

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

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

**Studio delle prestazioni dei rivelatori  
polarquEEEst dopo oltre un anno di  
presa dati alle isole Svalbard**

**Relatore:**  
Prof.ssa Gilda Scioli

**Presentata da:**  
Jacopo Succi

**Correlatore:**  
Dott. Francesco Noferini

Anno Accademico 2019/2020



# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduzione</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1 Raggi Cosmici</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1 Cenni Storici . . . . .   | 5         |
| 1.2 Composizione e classificazione . . . . .  | 5         |
| 1.3 Raggi cosmici primari . . . . .   | 7         |
| 1.4 Raggi cosmici secondari . . . . .   | 9         |
| 1.5 Sciami di raggi cosmici . . . . .   | 11        |
| 1.6 Origine dei raggi cosmici . . . . .   | 14        |
| 1.7 Il limite Greisen–Zatsepin–Kuzmin . . . . .                                     | 15        |
| <b>2 Il progetto PolarquEEEst e il rivelatore POLA-04</b>                           | <b>16</b> |
| 2.1 Progetto PolarquEEEst . . . . .   | 16        |
| 2.2 Struttura generale dei telescopi POLA . . . . .                                 | 17        |
| 2.3 Struttura dei fotomoltiplicatori al Silicio . . . . .                           | 19        |
| 2.4 Materiali scintillatori . . . . .   | 22        |
| 2.5 Principio di funzionamento del rivelatore . . . . .                             | 23        |
| 2.6 Parametro di pseudoefficienza . . . . .   | 24        |
| <b>3 Analisi Dati</b>   | <b>26</b> |
| 3.1 Introduzione alla notazione . . . . .   | 26        |
| 3.2 Miglioramento del software di ricostruzione . . . . .                           | 28        |
| 3.3 Andamento della misurazione durante l’anno<br>e variazione stagionale . . . . . | 29        |
| 3.4 Correzione della misura di flusso per pseudoefficienza . . . . .                | 30        |
| 3.5 Relazione tra pseudoefficienza e ToT . . . . .                                  | 33        |
| 3.6 Andamento dei valori misurati in relazione<br>alla temperatura . . . . .        | 36        |
| <b>Conclusioni</b>  | <b>39</b> |
| <b>Bibliografia</b>   | <b>41</b> |



# Introduzione

Lo studio dei raggi cosmici, sin dalla loro scoperta nei primi anni del Novecento, ha permesso la scoperta di nuove particelle e ha aiutato a definire maggiormente il Modello Standard.

Oggi sono ancora vari e molteplici gli esperimenti portati avanti nel mondo che tentano di capire la natura, la composizione e l'origine di questo fenomeno.

In questo ambito il progetto PolarquEEEst utilizza quattro telescopi per misurare il flusso di muoni derivati da raggi cosmici che incidono sulla superficie terrestre a diverse latitudini.

Durante questa tesi sono stati analizzati i dati provenienti dal telescopio POLA-04, costruito a Bologna e poi installato alle isole Svalbard nel periodo compreso fra l'1 Luglio 2019 e l'1 Luglio 2020, ponendo particolare attenzione alla stabilità dell'efficienza e alla sua dipendenza dai parametri di funzionamento del telescopio e dalle condizioni esterne.

# Capitolo 1

## Raggi Cosmici

### 1.1 Cenni Storici

L'esistenza dei cosiddetti *raggi cosmici* è nota fin dai primi anni del Novecento, grazie agli esperimenti del fisico austriaco Victor Hess, il quale notò, durante alcune misurazioni in mongolfiera, che il tasso di ionizzazione dell'aria aumentava considerevolmente e molto rapidamente una volta superati i 3000 m di altitudine. Oltre a questo il tasso di ionizzazione non diminuiva durante le eclissi solari, prova che portò a concludere che la radiazione rilevata non provenisse solamente dal Sole ma che fosse prodotta anche da altre sorgenti presenti nello spazio cosmico (da qui il nome *raggi cosmici*[1]).

Questo fenomeno naturale fu ampiamente studiato fra il 1920 e 1950 per lo sviluppo di teorie della fisica delle alte energie, essendo una fonte di urti ad altissima energia con i nuclei atomici presenti nell'atmosfera, portando alla scoperta di nuovi tipi di particelle all'epoca sconosciuti come per esempio il muone ( $\mu$ ) e il positrone ( $e^+$ ), insieme anche al contributo alla teoria della QED e alla formulazione della teoria delle *shower* elettromagnetiche.

### 1.2 Composizione e classificazione

I raggi cosmici sono definiti come fasci di particelle elementari e nuclei atomici (protoni, particelle  $\alpha$ , etc...) provenienti dallo spazio cosmico, aventi origine sia nella Via Lattea sia al di fuori di essa. Essendo composti prevalentemente da particelle dotate di carica elettrica essi vengono deviati durante il loro tragitto dai campi magnetici presenti nello spazio intergalattico e dal campo magnetico terrestre in prossimità del nostro pianeta rendendo impossibile ricostruire il punto di origine della radiazione.

Essi coprono un intervallo energetico molto ampio, che si estende dall'ordine di  $\approx 1$  GeV a  $\approx 10^{11}$  GeV, spaziando ben undici ordini di grandezza[2].

Nei loro componenti si trovano maggiormente nuclei di tutti gli elementi della tavola periodica, in varie percentuali, insieme a particelle elementari come elettroni e fotoni che rappresentano circa l'1% del totale.

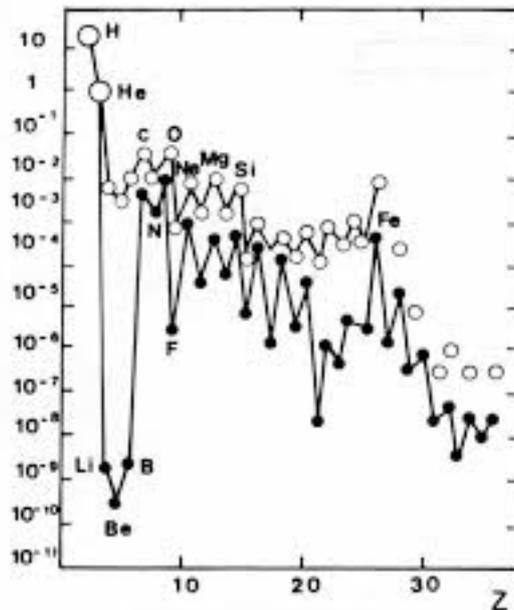


Figura 1.1: *Abbondanza di elementi presenti nel sistema solare (●) e nei raggi cosmici (○).*

I raggi cosmici si suddividono poi in due categorie:

- Raggi primari, i quali sono maggiormente composti da protoni ( $\approx 90\%$ ), nuclei di elio ( $\approx 10\%$ ) e in piccola parte da fotoni, elettroni ed antimateria.
- Raggi secondari, suddivisi in due componenti principali:
  - componente molle ( $\approx 30\%$ ) formata da fotoni, elettroni e in piccola parte da nuclei e mesoni
  - componente dura ( $\approx 70\%$ ) formata da muoni altamente energetici

Prima degli anni '60 l'identificazione dei nuclei che compongono i raggi cosmici primari suggerivano la presenza di elementi fino al Fe ( $Z=26$ ); successivi studi su cristalli meteoritici hanno poi evidenziato la presenza, seppur in minima parte, di elementi più pesanti stimando il rapporto di quantità a  $\approx 2 \times 10^{-12}$  per elementi con  $Z > 60$ .

L'abbondanza di elementi presenti nei raggi cosmici differisce poi da quella tipica osservata nel nostro sistema solare, soprattutto per una maggiore percentuale di elementi come Litio, Berillio e Boro (fig. 1.1), probabilmente dovuto a spallazione di elementi come Carbonio e Ossigeno su Idrogeno ed Elio interstellare. Lo studio

dell'abbondanza dei vari elementi fornisce indizi per ulteriori indagini riguardanti le modalità di formazione dei raggi cosmici.

### 1.3 Raggi cosmici primari

Per quanto riguarda i raggi cosmici primari, essi vengono suddivisi in base alla loro energia iniziale nelle seguenti categorie:

- High Energy Cosmic Rays (HECR):  $E_0 \approx 1 \text{ GeV}$
- Very High Energy Cosmic Rays (VHECR):  $E_0 \approx 10^3 \text{ GeV}$
- Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR):  $E_0 \approx 10^6 \text{ GeV}$
- Extremely High Energy Cosmic Rays (EHECR):  $E_0 > 10^9 \text{ GeV}$

L'attività solare però influisce molto sul flusso di raggi cosmici a basse energie che raggiungono l'atmosfera terrestre, infatti per  $E_0 < 10 \text{ GeV}$ , lo spettro energetico risente della cosiddetta *modulazione solare* [3].

Con un periodo di circa undici anni, infatti, il Sole emette particelle di plasma dalla corona con energia variabile a seconda del periodo nel ciclo di attività; il plasma espulso dal vento solare crea la cosiddetta *Eliosfera*, ovvero una zona di spazio interplanetario in cui la densità del vento solare è di molto superiore rispetto a quella del materiale interstellare.

Questa regione, permeata da un forte campo magnetico, assorbe buona parte dei raggi cosmici ad energia più bassa, rendendo il flusso misurato minore nei periodi di maggiore attività solare e maggiore nei periodi di minima attività.

Ad energie maggiori, però, lo spettro energetico è descrivibile con una funzione

$$\Phi \propto E^{-\alpha} \tag{1.1}$$

con  $\alpha$  indice spettrale e, a parte la zona affetta da modulazione solare in cui questo indice non è univocamente definito, esso assume particolari valori in diversi intervalli energetici.

Guardando il grafico riportato in figura 1.2, che descrive l'andamento del flusso in funzione dell'energia, si notano due zone di transizione in cui la pendenza varia sensibilmente. La prima zona, con energia compresa fra  $\approx 10 \text{ GeV}$  e  $\approx 10^7 \text{ GeV}$ , è caratterizzata dal valore  $\alpha = 2.7$ , fino al punto chiamato *ginocchio*, oltre il quale si delinea la seconda zona a pendenza più ripida e con indice spettrale  $\alpha = 3$ . Questa seconda zona si estende fino a  $\approx 10^9 \text{ GeV}$ , dove si incontra la cosiddetta *caviglia*, soglia oltre la quale la ripidità del grafico e l'indice spettrale tendono a diminuire.

Oltre a queste variazioni del flusso dovute all'energia degli stessi raggi cosmici, sono stati scoperti altri due effetti legati al campo magnetico terrestre che influenzano il valore del flusso di raggi primari.

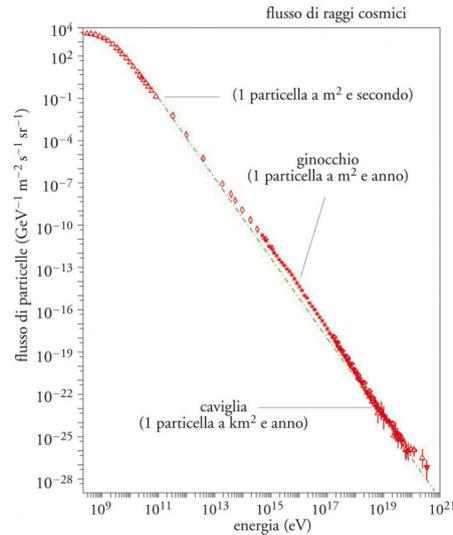


Figura 1.2: *Spettro energetico dei raggi cosmici primari. Sono evidenti due zone di transizione in cui la pendenza varia significativamente.*

Essendo i raggi cosmici composti prevalentemente da particelle cariche, esse saranno deviate dalla forza di Lorentz una volta sottoposte al campo magnetico terrestre; in particolare nelle zone dei poli magnetici in cui le linee di campo risultano perpendicolari alla superficie le particelle risentiranno in maniera minima della deviazione, influenzandone poco significativamente la traiettoria, d'altro canto però, nella zona equatoriale in cui le linee di campo magnetico risultano quasi parallele alla superficie terrestre, questa interazione produce un'effetto di sbarramento, in cui le particelle vengono deflesse in maniera significativa riducendone il numero e conseguentemente il flusso misurato. Questo effetto prende il nome di *Effetto Latitudine*, anche se è doveroso ricordare che l'asse di rotazione terrestre non è allineato a quello magnetico, per cui esistono zone con diversa latitudine in cui la radiazione misurata è equivalente, denominate *isocosme*.

