

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

Misura dell'effetto di latitudine sul flusso di raggi cosmici con il rivelatore PolarqEEEst

Relatore:
Prof.ssa Gilda Scioli

Presentata da:
Greta Bellagamba

Correlatore:
Dott. Francesco Noferini

Terza Sessione di Laurea
Anno Accademico 2017/2018

A mio fratello

Introduzione

Lo studio dei raggi cosmici, sin dalla loro scoperta all'inizio del '900, ha permesso di scoprire nuove particelle e definire il Modello Standard della fisica delle particelle elementari.

Ancora oggi grandi esperimenti continuano il loro studio per capirne la composizione e l'origine, e per collegarli ai fenomeni astrofisici che li hanno generati.

In questa tesi sono stati analizzati i dati del rivelatore POLA-01 dell'esperimento Polar-qEEEst. I dati sono stati raccolti in due periodi: dal 21 luglio al 5 settembre 2018, a bordo dell'imbarcazione Nanuq in viaggio attorno alle Svalbard, e dal 27 novembre 2018 al 31 gennaio 2019 in un viaggio lungo la penisola italiana, coprendo in totale latitudini tra i 38° e gli 82° di latitudine Nord. Il principale argomento di studio qui riportato è la valutazione della variazione di flusso di raggi cosmici rivelati in funzione della latitudine.

Capitolo 1

Raggi cosmici: cenni storici e aspetti teorici

1.1 Che cosa sono?

1.1.1 La scoperta dei raggi cosmici: un laboratorio a cielo aperto

Sin dalla scoperta della radioattività e dell'alto rate di ionizzazione dell'aria nei primi del '900, sorse spontanea una domanda: la radiazione ionizzante proviene dal suolo (radiazione naturale terrestre) o da qualche materiale radioattivo, anche se apparentemente assente, come uranio o radio?

La radioattività era già stata suddivisa in tre categorie: radiazione α , β , e γ ; i raggi γ , ad alta penetrazione, sembravano i candidati ideali per spiegare la ionizzazione dell'aria. Fu così che il fisico austriaco Victor F. Hess, nel 1912, grazie a delle misure svolte in mongolfiera, osservò che la ionizzazione dell'aria aumentava, anziché diminuire, con la quota. La radiazione che provocava tale ionizzazione doveva perciò provenire non dalla Terra, ma dallo spazio interplanetario!

Non conoscendone l'origine, a tale radiazione venne dato il nome di *raggi cosmici*. [1]

Lo studio dei raggi cosmici divenne subito un campo attivissimo: per circa vent'anni infatti tale area di ricerca fu l'unico modo di studiare le interazioni ad alta energia tra particelle. Tale studio portò alla scoperta di nuove particelle, generate negli urti di raggi cosmici (i quali viaggiano a velocità paragonabili a c) con il materiale atmosferico, e quindi allo sviluppo del modello standard e della fisica delle particelle come la conosciamo oggi; [2] le prime nuove particelle scoperte sono state il positrone (e^+) generato da fotoni γ nella produzione di coppie e^+e^- , il muone e vari barioni (come Λ^0 , Ξ e Σ). [3] Inoltre la ricerca in questo campo portò allo sviluppo della QED (quantum electrodynamics) e alla formulazione della teoria degli sciami elettromagnetici (completata nel 1940) da parte di D. V. Skobelzyn, grazie all'osservazione delle shower elettromagnetiche in atmosfera indotte dai cosmici in collisione. [1]

Il laboratorio a cielo aperto dei raggi cosmici però, venne sfruttato a pieno soltanto fino

agli anni '50, giacché da quel momento in poi vennero sviluppati acceleratori di particelle sempre più potenti, permettendoci uno studio più diretto e mirato della fisica nucleare e subnucleare.

Il campo dei raggi cosmici e quello della fisica delle particelle rimangono tuttavia strettamente interconnessi e si influenzano vicendevolmente; la fisica delle particelle fornisce gli strumenti per analizzare e comprendere i vari fenomeni dei raggi cosmici, e i raggi cosmici forniscono nuove informazioni alle nostre conoscenze delle interazioni o delle proprietà delle particelle. **[3]** Rimane inoltre vivo l'interesse verso i raggi cosmici ad alta energia, cioè con energie superiori a 10^{11} GeV, cioè maggiori delle energie raggiungibili dagli odierni LHC. Qual è, ci chiediamo, il fenomeno nel cosmo che riesce ad accelerare una particella fino ad un'energia così grande? Per ora ci limitiamo tuttavia ad analizzare la composizione dei raggi cosmici e la loro classificazione, rimandando la risposta a questa domanda al paragrafo 1.2.

1.1.2 Classificazione e composizione

I raggi cosmici sono nuclei di elementi ionizzati, accelerati ad alte velocità, provenienti dallo spazio (per questo detti *cosmici*).

Sono, per la maggior parte, *nuclei di tutti gli elementi* della tavola periodica, in percentuali diverse, ma tra loro ci sono anche particelle con massa molto piccola (come elettroni) o addirittura nulla (come fotoni γ).

Ovviamente il primato va ai nuclei leggeri; i protoni nudi costituiscono ben il 90% del totale, i nuclei di elio (particelle alpha) sono presenti per il 9%, mentre i nuclei più pesanti sono presenti solo in piccole percentuali. **[3]**

Prima degli anni '60 i dati raccolti fornivano indizi della sola presenza di elementi fino al Fe ($Z = 26$), ma grazie ad alcuni studi su cristalli estratti da meteoriti, si scoprì che la radiazione cosmica presenta anche nuclei più pesanti, secondo la legge: **[2]**

$$\frac{2 \text{ particelle pesanti}}{10^{12} \text{ particelle totali}} \text{ se } Z > 60 \quad (1.1)$$

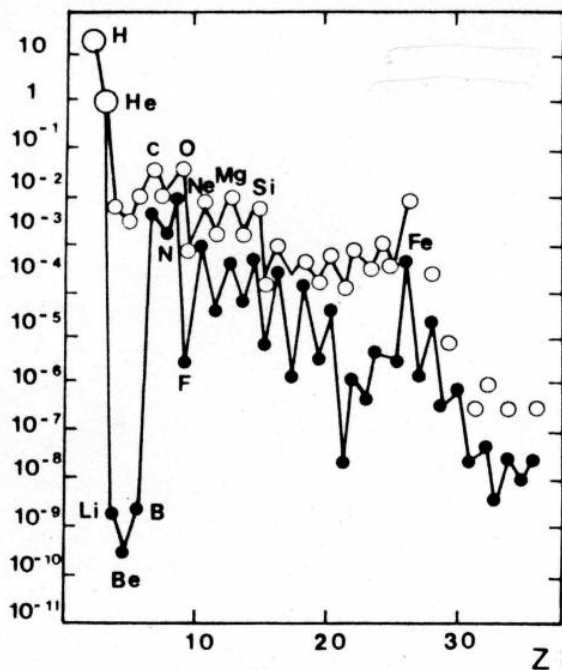


Figura 1.1: Abbonanze di elementi presenti nei raggi cosmici a confronto con il Sistema solare. ○ = abbondanze nei raggi cosmici. ● = abbondanze nel Sistema solare. [13]

Conoscere le abbondanze dei vari elementi risulta molto importante per ulteriori indagini, come ad esempio per studiare le *modalità, il luogo e il tempo* in cui i cosmici si sono formati.

La presenza di elettroni e fotoni tra i raggi cosmici primari è attorno all'1%. In realtà tra gli elettroni primari ci sono anche dei positroni, in un'abbondanza che oscilla tra il 10 e il 20% in dipendenza dell'energia. Gli elettroni acquisiti vicino alla Terra comprendono non solo elettroni primari, ma anche elettroni e positroni secondari. L'energia con cui gli elettroni arrivano alla Terra è molto inferiore a quella dei protoni. La massa degli elettroni, essendo piccola al confronto con la massa protonica, risulta più facile sia da accelerare sia da decelerare: gli elettroni infatti possono perdere energia durante il loro viaggio nello spazio interplanetario in diversi modi, emettendo diverse radiazioni, come Bremsstrahlung o radiazione di Sincrotrone. [2] Essendo infatti i RC¹ formati da materiale ionizzato, ci aspettiamo che il numero di elettroni e di protoni sia lo stesso, ma questa disparità è spiegabile tramite processi di perdita di energia da parte degli elettroni lungo il percorso.

I fotoni γ presenti nei RC possono essere prodotti grazie alla radiazione di Bremsstrahlung, dovuta all'irraggiamento dell'elettrone passante in prossimità di un nucleo atomico, [2] ma, se ad energie sufficientemente alte, (tanto da essere classificati come raggi

¹RC = Raggi Cosmici. Da qui in avanti useremo questa notazione.

γ) allora potrebbero provenire direttamente dall'accelerazione originale. I fotoni infatti, essendo privi di carica elettrica, possono percorrere lunghissime distanze senza essere influenzati da campi magnetici lungo il loro percorso: sono perciò delle importantissime fonti di informazioni sulle sorgenti di emissione dei raggi cosmici. [10]

Quelli appena elencati sono i cosiddetti raggi cosmici *primari*. I raggi cosmici *secondari* invece sono i prodotti delle reazioni nucleari dovute alle collisioni dei primari con i costituenti dell'atmosfera terrestre o a decadimenti deboli. La nostra atmosfera è costituita per la maggior parte da Azoto molecolare (N_2 78.1%), Ossigeno molecolare (O_2 , 20.9%) e Argon (Ar, 0.93%)². [3]. Quando i RC primari colpiscono la stratosfera, sono soggetti a reazioni nucleari che danno luogo alla produzione di sciami adronici, i quali sono poi soggetti a decadimenti deboli per cui si ha produzione di muoni che, decadendo a loro volta, provocano cascate elettromagnetiche.

Parlando di *raggi cosmici* è quindi necessario definire due categorie: i raggi cosmici *primari* e quelli *secondari*.

I raggi cosmici primari

I raggi cosmici primari sono classificabili in base alla loro energia iniziale, che spazia su ben undici ordini di grandezza: dai 10^9 ai 10^{20} eV. Tale classificazione è illustrata in tabella 1.1

Nome	Energia (eV)
High Energy Events	10^9
Very High Energy Events	10^{12}
Ultra High Energy Events	10^{15}
Extreme High Energy Events	$E > 10^{15}$

Tabella 1.1: *Classificazione dei raggi cosmici primari in base alla loro energia.*

²Le percentuali si riferiscono all'unità di volume.

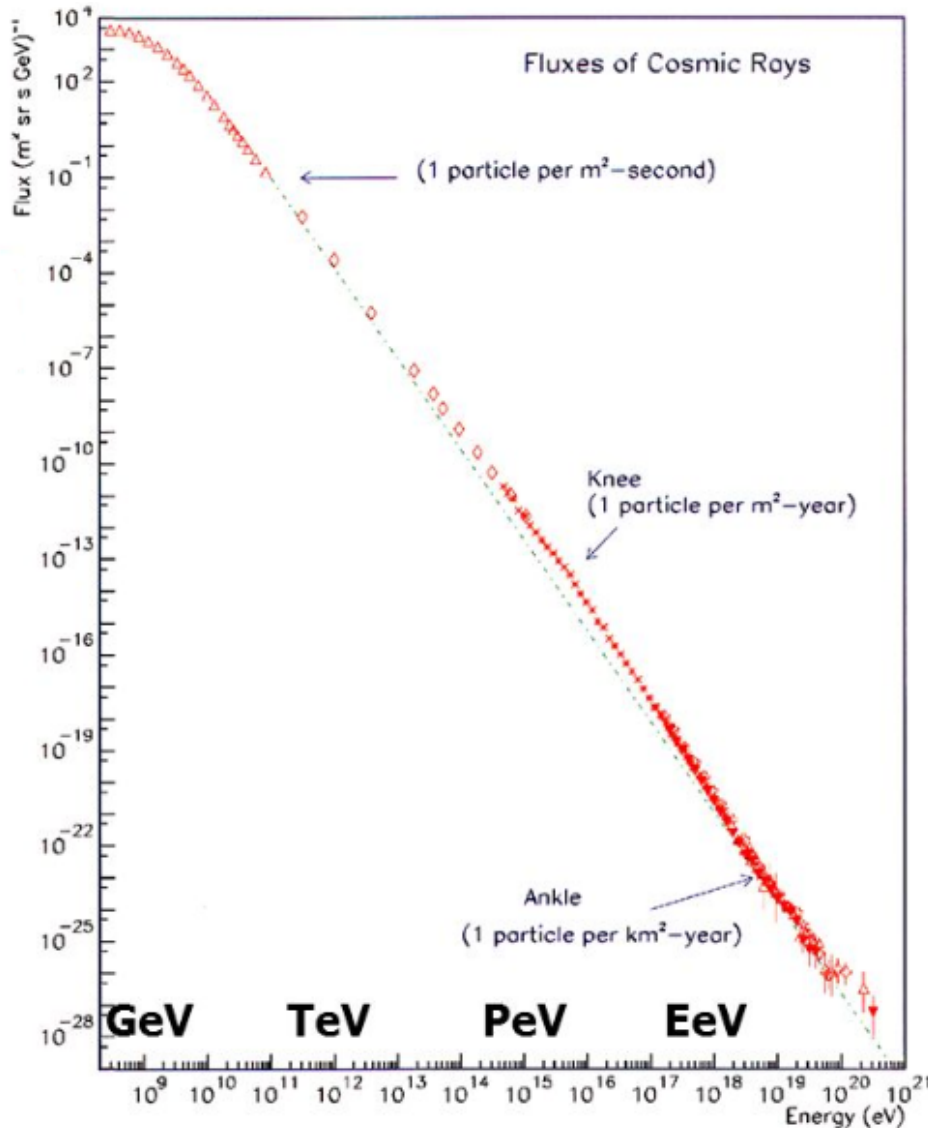


Figura 1.2: Spettro energetico dei raggi cosmici primari. Sono visibili due zone di transizione: il ginocchio (pendenza più ripida) e la caviglia (pendenza meno ripida) [12]

In figura 1.2 vediamo il grafico che descrive l'andamento del flusso di raggi cosmici in funzione dell'energia.

