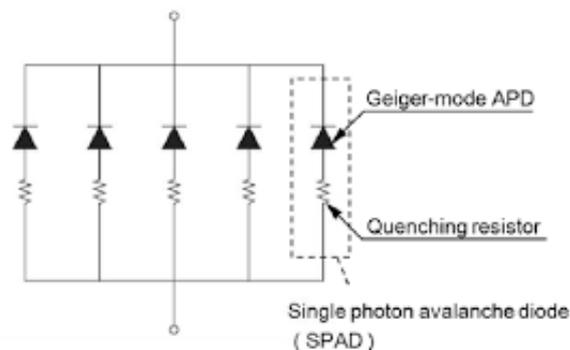


FIGURA 2.5: Schema delle connessioni degli SPAD

Gli SPAD sono giunzioni p-n a semiconduttore polarizzate inversamente che, pur mantenendo la stessa struttura degli APD (*Avalanche PhotoDiode*), hanno una tensione inversa V_{bias} superiore alla tensione di breakdown $V_{breakdown}$ (modalità Geiger). Tipicamente si ha che V_{bias} è il (10-20)% maggiore della $V_{breakdown}$. Questo permette di avere un guadagno di circa 10^6 che è di gran lunga superiore rispetto a quello dei semplici fotodiodi a valanga che è circa 10^2 . [12] Questa proprietà è evidente e può essere notata nel confronto delle loro caratteristiche, mostrato in figura 2.6.

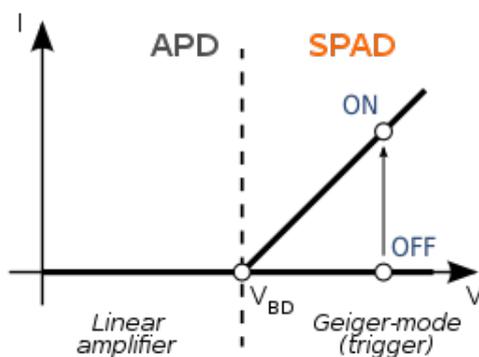


FIGURA 2.6: Confronto delle caratteristiche di un SPAD e un APD

Per quanto riguarda la struttura di un SPAD si può notare che questo è formato da quattro strati di semiconduttore che sono drogati asimmetricamente e determinano le seguenti zone:

- strato drogato n^+ caratterizzato dalla presenza di un numero molto elevato di atomi N_d donatori ($> 10^7$);
- strato drogato p necessario per la formazione della giunzione;
- strato quasi intrinseco π , poco drogato, che rappresenta la regione in cui si origina la moltiplicazione a valanga;

- strato drogato p^+ caratterizzato dalla presenza di un numero molto elevato di atomi N_a accettori ($> 10^7$).

In particolare, si noti che lo strato π ha spessori tipici dell'ordine di qualche μm ed è una regione a basso campo elettrico.

La regione, invece, a campo elevato dove si può verificare la condizione per il breakdown ($V_{bias} > V_{breakdown}$) e, quindi, la moltiplicazione è di circa $0.7-0.8 \mu m$ ed è situata tra lo strato n^+ e lo strato p .

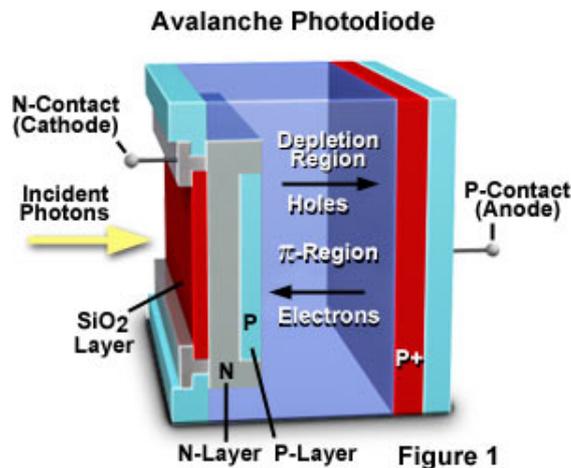


FIGURA 2.7: Sezione trasversale di un SPAD. L'indicazione del catodo e dell'anodo si riferisce alla configurazione in polarizzazione diretta.

Il funzionamento di un APD è legato al fatto che se l'energia del fotone incidente è maggiore del gap che esiste tra la banda di valenza e quella di conduzione, per effetto fotoelettrico si crea una coppia primaria elettrone-lacuna nella depletion region. In seguito, a causa del campo elettrico presente, l'elettrone si sposta verso la regione n , mentre la lacuna nella regione p , andando a causare l'effetto moltiplicativo (effetto a valanga) responsabile della creazione di un numero elevato di cariche secondarie.

Lo SPAD, lavorando in modalità Geiger, ha l'ulteriore vantaggio di avere un campo elettrico molto più elevato nella zona di depletion region e questo fa in modo che una singola coppia elettrone-lacuna sia sufficiente ad innescare la ionizzazione e la conseguente moltiplicazione dei portatori, in quanto è dotata di un elevato valore di energia cinetica.

Si noti che la lunghezza di assorbimento di fotoni incidenti nel silicio dipende fortemente dalla lunghezza d'onda del fotone stesso.

Per questo motivo fotoni con piccola lunghezza d'onda creano la coppia primaria in prossimità della giunzione; mentre fotoni con una lunghezza d'onda più grande creano la coppia primaria nella regione π . In entrambi i casi, comunque, lo sviluppo maggiore della valanga avviene in prossimità della giunzione $n^+ - p$ dove il campo elettrico è molto elevato.

I SiPM utilizzati in questo lavoro di tesi sono ottimizzati per fotoni incidenti con lunghezza d'onda dell'ordine di 400 nm e, di conseguenza, lo spessore degli strati n^+ e p è tale da permettere ai fotoni incidenti di creare la coppia primaria nella regione

π .

Essendo i SiPM costituiti da SPAD e considerando che in media un singolo fotone colpisce una singola cella, si può ricavare il numero di fotoni incidenti dal numero di celle attivate. In questo modo il segnale complessivo sarà la somma dei segnali singoli e dipenderà dal guadagno che è legato al guadagno del singolo SPAD (pixel) ed è dato da:

$$Q_{cella} = C_{cella} \cdot (V_{bias} - V_{breakdown}) \quad (2.1)$$

dove Q_{cella} è la carica accumulata, cioè la carica dell'impulso prodotto da un pixel quando quest'ultimo rivela un fotone, e C_{cella} è la capacità della cella.

Il guadagno G di un SiPM è definito come:

$$G = \frac{Q_{cella}}{q_e} \quad (2.2)$$

dove q_e è la carica dell'elettrone che è pari a $1.602 \cdot 10^{-19}$ C.

In definitiva dalle equazioni 2.1 e 2.2 è possibile intuire che all'aumentare della tensione applicata aumenti G ; tuttavia bisogna tener conto degli effetti collaterali dovuti all'aumento della V_{bias} quali l'aumento della dark current, che è una corrente elettrica relativamente piccola dovuta alle cariche generate nel SiPM senza che questo sia colpito da radiazione, e il fenomeno degli after pulses, che sono impulsi causati dal rilascio ritardato di una carica vettore prodotta nella valanga originale e intrappolata da un'impurità.

I vantaggi dei SiPM rispetto ai fotomoltiplicatori tradizionali sono:

- possibilità di conteggiare il numero di fotoni;
- richiesta di un basso voltaggio per funzionare;
- insensibilità riguardo l'influenza del campo magnetico.

Invece, gli svantaggi sono:

- presenza di rumore termico statistico (o di buio, in quanto presente anche in condizioni di non illuminazione del SiPM) che è all'incirca proporzionale all'area attiva;
- impossibilità di realizzare SiPM aventi una grande superficie attiva.

2.3 Rivelatore a scintillazione

Un rivelatore a scintillazione è un materiale capace di emettere impulsi di luce quando viene attraversato da radiazione.[13]

In particolare, al proprio passaggio, le particelle incidenti cedono parte della propria energia allo scintillatore causando l'eccitazione di elettroni che si spostano in livelli energetici superiori e che, quando decadono ai livelli occupati prima dell'eccitazione, emettono fotoni di energia come luce visibile.

I materiali scintillatori, quindi, sfruttano una proprietà chiamata luminescenza che consiste nell'assorbimento e nella riemissione di energia nella forma di luce visibile dopo un'esposizione a energie come radiazione, calore, ecc.

Alla luminescenza sono associati due fenomeni:

- *fluorescenza* quando la riemissione avviene circa 10^{-8} s dopo l'assorbimento (componente veloce);
- *fosforescenza* quando, poichè lo stato eccitato è metastabile, cioè ha una condizione di equilibrio che non corrisponde ad un minimo assoluto di energia, la riemissione è ritardata con un tempo (dall'ordine dei μ s alle ore) che dipende dal materiale. In questo caso la luminescenza persiste anche dopo aver finito di irradiare il campione (componente lenta).

In prima approssimazione l'andamento temporale del processo di riemissione è un decadimento esponenziale:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (2.3)$$

dove N è il numero di fotoni emessi al tempo t , N_0 è il numero totale di fotoni emessi, τ_d è la costante di decadimento e il tempo di salita da zero al massimo è stato posto uguale a 0 per semplicità in quanto nella maggior parte dei materiali è di gran lunga più rapido del tempo di decadimento.

In realtà, per avere una descrizione più accurata, è più adatto un decadimento dato da un'esponenziale a due componenti:

$$N = A \exp\left(\frac{-t}{\tau_v}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau_l}\right) \quad (2.4)$$

dove τ_v e τ_l sono le costanti di decadimento associate, rispettivamente, alle componenti veloci e lente e le grandezze relative A e B variano da materiale a materiale.

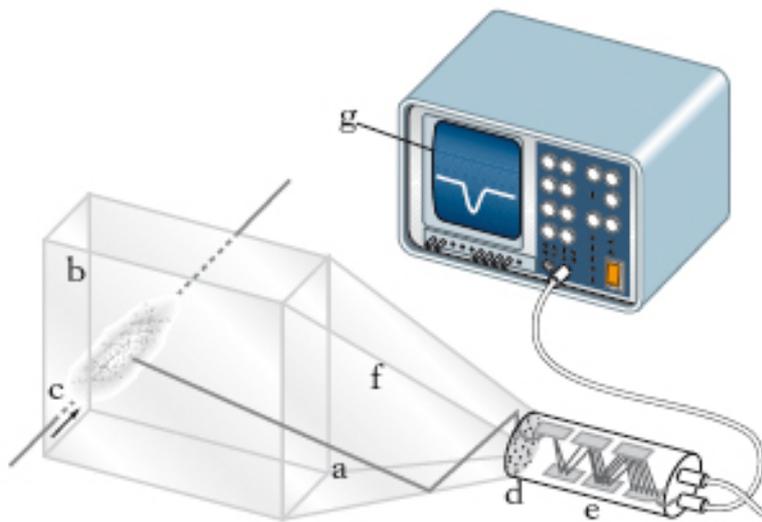


FIGURA 2.8: Schema di uno scintillatore accoppiato a un fotomoltiplicatore

Al momento sono utilizzati diversi tipi di scintillatori che si distinguono in base al materiale di cui sono composti e sono:

- scintillatori organici che:
 - ★ possono essere in forma solida o liquida (soluzioni di uno o più scintillatori in un solvente organico),

- ★ hanno una risposta veloce (circa un ns),
- ★ possono essere difficili da lavorare e organizzare nella forma più opportuna, soprattutto se solidi.
- scintillatori inorganici:
 - ★ possono essere in forma solida (cristalli composti in genere da alogenuri alcalini), plastica (simili ai cristalli inorganici ma più semplici da lavorare), gassosa (gas in cui l'emissione dei fotoni avviene grazie alla diseccitazione delle molecole) o vetrosa (vetri silicati),
 - ★ hanno un'elevata efficienza ma tempi di risposta più lenti che vanno dalla centinaia di ns per quelli in forma solida ad alcuni ns per quelli in forma gassosa,
 - ★ funzionano diversamente tra di loro,
 - ★ la maneggevolezza dipende dal materiale e per quanto riguarda quelli vetrosi possono trovare applicazioni anche in ambienti corrosivi e ad alte temperature.