Il secondo effetto, noto come *Effetto Est-Ovest*, provoca un'asimmetria di rivelazione in queste due direzioni in base alla carica della particella incidente; infatti è stato osservato che cariche positive sono più penetranti se provengono da ovest, mentre quelle negative lo sono se provenienti da est. Questo effetto risulta misurabile a livello energetico considerando che i raggi cosmici sono principalmente carichi positivamente confrontando le energie di raggi proveniente dalle due direzioni[4]. Il massimo dell'effeto si ha per raggi cosmici con orbita equatoriale geomagnetica dove è stato misurato che per particelle provenienti da Ovest  $p_{min} \approx 10$  GeV, mentre per particelle provenienti da Est  $p_{min} \approx 60$  GeV. La differenza energetica fra le particelle risulta poi in una differenza del flusso misurato come dal grafico in figura 1.2.

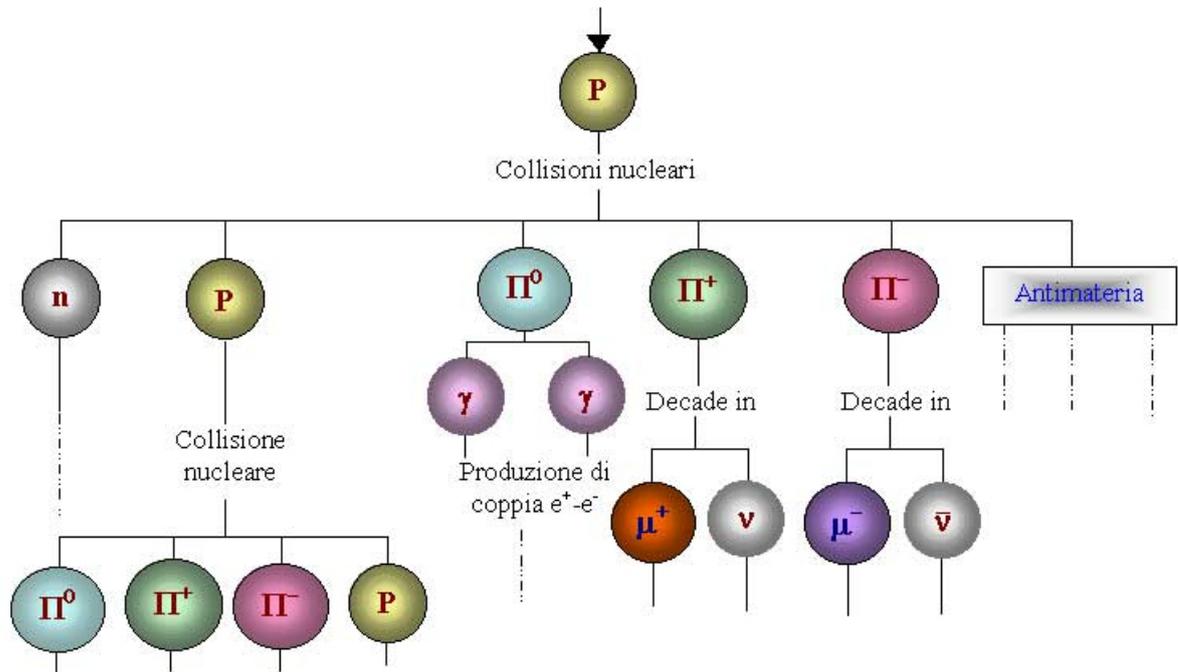


Figura 1.3: *Schema di decadimenti tipici di particelle componenti i raggi cosmici primari.*

## 1.4 Raggi cosmici secondari

I raggi cosmici primari, incontrando il mezzo atmosferico e data la loro composizione, innescano con le molecole dell'atmosfera terrestre una serie di interazioni di vario tipo. La scala di lunghezza di questo tipo di interazioni si può stimare tramite la formula:

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma_{target}} = \frac{A}{N_A\rho} \frac{1}{\pi R_0^2 A^{2/3}} \approx 34 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \times \frac{A^{1/3}}{\rho} \quad (1.2)$$

dove, considerando l'azoto, preponderante nella composizione atmosferica e una densità media di  $\rho \approx 2 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$ , si ottiene un valore di lunghezza di interazione  $\lambda \approx 4 \text{ Km}$  che ha portato all'ipotesi di raggi secondari prodotti dall'interazione dei primari con l'atmosfera.

Il tipo di particella, l'energia e la carica definiscono il tipo di interazione con l'atmosfera e le particelle risultanti da essa; prendendo ad esempio un protone, che come detto in precedenza rappresenta la particella più comune, esso interagirà in

alta atmosfera producendo per lo più pioni nei loro tre possibili stati (vedi fig. 1.3), essi a causa della loro instabilità decadranno in gran numero prima di raggiungere la superficie nei seguenti modi:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

La componente muonica è quella che costituisce la maggioranza dei raggi cosmici secondari osservati a terra dato che, venendo prodotti con velocità relativistiche, la loro vita media risulta dilatata permettendo loro di coprire lunghe distanze prima di decadere spontaneamente, infatti la lunghezza di decadimento media, ovvero la distanza media percorsa prima che la particella decada spontaneamente, risulta essere di circa 6.6 Km per muoni con energia inferiore a 1 GeV, mentre per muoni con energia pari a 3 GeV risulta essere pari a 20 Km. Se poi il rate di perdita di energia è sufficientemente basso essi possono percorrere lunghezze maggiori senza essere riassorbiti dalle interazioni ed attraversare l'atmosfera per poi penetrare considerevolmente nel sottosuolo, motivo per cui fanno parte della cosiddetta *componente dura*.

Per quanto riguarda invece la componente elettromagnetica dei raggi cosmici secondari, il contributo è dato principalmente dalle coppie  $e^+e^-$  derivate dai fotoni e dai decadimenti dei pioni neutri ( $\pi^0$ ) e dai muoni che decadono prima di raggiungere la superficie producendo elettroni, positroni e neutrini nelle seguenti modalità:

$$\begin{aligned} \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu & \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma & \pi^0 &\rightarrow \gamma + e^+ + e^- \end{aligned}$$

Questi processi, avendo vita media molto più breve di quella dei muoni, alimentano quella che viene definita come *cascata elettromagnetica* che viene riassorbita dalle interazioni molto rapidamente. Per questo la componente elettromagnetica risulta essere poco penetrante e prende il nome di *componente molle* seppur trasporta la maggior parte dell'energia.

Misurazioni a livello del mare hanno quantificato il numero di particelle cariche incidenti, con energia dell'ordine del GeV, per unità di superficie e di tempo pari a

$$\frac{180 \text{ particelle}}{\text{m}^2 \text{ s}} \approx \frac{0.02 \text{ particelle}}{\text{cm}^2 \text{ s}} \quad (1.3)$$

con distribuzione angolare uniforme rispetto all'angolo azimutale:

$$P(\Phi) = \frac{1}{2\pi} \quad (1.4)$$

mentre rispetto all'angolo con la normale alla superficie terrestre ( $\Theta$ ):

$$P(\Theta) = \frac{4}{\pi} \cos^\alpha(\Theta) \quad \alpha \approx 2 \quad (1.5)$$



energia, nuclei più pesanti subiranno collisioni più frequenti e dissiperanno la loro energia più rapidamente rispetto ad un singolo protone, risultando in una minore penetrazione dello sciame.

Lo sciame di solito si sviluppa in tre componenti distinte: un nucleo adronico centrale ad alta energia che alimenta le componenti elettromagnetiche e muoniche che si sviluppano attorno al nucleo (fig.1.4).

Le scale energetiche delle tre componenti risultano essere comprese fra 1 e 10 MeV per la componente elettromagnetica, formata da  $\gamma$ ,  $e^+$  ed  $e^-$ , circa 1 GeV per la componente muonica, formata da  $\mu$  e  $\mu^+$ , e energie dell'ordine del GeV per la componente adronica, formata principalmente da pioni e piccole quantità di barioni.

La rilevazione di questi fenomeni avviene tramite il confronto temporale di coincidenze acquisite da rivelatori limitrofi e tramite i ritardi di acquisizione di questi ultimi si può ricostruire la *direzione di provenienza* del raggio primario, definendo così l'asse dello sciame.

Altre informazioni utili alla comprensione degli sciame si possono ottenere misurandone le dimensioni spaziali, in particolare vengono solitamente misurati due valori:

- **Sviluppo longitudinale:** numero di particelle dello sciame ad una data profondità atmosferica; questo parametro aumenta fino ad un valore massimo ad una certa profondità  $x_{max}$ , per poi diminuire per la dominanza di fenomeni di assorbimento.
- **Sviluppo laterale:** definito come la densità di particelle in funzione della distanza dall'asse dello sciame; ha il suo massimo in prossimità del nucleo dello sciame e decresce allontanandosi da esso.

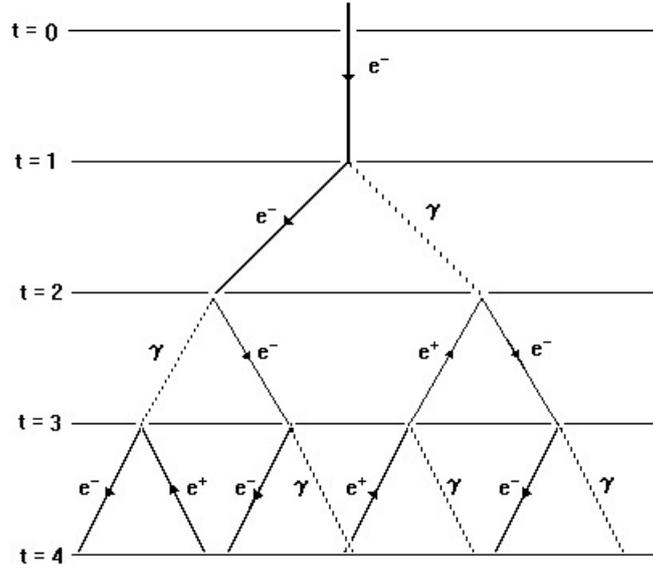


Figura 1.5: *Schema esemplificativo del Heitler Branching Model*

Un semplice modello che descrive l'andamento e le caratteristiche dello sviluppo longitudinale per la componente elettromagnetica è dato dal *Heitler Branching Model*[5], il cui schema è mostrato in figura 1.5.

Si pensa alla cascata elettromagnetica nel seguente modo: ogni riga rappresenta lo splitting dell'elettrone con energia iniziale  $E_0$  che, dopo una certa lunghezza di radiazione ( $\lambda$ ), si divide a causa dell'emissione di un fotone per Bremsstrahlung; quindi dopo un numero di passi  $n = \frac{x}{\lambda}$  il numero di segmenti e l'energia di ogni particella sono dati dalle seguenti relazioni:

$$N(x) = 2^{\frac{x}{\lambda}} \quad E(x) = \frac{E_0}{N(x)} \quad (1.6)$$

Fino al raggiungimento di un certo valore di energia critica  $E_C$ , di approssimativamente 87 MeV per le cascate elettromagnetiche, sotto la quale i processi di splitting e di produzione si arrestano e diventano predominanti i processi di perdita di energia per ionizzazione col conseguente aumento dell'assorbimento delle particelle da parte dell'atmosfera.

