



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## Sincronizzazione tramite GPS di rivelatori di particelle ArduSiPM per lo studio di sciami di raggi cosmici.

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali  
Corso di Laurea in Fisica

Candidata

Gaia Muti

Matricola 1696006

Relatori

Dr. Valerio Bocci

Prof. Franco Meddi

Anno Accademico 2017/2018

---

**Sincronizzazione tramite GPS di rivelatori di particelle ArduSiPM per lo studio di sciame di raggi cosmici.**

Tesi di Laurea. Sapienza – Università di Roma

© 2018 Gaia Muti. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con  $\text{\LaTeX}$  e la classe Sapthesis.

Versione: 2 settembre 2018

Email dell'autore: [muti.1696006@studenti.uniroma1.it](mailto:muti.1696006@studenti.uniroma1.it)

*Dedicato ai miei genitori,  
ai miei fratelli e a Michele.*

# Introduzione

L'ArduSiPM<sup>[1]</sup> è un rivelatore di particelle sviluppato dal gruppo di ricerca del Dr. Bocci dell'INFN di Roma, progettato per realizzare un rivelatore pratico, con bassi consumi (dell'ordine del Watt), peso inferiore a 100g e di prezzo contenuto. Inizialmente utilizzato come sistema di monitoraggio per una pratica chirurgica radioguidata<sup>[2]</sup> che sfrutta il decadimento  $\beta$  e nell'ambito della fisica delle particelle come sistema di monitor di fasci estratti al CERN<sup>[3]</sup>, offre una molteplicità di applicazioni nell'ambito della fisica delle particelle.

Sono possibili anche applicazioni in ambito didattico, sia a livello accademico che scolastico, non che nell'uso di piccoli palloni areostatici con carico inferiore al chilogrammo come quello del progetto EOS, successivamente presentato.

Nella dissertazione vengono inizialmente analizzate le parti costituenti l'ArduSiPM (scintillatore, SiPM, Arduino DUE e ArduSiPM Shield), per poi approfondire il tema centrale del lavoro di tesi, cioè la sincronizzazione di rivelatori ArduSiPM tramite GPS.

Viene riportato il meccanismo alla base della sincronizzazione che utilizza il modulo GPS come fonte d'informazione di un tempo assoluto (*GPS time*) e come sorgente del segnale PPS in grado di scandire il tempo con una precisione di qualche decina di nanosecondi.

Apportando le modifiche necessarie al firmware dell'ArduSiPM, per gestire la sincronizzazione tramite il GPS, è stato possibile procedere in diverse prese dati per avere verifica dell'avvenuta sincronizzazione.



# Indice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Raggi Cosmici</b>                                 | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Rivelatori</b>                                    | <b>4</b>  |
| 2.1      | Scintillatori . . . . .                              | 5         |
| 2.2      | SiPM . . . . .                                       | 6         |
| <b>3</b> | <b>ArduSiPM</b>                                      | <b>9</b>  |
| 3.1      | Microcontrollori . . . . .                           | 9         |
| 3.2      | Arduino Due . . . . .                                | 11        |
| 3.3      | ArduSiPM Shield . . . . .                            | 12        |
| 3.4      | ArduSiPM . . . . .                                   | 14        |
| <b>4</b> | <b>Sincronizzazione</b>                              | <b>16</b> |
| 4.1      | Global Positioning System . . . . .                  | 17        |
| 4.2      | Elaborazione dei dati GPS tramite ArduSiPM . . . . . | 19        |
| <b>5</b> | <b>Setup sperimentale e risultati</b>                | <b>22</b> |
| 5.1      | Set up sperimentale . . . . .                        | 22        |
| 5.2      | Analisi Dati . . . . .                               | 23        |
| 5.3      | Progetto EOS ArduSiPM . . . . .                      | 26        |

# Capitolo 1

## Raggi Cosmici

Lo studio della radioattività naturale sulla Terra portò alla domanda del perchè fosse presente radiazione ionizzante anche senza la presenza di sostanze radioattive. All'inizio del novecento diversi scienziati cercarono di darne risposta.

Nel 1911 Domenico Pacini osservò che le radiazioni penetranti diminuivano nel passaggio dalla superficie dell'acqua a diversi metri di profondità, mentre Victor Hess nel 1912 misurò un aumento della ionizzazione media in funzione dell'altitudine<sup>[4]</sup>. Entrambi utilizzarono per le misure l'elettroscopio di Wulf<sup>1</sup>, riportato in Figura 1.1.

Nel 1930 il fisico tedesco E. Regener insieme ad un suo studente Georg Pfozter



**Figura 1.1.** Elettroscopio di Wulf.

scoprirono con le loro misure l'altitudine alla quale viene raggiunto il picco di ionizzazione nell'atmosfera (massimo di *Reneger-Pfozter*), corrispondente al punto di massimo sviluppo degli sciame<sup>[5-6]</sup>. Questi risultati fornirono le prove necessarie per definire l'origine extraterrestre dei raggi cosmici; ad oggi sappiamo che sono particelle subatomiche di altissima energia provenienti dallo spazio e che quelli misurati da

---

<sup>1</sup>L'elettroscopio di Wulf a differenza dell'elettroscopio tradizionale era più sensibile e trasportabile. Le due foglie d'oro dell'elettroscopio tradizionale vengono sostituite da due strisce di vetro metalizzato in tensione. Si è quindi in grado di misurare l'intensità della radiazione contando il numero di scatti della lamina per unità di tempo.

Hess ne costituiscono la componente secondaria. I raggi cosmici primari sono distribuiti uniformemente nello spazio e incidono gli strati più esterni dell'atmosfera, costituiti prevalentemente da particelle ad alta energia. Sono composti per l'85% da protoni, il 12% da nuclei d'elio, l'1% da nuclei leggeri (Litio, Berillio, Boro, Carbonio, Azoto e Ossigeno) e per il restante 2% da elettroni. I raggi secondari, invece, sono composti dalle particelle prodotte dall'interazione dei raggi primari con l'atmosfera, che possono arrivare sulla Terra attraverso il meccanismo degli sciami moltiplicativi, nella componente penetrante troviamo i muoni.

Tramite la rivelazione delle particelle cariche si è potuto indentificare un legame tra il numero delle particelle incidenti sulla terra (indicandolo come flusso per unità di energia, di tempo, di area e di angolo solido) e l'energia dei raggi, ottenendo un'andamento decrescente del flusso in relazione all'aumento dell'energia (Figura 1.2). Lo spettro è descritto da una legge di potenza ( $f = E^{-p}$ , con  $p$  indice spettrale) suddivisibile in tre zone.

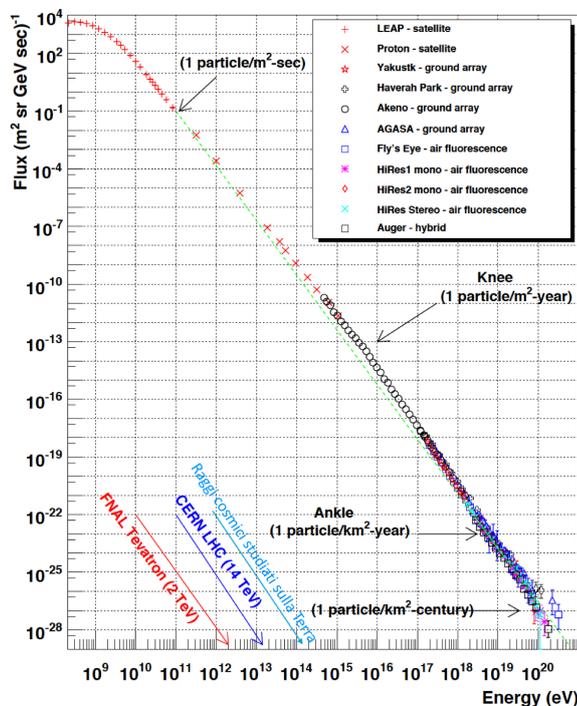


Figura 1.2. Spettro dei raggi cosmici.

La prima corrisponde alla zona di basse energie, dominata dai raggi cosmici provenienti dal Sole, con una  $p = 2.7$  [fino ad  $E = 10^{10}$  eV]. Subito dopo il primo punto di variazione di pendenza denominato “*Knee*” (ginocchio), corrispondente a  $E = 3 \cdot 10^{15}$  eV, si trova la seconda zona, dove  $p = 3$ , composta da raggi cosmici di origine galattica. Dopo il secondo punto di variazione “*Ankle*” (caviglia), corrispondente a  $E = 10^{18}$  eV, si ha un'ulteriore variazione di pendenza dove  $p = 2.7$ , da qui in poi la loro origine è extragalattica. Come si evince dal grafico riportato in Figura 1.2 ad alte energie corrispondono piccoli valori del flusso; per rivelare quindi una particella con un'energia dell'ordine di  $10^{20}$  eV si necessita di un tempo

di campionamento di un secolo ed un rivelatore di area pari a  $1\text{Km}^2$ .

Il flusso di particelle cosmiche che arrivano sulla Terra è correlato anche all'attività solare. L'aumento dell'attività solare comporta a sua volta l'aumento del vento solare, composto da un flusso di particelle cariche che propaga nello spazio insieme al suo forte campo magnetico. Il flusso di particelle a bassa energia decresce nei periodi di alta attività solare poichè il campo magnetico del vento solare deflette i raggi cosmici, mentre raggiunge un massimo durante il periodo di bassa attività solare; questo fenomeno viene chiamato *solar modulation* (nel 2018 ci troviamo in un periodo di minimo dell'attività solare).

Lo studio dei raggi cosmici è stato essenziale per lo sviluppo della fisica delle particelle. Dal loro studio è stato possibile esaminare e trovare particelle come il muone o il positrone in un periodo in cui la tecnologia degli acceleratori non era in grado di raggiungere energie sufficienti per la loro creazione.

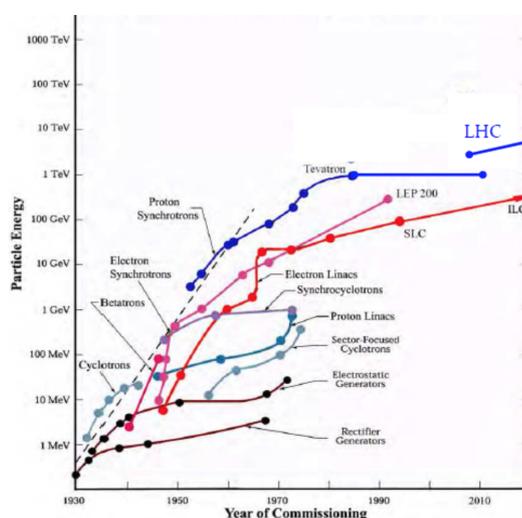


Figura 1.3. Sviluppo degli acceleratori.