Capitolo 3

Apparato sperimentale utilizzato e misure

3.1 Descrizione del prototipo

Lo scopo di questo lavoro di tesi è lo studio preliminare di diverse configurazioni geometriche per l'accoppiamento diretto scintillatore-SiPM.

Per simulare il segnale si è utilizzato un LED posto a diretto contatto con lo scintillatore in diverse posizioni. Lo studio è stato fatto posizionando i due SiPM sullo spessore dello scintillatore in 4 configurazioni diverse:

- **Configurazione 1:** affiancati sul lato lungo;
- **Configurazione 2:** affiancati sul lato corto;
- **Configurazione 3:** distanziati uno sul lato lungo e uno sul lato corto;
- **Configurazione 4:** all'angolo uno sul lato lungo e uno sul lato corto.

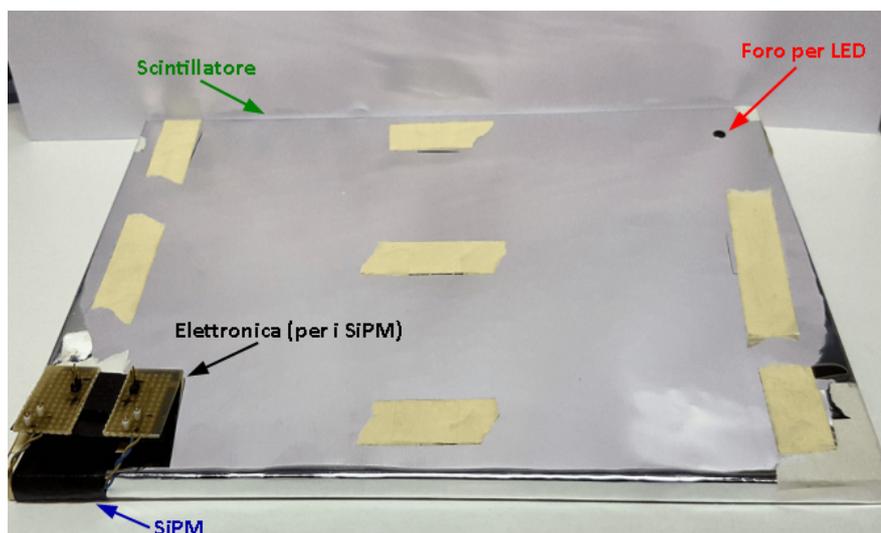


FIGURA 3.1: Accoppiamento dello scintillatore con i due SiPM.
In figura i SiPM sono posizionati sul lato lungo nell'estremità a sinistra.

Le misure sono state fatte utilizzando il prototipo mostrato in figura 3.1 dove è visibile la "mattonella" di scintillatore completamente rivestita da una pellicola di

mylar riflettente con i due SiPM posizionati in basso a sinistra. E' inoltre visibile nell'angolo in alto a destra un forellino "aperto" su cui è possibile posizionare la testina del LED.

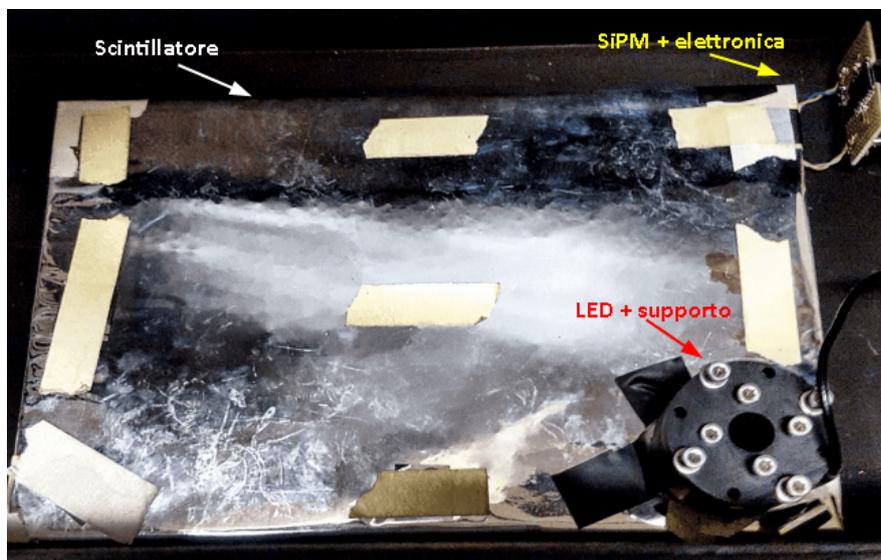


FIGURA 3.2: Accoppiamento dello scintillatore con i due SiPM. In figura i SiPM sono posizionati sul lato corto ed è possibile notare un supporto che serve a tener fermo il LED in posizione verticale e perpendicolare allo scintillatore.

Per quanto riguarda la scelta di posizionare dei fori (individuabili dal nastro giallo nelle figure 3.1 e 3.2) si è optato per una matrice 3x3 in modo da poter avere diverse posizioni per il LED a diversa distanza dai SiPM. Ogni forellino ha un diametro di 3 mm.

Questo prototipo è stato inserito in una scatola a prova di luce e foderata internamente con un panno nero per evitare ulteriori riflessioni luminose e avere la sicurezza che il segnale ottenuto fosse dovuto solo ai fotoni prodotti dal LED.

3.1.1 Scintillatore

Lo scintillatore utilizzato in questa misura è uno scintillatore plastico BC-420 che ha dimensioni 20x30 cm ed è a basso autoassorbimento. Le sue specifiche sono riportate in tabella 3.1.

Parametri	Valori
Base	Polyvinyltoluene
Densità (g/cm^3)	1.032
Indice di rifrazione	1.58
Lunghezza d'onda di massima emissione (nm)	391
Lunghezza di attenuazione della luce (cm)	140
Rapporto degli atomi H/C	1.100
Tempo di decadimento (ns)	1.5

TABELLA 3.1: Specifiche scintillatori plastici BC-420

3.1.2 SiPM

Nello studio sono stati utilizzati due SiPM ASD-NUV3S-P della ditta Advansid le cui caratteristiche generali sono state fornite dal costruttore e hanno permesso il corretto orientamento dei SiPM, facendo attenzione alla posizione dell'anodo e del catodo. Queste sono mostrate nelle figure 3.3 e 3.4.

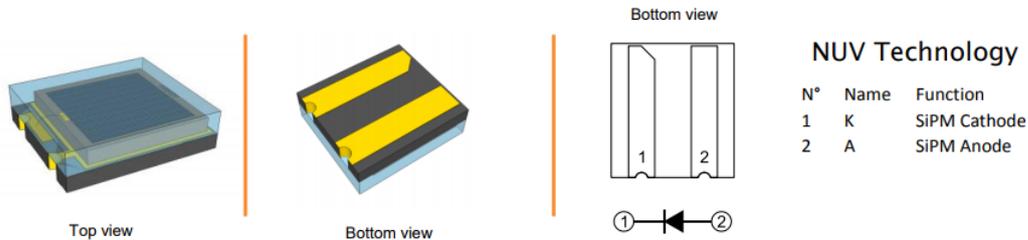


FIGURA 3.3: Caratteristiche generali dei SiPM utilizzati

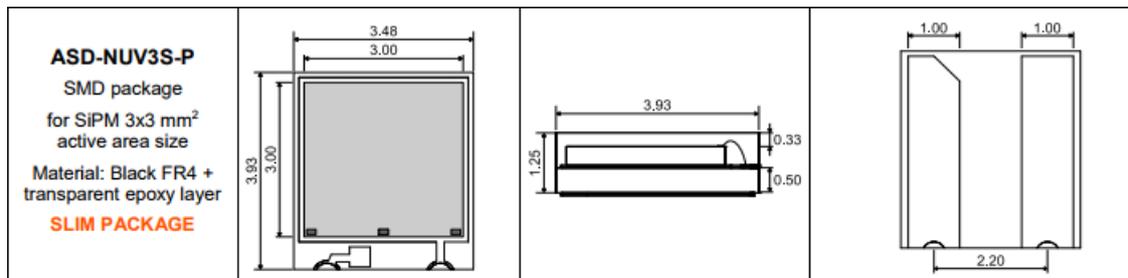


FIGURA 3.4: Caratteristiche generali dei SiPM utilizzati

I SiPM hanno le specifiche riportate in tabella 3.2.

Parametri	Valori
Tensione di breakdown a 25°C (V)	26.1
Resistenza di quenching (kΩ)	800
Area attiva effettiva (mm ²)	3x3
Numero di celle (pixel)	5520
Dimensione della cella (μm ²)	40x40
Fill-factor della cella	60%
Range spettrale (nm)	da 350 a 900
Lunghezza d'onda con la massima sensibilità di picco (nm)	420
Guadagno	3x10 ⁶

TABELLA 3.2: Specifiche SiPM ASD-NUV3S-P

I SiPM sono caratterizzati da un'elevata Photon Detection Efficiency (PDE) che tipicamente è tra il 20% e il 40% ed è data da:

$$PDE = \frac{\text{Numero di fotoni rivelati}}{\text{Numero di fotoni incidenti}} \quad (3.1)$$

Inoltre, la PDE dipende da più fattori:

$$PDE = QE \cdot \epsilon_{BD} \cdot \epsilon_g \quad (3.2)$$

dove QE è la quantum efficiency, ovvero il numero medio di coppie elettrone-lacuna generate dalla conversione di un fotone nella depletion region, e dipende dalla lunghezza d'onda; ϵ_{BD} è la probabilità che un singolo portatore provochi il breakdown e dipende dal campo elettrico E e dal tipo di carica (elettrone o lacuna); ϵ_g è l'efficienza geometrica (fill factor) ed è pari a $\epsilon_g = \frac{\text{Area sensibile}}{\text{Area totale}}$. Inoltre, la PDE dipende dalla perdita di fotoni all'ingresso della finestra (per riemissione o assorbimento) e dal tempo di recupero, ovvero dal periodo necessario (≈ 100 ns) affinché una cella, dopo una moltiplicazione a valanga, sia sensibile di nuovo e possa innescare il breakdown. Per quanto riguarda i SiPM utilizzati, in figura 3.5 è riportato l'andamento della PDE in funzione della lunghezza d'onda.