Questo modello permette di ricavare i parametri caratteristici di uno sciame, fra cui il massimo sviluppo longitudinale ed il numero di particelle associate:

$$x_{max} = \lambda \frac{\ln(\frac{E_0}{E_C})}{\ln 2} \quad N(x_{max}) = \frac{E_0}{E_C} \quad (1.7)$$

Lo sviluppo laterale della componente adronica però risulta molto maggiore rispetto alla componente elettromagnetica in quanto hanno impulso maggiore e possono propagarsi per diverse lunghezze di interazioni con basse perdite di energie, stimate essere inferiori al 25% dell'energia della particella.

Il numero reale di particelle dello sciame ad una certa profondità atmosferica  $x$  è dato dalla formula di Gaisser-Hillas:

$$N(x) = N_{max} \left( \frac{x - x_0}{x_{max} - x_0} \right)^{\frac{x_{max} - x_0}{\lambda}} \exp\left( -\frac{x_{max} - x}{\lambda} \right) \quad (1.8)$$

dove  $N_{max}$  rappresenta il numero di particelle al massimo dello sviluppo longitudinale alla profondità  $x_{max}$  e  $x_0$  è la profondità di origine dello sciame, che varia sia a seconda dell'energia del raggio primario sia a seconda del tipo di particella che ha generato i raggi secondari, infatti come descritto in precedenza sciami generati da nuclei più pesanti risultano meno penetranti, con un conseguente abbassamento del valore della profondità di origine.

## 1.6 Origine dei raggi cosmici

La direzione di arrivo dei raggi cosmici sulla nostra atmosfera risulta essere isotropa, tuttavia, essa non fornisce informazioni riguardo al loro punto di origine a causa del grande numero di deviazioni subite durante il loro tragitto.

Risulta quindi utile concentrarsi sulle informazioni estraibili dall'energia dei raggi cosmici, che, come detto in precedenza, spaziano ben undici ordini di grandezza.

Uno dei processi di accelerazione noti è il meccanismo di Fermi, processo per cui si ha un trasferimento di energia cinetica da plasma magnetizzato in movimento a particelle cariche nelle sue vicinanze.

Le energie previste da questo modello risultano molto simili alle distribuzioni caratteristiche di nuclei atomici dei raggi cosmici, rendendo il processo di esplosione di una supernova uno dei candidati per la generazione di raggi cosmici[6].

È stato ipotizzato che le particelle cosmiche con carica  $Ze$  prodotte da questi fenomeni avessero energia massima dell'ordine dei  $10^6$  GeV, ma una stima più precisa è data dalla relazione:

$$E_{max} = Ze\beta BcL \quad (1.9)$$

dove  $\beta c$  è la velocità del fronte d'onda magnetizzato,  $L$  rappresenta la dimensione lineare della sorgente e  $B$  quantifica l'intensità del campo magnetico presente nella zona di accelerazione. Se una supernova esplose in un ambiente diverso del mezzo interstellare standard, come per esempio in una zona in cui è ancora presente il vento del suo progenitore, le particelle raggiungono energie dell'ordine dei  $10^8$  GeV.

Lo Hillas Plot classifica e raggruppa alcune potenziali sorgenti astronomiche di raggi cosmici in base alle loro caratteristiche fisiche e porta a pensare che la

produzione di particelle con energia compresa tra  $10^6$  e  $10^{10}$  GeV sia principalmente dovuta a *Nuclei Galattici Attivi* (AGN) e *Radio Galassie*.

Vi sono tuttora altre teorie per spiegare tali scale eneegetiche, una di queste pensa che questa accelerazione possa essere conferita per via gravitazionale, trasformando energia potenziale in energia cinetica, tramite processi ancora sconosciuti.

Le scale energetiche in questione superano di molto quelle raggiungibili tramite acceleratori di particelle artificiali essendo l'energia finale massima proporzionale alla rigidità magnetica

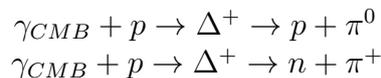
$$\vec{r} \cdot \vec{B}$$

che per acceleratori artificiali, con campi magnetici dell'ordine della decina di tesla e raggi di centinaia di chilometri, producono energia totale massima dell'ordine delle centinaia di TeV, valore ben lontano dalle energie dei raggi cosmici.

## 1.7 Il limite Greisen–Zatsepin–Kuzmin

Nel 1966 i fisici K. Greisen, G. Zatsepin e V. A. Kuzmin calcolarono indipendentemente il limite superiore dell'energia possibile per i protoni che compongono i raggi cosmici.

Questo limite, conosciuto meglio come limite GZK, attesta il suo valore a circa  $5 \times 10^{19}$  eV e fu calcolato in base alle interazioni su lunghe distanze ( $\approx 160$  Mly) dei protoni componenti i raggi cosmici con fotoni appartenenti alla radiazione cosmica di fondo. Se infatti un protone cosmico possedesse energia superiore a questa soglia, interagirebbe con la radiazione cosmica di fondo per produrre pioni attraverso la cosiddetta " risonanza delta" che si sviluppa nel seguente modo:



Il processo di produzione di pioni assorbe circa il 20% dell'energia iniziale del protone e si ripeterà fino a che l'energia del raggio cosmico non sarà inferiore alla soglia necessaria per l'avvenire di questo processo.

Questa teoria, dato il cammino medio associato a questa interazione, spiega la difficoltà di osservazione di protoni extragalattici ad energie così elevate. Tuttavia è doveroso ricordare che questo limite è valido nell'assunzione che i raggi cosmici ad estremamente alta energia siano composti da protoni, quando in realtà, grazie alle misurazioni dell'osservatorio Pierre Auger, è stato osservato che la maggioranza di questi sono composti da nuclei di elementi più pesanti risolvendo così i casi in cui sono stati osservati raggi cosmici ad energie maggiori che parevano violare tale limite.

## Capitolo 2

# Il progetto PolarquEEEst e il rivelatore POLA-04

### 2.1 Progetto PolarquEEEst

L'esperimento PolarquEEEst, nato come *side-project* del progetto EEE (*Extreme Energy Events*), è stato ideato e portato avanti dalla collaborazione fra Centro Fermi, INFN e CERN, con lo scopo di fare misure del flusso di raggi cosmici ad alte latitudini, in particolare circumnavigando le isole Svalbard, luogo in cui sono tuttora installati alcuni telescopi dell'esperimento[7].

Come accennato nel primo capitolo, a causa della forma del campo magnetico terrestre, l'intensità della radiazione cosmica composta da particelle cariche risulta maggiore nelle vicinanze dei poli magnetici con una soglia di cut-off energetico dipendente dalla latitudine. Questa soglia raggiunge il suo minimo a latitudini di circa 50-60°, luoghi in cui il suo valore si attesta attorno a pochi GeV e non cresce a latitudini maggiori. Il fatto che la soglia di cut-off nè cresca nè diminuisca all'aumentare della latitudine, rende questi luoghi di maggiore interesse in quanto la soppressione di raggi cosmici con energia minore a questo valore è dovuta alla sola modulazione solare, permettendo di studiare l'attività del corpo celeste nel tempo.

La prima parte di questo progetto ha richiesto la realizzazione di tre telescopi per raggi cosmici, denominati POLA-01, POLA-02 e POLA-03, tutti con stesso tipo di struttura e composizione. Questi sono poi stati installati uno in Norvegia, uno in Italia e uno sull'imbarcazione *Nanuq* che ha effettuato in sei settimane la circumnavigazione delle isole Svalbard partendo dall'Islanda per approdare infine in Norvegia. Durante questo esperimento sono stati acquisiti dati sul flusso di raggi cosmici a latitudini in cui non erano ancora state effettuate misurazioni.

A causa delle condizioni imposte per l'installazione del rivelatore, ovvero un peso non superiore ai 50 Kg, il consumo di potenza minore di 15 W e un volume ridotto per essere ospitato all'interno dell'imbarcazione, è stata scartata l'idea di utilizzare i rivelatori MRPC (*Multigap Resistive Plate Chamber*) già in uso nel

progetto EEE in quanto di dimensioni troppo elevate e per la presenza di gas necessario per il funzionamento del telescopio.

Dopo il termine della spedizione, la collaborazione ha deciso di costruire un quarto telescopio, denominato POLA-04, realizzato in sede a Bologna e poi installato insieme a POLA-01 e POLA-03 alle isole Svalbard per l'acquisizione continuativa dei dati relativi ai raggi cosmici a latitudine elevata, mantenendo l'installazione di POLA-02 in Norvegia come riferimento.

## 2.2 Struttura generale dei telescopi POLA

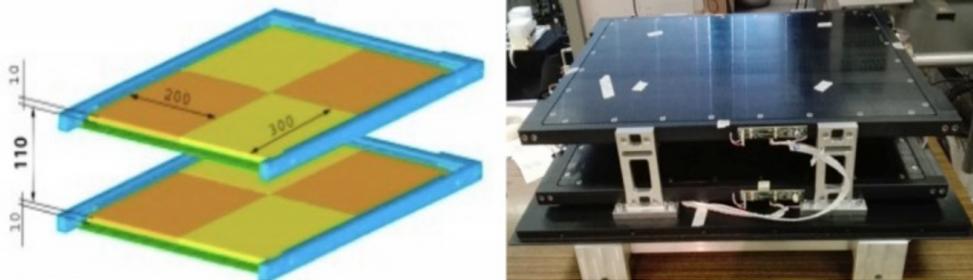


Figura 2.1: A sinistra lo schema dei piani del rivelatore con dimensioni riportate in millimetri. A destra una fotografia del telescopio POLA-04.

Tutti i quattro telescopi prodotti per l'esperimento condividono la stessa struttura di base (vedi fig. 2.1) e sono formati da due piani, distanziati verticalmente di 11 cm, composti ciascuno da quattro piastre rettangolari di materiale scintillatore di dimensioni  $300 \times 200 \text{ mm}^2$ [8]. Ciascuna di queste piastre presenta un taglio in due angoli opposti, come in fig. 2.2, creando quelle che vengono denominate come *finestrelle*, punti in cui sono stati creati gli alloggiamenti per i due *Silicon PhotoMultiplier* (SiPM). La geometria delle lastre e il posizionamento dei SiPM è stata scelta per massimizzare il più possibile l'efficienza del rivelatore, rendendo la misura più accurata possibile.

Ogni piastra è rivestita da un materiale trasparente al passaggio di particelle, ma riflettente per la radiazione elettromagnetica prodotta dalla diseccitazione degli atomi dello scintillatore per mantenere i fotoni così prodotti all'interno della piastra e rifletterli fino alle *finestrelle*, la quali non sono rivestite, e ai SiPM che lo trasforma in un segnale elettrico. Il segnale dei SiPM viene poi trasmesso ad una scheda di Front-End che lo trasforma in segnale LVDS.

I due piani, insieme a tutte le componenti elettroniche associate, sono poi montate all'interno di una scatola metallica sigillata per evitare l'acquisizione di falsi eventi dovuti all'inquinamento luminoso. All'esterno è invece montata la parte principale della scheda di *read-out* formata da:

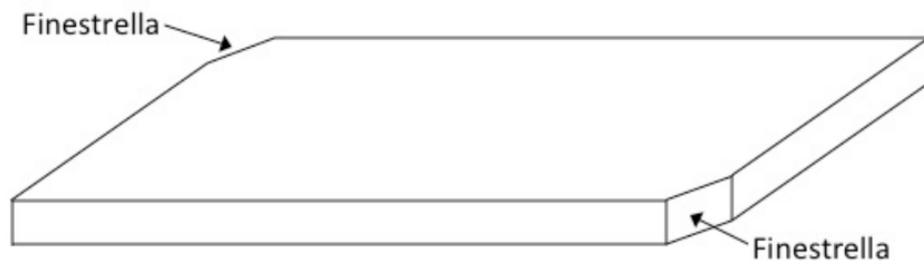


Figura 2.2: *Geometria di una lastra scintillatrice con in evidenza le posizioni delle finestre.*

- FPGA per la misurazione della carica dei segnali e del tempo di arrivo
- GPS
- Raspberry Pi per la raccolta dei dati e la registrazione su un SSD locale
- Batteria di backup per evitare interruzioni improvvise di alimentazione

in aggiunta sono anche montati sensori di vario tipo per la misura di variabili ambientali, come pressione e temperatura, e orientazione del telescopio.