Per energie inferiori ai 10 GeV lo spettro risente di *modulazione solare*. Il Sole ha un'attività periodica di undici anni, ed emette particelle di plasma originate nella corona con temperature e velocità variabili a seconda del periodo nel ciclo di attività. La regione di spazio interplanetario in cui il vento solare è più denso rispetto al materiale interstellare si estende per circa 100 unità astronomiche ed è chiamata Eliosfera. I raggi cosmici che fluiscono verso il sistema solare devono perciò superare l'eliosfera prima di poter

arrivare alla Terra; minore è la loro *rigidità magnetica*, $(\vec{r} \cdot \vec{B})$ minore è la probabilità che penetrino nell'eliosfera. I raggi cosmici provenienti dalla galassia con energie sotto i 10 GeV risentono parecchio della presenza del vento solare, e il loro rate di incidenza sulla Terra diminuisce sensibilmente nel periodo di massima attività solare, e si accentua sensibilmente nel periodo di minima attività. [3]

Per via della rotazione del Sole attorno al suo asse, il flusso di particelle ionizzate (e quindi il campo magnetico congelato in esse) si sviluppa come una spirale archimedeana (vedi figura 1.3). Le componenti del campo magnetico in un sistema di riferimento con il Sole al centro sono:

- Componente radiale: $B_r = B_s R_s^2 \frac{1}{r^2}$
- Componente azimutale: $B_s R_s \frac{\sin \theta}{r}$

dove θ è l'angolo zenitale misurato dal centro del Sole, R_s è il raggio del Sole, e B_s è il campo magnetico sulla superficie del Sole. Per grandi distanze ($r \rightarrow \infty$) la componente azimutale è dominante, e può essere approssimata come circolare. [2]

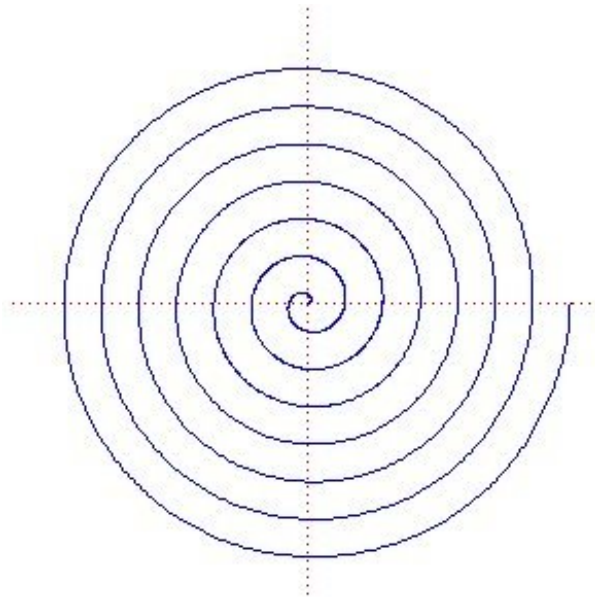


Figura 1.3: *Spirale di Archimede. La funzione che la descrive è: $r(\theta) = a + b\theta$ dove il parametro a provoca la rotazione della spirale, mentre il parametro b controlla la distanza tra i bracci. Essa è un buon modello per descrivere la forma del campo magnetico dato dal flusso di particelle di plasma provenienti dal Sole. [11]*

Torniamo ad analizzare il grafico in figura 1.2: l'andamento dell'energia dei raggi cosmici può essere confrontato localmente con una funzione Ψ del tipo:

$$\Psi = E^{(-p)} \quad (1.2)$$

In cui p (indice spettrale) definisce la pendenza del grafico in unità logaritmiche. Ad energie più alte della zona dominata dall'influenza solare si ha un indice spettrale $p = 2.7$ (più ripido) fino ad un'energia di circa 1 PeV. La prima zona di transizione, detta *ginocchio* (con energia attorno ai 3×10^{15} eV) ha invece un indice spettrale $p = 3$, infatti la curva è più ripida in quella zona. La seconda zona di transizione, detta *caviglia*, (con energia attorno ai 3×10^{18}) ha una pendenza minore. [10] Tale diminuzione di pendenza segna l'energia a cui di solito si trovano le particelle di origine extragalattica. [3]

L'ultimo ostacolo sul cammino dei raggi cosmici, prima che incidano in atmosfera, è il campo magnetico terrestre. Esso infatti ostacola le particelle con bassa rigidità, oppure le devia, facendo sì che l'incidenza in atmosfera dei RC non sia uniforme. Possiamo approssimare il comportamento del pianeta Terra ad un dipolo magnetico.

Poniamo $M =$ momento di dipolo magnetico terrestre ($\approx 8.1 \times 10^{25}$ G cm³)
e $(\frac{M}{2r^2}) =$ Rigidità di una particella in un'orbita circolare di raggio r .

Sia inoltre λ_B la latitudine magnetica.

Posso allora definire la *rigidità di Stoermer* (R_s), che fornisce il valore di rigidità minimo affinché la particella riesca a penetrare il dipolo magnetico:

$$R_s(r, \lambda_B, \theta, \phi_B) = \left(\frac{M}{2r^2}\right) \left\{ \frac{\cos^4 \lambda_B}{[1 + (1 - \cos^3 \lambda_B \sin \theta \sin \phi_B)^{\frac{1}{2}}]^2} \right\} \quad (1.3)$$

in cui $\theta =$ angolo che forma la particella rispetto allo zenit, e $\phi_B =$ angolo azimutale misurato in senso *orario* dalla direzione del polo sud magnetico. [1] Questa formula evidenzia un importante effetto a cui sono sottoposti i raggi cosmici primari nel loro ingresso in atmosfera: la dipendenza dall'angolo azimutale ϕ_B .

Tale dipendenza comporta l'*effetto est/ovest*: per particelle cariche positivamente (negativamente), a parità di angolo zenitale θ , l'effetto di cutoff è più forte se la particella proviene da est. (ovest). L'enunciato per le cariche di segno positivo può essere utilizzato in generale in quanto sappiamo che i RC sono composti da una grande maggioranza di *protoni*. Questo effetto comporta un'asimmetria di rivelazione, in quanto i raggi cosmici a bassa energia penetrano solamente se provengono da ovest, con soglia di energia pari a: $E_{min} = 10.2$ GeV.

Un altro importante effetto nell'interazione tra RC e atmosfera terrestre è il cosiddetto *effetto latitudine*. Questo fenomeno è facilmente comprensibile considerando gli effetti della forza di Lorentz:

$$q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (1.4)$$

che porta le particelle con velocità iniziale non nulla immerse in un campo magnetico a muoversi su una traiettoria elicoidale attorno alle linee dello stesso campo magnetico. All'equatore le linee di campo sono dirette parallelamente al suolo, perciò solo le particelle con grande energia iniziale riescono ad arrivare a terra (effetto di sbarramento). Ai poli invece le linee di campo sono dirette circa perpendicolarmente rispetto a terra, e le particelle riescono così a penetrare nel dipolo magnetico fino ad arrivare al suolo anche con poca energia iniziale, guidate dalla traiettoria delle linee del campo magnetico

terrestre stesso (sbarramento nullo). Il fenomeno delle aurore polari conferma quanto detto.

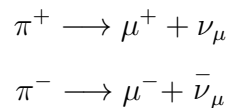
Ci aspettiamo perciò che all'aumentare dei gradi di latitudine aumenti anche il rate di incidenza di RC. [9]

L'effetto latitudine può essere dedotto anche dalla formula della rigidità di Stoermer (vedi (1.3)); se la latitudine è pari a 90° infatti il coseno al numeratore è pari a zero, perciò, annullandosi, la rigidità sarà minima, confermando il risultato già noto che a latitudini polari si ha un'incidenza maggiore di raggi cosmici.

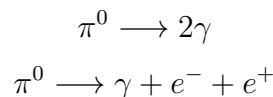
I raggi cosmici secondari

Come già accennato, i raggi cosmici primari, quando interagiscono con i nuclei dell'atmosfera terrestre, generano sciami di particelle, che si sviluppano in interazioni a catena, produzioni, assorbimenti e decadimenti spontanei. [10]

In particolare si hanno urti tra raggi cosmici primari e particelle dell'atmosfera; le reazioni nucleari che si generano tra tali urti danno origine a pioni. Essi sono formati soprattutto nella stratosfera, e hanno vita media $\tau_\pi = 26$ ns. Il loro libero cammino medio dipende dalla loro energia iniziale; se i pioni hanno energia iniziale nell'ordine del GeV allora decadranno in volo, generando muoni e neutrini:

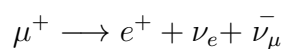


Ad energie nell'ordine del TeV invece, i pioni subiranno reazioni nucleari negli urti con particelle atmosferiche prima di decadere debolmente. Pioni neutri, con un tempo di decadimento brevissimo (circa 8×10^{-17} s) decadono in fotoni, e, più raramente, elettroni:



Tali processi alimentano la cascata elettromagnetica, le cui componenti hanno vita brevissima e vengono riassorbite nell'alta atmosfera. Per la rapidità con cui la componente elettromagnetica viene riassorbita essa è denominata *componente molle* della radiazione cosmica. [9]

I muoni (che sono leptoni) costituiscono la maggioranza della radiazione secondaria, e hanno un tempo di decadimento $\tau_\mu = 2200$ ns. Anche i muoni sono instabili e decadono in elettroni (i loro parenti più leggeri) e neutrini:



Grazie alla teoria della Relatività Ristretta possiamo acquisire muoni al suolo: infatti la loro grande velocità permette il fenomeno di *accorciamento delle lunghezze*, che fa sì che il sistema di riferimento in moto (la particella), in virtù della sua velocità confrontabile con c , veda la distanza che lo separa dal suolo come più corta di quella vista da un osservatore in un sistema di riferimento statico. Muoni di energie inferiori ad 1 GeV infatti hanno lunghezza media di decadimento di 6.6 km, mentre un muone con energia pari a 3 GeV ha una lunghezza media di decadimento pari a 20 km. Se il rate di perdita di energia è sufficientemente lento inoltre, i muoni a 3 GeV possono attraversare l'intera atmosfera senza decadere o essere riassorbiti, e con energie ancora superiori i muoni possono addirittura raggiungere considerevoli profondità nel sottosuolo; motivo per cui essi sono detti *componente dura* dei secondari. [9]

Il numero di particelle cariche dei secondari che arrivano a terra per unità di tempo e superficie è:

$$\frac{1 \text{ particella}}{\text{cm}^2 \text{ min}} \quad (1.5)$$

È una fortuna che l'atmosfera schermi l'arrivo diretto di queste particelle ad alta velocità, altrimenti subiremmo quotidianamente grosse dosi di radiazione. La radiazione da raggi cosmici è stimata essere attorno ad 1 mSv (milli-Sievert) all'anno (media della dose medica sull'intera popolazione). Stimiamo che per ogni 100 Sievert totali sull'intera popolazione degli Stati Uniti si possa sviluppare un tumore. Purtroppo la media dei malati tumorali annua supera di gran lunga l'incidenza di tumori dati da radiazione cosmica, poiché dovuta ad altri fattori, come stile di vita, ambiente, materiali tossici o mutageni. I RC tuttavia possono risultare un pericolo per chi spesso viaggia o lavora in aereo: piloti e personale di volo assorbono infatti una dose annua di ben 5 mSv (il quintuplo della media!). Particolare attenzione va inoltre prestata durante fenomeni di intensa attività solare, in cui la radiazione può diventare molto forte: nel 1956 ad esempio vi fu una violenta eruzione solare che espose chiunque si trovasse al di sopra dei 10.000 metri ad una radiazione di 1 Sievert all'ora! Per fortuna gli aerei non viaggiavano ancora a quote così alte, ma al giorno d'oggi sono previste varie precauzioni in casi del genere, come l'abbassamento della quota di volo. [2]

1.1.3 Extensive air showers

Una *air shower*, detta anche *sciame*, è una cascata di particelle generata da un singolo raggio cosmico primario (nucleo o fotone) ad alta energia (EHECR) quando entra in contatto con l'alta atmosfera. All'inizio il numero di particelle si moltiplica, poi raggiunge un numero massimo e infine si attenua man mano che l'energia delle particelle diminuisce andando sotto la soglia necessaria alla produzione di altre particelle.

Dalla natura della *shower* possiamo determinare il primario che l'ha generata; per un'e-

nergia data infatti showers generate da protoni penetrano più in profondità di quelle generate da nuclei più pesanti. Questo fatto è facilmente comprensibile in termini di dissipazione dell'energia: nuclei più pesanti dissipano energia più rapidamente negli urti con le particelle dell'atmosfera, e perciò non riescono a raggiungere grandi profondità.

