

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Test di Silicon Photomultipliers (SiPM) accoppiati a scintillatori

Relatore:
Prof. Maurizio Basile

Presentata da:
Andrea Achilli

Correlatore:
Dott. Rosario Nania

Sessione II
Anno Accademico 2012/2013

Abstract

In questa tesi si riportano i risultati di uno studio della risoluzione temporale di un fotomoltiplicatore al Silicio (SiPM).

La diffusione di questi rivelatori è in notevole aumento sia nelle ricerche di Fisica Nucleare e Subnucleare che nelle applicazioni mediche.

I vantaggi sono legati alla loro insensibilità ai campi magnetici e ai facili modi di operazione (piccoli, robusti e con utilizzo a basso voltaggio). Usati sino ad ora per la misura di cariche, sono oggi di grande interesse per possibili applicazioni che richiedano alta risoluzione temporale (sistemi di tempo di volo, trigger, calorimetria).

In questo studio sono stati studiati due tipi diversi di accoppiamento Scintillatore-SiPM: diretto o tramite fibre.

Per queste analisi sono stati utilizzati diversi metodi di acquisizione e successivamente si sono incrociati i relativi risultati.

Indice

Introduzione	Pag. 1
Capitolo 1 : Aspetti teorici	Pag. 2
1.1 Scintillatore	
1.2 Wavelength shifter	
1.3 Fotomoltiplicatore classico	
1.4 Fotomoltiplicatori moderni	
Capitolo 2 : Setup Sperimentale	Pag. 8
2.1 Configurazione per l'acquisizione dei dati	
Capitolo 3 : Caratterizzazione dei SiPM	Pag. 16
3.2 Conteggio di singole ed efficienza	
Capitolo 4 : Analisi	Pag. 18
4.1 Analisi preliminare	
4.2 Correzione per Time Slewing	
Capitolo 5 : Analisi con fotomoltiplicatori esterni	Pag. 25
5.1 Misure prese tramite oscilloscopio	
5.2 Misure prese tramite moduli CAMAC	
Conclusione	Pag. 30
Ringraziamenti	Pag. 31
Bibliografia	Pag. 32

Introduzione

La rivelazione della luce ha da sempre assunto una grande importanza per la fisica nucleare e subnucleare. Molti rivelatori (scintillatori, fibre) emettono luce che deve essere trasformata in segnali elettrici tramite strumenti specifici.

Storicamente sono stati utilizzati per molto tempo i tubi fotomoltiplicatori (PM)^[1] poi sono apparsi i rivelatori a stato solido come i diodi PIN e successivamente i fotodiodi a valanga (APD), per poi giungere ai giorni nostri dove sono utilizzati principalmente i Silicon PhotoMultiplier (SiPM).

Lo scopo di questa tesi è lo studio della risoluzione temporale di un fotomoltiplicatore al Silicio abbinato ad uno scintillatore.

Sono state studiate due diverse configurazioni; nella prima la luce prodotta dallo scintillatore è trasmessa al SiPM tramite una guida di luce, mentre nella seconda lo scintillatore è messo a diretto contatto con la superficie del fotomoltiplicatore.

La prima configurazione è quella maggiormente usata negli esperimenti. L'interesse di questo studio è legato alle possibili applicazioni in rivelatori che richiedono buone risoluzioni temporali (contatori di trigger, tempo di volo, calorimetri...).

Tale studio ha dimostrato che la configurazione a contatto diretto migliora nettamente la risoluzione di questi dispositivi.

Capitolo 1

Aspetti teorici

1.1 Scintillatore

I materiali scintillanti sono rivelatori di particelle che sfruttano un fenomeno di conversione indiretta della radiazione incidente, la luminescenza^[2].

Quando una particella attraversa il materiale cede una parte della propria energia eccitando un elettrone, che si porta cioè ad un livello energetico superiore.

L'elettrone, tornando nello stato fondamentale, riemette l'energia sotto forma di fotone, tipicamente come luce visibile, tale luce è detta luce di scintillazione.

In prima approssimazione tale processo di riemissione può essere descritto da un semplice decadimento esponenziale:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{N_{TOT}}{\tau_D} e^{-\frac{t}{\tau_D}}$$

dove:

$N(t)$ = numero di fotoni emessi all'istante t

N_{TOT} = numero totale di fotoni emessi

τ_D = tempo di decadimento

La luminescenza si può distinguere in due fenomeni in base al tempo di vita della radiazione: se tra l'assorbimento e la riemissione intercorre un intervallo di tempo necessario alla transizione atomica ($t < 10^{-8}$ s) tale processo è chiamato *fluorescenza*; se invece lo stato di eccitazione è metastabile, cioè la luminescenza persiste anche dopo aver cessato di irradiare il campione, in tal caso il processo è detto *fosforescenza*.

Se questi processi possono essere identificati in due componenti distinte, τ_{fast} e τ_{slow} , la legge che descrive l'intensità della luce emessa in funzione del tempo è data dalla sovrapposizione di due esponenziali

$$N(t) = A \cdot e^{(-t/\tau_f)} + B \cdot e^{(-t/\tau_s)}$$

Le ampiezze relative alle due componenti variano da uno scintillatore all'altro come l'esempio mostrato in figura 1.1 nella quale si vedono la componente lenta raffigurante la *fosforescenza* e quella lenta che rappresenta la *fluorescenza*., Quest'ultima è quella più rilevante per lo studio che vogliamo fare.

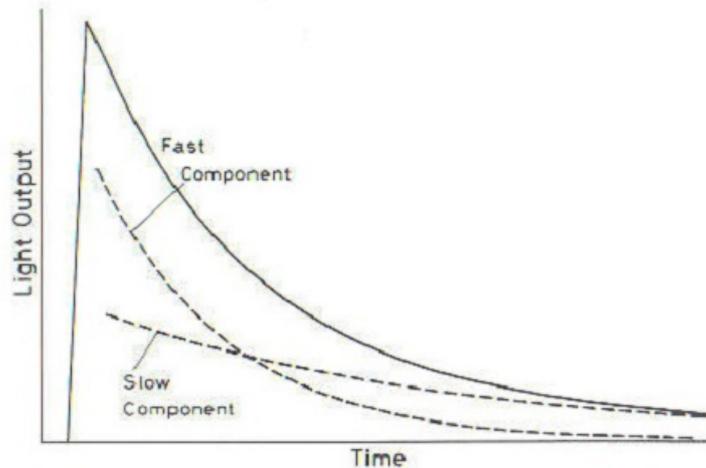


Figura 1.1: Rappresentazione dell'andamento esponenziale dell'emissione di luce di uno scintillatore nelle sue due componenti, veloce e lenta, e della loro somma.

Gli scintillatori si dividono in base al materiale di cui sono composti e possono essere inorganici ed organici; i primi sono principalmente cristalli di composti alogenuri alcalini contenenti piccole quantità di atomi droganti, detti attivatori, indispensabili per il processo di luminescenza. I secondi sono costituiti generalmente da idrocarburi aromatici, ossia composti organici contenenti anelli benzenici collegati tra loro in vari modi, motivo per cui il loro meccanismo di scintillazione è di natura molecolare, cioè generato da transizioni elettroniche che coinvolgono una singola molecola.

Gli scintillatori plastici sono un particolare tipo di scintillatori organici composti da una soluzione di scintillatore in un solvente plastico.

1.2 Wavelength shifter

Per trasportare il segnale luminoso prodotto da uno scintillatore plastico si utilizza un particolare tipo di fibra ottica, la fibra "wavelength shifter".

Tale fibra deve il suo nome al cambio di lunghezza d'onda alla quale è sottoposta la luce quando è trasportata al suo interno; ne esistono di due tipi, con spostamento verso frequenze maggiori o frequenze minori, e la scelta è dettata dalle caratteristiche del rivelatore alla quale deve essere associata.

Come ogni fibra ottica per trasportare i fotoni al suo interno utilizza il principio della riflessione interna totale tra il nucleo centrale detto "core" ed uno stato esterno detto "cladding" con indici di rifrazione diversi, come mostrato in figura 1.2, aggiungendovi però uno sfasamento nella lunghezza d'onda.

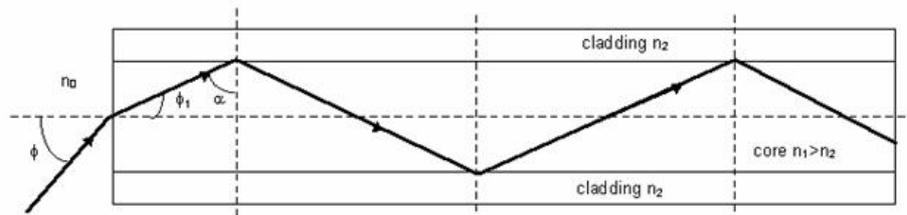


Figura 1.2: Rappresentazione schematica della riflessione interna totale

Tali fibre sono caratterizzate dall'aggiunta di piccole quantità di elementi droganti che permettono l'assorbimento di fotoni di una certa lunghezza d'onda e la riemissione degli stessi ad una lunghezza d'onda maggiore o minore, in figura 1.3 viene riportato uno spettro ottico di esempio.

La concentrazione di questi droganti all'interno della fibra può variare da qualche decina a qualche centinaia di parti per milione^[3].

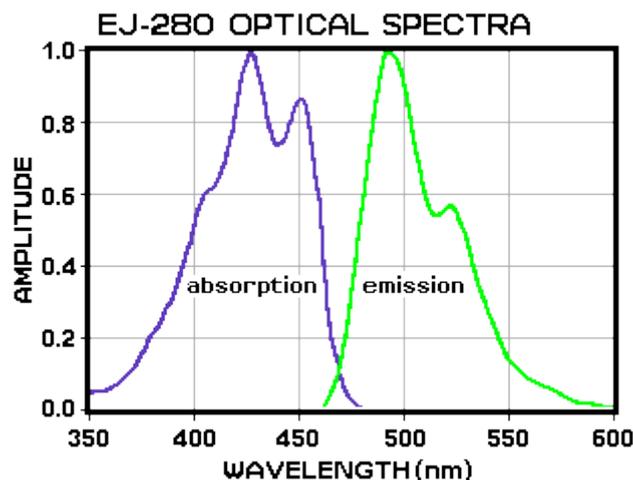


Figura 1.3: Spettro di assorbimento e di emissione di una fibra wavelength shifter.

1.3 Fotomoltiplicatore classico

La rivelazione di radiazioni luminose è possibile tramite diversi sensori il cui funzionamento deriva sempre dall'effetto fotoelettrico e questi prendono il nome di fotorivelatori.

Un fotomoltiplicatore classico (Photomultiplier, PM) è una struttura elettronica, costituita da un catodo fotosensibile, da una serie di elettrodi, i dinodi, mantenuti a potenziale crescente positivo, e da una griglia che funge da collettore elettronico, l'anodo (Figura 1.4).

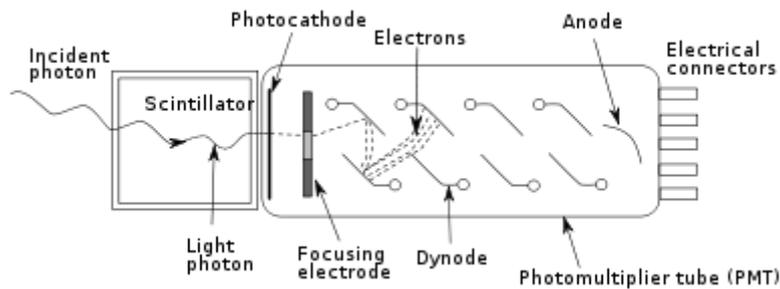


Figura 1.4: Schema di un fotomoltiplicatore.