## 2.3 Struttura dei fotomoltiplicatori al Silicio

Un singolo SiPM (*Silicon PhotoMultiplier*) è strutturato come una matrice di APD (*Avalanche PhotoDiode*) collegati in parallelo fra di loro e in serie, ciascuno, ad una resistenza di carico sullo stesso substrato di Silicio che operano in modalità Geiger. La tensione operativa dei diodi è superiore alla soglia di *breakdown* di un valore percentuale compreso fra il 10% e il 20% senza aumentarla ulteriormente in quanto l'aumento della stessa a valori più elevati comporterebbe un aumento del rumore di fondo che risulta essere proporzionale alla tensione di polarizzazione inversa delle giunzioni. Operativamente il valore della tensione applicata si aggira intorno ai 40 - 70 V.

L'entità del segnale in uscita è pari alla somma analogica dei segnali dei singoli APD, difatto la matrice fornisce un segnale elettrico proporzionale al numero di fotoni incidenti, e quindi al numero di diodi attivati, se questi sono in numero tale da non raggiungere la condizione di saturazione, ovvero quella condizione per cui il numero di fotoni incidenti risulta essere maggiore o uguale del numero di microcelle di APD che prendono il nome di *pixel*.

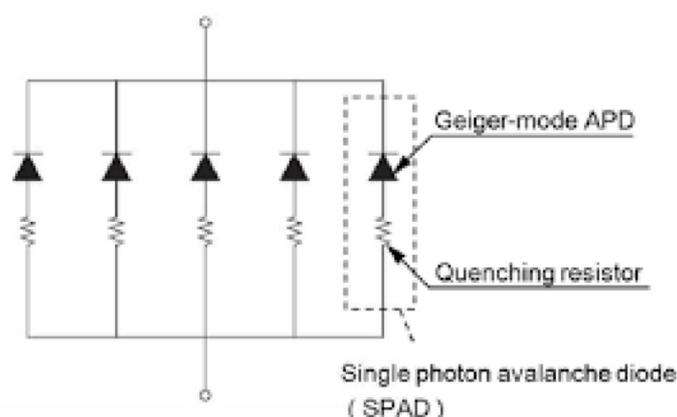


Figura 2.3: *Struttura della matrice di SPAD di un SiPM.*

Nel caso dei SiPM con cui sono stati costruiti i telescopi POLA, sul substrato di silicio è stata impiantata una matrice di SPAD (*Single Photon Avalanche Diode*), consistente in fotodiodi multipixel che sfruttano l'effetto valanga. Ogni giunzione opera come un contatore binario, analogamente agli APD, consentendo però il conteggio del numero di fotoni incidenti grazie alla lettura in parallelo del segnale dei singoli SPAD[9]. La presenza della resistenza in serie (vedi fig.2.3), quando percorsa da corrente, produce una caduta di tensione sufficiente a rendere la tensione

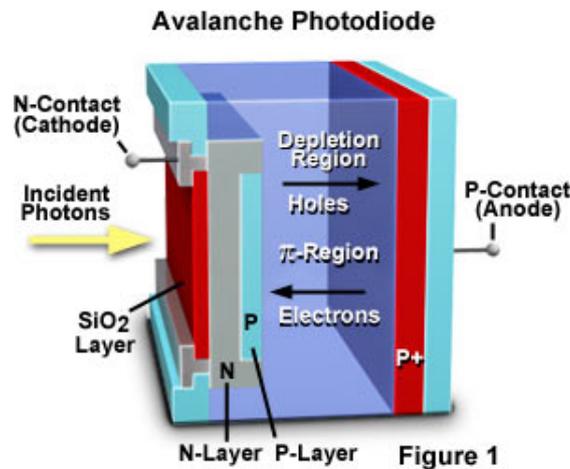


Figura 2.4: Sezione trasversale di un APD. In questo caso catodo e anodo si riferiscono alla configurazione di polarizzazione diretta.

effettiva minore di quella di breakdown e ad estinguere quindi la corrente di valanga prodotta dal fotodiode.

Analizzando più nello specifico la struttura di un APD (fig. 2.4) si nota che esso è formato da quattro regioni di semiconduttore con drogaggio asimmetrico che determinano le seguenti zone:

- Strato drogato  $n$ : caratterizzato da un numero elevato  $N_d$  di atomi donatori ( $> 10^7$ )
- Strato drogato  $p$ : necessario per la formazione della giunzione
- Strato quasi intrinseco  $\pi$ : regione poco drogata in cui si origina la moltiplicazione a valanga
- Strato drogato  $p^+$ : caratterizzato da un numero elevato  $N_a$  di atomi accettori ( $> 10^7$ )

Quando un fotone incide sull'APD con energia maggiore del gap esistente fra la banda di valenza e quella di conduzione, a causa dell'effetto fotoelettrico viene a crearsi una coppia elettrone-lacuna nella depletion region; l'elettrone e la lacuna, a causa del campo elettrico presente nella giunzione tenderanno a spostarsi rispettivamente verso le regioni  $n$  e  $p$  causando la moltiplicazione di un numero elevato di cariche mobili secondarie. L'elevato campo elettrico presente nella regione di svuotamento fa in modo che la creazione di una singola coppia inneschi la ionizzazione e la conseguente moltiplicazione dei portatori nella giunzione.

Considerando che solitamente un singolo fotone colpisce una singola cella è possibile ricavare il numero di fotoni incidenti in base al numero di celle attive. L'entità del segnale in uscita sarà data dal guadagno (o *gain*) del singolo SPAD dato dalla relazione:

$$G = \frac{Q_{Cella}}{e} \quad (2.1)$$

dove  $Q_{Cella}$  è la carica dell'impulso prodotto da un singolo pixel quando esso rivela un fotone; la carica rilasciata dipende dalla capacità della cella stessa ( $C_{Cella}$ ), dalla tensione applicata al SiPM ( $V_{Bias}$ ) e dalla tensione di breakdown della giunzione ( $V_{Breakdown}$ ) secondo la relazione:

$$Q_{Cella} = C_{Cella}(V_{Bias} - V_{Breakdown}) \quad (2.2)$$

L'utilizzo di SiPM presenta alcuni vantaggi rispetto all'utilizzo di fotomoltiplicatori tradizionali fra cui il basso voltaggio operativo, la possibilità di conteggio di fotoni incidenti contemporaneamente e l'insensibilità di questi sensori a campi magnetici; bisogna però ricordare che, nonostante l'aumento di  $G$  all'aumentare della tensione applicata al SiPM, l'aumento di  $V_{Bias}$  provoca effetti collaterali quali la *Dark Current*, ovvero una corrente generata senza che il sensore sia effettivamente colpito da radiazione, o i cosiddetti *After Pulses*, impulsi causati da un rilascio ritardato di una carica intrappolata in un'impurità.

Intuitivamente l'efficienza di un fotomoltiplicatore può essere espressa come il rapporto fra il numero di fotoni rivelati e il numero di fotoni incidenti, tuttavia ulteriori studi hanno definito la *Photon Detection Efficiency*, brevemente PDE, nel seguente modo:

$$PDE = \eta \epsilon_{BD} \epsilon_g \quad (2.3)$$

dove  $\eta$  rappresenta l'efficienza quantica e corrisponde al numero di coppie elettrone - lacuna create da un fotone incidente nella regione di svuotamento,  $\epsilon_{BD}$  rappresenta la probabilità di breakdown che dipende dall'intensità del campo elettrico e dal tipo di portatori, infatti  $\epsilon_{BD, elettrone} > \epsilon_{BD, lacuna}$  a causa del maggiore coefficiente di ionizzazione. L'ultimo termine  $\epsilon_g = \frac{Area\ Sensibile}{Area\ Totale}$  rappresenta l'efficienza geometrica sotto forma del fattore di riempimento[10]. Oltre a ciò, il valore della PDE è influenzato anche dal tempo di recupero delle celle, il quale si attesta essere attorno a 100 ns.

## 2.4 Materiali scintillatori

Come descritto in precedenza per la costruzione delle otto piastre che compongono il telescopio, è stato utilizzato del materiale scintillatore.

Questo tipo di materiali sfruttano la luminescenza, ovvero quel fenomeno per cui assorbono energia dall'esposizione a varie fonti (calore, radiazione, ecc..) per poi riemetterla sotto forma di radiazione luminosa nello spettro visibile.

Nell'ottica di questo tipo di telescopi, il passaggio di particelle cariche attraverso di essi provoca l'eccitazione degli elettroni degli atomi del materiale i quali, diseccitandosi, emettono alcuni fotoni[11].

Il fenomeno della luminescenza è associato ad altri due fenomeni: la fluorescenza e la fosforescenza. La fluorescenza ha una durata di circa  $10^{-8}$  secondi, trascorsi i quali il fotone viene emesso per diseccitazione degli elettroni e a causa della rapidità viene descritta come *componente veloce*. Nella fosforescenza, invece, l'elettrone eccitato si trova in uno stato definito come metastabile, ovvero in uno stato di equilibrio che non corrisponde al minimo assoluto, a causa di ciò l'emissione del fotone risulta essere ritardata nel tempo di un intervallo variabile a seconda del materiale (da qualche  $\mu s$  ad ore). In questo caso la luminescenza può permanere anche dopo la fine dell'irradiazione del materiale e viene definita come *componente lenta*.

La descrizione dei fenomeni di fluorescenza e fosforescenza è data da un decadimento di tipo esponenziale nel tempo della quantità di fotoni riemessi, e tenendo conto di queste due componenti, per uno scintillatore si ottiene che il numero di fotoni riemessi  $N(t)$  risulta essere descritta dalla legge:

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

dove  $\tau_v$  e  $\tau_l$  sono le costanti di decadimento rispettivamente per la componente veloce e la componente lenta, mentre A e B rappresentano le grandezze relative delle stesse che variano a seconda del materiale.

La caratterizzazione degli scintillatori avviene in base al tipo di materiale utilizzato per la loro costruzione e si suddividono in due categorie: scintillatori organici e scintillatori inorganici. I primi possono presentarsi sia come liquidi (ad esempio come soluzione in solvente organico di uno o più scintillatori), sia come solidi, tipicamente scintillatori plastici, come quelli utilizzati nei rivelatori POLA e sono caratterizzati da tempi di risposta dell'ordine del nanosecondo. Per quanto riguarda la categoria degli scintillatori inorganici, essi possono essere in forma solida (solitamente composti di alogenuri alcalini), gassosa o vetrosa (vetri silicati), risultano più efficienti dell'altra categoria ma con tempi di risposta variabili a seconda della fase e vanno da qualche nanosecondo, in fase gassosa, all'ordine di centinaia di nanosecondi in fase solida.

## 2.5 Principio di funzionamento del rivelatore

L'obbiettivo di questo particolare tipo di telescopio è quello di stimare il numero di muoni cosmici incidenti a livello del mare e, data la struttura dello stesso, non è in grado di ricavare informazioni sulla direzione di arrivo e sull'impulso delle particelle.