La rilevazione delle shower avviene grazie alle coincidenze temporali di eventi acquisiti da rivelatori limitrofi. È possibile determinare la *direzione di provenienza* della shower (e quindi del raggio cosmico primario) grazie al ritardo nell'acquisizione di alcuni rivelatori in coincidenza. L'ampiezza del segnale acquisito ci permette di determinare la natura e l'energia dei primari generatori, anche se, per maggiore accuratezza, è necessario comparare la misura indiretta (a terra, tramite acquisizione di RC secondari) e diretta (in alta atmosfera).

Una *shower* indotta da raggi cosmici ha tre componenti:

- elettromagnetica
- muonica
- adronica

Lo sciame è composto da un nucleo adronico ad alta energia che alimenta continuamente la parte elettromagnetica della shower, creando fotoni tramite decadimento di pioni neutri ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) o di mesoni eta. Ogni fotone ad alta energia genera un *sotto-sciame* elettromagnetico in cui si alternano fenomeni di produzione di coppie e radiazione di bremsstrahlung. I pioni e kaoni di energia minore invece, decadono in muoni. [3]

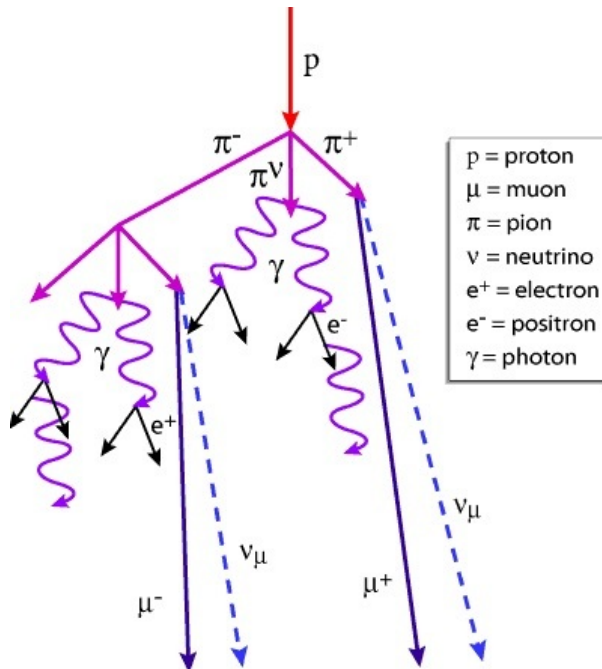


Figura 1.4: Schema di uno sciame di raggi cosmici. [14]

1.2 Da dove vengono?

I raggi cosmici arrivano sulla nostra atmosfera isotropicamente da tutte le direzioni, quindi provengono effettivamente da tutte le direzioni oppure sono stati deviati durante il percorso? La risposta giusta è la seconda, già accennata nei paragrafi precedenti. Sappiamo infatti che non tutti i raggi cosmici provengono dal Sole, e quindi è logico pensare che gli altri provengano da altre sorgenti stellari, più energetiche o più luminose del Sole. Le stelle tuttavia hanno una collocazione ben precisa: nella nostra galassia ad esempio si trovano soprattutto concentrate nella *via lattea*, la sua zona equatoriale. I raggi cosmici tuttavia *non* seguono traiettorie rettilinee, altrimenti vedremmo molti più RC provenire dal centro della galassia!

Consapevoli che la direzione da cui provengono non possa darci alcuna informazione sulla loro effettiva origine, ci concentriamo sulla loro grande energia. Come già accennato, le energie dei RC si distribuiscono su 11 ordini di grandezza (da 10^9 a 10^{20} eV).

Un processo di accelerazione noto è il meccanismo di Fermi, per cui si ha un trasferimento di energia cinetica dal plasma magnetizzato in movimento a singole particelle cariche. L'energia delle particelle cariche aumenta così tanto da raggiungere la distribuzione di energia caratteristica di nuclei e protoni nei RC. Il processo di esplosione di resti supernova è il candidato ideale a causare tale accelerazione. **[3]**

Si pensa inoltre che una tale energia possa essere data dalla *gravità*: collisioni gravitazionali di resti di supernova o di processi di accrescimento di buchi neri supermassicci possono portare a *trasformare* (tramite processi ancora sconosciuti) l'energia potenziale gravitazionale in energia cinetica delle particelle.

L'energia delle particelle accelerate in questi processi supera di gran lunga le energie raggiungibili negli acceleratori di particelle costruiti dall'uomo. Il motivo è semplice; una particella, affinché venga accelerata, deve essere confinata in una regione di raggio \vec{r} , in cui sia sottoposta ad un campo magnetico \vec{B} . L'energia finale della particella sarà proporzionale alla rigidità magnetica:

$$\vec{r} \cdot \vec{B} \tag{1.6}$$

I campi magnetici che possiamo produrre sulla Terra raggiungono al massimo i 10 T (circa un milione di volte più intensi del campo magnetico terrestre), e le distanze massime in cui riusciamo a confinare una particella raggiungono al massimo i 100 km, per produrre un'energia totale (negli odierni LHC) di circa 10 TeV (10^{13} eV). Le supernove invece hanno raggi di centinaia di anni luce, e i nuclei galattici attivi hanno raggi di decine di migliaia di anni luce. Risulta ovvio perciò che, se vale la 1.6, i nostri LHC non possano competere con gli *acceleratori galattici e extragalattici*, e in più questi ultimi, come sottolinea A. De Angelis in "L'enigma dei raggi cosmici", sono gratis. **[10]**

Capitolo 2

Apparato sperimentale e acquisizione dati

2.1 Il dirigibile Italia e la spedizione Polarquest2018

Il 15 maggio 1928, a bordo del dirigibile Italia, il generale Umberto Nobile, insieme ad alcuni esploratori, tecnici e scienziati, partì per una spedizione verso il Polo Nord. Quella era la seconda missione per Nobile, già a capo di un'altra spedizione avvenuta due anni prima, che aveva condotto il dirigibile Norge verso le stesse estreme latitudini.

Il 25 maggio 1928, dopo aver completato la spedizione nelle regioni artiche, il dirigibile Italia precipitò a Nord-Est di Nordaustlandet, nell'arcipelago Svalbard. Dieci esploratori vennero scagliati a Terra, 9 di loro ancora vivi, e furono recuperati da una missione di salvataggio dopo sette settimane. I sei rimasti a bordo volarono via con il resto del dirigibile, e non furono più ritrovati.

Dopo 90 anni dall'avvenimento, tra il 21 luglio e il 4 settembre 2018 si è svolta la missione Polarquest2018, pioniera della ricerca dei resti del dirigibile e dell'equipaggio, ma anche finalizzata, oltre che alla commemorazione di un evento storico di portata mondiale, alla ricerca scientifica.

Gli scopi scientifici della missione sono:

- Raccogliere campioni di acqua marina, ghiaccio e atmosfera al fine di rilevare l'impatto dell'inquinamento umano in termini di microplastiche e monitorarne gli effetti sul cambiamento climatico.
- Misurare il flusso di raggi cosmici sopra il circolo polare artico, che sappiamo essere lì molto intenso per via delle linee del campo magnetico terrestre approssimativamente verticali.

Un altro scopo della missione, seppur non diretto, è stato *mandare un messaggio a favore dell'ambiente*. Il viaggio verso la natura incontaminata infatti (dai 66° agli 82° di latitudine nord) mira ad essere il simbolo dell'importanza dell'Artide nel nostro futuro sostenibile. A rafforzare questo messaggio c'è Nanuq, la barca a vela utilizzata per

il viaggio; la combinazione di materiali innovativi con cui è stata costruita le conferiscono un'isolamento termico efficientissimo, consentendole il minor impatto ambientale possibile. [6]

2.1.1 Nanuq: la barca a vela-laboratorio sostenibile

Nanuq (*orso polare* in lingua inuit), è una barca a vela di circa 18 m (60 piedi), disegnata dall'architetto ginevrino Pietro Gallinelli, che ha partecipato come skipper, insieme al suo team, al viaggio attorno alle Svalbard. [4]

La barca, costruita apposta per resistere a temperature artiche (fino a -40°C), è stata testata da Gallinelli nell'inverno tra il 2016 e il 2017, quando ha trascorso l'intera stagione invernale sulla barca in Groenlandia, lasciando che i ghiacci la circondassero. [7]

Nanuq è completamente isolata termicamente grazie alla combinazione di materiali come vetroresina, polistirene e resina epossidica, e fa ampio uso di energie rinnovabili. [8] Il viaggio a bordo di Nanuq è stato possibile perché il mare attorno alle Svalbard, per la prima volta in centinaia di anni, non era ghiacciato. [6]



Figura 2.1: La barca a vela Nanuq alle isole Svalbard. [7]

2.1.2 PolarquEEEst

L'esperimento PolarquEEEst, nell'ambito della spedizione Polarquesst2018, è un progetto promosso dal Centro Fermi, dall'INFN e dal CERN. Esso consiste nell'acquisizione di

dati sul flusso dei raggi cosmici grazie al rivelatore POLA-01, appositamente progettato e realizzato al CERN da studenti di alcune scuole superiori italiane.

PolarquEEEest nasce come spin-off del progetto EEE (Extreme Energy Events), ideato dal Prof. A. Zichichi nel 2004, con lo scopo di indagare la fisica dei *raggi cosmici ad alte energie* su una larga estensione geografica. La distribuzione di rivelatori su un'area molto estesa contribuisce infatti all'individuazione di sciame di grandi dimensioni, causati cioè da raggi cosmici primari ad energie molto elevate.

Grazie ad EEE, oggi ben 51 scuole superiori italiane e 8 laboratori ospitano dei rivelatori a gas (con Multigap Resistive Plate Chambers) per l'acquisizione dati, comunicanti tra loro tramite una piattaforma online che raggruppa i loro dati grazie ad un sistema GPS, e li rende fruibili anche in tempo reale. Altre 54 scuole superiori contribuiscono, pur prive di rivelatore in sede, all'analisi dati; tutto il lavoro è inoltre costantemente monitorato da controlli automatici sul funzionamento del rivelatore e da ricercatori esperti. [4]

Nell'ambito del progetto *spin-off* PolarquEEEest sono stati costruiti 3 rivelatori: POLA-01, POLA-02 e POLA-03, che sono stati messi in rete con gli altri rivelatori EEE presenti su tutto il suolo italiano. [6]

POLA-01 è stato imbarcato sulla barca a vela Nanuq, affinché raccogliesse dati circumnavigando le Svalbard, spingendosi così a latitudini inesplorate dal punto di vista dell'acquisizione di RC. POLA-02 e POLA-03 sono stati invece collocati rispettivamente in una scuola norvegese e in una italiana e sono quindi dei riferimenti fissi.

Uno degli scopi di questa acquisizione simultanea di tre rivelatori simili a latitudini diverse è osservare la variazione di flusso di cosmici in base alla variazione di latitudine. Avere dei rivelatori *fissi nello spazio* infatti ci permette di valutare la variazione del flusso di raggi cosmici *nel tempo*, per poter effettuare osservazioni o correzioni sull'acquisizione del rivelatore che si muove nello spazio (in questo caso POLA-01).

2.2 Il rivelatore POLA-01

2.2.1 Struttura ed elettronica

Il telescopio POLA-01 (così come POLA-02 e POLA-03) è stato costruito interamente da studenti nell'ambito del progetto EEE.

Il rivelatore è formato da due piani (contrariamente ai rivelatori nelle scuole italiane, su tre piani), i quali sono formati da 4 piastre di materiale scintillatore ciascuno (vedi figura 2.2). Ogni piastra è accoppiata a due fotomoltiplicatori al silicio (SiPM), che hanno lo scopo di raccogliere la luce e di trasformarla in un segnale elettrico misurabile.

Nella costruzione del rivelatore si sono dovuti rispettare dei parametri, in vista del suo impiego su una barca con capacità e potenza ridotte: [7]

- Il peso non deve superare i 50 kg
- La potenza dissipata deve essere inferiore a 15 W

- Il volume deve essere ridotto: Ogni piastra di materiale scintillatore è larga 30 e lunga 20 cm; la distanza tra i due piani è di 11 cm.

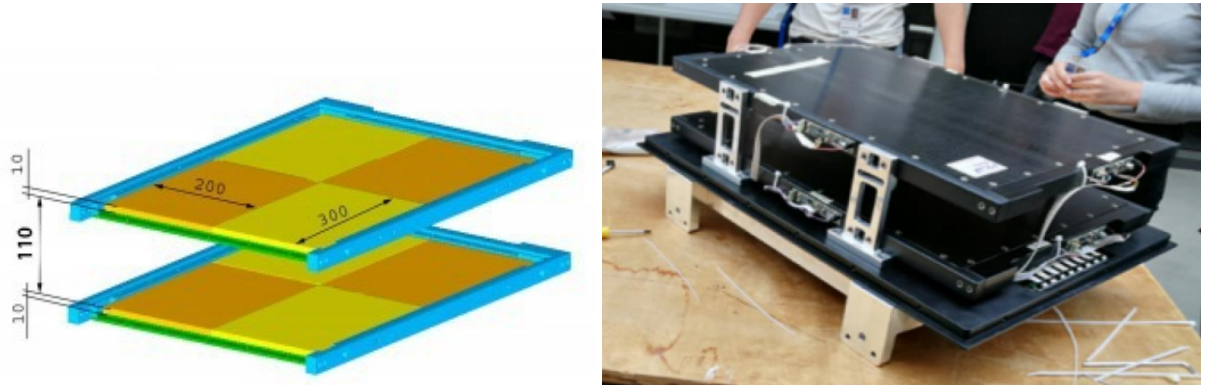


Figura 2.2: *Struttura base del rivelatore POLA-01. A sinistra: schema riassuntivo delle dimensioni, A destra: POLA-01 in assemblaggio.*[4]

La posizione dei SiPM è stata studiata con attenzione; in alcuni lavori precedenti (vedi [4] e [5]) sono state sperimentate diverse geometrie, giungendo alla conclusione che le posizioni di massima efficienza dei SiPM erano due:

- Un SiPM sul lato lungo, l'altro sul lato corto.
- Entrambi a cavallo di un due spigoli.