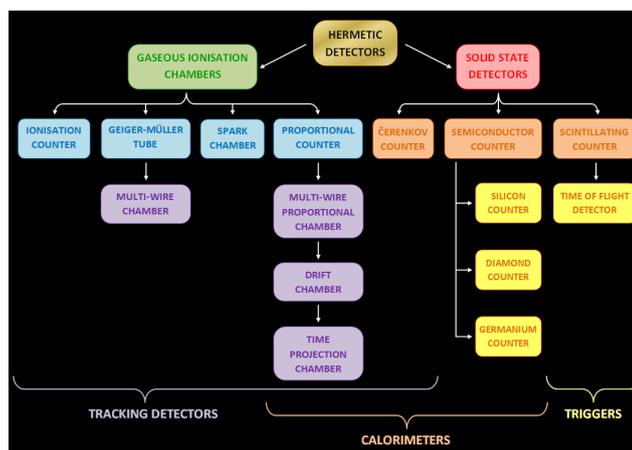
Ancora oggi non siamo in grado di produrre energie paragonabili alle massime energie raggiunte dai raggi cosmici, come è possibile vedere dal grafico (riportato in Figura 1.3)<sup>[9]</sup>, ma è possibile osservarli sia in modo diretto, con rivelatori su satelliti (come l'AMS-02 nella Stazione Spaziale Internazionale), che indiretto, tramite la rivelazione di sciami di particelle generati nell'interazione con l'atmosfera (come l'osservatorio Telescope Array nello Utah e Pierre Auger in Argentina).

Recentemente (settembre del 2017) è stato rilevato il primo neutrino extragalattico in coincidenza a fotoni ad altissima energia studiando la galassia TXS-0506+056, importante scoperta nell'ambito dell'astrofisica multimessaggera, per lo studio della natura dei raggi cosmici ultraenergetici e di come un Blazar produca protoni ad altissima energia<sup>[10]</sup>. La rivelazione del neutrino ultra energetico è da associare al processo di accelerazione di protoni (quindi raggi cosmici). Tra le più grandi scoperte sui raggi cosmici degli ultimi decenni ritroviamo l'articolo di Auger del 2017<sup>[11]</sup>, dove per la prima volta viene dimostrato che i raggi cosmici ad altissima energia sono anisotropici, e quello di Icecube del 2018<sup>[10]</sup>.

## Capitolo 2

# Rivelatori

Nello studio della fisica delle particelle sono stati sviluppati diversi tipi di rivelatori in grado di tracciare ed identificare le particelle interagenti con il rivelatore medesimo (Figura 2.1). A seconda del principio fisico sfruttato nella rivelazione è possibile differenziare varie tipologie di detector.



**Figura 2.1.** Tipologie di detector.

I rivelatori a ionizzazione misurano la ionizzazione prodotta dall'interazione della particella nell'attraversare il mezzo costituente il rivelatore. Per catturare gli elettroni o gli ioni prodotti nell'interazione prima che questi si ricombinino viene applicata una differenza di potenziale ( $\Delta V$ ) ai capi del materiale. A seconda del  $\Delta V$  applicato è possibile definire diversi tipi di rivelatori come quelli a ricombinazione, ionizzazione, proporzionali o Geiger.

Gli scintillatori sfruttano l'emissione della luce nella diseccitazione nei materiali per la rivelazione delle particelle, i contatori Cherenkov sfruttano la radiazione Cherenkov prodotta nell'interazione della particella con un mezzo dielettrico, mentre i rivelatori a semiconduttori sfruttano la giunzione polarizzata in maniera inversa (p-n) per rivelare un segnale elettrico.

Grazie all'innovazione tecnologica si è stati in grado nel tempo di sviluppare rivelatori sempre più efficaci e accurati.

## 2.1 Scintillatori

Negli scintillatori si sfruttano le proprietà di alcuni materiali, detti *scintillanti*, che attraversati da particelle emettono una piccola quantità di luce data dall'eccitazione e successiva diseccitazione degli atomi del materiale o dalle vibrazioni reticolari.

Il segnale luminoso, convertito in un impulso elettrico tramite fotomoltiplicatori, è in grado di dare informazioni relative all'energia depositata nel materiale scintillante. Caratteristica fondamentale dei materiali scintillanti è la *luminescenza*. Una sostanza luminescente esposta ad alcune forme di energia (come calore, luce, radiazione) riemette l'energia assorbita sotto forma di luce visibile (fotoni) tramite fluorescenza con un tempo di riemissione inferiore a 100 ms oppure tramite fosforescenza con un tempo di riemissione superiore a 100 ms.

Esistono diversi tipi di materiali scintillanti di origine organica e inorganica. Tra gli scintillatori inorganici sono presenti cristalli come lo ioduro di sodio (NaI) o la stolzite ( $\text{PbWO}_4$ ), vetri e gas, mentre in quelli organici oltre ai cristalli e ai liquidi sono presenti gli scintillatori plastici (Figura 2.2).

Gli scintillatori plastici consistono in soluzioni di scintillatori organici, come il para-terfenile, il PBD ed il PPO, in un solvente plastico, come il poliviniltoluene, il polifenilbenzene ed il polistirene.

All'interno di essi esiste una struttura di livelli atomici vibrazionali ed elettronici. A temperatura ambiente è possibile considerare le molecole componenti lo scintillatore come poste nel livello fondamentale ( $S_{00}$ ). Il processo di eccitazione o ionizzazione indotto dalla radiazione porta gli elettroni sui livelli eccitati ( $S_{1x}, S_{2x}, S_{3x}$ ). Gli stati elettronici/vibrazionali decadono velocemente nello stato  $S_{10}$  via transizioni non radiative, successivamente viene emessa radiazione pronta (prompt fluorescence) nella transizione tra lo stato  $S_{10}$  e gli stati  $S_{0x}$ .

Questo meccanismo di decadimento impedisce alla luce di scintillazione di essere assorbita. Infatti poichè nel materiale gli elettroni occupano solo lo stato  $S_{00}$  non hanno abbastanza energia termica per saltare sul primo stato vibrazionale. Solo la transizione diretta  $S_{10}$ - $S_{00}$  può essere assorbita, mentre le altre no.

Per rivelare la luce di scintillazione lo scintillatore deve essere un materiale trasparente alla propria radiazione, perciò non può avere una breve lunghezza d'attenuazione alle frequenze d'interesse. Per raggiungere ciò gli scintillatori sfruttano sequenze di eccitazione e diseccitazione incrementando sempre  $\lambda$  per spostare la lunghezza d'onda verso lunghezze di attenuazione più elevate, la differenza tra le lunghezze d'onda del picco di emissione e del picco di assorbimento è chiamata *Stokes' shift*. Questo è possibile utilizzando la fluorite o aggiungendo soluti secondari in basse concentrazioni come il POPOP.

Per determinare l'evoluzione temporale del processo di riemissione è possibile

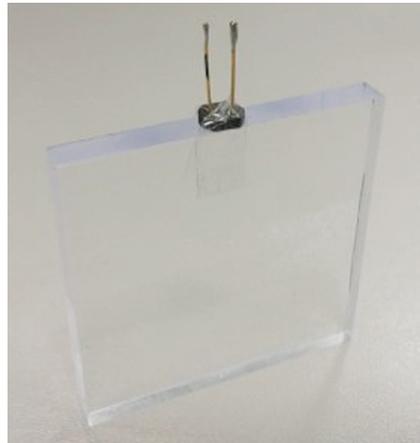


Figura 2.2. Scintillatore plastico.

considerare la seguente legge di tipo esponenziale<sup>[12]</sup>:

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-\frac{t}{\tau_d}}$$

dove vengono considerati il numero totale di fotoni emessi ( $N_0$ ) e la costante di decadimento ( $\tau_d$ ). Essendo il tempo di risalita molto veloce, dell'ordine di un ns, e la costante di decadimento di 2-3 ns è possibile descrivere l'equazione precedente in modo più esatto utilizzando il prodotto tra una Gaussiana e una funzione esponenziale:

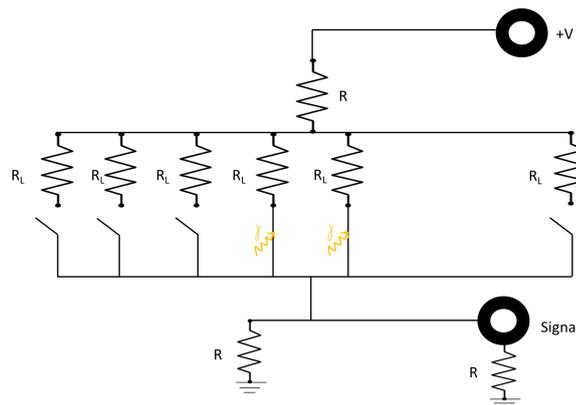
$$N(t) = N_0 f(\sigma, t) e^{-\frac{t}{\tau_d}}$$

Uno dei maggiori vantaggi degli scintillatori plastici è la loro flessibilità, in quanto possono assumere svariate forme e sono relativamente economici. Inoltre, i diversi materiali vengono prodotti per offrire ottime prestazioni in termini di quantità di luce trasmessa e velocità di propagazione del segnale.

## 2.2 SiPM

Per la rivelazione dei fotoni emessi all'interno degli scintillatori si utilizzano principalmente strumenti chiamati fotomoltiplicatori che sfruttano l'effetto fotoelettrico per convertire il fotone in un segnale elettrico. Negli ultimi anni è stato sviluppato un nuovo tipo di rivelatore fotonico composto da fotodiodi a valanga controllata, connessi in parallelo su un comune substrato di Silicio, vengono detti SiPM<sup>[13]</sup>.