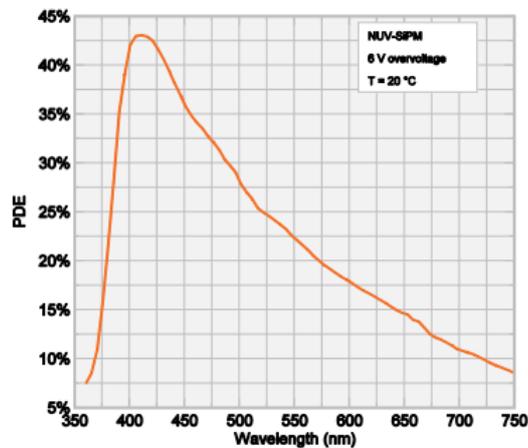


FIGURA 3.5: Photon Detection Efficiency (PDE) in funzione della lunghezza d'onda in fotomoltiplicatori di tipo NUV-SiPM

3.2 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale è mostrato nelle figure 3.6 e 3.7.

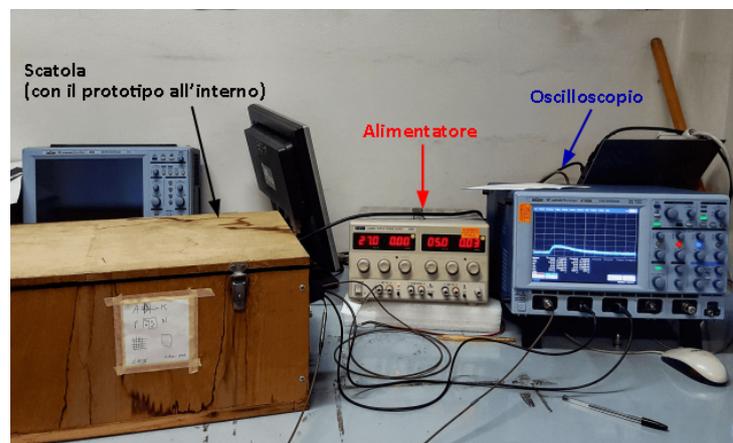


FIGURA 3.6: In figura è possibile notare (da sinistra verso destra) la scatola al cui interno è stato posto il prototipo, il dispositivo di alimentazione elettrica e l'oscilloscopio.

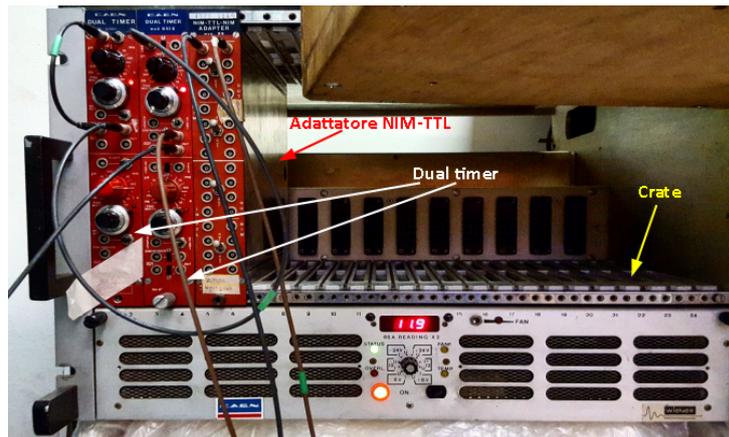


FIGURA 3.7: Dual timer e adattatore NIM-TTL collegati al crate. Questi sono necessari per l'alimentazione del LED.

Di seguito, sono riportate le caratteristiche degli strumenti impiegati nella realizzazione di questo set up.

3.2.1 Alimentazione

Per quanto riguarda l'alimentazione sono state utilizzate le seguenti componenti:

- **2 dual timer** modello N93B della CAEN (specifiche in tabella 3.3) poste in un crate CAMAC per triggerare il LED. Nel collegamento sono stati regolati frequenza e lunghezza degli impulsi in modo da tenere questi ultimi fissati a 60 ns.

Parametri	Valori
Segnali di START	2, NIM ed ECL, sensibili al bordo di partenza (Minima larghezza a metà altezza 5 ns)
Segnale di VETO	1, input NIM, disabilita i segnali di START
Segnale di RESET	1, segnale NIM (Minima larghezza a metà altezza 15 ns)
Outputs	due normali indipendenti, uno complementare al livello NIM e uno all'ECL
Larghezza di output (s)	da $50 \cdot 10^{-9}$ a 10 in 9 steps da 10
Tempo morto	più corto del tempo di ciclo
Tempo di salita/discesa (ns)	< 2
Ritardo I/O (ns)	13
End marker	output NIM ed ECL

TABELLA 3.3: Specifiche dual timer N93B

- **Adattatore NIM-TTL** modello N89 della CAEN (specifiche in tabella 3.4) per pilotare correttamente il LED.

Parametri	Valori
Inputs	8 canali
Impedenza (Ω)	50
Larghezza min. di impulso di input (ns)	10
Ampiezza di impulso di output (V)	> 2
Tempo di salita e di discesa (ns)	< 3
Ritardo Input-Output (ns)	< 8
Frequenza max. di funzionamento (MHz)	60

TABELLA 3.4: Specifiche adattatore NIM-TTL N89

- **Alimentatore di bassa tensione** (*TTi power supply*) serie EX354T (specifiche in tabella 3.5). Questo è indispensabile per accendere il circuito elettronico a cui sono collegati i SiPM in modo da fornire a questi ultimi una tensione inversa di 27 V.

Parametri	Valori
Tensione (V)	5 o 3.3, selezionabile da pannello
Accuratezza di tensione	$\pm 2\%$
Limite minimo di corrente (A)	5
Regolazione del carico	$< 0.5\%$ per un cambio di carico del 90%
Regolazione fine	$< 0.1\%$ per un cambio fine di tensione del 10%
Rumore (mV)	< 2 (rms)
(Larghezza di banda di 20 MHz)	
Terminali di output	4 mm di terminali su 19 mm di altezza
Indicazione dello stato	lampadina per il limite di corrente

TABELLA 3.5: Specifiche alimentatore TTi power supply EX354T

3.2.2 LED

Il LED utilizzato in questa prova emette luce blu, è fatto con GaN ed è il modello L-934MBC della ditta Kingbright. Le sue specifiche sono riportate in tabella.

Parametri	Valori
Lunghezza d'onda del picco (nm)	430
Mezza larghezza della linea spettrale (nm)	60
Capacità (pF)	65
Tensione diretta (V)	da 4.0 a 4.5
Corrente inversa (μA)	fino a 10

TABELLA 3.6: Specifiche LED L-934MBC

Per quanto riguarda le successive immagini, inserite per visualizzare e capire il comportamento del LED, in figura 3.8 è riportato l'andamento dell'intensità relativa del LED in funzione della lunghezza d'onda; mentre in figura 3.9 sono mostrati rispettivamente l'andamento della corrente diretta in funzione della tensione diretta a cui si fa riferimento nelle specifiche del LED e quello della sua intensità luminosa in funzione della corrente stessa.

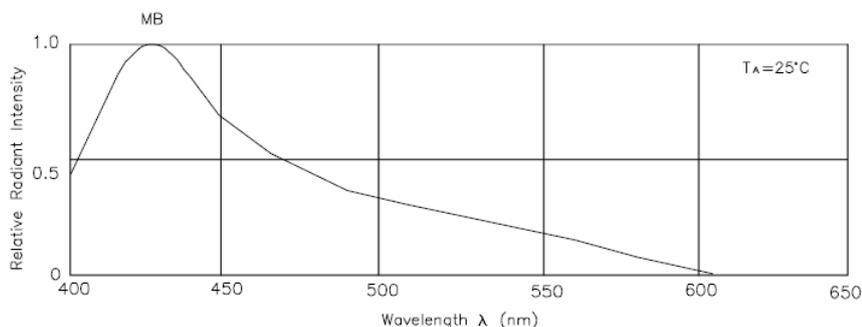


FIGURA 3.8: Intensità relativa del LED L-934MBC in funzione della lunghezza d'onda

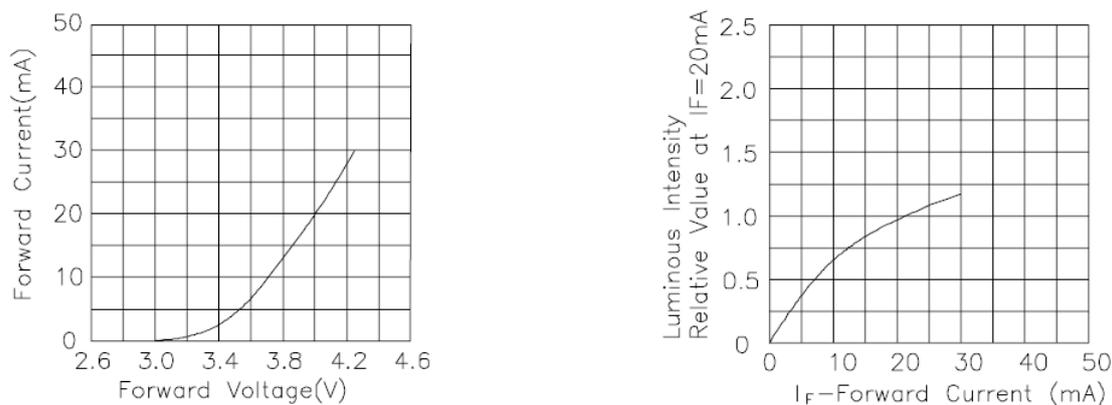


FIGURA 3.9: A sinistra: corrente diretta in funzione della tensione diretta nel LED L-934MBC. A destra: intensità luminosa del LED L-934MBC in funzione della corrente diretta.

3.2.3 Oscilloscopio

Oltre agli strumenti utilizzati per l'apparato sperimentale vero e proprio, è stato usato un oscilloscopio digitale, collegato alla scheda elettronica dei SiPM tramite delle sonde, per rivelare e misurare il segnale in uscita da questi.

L'oscilloscopio usato è il WaveSurfer 454 prodotto dall'azienda LeCroy. Le sue specifiche sono riportate in tabella 3.7.

Parametri	Valori
Larghezza di banda (MHz)	200
Tempo di salita (ps)	750
Canali di input	4
Frequenza di campionamento massima (GS/s)	65
Limite di larghezza di banda (MHz)	20, 200
Sensibilità verticale a $1M\Omega$ (V/div)	da $1 \cdot 10^{-3}$ a 10
Range della base dei tempi (s/div)	da $200 \cdot 10^{-12}$ a 1000

TABELLA 3.7: Specifiche Oscilloscopio WaveSurfer 454

Prima di fare le misure con il segnale fornito dal LED, è stata fatta una misura su un raggio cosmico casuale. L'andamento del segnale è mostrato in figura 3.10.