La configurazione finale scelta per i rivelatori è la seconda: gli scintillatori sono stati posti sugli spigoli delle lastre, appositamente smussati per ospitarli. Nei punti di congiunzione tra due lastre i SiPM sono alimentati da delle schede elettroniche di Front-End, che trasformano il segnale del SiPM in segnale LVDS, dopo aver applicato una soglia. Otto schede di front-end consumano solamente 2 W!

I due livelli del rivelatore sono contenuti in una scatola protettiva; l'elettronica aggiuntiva è sistemata in un piccolo box al di sotto del secondo livello, fuori dall'involucro. Le parti elettroniche più importanti sono: [7]

- Raspberry PI, che raccoglie tutti i dati e comunica con l'esterno
- Batteria di backup
- GPS/GNSS-Ublox
- Sensori vari, come accelerometro, giroscopio, barometro ecc..
- Una Trigger & Read Out Board, che si occupa sia di inviare il segnale di trigger, sia della misura del TOT (Time over Treshold, proporzionale alla carica del segnale), sia di inviare il flusso di dati al Raspberry e fornirgli un voltaggio.

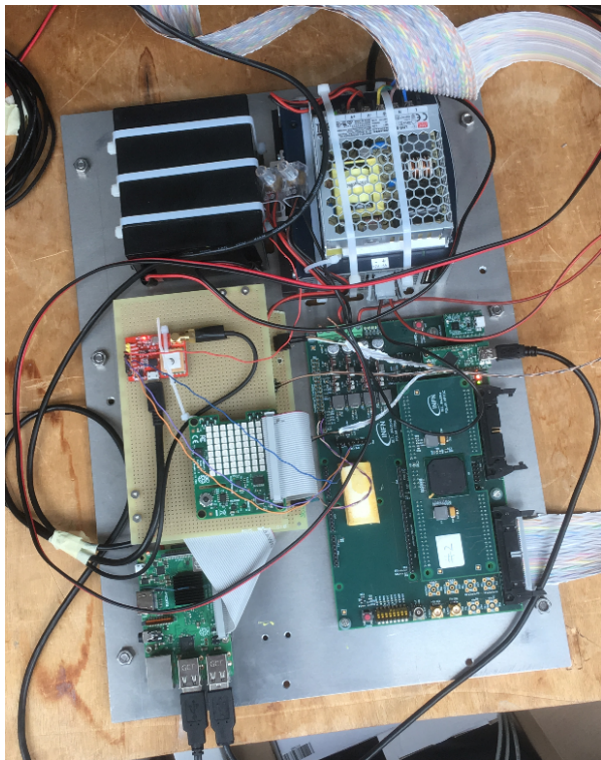


Figura 2.3: Elettronica di POLA01. Nella parte sinistra vediamo, dall'alto: la batteria di backup, il GPS/GNSS-Ublox e i sensori vari, e infine la CPU Raspberry PI. Sulla destra è collocata la scheda elettronica che interfaccia il raspberry al rivelatore.[7]

2.2.2 La condizione di trigger per l'acquisizione

I dati sono acquisiti secondo la cosiddetta condizione di *majority*: il muone che attraversa una delle quattro piastre superiori e una delle quattro piastre inferiori fa accendere i SiPM corrispondenti, ma la condizione affinché il dato venga acquisito (condizione di trigger che fa partire l'acquisizione) è che *almeno tre* SiPM si siano attivati, *di cui due appartenenti alla stessa piastrina di scintillatore*, al fine di ridurre possibili false coincidenze. Se infatti il muone incide nel lato opposto rispetto al SiPM, il segnale potrebbe essere tanto piccolo da non superare la soglia, così da far perdere il dato. Il trigger parte quindi non appena si ha la condizione descritta, ma il segnale di acquisizione attende 1050 ns prima di attivarsi in modo da lasciare un tempo sufficiente ad acquisire un completo tot (Time Over Treshold). La condizione di *majority* è stata scelta per massimizzare e stabilizzare l'efficienza del rivelatore poiché si concede che uno dei 4 SiPM possa non aver visto, e in più, considerando tre SiPM per l'attivazione del trigger anziché due, si assicura l'eliminazione del rumore di fondo.

Consideriamo ad esempio la condizione in cui l'efficienza sia approssimabile al 100%: l'efficienza di riferimento sarà uguale a 1; allora l'efficienza del rivelatore può essere scritta come:

$$1 - \Delta\varepsilon$$

dove $\Delta\varepsilon$ («1») rappresenta la variazione rispetto al valore ideale, o meglio la *fluttuazione* sull'efficienza dovuta a vari fattori, come cambiamento di temperatura o pressione, oscillazioni nel voltaggio ecc. Per i nostri scopi, $\Delta\varepsilon$ sarà perciò la probabilità che un singolo SiPM non si sia acceso, mentre $(1 - \Delta\varepsilon)$ sarà la probabilità che il singolo SiPM si sia acceso, partecipando al trigger.

Considerando una delle quattro lastre di scintillatore del livello superiore e una del livello inferiore, avremo quattro SiPM (due per ogni lastra). Secondo quanto detto in precedenza, la condizione affinché il trigger non si attivi, e il dato sia perso, è che almeno due SiPM su quattro *non* siano attivi. Secondo il calcolo delle probabilità perciò avremo sei modi di combinare i quattro SiPM in gruppi di due (combinazioni semplici) affinché si ottenga la condizione di *non trigger* (dato perso):

$$\frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{4!}{2!(4-2)!} = 6$$

Ignorando i termini cubici in $\Delta\varepsilon$ (infinitesimi) e ponendo:

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

dalla somma si ottiene che la probabilità totale di perdere il dato è:

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

E perciò la *probabilità di trigger* è:

$$P_{\text{trigger}} = 1 - 6\Delta\varepsilon^2.$$

In questo calcolo si è assunta l'approssimazione della totale indipendenza dei 4 SiPM. Grazie a questa condizione le fluttuazioni di efficienza $\Delta\varepsilon$ dell'1% influenzano il rate acquisito soltanto dell'1‰.

Considerando la condizione con quattro SiPM abbiamo infine che l'efficienza totale sul trigger pari a: $1 - 4\Delta\varepsilon$

2.3 I viaggi di POLA-01

Dopo il ritorno di Nanuq, POLA-01 è stato ospite di molte conferenze dimostrative in Italia e in Europa.

Nel dicembre 2018, poi, è stato protagonista di un altro viaggio di acquisizione, questa volta via terra, nel sud Italia.

Arrivato a Cosenza il 3 dicembre 2018, POLA-01 è giunto al liceo scientifico G. B. Scorza, una delle scuole attive nel progetto EEE, e ospitante dei 51 rivelatori.

Dopo due giorni di acquisizione a Cosenza (sia outdoor che indoor, al primo e al secondo piano dell'edificio del liceo Scorza), il 5 dicembre POLA-01 è stato portato a Messina, acquisendo dati durante il viaggio. I dati acquisiti sul traghetto purtroppo non sono utilizzabili in quanto la schermatura dovuta al materiale di cui è fatta la nave risulta troppo forte.

Partiti in automobile da Messina verso Erice, i ricercatori hanno fatto tappa a Cefalù, acquisendo dati (per circa un'ora) al livello del mare. Proseguendo il viaggio verso Erice risultava evidente che il rivelatore stesse acquisendo anche del rumore elettrico, oltre che muoni. Passando sotto delle gallerie infatti, che dovrebbero schermare di parecchio l'incidenza, il rate acquisito rimaneva comunque molto alto. La causa del rumore è stata individuata nel cavo inverter utilizzato per l'alimentazione di POLA-01; per questo motivo la salita verso Erice è stata effettuata con la sola batteria di POLA-01.

Anche la presa dati ad Erice (outdoor) è stata effettuata senza inverter, allacciando POLA-01 ad una presa di corrente. Nell'analisi dati abbiamo tenuto conto delle varie condizioni di acquisizione:

- la presenza o meno dell'alimentatore inverter
- la posizione del rivelatore nell'acquisizione (outdoor o indoor)
- la quota in cui si trova Erice (circa 700 m), valutando se effettivamente le variazioni di flusso fossero dovute alla sola pressione.

L'otto dicembre POLA-01 è stato poi spedito a Catania per ulteriori acquisizioni.

L'effetto dell'inverter è stato stimato utilizzando le ditribuzioni dei TOT, con una correzione che sarà illustrata nel capitolo successivo.



Figura 2.4: Il rivelatore POLA01 a Cosenza. Nella foto vediamo degli studenti del liceo Scorza insieme a due insegnanti e ai dottori (da sinistra) M. Garbini, F. Noferini e C. Pellegrino

Capitolo 3

Analisi dati

Lo scopo primario di questa tesi è valutare il rate di incidenza di raggi cosmici in funzione della latitudine; a questo scopo sono stati utilizzati dati acquisiti a diverse latitudini, per un range che spazia dai 38° agli 82° di latitudine nord. Di seguito è riportato il grafico del rate in funzione del tempo per le acquisizioni, in cui vediamo i dati acquisiti con Nanuq alle Svalbard e via terra a Vigna di Valle (RM), a Cosenza, Cefalù (PA) e a Catania. Il rate riportato si riferisce ad una media su un tempo di 60 secondi.

Risulta già evidente la variazione di rate tra il primo periodo (tra i 66° e gli 82° di latitudine Nord) e il secondo periodo (tra i 38° e i 42° di latitudine Nord; per ottenere una stima migliore però è stato necessario *correggere* questi dati in base alle condizioni di acquisizione.

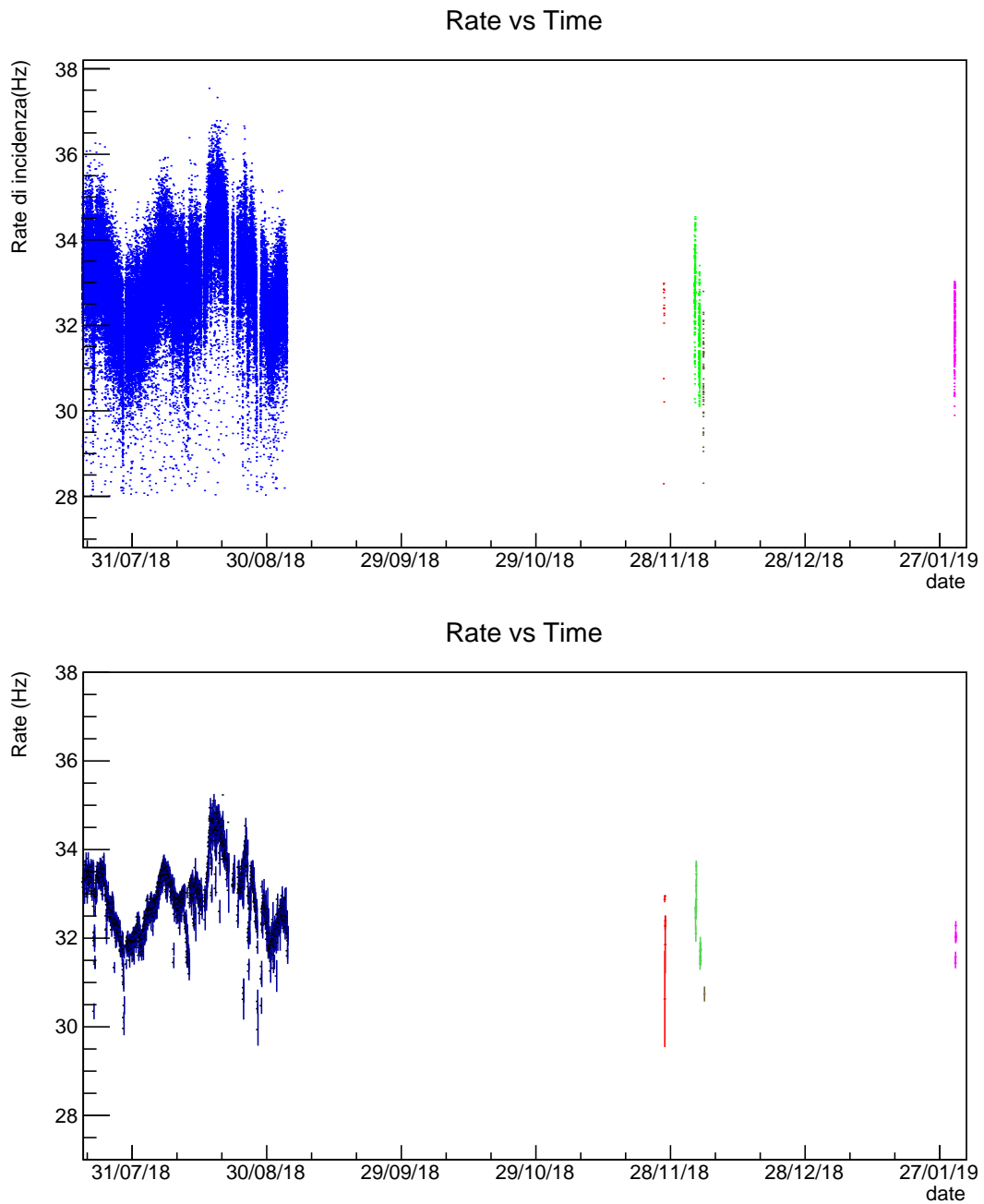


Figura 3.1: *Rate vs time, istogramma bidimensionale e suo profile (mediana). I dati riportati sono stati acquisiti alle isole Svalbard (in blu), a Vigna di Valle (Bracciano, RO, in rosso), a Cosenza (in verde), a Cefalù (PA, in marrone), e a infine a Catania (in rosa). Si nota già un lieve abbassamento del rate per le acquisizioni in Italia, anche se i dati devono essere corretti per*

3.1 Correzioni applicate ai dati

Al fine di valutare gli effetti della latitudine sull'incidenza di raggi cosmici abbiamo dovuto apportare correzioni ai dati per due diversi fattori: l'orientazione spaziale e la pressione.