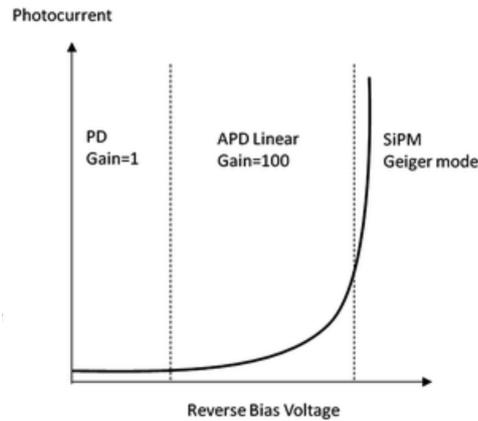
I SiPM sono dei dispositivi di dimensioni ridotte, di costo contenuto e che funzionano a basse tensioni; caratteristiche che lo rendono preferibile ai tradizionali fotomoltiplicatori. I Silicon Photo Multiplier (SiPM) sono dei fotomoltiplicatori composti da una matrice di fotodiodi a valanga (APD) che operano in regime Geiger controllato. Ogni fotodiodo è collegato in serie ad una resistenza che ha la funzione di inibire la scarica una volta che è iniziata (resistenza di quenching) ed in parallelo tra di loro nello stesso strato di Silicio (come illustrato nella Figura 2.3.).



**Figura 2.3.** Schema interno del SiPM.

I fotodiodi lavorano con un potenziale di *bias* tipico di (20 ÷ 60)V in modo da superare il potenziale di breakdown ed entrare nella zona Geiger, l'andamento è

illustrato in Figura 2.4<sup>[14]</sup>. In questa zona se viene rivelato un fotone si genera una valanga di elettroni in crescita che produce un'amplificazione del segnale molto alta.



**Figura 2.4.** Caratteristica del SiPM.

Il segnale in uscita del SiPM è la somma analogica dei segnali degli APD, è quindi la misura del flusso luminoso ed è infatti proporzionale al numero di fotoni incidenti.

Il range dinamico, definito come il massimo numero di fotoni che possono essere rivelati simultaneamente dal dispositivo, va da uno a qualche migliaio di fotoni per  $\text{mm}^2$ . Il range è dato dalla struttura stessa del fotomoltiplicatore.

Per un SiPM si possono considerare tempi di salita del segnale dell'ordine del ns, valore dovuto alla scarica Geiger, e tempi di discesa dell'ordine di alcune decine di ns. Si ha quindi un basso valore di tempo di recupero che lo rende ottimale per misure con alte frequenze di conteggi.

Il guadagno  $G$ , cioè il numero totale di elettroni prodotti per fotone incidente, è funzione della sovratensione e della superficie delle microcelle<sup>[15]</sup>. Si definisce come il rapporto tra la carica delle microcelle attivate e la carica dell'elettrone, ottenendo quindi:

$$G = \frac{C * \Delta V}{q}$$

Il guadagno è quindi funzione della tensione; dopo il potenziale di breakdown si raggiunge la zona Geiger, dove si ha il guadagno massimo.

Oltre al guadagno è possibile definire anche l'efficienza quantica (QE) che corrisponde al rapporto tra fotoni emessi e incidenti, che per fotoni nella banda dell'ottico corrisponde circa al 100%. L'efficienza di rivelazione dei fotoni (PDE) indica la frazione di fotoni incidenti rivelati dal SiPM e quindi esprime la capacità del dispositivo di rivelare fotoni. La PDE è legata alla QE dalla seguente relazione<sup>1</sup>:

$$PDE = QE * \epsilon_{geometrico} * \epsilon_{BD}$$

<sup>1</sup>Il termine  $\epsilon_{BD}$  equivale alla probabilità che un fotoelettrone inneschi l'effetto valanga producendo così il segnale aspettato, tale fattore è anche definito probabilità di trigger, legata all'*over-voltage*.

La struttura a matrice del SiPM pur garantendo un buon valore del range dinamico causa una perdita d'efficienza dovuta alla presenza di punti morti tra i pixel (fotodiodi). Il fotone che colpisce queste zone non viene rivelato. Il parametro che descrive il rapporto tra l'area attiva di un pixel e la sua area totale viene detto *fill factor* o parametro di riempimento. Per un parametro di riempimento più grande si ha una maggiore efficienza dello strumento.

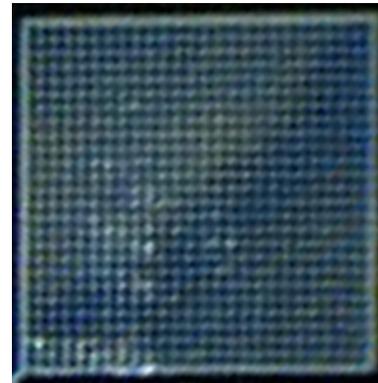
Nella comunicazione del segnale è possibile che tra celle adiacenti della matrice avvenga una comunicazione del segnale (*crosstalk*) tramite il passaggio di fotoni e che successivamente venga quindi generata una scarica spuria. Si può ridurre questo effetto andando ad abbassare il guadagno oppure isolando otticamente ogni cella, stando attenti a non ridurre in questo modo il *fill factor*.

Nel rumore generato all'interno del SiPM è rilevante la componente relativa al *dark count rate* DCR, che è causato dall'interazione di elettroni termici con la struttura. Essendo uguali i segnali prodotti da elettroni termici e quelli a singolo fotone non è sufficiente introdurre una soglia per eliminare il rumore, tuttavia il *dark count* a due o più fotoni è improbabile. L'effetto della DCR quando una grande quantità di fotoni colpisce il sensore può essere rimosso mettendo più celle accese in coincidenza.

Nel *data sheet* è possibile trovare tutti i parametri caratteristici.



**Figura 2.5.** Esempio di fotomoltiplicatore SiPM.



**Figura 2.6.** Ingrandimento dell'array.

I SiPM (Figura 2.5 e 2.6) sono strumenti molto sensibili a flussi di fotoni estremamente ridotti e hanno largo impiego grazie alla loro compattezza e al costo contenuto, all'insensibilità ai campi magnetici e al basso consumo di potenza elettrica.

## Capitolo 3

# ArduSiPM

Grazie all'innovazione tecnologica è stato possibile sviluppare nuovi apparecchi per la rivelazione delle particelle, tra questi è possibile trovare i rivelatori ArduSiPM, primi al mondo di questa concezione (pubblicazione ArduSiPM INFN del 2014<sup>[1]</sup>, Cosmic watch MIT 2015<sup>[16]</sup>, Cosmic PI CERN 2016).

L'ArduSiPM, sviluppato dal gruppo di ricerca del Dr. Valerio Bocci dell'INFN, è costituito da una scheda Arduino Due (come processore e convertitore di segnali analogici e digitali), dall'ArduSiPM Shield (utilizzato per la generazione di tensioni di controllo e condizionamento dei segnali veloci), un SiPM ed uno scintillatore plastico.

L'ArduSiPM è stato realizzato utilizzando lo stato dell'arte della tecnologia dei microcontrollori e dei sensori fotonici, cosa che ha permesso di realizzare un rivelatore a scintillazione completo del suo sistema di acquisizione dati, leggero, portatile e funzionante a batteria.

### 3.1 Microcontrollori

I microcontrollori sono dispositivi elettronici programmabili che, diversamente dai microprocessori, hanno le periferiche di comunicazione contenute nel chip stesso, è come un microcomputer in un singolo chip che contiene tutto ciò che serve a gestire un sistema digitale.

Il primo microcontrollore, il TMS 1000 Texas, venne prodotto dalla Texas Instrument nel 1975 con il bisogno di ridurre al minimo il numero di integrati necessari per realizzare il circuito. Venne utilizzato anche nella realizzazione di giochi elettronici come *Simon* e *Speak end Spell*<sup>[17]</sup>.

Grazie alla sua struttura è in grado di svolgere autonomamente diverse funzioni in base al programma implementato all'interno.

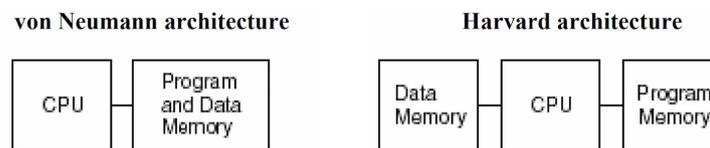
All'interno di un microcontrollore sono presenti:

- il *Central Processing Unit* (CPU)
- memorie di programma (ROM, EPROM, FLASH)
- le memorie dati (RAM, EEPROM)
- oscillatori, timer, contatori

- porte I/O
- gestione di interrupt
- moduli di comunicazione, convertitori e modulatori
- ADC e DAC

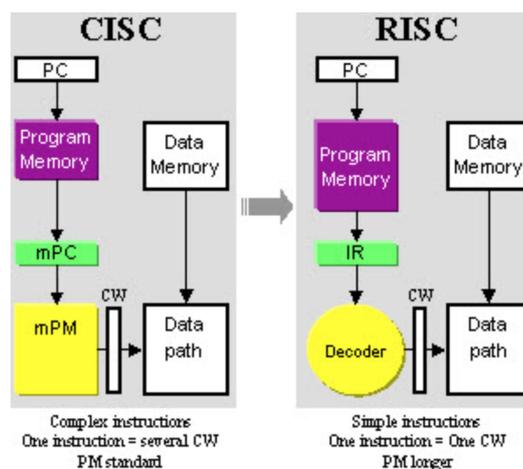
L'introduzione di ADC e DAC nella struttura interna di microcontrollori di ultima generazione è stata possibile grazie allo sviluppo della tecnologia Mixed-Signal dove parti analogiche coesistono con parti digitali.

Una prima suddivisione all'interno dei microcontrollori in base all'architettura è quella tra Von Neuman e Harvard, viene riportato uno schema in Figura 3.1. Nell'architettura Von Neumann programma e dati sono ospitati sulla stessa memoria permettendo la massima flessibilità di allocazione mentre in quella Harvard la memoria di programma è separata da quella per i dati.



**Figura 3.1.** Architettura Von Neumann (sinistra) a confronto con quella Harvard (destra).

L'architettura Harvard rende possibile l'utilizzo di due diversi tipi di memoria per i dati e per il programma. Utilizzando una memoria volatile (RAM) per i dati e una memoria non volatile (ROM/Flash) per il programma è possibile mantenere la struttura del programma anche dopo lo spegnimento del microcontrollore ed iniziare una nuova presa dati. Una separazione che delinea la differenza tra le architetture principalmente utilizzate oggi è quella RISC e CISC riportata nella Figura 3.2<sup>[18]</sup>.