Il passaggio di un muone attraverso una coppia di piastre dei due piani eccita gli atomi degli scintillatori che, come descritto in precedenza, diseccitandosi emettono fotoni poi raccolti attraverso i SIPM associati ad ogni piastra. Il segnale elettrico proveniente dai SiPM viene poi tradotto in un segnale di tensione dalle schede di *Front-End* il cui canale è monitorato continuamente dalla scheda di *read-out* per la verifica della condizione di trigger.

Per considerare un SiPM come attivo, il segnale proveniente da esso deve superare una certa soglia stabilita al momento della calibrazione del rivelatore per ottenere una misura più precisa possibile; se infatti la soglia fosse troppo bassa vi è la possibilità di acquisire eventi "falsi" provocati dal rumore elettronico della strumentazione, mentre, se fosse troppo alta, si incorrerebbe nella possibilità di non acquisire eventi validi a bassa energia, andando così a sottostimare la misura del flusso.

Per la condizione di trigger è stata scelta quella che viene chiamata condizione di *Majority*, una condizione interna per cui nel momento in cui una particella attraversa due piastre dei due differenti piani, l'evento viene acquisito quando almeno tre dei quattro SiPM associati producono un segnale superiore alla soglia sopracitata. Quando questa condizione è verificata, la scheda di *read-out* provvede alla registrazione dei parametri di tutti i sensori collegati, tuttavia, l'acquisizione si protrae per circa  $1.05 \mu s$ , un intervallo di tempo sufficiente per registrare l'intervallo di tempo in cui il segnale in uscita dai SiPM supera la soglia prestabilita e registra il dato denominandolo ToT (*Time over Threshold*). La scelta di questo particolare tipo di trigger interno è stata fatta per massimizzare e stabilizzare l'efficienza di rivelazione, ammettendo la possibilità che uno dei SiPM possa non aver rivelato l'evento e al contempo filtrando il rumore di fondo del sistema elettronico.

Nell'ipotesi di totale indipendenza dei SiPM associati ad una coppia di piastre e che l'efficienza sia vicina all'unità è possibile scrivere la loro efficienza come:

$$1 - \Delta\varepsilon \quad \Delta\varepsilon \ll 1$$

dove  $\Delta\varepsilon$  rappresenta la fluttuazione dell'efficienza dovuta a fattori esterni e quindi la probabilità che un singolo SiPM non si attivi al passaggio di una particella. Considerando una coppia di piastre e i relativi quattro SiPM associati si pone per semplicità che:

$$\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_3 = \Delta\varepsilon_4 = \Delta\varepsilon$$

La condizione di non trigger è data dalla non attivazione di due SiPM su quattro totali e dal calcolo delle combinazioni che determinano questa condizione e trascurando i termini cubici e superiori di  $\Delta\varepsilon$  si ottiene che:

$$P_{no\ trigger} = 6\Delta\varepsilon^2$$

riducendo la perdita di efficienza a circa l'1‰ per un valore di  $\Delta\varepsilon$  pari all'1%.

## 2.6 Parametro di pseudoefficienza

Durante l'acquisizione, i dati vengono elaborati a intervalli di un minuto per l'estrazione di vari parametri utili per monitorare lo stato dei vari sensori presenti all'interno del telescopio, uno di questi, oggetto di questo elaborato, è il parametro di *pseudoefficienza*.

Quando si verifica la condizione di trigger, come spiegato precedentemente, la scheda di *read-out* registra per ogni evento lo stato di tutti i sedici SiPM presenti nel telescopio ed elaborando così due tipi di misura di flusso, il primo dato dalla condizione di *Majority*, richiedendo quindi l'attivazione di almeno tre sensori per ogni coppia, e il secondo dato dalla condizione di *4-AND* per cui tutti e quattro i SiPM di una coppia devono risultare attivi durante un evento.

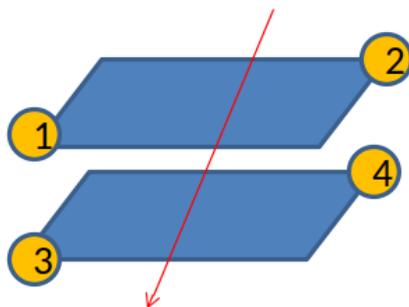


Figura 2.5: *Schema di riferimento per una coppia di piastre.*

Prendendo come riferimento la figura 2.5 è possibile estrarre dai dati del telescopio i seguenti valori:

- $N_{123}, N_{124}, N_{134}, N_{234}$  : rappresentanti il numero di eventi in cui i SiPM indicizzati erano attivi.
- $N_{1234}$  : rappresentante il numero di eventi in cui tutti i quattro SiPM risultavano attivi.

Si definisce poi la pseudoefficienza di uno dei sensori come:

$$\bar{\varepsilon}_1 = \frac{N_{1234}}{N_{234}} \quad (2.5)$$

che rappresenta idealmente quanti eventi sono stati "visti" da un particolare SiPM rispetto alle coincidenze date dal trigger degli altri tre presenti nella coppia. La stima del parametro di pseudoefficienza segue questo ragionamento espandendolo ovviamente a tutte le possibili coppie in cui è coinvolto ciascun sensore e permette di monitorare lo stato di ciascuno di essi rispetto agli altri rendendo possibile identificare un eventuale malfunzionamento.

Considerando una coppia di lastre e selezionando gli eventi in cui entrambi i fotomoltiplicatori di una della due risultano attivi, quindi prendendo una lastra come riferimento, il parametro di pseudoefficienza estrapola l'informazione di quanto un fotomoltiplicatore sia "efficiente" rispetto a quello posizionato sulla stessa lastra. Ovviamente per il metodo con cui viene calcolato questo parametro, esso fornisce questa informazione, ma risulterà sovrastimato rispetto all'efficienza reale del rivelatore.

Dagli studi fatti in fase di costruzione del telescopio POLA-04[12], durante la calibrazione per una stima dell'efficienza globale del telescopio, è stato usato come riferimento uno dei rivelatori *MRPC* del progetto EEE e, utilizzando il tracciamento delle particelle incidenti, si è notato come, a seconda del punto di incidenza sulla lastra, gli eventi risultano più facilmente rivelabili dal SiPM più prossimo. Questo fenomeno crea effetti di correlazione ed anti-correlazione all'interno di ogni singola lastra e influisce direttamente sul parametro di pseudoefficienza.

## Capitolo 3

# Analisi Dati

Scopo primario di questo lavoro di tesi, concentrandosi principalmente sul telescopio POLA-04, è stato quello di valutare le misure durante un anno di presa dati alle isole Svalbard e di valutare la validità del parametro interno pseudoefficienza come descrizione dell'efficienza di ogni singolo SiPMs.

Allo stesso tempo si è cercato di chiarire quali siano i fattori che possono portare a variazioni delle prestazioni del rivelatore.

### 3.1 Introduzione alla notazione

Prima di procedere alla descrizione dell'analisi compiuta è doveroso esplicitare alcune notazioni usate in questa tesi e la nomenclatura utilizzata per la mappatura del telescopio.

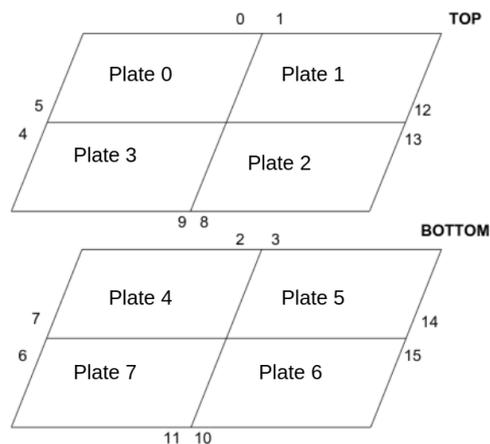


Figura 3.1: *Schema della mappatura dei canali dei SiPM e relativa numerazione delle piastre scintillatrici.*

La mappatura dei canali dei SiPM del telescopio e la nomenclatura delle piastre associate è stata riportata in figura 3.1. Dato questo schema vi sono sedici possibili

combinazioni di lastre *top* e *bottom* misuranti il rate di incidenza e indicati come *Pair*. In tabella 3.1, per ogni indice indicante una coppia, sono esplicitati gli indici dei canali dei SiPMs e delle piastre coinvolte in entrambi i piani.

| Pair # | Plate Top # | Plate Bottom # | SiPMs Top | SiPMs Bot |
|--------|-------------|----------------|-----------|-----------|
| 0      | 0           | 4              | 0 ; 5     | 2 ; 7     |
| 1      | 0           | 6              | 0 ; 5     | 10 ; 15   |
| 2      | 0           | 7              | 0 ; 5     | 6 ; 11    |
| 3      | 0           | 5              | 0 ; 5     | 3 ; 14    |
| 4      | 2           | 4              | 8 ; 13    | 2 ; 7     |
| 5      | 2           | 6              | 8 ; 13    | 10 ; 15   |
| 6      | 2           | 7              | 8 ; 13    | 6 ; 11    |
| 7      | 2           | 5              | 8 ; 13    | 3 ; 14    |
| 8      | 3           | 4              | 4 ; 9     | 2 ; 7     |
| 9      | 3           | 6              | 4 ; 9     | 10 ; 15   |
| 10     | 3           | 7              | 4 ; 9     | 6 ; 11    |
| 11     | 3           | 5              | 4 ; 9     | 3 ; 14    |
| 12     | 1           | 4              | 1 ; 12    | 2 ; 7     |
| 13     | 1           | 6              | 1 ; 12    | 10 ; 15   |
| 14     | 1           | 7              | 1 ; 12    | 6 ; 11    |
| 15     | 1           | 5              | 1 ; 12    | 3 ; 14    |

Tabella 3.1: *Tabella riportante la numerazione delle piastre e dei canali dei SiPM di ciascuna coppia per il rivelatore POLA-04.*

## 3.2 Miglioramento del software di ricostruzione

Durante il procedere dell'analisi dati è stato trovato un errore nell'algoritmo di ricostruzione degli eventi che influiva sul calcolo dei parametri del telescopio. Questo problema era dovuto al fatto che l'algoritmo privilegiava alcuni canali di acquisizione nel caso di eventi in cui alcune particelle incidevano su due lastre diverse dello stesso piano e su una singola lastra dell'altro piano nello stesso istante. In questo caso, nella fase di ricostruzione, potevano risultare attive due o più piastre di uno stesso piano con un'unica corrispondenza nell'altro. Prendendo per semplicità il caso di due eventi, entrambe le coincidenze possono potenzialmente portare alla condizione di trigger per l'acquisizione, tuttavia se si ammette la rivelazione di uno dei due eventi non risulta più ammissibile l'altro in quanto non soddisfa la condizione di acquisizione.

Nel caso di due eventi simultanei, quindi, uno dovrà essere necessariamente scartato e la scelta del software di attribuire l'evento restante ad una coppia piuttosto che l'altra risulta influire sulle misure. Il criterio con cui l'evento veniva attribuito a una coppia è risultato dipendere dall'istante in cui il segnale risultava attivo, privilegiando in questo modo i canali dei SiPMs più veloci.