L'orientazione, specialmente per un rivelatore montato su una barca a vela, influenza direttamente il tasso di incidenza di muoni; se la nave si inclina infatti, la zona di cielo verso cui il rivelatore è esposto equivale ad uno spessore atmosferico molto più grande rispetto a quello che si ha quando il rivelatore si trova parallelo a terra. Maggiore spessore atmosferico corrisponde ad un maggiore numero di particelle incontrate dai muoni nel viaggio verso il rivelatore, con maggiore probabilità che essi vengano assorbiti durante il loro percorso, facendo sì infine che il rate acquisito sia inferiore a quello che si avrebbe con il rivelatore parallelo a terra.

La pressione è rilevante poiché ad una maggiore pressione corrisponde una maggiore densità delle particelle in atmosfera, cioè una maggiore probabilità che i muoni siano riassorbiti, e perciò ad un minore rate acquisito.

I dati del viaggio in Sicilia sono stati corretti considerando l'influenza di un cavo inverter utilizzato per l'alimentazione del rivelatore, il quale provocava del rumore elettrico falsando il rate effettivo.

3.1.1 Effetti di orientazione

La correzione per effetti di orientazione è stata effettuata solamente per i dati di Svalbard, in quanto durante le acquisizioni via terra il rivelatore era sempre posizionato parallelamente al suolo, in pianura. Per effettuare tale correzione abbiamo diviso il rate per una funzione Ψ :

$$\Psi = 1 + \rho \left(1 + \frac{g_z}{g}\right) \quad (3.1)$$

dove:

- g è il modulo del vettore \vec{g} , accelerazione angolare
- g_z è la componente zenitale di \vec{g}
- ρ è lo slope del fit del grafico rate vs $\frac{g_z}{g}$ (figura 3.3)



Figura 3.2: La barca a vela Nanuq inclinata a 45° durante una secca. L'inclinazione della barca fa sì che POLA-01 acquisisca la maggior parte dei dati non più dallo zenit ma da una diversa zona di cielo. In questo caso il percorso in atmosfera che i muoni devono compiere per raggiungere POLA-01 perpendicolarmente alle piastre di scintillatore sarà più lungo, con maggiore probabilità di assorbimento e quindi con conseguente abbassamento del rate acquisito.[7]

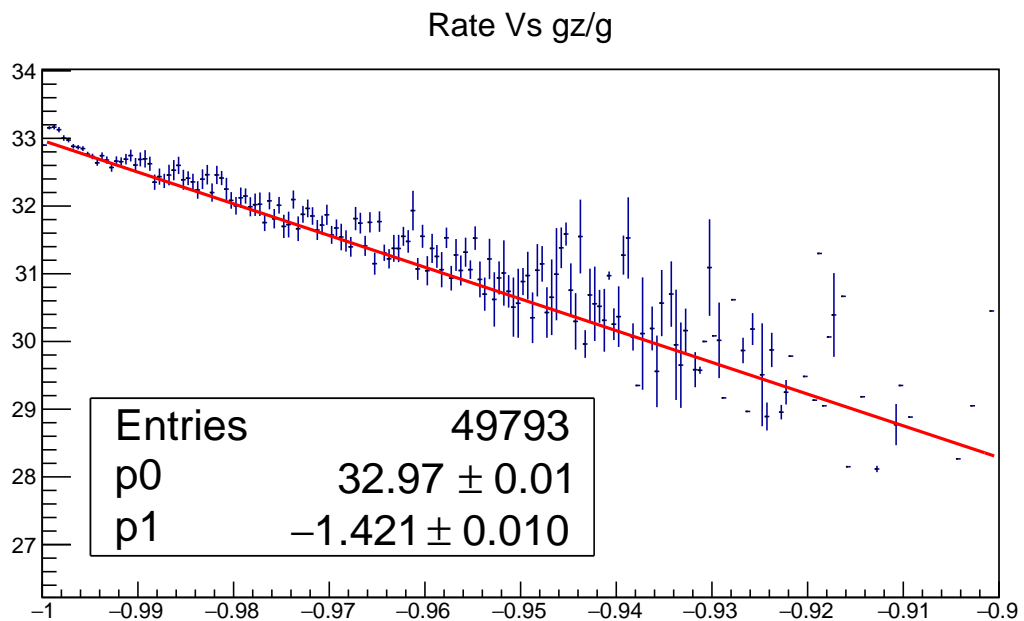


Figura 3.3: Fit di Rate vs $\frac{gz}{g}$. Il parametro 1 corrisponde allo slope utilizzato per correggere il rate come illustrato nella formula 3.1

3.1.2 Effetti di Pressione

Per correggere per effetti di pressione è stato diviso il rate acquisito per una funzione Φ :

$$\Phi = \exp[\alpha(p - p_{\text{rif}})] \quad (3.2)$$

dove:

- α è il coefficiente barometrico (valore di riferimento $\alpha = -0,002189 \pm 7,365 \times 10^{-6}$)
- p è la pressione corrispondente ai 60 secondi di acquisizione
- p_{rif} è la pressione utilizzata come riferimento, cioè la pressione media dell'acquisizione a Cefalù (a livello del mare), pari a 1024 mbar.

Il coefficiente barometrico utilizzato è lo stesso per tutte le latitudini, e corrisponde alla migliore stima del coefficiente barometrico per dati presi alle Svalbard. Al fine di ottenerlo i dati delle Svalbard (già corretti per effetti di orientazione) sono stati suddivisi in quattro periodi, ed è stato effettuato un fit esponenziale di rate vs pressure per ogni periodo, in cui lo slope del fit fornisce il coefficiente barometrico. (vedi figura 3.3)

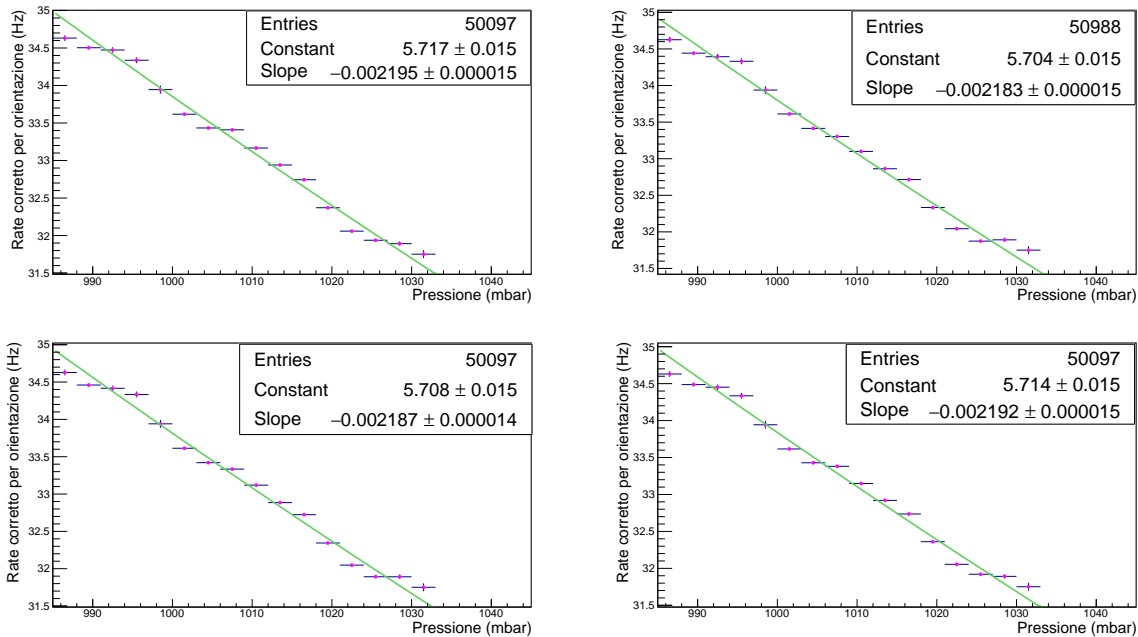


Figura 3.4: Grafici rate vs pressure per quattro periodi di acquisizione alle Svalbard. Il coefficiente barometrico per ogni grafico è lo slope del fit esponenziale

A questo punto i quattro coefficienti barometrici sono stati messi in relazione tra loro per ottenere la miglior stima: a questo scopo è stato eseguito un fit con una costante. (vedi figura 3.5)

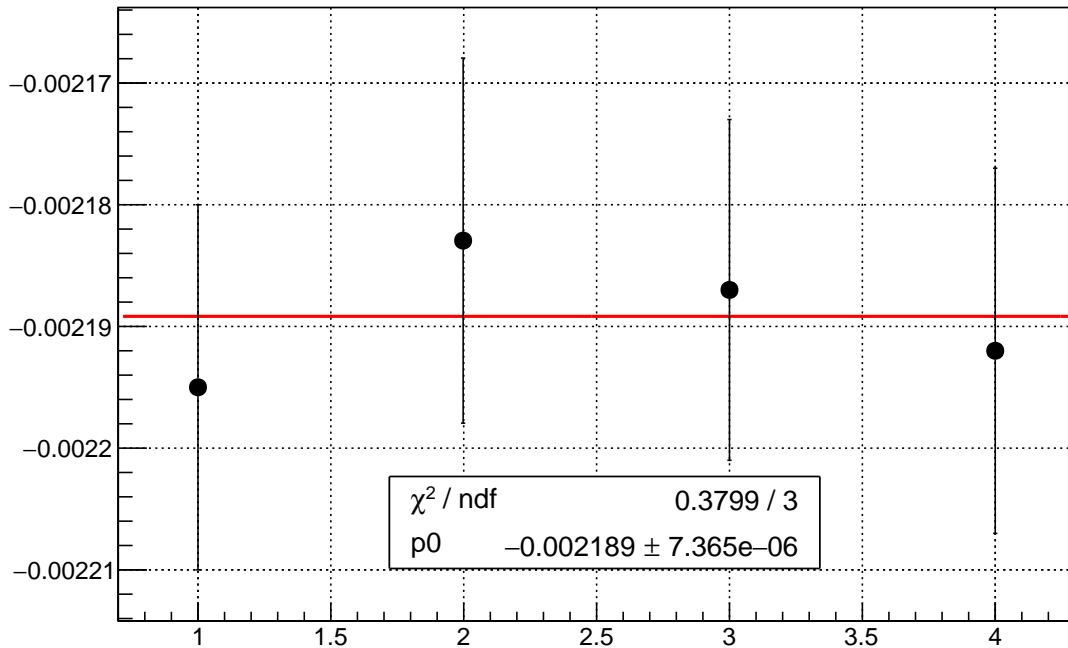


Figura 3.5: Coefficienti barometrici per quattro diversi periodi di acquisizione alle Svalbard messi a confronto. Il fit ci permette di ottenere la miglior stima del coefficiente barometrico. Tale valore è stato utilizzata nella formula per la correzione per effetti di pressione.

3.1.3 Molto rumore per un cavo inverter

Come accennato nel capitolo 2, i dati acquisiti nel viaggio via terra in Sicilia sono stati tagliati in modo da eliminare il rumore del cavo inverter. L'effetto del rumore è quello di accendere, contemporaneamente, più di una lastra nel livello superiore (Top) e in quello inferiore (Bottom), in corrispondenza dello stesso evento (eventi multi-traccia). Il taglio posto consiste nello scartare i dati che presentavano più di una hit per ogni piano (ovvero più di una coppia di lastre top-bottom accesa), in modo da assicurare l'eliminazione degli eventi rumorosi.

In figura 3.6 sono mostrate le posizioni dei SiPM sulle piastre del rivelatore.