**Figura 3.2.** Confronto tra Architettura CISC (sinistra) e Architettura RISC (destra).

L'architettura CISC (*Complex Instruction Set Computing*) ha la capacità di eseguire operazioni a multi-step all'interno di un singolo set di istruzioni, minimizza il numero di istruzioni per programma sacrificando il numero di cicli per istruzione. L'architettura RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) si basa sull'idea che un set di istruzioni semplificate dia un rendimento migliore quando è combinato con microprocessori che eseguono istruzioni tramite cicli diversi.

Tra i microcontrollori della Atmel (ora Microchip Technology) sono presenti i SAM, cioè microcontrollori basati su *Smart ARM*, che si suddividono successivamente in quattro sotto gruppi: SAM D, SAM 3, SAM 4, SAM x70.

Il microprocessore SAM 3 appartiene all'ultima generazione di microcontrollori e oltre ad avere una discreta potenza di calcolo ha un notevole numero di periferiche<sup>[19]</sup>. Tra queste è possibile trovare periferiche USB Host and Device ad alta velocità con ricetrasmittitore incorporato, un MAC Ethernet, un'interfaccia di bus esterni, 5 periferiche UART, 2 TWI, 4 SPI, 3 canali timer a 32-bit, convertitori DAC e ADC a 12-bit.

L'architettura del SAM 3 è disegnata appositamente per sostenere un'alta velocità di trasferimento dati, include infatti sia matrici di bus multi-layer che multiple banche SRAM, canali PDC e DMA che lo rendono in grado di eseguire operazioni in parallelo e massimizzare la capacità di trasmissione dati "effettivamente utilizzata" (throughput).

Questi microcontrollori sono costituiti da un core ARM Cortex-M e ad oggi viene utilizzato in decine di miliardi di dispositivi, anche per questo motivo il costo di questi microcontrollori è molto competitivo.

Il microcontrollore SAM 3 per le sue peculiarità di efficienza, velocità e potenza di calcolo è stato utilizzato per la piattaforma hardware di Arduino Due.

## 3.2 Arduino Due

Arduino è una piattaforma hardware, open-source, per lo sviluppo di prototipi elettronici basata sulla facilità di utilizzo hardware e software<sup>[20]</sup>. Viene sviluppato dall'Internectional Design Institute di Ivrea nel 2005 ed è composto da una serie di schede elettroniche dotate di un microcontrollore ATMEL AVR Mega. Negli anni sono state prodotte diverse versioni di Arduino ognuna con delle determinate specifiche, nelle quali sono state integrate o migliorate parti costituenti l'hardware. Arduino Due, riportato in Figura 3.3, è costituito da un Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 RISC core, una categoria dei microcontrollori SAM 3.

Il SAM3X8E è un microcontrollore basato su un processore RISC, con un'architettura ARMv7-M Harvard e supporta uno spazio di indirizzamento di 32 bit e aritmetica a 32 bit.

Ha 512 Kbyte di FLASH memory, 96 Kbyte di SRAM e un velocità di clock di 84 MHz (oscillatore al quarzo). Dispone di 54 linee I/O digitali (di cui 12 utilizzate come uscite PWM), 12 input analogici, 4 UARTs (porte seriali hardware), 2 DAC (digital/analog), 2 TWI (per la comunicazione I2C o Two Wire), due porte USB (una usata come host e l'altra con scopi di debug) e una JTAG per la programmazione diretta del microcontrollore e per il debug.

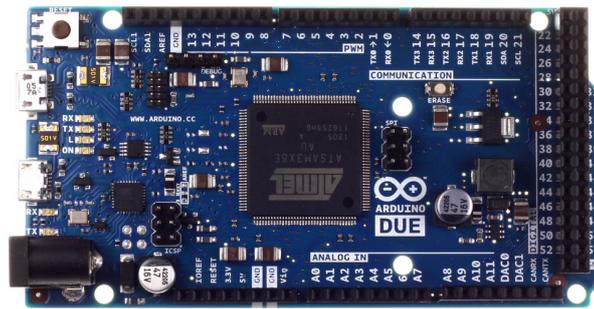


Figura 3.3. Circuito stampato per la vista dall'alto di Arduino DUE.

Nella realizzazione del rivelatore vengono utilizzate principalmente queste componenti e periferiche:

- 9 canali timer a 32-bit (TC)
- un Real time Clock (RTC) a 32 bit a basso consumo
- 16 canali ADC a 12 bit (con modalità di ingresso differenziale e guadagno programmabile)
- un sofisticato interrupt handler attivabile da pin esterni o processi interni
- 2 canali DAC a 12 bit
- 4 porte seriali USARTs

La scheda Arduino Due consente un facile utilizzo del microcontrollore SAM, mettendo a disposizione la maggior parte dei suoi pin. Il firmware specifico per ArduSiPM viene caricato tramite USB e rimane residente nella memoria flash del processore stesso e viene eseguito ad ogni accensione senza bisogno di un computer esterno.

### 3.3 ArduSiPM Shield

La scheda Shield (Figura 3.4)<sup>[1–21–22]</sup> è stata ideata in modo da monitorare, impostare e acquisire i segnali ricevuti dal SiPM tramite il microcontrollore SAM3X8E. La Shield viene collegata tramite i connettori esterni presenti in Arduino. All'interno della scheda sono presenti diversi componenti elettronici per la gestione dei segnali veloci dei SiPM dell'ordine dei ns, qui di seguito vengono riportate le singole parti con le relative funzioni, nella Figura 3.5. viene riportato lo schema a blocchi.

**Convertitore DC-DC:** sono utilizzati per convertire una tensione d'ingresso continua non regolata in una tensione d'uscita continua regolata.

All'ingresso ritroviamo un segnale di 5 V, che viene successivamente convertito in un segnale compreso tra 30 e 100 V. Andando a fissare la tensione nominale è possibile

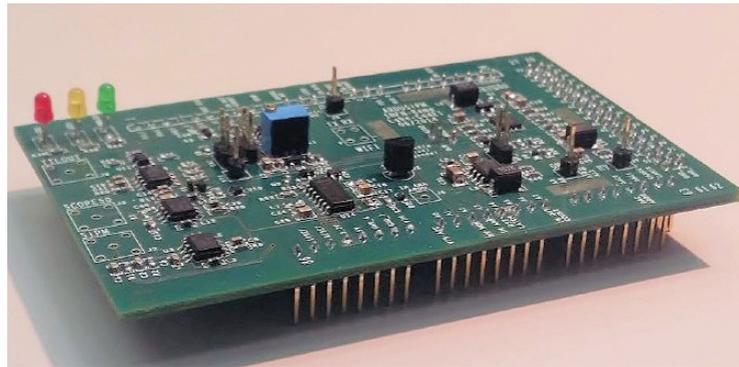


Figura 3.4. Circuito stampato dello Shield ArduSiPM.

variare intorno a quel valore di pochi Volt con una risoluzione a 8 bit. Il valore della tensione di alimentazione è impostato a seconda del tipo di SiPM, volendo può anche essere variato per compensare effetti della temperatura.

**Amplificatore di tensione veloce:** preleva il segnale dal SiPM e ne adatta il valore al range del *fast discriminator* e a quello dell'ingresso del blocco ADC di Arduino Due. Viene utilizzato un amplificatore veloce per seguire la risposta del SiPM di pochi ns e per ricevere il segnale lineare in tutta la gamma del SiPM. Si tratta di un'amplificatore con un rumore inferiore al segnale di un singolo pixel del SiPM per garantire una accurata discriminazione e precisione nella misura dell'ampiezza.

**Fast Discriminator:** è costituito da un discriminatore veloce a 7ns che viene utilizzato per selezionare i segnali, provenienti dal SiPM, sopra il valore di soglia e per contarli, collegandone l'uscita a un contatore in Arduino Due. Il valore di soglia è controllato digitalmente tramite un canale DAC e monitorato utilizzando un canale ADC. La durata in tempo del segnale discriminato è programmata in modo da evitare il conteggio degli *after pulse* e per controllare il tempo morto nell'acquisizione di un impulso.

**Rivelatore di picco:** è costituito da un preciso circuito con un rivelatore di picco veloce utilizzato per mantenere la tensione di picco. Il rivelatore presenta una commutazione di carica molto breve in modo da poter misurare gli impulsi brevi provenienti dal SiPM. Gli impulsi sono allungati di oltre un  $1 \mu\text{s}$ , in modo da poter convertire il segnale dall'ADC di Arduino Due in 12 Bits.

Un segnale digitale programmabile controlla il circuito di scarica veloce per ripristinare il rivelatore di picco dopo l'acquisizione da parte dell' ADC, per riarmare il sistema per una nuova acquisizione.

**LED di monitoraggio:** tramite arduino si è inserito il collegamento con due LED; il primo si illumina ad ogni impulso sopra la soglia, il secondo ogni dieci impulsi nella finestra di un secondo.

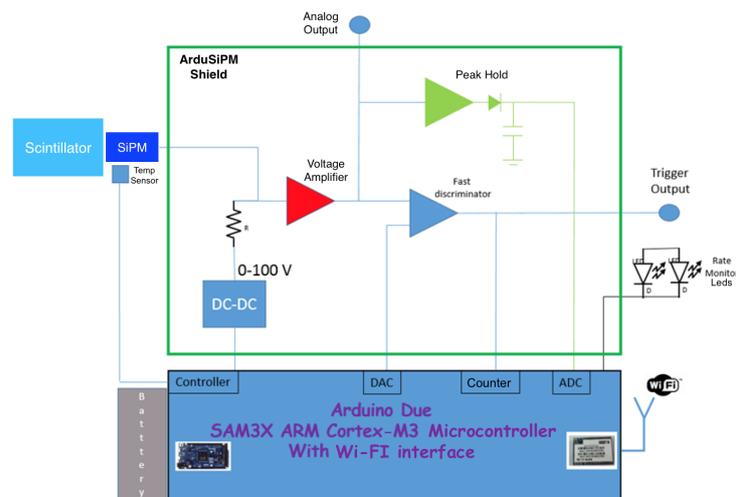


Figura 3.5. Schema a blocchi della scheda Shield denominata ArduSiPM.

### 3.4 ArduSiPM

Grazie alla struttura di Arduino Due è possibile accedere a tutte le funzionalità del processore tramite connessioni esterne, questa caratteristica è stata sfruttata per collegare Arduino con la scheda Shield.