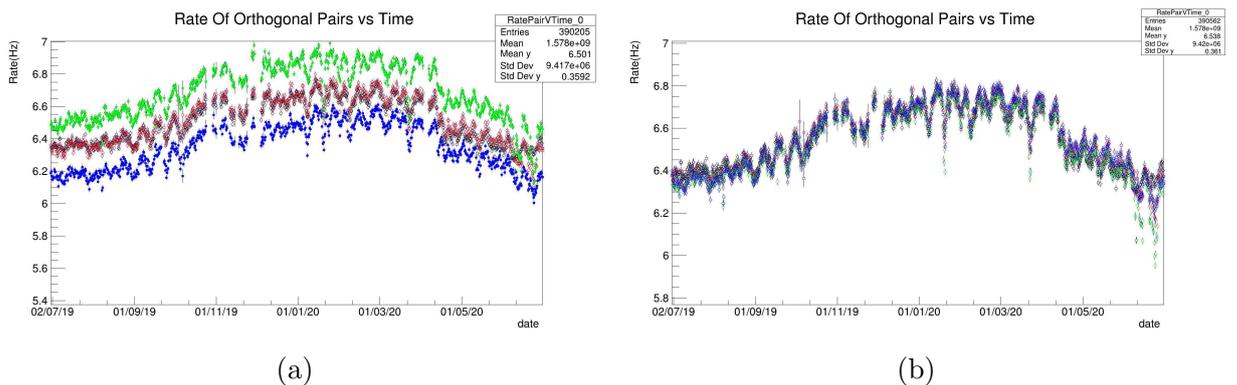


Figura 3.2: Misure del rate in condizione di Majority delle coppie in corrispondenza verticale (0,5,10,15) prima della risoluzione dell'errore (a) e dopo (b).

L'errore andava quindi a sovrastimare o sottostimare sistematicamente la misura dei rate di alcune coppie (fig.3.2) con effetti collaterali sui valori di *pseudoefficienza* misurati.

Dopo aver modificato l'algoritmo i dati sono stati rielaborati e utilizzati per la successiva analisi.

### 3.3 Andamento della misurazione durante l'anno e variazione stagionale

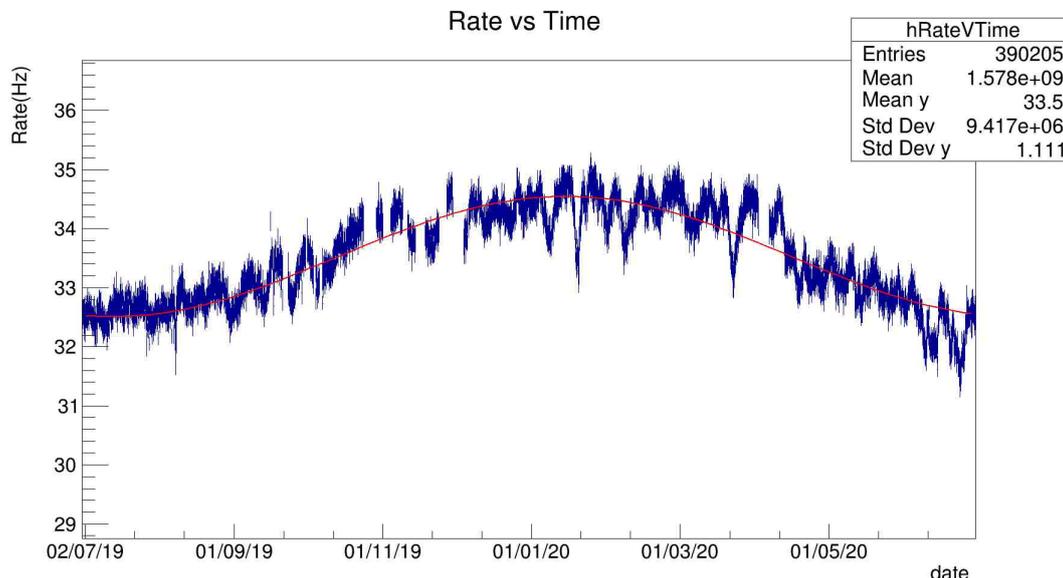


Figura 3.3: Misura del rate in condizione di Majority durante l'anno di presa dati.

Per prima cosa è stato analizzato l'andamento del flusso misurato durante l'intero anno di presa dati. Come si può vedere dalla figura 3.3 è ben visibile l'oscillazione del valore misurato con valori crescenti fino al raggiungimento di un picco durante i mesi invernali. Questa variazione stagionale risulta data da un effetto dipendente dalla temperatura che influenza l'intensità del flusso di muoni cosmici incidenti.

Essendo i pioni la maggiore fonte di muoni cosmici durante le *shower*, l'aumento della temperatura durante i mesi estivi provoca il minore assorbimento di questi ultimi da parte dell'atmosfera a causa della diminuzione della sua densità e aumentando quindi la probabilità che questi decadano in muoni. Di conseguenza aumenta il flusso di muoni incidenti (*effetto positivo*). Tuttavia questo aumento risulta essere la componente di minore entità rispetto ad un altro effetto associato all'espansione atmosferica dei mesi più caldi. Infatti in estate la massa d'aria si espande più in alto e quindi i muoni risultano prodotti a quote più elevate ma sono assorbiti o decadono prima di raggiungere il livello del mare. Questo effetto si traduce in una diminuzione del flusso al livello del mare (*effetto negativo*).

La combinazione di questi due effetti provoca questa variazione annua della misura del flusso, con picchi durante l'inverno e minimi in estate.

Per correggere questa variazione ed ottenere dati più stabili durante il periodo considerato è stato eseguito un *fit* con una funzione sinusoidale per ottenere l'ampiezza percentuale dell'oscillazione il cui valore si attesta a  $(3.038 \pm 0.005)\%$ .

Dal grafico riportato in figura 3.2b, si può notare come le quattro coppie selezionate, ovvero le coppie che danno il contributo maggiore alla misurazione, abbiano tutte gli stessi andamenti durante l'intero periodo.

### 3.4 Correzione della misura di flusso per pseudoefficienza

Successivamente alla correzione della variazione stagionale si è passati alla valutazione del parametro di pseudoefficienza, il quale viene calcolato, come descritto nel capitolo precedente, dai conteggi dei singoli SiPMs durante la fase di ricostruzione ad intervalli di un minuto.

Assumendo per ipotesi la totale indipendenza dei SiPMs associati a ciascuna piastra scintillatrice e utilizzando il parametro di pseudoefficienza come stima dell'efficienza di ciascun SiPM, è stata verificata la dipendenza del rate misurato in condizione di *4-AND*, ovvero dell'attivazione di tutti i SiPMs di una coppia, e in condizione di *Majority* dalle rispettive efficienze stimate secondo le relazioni:

$$\varepsilon_{AND} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{Majority} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_4 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 \varepsilon_4 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 - 3\varepsilon_{AND} \quad (3.2)$$

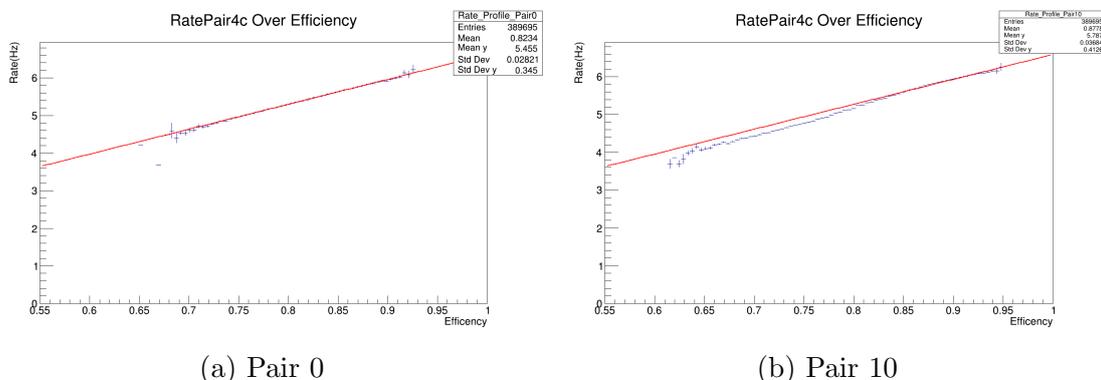
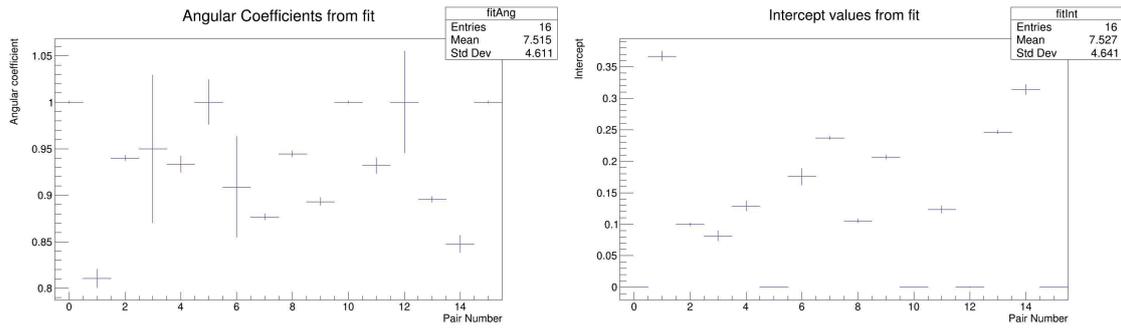


Figura 3.4: *Grafici delle relazioni fra rate misurato in condizione di 4-AND e prodotto delle pseudoefficienze dei SiPMs coinvolti per le coppie 0 e 10.*

Dai grafici in figura 3.4 è ben visibile la dipendenza di tipo lineare fra i valori misurati e il prodotto dei valori di pseudoefficienza, motivo per cui è stato eseguito un fit secondo la relazione  $y = A(B + Cx)$  per verificarne la compatibilità con una retta a coefficiente angolare unitario e intercetta nulla a meno di un fattore moltiplicativo proprio di ciascuna coppia considerata.



(a) Valori del coefficiente angolare per ogni coppia dal fit lineare (b) Valori dell'intercetta per ogni coppia dal fit lineare

Figura 3.5: Nei grafici sono riportati i valori dei parametri estrapolati dal fit lineare per ogni singola coppia. A sinistra vi sono i valori del coefficiente angolare della retta mentre a destra vi sono i valori dell'intercetta.

I risultati, riportati nelle figure 3.5a e 3.5b, mostrano la compatibilità con questa ipotesi di dipendenza lineare delle coppie in corrispondenza verticale (0, 5, 10, 15) che portano il contributo maggiore alla misura totale; tuttavia lo stesso non avviene per le altre coppie, fatta eccezione per la numero 12.

Successivamente, per verificare la validità di questa ipotesi e della correzione alla misura, sono stati confrontati i dati della misurazione del rate in condizione di *Majority*, utilizzati come riferimento, e la somma dei rate misurati dalle singole coppie in entrambe le condizioni correggendoli per effetti di pressione e dividendo i rate delle coppie per i valori di  $\varepsilon_{AND}$  e  $\varepsilon_{Majority}$ .

Come si può vedere dai grafici 3.6a e 3.6b, dopo aver effettuato le correzioni secondo le relazioni ipotizzate, le due misure risultano essere molto vicine fra loro durante l'intero periodo considerato.

Visualizzando poi il rapporto fra le misure corrette per i valori di pseudoefficienza (fig. 3.7) si nota come queste correzioni risultino efficaci e coerenti fra di loro durante l'intero periodo, sovrapponendo quasi perfettamente le due misure.

Vista la buona descrizione del parametro di pseudoefficienza d'ora in poi, per comodità, ci riferiremo ad esso considerandolo l'efficienza del singolo SiPM.

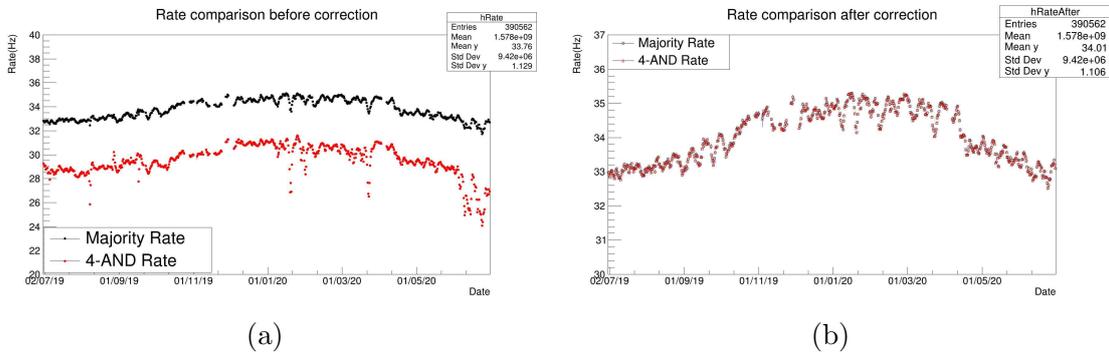


Figura 3.6: Grafici con i valori cumulativi del rate di incidenza in condizione di Majority (nero) e in condizione di 4-AND (rosso) prima (a) e dopo (b) aver corretto i rate per i valori di pseudoefficienza.

