

# Un Telescopio *Low Cost* a Coincidenza con scintillatori Plastici, rilevatori *SiPM* e microcontrollore *PSoC* per la rilevazione dei Raggi Cosmici

Lodovico Lappetito<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Progetto PhysicsOpenLab [1]

## Abstract

This work describes the design and construction of an apparatus for the detection of cosmic rays. The apparatus consists of coincidence detectors, readout electronics and a microcontroller. The innovative aspect of this “classic” experimental apparatus is the use of new technologies that are easily available at low costs, such as the SiPM sensor and the PSoC Cypress microcontroller. This approach makes the construction of the apparatus within the reach of physics laboratories with limited budgets.

## 1. Introduzione

Il metodo più semplice per la rilevazione dei raggi cosmici è quello basato sulle *coincidenze*. Questo metodo consiste nel disporre due o più rilevatori distanziati l'uno dall'altro e nell'analizzare gli impulsi generati dai rilevatori in modo da individuare gli eventi che si verificano nello stesso istante. Questi eventi di coincidenza temporale indicano il passaggio di una stessa particella attraverso i rilevatori che hanno generato gli impulsi. La posizione dei rilevatori, la loro superficie attiva e la loro distanza determinano l'angolo solido sotteso che contiene le direzioni di arrivo dei raggi cosmici che, passando attraverso tutti i rilevatori, possono produrre eventi di coincidenza.

Nel nostro progetto abbiamo utilizzato due rilevatori costituiti da uno scintillatore plastico, particolarmente sensibile alle particelle cariche come i muoni prodotti dai raggi cosmici primari. Lo scintillatore ha la forma di una piccola piastra quadrata con lato di circa 6 cm e spessore di 1 cm. Su di un lato del cristallo plastico viene posizionato il sensore SiPM che ha la funzione di rilevare gli impulsi luminosi prodotti dallo scintillatore. Il SiPM è un *fotomoltiplicatore a stato solido*, il cui utilizzo è in costante crescita in questi ultimi anni. Rispetto al classico fotomoltiplicatore ha alcune caratteristiche che lo rendono particolarmente adatto a questo tipo di applicazione: piccolo ingombro, robustezza, costo contenuto e bassa tensione di utilizzo. I segnali prodotti dai sensori SiPM vengono amplificati ed acquisiti da un *microcontrollore PSoC*. Il PSoC 5, con il suo clock a 50 MHz, permette una buona precisione nel timing degli impulsi e questo abilita lo strumento alla rilevazione affidabile degli eventi di coincidenza. Un progetto simile al nostro è il sistema *ArduSiPM* che utilizza la piattaforma Arduino per l'acquisizione degli impulsi [7].

Il nostro apparato *low cost* può essere utilizzato per fare interessanti esperimenti sulla fisica dei raggi cosmici. In particolare, andremo a descrivere la misura del flusso dei raggi cosmici al variare della inclinazione rispetto alla direzione verticale e daremo una dimostrazione sperimentale del cosiddetto effetto Est-Ovest che ci fornisce importanti indicazioni sulla interazione dei raggi cosmici primari con il campo magnetico terrestre.

## 2. Apparato Sperimentale

L'apparato sperimentale è essenzialmente costituito da una coppia di rivelatori a scintillazione accoppiati ad un sensore SiPM, da una elettronica che alimenta i SiPM ed effettua l'amplificazione degli impulsi e da un microcontrollore PSoC che registra gli impulsi, individua le coincidenze tra gli impulsi e ne fa il conteggio.

### Scintillatore Plastico

Per ottimizzare l'efficienza nella rilevazione dei muoni è stato scelto lo scintillatore plastico BC-412 [2], abbastanza economico, facilmente reperibile e particolarmente adatto a rilevare particelle cariche come muoni o elettroni. Il nostro cristallo è una piccola piastra quadrata di lato pari a 57 mm per 10 mm di spessore (Fig. 1). Il materiale base dello scintillatore è il poliviniltoluene, avente densità  $\rho = 1,023 \text{ g/cm}^3$  e caratterizzato da emissione luminosa compresa tra 400 nm e 520 nm con il massimo a 434 nm. La durata dell'impulso luminoso generato dal BC-412 (FWHM) è di 4,2 ns, sufficientemente corta da non influenzare la successiva rilevazione fatta dal sensore SiPM. I dati tecnici dello scintillatore sono riassunti nella Tabella I.

Caratteristiche dello scintillatore	
Tipo	BC-412
Materiale	Poliviniltoluene
Dimensioni	57 mm x 57 mm x 10 mm
Densità $\rho$	1,023 g/cm <sup>3</sup>
Spettro di emissione	400 nm – 520 nm
Massimo di emissione	434 nm
Durata impulso (FWHM)	4,2 ns
Resa quantica	11400 photons/MeV

Tabella I – Caratteristiche dello scintillatore

Su di un lato del cristallo viene posizionato il foto-rilevatore SiPM, fissato con del semplice nastro adesivo trasparente. Per garantire l'accoppiamento ottico tra il cristallo plastico ed il foto-rilevatore, tra le due superfici viene distribuito un sottile strato di grasso ottico siliconico. Lo scintillatore va poi avvolto con nastro bianco di teflon (Fig. 1) in modo da riflettere e diffondere all'interno la radiazione luminosa prodotta dalla interazione con le particelle, in questo modo si massimizza l'efficienza di rilevazione. In alternativa al teflon si può anche utilizzare del foglio di alluminio riflettente.