Per la scrittura del software da implementare sulla scheda sono state utilizzate istruzioni di alto-livello per il programma principale, la gestione degli interrupt e microprogrammazione delle periferiche interne come i contatori, ADC e DAC e del controllore di interrupt.

Nella realizzazione del rivelatore sono state sfruttate in particolare alcune delle peculiarità presenti all'interno di arduino, come il modulo di timer, la conversione di ADC e DAC e la comunicazione seriale.

**Moduli Timer:** presenti nel microprocessore SAM3X8E sono programmati per gestire tutte le temporizzazioni e le misure del tempo dei segnali del rivelatore.

**Modulo di conversione ADC e DAC:** all'interno del microcontrollore sono presenti convertitori da digitale a analogico (DAC) e convertitori da analogico a digitale (ADC).

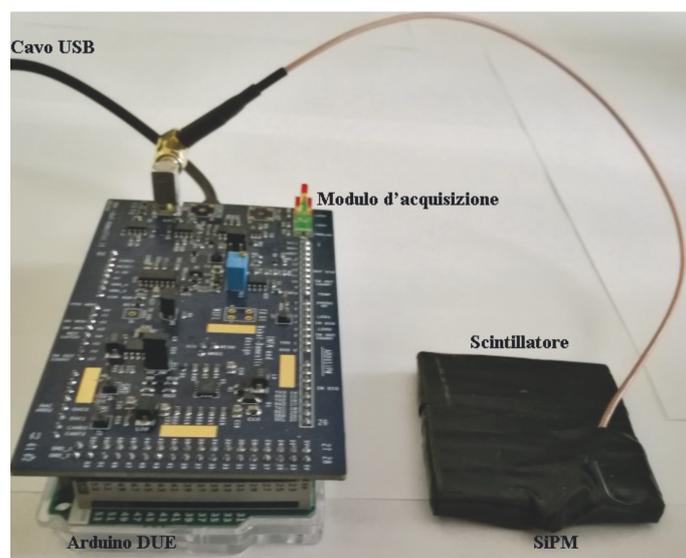
Il convertitore da analogico a digitale è utilizzato per acquisire l'ampiezza del picco rivelato dal SiPM. Gli altri canali di ADC sono utilizzati per controllare il valore di soglia per la selezione dell'impulso e per una prima impostazione della tensione di alimentazione del SiPM.

**Comunicazione seriale:** arduino supporta diversi meccanismi di comunicazione con dispositivi esterni come : USART, SPI, I2C/TWI. Questi vengono utilizzati per caricare e gestire il programma eseguito sul microcontrollore e per collegare dispositivi esterni utilizzati anche per la lettura dati (GPS, Open Log Data Logger).

Tra i diversi canali per la comunicazione seriale uno di questi può essere utilizzato per la lettura della temperatura in correlazione con la scheda Shield.

Grazie ai singoli componenti appena descritti si è in grado di costruire un rivelatore di particelle completo della parte di controllo, di misura e di acquisizione e trasmissione dei dati (riportato in Figura 3.6).

Lo Shield gestisce la parte veloce di elaborazione del segnale, mentre il microcontrollore presente su Arduino DUE, grazie al firmware implementato su di esso, riesce a eseguire tutti i meccanismi alla base della rilevazione e della trasmissione, una volta collegati tutti i componenti basta collegarlo ad un'alimentazione. Questo rende la struttura del rivelatore leggera, comoda nel trasporto e semplice nell'utilizzo.



**Figura 3.6.** Rivelatore ArduSiPM.

## Capitolo 4

# Sincronizzazione

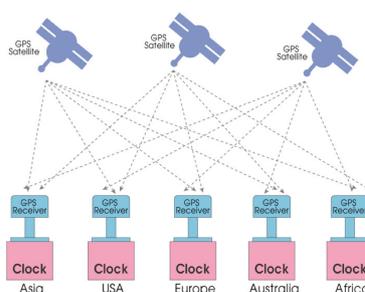
Utilizzando la struttura del rivelatore ArduSiPM è possibile integrare parti esterne e aggiungere funzionalità di controllo al firmware per apportarne modifiche.

Per lo studio degli sciami di raggi cosmici è necessario un rivelatore che segnali il passaggio di particelle in un tempo non relativo al proprio zero temporale, ma in uno assoluto, uguale in ogni luogo si misuri e uguale per ogni rivelatore usato.

Si presenta quindi il problema della sincronizzazione dei rivelatori.

Dalla ricerca di un metodo per la sincronizzazione dei rivelatori nascono diversi quesiti sulla realizzazione della stessa; primo fra tutti quello di dare un intervallo di tempo di validità per la sincronizzazione. Questo valore è strettamente legato alla strumentazione utilizzata. Per questo motivo non si è scelto di sincronizzare gli orologi interni dei microcontrollori, ma è stata utilizzata una sincronizzazione GPS (*Global Positioning System*), come nello schema di Figura 4.1.

Gli orologi interni dei microcontrollori infatti hanno un errore di qualche decina di ppm<sup>1</sup>, che quindi porterebbe a misure sfasate di decine di microsecondi già dopo un solo secondo.



**Figura 4.1.** Schema dell'utilizzo dei GPS nella sincronizzazione.

Del ricevitore GPS si è utilizzato il segnale PPS<sup>2</sup> per scandire i secondi e la sua porta seriale che trasmette informazioni. Il firmware di ArduSiPM è stato quindi modificato per agganciare l'acquisizione al segnale PPS e decodificare le stringhe del codice NMEA in uscita dal GPS.

<sup>1</sup>Parte per milione.

<sup>2</sup>Pulse Per Second: è un segnale elettrico che indica l'inizio di un secondo.

Tramite l'utilizzo del GPS time è possibile considerare un tempo unico per i rivelatori con un errore di circa 25 ns (25 ppb), valore dato dalla accuratezza del modulo GPS.

## 4.1 Global Positioning System

Il sistema di posizionamento globale GPS è stato lanciato nel 1973 dal dipartimento di difesa statunitense e è diventato completamente operativo nel 1995<sup>[23]</sup>. Il dispositivo sfrutta una rete dedicata di satelliti artificiali, ad oggi 31, in orbita per fornire ad un ricevitore GPS informazioni sulla propria posizione geografica e sull'orario. Il GPS utilizza un metodo di posizionamento sferico (trilaterazione) che parte dalla misura del tempo impiegato da un segnale radio a percorrere la distanza satellite-ricevitore. Si può determinare il luogo in cui è posto il ricevitore considerando che i segnali provenienti dai satelliti possono essere rappresentati come sfere e che disponendo di almeno quattro sfere (satelliti) è possibile trovarne il punto d'intersezione. Per calcolare la distanza a cui è posto il ricevitore rispetto ai satelliti viene fatta una valutazione del tempo unidirezionale. Conoscendo quindi la velocità delle onde radio e da quanto tempo il segnale è partito dal satellite viene calcolato lo spazio percorso. La precisione degli orologi interni ai satelliti è quindi di fondamentale importanza. Ogni satellite ha a bordo quattro orologi atomici ad altissima precisione, mentre per i ricevitori non essendo possibile utilizzare orologi atomici, soprattutto per il loro costo, vengono utilizzati orologi che assicurino l'accuratezza necessaria a brevi periodi, ma dovendo mantenere un'altissima precisione vengono corretti frequentemente<sup>[24-25]</sup>. Quando le quattro sfere non si intersecano perfettamente il ricevitore non è sincronizzato. Per correggere l'orario il ricevitore esegue una routine che termina solo quando le quattro sfere si intersecano, questo avviene ogni volta che il ricevitore viene inizializzato.

Per sincronizzare i due rivelatori sono stati utilizzati due mini moduli GPS economici (Figura 4.2) e due antenne (Figura 4.3) dello stesso modello in modo da ridurre al minimo le differenze di ricezione.



Figura 4.2. Ricevitore GPS.



Figura 4.3. Antenna.

## PPS

Un tipico ricevitore GPS consiste in un modulo radio, un demodulatore e un microcontrollore. Una volta alimentato il GPS calcola le sue coordinate spaziali e successivamente inizia a generare il segnale PPS (low-jitter<sup>3</sup>), settando il suo orologio interno con le informazioni sull'ora ricevute dai satelliti. Non tutti i ricevitori GPS mettono a disposizione il segnale PPS.

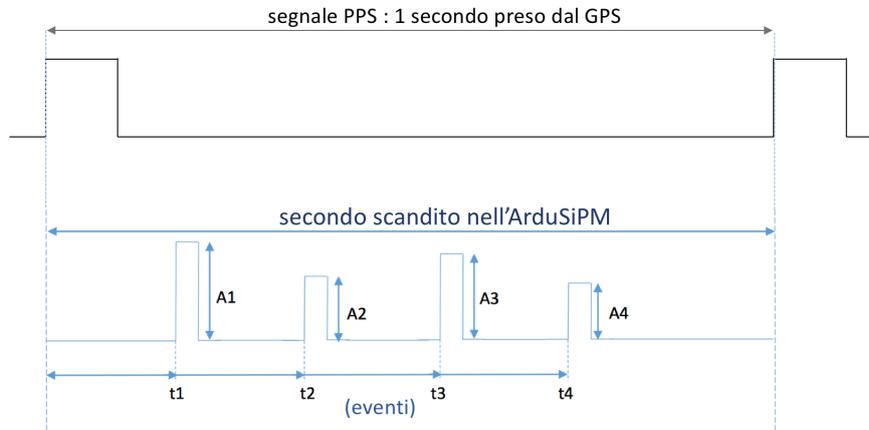
Il segnale PPS è un impulso di livello TTL, che può essere prelevato direttamente ed utilizzato per scandire il secondo. Nella maggior parte dei ricevitori GPS le fluttuazioni del periodo di 1-pps sono, nel peggiore dei casi, dell'ordine di alcune decine di ns.

Il segnale PPS ricevuto non specifica un tempo, ma l'inizio del secondo e può essere utilizzato insieme ad un'altra sorgente di tempo per ottenere una misura di data e tempo accurata e precisa.

Viene riportato nella Figura 4.4 una schema di come il segnale della PPS sia stato utilizzato per determinare un range temporale per analizzare gli eventi.

L'ArduSiPM fa partire il secondo all'arrivo del segnale di salita della PPS, all'interno del quale possono essere registrati o meno degli eventi. Il secondo termina al successivo segnale di salita della PPS. In questo istante quindi viene chiuso il primo range temporale e viene aperto il successivo.