Tutta la struttura è racchiusa in un tubo a vuoto così da massimizzare il percorso libero medio degli elettroni. I fotoni incidenti sul PM, la cui energia è superiore alla funzione di lavoro del fotocathode, danno luogo, per effetto fotoelettrico, all'emissione di elettroni liberi che sono poi accelerati da un dinodo all'altro.

L'energia cinetica impartita dal forte campo elettrico alla nube elettronica produce, per emissione secondaria della superficie dei dinodi, un arricchimento numerico della nube stessa ad ogni successivo impatto sui dinodi.

Il risultato di questo effetto a valanga è che ogni fotone può arrivare a produrre anche 10^8 elettroni successivamente raccolti dall'anodo.

Ogni dinodo mediamente moltiplica il numero di elettroni per il guadagno g .

Se gli stadi moltiplicativi hanno tutti lo stesso guadagno, il guadagno totale per n stadi risulta essere $G=g^n$

I principali svantaggi dei fotomoltiplicatori sono rappresentati dalle dimensioni ingombranti, dalla loro fragilità, dal rumore, dall'elevata tensione di alimentazione e dal fatto che non possono lavorare all'interno di campi magnetici.

1.4 Fotomoltiplicatori moderni

I SiPM (Silicon Photomultipliers) sono dispositivi di conteggio di fotoni costituiti da una matrice di SPAD (Single Photon Avalanche Photodiode) connessi in parallelo su un substrato comune utilizzati in modalità Geiger^[4].

Ciascuna cella ha il compito di analizzare uno o più fotoni (dipende dalle dimensioni del pixel) e per fare questo, si utilizzano i fotodiodi a valanga che utilizzano le proprietà dei semiconduttori e, applicandovi una differenza di potenziale, aumentano il numero dei portatori di carica raccolti con un guadagno $G=10^6$.

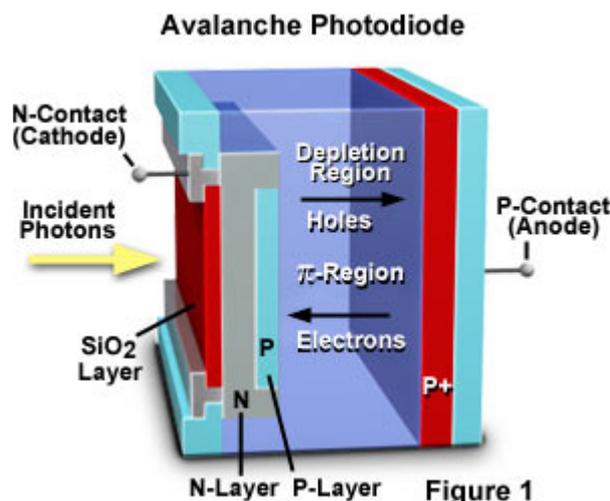


Figura 1.5: Rappresentazione schematica di una singola cella di un SiPM, un fotodiode a valanga (APD).

La struttura tipica di un fotodiode a valanga come mostrato in figura 1.5 è la sovrapposizione di 4 strati di materiale semiconduttore disposti alternatamente^[5]:

- La zona p+, cioè molto drogata con Na accettori.
- La zona chiamata “depletion region”, che serve a mantenere quasi costante il campo elettrico, aumentare l'efficienza quantica e diminuire la capacità di giunzione.
- La zona p, drogata con Na accettori ma con un drogaggio inferiore al primo strato, è determinante nel funzionamento di tale dispositivo perchè permette l'effetto moltiplicativo ovvero un effetto a valanga sulle cariche primarie prodotte nella zona intrinseca che genera un aumento delle cariche secondarie.
- La zona n+ caratterizzata dalla presenza di un elevato numero di atomi Nd donatori.

Se l'energia di un fotone incidente è maggiore del “gap” di energia tra la banda di valenza e banda di conduzione del materiale, avviene la creazione di una coppia elettrone-lacuna nella depletion region e, a causa del campo elettrico presente, l'elettrone si sposterà verso la regione n e la lacuna verso la zona p dove avverrà l'effetto moltiplicativo.

In pratica, le cariche primarie prodotte nella zona intrinseca per effetto fotoelettrico, creano un effetto valanga che genera un numero elevato di cariche secondarie. Queste cariche saranno quelle che generano la corrente prodotta dal fotodiode.

Un fattore importante per i fotodiodi a valanga è il fattore moltiplicativo M il quale rappresenta il guadagno del fotodiode ed è determinato dal rapporto tra il numero di coppie e-h (elettrone-lacuna) secondarie generate e il numero di e-h primarie ottenute per fotoconduttività.

Il singolo fotodiode a valanga è unicamente in grado di segnalare la presenza di fotoni, ma da esso non si riesce a dedurre in nessun modo la quantità.

Lo SPAD è un fotodiode APD polarizzato con una tensione inversa superiore alla tensione di breakdown, tale operazione prende il nome di modalità Geiger. In questo modo nella zona svuotata si ha un forte campo elettrico tale da trasferire al singolo portatore un grandissimo valore d'energia cinetica e rendere sufficiente solo una singola coppia elettrone-lacuna (generata per assorbimento di un fotone) ad innescare il processo di ionizzazione per impatto e la moltiplicazione a valanga dei portatori. L'elevata energia fornita dalla polarizzazione fa sì che il guadagno sia elevato nell'ordine di circa 10^6 contro i 10^2 degli APD in zona lineare.

Un SiPM è una matrice di tali elementi, quindi, considerando che in media una cella verrà colpita da un singolo fotone, è possibile ricavare il numero di fotoni incidenti dal numero di celle attivate.

Insieme alle dimensioni ridotte gli altri fattori che hanno contribuito alla sostituzione dei fotomoltiplicatori classici sono l'indipendenza dei segnali dal campo magnetico e l'elevato guadagno, infatti rispetto agli APD di cui è composto ha un'amplificazione di 3 ordini di grandezza maggiore con un guadagno $G=10^6$.

La ditta Hamamatsu ha creato dei dispositivi fotorivelatori al Silicio che prendono il nome di MPPC (Multi Pixel Photon Counter) costituiti anch'essi da una matrice di APD in modalità Geiger.

Essi possiedono vantaggi come il funzionamento a bassa tensione (meno di 100V), l'insensibilità ai campi magnetici ed un guadagno $G=10^5-10^6$.

Capitolo 2

Setup Sperimentale

2.1 Configurazione per l'acquisizione dei dati

Lo scopo della nostra esperienza è lo studio della risoluzione temporale di un rivelatore SiPM-scintillatore in due diversi tipi di accoppiamento: direttamente a contatto e tramite una fibra “wavelength shifter”.

Questa analisi è stata effettuata studiando i segnali prodotti in un telescopio per raggi cosmici e letti tramite un oscilloscopio Tektronix CSA7404.

Il telescopio è composto da 3 elementi distinti sovrapposti, ciascuno contenente un SiPM e uno scintillatore, come schematizzato in figura 2.1.

Tutta la struttura è stata inizialmente inserita in una scatola in plexiglass nero per eliminare la luce ambientale.

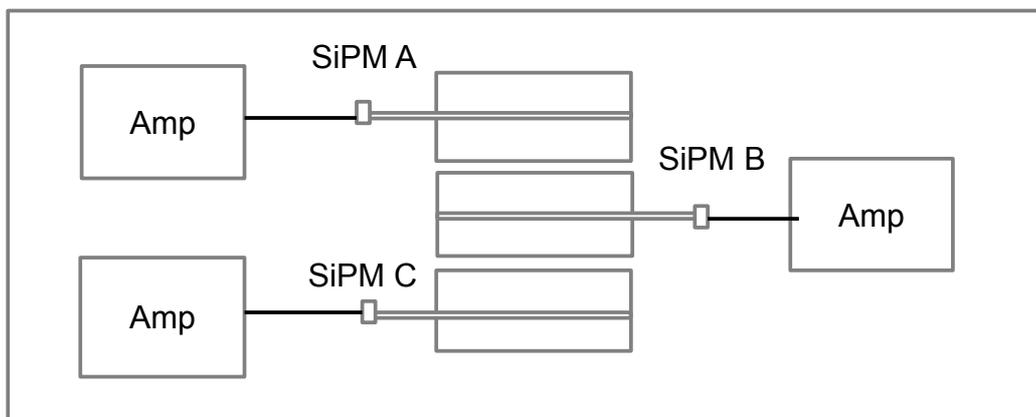


Figura 2.1: Rappresentazione schematica della disposizione dei SiPM all'interno del telescopio.

I fotomoltiplicatori utilizzati sono 3 SiPM Hamamatsu MPPC S10931–100P , come quello mostrato in Figura 2.2, e le caratteristiche di tali dispositivi sono riportate in tabella 2.1^[6]:

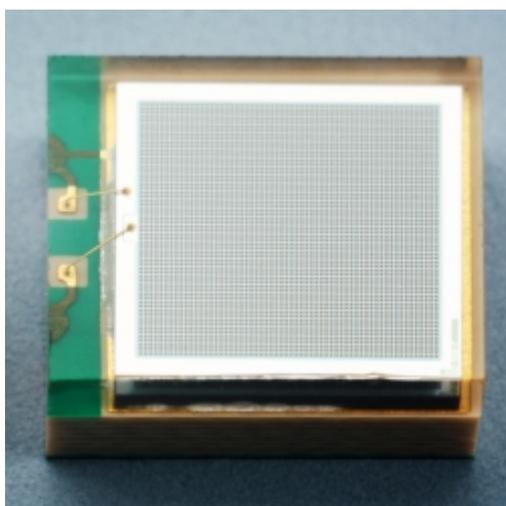


Figura 2.2: SiPM Hamamatsu MPPC S10931–100P

Parametri	Valori
Area effettiva fotosensibile	3x3 mm
Dimensione pixel	100x100 μm
Numero di pixel	900
Dark count	8000 kcps(conteggi /mm ² *s)
Guadagno	$2.4 \cdot 10^6$
Risoluzione temporale (FWHM) per un singolo fotone	Da 500 a 600 ps
Fill factor (area attiva di 1 pixel/area totale di 1 pixel)	78,5%
Tensione di lavoro	70 ± 10 V

Tabella 2.1: Parametri dei SiPM utilizzati.

Gli scintillatori plastici utilizzati nel nostro telescopio sono di due differenti dimensioni a seconda del tipo di connessione con i SiPM.

Gli scintillatori utilizzati nell'analisi con la “wavelength shifter” sono composti da due parallelepipedi di spessore 1 cm e dimensioni 2x3 cm appoggiati uno sull'altro con un foro di diametro 2mm fra i due. Per lo studio a contatto sono stati utilizzati dei blocchi unici dello stesso materiale ma di dimensione 1x3 cm e spessi 1 cm.

Per evitare che i fotoni prodotti dal passaggio di una particella si disperdano all'esterno sono stati ricoperti da una pellicola riflettente di Mylar in modo tale che essi rimbalzino al loro interno.

Nelle figure 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 sono raffigurate in dettaglio le due configurazioni utilizzate per connettere il SiPM e il materiale scintillatore.

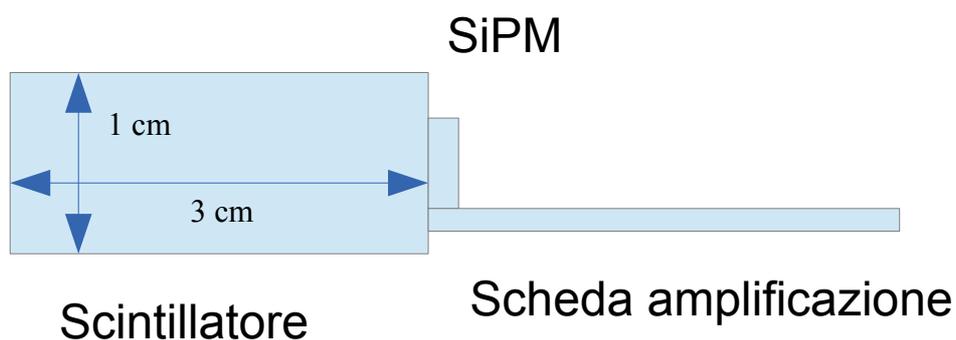


Figura 2.3: Rappresentazione schematica di un SiPM a contatto diretto con lo scintillatore.