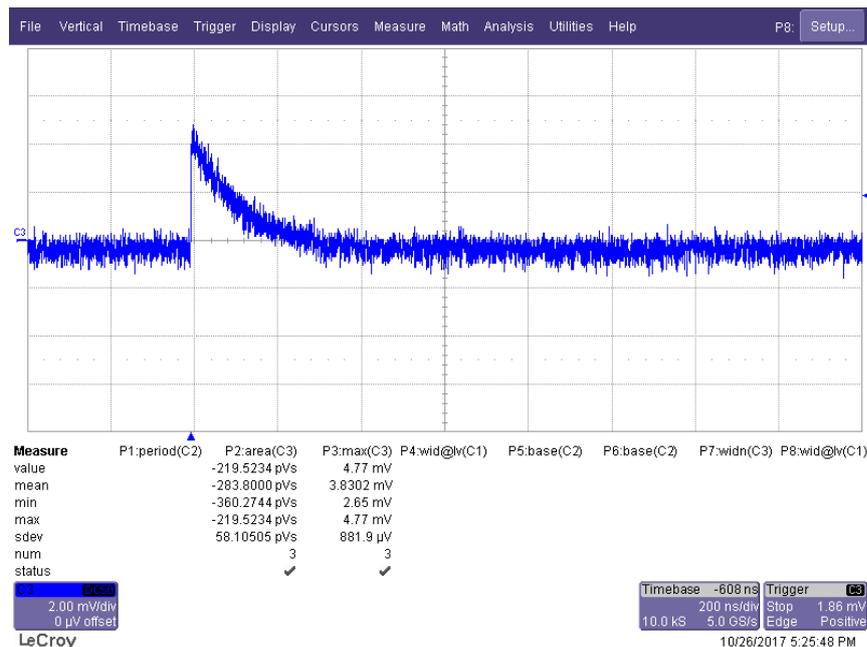


FIGURA 3.10: Segnale rivelato di un raggio cosmico. L'asse delle ascisse è quello dei tempi, l'asse delle ordinate è quello dei valori di tensione.

L'utilizzo di sorgenti diverse (raggi cosmici, LED) è legato anche a fenomeni diversi: nel primo caso abbiamo delle particelle che penetrano all'interno dello scintillatore e causano il fenomeno della scintillazione con la conseguente produzione di molti fotoni; nel secondo caso abbiamo dei fotoni che vengono iniettati direttamente nel materiale scintillante e subiscono solo le riflessioni nel materiale, dovute al fatto che questo sia ricoperto da mylar, prima di giungere ai fotomoltiplicatori. In definitiva, nel secondo caso non osserviamo la scintillazione.

3.3 Configurazioni geometriche

In questa sezione sono riportate le 4 configurazioni geometriche studiate e i relativi risultati ottenuti analizzando il segnale in uscita dai SiPM in corrispondenza delle 9 posizioni del LED.

Si noti che in questo studio è interessante considerare:

- l'uniformità della risposta dei SiPM al variare della posizione del LED, per ogni configurazione;
- il confronto tra le quattro configurazioni.

3.3.1 Configurazione 1

In figura 3.11 è riportato lo schema relativo al posizionamento dei SiPM, indicati con il colore rosa e blu. In questa configurazione entrambi i SiPM sono posizionati su un lato lungo.

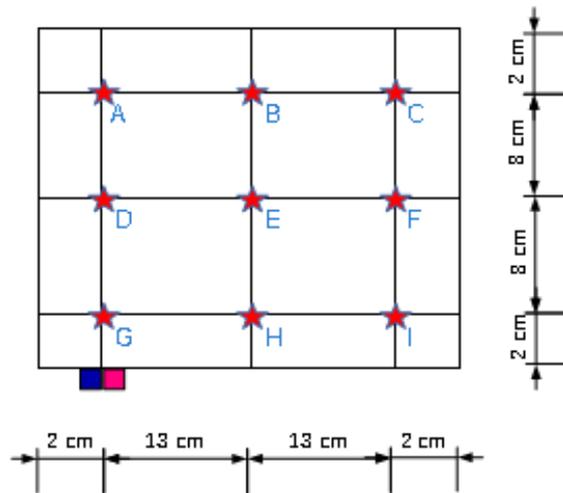
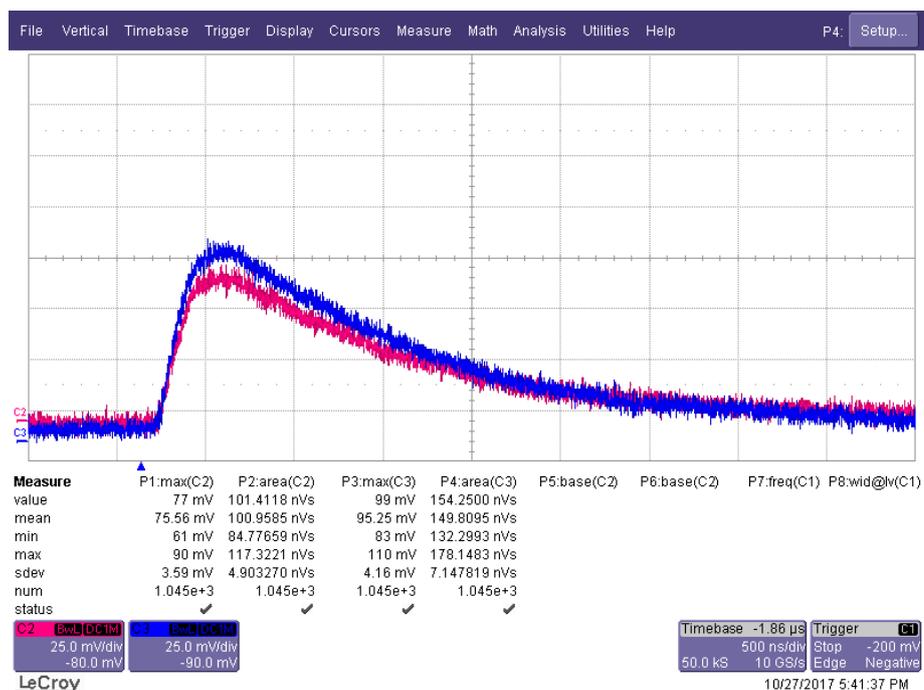


FIGURA 3.11: Schema della posizione dei SiPM quando questi sono entrambi su un lato lungo.

In figura 3.12 sono riportati i segnali dei due SiPM (le cui tracce sono le righe blu e rosa) acquisiti con l'oscilloscopio per le posizioni G, E, C con le rispettive statistiche circa la misura degli integrali e dei massimi di segnale.



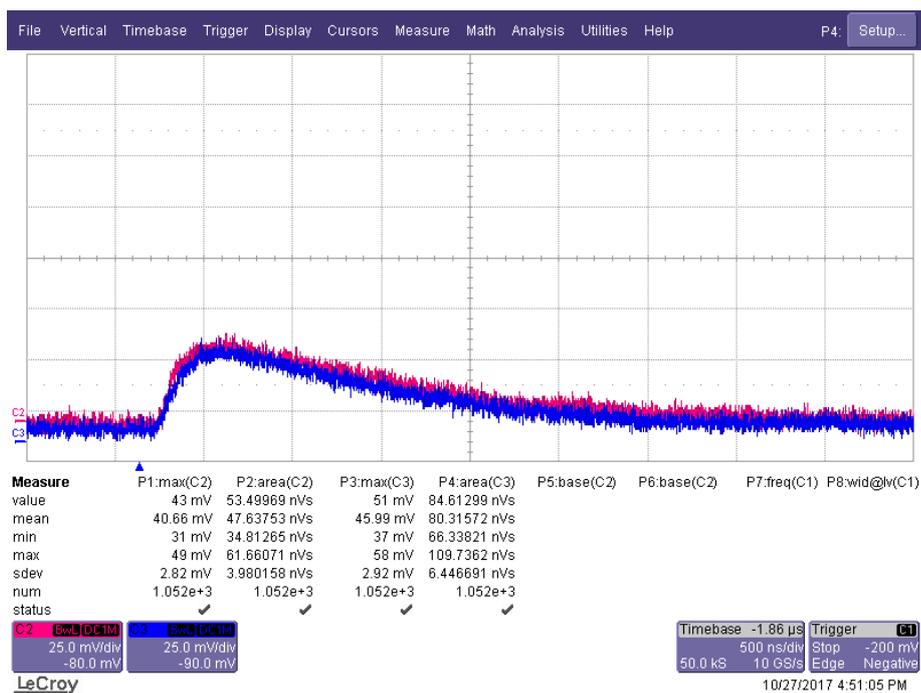
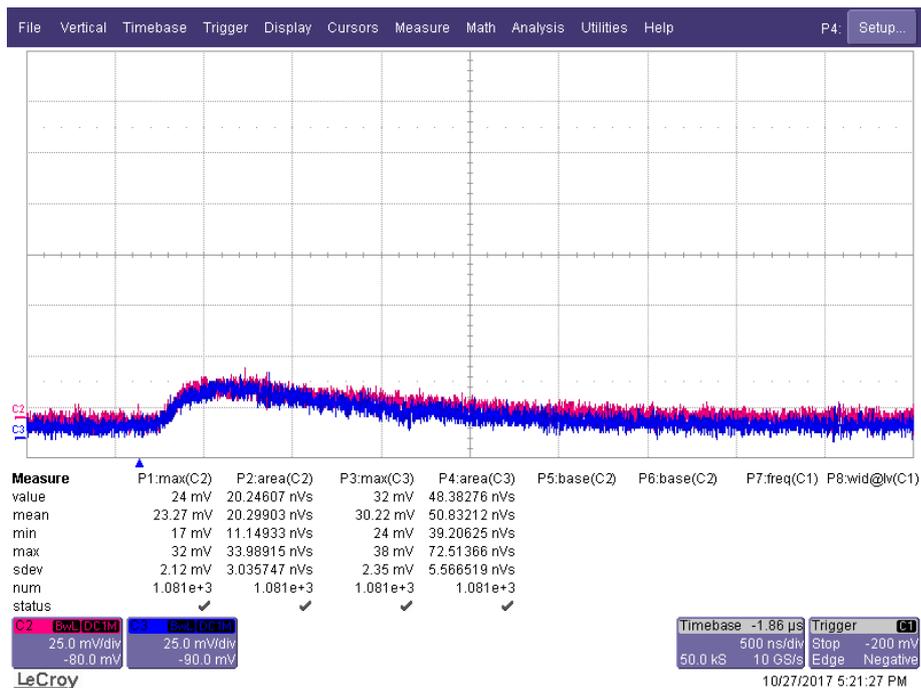


FIGURA 3.12: Segnali dei due SiPM nella configurazione 1 con statistiche.

Nella figura 3.13 sono riportati i risultati riguardanti l'integrale del segnale amplificato dai singoli SiPM. Il valore esplicitato nelle varie posizioni (colore giallo) è stato ottenuto da una media dei valori d'area fatti su circa 1000 punti per ogni posizione. Il valore in percentuale (colore bianco) è dato dal rapporto (moltiplicato per 100) tra il segnale in quella posizione e il segnale massimo della configurazione. Ogni grafico bidimensionale è stato elaborato utilizzando il software ROOT.