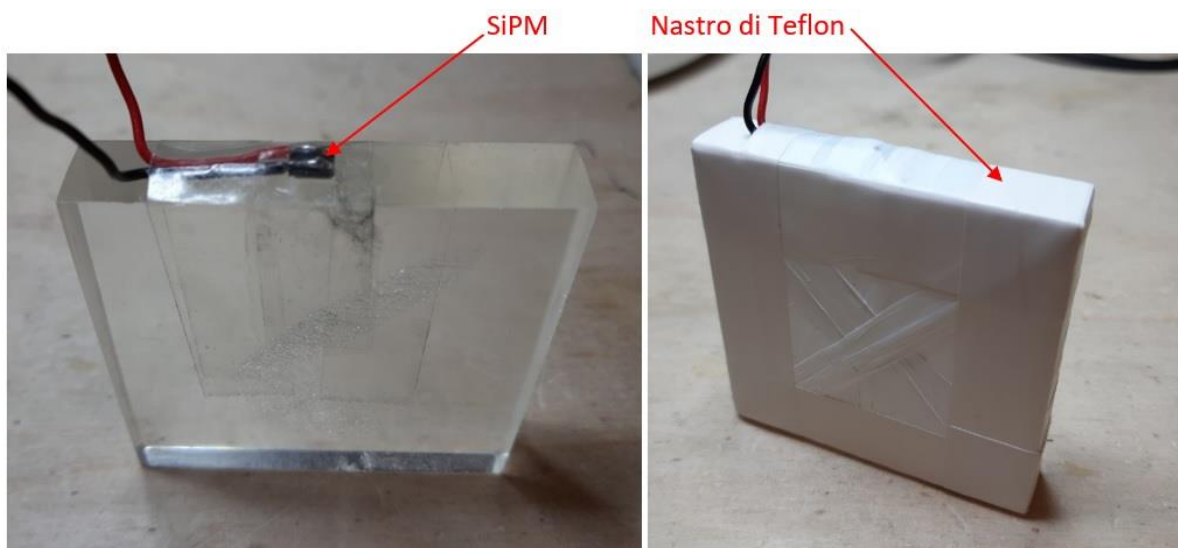


Fig. 1 – Scintillatore plastico

Lo scintillatore avvolto nel nastro di teflon viene poi rivestito con nastro adesivo scuro per evitare che la luce ambientale raggiunga il sensore SiPM. Lo scintillatore a questo punto viene collocato in una scatola di alluminio, dalle dimensioni opportune, provvista di connettore SMA per il cavo di collegamento (Fig. 2).



Fig. 2 – Detector ultimato

### Fotorilevatore SiPM

Per la rilevazione della emissione luminosa del cristallo scintillatore abbiamo adottato il fotorilevatore SiPM. I SiPM, acronimo di *Silicon Photomultipliers* (Fig. 3), costituiscono la più moderna tipologia di fotorilevatori a stato solido. Si tratta di dispositivi costituiti da una matrice di fotodiodi a valanga, detti pixel, operanti in *modalità Geiger* e collegati fra di loro in parallelo su un comune substrato di Silicio [3] [8] [9].

Un fotodiodo operante in regime Geiger è un fotodiodo a valanga polarizzato ad una tensione inversa maggiore della tensione di breakdown. In questo modo, nella zona di svuotamento, si ha un forte campo elettrico in grado di trasferire al singolo portatore un elevatissimo valore di energia cinetica. Questa energia rende il processo di ionizzazione per impatto e moltiplicazione a valanga dei portatori, innescabile anche solo da una singola coppia elettrone-lacuna. È chiaro che un fotodiodo in cui l'arrivo di un fotone ha innescato il processo a valanga in regime Geiger, non ha possibilità di rilevare l'arrivo di un successivo fotone. È necessario quindi un meccanismo che arresti la valanga, abbassando il campo elettrico nella regione di svuotamento ad un valore tale da non consentire più la moltiplicazione per impatto dei portatori. Questo effetto si ottiene con l'utilizzo di un circuito di spegnimento, detto *quenching circuit*. Il più semplice circuito di quenching è costituito da una resistenza in serie alla giunzione del fotodiodo, questo elemento di quenching è integrato direttamente nel chip. L'effetto di amplificazione è dovuto al processo a valanga che produce una corrente di scarica "macroscopica" anche con un solo pixel attivo. Il collegamento in parallelo di tutti i pixel produce una corrente di uscita proporzionale al numero di fotodiodi attivati dai fotoni incidenti sulla superficie attiva del rilevatore.

Uno dei principali svantaggi del sensore SiPM sono gli impulsi di background che si manifestano anche in assenza di fotoni incidenti. Si tratta di pixel che si attivano per effetto termico, la probabilità che questo accada non è trascurabile alla temperatura ambiente di 300 °K. Questi impulsi corrispondono alla attivazione di un solo pixel (l'attivazione termica di due pixel nello stesso istante è molto rara e può essere trascurata) e, dato che la corrente è comunque molto piccola, possono essere facilmente esclusi dal processo di rilevazione implementando nel nostro microcontrollore un filtro a soglia. Le caratteristiche del sensore SiPM sono riassunte nella Tabella II.