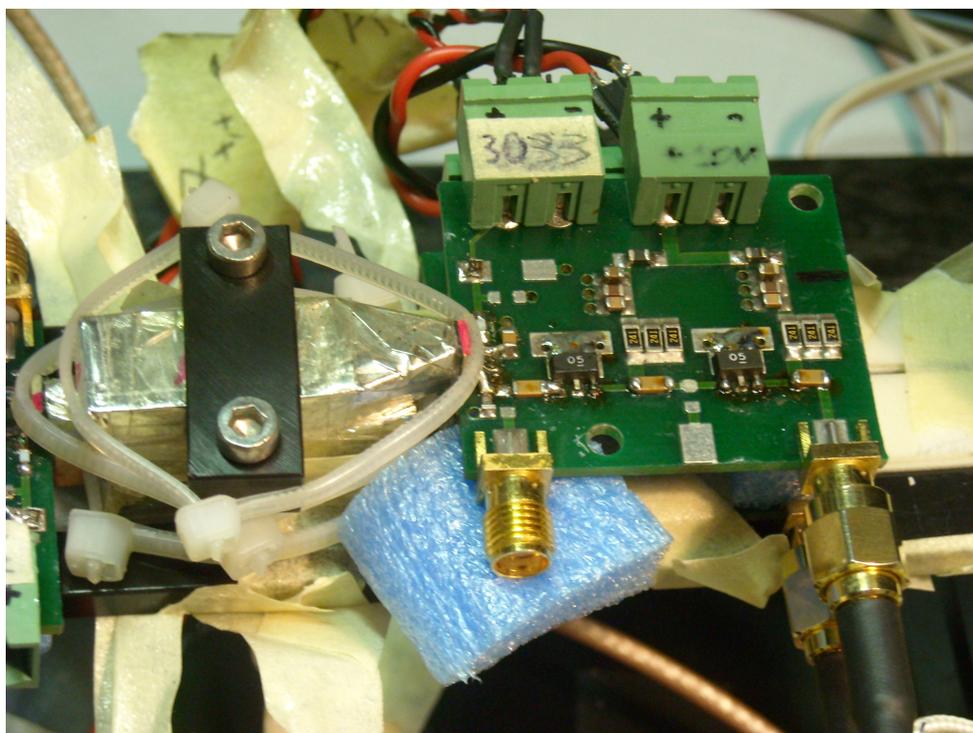


Figura 2.4: Scintillatore 1cmx1cmx3cm a contatto con un SiPM Hamamatsu S10931 – 100P installato su una scheda di amplificazione.

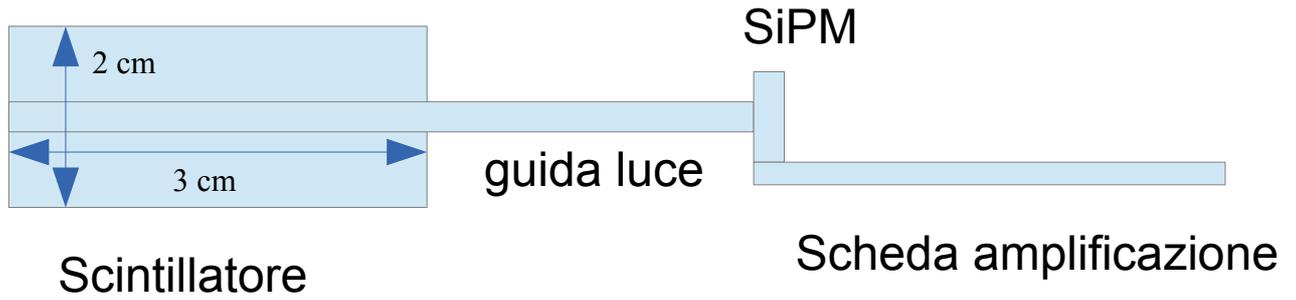


Figura 2.5: Rappresentazione schematica di un SiPM abbinato a uno scintillatore tramite una guida luce

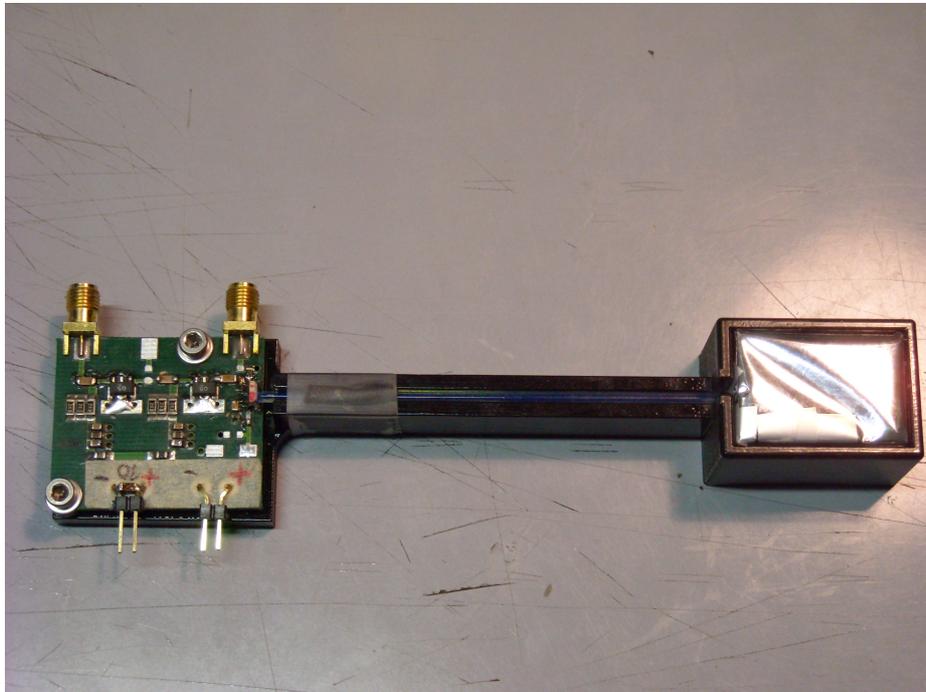


Figura 2.6: Scintillatore 2cmx2cmx3cm connesso tramite una fibra “wavelength shifter” a un SiPM Hamamatsu S10931 – 100P installato su una scheda di amplificazione.

La configurazione con una “wavelength shifter” è stata introdotta perchè i SiPM dei quali si sta studiando la risoluzione temporale potrebbero essere usati in rivelatori di particelle dove le radiazioni sono superiori a quelle ottimali per questo tipo di dispositivo e quindi è stata introdotta una guida luce che potesse allontanare la componente elettronica dal fascio di particelle.

Per portare i fotoni prodotti dallo scintillatore al fotomoltiplicatore è stata inserita nel materiale scintillante una fibra “wavelength shifter” di lunghezza 11,6 cm e diametro 2mm.

Come per i fotoni all'interno dello scintillatore abbiamo cercato di evitare la dispersione dei fotoni diretti verso il capo della fibra senza SiPM e lo si è fatto appoggiandogli del materiale riflettente.

Il SiPM genera un segnale elettrico il cui ordine di grandezza è molto minore dei millivolt e quindi per essere analizzato nel dettaglio necessita un'amplificazione.

A tal scopo è stata usata una scheda a componenti discreti riportata in figura 2.7.

La scheda svolge principalmente due ruoli; inizialmente esclude le frequenze prodotte dal rumore elettromagnetico e successivamente amplifica il segnale tramite due amplificatori Gali 5 collegati in serie.

I Gali5 sono amplificatori a banda larga che offrono elevate prestazioni e mantengono inalterata la forma del segnale in ingresso^[7].

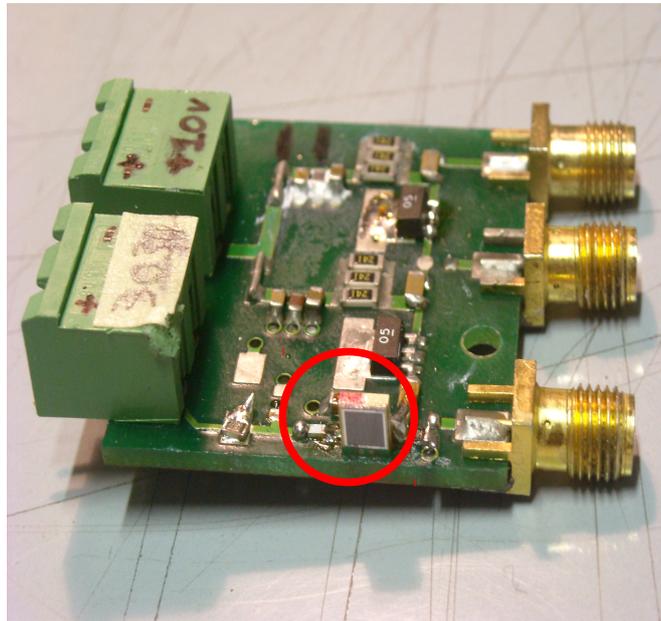


Figura 2.7: Scheda di amplificazione con SiPM (in primo piano).

I componenti della scheda, a causa delle elevate prestazioni, dissipano energia innalzando la temperatura della scheda sulla quale è montato il SiPM. In aggiunta l'aver inserito il telescopio in una scatola sigillata aumenta ulteriormente la temperatura di operazione del SiPM.

Nei “datasheet” dei SiPM utilizzati^[8] si nota che c'è una proporzionalità inversa tra la loro temperatura di lavoro e il guadagno ($G \propto a-bT$), come mostrato in figura 2.8, quindi uno dei principali obiettivi futuri sarà proprio quello di mantenere la temperatura all'interno di un ristretto intervallo.

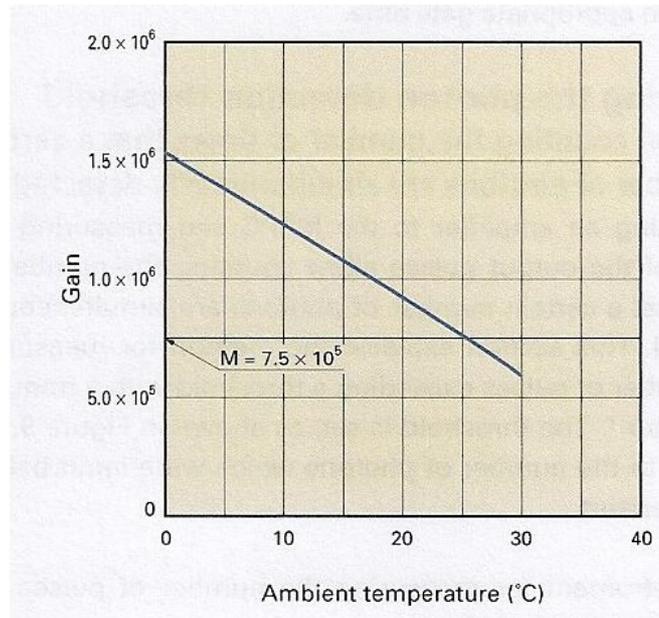


Figura 2.8: Dipendenza del guadagno rispetto alla temperatura di un SiPM a tensione fissata (V_{bias}).

Nella scatola, per ridurre gli effetti “camino”, è stato introdotto un angolo di sfasamento rispetto l'asse orizzontale per evitare che la scheda superiore riceva il calore disperso da quella inferiore.

I segnali prodotti dai fotomoltiplicatori sono composti sia dal rumore di fondo che dal segnale prodotto dall'arrivo di fotoni sulla superficie e proprio questi ultimi sono i segnali che andremo ad analizzare nella nostra analisi.