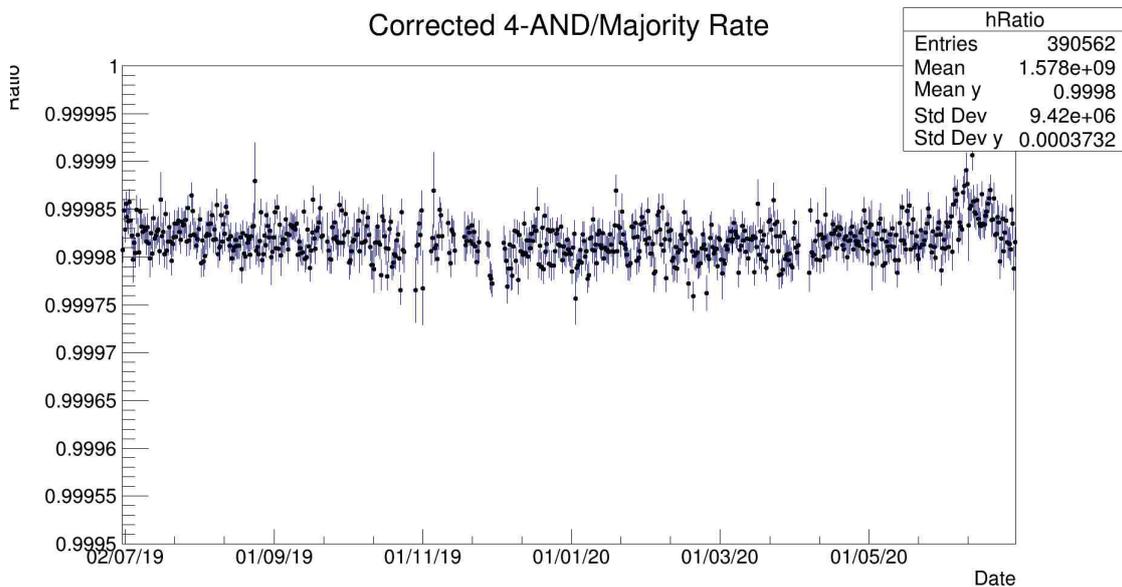


Figura 3.7: Rapporto tra le misure del rate in condizione di 4-AND e in condizione di Majority corretti per i valori di pseudoefficienza durante l'anno.

### 3.5 Relazione tra pseudoefficienza e ToT

Successivamente è stata analizzata la relazione che intercorre fra il parametro di efficienza e il tempo sopra soglia ( $ToT$ ) dei segnali provenienti da SiPMs.

Una maggiore interazione dei muoni con il materiale scintillatore provocherà, idealmente, il rilascio di più fotoni all'interno della lastra aumentando la probabilità di rivelazione e l'intensità del segnale proveniente dai SiPM colpiti, aumentando quindi anche l'intervallo di tempo in cui questi risultano attivi.

Sempre nell'ipotesi di indipendenza dei SiPM è stato analizzato l'andamento dell'efficienza dell' $AND$  dei rivelatori associati ad ogni piastra scintillatrice. È stato notato come il valore del prodotto delle efficienze tende a crescere all'aumentare del valore medio del  $Time\ over\ Threshold$  dei SiPM, come riportato in figura 3.8.

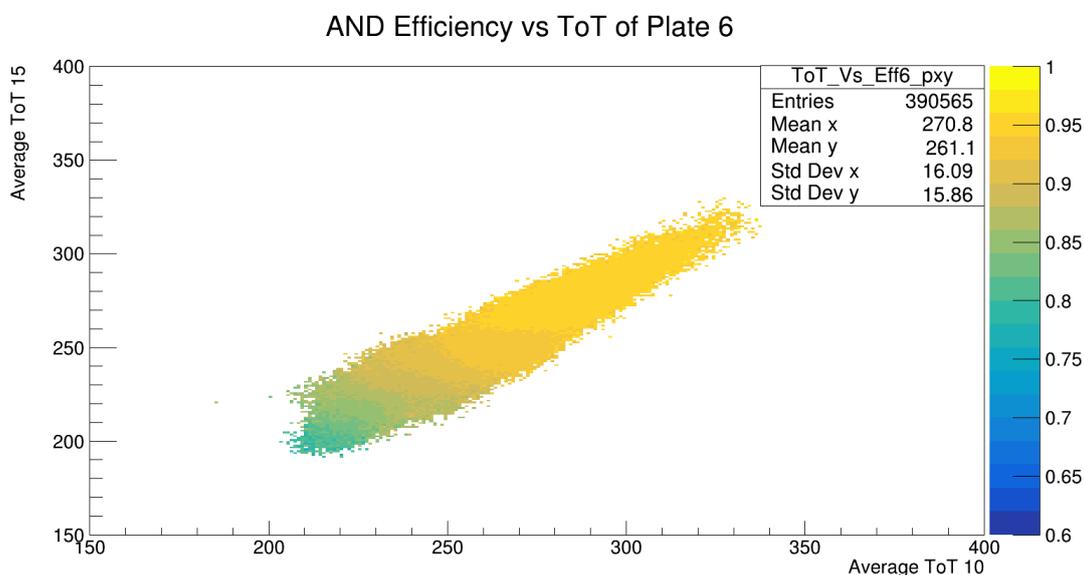


Figura 3.8: Grafico dell'andamento del prodotto di pseudoefficienze della piastra 6 in relazione ai valori di  $ToT$  dei SiPMs associati.

Tuttavia sono stati riscontrati alcuni casi anomali in cui a un'iniziale crescita dei valori di efficienza seguiva un calo come in figura 3.9a, in cui per valori del  $ToT$  medio superiori a circa 300 ns, il prodotto dei parametri di efficienza mostra una flessione nei valori, perdendo circa il 4%. Altri casi come quello riportato in figura 3.9b presentano sempre un andamento crescente dei valori, ma una zona centrale più larga in cui sembra che i valori efficienza crescano indipendentemente dai valori misurati da uno dei due sensori.

Alla luce di queste osservazioni è stato studiato più in dettaglio la relazione di queste misurazioni per ciascun SiPM. Sono stati presi in considerazione i dati di ciascun canale di acquisizione ponendo una condizione di soglia sul valore del  $ToT$

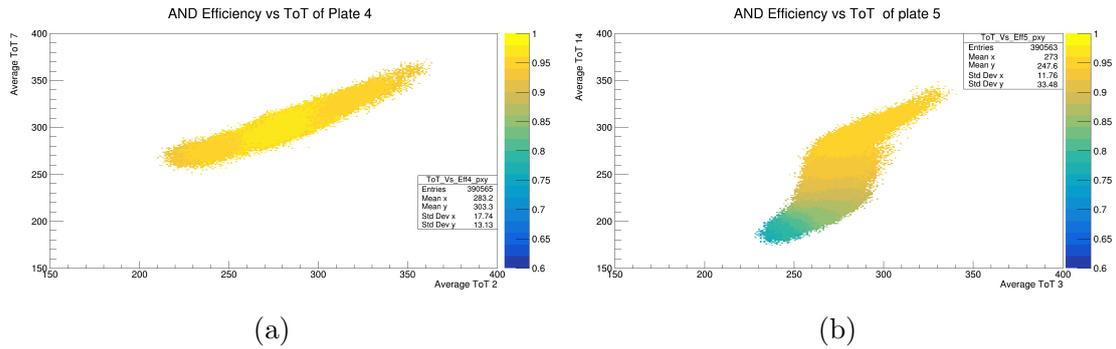


Figura 3.9: Grafici dell'andamento del prodotto delle pseudoefficienze in relazione ai valori del  $ToT$  misurato in casi anomali.

dei sensori appartenenti alla stessa piastra. Questa soglia è poi stata variata fra diversi valori.

Da questa analisi più dettagliata si evince come i valori efficienza di ciascun canale, salvo alcune eccezioni, tendano a crescere stabilmente all'aumentare del valore del  $ToT$  fino a valori compresi fra circa 250-260 ns per poi cambiare bruscamente pendenza e stabilizzarsi attorno a certi valori di efficienza come in figura 3.10.

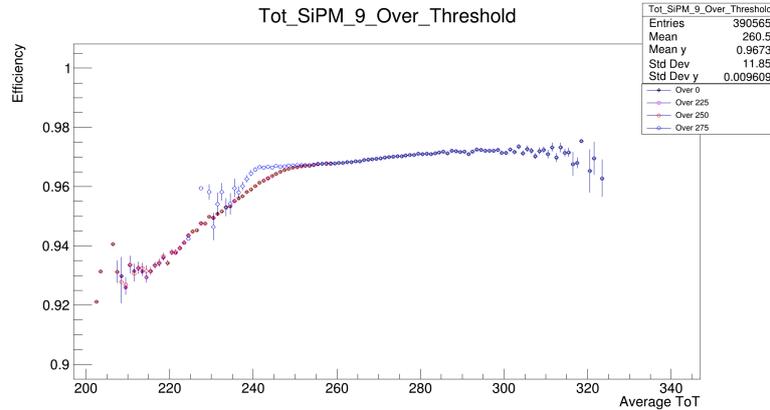


Figura 3.10: Grafico rappresentante i valori di pseudoefficienza medi in relazione al  $ToT$  misurato per il SiPM 9 al variare della soglia del  $ToT$  imposta sul SiPM 4 associato alla stessa lastra.

Si è notato che l'aumento del valore di soglia del  $ToT$  imposto sul SiPM appartenente alla lastra del canale di acquisizione sotto studio provoca uno spostamento verso destra del range dei valori del  $ToT$ , facendo corrispondere quindi intervalli temporali dei segnali in uscita più grandi all'aumentare della durata del segnale

del SiPM della stessa lastra. L'aumento del valore di soglia sul  $ToT$  del SiPM associato produce anche un aumento del range di stabilità e dei valori di efficienza, coerente con l'ipotesi di partenza.

Questo comportamento risulta essere condiviso dalla maggior parte dei SiPMs, tuttavia vi sono alcuni casi in cui il  $ToT$  medio misurato raggiunge valori più elevati rispetto agli altri canali come riportato in figura 3.11 i quali presentano, dopo un'iniziale salita come negli altri casi, un trend decrescente sui valori di efficienza all'aumentare della durata del segnale.

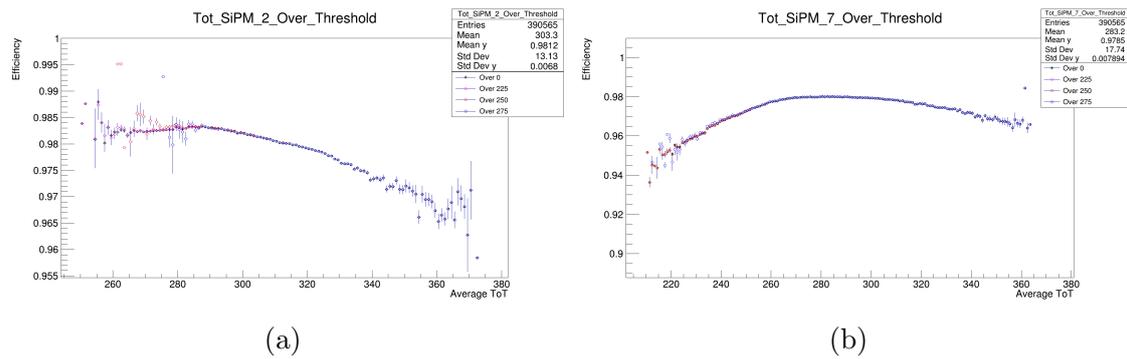


Figura 3.11: Grafici dell'andamento dei valori di pseudoefficienza dei canali 2 (a) e 7 (b), appartenenti alla piastra 4, in funzione del  $ToT$  misurato.