Caratteristiche del fotorilevatore SiPM	
Modello	Advansid ASD-NUV4S-P
Dimensioni Area Attiva	4 mm x 4 mm
Spettro di sensibilità	350 nm – 900 nm
Massimo di sensibilità	420 nm
Tempo di risposta	70 ns
Gain	$\sim 10^6$
Tensione di lavoro	$\sim 30$ V

Tabella II – Caratteristiche del sensore SiPM

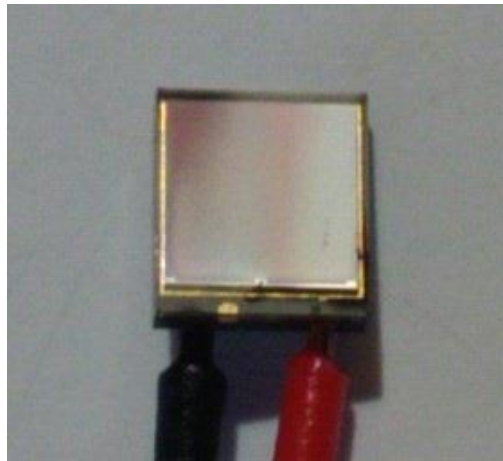


Fig. 3 – Dettaglio del fotorilevatore SiPM

### Polarizzazione del SiPM ed Amplificatore a Transimpedenza

Il SiPM da noi adottato va polarizzato inversamente con una tensione continua di valore compreso tra 28 V e 32 V. La tensione di polarizzazione deve essere regolabile, stabilizzata e a *basso rumore*. Per generare la tensione di polarizzazione abbiamo utilizzato il modulo HV80A del produttore *AiT Instruments* che consente di ottenere una tensione regolabile con precisione da 10 V a 80 V con un ripple inferiore a 0,5 mV. Il modulo ha anche altre interessanti caratteristiche, per una descrizione dettagliata rimandiamo al *datasheet* del prodotto [4].

Il SiPM viene polarizzato tramite una resistenza di carico da 2,2 K $\Omega$  che ha la funzione di limitare la corrente di scarica. Gli impulsi vengono prelevati dal catodo del SiPM tramite un condensatore di accoppiamento (Fig. 4). Quando il SiPM non è in conduzione il suo catodo è a tensione positiva mentre durante l'impulso di conduzione viene portato al livello GND: a valle del condensatore di accoppiamento l'impulso avrà quindi polarità negativa.

Gli impulsi prodotti dal sensore SiPM vengono inviati ad un amplificatore a transimpedenza (TIA). L'impulso di corrente generato dal sensore è inviato ad un circuito amplificatore a transimpedenza che converte l'impulso di corrente in un impulso di tensione (Fig. 4). L'amplificatore operazionale utilizzato deve essere molto veloce al fine di mantenere inalterato il timing del segnale originale. Per questo motivo abbiamo scelto l'amplificatore operazionale OPA354 di TI che garantisce un rise time di soli 2 ns. Il segnale prodotto in uscita dall'amplificatore è invertito rispetto all'ingresso, in modo da ottenere un segnale con escursione positiva dal livello GND fino ad un livello massimo di circa 3 V.