Questo meccanismo persevera a patto che il GPS continui a ricevere il segnale, in caso contrario lo scandire del secondo viene gestito dal clock interno di Arduino Due e non più dalla PPS.



**Figura 4.4.** Schema del segnale scandito dell'ArduSiPM.

Nella sincronizzazione degli ArduSiPM si è sfruttata l'uscita PPS per scandire il secondo e si è prelevata dall'uscita TX del modulo GPS l'informazione riguardante data e tempo.

<sup>3</sup>Per jitter si intende il fenomeno della irregolarità del clock in un segnale digitale

## Protocollo NMEA

Il modulo GPS utilizza per la comunicazione il protocollo NMEA<sup>[27]</sup>. Nelle stringhe NMEA sono presenti diverse informazioni riguardanti la posizione geografica del ricevitore, con latitudine e longitudine, l'ora, la data, il numero di satelliti attivi e in vista, la velocità di terra e di mare, le rotte e molto altro ancora.

Per la sincronizzazione è stata utilizzata la stringa GPZDA, che contiene informazioni sull'orario (ore, minuti, secondi), sulla data (giorno, mese e anno) e zona del fuso orario (ore e minuti), come riportato nella Figura 4.5.

```
$GPZDA,hhmmss.ss,day,month,year,local.zone,local.zone.minutes*checksum
```

```
$GPZDA,164910.000,09,03,2018,00,00*5C
```

**Figura 4.5.** Esempio di una stringa GPZDA del codice NMEA.

Dopo aver letto e salvato le informazioni della stringa si è scelto uno specifico formato per la stampa dei dati, questo viene riportato nel paragrafo successivo.

## 4.2 Elaborazione dei dati GPS tramite ArduSiPM

Nella stringa dell'output dell'ArduSiPM, riportata in Figura 4.6, sono presenti informazioni riguardanti l'orario, l'evento (inteso come rilevamento del passaggio di una particella carica attraverso lo scintillatore) e il numero di clock interni avvenuti in un intervallo della PPS.

La prima parte della stringa contiene l'informazione prelevata dal GPS e riporta nell'ordine anno, mese, giorno, ora e minuti, il tutto preceduto dalla lettera *G*. Questa parte della stringa non è presente ad ogni secondo, ma solo una volta in un minuto. Questa scelta è stata presa essendo la decodifica della stringa NMEA e la successiva scrittura un processo che appesantisce e occupa eccessivamente il microcontrollore. Non è necessaria la presenza di questa parte di stringa ad ogni secondo, poichè è deducibile dall'ultima acquisizione fatta. Successivamente vengono riportati i secondi preceduti dalla lettera *S*, che vengono scanditi dal segnale della PPS. Poichè è possibile che il GPS perda il segnale nell'output vengono riportati i simboli *g* e *s*, ciò indica che la data riportata è quella interna presente nel microcontrollore e i secondi sono quelli del clock interno del microcontrollore.

Se è stato rilevato un evento allora nella stringa viene scritta la lettera *T* seguita da un numero esadecimale corrispondente al numero di clock interni contati dal microcontrollore tra l'inizio del secondo e il momento in cui è stato ricevuto il segnale. L'ultimo termine della stringa definito con la lettera *K* indica il numero di clock interni in un impulso della PPS.

Di seguito si riporta una descrizione più nel dettaglio dei valori corrispondenti alla *K* e alla *T*.

|             |     |    |     |           |           |   |
|-------------|-----|----|-----|-----------|-----------|---|
| K           |     | K  | K   | K         |           | K |
| E           |     | E  | E   | E         |           | E |
| YA          | MM  | GG | HH  | MM        | YSS       | Y |
| G1812312341 | S00 | T3 | AEB | T12345678 | K41999532 |   |

Figura 4.6. Formato dati dell'output del rivelatore ArduSiPM.

**K:** il valore teorico della  $K$ , poichè si sta lavorando su una frequenza di 42 MHz, dovrebbe corrispondere a 42milioni. Dalle prime prove sperimentali si riscontra non solo un valore diverso, ma discordante tra i due ArduSiPM, come aspettato. Si ottengono per il primo microcontrollore delle  $K$  intorno a 41998616 e per il secondo intorno a 41998390. Questo risultato è correlato all'errore prodotto dall'oscillatore al quarzo, che in un intervallo di un secondo della PPS non compie 42milioni colpi di clock. Si ha per il primo microcontrollore un errore di 33 ppm e per il secondo 38 ppm, come previsto quindi i quarzi di Arduino hanno una precisione di qualche decina di ppm. Gli oscillatori possono quindi risultare sia più "lenti", come nel nostro caso, che più veloci a seconda del quarzo utilizzato.

Questo risultato è la prova dell'impossibilità di sincronizzare i rivelatori utilizzando il clock interno del microcontrollore, poichè porterebbe ad uno sfasamento nel tempo tra i due ArduSiPM.

La poca affidabilità dell'oscillatore al quarzo per la sincronizzazione è legata anche alla variazione della frequenza di oscillazione in funzione di diversi parametri fisici, come temperatura e pressione<sup>[28]</sup>. Si avrebbero quindi anche  $K$  diverse per un singolo rivelatore se questo fosse sottoposto a cambiamenti di temperatura e pressione nell'arco di una singola presa dati.

**T:** il valore di  $T$ , corrispondente al numero di clock scanditi dall'inizio del secondo al rilevamento di un segnale da parte del SiPM, viene utilizzato nell'analisi dati per definire quando viene rilevata la particella. I segnali nei due scintillatori che producono delle coincidenze sono prodotti dal passaggio di muoni, componente principale dei raggi cosmici secondari.

Si va a considerare il secondo come un insieme di  $K$  caselle una di seguito all'altra. All'inizio del secondo ci troviamo sulla prima casella e ad ogni battito di clock saltiamo nella casella adiacente, ma se arriva un segnale da parte del SiPM si registra la casella un cui risiediamo, come mostra lo schema nella Figura 4.7.

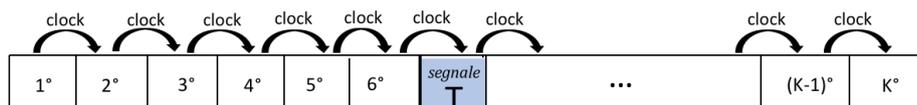


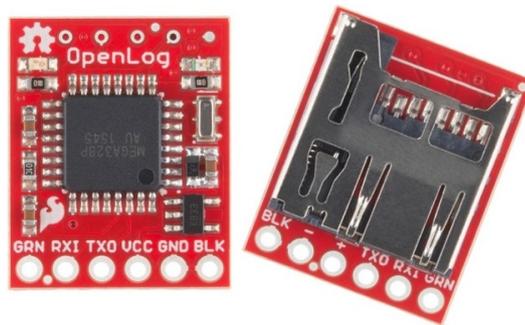
Figura 4.7. Schema dei clock interni.

Per calcolare quindi il tempo intercorso tra l'inizio del secondo e l'evento è necessario normalizzare il numero di clock di  $T$  con il numero di clock totale  $K$  e moltiplicarlo per l'unità temporale.

$$t_{evento} = \frac{\#clock_T}{\#clock_K} * (unità.temporale)$$

## Data Logger

Per poter salvare i dati dell'ArduSiPM durante il processo di misura è stato utilizzato un Open Log Data Logger<sup>[29]</sup>, come quello riportato in Figura 4.8, il quale fornisce una semplice interfaccia seriale per salvare i dati all'interno di una microSD. Nell'impostazioni dell'Open Log è necessario definire la velocità di acquisizione dati utilizzata, per l'ArduSiPM si è utilizzata una baud rate<sup>4</sup> di 115200 baud.



**Figura 4.8.** Foto dell'Open Log Data Logger usato.

---

<sup>4</sup>Numero di simboli trasmessi in un secondo.

## Capitolo 5

# Setup sperimentale e risultati

Si è preparato un setup sperimentale per effettuare le prime misure con due ArduSiPM sincronizzati tramite GPS.

Lo scopo principale di questo esperimento è quello di ottenere delle coincidenze nel range di tempo dato dalla precisione del modulo GPS utilizzato, quindi all'interno dei 25 ns, per avere prova dell'avvenuta sincronizzazione dei due rivelatori.

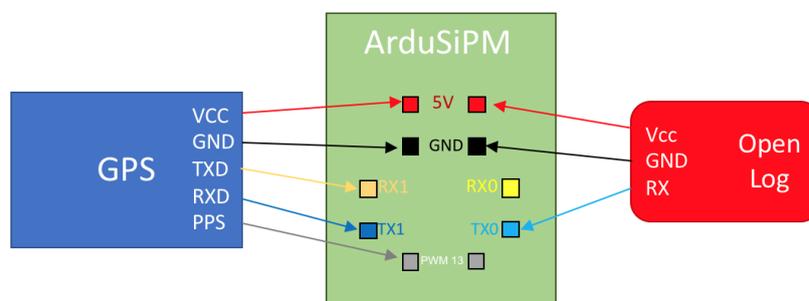
Questo esperimento riguarda una prima fase di messa a punto di un sistema per misure sincronizzate tramite ArduSiPM, che può essere sfruttato per diversi esperimenti apportando le opportune modifiche.

### 5.1 Set up sperimentale

Nel set up sperimentale vengono utilizzati i seguenti dispositivi:

- due scintillatori plastici
- due ArduSiPM (codice seriale 10379 e 10386)
- due ricevitori GPS con relative antenne
- due Open Log con due microSD

Si riporta nella figura 5.1 lo schema semplificato dei collegamenti tra l'ArduSiPM, il GPS e l'Open Log, necessario per la sincronizzazione e il salvataggio dati.



**Figura 5.1.** Schema dei collegamenti eseguiti tra l'ArduSiPM, l'Open Log e il GPS.

Vengono effettuate tre diverse prese dati, con l'apparato sperimentale riportato in Figura 5.2. Nella prima i due scintillatori vengono posti ad una distanza di circa 20 cm l'uno dall'altro, nella seconda vengono attentamente sovrapposti i due scintillatori bloccandoli tramite degli elastici ponendo lo scintillatore dell'ArduSiPM 10386 sopra e il 10379 sotto, mentre nella terza viene posto il 10379 sopra e il 10386 sotto. Ogni presa dati ha una durata all'incirca di 12 minuti.