Per separarli si usa un comparatore che produce un segnale PECL che assume il livello alto quando il segnale amplificato dei SiPM supera una data soglia (Figura 2.9 e 2.10).

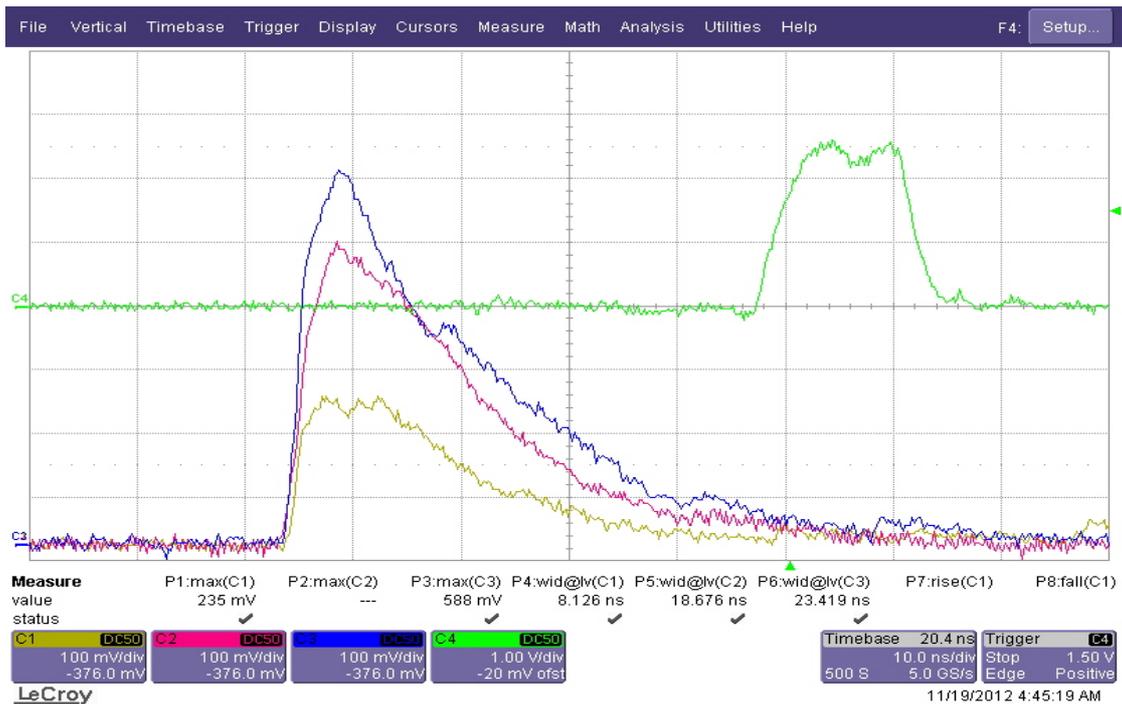


Figura 2.9: Segnali analogici prodotti dalla scheda di amplificazione. Il segnale Blu, Rosso e Giallo rappresentano i segnali amplificati dei tre SiPM e il segnale verde è il “trigger” prodotto dalla scheda di acquisizione.

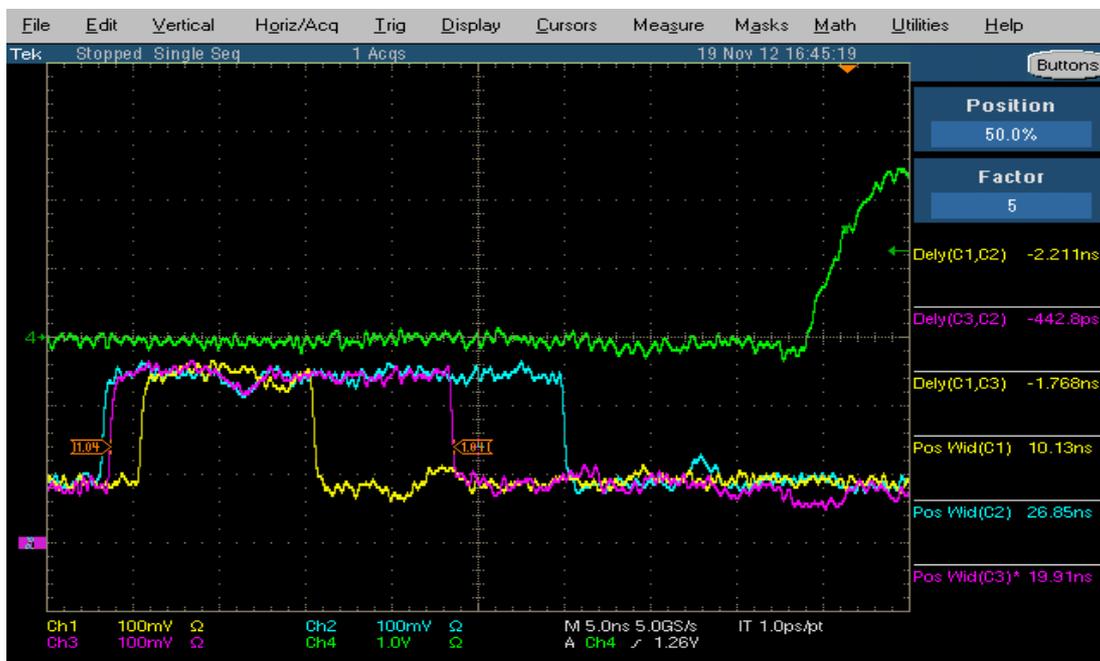


Figura 2.10: Segnali digitali prodotti dalla scheda di comparazione. Il segnale Blu, Rosso e Giallo rappresentano i segnali prodotti dal comparatore e il segnale verde è il “trigger” prodotto dalla scheda di acquisizione.

Come tensione di soglia dei comparatori è stata scelta una tensione superiore al rumore ma non troppo per evitare che venissero persi i segnali poco intensi. La larghezza dei segnali digitali, espressa in unità di tempo, è correlata al tempo in cui il segnale è oltre una data soglia e quindi alla sua ampiezza. Tale valore prende il nome di "Time-Over-Threshold" (TOT). I due scintillatori esterni sono stati usati in coincidenza per definire il passaggio di una particella e far partire l'acquisizione dei dati sull'oscilloscopio Tektronix CSA7404, tale operazione prende il nome di "trigger" (vedi figura 2.11).

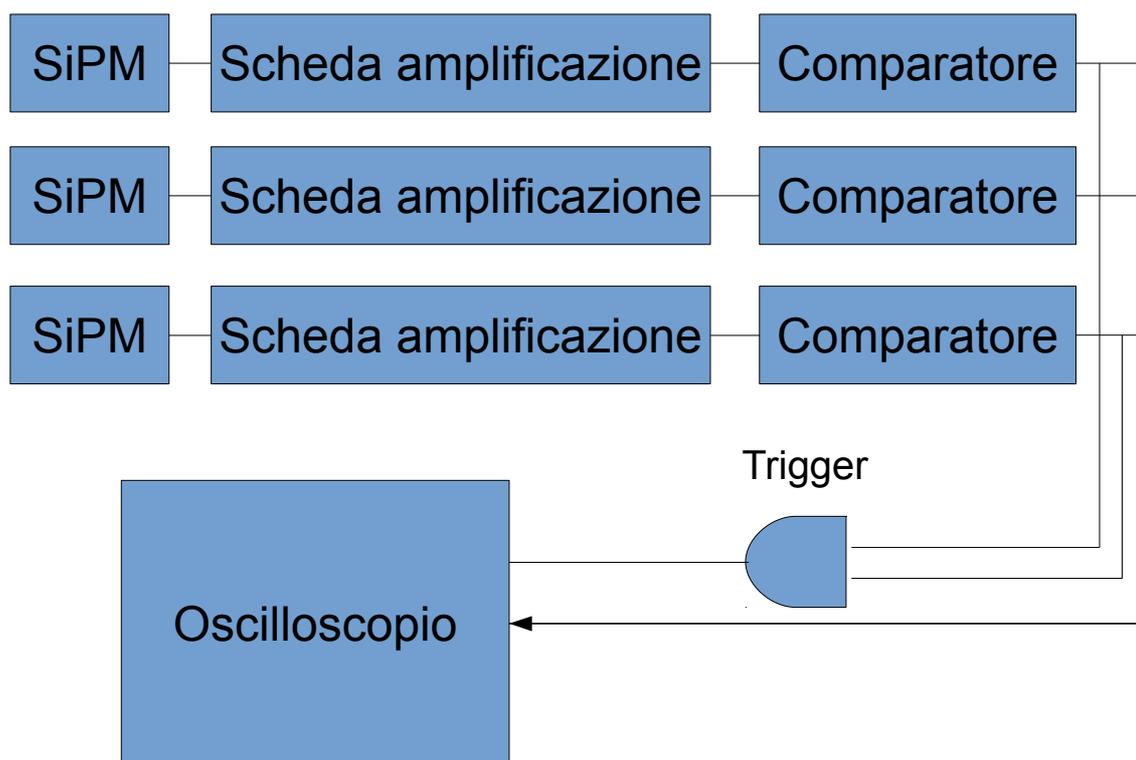


Figura 2.11: Rappresentazione schematica dell'elettronica utilizzata per l'acquisizione dei dati.

Capitolo 3

Caratterizzazione dei SiPM

3.1 Conteggio di singole ed efficienza

I tre SiPM del nostro telescopio del quale abbiamo svolto la caratterizzazione sono:

SiPM A: Hamamatsu S10931-100P numero di serie 3033

SiPM B: Hamamatsu S10931-100P numero di serie 3034

SiPM C: Hamamatsu S10931-100P numero di serie 3035

Le loro tensioni nominali indicate dal costruttore variano leggermente e rispettivamente sono 72.15V, 72.17V, 72.19V.

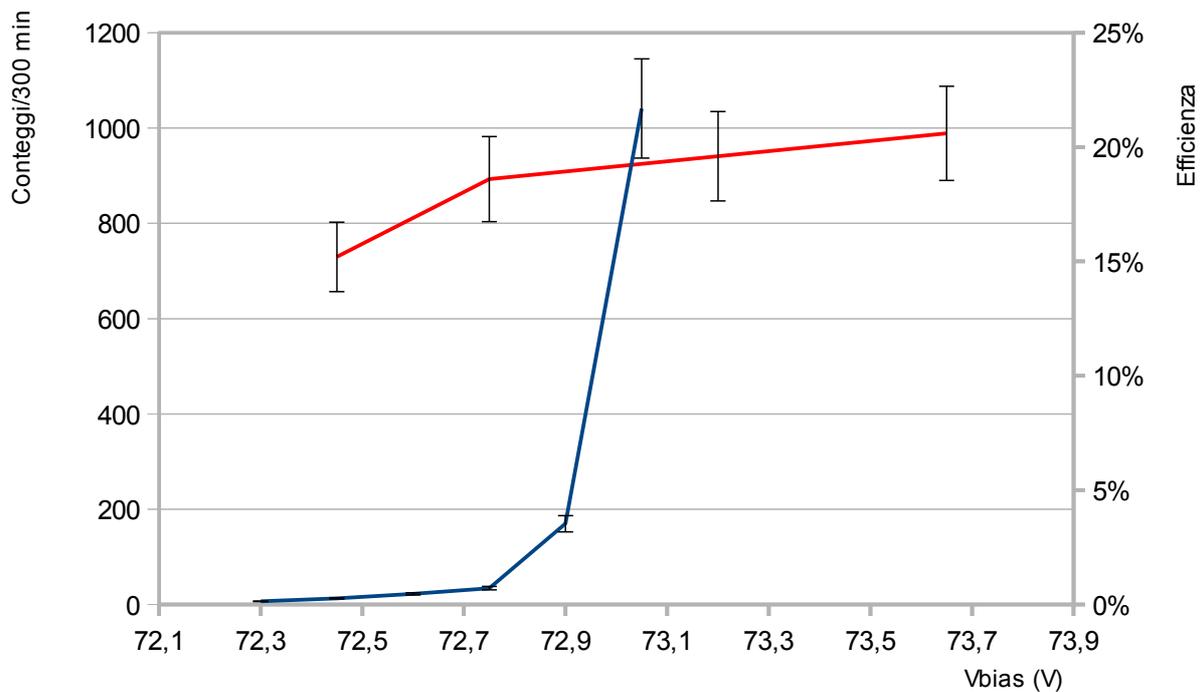


Figura 3.1: Conteggio delle singole su 300 minuti in blue e “rate” relativo delle coincidenze con un altro SiPM a tensione nominale in rosso entrambe per il SiPM A.