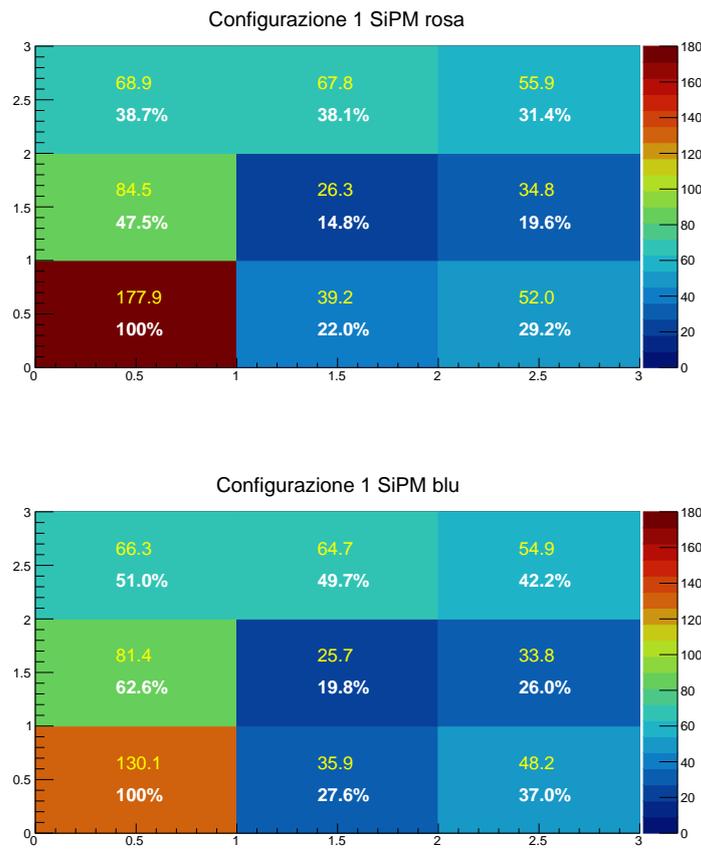


FIGURA 3.13: Grafico della carica integrata relativa alla configurazione 1. I valori misurati sono in $nV \cdot s$.

Nella tabella 3.8 sono riportati i valori di massimo del segnale amplificato dai due SiPM.

45(3)	49(3)	41(3)	48(3)	47(3)	40(3)
60(3)	22(2)	27(2)	59(3)	22(2)	27(2)
121(5)	29(2)	38(3)	91(4)	28(2)	36(3)

TABELLA 3.8: Valori di ampiezza del picco per il SiPM rosa (destra) e per il SiPM blu (sinistra) nella configurazione 1. I valori sono espressi in mV.

3.3.2 Configurazione 2

In figura 3.14 è riportato lo schema relativo al posizionamento dei SiPM. In questa configurazione entrambi i SiPM sono posizionati su un lato corto.

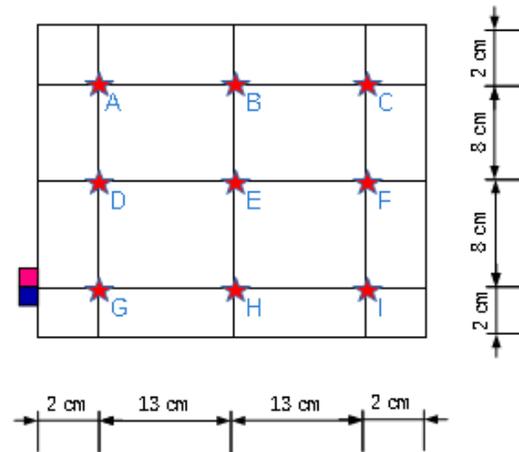
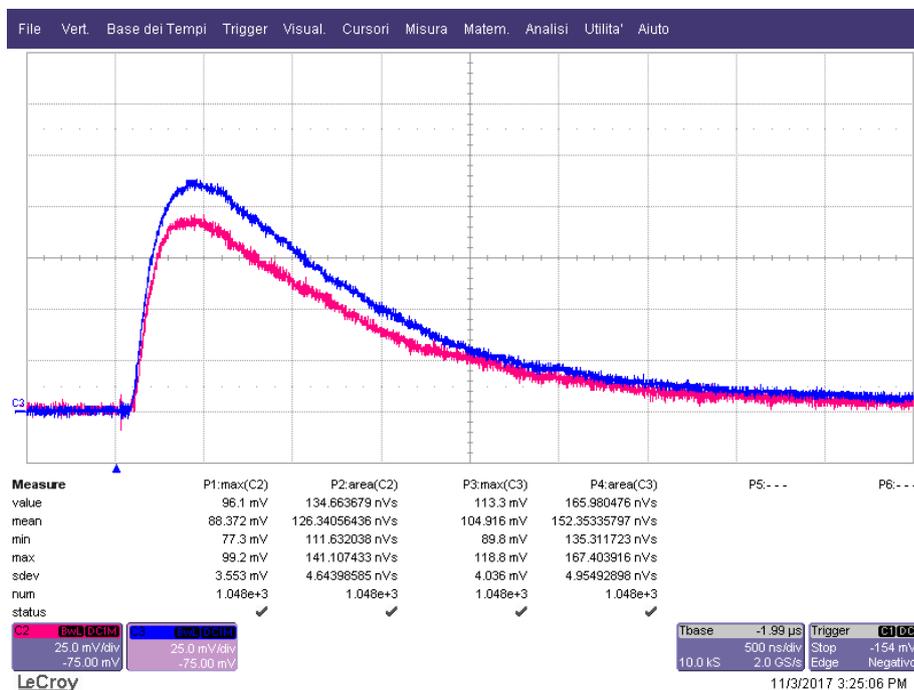


FIGURA 3.14: Schema della posizione dei SiPM quando questi sono entrambi su un lato corto.

Nella figura 3.15 sono riportati i segnali acquisiti con l'oscilloscopio per le posizioni G, E, C con le rispettive statistiche circa la misura degli integrali e dei massimi di segnale per i due SiPM.



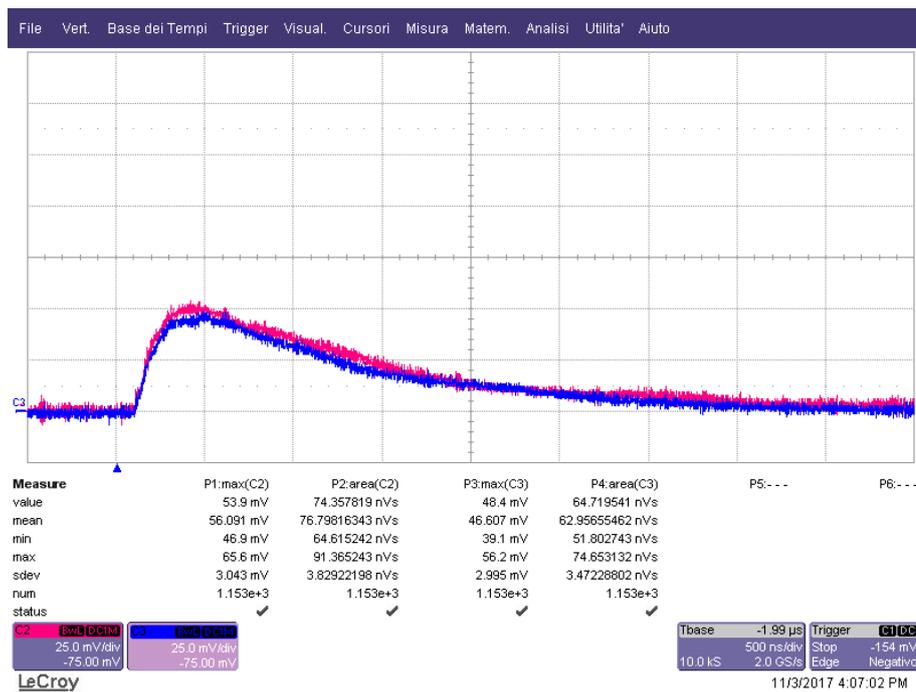
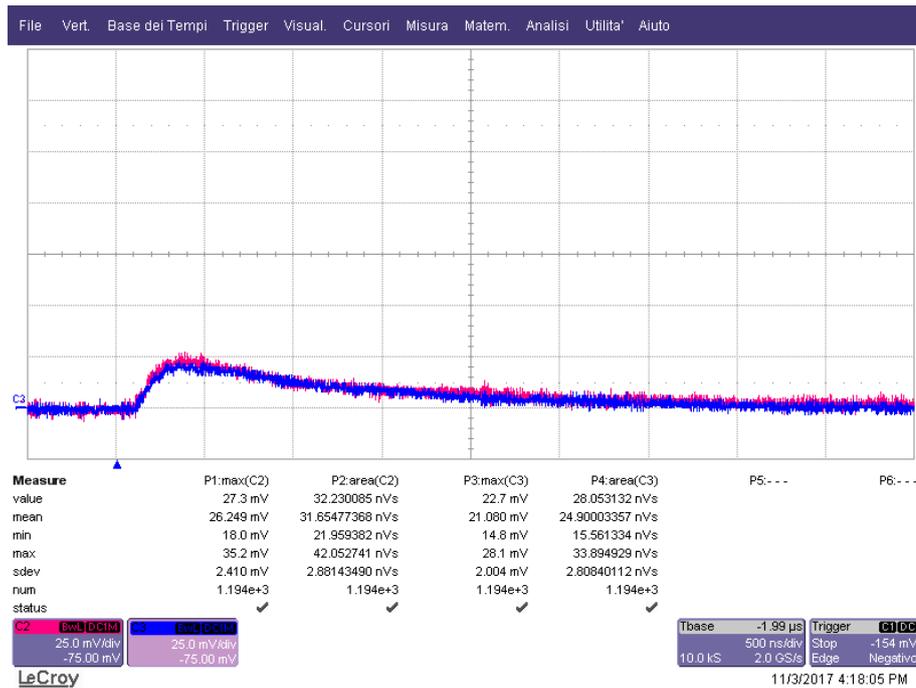


FIGURA 3.15: Segnali dei due SiPM nella configurazione 2 con statistiche.

Nella figura 3.16 sono riportati i risultati riguardanti l'integrale del segnale amplificato dai singoli SiPM.

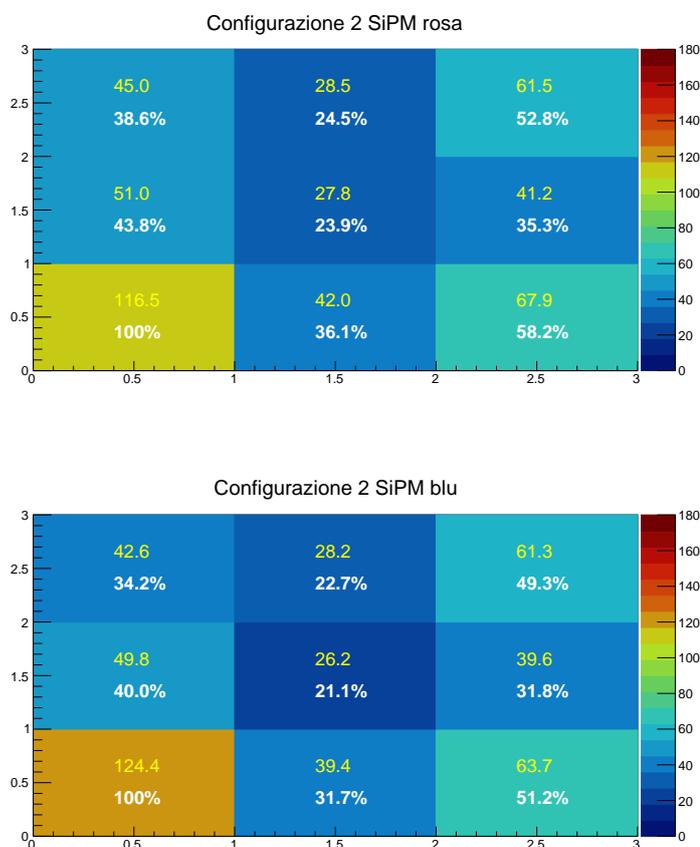


FIGURA 3.16: Grafico della carica integrata relativa alla configurazione 2. I valori misurati sono in $nV \cdot s$.