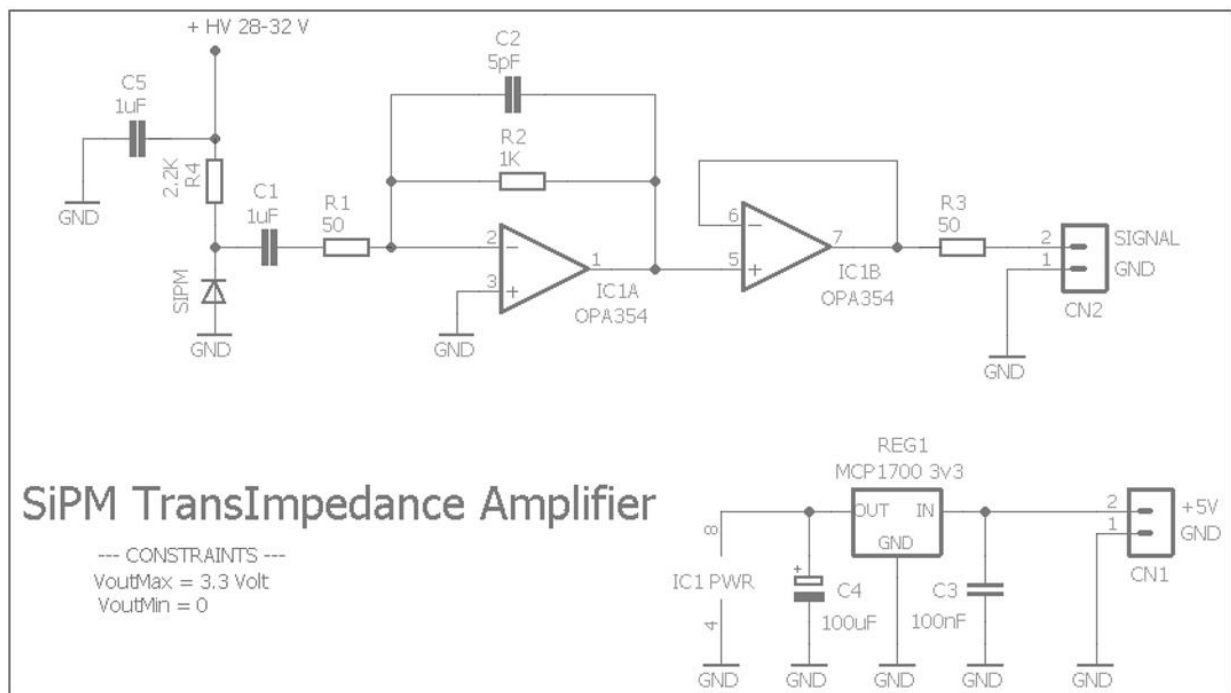


Fig. 4 – Schema dell’amplificatore TIA

### Microcontrollore PSoC

PSoC è un acronimo e significa *Programmable System on Chip*. È un microcontrollore prodotto dalla *Cypress Semiconductor* che combina sia componenti digitali che componenti analogici. Questo fatto lo rende particolarmente adatto all’utilizzo in ambito sperimentale perché permette di fare “quasi tutto” all’interno di un solo chip. Uno dei principali vantaggi dello PSoC è che si possono combinare circuiti logici e digitali in un singolo chip insieme ad un processore relativamente potente che permette di acquisire e successivamente elaborare i dati registrati.

Ci sono vari tipi di PSoC: PSoC 1, 3, 4, 5 con caratteristiche differenti l’uno dall’altro, noi ci siamo orientati su uno dei modelli più potenti, il PSoC 5, caratterizzato da un processore ARM da 32 bit [5]. Il suo utilizzo è notevolmente facilitato dalla scheda di prototipazione CY8CKIT-059 (Fig. 5), disponibile ad un prezzo veramente ridotto: 10-20 €.



Fig. 5 – Scheda di prototipazione CY8CKIT-059

Questa scheda kit di prototipazione permette l’utilizzo di un potente processore a 32 bit con grande storage ed una ampia dotazione di componenti analogici e digitali.

La realizzazione dei circuiti elettronici che abbiamo descritto non è una operazione critica. Non ci sono componenti SMD, gli integrati sono tutti in formato DIP e non è necessaria la progettazione e la realizzazione di complessi PCB: tutte le parti possono essere sistemate su schede di prototipazione. La parte elettronica è completata da un display LCD per la visualizzazione dei dati, da alcuni pulsanti

di controllo e da un potenziometro di precisione multi giro per l'impostazione della soglia di rilevazione.

## **Firmware PSoC**

Il firmware per il nostro microcontrollore viene creato con lo strumento free PSoC Creator fornito sempre dalla Cypress. PSoC Creator è un IDE (*Integrated Design Environment*) che consente la programmazione di hardware e firmware, la compilazione e il debug dei sistemi PSoC. Le applicazioni vengono create combinando gli oltre 150 componenti analogici e digitali pronti per l'utilizzo. La programmazione dello PSoC avviene a due livelli: vi è un livello grafico nel quale vengono inseriti e collegati fra loro i componenti già disponibili nella libreria del microcontrollore e vi è un livello di programmazione in codice sorgente C nel quale vengono inserite le istruzioni per la gestione dei componenti. Per tutti i dettagli si può fare riferimento alla documentazione ufficiale dello PSoC Creator [6].

Nel nostro apparato lo scopo del microcontrollore PSoC è principalmente quello di acquisire i segnali impulsivi che superano un livello di soglia configurabile (in modo da escludere gli impulsi dovuti al rumore), contarli ed individuare gli eventi di coincidenza temporale. In maggiore dettaglio i compiti che vengono eseguiti dallo PSoC sono i seguenti:

- Acquisire dal potenziometro e visualizzare sul display LCD la soglia configurata;
- Acquisire gli impulsi dai due canali A e B che superano il livello della soglia e, per ognuno di essi, generare un impulso di durata fissa di 1  $\mu$ s;
- Individuare le coincidenze temporali tra gli impulsi sui canali A e B. Questo viene realizzato con una porta logica AND;
- Contare gli impulsi e calcolare rateo e varianza;
- Contare gli eventi di coincidenza e calcolare rateo e varianza;
- Visualizzare i dati su LCD;

Tra le varie funzionalità realizzate, descriviamo con maggiore dettaglio la parte di acquisizione degli impulsi (Fig. 6) perché ci sembra quella più significativa. Gli impulsi provenienti dai canali A e B vengono inviati a due comparatori con isteresi che producono un impulso solo se l'ampiezza dell'impulso di ingresso supera la soglia configurata. Dato che gli impulsi prodotti dai comparatori possono avere durata variabile, a valle è posizionato un flip-flop D-type con una rete RC esterna, in modo da ottenere un impulso "pulito" con durata fissa e prestabilita di 1  $\mu$ s, che viene inviato ai circuiti interni di conteggio ed alla porta AND per la determinazione degli eventi di coincidenza temporale. Gli impulsi vengono anche inviati ad output digitali di controllo per fare le opportune verifiche con l'oscilloscopio.