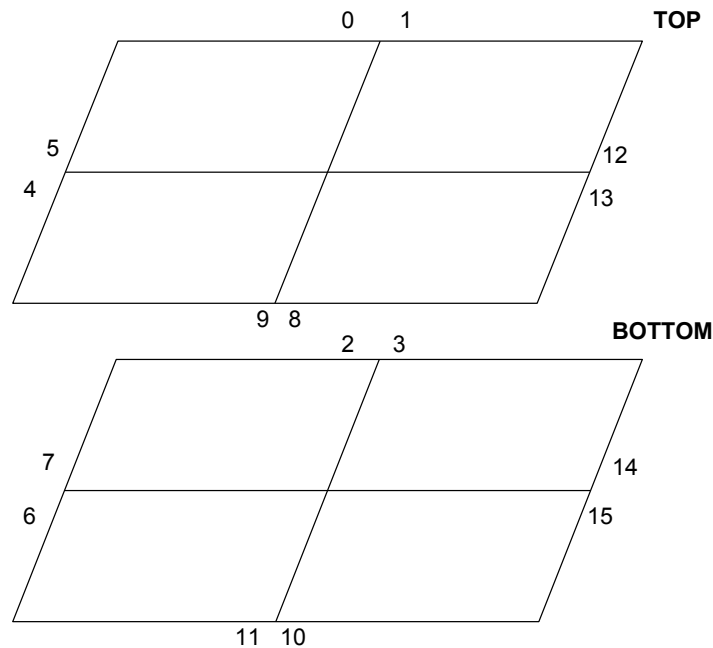
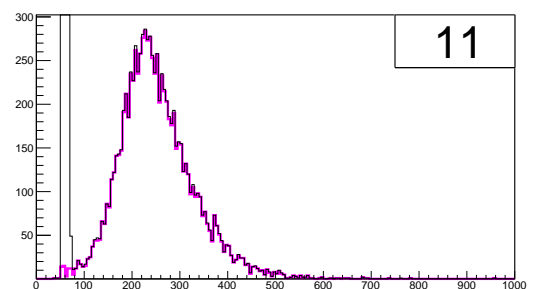
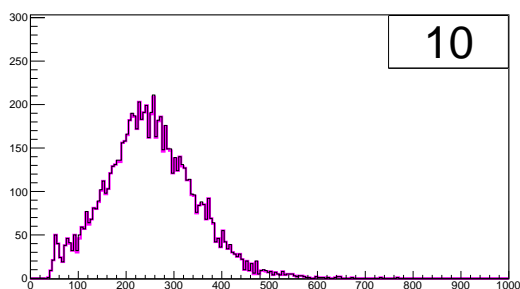
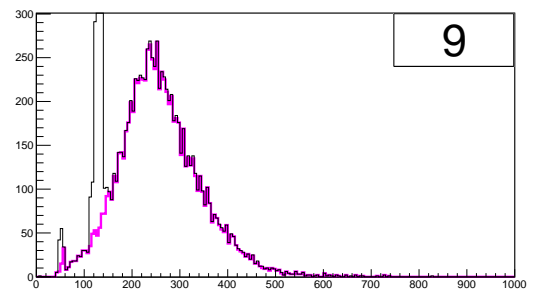
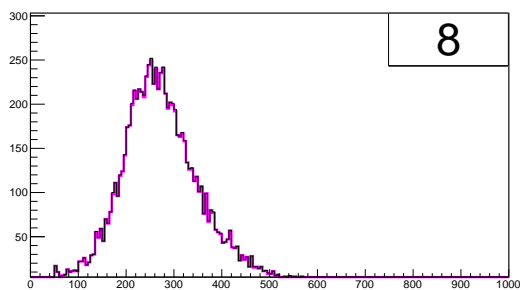
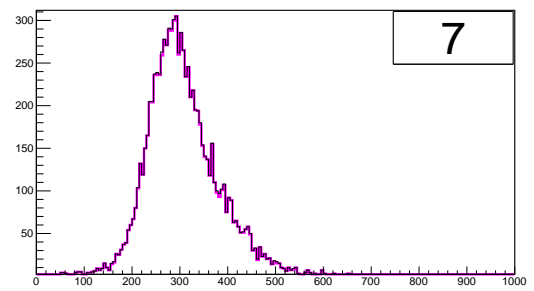
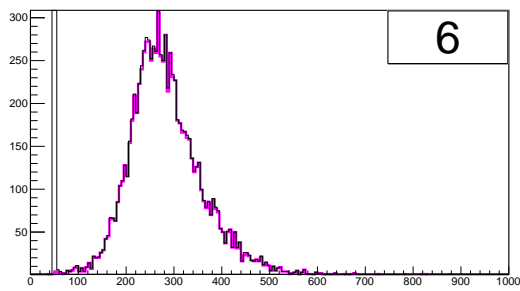
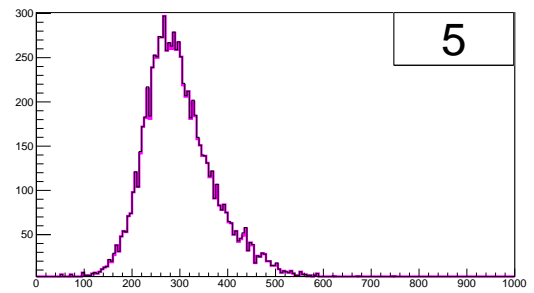
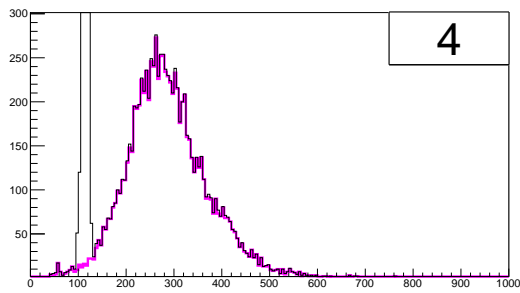
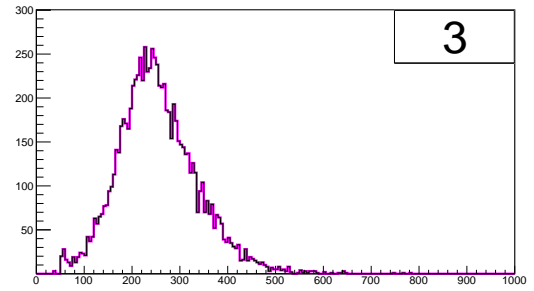
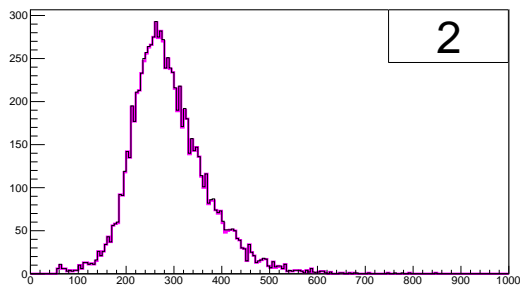
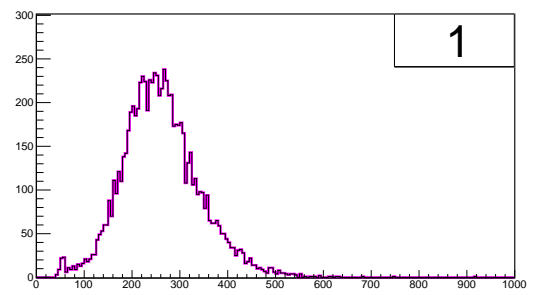
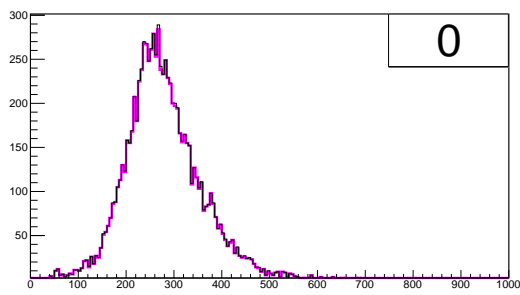


Figura 3.6: Schema dei SiPM sulle 8 piastre del rivelatore POLA01. La numerazione qui mostrata è mantenuta anche nella descrizione dei TOT. (cortesia del Dr. Flavio Cacciari)

Mostriamo di seguito i TOT (time over threshold) realizzati con i dati integri (in nero) sovrapposti a quelli realizzati con i dati tagliati (in rosa) per i singoli SiPM. La sovrapposizione evidenzia il taglio apportato ai dati per escludere il rumore elettrico dato dal cavo inverter, come si può notare dai picchi presenti. Questo taglio ai dati ci permette di eliminare totalmente il rumore, e ci fa perdere solamente l'1.23% dei dati validi; questo significa che quasi il 99% dei dati non rumorosi presentano una *singola* coppia top-bottom di lastre accese. Abbiamo ottenuto questa stima dei dati validi persi applicando la stessa correzione anche a dati acquisiti senza avere il cavo inverter collegato, e osservando quante entries venivano scartate.

Come si evince chiaramente dai grafici riportati, i SiPM affetti dal rumore elettrico del cavo sono i numeri 4, 6, 9, 11, che, come si vede nella figura 3.6, corrispondono a due lastre collocate l'una sopra l'altra. Possiamo supporre che l'interfaccia per l'inverter sia adiacente a tali lastre, e abbia quindi provocato eventi multitraccia accendendo sempre i corrispondenti SiPM durante l'acquisizione con inverter collegato. Questa affermazione tuttavia è ancora da accertare con futuri test su POLA-01.



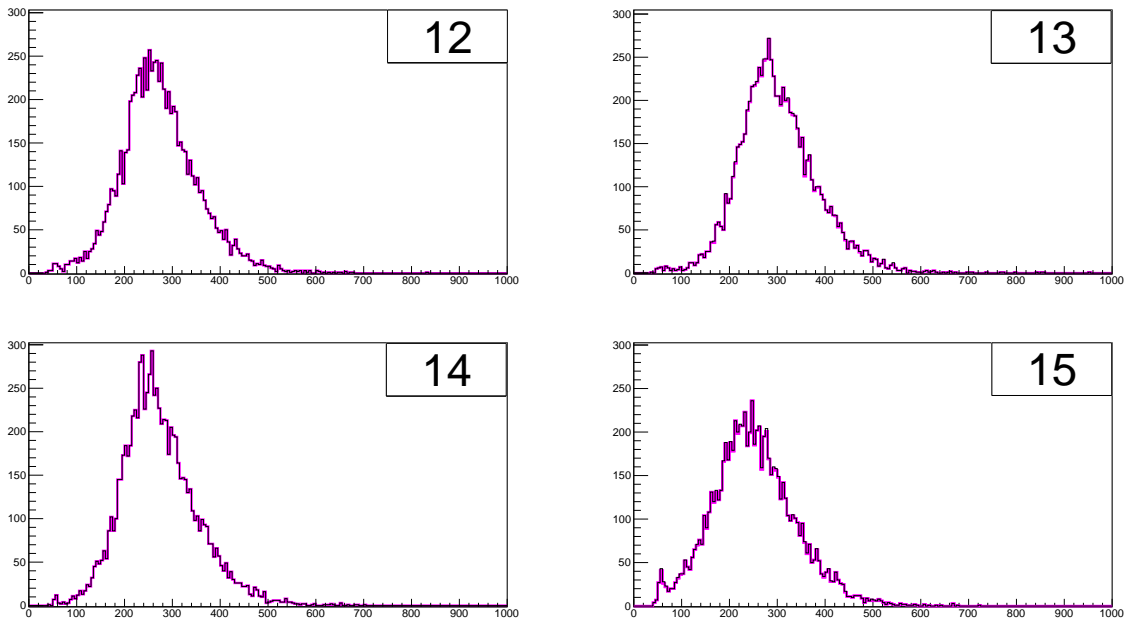


Figura 3.7: Sono riportati i TOT di acquisizione con inverter (in nero) a confronto con quelli corretti per numero di tracce = 1 (in rosa). Ogni Tot si riferisce ad un singolo SiPM. Il numero di entries riportato corrisponde all'istogramma che ha subito una correzione. Il maggior rumore si trova in corrispondenza dei SiPM numero 4, 6, 9 e 11, probabilmente per via della posizione dell'interfaccia a cui era collegato l'inverter. La correzione utilizzata è molto soddisfacente, in quanto stabilizza notevolmente l'andamento del TOT e taglia solamente l'1.23% dei dati validi.

3.2 Direzioni di incidenza e coefficiente barometrico

La direzione di incidenza dei muoni è un oggetto di studio interessante e utile per capire se il coefficiente barometrico viene influenzato dall'angolo di incidenza. A questo scopo sono stati studiati i dati di Svalbard (disponibili su un periodo di circa un mese e mezzo), con il rate suddiviso nelle diverse possibili direzioni di incidenza sul rivelatore. In figura 3.8 illustriamo schematicamente l'apparato di acquisizione e le quattro configurazioni possibili per la direzione di incidenza del muone.