Nella tabella 3.9 sono riportati i valori di massimo del segnale amplificato dai due SiPM.

34(2)	23(2)	44(3)	33(2)	23(2)	45(3)
37(2)	22(2)	31(2)	37(3)	22(2)	31(2)
81(4)	32(2)	49(3)	87(4)	30(2)	46(3)

TABELLA 3.9: Valori di ampiezza del picco per il SiPM rosa (destra) e per il SiPM blu (sinistra) nella configurazione 2. I valori sono espressi in mV.

3.3.3 Configurazione 3

In figura 3.17 è riportato lo schema relativo al posizionamento dei SiPM. In questa configurazione il SiPM associato al segnale blu è posizionato su un lato corto mentre quello associato al colore rosa è posizionato su un lato lungo e sono posti in modo da essere separati e molto distanziati l'uno dall'altro.

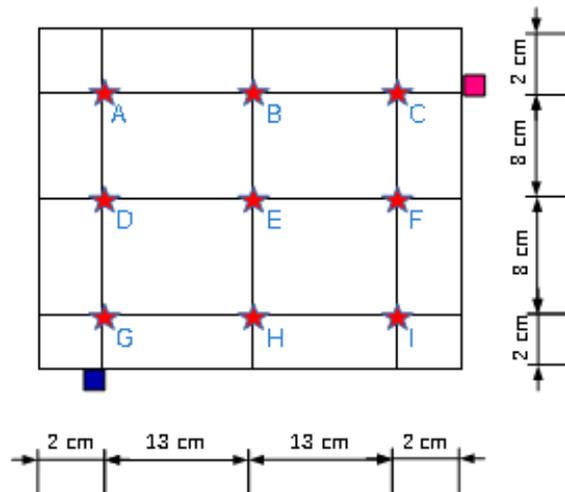
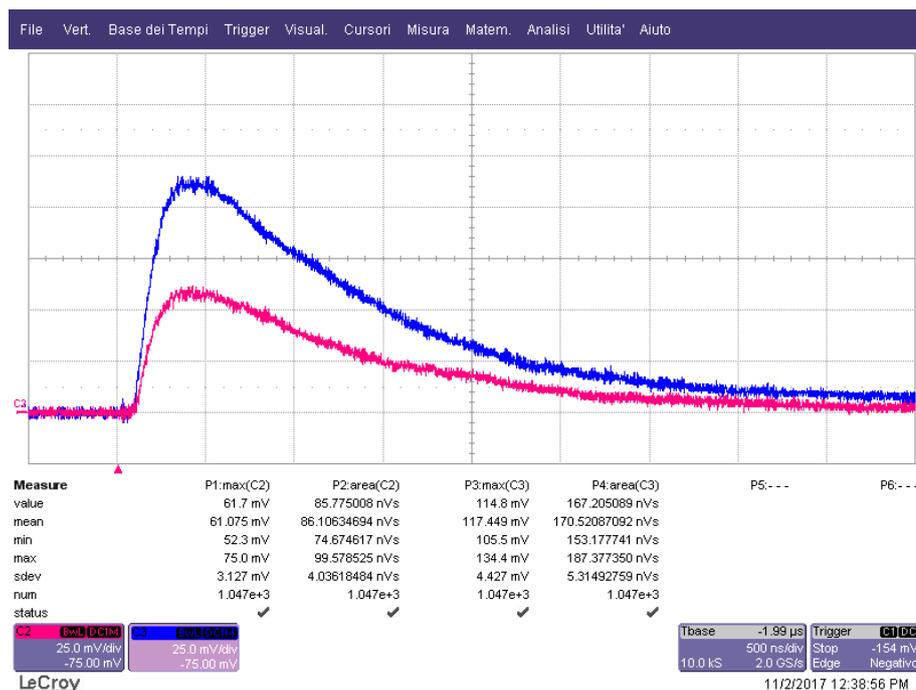


FIGURA 3.17: Schema della posizione dei SiPM quando quello blu è su un lato corto e quello rosa è su un lato lungo ma sono molto distanziati.

Nella figura 3.18 sono riportati i segnali acquisiti con l'oscilloscopio per le posizioni G, E, C con le rispettive statistiche circa la misura degli integrali e dei massimi di segnale per i due SiPM.



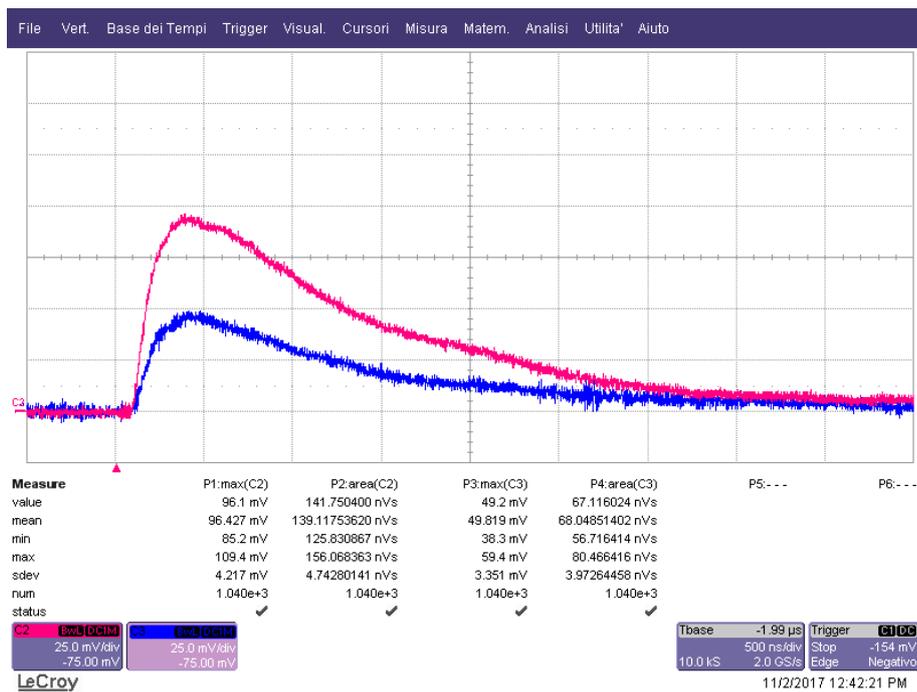
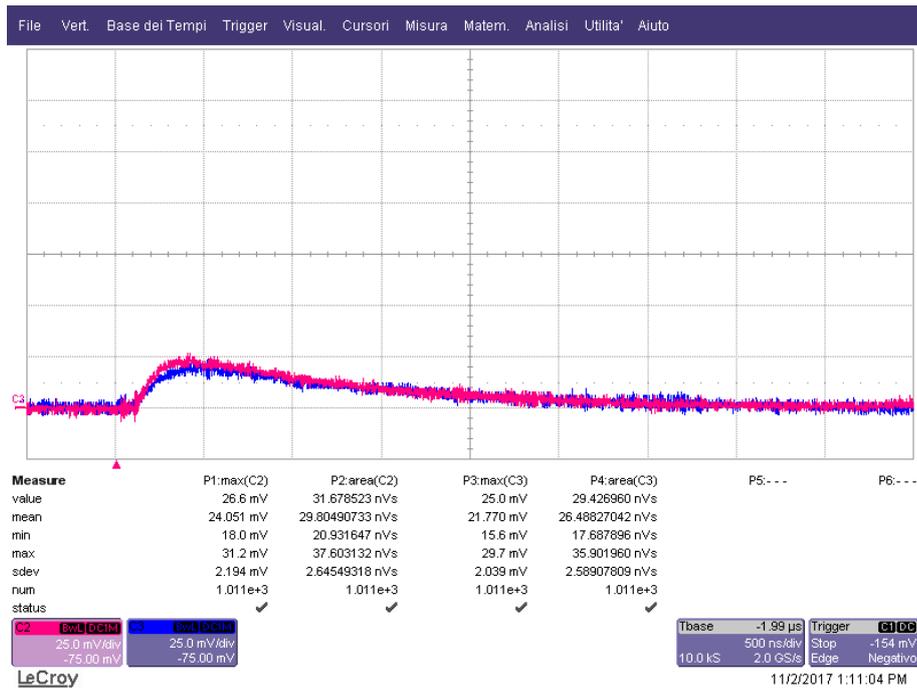


FIGURA 3.18: Segnali dei due SiPM nella configurazione 3 con statistiche.

Nella figura 3.19 sono riportati i risultati riguardanti l'integrale del segnale amplificato dai singoli SiPM.

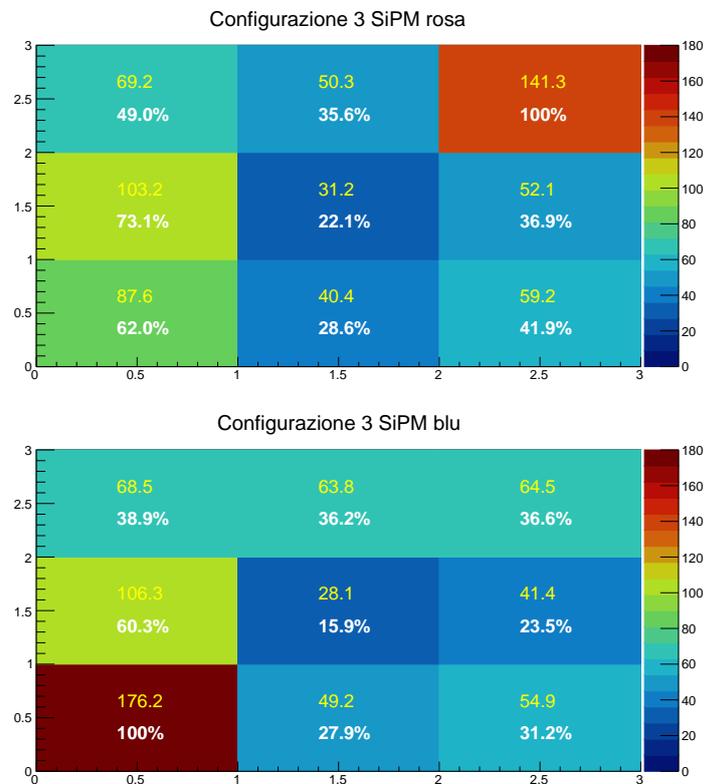


FIGURA 3.19: Grafico della carica integrata relativa alla configurazione 3. I valori misurati sono in $nV \cdot s$.