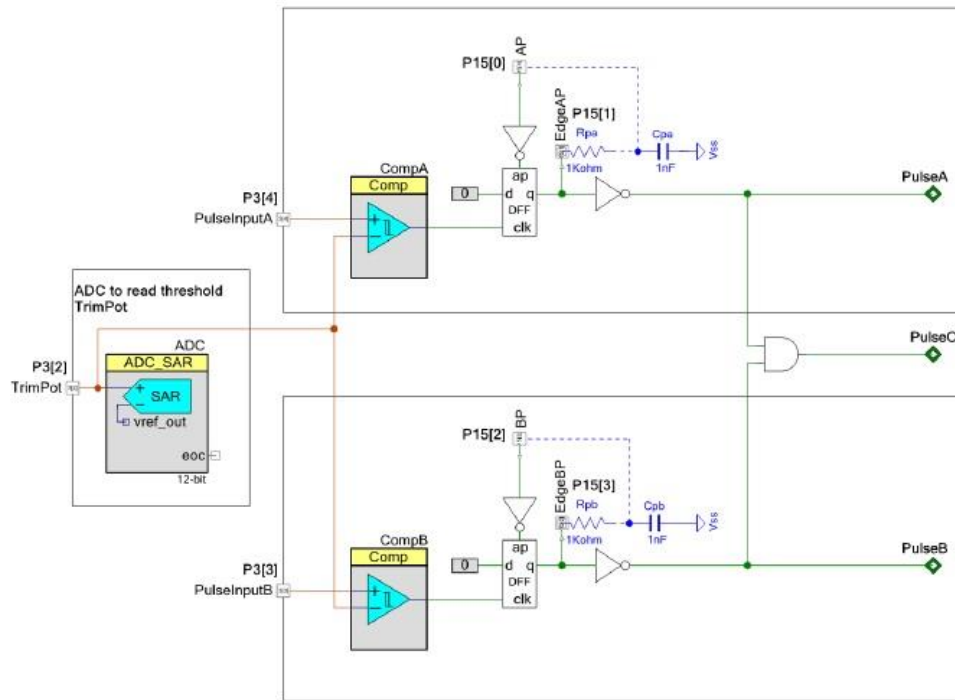


Fig. 6 – Circuito interno PSoC per l’acquisizione degli impulsi

## Analisi degli Impulsi

Gli impulsi generati dal sensore SiPM, amplificati e processati dallo PSoC sono stati accuratamente controllati al fine di verificare il buon funzionamento dei vari step di elaborazione del segnale e la correttezza delle assunzioni fatte sul timing degli impulsi. Gli impulsi tipici prodotti dal SiPM hanno ampiezza maggiore di 80–100 mV e durata (FWHM) di circa 100 ns. Dopo l’amplificatore l’impulso ha ampiezza di 0,5–1 V e medesima durata temporale (Fig. 7 a). Il passo successivo è il comparatore interno allo PSoC che produce un impulso squadrato, leggermente ritardato rispetto all’impulso del PMT (Fig. 7 b).

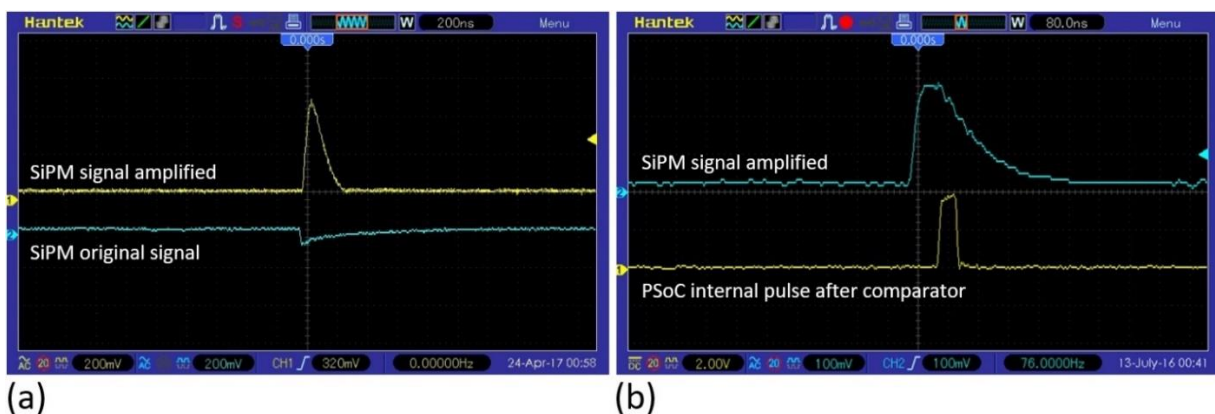


Fig. 7 – (a) Segnale originale SiPM e segnale amplificato (b) Impulso prodotto dal comparatore

Il PSoC produce poi, con il flip-flop D-type e la rete RC esterna, un impulso con durata fissa e ritardato rispetto all’impulso originale. È anche importante verificare che il ritardo rispetto all’impulso originale del SiPM rimanga costante da impulso ad impulso. In pratica va verificato che il *jitter* temporale sia limitato entro valori di poche decine di nanosecondi in modo da influire solo in maniera marginale sulla determinazione degli eventi di coincidenza. Queste verifiche hanno permesso di stimare per il *jitter* temporale un valore minore di 20 ns (Fig. 8 a). L’evento di coincidenza si

verifica quando i due impulsi, provenienti dai canali A e B, accadono nello stesso istante temporale con una tolleranza pari alla durata dell'impulso (Fig. 8 b).