### 3.6 Andamento dei valori misurati in relazione alla temperatura

In seguito si è studiato se la temperatura della scatola contenente le componenti elettroniche potesse influire sui valori misurati dal telescopio e di quanto.

Dall'elaborazione dei dati del rate di incidenza in funzione della temperatura sia in condizione di *Majority* che in condizione di *4-AND*, riportati in figura 3.12, si nota come l'aumento della temperatura produce un abbassamento del valore misurato più marcato nella seconda condizione rispetto alla prima che è meno sensibile alle variazioni di temperatura. Tuttavia questo è valido solo in un intervallo compreso tra i 20°C e i 37°C circa; oltre i 37°C entrambi i rate presentano un brusco cambiamento di pendenza.

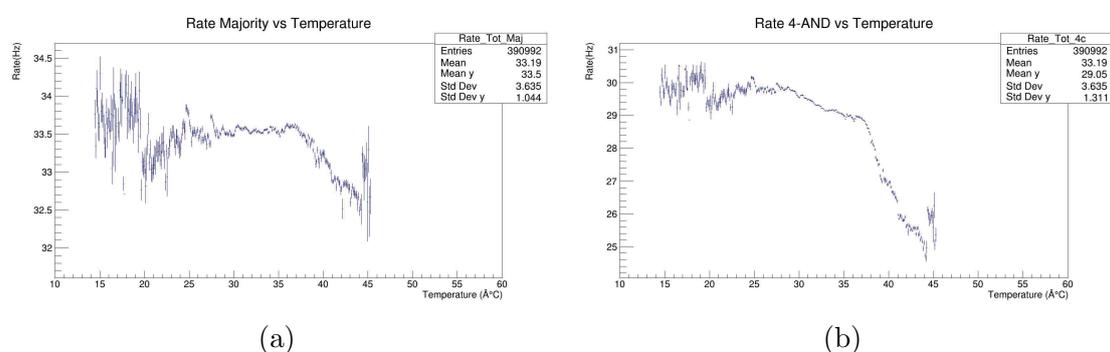


Figura 3.12: Grafici riportanti i valori del rate misurato in condizioni di *Majority* (a) e in condizione di *4-AND* (b) in relazione alla temperatura misurata della box elettronica di *POLA-04*.

Analizzando i valori di *ToT* misurati dal telescopio e messi in relazione con la temperatura della box contenente l'elettronica si è notato che il *ToT*, in generale, tende a diminuire linearmente all'aumentare della temperatura come in figura 3.13, senza troppe fluttuazioni se non in rari casi.

All'aumentare della temperatura dei sistemi elettronici del telescopio ci si aspetta un calo dell'efficienza di rivelazione a causa dell'aumento della tensione di breakdown dei SiPM oltre a un possibile aumento del rumore elettronico. L'aumento di temperatura dei SiPM porta ad una riduzione della differenza fra la tensione di bias e quella di breakdown. A questo consegue una riduzione dell'ampiezza del segnale in uscita che rende più difficile il superamento della soglia imposta, causando anche una riduzione della misura del *ToT* medio.

Dall'analisi di questo parametro in relazione alla temperatura, di cui un esempio è fornito in figura 3.14, si può notare che a basse temperature i valori di *pseudoefficienza* restano tendenzialmente stabili per poi cambiare pendenza superata la stessa soglia per cui vi era un brusco calo del rate misurato.

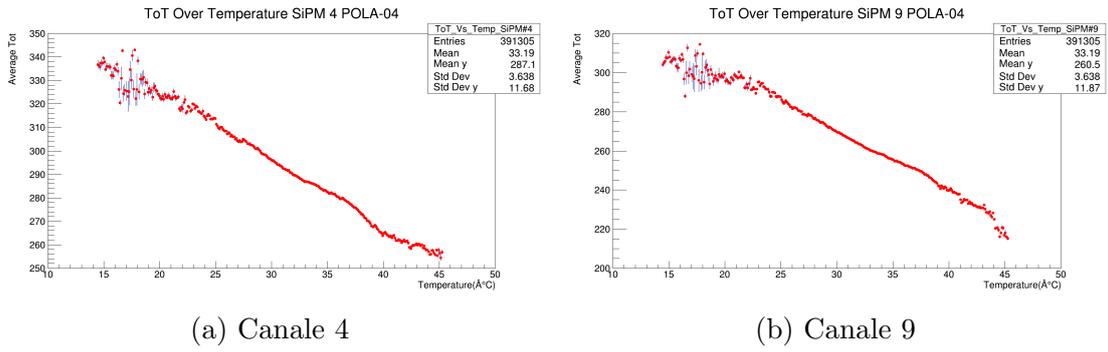


Figura 3.13: *Andamento del valore di ToT misurato da SiPMs di una stessa piastra in relazione alla temperatura della box elettronica.*

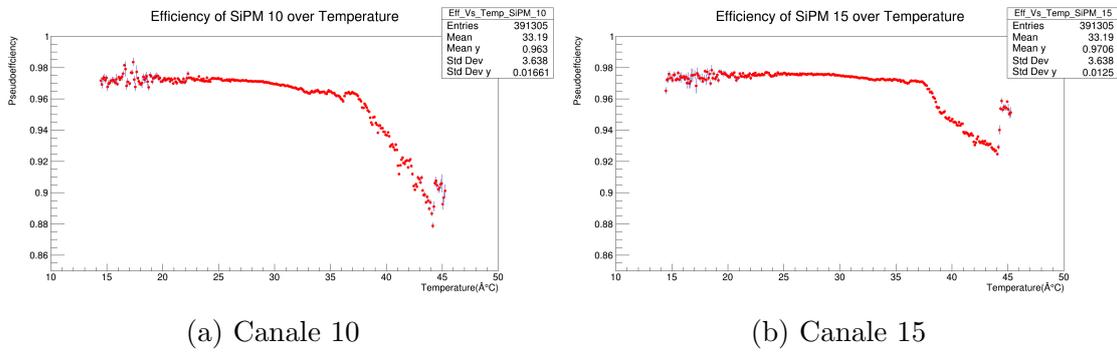


Figura 3.14: *Grafici riportanti i valori di pseudoefficienza calcolati per due SiPM associati alla stessa piastra scintillatrice.*

Dato il riscontro positivo sull'ipotesi di partenza si è confrontato il rate misurato in condizione di  $4-AND$  in relazione alla temperatura prima e dopo la correzione per i valori di pseudoefficienza. Il grafico riportato in figura 3.15 mostra come la correzione, oltre a portare la misura a valori più elevati concordi con la condizione di *Majority*, rende la misura in prima approssimazione indipendente dalla temperatura dell'elettronica del telescopio.

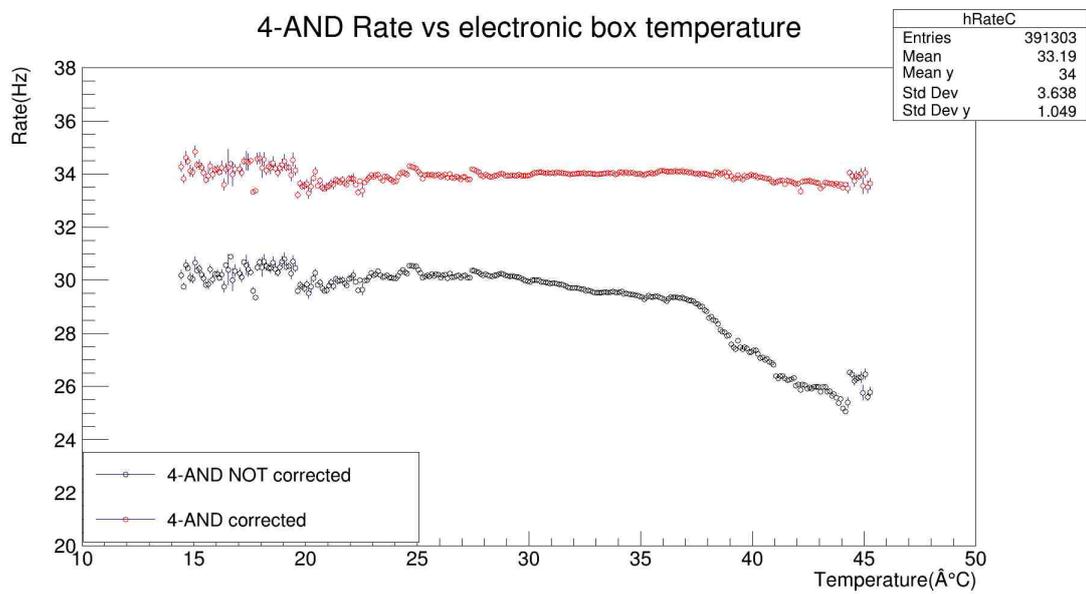


Figura 3.15: Grafico riportante i valori del rate misurato in condizione di 4-AND prima della correzione per pseudoefficienza (in nero) e dopo la correzione (in rosso).

# Conclusioni

Durante questo lavoro di tesi sono stati analizzati i dati provenienti dal telescopio POLA-04, installato alle isole Svalbard, nel periodo compreso fra l'1 Luglio 2019 e l'1 Luglio 2020 per valutare le performance del rivelatore durante un lungo periodo di presa dati.

Dai risultati ottenuti si evidenzia come il parametro interno di pseudoefficienza risulti una buona approssimazione dell'efficienza dei singoli SiPM del telescopio.

Le correzioni sui valori di flusso di muoni cosmici per i valori di pseudoefficienza in entrambe le condizioni di acquisizione (*Majority* e *4-AND*) risultano efficaci e coerenti fra di loro. Inoltre queste correzioni rendono le misure, in prima approssimazione, indipendenti dalla temperatura interna del telescopio, stabilizzando i valori misurati anche per temperature superiori ai 37°C e rendendo la misura più precisa nonostante le possibili interferenze date dalle condizioni esterne.



# Bibliografia

- [1] A. de Angelis, *L'enigma dei raggi cosmici*. Springer, 2012.
- [2] <https://www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici>.
- [3] B. Caccianiga. <http://cosmo.fisica.unimi.it/assets/IntroAstro/IntroAstro1011/Caccianiga6.pdf>.
- [4] M. Arcani, “L'effetto est-ovest.” [https://www.astroparticelle.it/public/Effetto-Est-Ovest\\_pub.pdf](https://www.astroparticelle.it/public/Effetto-Est-Ovest_pub.pdf).
- [5] A. Zilles, *Emission of Radio Waves in Particle Showers*. Springer, 2017.
- [6] E. R. T. Gaisser, R. Engel, *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 2016.
- [7] <http://www.polarquest2018.org>.
- [8] [http://www.polarquest2018.org/wp-content/uploads/2018/02/PolarqEEEst\\_v4.pdf](http://www.polarquest2018.org/wp-content/uploads/2018/02/PolarqEEEst_v4.pdf).
- [9] P. B. et al., “An advanced study of silicon photomultiplier,”
- [10] F. Carnesecchi, *Experimental study of the time resolution for particle detectors based on MRPC, SiPM and UFSD technologies*. PhD thesis, 2018.
- [11] W. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer, 1994.
- [12] S. Rabaglia, “Costruzione e test del rivelatore di raggi cosmici pola-04,”