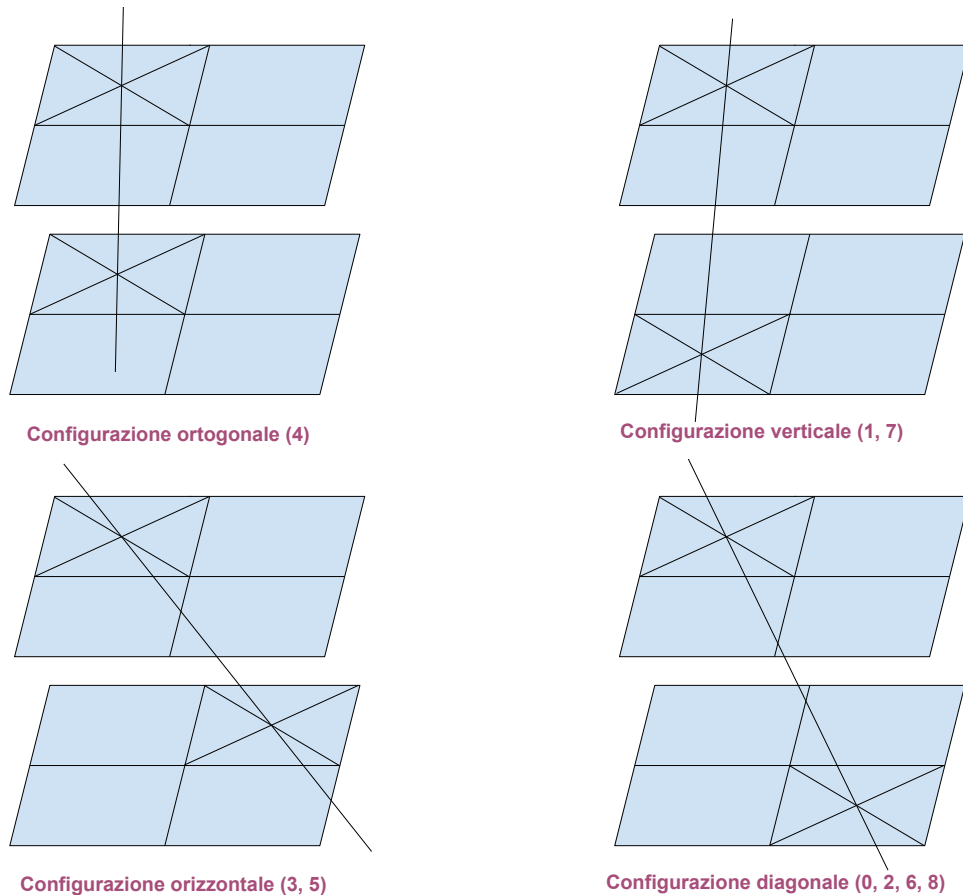


Figura 3.8: Schema della convenzione nel passaggio di muoni. In alto a sinistra: configurazione perpendicolare (4), in alto a destra: configurazione verticale (1, 7), in basso a sinistra: configurazione orizzontale (3, 5), in basso destra: configurazione diagonale (0, 2, 6, 8). Il rate maggiore si ha per la direzione ortogonale (4), poi per la direzione verticale (1,7), quindi per la direzione orizzontale (3,5), e infine il rate minore si ha per la direzione diagonale (0, 2, 6, 8)

Osservando la figura 3.8 e contando le possibili direzioni di incidenza si ottengono le seguenti possibilità per il passaggio del muone:

- Una configurazione ortogonale, con quattro possibili combinazioni
- Una configurazione "verticale", con quattro possibili combinazioni, due da dietro verso davanti e due da davanti verso dietro
- Una configurazione "orizzontale", con quattro possibili combinazioni, due da sinistra verso destra e due da destra verso sinistra.
- Una configurazione "diagonale", con quattro possibili combinazioni.

Utilizzando la convenzione di passaggio dalla lastra inferiore (Bottom) a quella superiore (Top), raggruppiamo tali configurazioni in una matrice 3×3

$$\begin{array}{ccc} 6 & 7 & 8 \\ 3 & 4 & 5 \\ 0 & 1 & 2 \end{array}$$

In cui:

- L'elemento al centro della matrice (4) raggruppa in se' le quattro configurazioni ortogonali possibili
- Gli elementi 1 e 7 corrispondono alle quattro configurazioni verticali, in particolare si ha che **1** raggruppa le due configurazioni *da davanti a dietro* e che **7** raggruppa quelle *da dietro a davanti*.
- Gli elementi 3 e 5 corrispondono alle quattro configurazioni orizzontali, e in particolare si ha che **3** raggruppa le due configurazioni *da sinistra a destra* e che **5** raggruppa le due *da destra a sinistra*.
- Gli elementi sui quattro angoli (0, 2, 6, 8) corrispondono ognuno a ciascuna delle 4 configurazioni diagonali.

Nella tabella 3.1 è schematizzata una legenda per la matrice, in cui vengono illustrati anche gli angoli medi di incidenza dei muoni per ogni configurazione rispetto alla normale al piano del rivelatore.

n. Casella	Passaggio di muoni	combinazioni possibili	angolo di incidenza θ
4	perpendicolare	4	$(26,8731 \pm 26,8731)^\circ$
1 e 7	verticale (sul lato corto)	2 (4 in tutto)	$(61,1892 \pm 8,6745)^\circ$
3 e 5	orizzontale (sul lato lungo)	2 (4 in tutto)	$(69,8637 \pm 6,4000)^\circ$
0, 2, 6, 8	diagonale	1 (4 in tutto)	$(73,0338 \pm 5,469)^\circ$

Tabella 3.1: *Legenda per lettura matrice*

Si è quindi trovato il coefficiente barometrico per le quattro direzioni grazie ad un fit dei grafici *rate direzionale vs pressure* con andamento esponenziale, come si vede in figura 3.9:

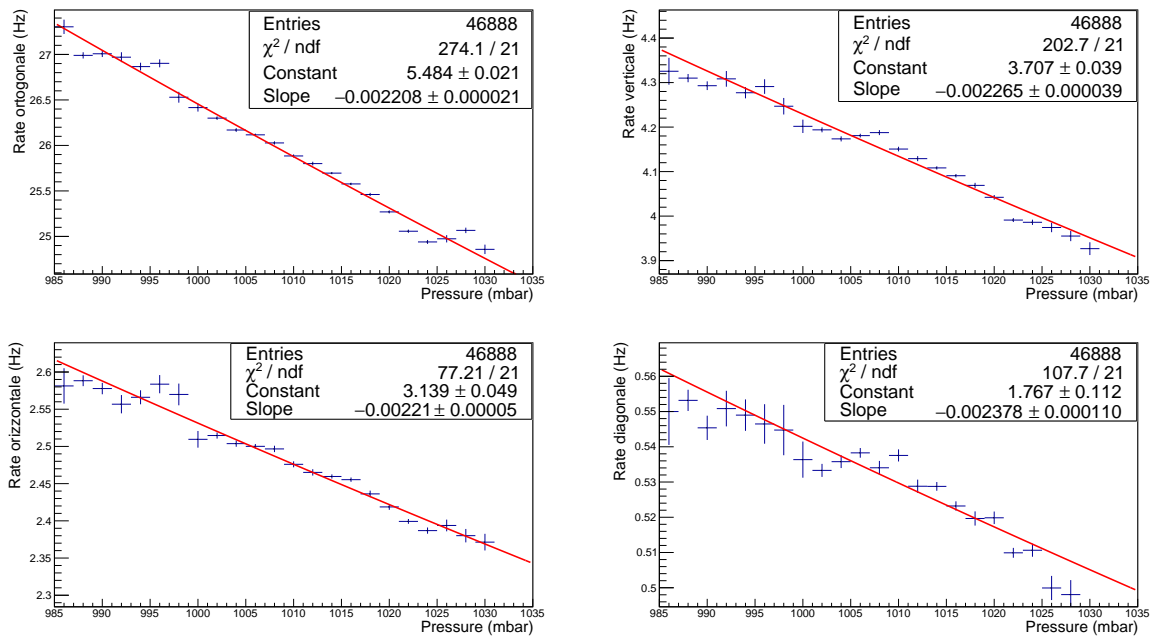


Figura 3.9: In figura vediamo i fit esponenziali di rate direzionale vs pressione per le quattro possibili direzioni descritte in precedenza. Il coefficiente barometrico per ciascun grafico è dato dallo slope del fit.

Una volta ricavati i coefficienti barometrici per i vari angoli di incidenza abbiamo studiato un'eventuale dipendenza del coefficiente barometrico dall'angolo di incidenza. Facendo un fit del grafico che mette in relazione queste due quantità si può notare che tra loro non c'è alcuna relazione significativa. (vedi figura 3.10)

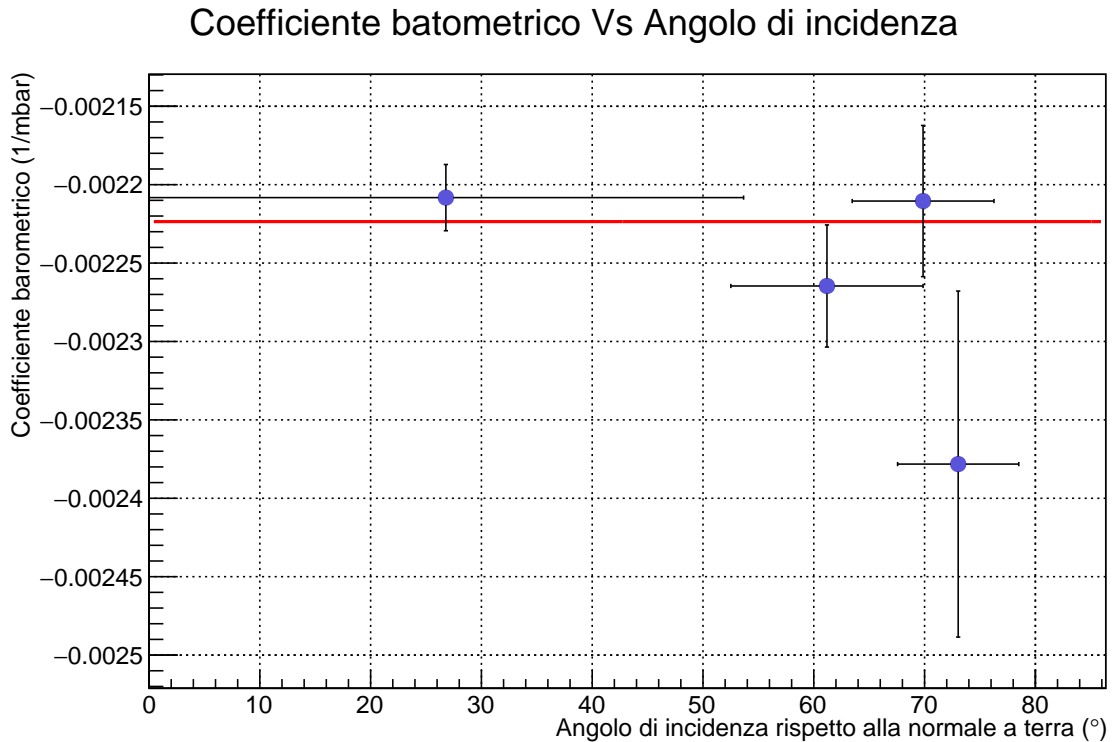


Figura 3.10: In figura vediamo il grafico che mette in relazione il coefficiente barometrico per le diverse direzioni di incidenza con l'angolo di incidenza. Possiamo affermare che non c'è alcuna relazione tra le due grandezze.

3.3 Effetti stagionali

Il rivelatore POLA-02, situato in Norvegia, è un punto di riferimento fisso molto importante per lo studio della variazione del rate di acquisizione rispetto al trascorrere del tempo. Per riassorbire perciò i cosiddetti *effetti stagionali* abbiamo diviso il rate di POLA-01 per il rate di POLA-02, acquisiti contemporaneamente. In questo modo otteniamo un numero puro, che poi andiamo a confrontare con altre grandezze, come tempo e latitudine, per studiarne l'andamento. Le correzioni apportate ai dati acquisiti da POLA-02 sono state studiate nell'ambito di un'altra tesi triennale, perciò non verranno qui illustrate. Ci limitiamo ad utilizzarne i risultati allo scopo di perfezionare i dati finali.

3.4 Rate versus Time

Alla luce delle correzioni discusse possiamo finalmente mostrare i grafici di rate vs time corretti. (Figura 3.11)