Si procede con un'analisi preliminare della sincronizzazione tramite il collegamento dell'ArduSiPM al computer appurando che le seriali visibili nello sketch del software di Arduino scandiscano il secondo contemporaneamente e che riportino lo stesso orario. Vengono quindi scollegati i due ArduSiPM dal computer e vengono inserite le due micro SD.

Si procede all'analisi dati prendendo i file creati all'interno delle microSD. Per fare questo si utilizza un programma in grado di decodificare ogni stringa (strutturata con la sequenza descritta precedentemente, riportata in Figura 4.6) e salvare solo le stringhe con la presenza di eventi. Confrontando i due file finali è possibile ricavare le coincidenze temporali.

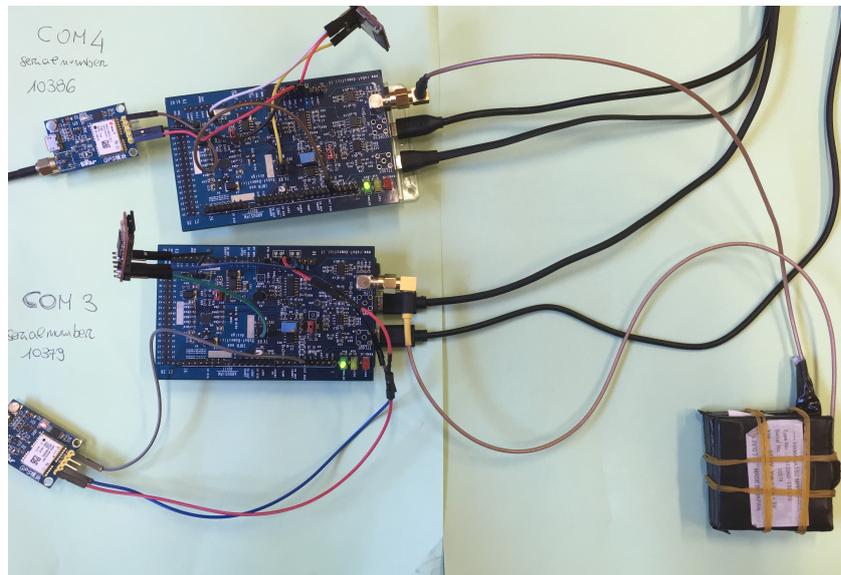


Figura 5.2. Apparato sperimentale.

## 5.2 Analisi Dati

Scopo dell'esperimento è quello di verificare la corretta sincronizzazione tramite GPS dei due ArduSiPM.

Nelle prese dati si è registrata una rate di eventi per i rivelatori di  $(0.53 \pm 0.05)\text{Hz}$ . Non tutti i segnali prodotti nello scintillatore provengono dai muoni presenti nei raggi cosmici, si hanno infatti diversi segnali detti "falsi positivi" che possono corrispondere a segnali prodotti dalla radioattività ambientale o artificiale.

Per verificare il corretto funzionamento dei rivelatori abbiamo posizionato una

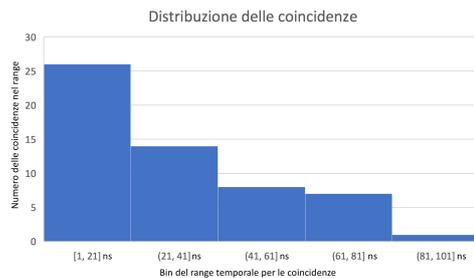
reticella di Auer <sup>1</sup> sopra lo scintillatore, osservando un'aumento del conteggio di eventi da parte dell'ArduSiPM. L'aumento del numero di eventi registrati è causato dalla natura radioattiva del Torio, componente principale della calza.

Un ulteriore fattore da prendere in esame è la possibilità che un muone entrante nel primo scintillatore non attraversi il secondo. Il rapporto tra il numero di muoni che attraversano entrambi gli scintillatori e il numero di muoni che attraversano il primo scintillatore è definita accettazione angolare. Questo valore è strettamente legato alla distanza verticale tra i due scintillatori, alla loro forma e dimensione.

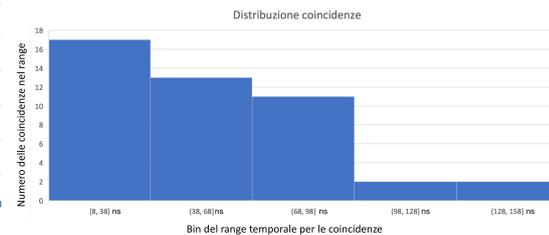
Con i limiti strumentali dati dalla tecnologia GPS, è possibile considerare coincidenti due eventi rilevati da due ArduSiPM sincronizzati se la differenza temporale tra i due è dell'ordine dei nanosecondi.

Analizzando la distribuzione della differenza temporale tra gli eventi registrati dai due ArduSiPM è possibile delineare le coincidenze.

Nelle due prese dati con gli scintillatori sovrapposti sono stati trovati diversi eventi di coincidenza. I due grafici nelle Figure 5.3 e 5.4 riportano la distribuzione della differenza temporale tra due eventi. Come è possibile notare dal grafico in entrambi i casi si hanno soprattutto differenze temporali nel range dei 25-50 nanosecondi.



**Figura 5.3.** Prima presa dati con scintillatori sovrapposti.



**Figura 5.4.** Seconda presa dati con scintillatori sovrapposti.

Vengono riportati i dati nella Tabella 5.1.

Nella presa dati, di durata 10 minuti, con i due scintillatori posti distanziati non sono state trovate coincidenze.

| Scintillatori  | Range 25 ns | Range 50 ns |
|----------------|-------------|-------------|
| distanti       | //          | //          |
| 1° sovrapposti | 32          | 47          |
| 2° sovrapposti | 17          | 30          |

**Tabella 5.1.** Tabella con il numero di coincidenze nelle tre prese dati.

La probabilità che la coincidenza rilevata sia generata da due raggi cosmici incidenti simultanei ( $\Delta t < 25$  ns) è praticamente nulla. Si considera la probabilità di

<sup>1</sup>La reticella di Auer utilizzata nelle lampade da campeggio contiene il Torio.

rilevare due particelle simultanee come la probabilità che una prima pallina entri in una determinata casella e che successivamente la seconda entri nella stessa identica casella. Nella nostra configurazione le caselle disponibili sono all'incirca 42milioni (il valore esatto corrisponderebbe alla  $K$ ), considerando quindi la rate dei nostri rivelatori  $Rate_{single} = (0.53 \pm 0.05)Hz$  e una finestra temporale di coincidenza di 25 ns, per calcolare la probabilità che avvenga una coincidenza tra due canali separati ottengo<sup>[30]</sup>:

$$P_{double} = Rate_{single} * \Delta t$$

Quindi per la rate della coincidenza, essendo  $R_{double} = 2 * R_{single}$ , si avrà:

$$\begin{aligned} Rate_{coincidenza} &= Rate_{double} * P_{double} = 2 * R_{single} * R_{single} * \Delta t = \\ &= 2 * R_{single}^2 * \Delta t = 2 * (0.53Hz)^2 * 25ns \simeq 10^{-8}Hz \end{aligned}$$

Una rate troppo bassa per considerare le coincidenze sperimentali causate da due raggi cosmici incidenti simultanei e non dallo stesso raggio cosmico.

Per avere un riscontro con i dati ottenuti si prende in esame l'articolo sullo studio delle coincidenze Est-Ovest con l'utilizzo degli ArduSiPM<sup>[31]</sup>, dove sono state eseguite diverse prese dati simili a quelle eseguite in questa dissertazione, con la differenza che sono utilizzate coincidenze hardware locali tramite una porta logica AND e non software con sincronizzazione GPS, come nel nostro caso. Nell'articolo si riporta la rate ottenuta per diverse direzioni dei due scintillatori, è possibile quindi fare un primo confronto.

Dalle due prese dati effettuate è stato ottenuto un valore medio di  $(26 \pm 10)$  coincidenze ogni 10 minuti nel range dei 25 ns, valore in accordo con i dati riportati dall'articolo. I risultati ottenuti convalidano l'ipotesi della sincronizzazione dei due ArduSiPM, che possono quindi essere utilizzati per lo studio degli sciami dei raggi cosmici.

Facendo ipotesi geometriche sulla propagazione degli sciami o sul singolo raggio cosmico si è in grado di progettare nuovi esperimenti. Partendo per esempio dall'insieme di più rivelatori sincronizzati disposti su un'area estesa, si è in grado di mappare l'"impronta" di uno sciame sul terreno e definirne tramite un'analisi geometrica il vertice, cioè il punto in cui il protone primario ha interagito con l'alta atmosfera.

### 5.3 Progetto EOS ArduSiPM

La facilità di utilizzo e il prezzo contenuto hanno reso l'ArduSiPM uno strumento impiegato in diversi esperimenti e progetti scolastici, inseriti anche nell'alternanza scuola-lavoro.

I due ArduSiPM nella configurazione Data Logger messi in funzione e testati nella dissertazione, sono stati utilizzati nello EOS Project (Figura 5.5).

Il 30 Giugno è stato lanciato il pallone aerostatico EOS, realizzato dai ragazzi dell'Istituto Tecnico Industriale A.Russo di Nicotera a compimento di un progetto alternanza scuola lavoro seguito dal Prof. Domenico La Malfa, dal Dr. Antonino Brosio e Dr. Antonella Tripodi del Parco Astronomico Lilio e dal Dr. Valerio Bocci e Dr. Francesco Iacoangeli per l'INFN. Il pallone ha raggiunto i 27.000 metri di quota. All'interno della sonda sono stati inseriti due rivelatori ArduSiPM che hanno registrato tramite i Data Logger il flusso di raggi cosmici al variare della quota, monitorata tramite un modulo GPS montato sulla sonda. In Figura 5.6 si riportano alcune foto del lancio della sonda.



**Figura 5.5.** Capsula contenente l'ArduSiPM.

In Figura 5.6 si riportano alcune foto del lancio della sonda.



**Figura 5.6.** In alto a sinistra si riporta una foto del pallone dopo esser stato lanciato, in basso a sinistra una foto fatta dal pallone e a destra il gruppo che ha partecipato al lancio della sonda.

In Figura 5.7 si riporta il tragitto della sonda registrato dalla strumentazione a bordo.