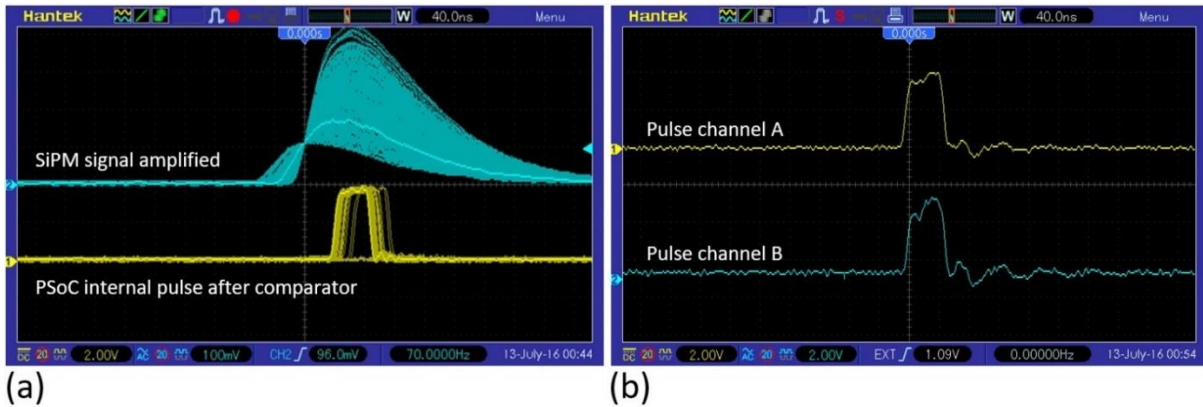


Fig. 8 – (a) Valutazione del *jitter* temporale (b) Evento di coincidenza tra due impulsi

### Configurazione finale dell'apparato

I rivelatori a scintillazione sono stati realizzati in due esemplari e sono stati collocati su di un supporto orientabile ed inclinabile in modo da realizzare quello che è noto come *telescopio a coincidenza per raggi cosmici* (Fig. 9). I due rivelatori sono allineati, uno al di sopra dell'altro, e distanziati di 2,4 cm in una configurazione e di 4,8 cm nell'altra configurazione. Come precedentemente descritto i due rivelatori funzionano con la tecnica della coincidenza, vengono cioè rilevate le particelle che, attraversando entrambi i rivelatori, producono un impulso nei rivelatori nello stesso istante. Da considerazioni geometriche risulta che l'angolo teorico sotteso dal nostro telescopio, nella prima configurazione in cui i rivelatori sono più ravvicinati, è di circa  $100^\circ$  che corrisponde ad un angolo solido di circa 2,24 sr, mentre nella configurazione in cui i rivelatori sono più lontani, l'angolo è di  $80^\circ$  corrispondente ad un angolo solido di circa 1.47 sr. L'angolo solido utile sotteso dal nostro strumento è però stimato essere leggermente minore dato che dipende dalla efficienza di rilevazione dei detector in funzione della traiettoria seguita dalla particella. Infatti, l'efficienza è maggiore per quelle particelle che passano in prossimità dei sensori SiPM, mentre è minore per le particelle che passano lontane dai sensori.

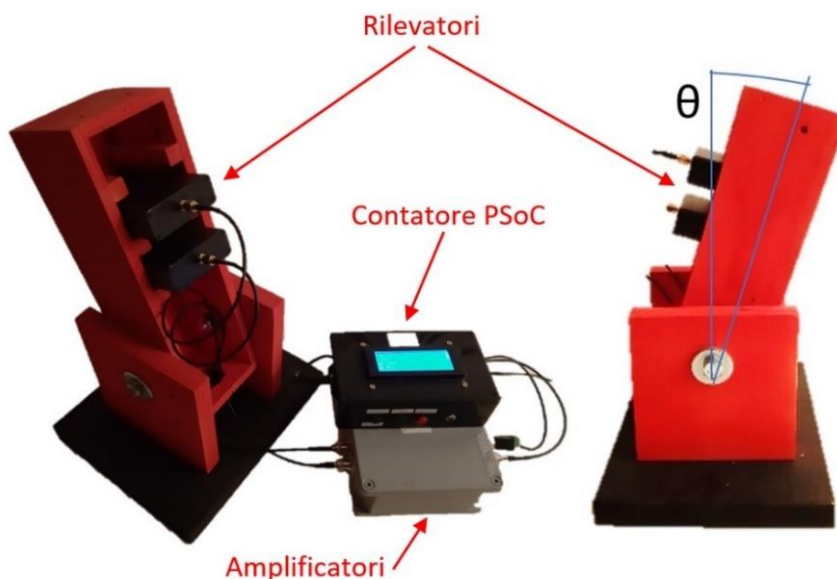


Fig. 9 – Telescopio a coincidenza per raggi cosmici



### 3. Risultati delle Misurazioni

Gli esperimenti che proponiamo consistono nella misurazione del flusso dei raggi cosmici al variare della direzione di arrivo e nella dimostrazione sperimentale dell'effetto Est-Ovest. La prima misura che va effettuata è però la valutazione del numero delle *coincidenze casuali*, quelle cioè che non sono dovute al passaggio di un raggio cosmico. Sappiamo che la durata dell'impulso prodotto dal nostro circuito è di 1  $\mu$ s, mentre la misura del rateo di conteggio dei due detector, presi singolarmente, vale circa 45 CPM. Questo valore comprende sia il contributo di tutti i raggi cosmici incidenti che il contributo della radioattività ambientale. Il tasso di coincidenze casuali  $R$  può essere determinato dalla relazione (1).