Nella tabella 3.10 sono riportati i valori di massimo del segnale amplificato dai due SiPM.

50(3)	38(2)	98(4)	50(3)	47(3)	48(3)
73(4)	25(2)	39(3)	75(4)	23(2)	32(3)
62(3)	31(2)	41(3)	121(5)	37(3)	39(3)

TABELLA 3.10: Valori di ampiezza del picco per il SiPM rosa (destra) e per il SiPM blu (sinistra) nella configurazione 3. I valori sono espressi in mV.

3.3.4 Configurazione 4

In figura 3.20 è riportato lo schema relativo al posizionamento dei SiPM. In questa configurazione il SiPM associato al segnale blu è posizionato su un lato corto mentre quello associato al colore rosa è posizionato su un lato lungo.

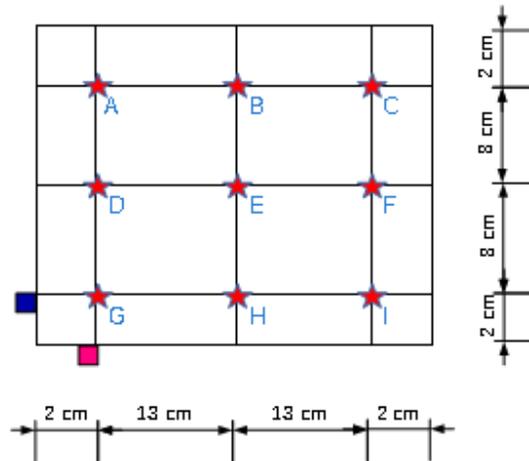
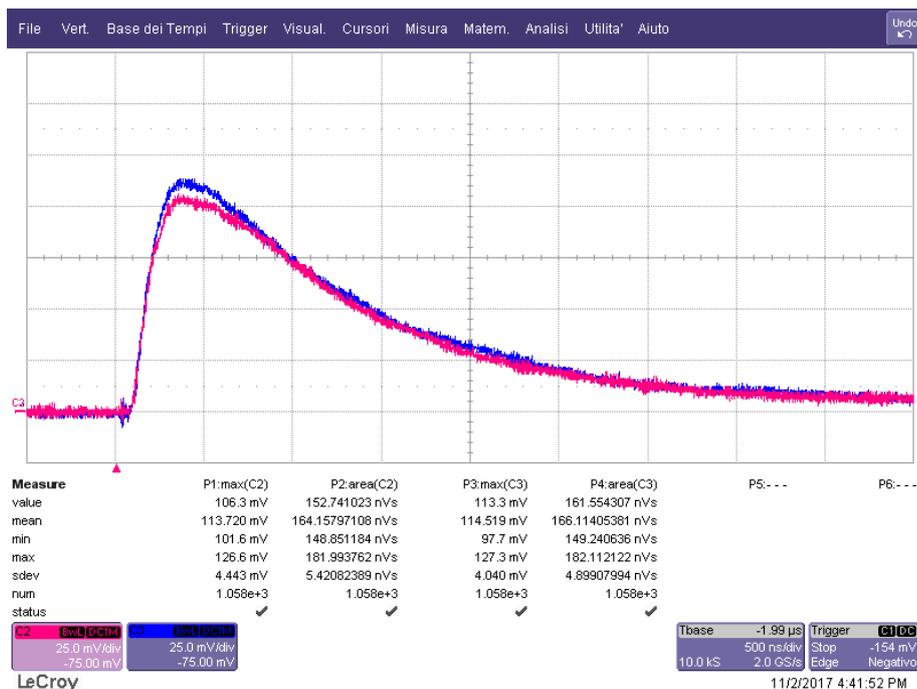


FIGURA 3.20: Schema della posizione dei SiPM quando quello blu è sul lato corto, quello rosa è sul lato lungo e sono entrambi vicini all'angolo.

Nella figura 3.21 sono riportati i segnali acquisiti con l'oscilloscopio per le posizioni G, E, C con le rispettive statistiche circa la misura degli integrali e dei massimi di segnale per i due SiPM.



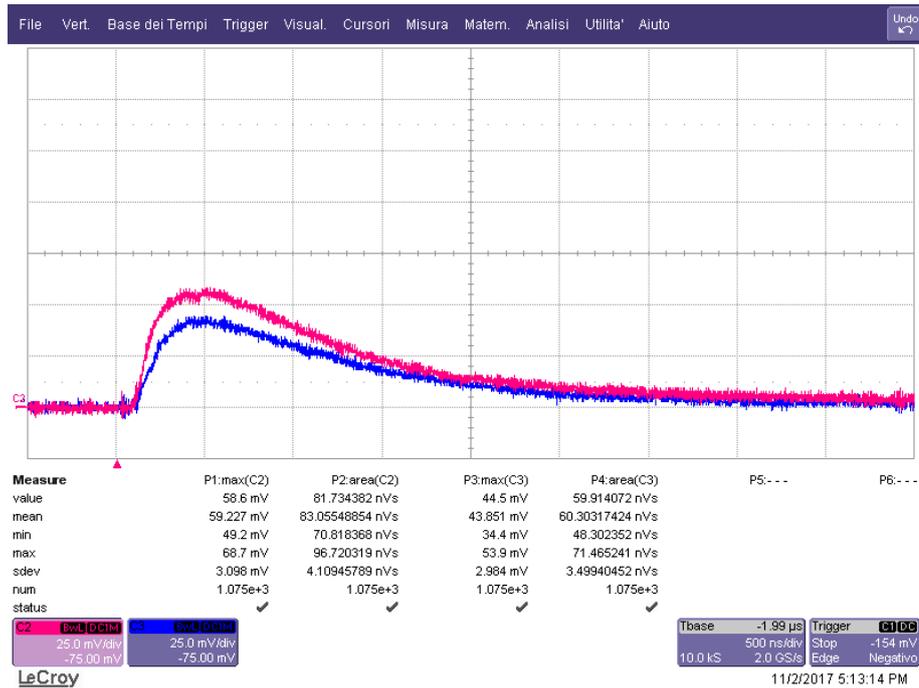
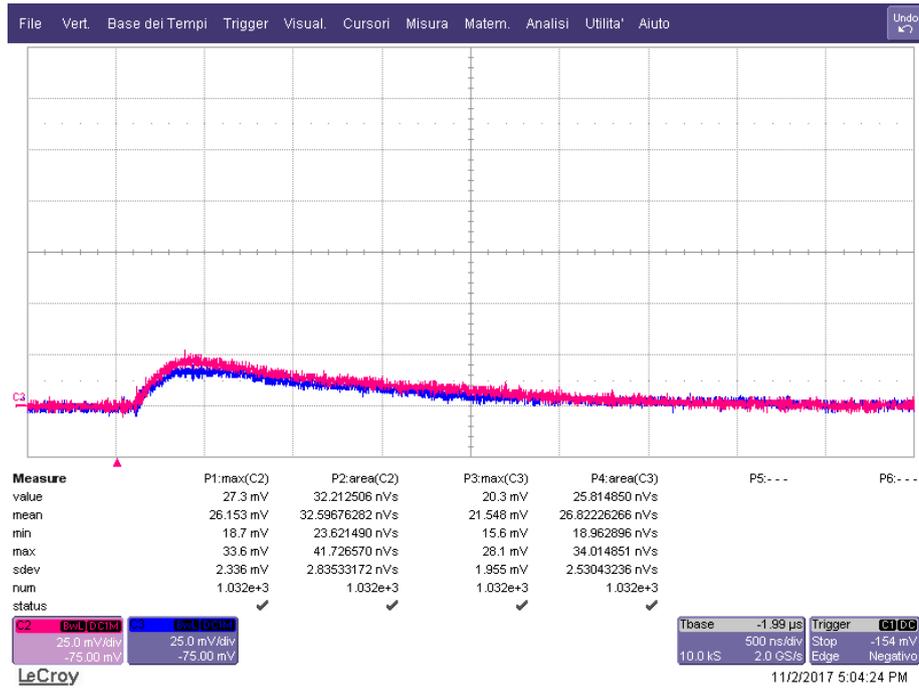


FIGURA 3.21: Segnali dei due SiPM nella configurazione 4 con statistiche.

Nella figura 3.22 sono riportati i risultati riguardanti l'integrale del segnale amplificato dai singoli SiPM.

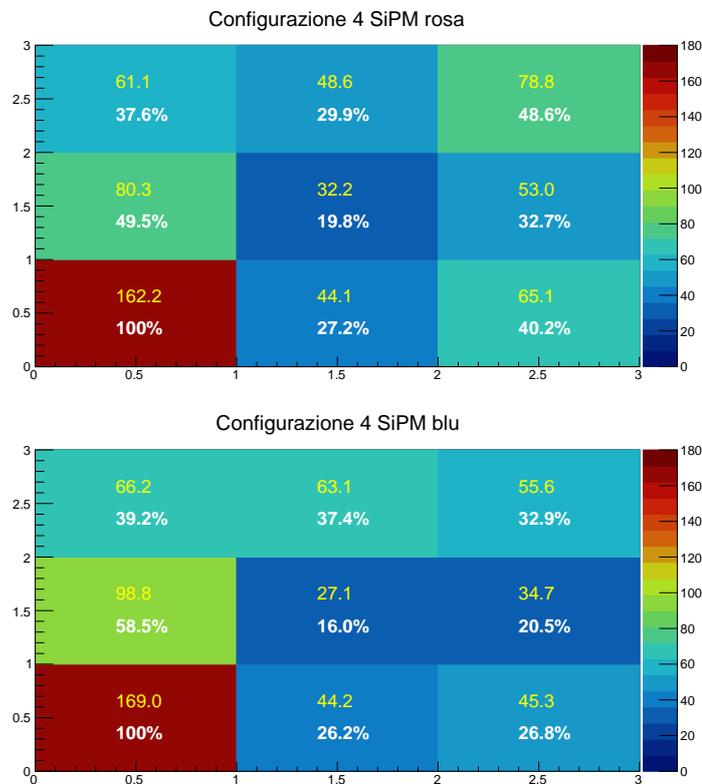


FIGURA 3.22: Grafico della carica integrata relativa alla configurazione 4. I valori misurati sono in $nV \cdot s$.

Nella tabella 3.11 sono riportati i valori di massimo del segnale amplificato dai due SiPM.

45(3)	37(2)	57(3)	49(3)	46(3)	41(3)
58(3)	26(2)	40(3)	70(4)	22(2)	27(2)
112(4)	34(2)	47(3)	116(4)	33(2)	34(2)

TABELLA 3.11: Valori di ampiezza del picco per il SiPM rosa (destra) e per il SiPM blu (sinistra) nella configurazione 4. I valori sono espressi in mV.

3.4 Risultati

Nelle tabelle 3.23, 3.24, 3.25 sono riportati i risultati relativi alla carica integrata e a ciascuna posizione (indicata con la lettera corrispondente) nelle quattro configurazioni per i due SiPM e per la loro somma. Questi grafici permettono un confronto visivo immediato delle quattro configurazioni.