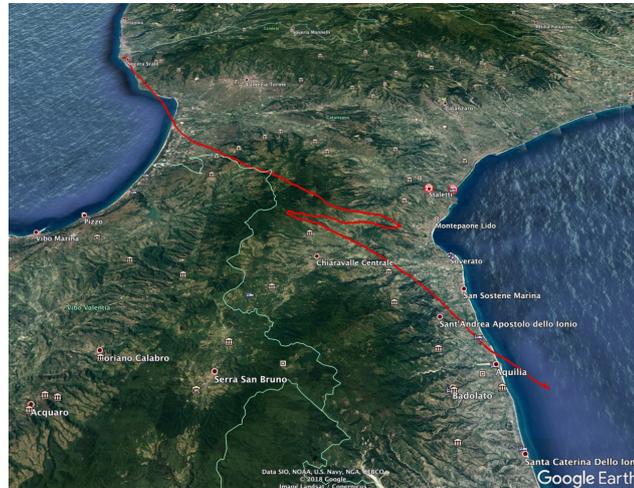


Figura 5.7. Tragitto seguito dal pallone.

Eseguito il recupero è stato possibile analizzare i dati rilevati dai due ArduSiPM, che hanno delineato un andamento in accordo con quello misurato dal fisico tedesco E. Regener insieme ad un suo studente Georg Pfozter agli inizi del 1930. Grazie ai dati raccolti è stato possibile definire anche il massimo di Regener-Pfozter, come si può vedere dal grafico riportato in Figura 5.8. Questo esperimento è stato la prova della possibilità di realizzare sonde replicabili e a basso costo per la misura del flusso dei raggi cosmici fino alla stratosfera.

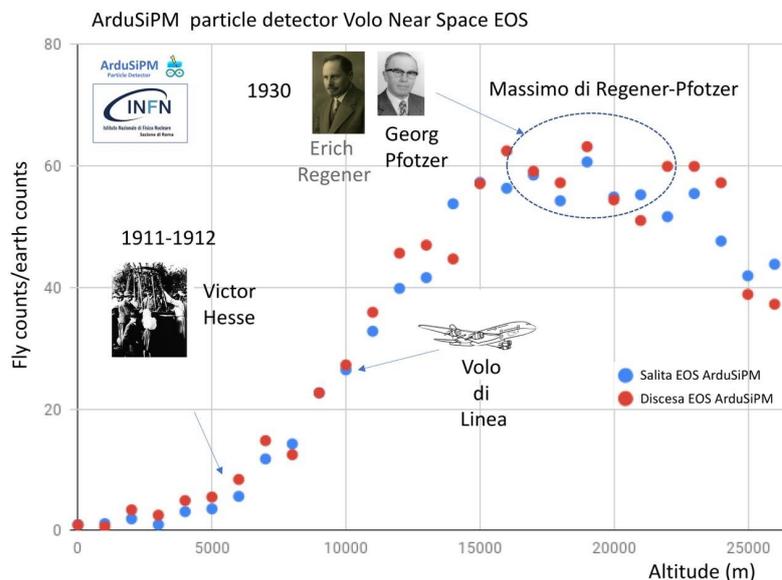


Figura 5.8. Flusso dei raggi cosmici registrato nel progetto EOS.

# Conclusioni

Nello svolgimento del lavoro di questa dissertazione è stata effettuata una sincronizzazione tramite GPS di due rivelatori ArduSiPM per rendere possibile la misura sincronizzata da parte di due o più rilevatori distinti, distanti spazialmente.

I dati ottenuti sono in accordo con le previsioni fatte e con gli esperimenti effettuati tramite diverse modalità, dove era stata misurata la rate di raggi cosmici incidenti, è stato quindi possibile concludere che i due ArduSiPM risultassero sincronizzati nel range delle decine di nanosecondi.

Grazie a questo esito si è in grado di sviluppare nuovi progetti, esperimenti, incentrati sullo studio degli sciame di raggi cosmici.

La stessa configurazione è stata utilizzata nel Giugno 2018 per la misura del flusso dei raggi cosmici in quota durante il lancio del pallone aerostatico EOS fino alla quota di 27000 metri ritrovando il massimo scoperto da Regener e Pfozter nel 1934.

Oltre al progetto EOS sono in programma diverse collaborazioni con altre sezioni INFN e Istituti Scolastici nell'ambito del progetto di terza missione OCRA (Outreach Cosmic Ray Activity). In particolare nel prossimo anno è prevista la realizzazione delle stazioni MAYA (Mini ArraY ArduSiPM), dove saranno letti in contemporanea quattro ArduSiPM distanti decine di metri, collegandoli tramite Wi-Fi. Tale configurazione sarà utilizzata in ambito didattico per lo studio del profilo degli sciame dei raggi cosmici.

Si utilizzeranno delle stazioni contenenti un rivelatore ArduSiPM sincronizzato tramite GPS, un processore WI-FI, un powerbank, un pannello solare, un datalogger microSD e altri sensori (di pressione, temperatura e umidità), utilizzando le tecniche tipiche dell'Internet delle cose (IOT, Internet Of Things)<sup>[22]</sup>.

Analizzando i dati raccolti dalle stazioni sarà possibile dare una stima della direzione di arrivo dello sciame e eseguendo rilevazioni su un periodo temporale medio-lungo si potrebbe confrontare la media del rate delle cascate di particelle in funzione del tempo con altri parametri fisici.

Gli impieghi di questo rivelatore sono innumerevoli, dall'applicazione medica a quella ambientale, dall'ambito accademico a quello scolastico. Essendo costruito sfruttando una piattaforma open-source, è possibile modellarne il meccanismo alla base per migliorarlo o specializzarlo per un determinato progetto.

# Bibliografia

- [1] Bocci V. et Al., “The ArduSiPM a compact transportable Software/Hardware Data Acquisition system for SiPM detector”, arXiv:1411.7814 [physics.ins-det] IEEE NSS-MIC 2014, Seattle. DOI: 10.1109/NSSMIC.2014.7431252.
- [2] Solfaroli E., Camillocci et al.,” First ex vivo validation of a radioguided surgery technique with  $\beta$ -radiation.”, *Physica Medica* Volume 32, Issue 9, September 2016, Pages 1139-1144 DOI:10.1016/j.ejmp.2016.08.018
- [3] Iacoangeli F. et al. , “Nuclear Interaction Detector system for UA9 experiments based on ArduSiPM prototype”,IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2015, DOI: 10.1109/NSSMIC.2015.7581878.
- [4] Alessandro De Angelis, “L’enigma dei raggi cosmici”, Milano: Springer, 2012.
- [5] Carlson P., Watson A. A., “Erich Regener and the ionisation maximum of the atmosphere”, *Hist. Geo Space Sci.*, 5, 175–182, 2014.
- [6] Erich Regener & Georg Pfozter., “Intensity of the Cosmic Ultra-Radiation in the Stratosphere with the Tube-Counter”, *Nature* 134(3383):325-325, January 1934 DOI: 10.1038/134325b0
- [7] Griffiths D., “Introduction to Elementary Particles”, Wiley-VCH, Weinheim, 2° ediction 2008.
- [8] Das A. and Ferbel T., “Introduction to Nuclear Particle Physics”, World Scientific, Singapore, 2nd Edition (2009) <sup>[1]</sup>
- [9] Alesini D., “Acceleratori di Particelle come sono, come funzionano, applicazioni e frontiere” LNF-INFN, Frascati, 2018.
- [10] The IceCube Collaboration, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, “Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A” VLA/17B-403 teams\*,*Science*, 13 Jul 2018.
- [11] The Pierre Auger Collaboration, “Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above  $8 \cdot 10^{18}$  eV”, *Science* 22 sept, 2017, Vol. 357, Issue 6357, pp 1266-1270, DOI: 10.1126/science.aan4338.

- [12] B.Bengston, M. Moszynski, "Status of timing with plastic scintillation detectors", Nuclear instruments and methods, 177, 227,1974.
- [13] TN-Intro ti SPM tech, SensL.
- [14] Bondarenko G. et Al., "Limited Geiger-mode microcell silicon photodiode: new results Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.", A 442 187– 92, 2000.
- [15] Eckert P. et al., "Characterisation studies of silicon photomultipliers," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 620, 217–226 (2010).
- [16] Axani S. N. et Al., "The dektop muon detector: A simple, physics-motivated machine- and electronics-shop project for university students", American Journal of physics, 2017.
- [17] PARALLAX, "Che cosa è un microcontrollore?", Guida per studenti, versione 3.
- [18] EDGEFX, "What is RISC and CISC Architecture with Advantages and Disadvantages", 2018.
- [19] AT91 SAM3x8e Atmel corporation data sheet.
- [20] Bocci V., "Introduzione ad arduino", materiale didattico, 2017-2018.
- [21] Bocci V. et Al., "A low cost network of spectrometer radiation detectors based on the ArduSiPM a compact transportable software/hardware data acquisition system with Arduino DUE", 2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA) Pages: 1 - 5, DOI: 10.1109/ANIMMA.2015.7465621.
- [22] Bocci V., "An educational distributed Cosmic Ray detector network based on ArduSiPM.", Journal of Physics: Conf. Series Volume 898 (2017), doi:10.1088/1742-6596/898/10/102011.
- [23] Dana P. H., Penrod B. M., "THE ROLE OF GPS IN PRECISE TIME AND FREQUENCY DISSEMINATION", Timing & Frequency, 1990.
- [24] Bertorelli P., "Compuserve Aviation Special Interest Group (Avsig)", IFS, 1992.
- [25] Allan W., Ashby N., Hodge C., "The Science of Timekeeping", HEWLETT, Printed in U.S.A. June 1997.
- [26] Siccardi M., "About time measurements", EFTF, 2012.
- [27] Glenn Baddeley, <http://aprs.gids.nl/gps>, 20 July 2001
- [28] John R., "Vig High sensitivity temperature sensor and sensor array", U.S. Patent 5,686,779, Issue date: Nov 11, 1997.
- [29] <http://www.hobbytronics.co.uk/openlog-datalogger>.

- [30] Zichichi A., Progetto “La scienza nelle scuole” EEE, 2004-2017.
- [31] Liguori D., Barone P., “Studio dell’effetto Est-Ovest con i rivelatori ArduSiPM”, La Fisica Nella Scuola, AIF, Anno LI-n.1-gennaio/marzo 2018, ISSN 1120-6527.