Per ogni SiPM è stato misurato con la configurazione a contatto il numero di conteggi in singola e nello stesso intervallo di tempo l'efficienza, ossia il numero di coincidenze con un secondo SiPM a tensione nominale.

La prima analisi serve a indicare la regione nella quale il rumore rimane accettabile mentre la seconda a verificare il valore ottimale di operazione. Un esempio è riportato in figura 3.1 . La soglia applicata è di 200 mV.

Tali misure sono state effettuate in un intervallo di tempo tale da avere l'errore sulla misura intorno al 10% tenendo conto che l'incertezza equivale alla radice quadrata del numero di eventi.

Il punto di lavoro scelto per i nostri SiPM è riportato in tabella 3.1. Per ciascuno di loro si è scelto un punto appena dopo il “ginocchio” per garantire il massimo di efficienza pur mantenendo il rumore sotto controllo.

Fotomoltiplicatore	Tensione nominale	Tensione di alimentazione
SiPM A	72,15 V	72,8 V
SiPM B	72,17 V	72,6 V
SiPM C	72,19 V	73,0 V

Tabella 3.1: Tensioni nominali e di alimentazione dei tre SiPM ricavate dal processo di caratterizzazione

Capitolo 4

Analisi

4.1 Analisi preliminare

Dopo aver fissato le tensioni di alimentazione abbiamo studiato la risoluzione temporale dei singoli SiPM.

Sia con la configurazione a contatto sia con la fibra abbiamo applicato il medesimo metodo di acquisizione e analisi dei dati.

I segnali che consideriamo prodotti esclusivamente dal passaggio di una particella sono quelli che corrispondono a una coincidenza tripla, ovvero quando tutti i SiPM hanno prodotto un segnale digitale.

Nel caso questo non succeda l'evento sarà scartato dall'analisi perchè ci troviamo di fronte a una coincidenza doppia. Essa può essere stata prodotta da diversi fattori quali: la produzione contemporanea di rumore da parte dei due SiPM esterni, l'inefficienza del SiPM centrale o un disallineamento geometrico tra gli scintillatori.

I *ritardi* sono definiti dalle differenze tra gli istanti di salita dei fronti di coppie di segnali, per esempio “delayCA” (Δ_{CA}) corrisponde alla differenza dei segnali prodotti da A e C.

Le distribuzioni dei ritardi sono state “fittate” con Gaussiane le cui larghezze sono collegate alle incertezze temporali delle singole variabili.

Nel nostro esempio:

$$\sigma_{AC}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_C^2$$

Se assumiamo $\sigma_A \approx \sigma_C$ possiamo ricavare l'incertezza iniziale di ciascun SiPM tramite:

$$\sigma_A = \sigma_C = \sigma_{AC}/\sqrt{2}$$

4.1.1 Configurazione con fibra

Nella configurazione con la fibra abbiamo analizzato 1080 eventi di “trigger” di cui 1006 con coincidenza triple quindi con un'efficienza del SiPM centrale del $93,1 \pm 0,8\%$.

Analizzando le differenze temporali tra i segnali digitali ricaviamo le distribuzioni mostrate in figura 4.2:

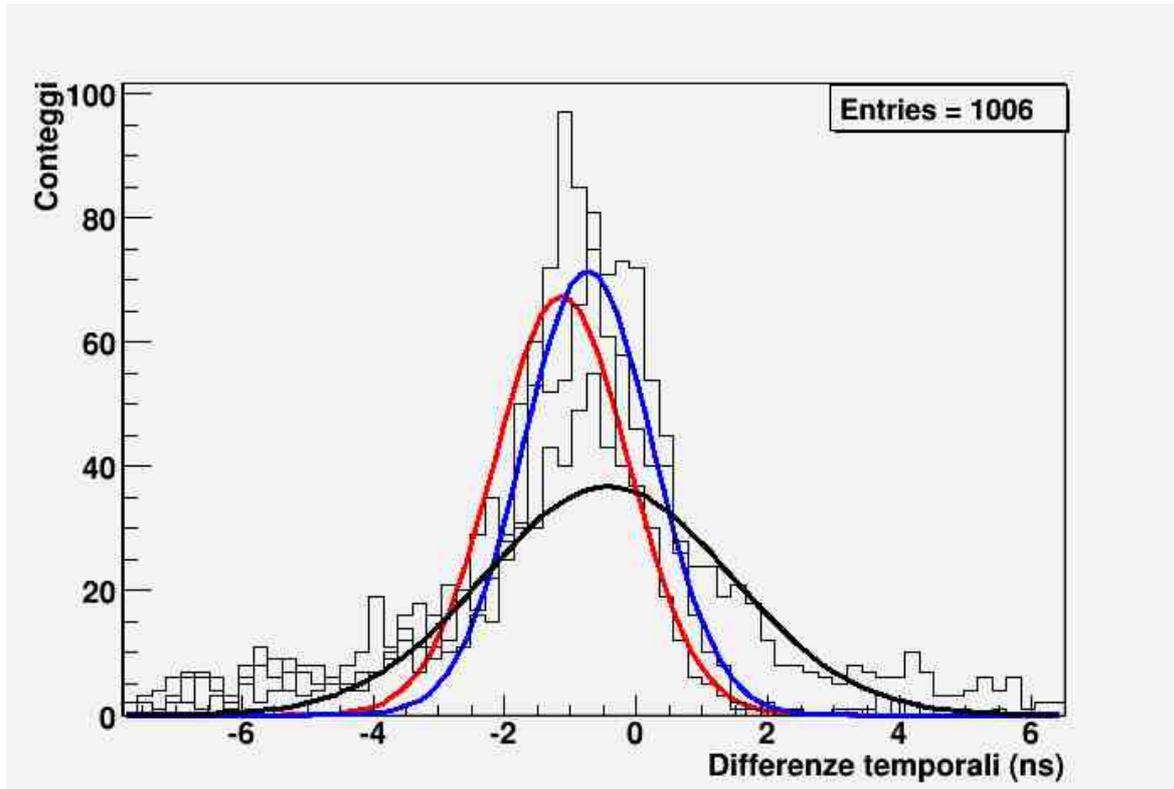


Figura 4.2: Distribuzione delle differenze temporali tra i SiPM A, B e C nella configurazione con la fibra prima della correzione per “time slewing”.
In Rosso la differenza AB, in Blu la differenza BC e in Nero la differenza AC.

Facendo un fit con una gaussiana alle distribuzioni si ottengono delle incertezze sulle differenze temporali tra i tempi di salita:

$$\sigma_{AB} = 1,03 \pm 0,05 \text{ ns}$$

$$\sigma_{BC} = 0,97 \pm 0,03 \text{ ns}$$

$$\sigma_{AC} = 1,91 \pm 0,01 \text{ ns}$$

4.1.2 Configurazione a contatto

La configurazione a contatto ha prodotto 812 eventi di “trigger” di cui 751 con coincidenza tripla quindi con un'efficienza del SiPM centrale del $92,5 \pm 0,9\%$.

Analizzando le differenze temporali tra i segnali digitali ricaviamo le distribuzioni mostrate in figura 4.3:

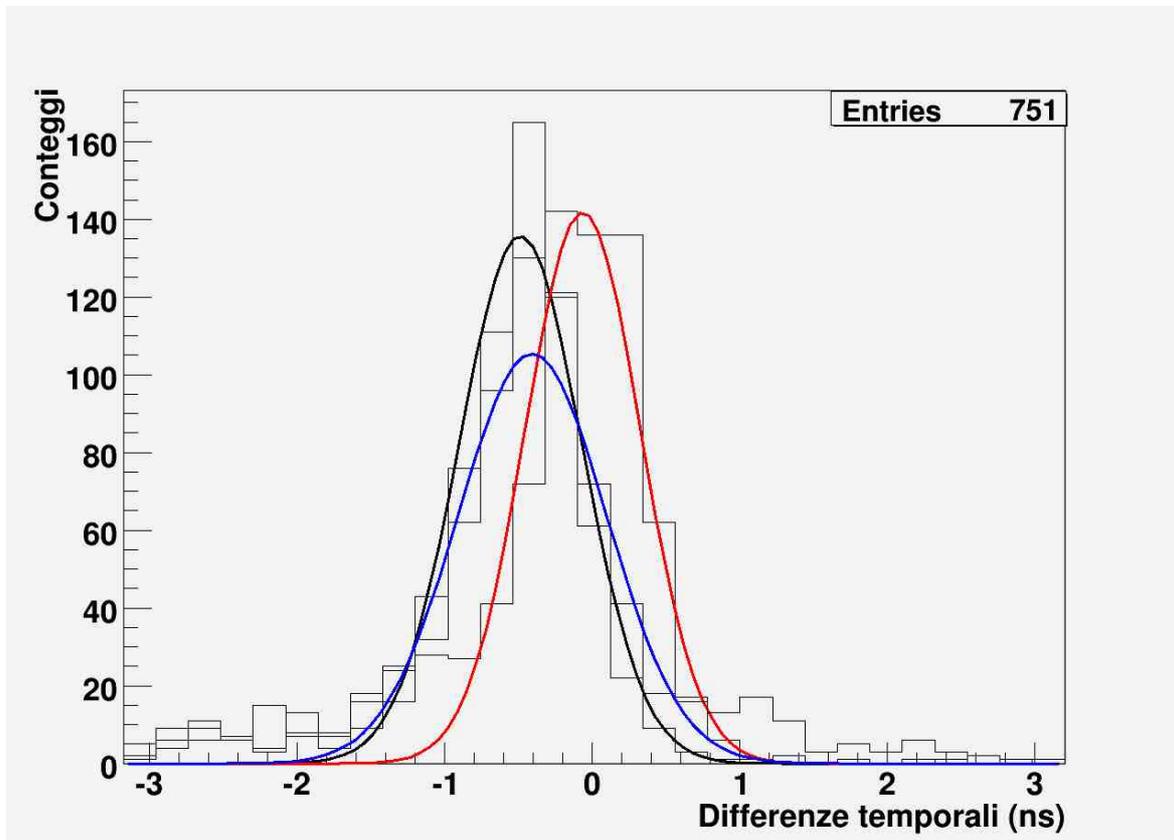


Figura 4.3: Distribuzione delle differenze temporali tra i SiPM A, B e C nella configurazione a contatto prima della correzione per “time slewing”.

In Blu la differenza AC, in Rosso la differenza BC e in Nero la differenza AB.

Facendo un fit con una gaussiana alle distribuzioni si ottengono delle differenze temporali tra i tempi di salita:

$$\sigma_{AB} = 0,39 \pm 0,01 \text{ ns}$$

$$\sigma_{BC} = 0,38 \pm 0,02 \text{ ns}$$

$$\sigma_{AC} = 0,51 \pm 0,02 \text{ ns}$$

4.2 Correzione per Time Slewing

Abbiamo prima selezionato i dati in base alla disposizione dei segnali ossia abbiamo verificato quale fosse il SiPM che ha prodotto il primo fronte e successivamente studiato la relazione tra il tempo di risposta e la lunghezza degli altri due segnali.