$$R = 2 R_a R_b \tau = 2 * 45 * 45 * 10^{-6} = 0,00405 \text{ [CPM]} \quad (1)$$

Dove  $R_a$  è il conteggio del sensore A,  $R_b$  è il conteggio del sensore B, e  $\tau$  è la durata dell'impulso. Il tasso calcolato  $R$  delle coincidenze casuali è molto basso e le nostre misure, effettuate ponendo i due rilevatori molto distanziati sullo stesso piano orizzontale, hanno confermato questa stima.

#### Flusso dei raggi cosmici vs Inclinazione

I raggi cosmici secondari che giungono fino al suolo sono generati, come sappiamo, dalla interazione dei raggi cosmici primari con i nuclei dei gas presenti negli strati più alti dell'atmosfera. I prodotti secondari della interazione a loro volta interagiscono con i gas atmosferici e perdono progressivamente energia fino ad essere assorbiti. Se l'energia della particella primaria supera una certa soglia i raggi cosmici secondari giungono fino al suolo e possono essere rilevati. Il numero di particelle che arrivano al rivelatore dipende quindi dallo spessore di atmosfera che hanno dovuto attraversare: appare quindi ovvio che il massimo di intensità si ottiene puntando il telescopio verso lo *zenit* ed il flusso andrà progressivamente calando all'aumentare dell'inclinazione rispetto alla direzione verticale, fino a raggiungere il minimo in corrispondenza alla direzione orizzontale. Da considerazioni geometriche si dimostra che la lunghezza del percorso nella atmosfera varia secondo una legge proporzionale al  $\cos^2$  dell'angolo di inclinazione rispetto alla verticale; ci aspettiamo quindi che anche il flusso di raggi cosmici segua un andamento simile. Con il nostro telescopio abbiamo fatto le misure di flusso a vari angoli di inclinazione ed abbiamo ottenuto il grafico mostrato in figura (Fig. 10), dove sull'asse delle x viene riportato l'angolo di inclinazione e sull'asse delle y il valore del conteggio in CPM. Le singole misure sono state prolungate per diverse ore in modo da accumulare un numero elevato di eventi e ridurre conseguentemente l'incertezza statistica, che si attesta per tutte le misure sul valore di 0,05 CPM. Nel grafico le misure sono messe a confronto con i valori calcolati secondo la legge del  $\cos^2$ , come si può vedere l'accordo è più che buono.

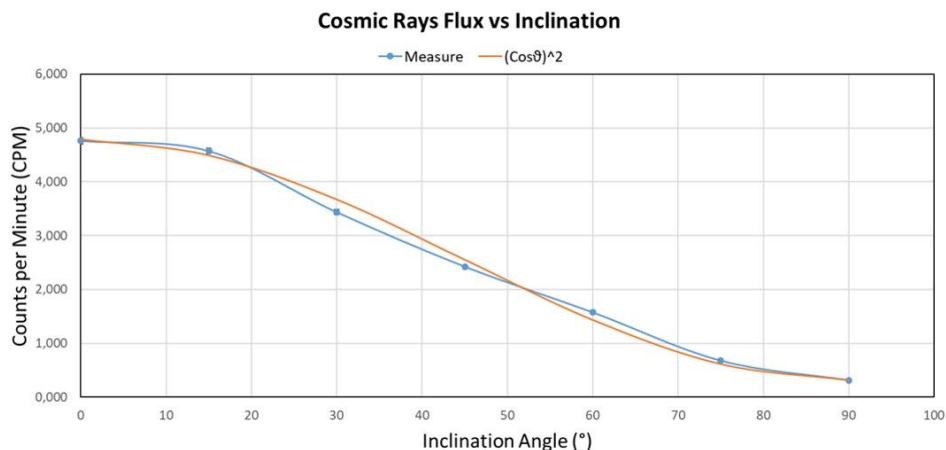


Fig. 10 – Flusso dei raggi cosmici in funzione dell'angolo zenitale del telescopio

## Effetto Est-Ovest

L'effetto Est-Ovest è l'aumento, specie a basse latitudini geografiche, del flusso dei raggi cosmici che arrivano nell'atmosfera da Ovest rispetto a quelli da Est. Questa è una conseguenza del fatto che i raggi cosmici sono *particelle cariche positivamente* la cui traiettoria viene sistematicamente deflessa dal campo magnetico terrestre. Questa interazione porta ad avere alcune traiettorie ammesse ed altre "proibite", con il risultato netto di avere più particelle provenienti da Ovest rispetto che da Est. Quindi i raggi cosmici primari, pur arrivando in prossimità della terra con direzioni isotrope, essendo stati "randomizzati" dal campo magnetico interstellare, subiscono l'interazione con il campo geomagnetico che ne deflette le traiettorie favorendo la direzione di arrivo da Ovest (Fig. 11). Questo effetto è massimo in corrispondenza dell'equatore e nullo ai poli.