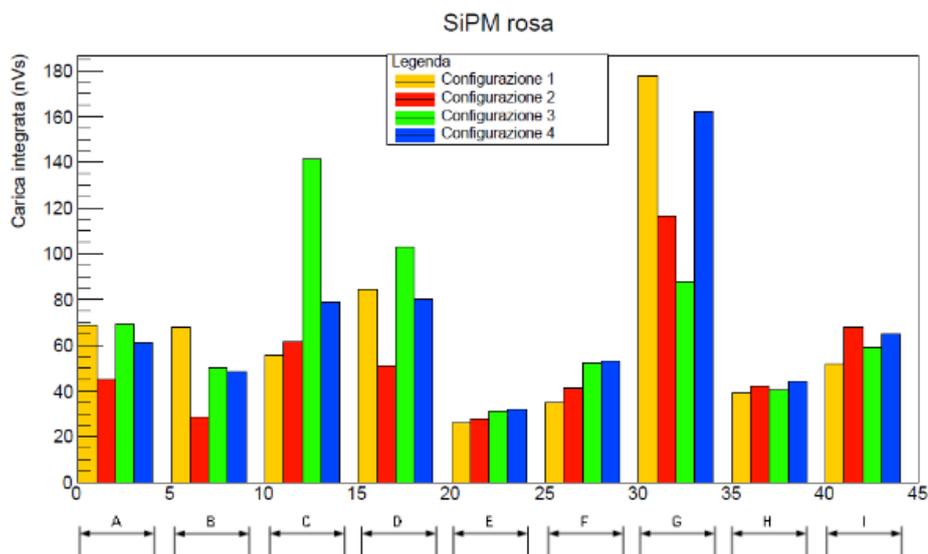


FIGURA 3.23: Grafico della carica integrata relativa alle 4 configurazioni per il SiPM rosa.

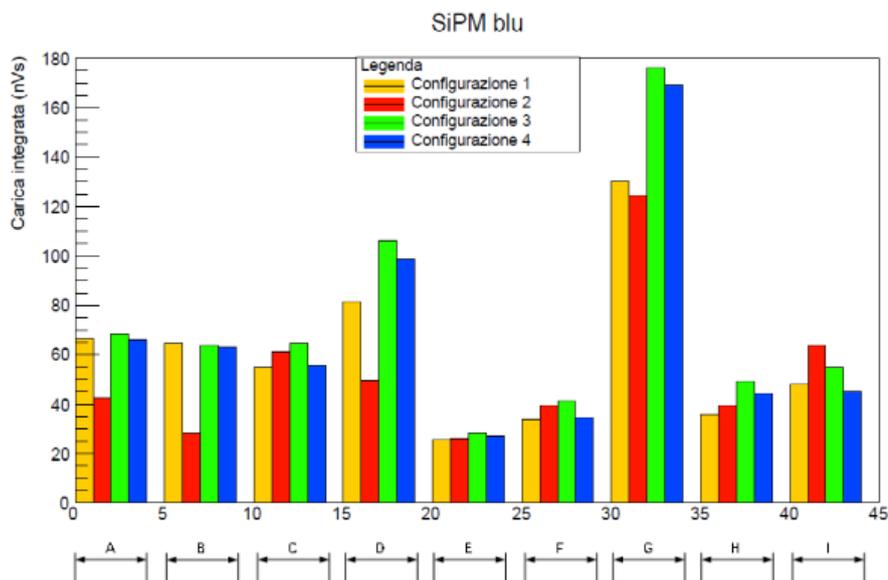


FIGURA 3.24: Grafico della carica integrata relativa alle 4 configurazioni per il SiPM blu

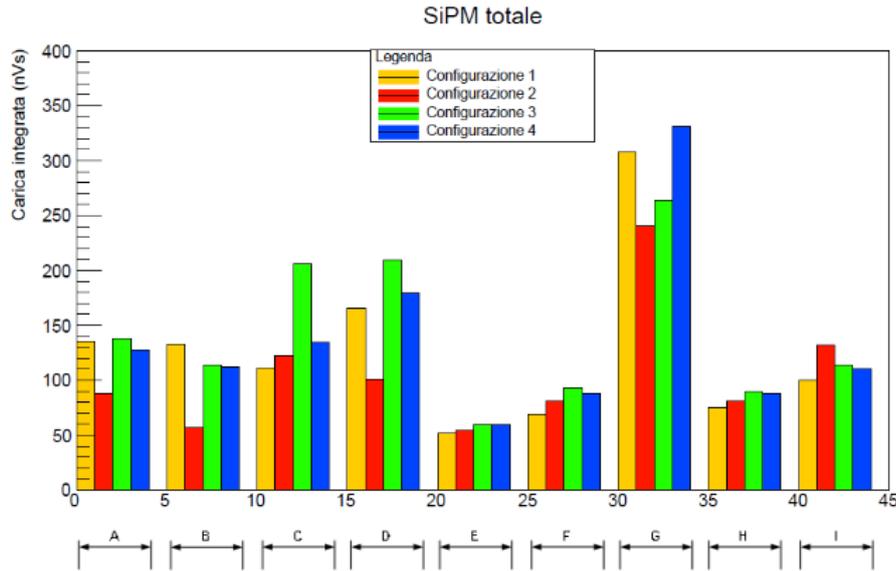


FIGURA 3.25: Grafico della somma delle cariche integrate dei due SiPM relative alle 4 configurazioni.

Infine, nel grafico 3.26 è riportato l'andamento del rapporto tra la somma dei segnali rispettivamente nelle configurazioni 2,3,4 e la somma dei segnali nella configurazione 1.

Da questo si possono mettere in evidenza la dipendenza del segnale rivelato dai SiPM dal punto in cui la luce del LED incide e le variazioni in prossimità del punto più vicino ai SiPM, ovvero della posizione G, (visibili anche in figura 3.25) dovute all'orientazione del LED, nonostante si sia cercato di tenerlo il più possibile perpendicolare alla "mattonella".

Si può notare una tendenza delle configurazioni 3 e 4 a fornire tra il 10% e il 20% di segnale in più sommando i due SiPM.

Per quanto riguarda gli errori associati a queste misure, sono stati calcolati per ogni posizione con la seguente formula:

$$\Delta z = z \sqrt{\left(\frac{\Delta x_n + \Delta y_n}{x_n + y_n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_1 + \Delta y_1}{x_1 + y_1}\right)^2} \quad \text{con} \quad z = \frac{x_n + y_n}{x_1 + y_1} \quad (3.3)$$

dove x_n e y_n sono rispettivamente i segnali dei due SiPM, rosa e blu, nella configurazione n-esima con Δx_n e Δy_n errori associati e x_1 e y_1 sono i segnali dei due SiPM, rosa e blu, nella prima configurazione con Δx_1 e Δy_1 errori associati.

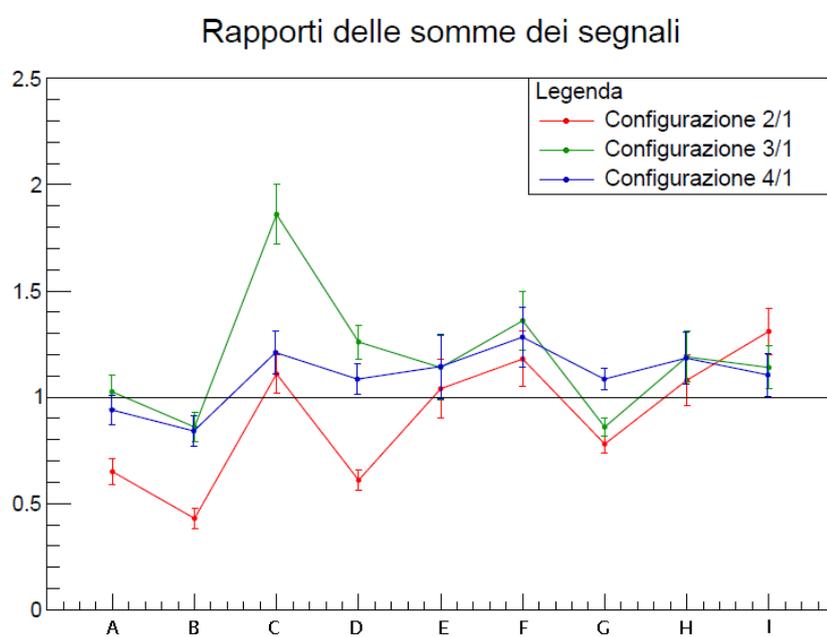


FIGURA 3.26: Grafico del rapporto delle somme delle cariche integrate dei due SiPM..

Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è lo studio tramite misure sperimentali dell'accoppiamento diretto tra due SiPM e uno scintillatore avendo come riferimento le esigenze dell'esperimento PolarQuEEEst. In particolare sono state analizzate quattro configurazioni e le misure hanno avuto come scopo principale l'individuazione della configurazione geometricamente migliore tramite il confronto delle misurazioni riguardanti la carica integrata.

Andando nello specifico, le misure sono state fatte per quattro configurazioni in cui si è variato il posizionamento dei due SiPM rispetto allo scintillatore. In particolare, nella prima sono stati posti affiancati sul lato lungo, nella seconda sono stati posti affiancati sul lato corto, nella terza sono stati separati e distanziati uno sul lato lungo e l'altro sul lato corto e nella quarta sono stati posti a cavallo di un angolo.

Per quanto riguarda i risultati, le misurazioni hanno messo in evidenza un netto miglioramento nel passaggio dalle configurazioni 1 e 2 alle configurazioni 3 e 4. A tutt'oggi i risultati ottenuti tramite questo studio rappresentano una novità e dovranno essere confermati tramite misure fatte con raggi cosmici in quanto la sorgente utilizzata in questo studio preliminare è un LED a luce blu. Queste e le successive misure con i raggi cosmici permetteranno di definire la geometria finale di costruzione per il rivelatore PolarQuEEEst.

Bibliografia

- [1] L'enigma dei raggi cosmici, A. de Angelis, 2012, Springer
- [2] http://www.fisica.uniud.it/~cobal/Lezione_I_raggi%20cosmici.pdf
- [3] <http://cosmo.fisica.unimi.it/assets/IntroAstro/IntroAstro1011/Caccianiga6.pdf>
- [4] Particle Astrophysics (Second Edition), D.H.Perkins, 2009, OUP Oxford
- [5] Emission of Radio Waves in Particle Showers, A.Zilles, 2017, Springer
- [6] http://www.roma1.infn.it/exp/ams/LezioniAP/2011/AP_lez3_2011.pdf
- [7] <http://eee.centrofermi.it/>
- [8] <http://www.ilsussidiario.net/News/emmeciquadro/Emmeciquadro-n-65/2017/7/16/SCIENZ-SCUOLA-L-esperimento-Extreme-Energy-Events-tra-ricerca-e-comunicazione-scientifica/772805/>
- [9] http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2_TOF.html
- [10] <http://www.polarquest2018.org/>
- [11] http://www.polarquest2018.org/wp-content/uploads/2017/09/polarQuEEEest_scientific_presentation.pptx.pdf
- [12] An advanced study of silicon photomultiplier, P.Buzhan
(<http://www.slac.stanford.edu/pubs/icfa/fall01/paper3/paper3.pdf>)
- [13] W.R.Leo , Techniques for nuclear and particle physics experiments, 1994, Springer