Ai valori ottenuti sono applicate alcune correzioni, in particolare il cosiddetto "time slewing" cioè la variazione nella risposta del discriminatore al variare dall'ampiezza del segnale (nel nostro caso della lunghezza temporale del segnale).

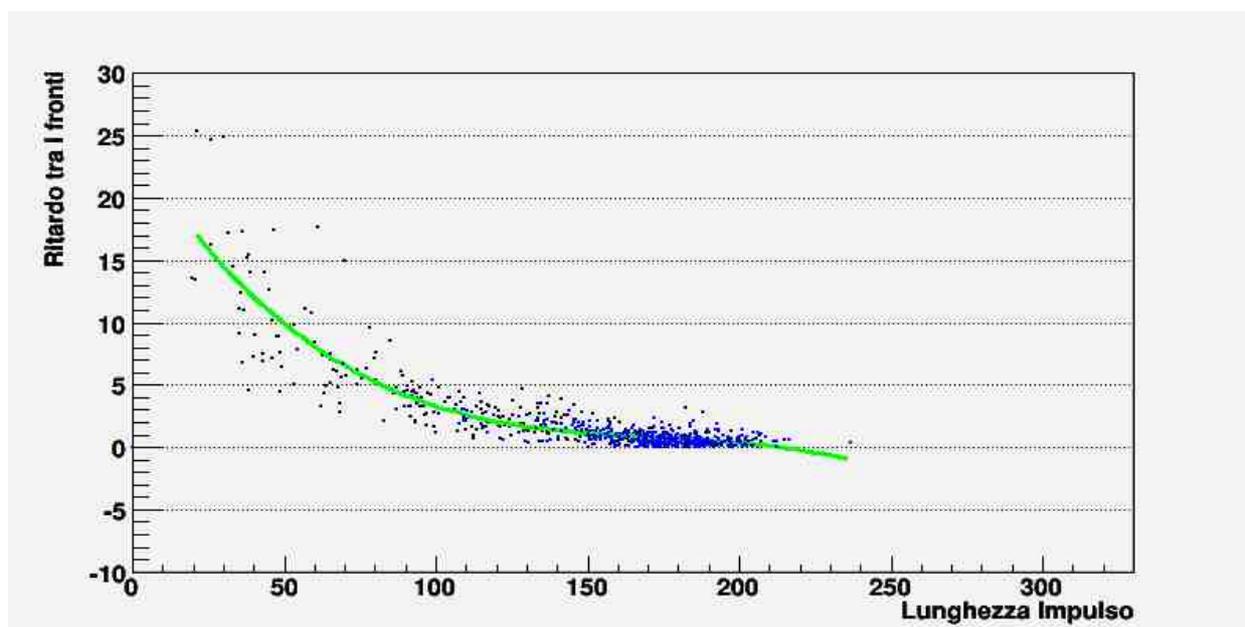


Figura 4.4: Grafico del segnale B rispetto al C (i punti blu appartengono alla disposizione CBA, quelli neri alla disposizione CAB) con valori espressi in ns.

La figura 4.4 riporta un tipico esempio di correlazione "time slewing". Nella figura, ottenuta per eventi con il primo segnale nello scintillatore C, si nota la differenza fra i casi in cui il segnale B arriva prima o dopo A: nel primo caso i segnali sono mediamente più grandi che nel secondo.

Per ogni distribuzione del tipo riportato in figura 4.4 abbiamo fatto un fit con una funzione polinomiale di terzo grado ed i dati sono poi corretti.

Il risultato della correzione è rappresentato dai punti rossi della figura 4.5.

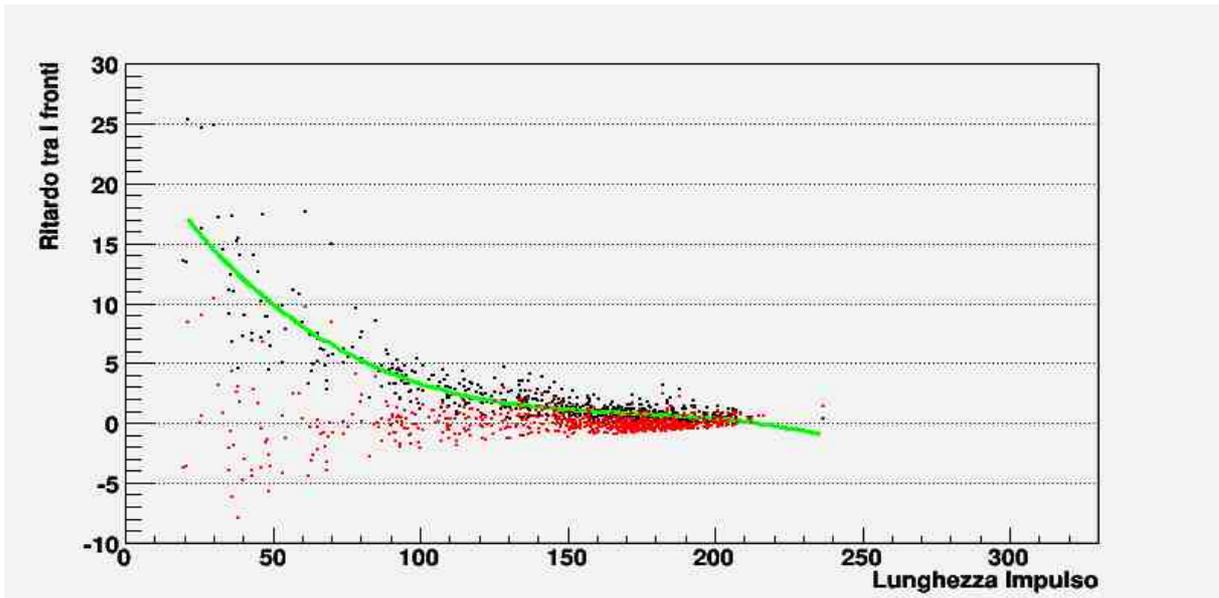


Figura 4.5: I punti rossi rappresentano la correzione per “time slewing” del segnale mostrato in Figura 4.4, valori espressi in ns.

4.2.1 Configurazione con fibra

Applicata la correzione per “time slewing” ed effettuato il fit gaussiano delle distribuzioni otteniamo le risoluzioni riportate nella tabella 4.1.

Quando A è stato il primo fronte	AB 0,35±0,5 ns	AC 0,8±0,2 ns	Media tra AB e AC 0,6±0,3 ns	81 eventi
Quando B è stato il primo fronte	BA 0,69±0,03 ns	BC 0,63±0,02 ns	Media tra BA e BC 0,66±0,02 ns	734 eventi
Quando C è stato il primo fronte	CA 0,9±0,1 ns	CB 0,29±0,03 ns	Media tra CA e CB 0,6±0,05 ns	191 eventi

Tabella 4.1: Risultati dei fit gaussiani alle differenze dei tempi dopo la correzione per "time slewing". Sono riportate tutte le sei differenti combinazioni.

La cui media è: $0,6 \pm 0,1$ ns.

Per ottenere la stima della risoluzione temporale di un singolo SiPM dividiamo tale valore per la radice quadrata di 2 ottenendo così $\sigma_{\text{SiPM}} = 0,4 \pm 0,1$ ns.

Le analisi svolte finora sono state effettuate rispetto ad un segnale il cui fronte è stato considerato come lo “zero” degli eventi e anche tale segnale sarebbe da correggere per “time slewing” ma dalla distribuzione della sua lunghezza si vede che ciò non è necessario.

Infatti da tale analisi risulta che quando un SiPM produce il primo fronte produce mediamente un segnale più lungo rispetto ai due casi nel quale il primo fronte è

stato prodotto da un altro SiPM. Inoltre tale analisi mostra anche che questi due casi producono mediamente due lunghezze sovrapponibili tra loro.

In figura 4.7 sono mostrate le lunghezze del segnale del SiPM A. Nel dettaglio sono mostrati il caso in cui ha prodotto il trigger e quando quest'ultimo è stato prodotto da un altro fotomoltiplicatore.

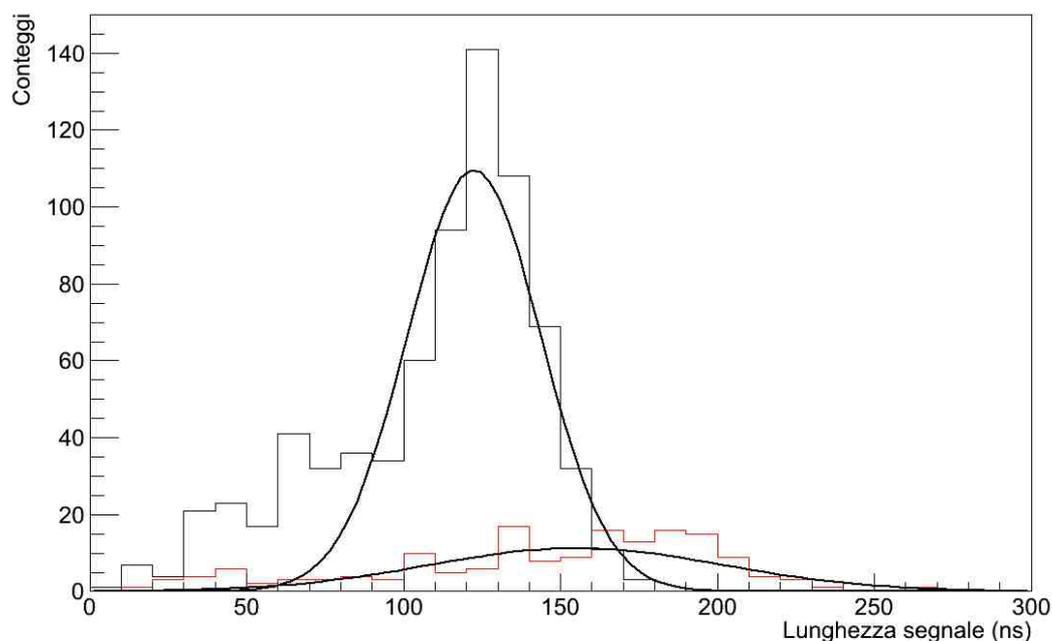


Figura 4.6: In rosso la distribuzione della lunghezza dei segnali del SiPM A quando questo ha prodotto il trigger, in nero le lunghezze del SiPM A quando il trigger è stato prodotto da uno degli altri due SiPM.

4.2.2 Configurazione a contatto

Anche in questo caso la curva di fit che meglio interpola i sei grafici prodotti è una polinomiale di terzo grado. I risultati dei fit gaussiani sono riportati in tabella 4.2.

Quando A è stato il primo fronte	AB $0,20 \pm 0,02$ ns	AC $0,22 \pm 0,03$ ns	Media tra AB e AC $0,21 \pm 0,02$ ns	37 eventi
Quando B è stato il primo fronte	BA $0,27 \pm 0,01$ ns	BC $0,24 \pm 0,02$ ns	Media tra BA e BC $0,25 \pm 0,01$ ns	422 eventi
Quando C è stato il primo fronte	CA $0,26 \pm 0,02$ ns	CB $0,16 \pm 0,01$ ns	Media tra CA e CB $0,21 \pm 0,01$ ns	292 eventi

Tabella 4.2: Risultati della correzione per “time slewing” delle sei differenti combinazioni e relative medie nella configurazione a contatto.

La media di questi tre valori è: $0,22 \pm 0,01$ ns.

Come mostrato precedentemente per ottenere la risoluzione temporale di un singolo SiPM dividiamo tale valore per la radice quadrata di 2 ottenendo così

$$\sigma_{\text{SiPM}} = 0,16 \pm 0,01 \text{ ns.}$$

In figura 4.7 sono mostrate le lunghezze del segnale del SiPM A quando ha prodotto il trigger e quando quest'ultimo è stato prodotto da un altro fotomoltiplicatore.