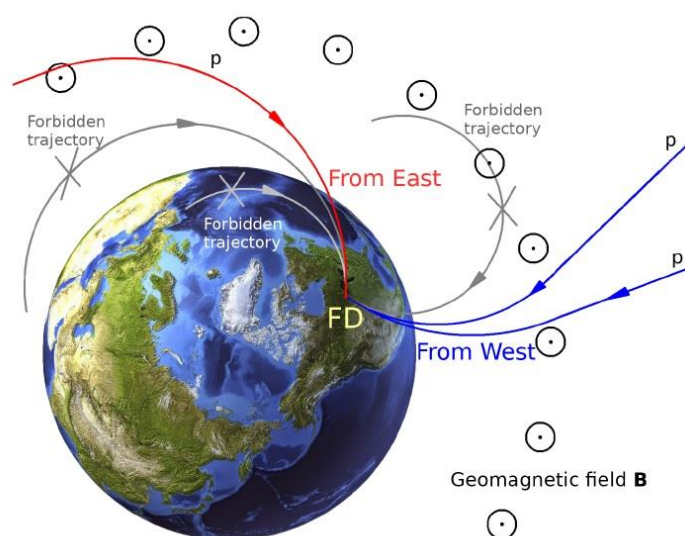


Fig. 11 – Traiettorie dei raggi cosmici deflesse dal campo geomagnetico [10]

Questa asimmetria si riflette naturalmente anche nella intensità dei flussi delle particelle secondarie che si generano a partire dalle particelle primarie di cui conservano la direzione di arrivo. Orientando il nostro telescopio prima verso Est e poi verso Ovest abbiamo fatto una serie di misurazioni allo scopo di evidenziare questa asimmetria. I dati sono riportati nella Tabella III.

	Direzione	Inclinazione	Conteggi	Durata conteggio (s)	Rateo (CPM)	$\sigma$ (CPM)
Sensori distanziati 4,8 cm	Ovest	45°	5615	138921	2,425	0,032
	Est	45°	3204	87784	2,190	0,039
Sensori distanziati 2,4 cm	Ovest	45°	22418	205418	6,548	0,044
	Est	45°	23389	222068	6,319	0,041

Tabella III – Misurazioni effetto Est-Ovest

I valori ottenuti sono interessanti, soprattutto per la misura fatta con i sensori più distanziati, perché evidenziano una differenza di conteggi tra le due direzioni pari a circa il 10%. Si tratta di un valore significativo, anche tenendo conto del basso valore dell'errore statistico, ottenuto prolungando la misura per molte ore. Sistemando i detector nella posizione più vicina fra loro, che sottende un angolo maggiore, otteniamo una differenza minore che vale in percentuale il 3,6%. Questo è corretto perché la risoluzione angolare è decisamente minore.

Questi risultati ci confermano che l'effetto Est-Ovest sul flusso dei raggi cosmici può essere evidenziato anche alle nostre latitudini. Bisogna però avere cura di prolungare molto il tempo di misura in modo da raccogliere molti dati, ridurre l'errore statistico, ed evidenziare così anche piccole differenze di conteggio.

## Conclusioni

Il telescopio a coincidenza per raggi cosmici descritto nel presente lavoro ha permesso la misura del flusso dei raggi cosmici in funzione della direzione di arrivo e la verifica sperimentale dell'effetto Est-Ovest. L'apparato è stato realizzato seguendo un approccio *open e DIY* e questo ha permesso di contenere notevolmente i costi della realizzazione, stimati inferiori ai 500 €. Non si tratta però di un progetto semplice in quanto sono richieste conoscenze sia nel campo della elettronica che nel campo del firmware. Con una buona dose di pazienza ed un pizzico di volontà questo apparato può comunque diventare un progetto annuale alla portata di un laboratorio liceale. Le ricadute educative sarebbero molteplici: fisica delle particelle, elettronica, coding, analisi dei dati.

## Bibliografia e Sitografia

- [1] physicsopenlab.org, (2021)
- [2] BC-412 datasheet, Saint Gobain, (2021)
- [3] SiPM ASD-NUV4S-P datasheet, Advansid, (2021)
- [4] HV80A datasheet, AiT Instruments, (2021)
- [5] Programmable System-on-Chip PSoC 5lp CY8C58LP Family Datasheets, Cypress Semiconductor Corporation, (2021)
- [6] www.cypress.com/products/psoc-creator-integrated-design-environment-ide (2021)
- [7] Bocci V. et al, "The ArduSiPM a compact trasportable Software/Hardware Data Acquisition system for SiPM detector" arXiv:1411.7814 [physics.ins-det] *IEEE NSS-MIC* (2014) Seattle
- [8] Bondarenko G. et al, "Limited Geiger-mode microcell silicon photodiode: new results" *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 442 187– 92, (2000)
- [9] Knoll G.F., *Radiation Detection and Measurement 4<sup>th</sup> Edition* (John Wiley & Sons, Inc.) 2010, p. 305-307
- [10] Petrova O., "East-west asymmetry effect in atmospheric muon flux in the Far Detector of NOvA", DLNP JINR, (2019)