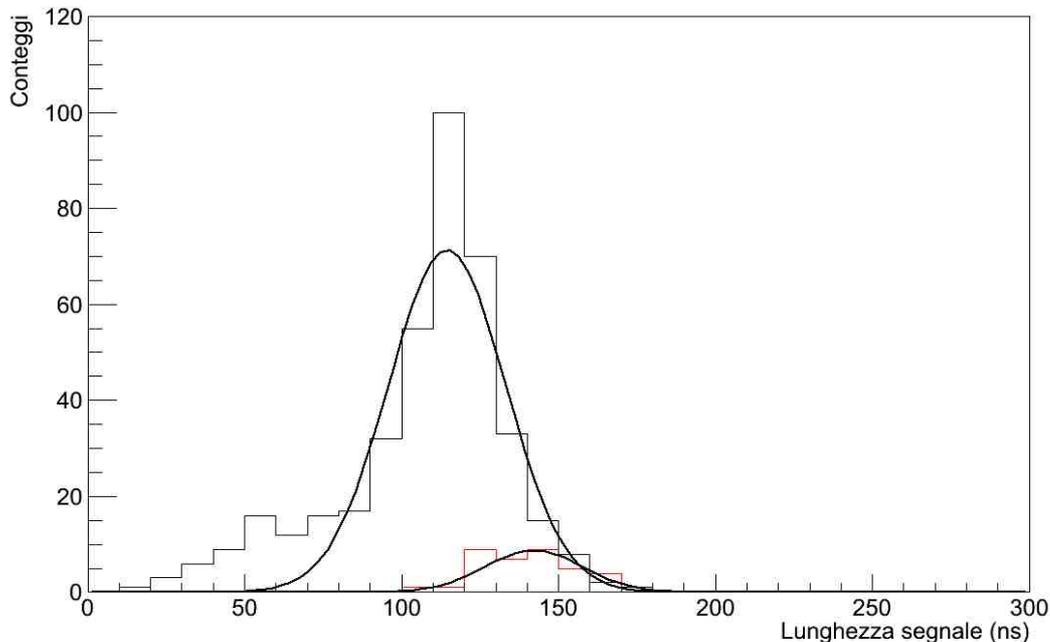


Figura 4.7: In rosso la distribuzione della lunghezza dei segnali del SiPM A quando questo ha prodotto il trigger, in nero le lunghezze del SiPM A quando il trigger è stato prodotto da uno degli altri due SiPM.

Da notare che il volume di materiale scintillante nella configurazione a contatto è un quarto dell'altra ma la lunghezza dei segnali e quindi le relative ampiezze (circa pari al numero dei fotoni) sono simili.

Il motivo di questa equivalenza è sia nella differente superficie attiva del SiPM (si passa dai 9 mm^2 a contatto ai $3,14 \text{ mm}^2$ con la guida luce) sia alla dispersione dei fotoni nella fibra dovuta al maggior percorso che devono compiere.

Capitolo 5

Analisi con fotomoltiplicatori esterni

5.1 Misure prese tramite oscilloscopio

Una volta ottenuti i risultati precedenti è stata ripetuta la misura della risoluzione temporale del SiPM Hamamatsu S10931-100P con un differente “setup” sperimentale e un diverso tipo di analisi dati. Nel telescopio sono stati sostituiti i SiPM A e C con dei fotomoltiplicatori classici Hamamatsu R5900 alimentati a una tensione di 800V.

In questa configurazione i due PM forniscono il tempo di riferimento del passaggio della particella, in conseguenza di ciò si è usata la differenza tra i fronti dei segnali dei due PM esterni per determinare l'incertezza dell'evento. Tale valore, $\Delta_{PM} = 0,173 \pm 0,007$ ns, corrisponde alla sigma della distribuzione temporale mostrata in figura 5.1.

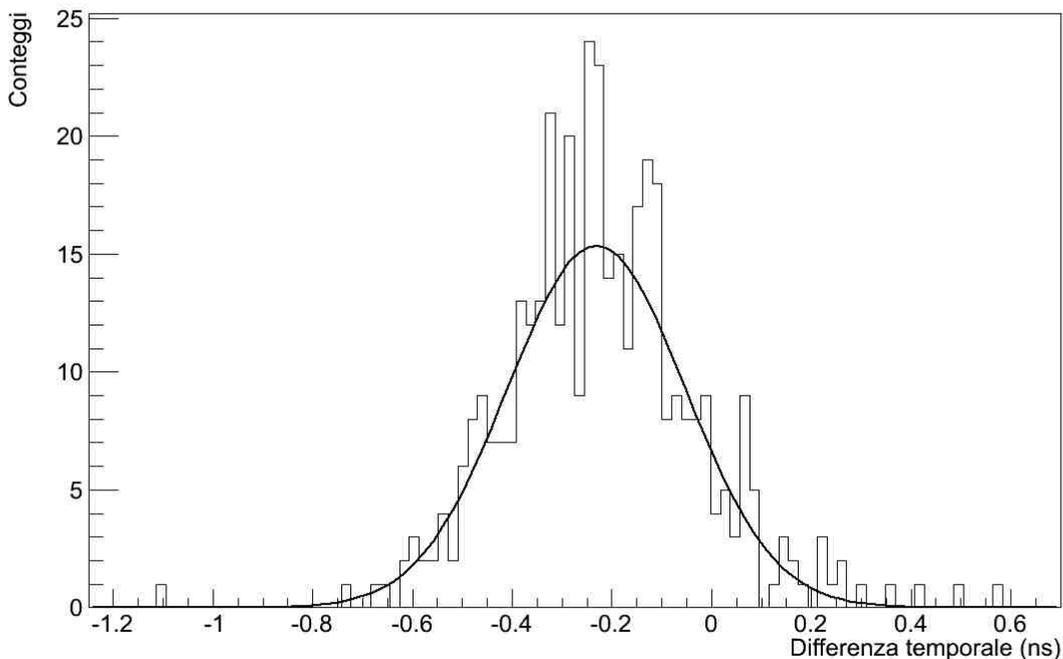


Figura 5.1: Distribuzione gaussiana delle differenze temporali tra i due PM esterni

La risoluzione temporale del SiPM è stata ottenuta, analogamente al metodo precedente, dalla correzione per “time slewing” del grafico raffigurante la dipendenza del ritardo temporale del SiPM in funzione della lunghezza del segnale.

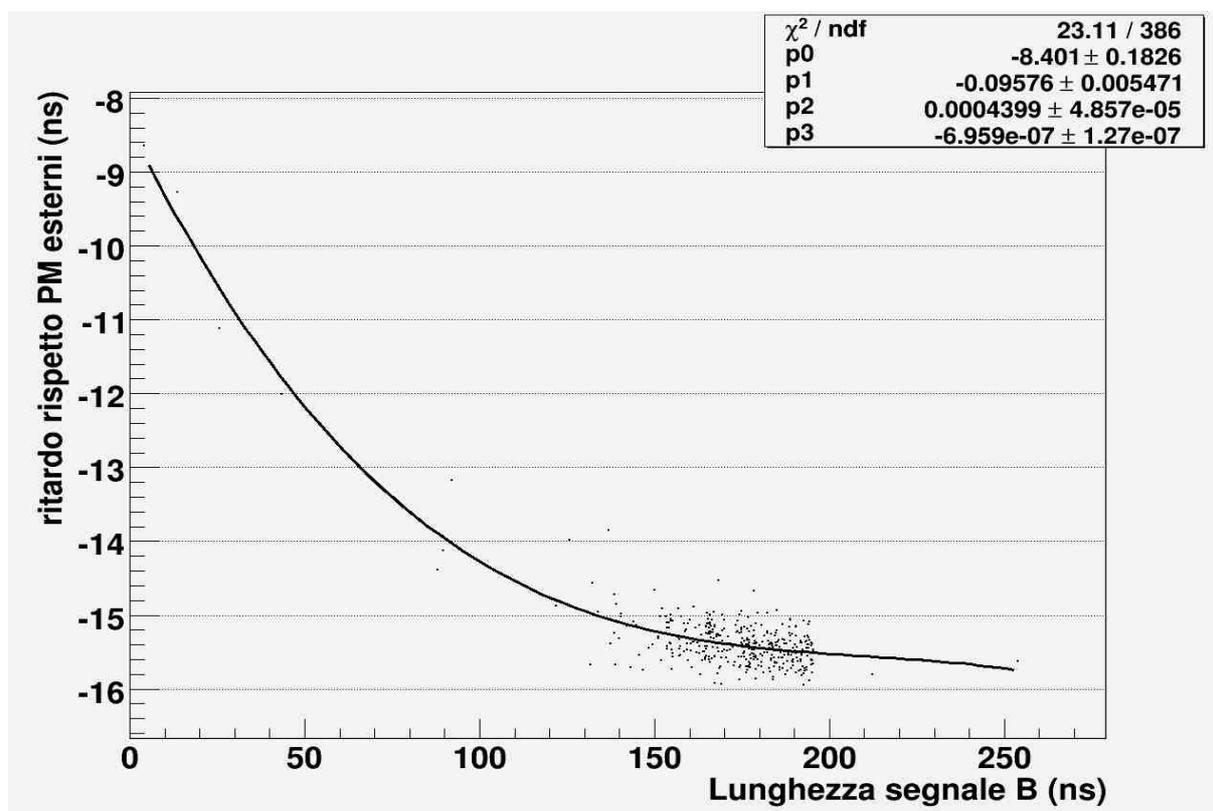


Figura 5.2: Grafico del SiPM B rispetto alla media dei PM esterni.

Dopo la correzione per "time-slewing" riportata in figura 5.2, il fit gaussiano della differenza dei tempi PM-SiPM ha una larghezza pari a $\sigma_{B-PM} = 0,223 \pm 0,009$ ns; esso però non tiene conto dell'incertezza temporale dei due PM esterni. Quindi, dopo aver trovato l'ampiezza della distribuzione delle loro differenze temporali effettuando un fit gaussiano, applichiamo la formula di propagazione degli errori relativa alle somme.

$$\sigma_{B-PM}^2 = \sigma_{PM}^2 + \sigma_B^2$$

Da tale formula ricaviamo la risoluzione del SiPM B corretto rispetto i PM esterni ottenendo $\sigma_B = 0,14 \pm 0,02$ ns totalmente in accordo all'interno di errori sperimentali con quello ottenuto dall'analisi con tre SiPM a contatto.

5.2 Misure prese tramite moduli CAMAC

Lo studio della risoluzione temporale di un SiPM abbinato ad uno scintillatore rispetto a due fotomoltiplicatori è stato ripetuto e modificando l'elettronica e il relativo metodo di acquisizione.

Il nuovo metodo sostituisce l'oscilloscopio e la scheda di comparazione con dei moduli CAMAC (Computer Automated Measurement And Control) utilizzati per l'acquisizione di dati in esperimenti di Fisica Nucleare e delle Particelle. Tali moduli possono essere semplicemente alimentati ed elaborare passivamente un segnale (analogico o digitale) oppure svolgere operazioni più complesse e comunicarne il risultato ad un Controller ad essi collegato.

Le principali modifiche apportate al telescopio sono le seguenti:

- Dimezzamento del fattore di amplificazione.
- Sostituzione della scheda di comparazione con un modulo CAMAC che svolge il suo compito.
- Misura del tempo di arrivo dei segnali tramite modulo TDC (Time to Digital Converter) e dell'integrale di carica dei segnali tramite modulo CIA (Charge Integrator Amplifier) entrambi collegati ad un Controller.
- Suddivisione del segnale da analizzare; il 10% del segnale in ingresso è utilizzato dal CIA per calcolarne l'integrale di carica mentre il restante è analizzato dal TDC per le misure temporali.
- Acquisizione tramite Labview dei dati presenti nel registro del Controller.

Tali modifiche hanno portato allo schema rappresentato in Figura 5.3.

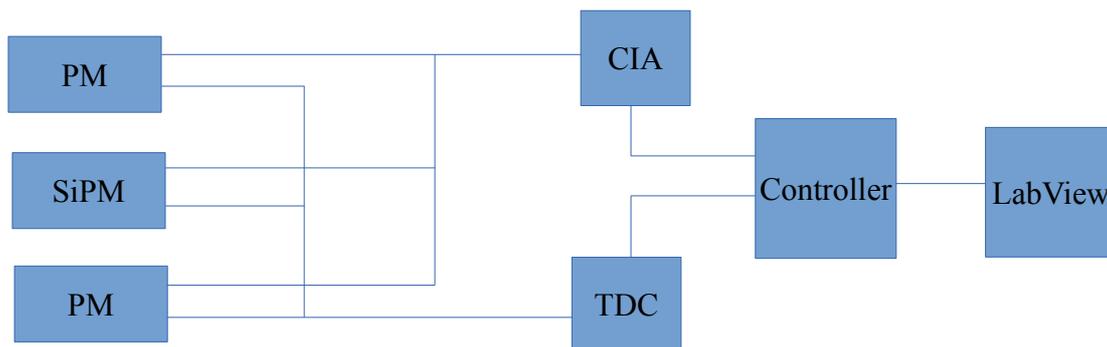


Figura 5.3: Rappresentazione schematica dell'elettronica utilizzata per l'acquisizione dei dati

5.2.1 Acquisizione con fibra a temperatura ambiente

Sostituire il “TOT” con l'integrale di carica permette una misura più precisa del segnale perchè tramite modulo CIA è possibile analizzare totalmente il segnale senza modificarne il fattore di forma eliminando così l'approssimazione dovuta all'introduzione di una soglia rispetto alla quale studiare un segnale.

Con il TDC è possibile analizzare direttamente la distribuzione temporale dell'istante “zero” della nostra acquisizione ossia la sigma della distribuzione del valor medio tra i due fotomoltiplicatori esterni e in queste condizioni è pari a $\sigma_{PM} = 0,016 \pm 0,001$ ns.

Essendo $\sigma_{B-PM} = 0,43 \pm 0,03$ ns il valore restituito dalla correzione per “time slewing” del grafico in figura 5.4, sottraendo il valore dei PM otteniamo con la fibra una risoluzione del SiPM pari a $\sigma_{SiPM} = 0,43 \pm 0,03$ ns.

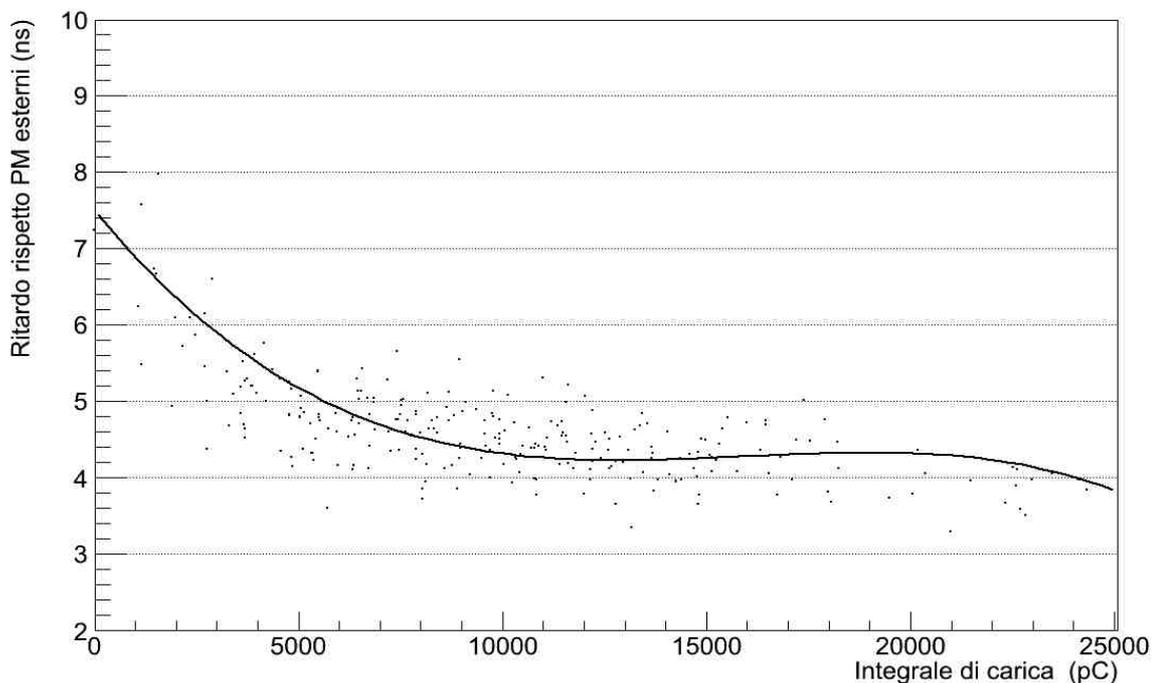


Figura 5.4: Grafico raffigurante la relazione tra il ritardo del SiPM (rispetto lo “zero” dato dai PM) e il relativo integrale di carica.

5.2.2 Acquisizione a contatto con criostato

Per questa acquisizione è stato inserito il telescopio in un criostato che ha stabilizzato la temperatura del telescopio attorno ai 19°. Da tale modifica ci si aspetta un miglioramento della risoluzione temporale del SiPM perchè come mostrato in Figura 2.8 abbassando la temperatura di lavoro aumenta il guadagno.

La correzione per time slewing del grafico rappresentante la relazione tra il ritardo del SiPM e il suo integrale di carica ha dato come risultato $\sigma_{B-PM} = 0,131 \pm 0,008$ ns. Sottraendo a tale valore la sigma della distribuzione temporale della media tra i due PM pari a $\sigma_{PM} = 0,026 \pm 0,002$ ns, come mostrato in figura 5.4, otteniamo una risoluzione temporale di $\sigma_{SiPM} = 0,128 \pm 0,008$ ns, in accordo con i valori ottenuti nell'analisi con l'oscilloscopio.

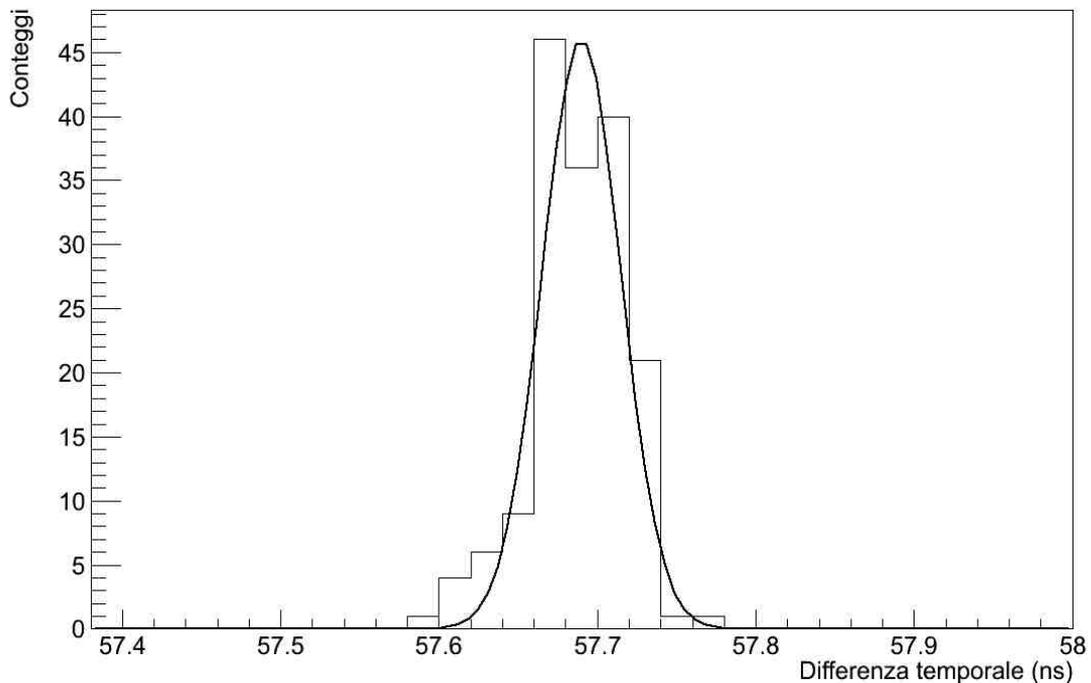


Figura 5.4: Distribuzione gaussiana della media temporale tra i due PM esterni

Conclusione

In questo lavoro e' stata studiata la risoluzione temporale ottenibile con scintillatori accoppiati in diverso modo ad un SiPM: un accoppiamento diretto ed uno tramite fibre WLS.

Le misure sono state fatte usando un telescopio per raggi cosmici con diversi metodi di acquisizione (tramite oscilloscopio o moduli CAMAC) e diverse configurazioni.

Dall'accoppiamento diretto abbiamo ottenuto una risoluzione temporale attorno ai 140 ps mentre con la fibra è intorno ai 400 ps. Di conseguenza l'accoppiamento diretto è migliore di circa un fattore 2.5. Questo è dovuto al fatto che quando tra il fotomoltiplicatore e lo scintillatore è inserita una guida di luce che trasporta i fotoni prodotti, non troviamo solamente un "offset" temporale dovuto al percorso effettuato, ma anche un peggioramento della risoluzione temporale.

La causa di tale fenomeno risiede proprio nei differenti percorsi che devono compiere i fotoni per giungere sulla superficie del SiPM.

Nella configurazione con la guida di luce i fotoni prodotti nello scintillatore prima devono raggiungere la fibra, direttamente o dopo la riflessione sulla superficie di Mylar, e in un secondo momento devono essere trasportati dalla fibra fino alla superficie del fotomoltiplicatore, direttamente o dopo essere stati riflessi dal capo opposto.

Il miglioramento della risoluzione temporale nelle configurazioni a contatto invece è dovuta sia dalle condizioni favorevoli di presa dati, con una temperatura di lavoro che permette un maggior guadagno, sia dal metodo di acquisizione che elimina l'approssimazione introdotta con la misura del TOT.

In futuro saranno studiati differenti tipi di fibre wavelength shifter e di elettronica di amplificazione per migliorare ulteriormente questi risultati.

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va al Professor Maurizio Basile, che mi ha permesso di intraprendere questo lavoro. Successivamente vorrei ringraziare il Dottor Rosario Nania per la pazienza e la disponibilità con il quale mi ha aiutato durante questo periodo. Infine un ringraziamento speciale va a Daniele Cavazza per avermi accompagnato e guidato con grande affetto durante questa esperienza.

Tutto ciò però non sarebbe stato possibile senza l'appoggio e il sostegno della mia famiglia e di tutti quelli che hanno creduto in me.

Bibliografia

- [1] Engstrom, Ralph W., Photomultiplier Handbook, RCA (1980).
- [2] Leo, W. R. (1994). “Techniques for Nuclear and particle Physics Experiments”, 2nd edition, Springer, ISBN 354057280
- [3] W. M. Yao et al. Review of particle physics. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 33:1–1232, July 2006.
- [4] P. Buzhan et al. An advanced study of Silicon Photomultiplier.
- [5] A. Stoykov and R. Scheuermann. Silicon avalanche photodiodes.
- [6] Datasheet Hamamatsu SiPM S10931-100P:
Hamamatsu MPPC (Multi-pixel Photon Counter) S10362-33 series,
Hamamatsu MPPC (Multi-pixel Photon Counter) S10931 series

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s10362-33_series_kapd1023e05.pdf
<http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/M/4113/S10931-100P/index.html>
- [7] Datasheet Gali5, www.mini-circuits.com
- [8] Scheda tecnica MPPC Hamamatsu
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_techinfo_e.pdf