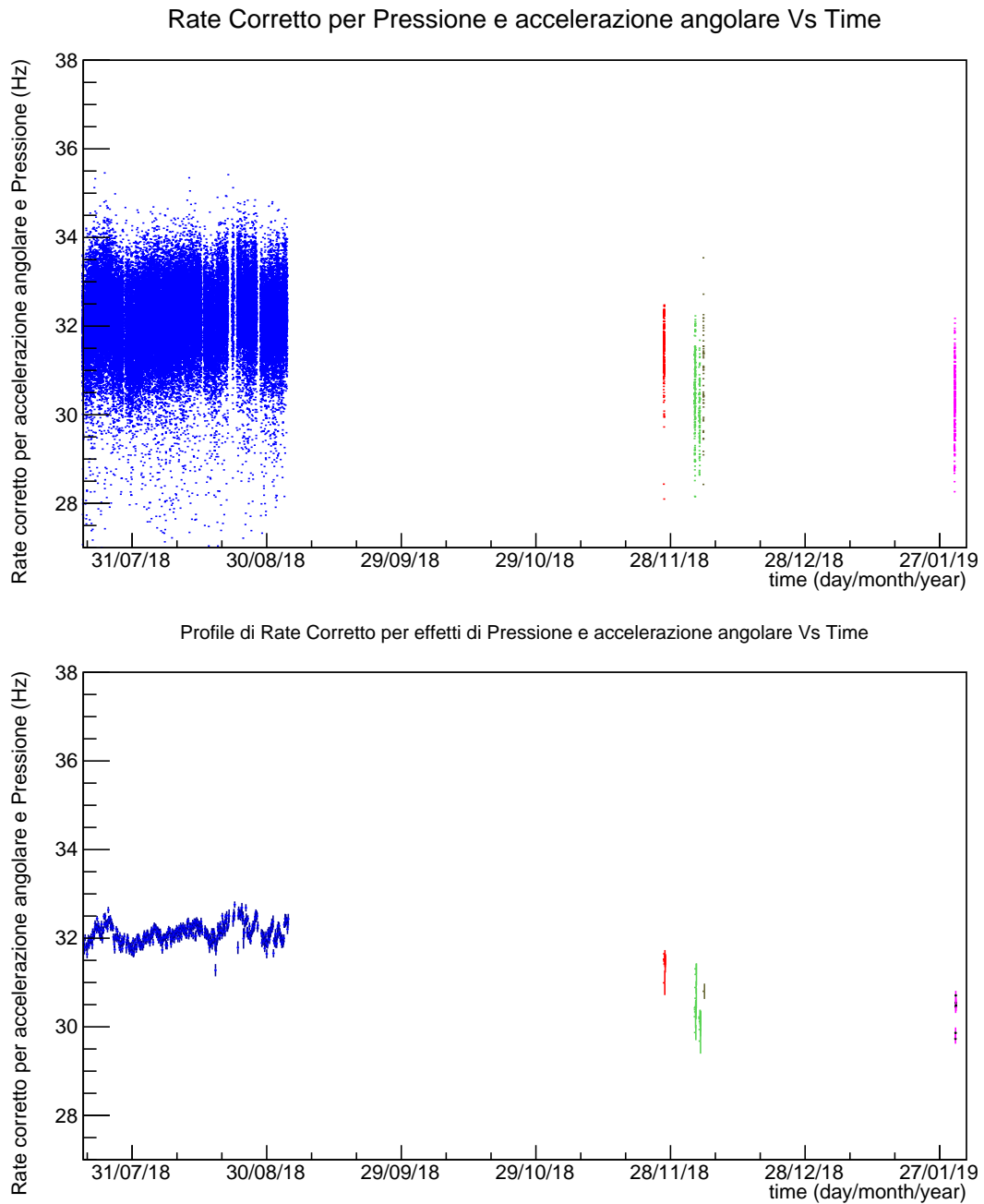


Figura 3.11: *Rate corretto vs time, istogramma bidimensionale e suo profilo. I dati riportati sono stati acquisiti alle isole Svalbard (in blu), a Vigna di Valle (Bracciano, RO, in rosso), a Cosenza (in verde), a Cefalù (PA, in marrone), e a infine a Catania (in rosa).*

Poniamo quindi il grafico Rate Vs Time in cui abbiamo apportato una correzione per *effetti stagionali*, come illustrato nel paragrafo precedente. (Figura 3.12)

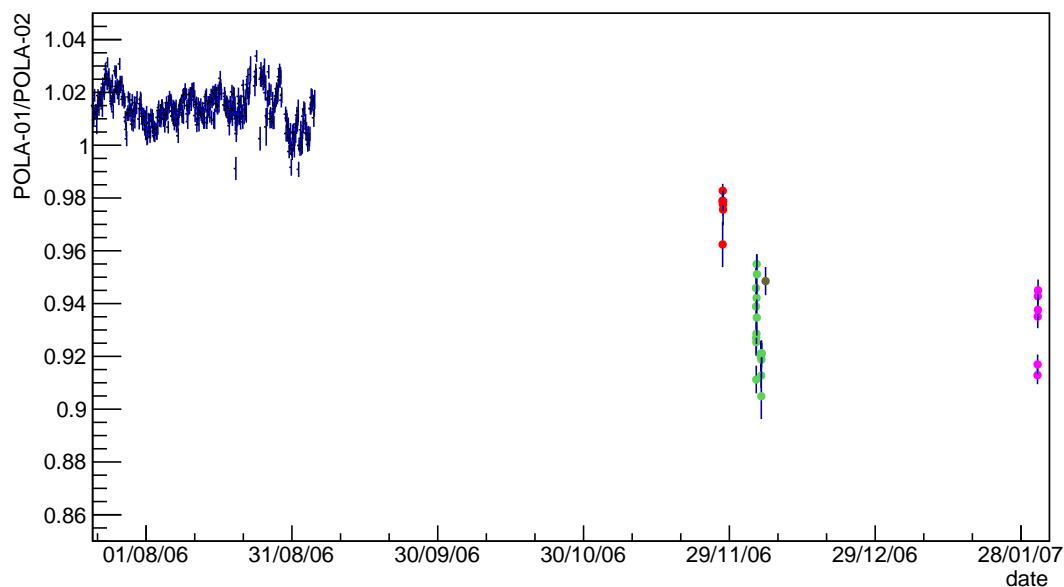


Figura 3.12: *Grafico Rate POLA-01/POLA-02 vs Time. Sull'asse delle ascisse c'è un numero puro; la divisione tra i rate dei due rivelatori permette un riassorbimento dell'effetto stagionale.*

Poniamo inoltre due grafici rate vs time sovrapposti al rate corretto vs time. Il primo grafico contiene tutti i dati acquisiti, mentre il secondo si riferisce soltanto ai dati presi alle isole Svalbard, che essendo stati acquisiti su un periodo più lungo ci permettono di apprezzare meglio gli effetti della correzione, ovvero lo smorzamento delle fluttuazioni. (Figura 3.13)

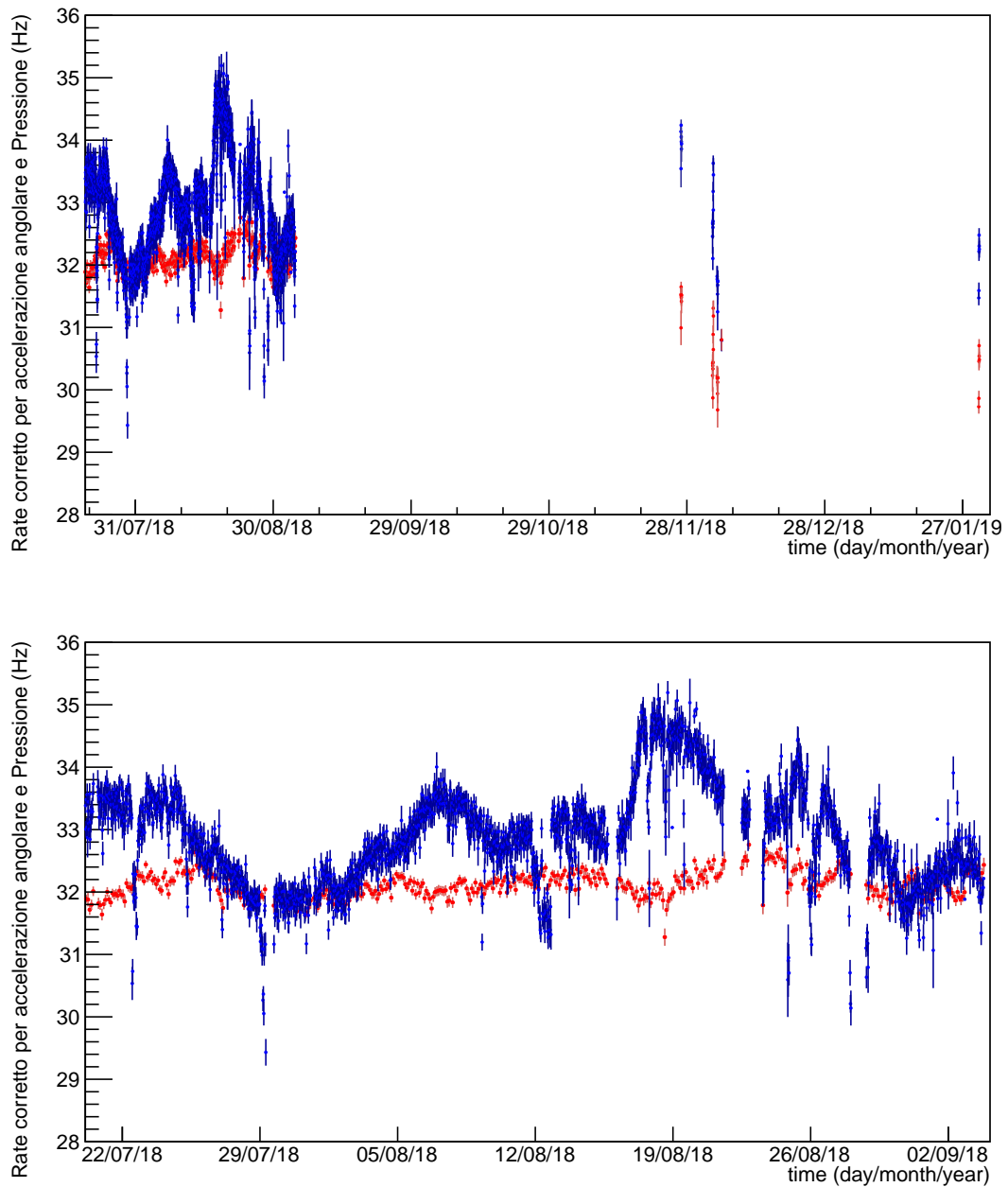


Figura 3.13: Nei grafici sono sovrapposti gli istogrammi bidimensionali Rate Vs Time per tutti i dati raccolti, e per i soli dati raccolti alle isole Svalbard. In rosso vediamo il rate corretto per orientazione e pressione vs time, mentre in blu vediamo il rate non corretto vs time. Le fluttuazioni risultano notevolmente smorzate.

3.5 Osservazione dell'effetto latitudine

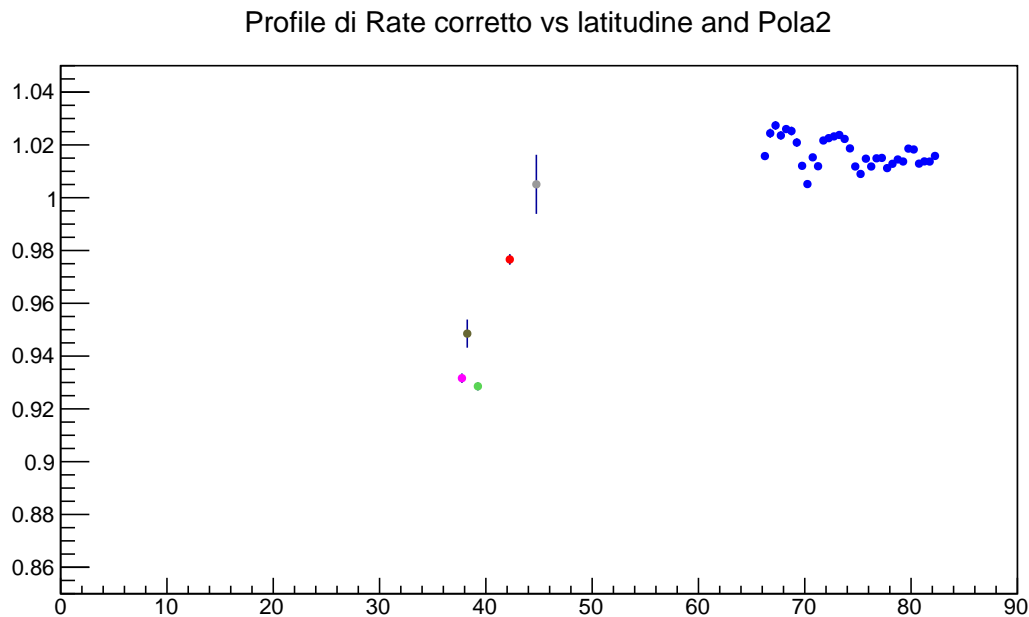


Figura 3.14: Riportiamo il profile di Rate Vs Latitude per tutti i dati a disposizione. Osserviamo che i dati acquisiti alle Svalbard si trovano già in una zona di plateau. Sull'asse delle ordinate abbiamo un numero puro in quanto il rate acquisito da POLA-01 è stato diviso per il rate di POLA-02, collocato in Norvegia. Notiamo che il rapporto al plateau si avvicina all'unità, in quanto il flusso alle Svalbard risulta simile a quello in Norvegia. Tale rapporto consente un riassorbimento degli effetti stagionali. NB: utilizziamo la convenzione già nota: Rosa per Catania, Marrone per Cefalù, Verde per Cosenza, Rosso per Vigna di Valle, Blu per Svalbard. Aggiungiamo un punto per Bra (CN), da dati acquisiti con il rivelatore POLA-03, in Grigio nel grafico.

L'effetto latitudine, descritto nel Capitolo 2, è stato studiato mettendo in relazione dati acquisiti da POLA-01 alle Svalbard, a Vigna di Valle (RM), a Cosenza e in varie zone della Sicilia. Nella figura 3.14 è stato inoltre aggiunto un punto acquisito a Bra (CN) con il rivelatore POLA-03. Il range di latitudine coperto dalle zone di acquisizione spazia dai 38° agli 82° di latitudine nord. La variabile riportata sull'asse delle ordinate è in realtà un numero puro: si ottiene infatti dividendo il rate acquisito da POLA-01 (a diverse latitudini) per il rate acquisito da POLA-02 (fisso, in Norvegia) in corrispondenza temporale. In questo modo il rate acquisito viene rinormalizzato per il trascorrere del tempo.

L'andamento rate vs latitudine ottenuto è mostrato in figura 3.15 anche confrontato alla curva di Lemaître. Stimiamo un *errore sistematico* dello 0.5% al fine di ottenere un χ^2 prossimo all'unità, pari a 1,426. L'assunzione dell'errore sistematico infatti giustifica le

fluttuazioni presenti nella zona di plateau, considerando eventuali variazioni delle soglie di tensione dei SiPM.

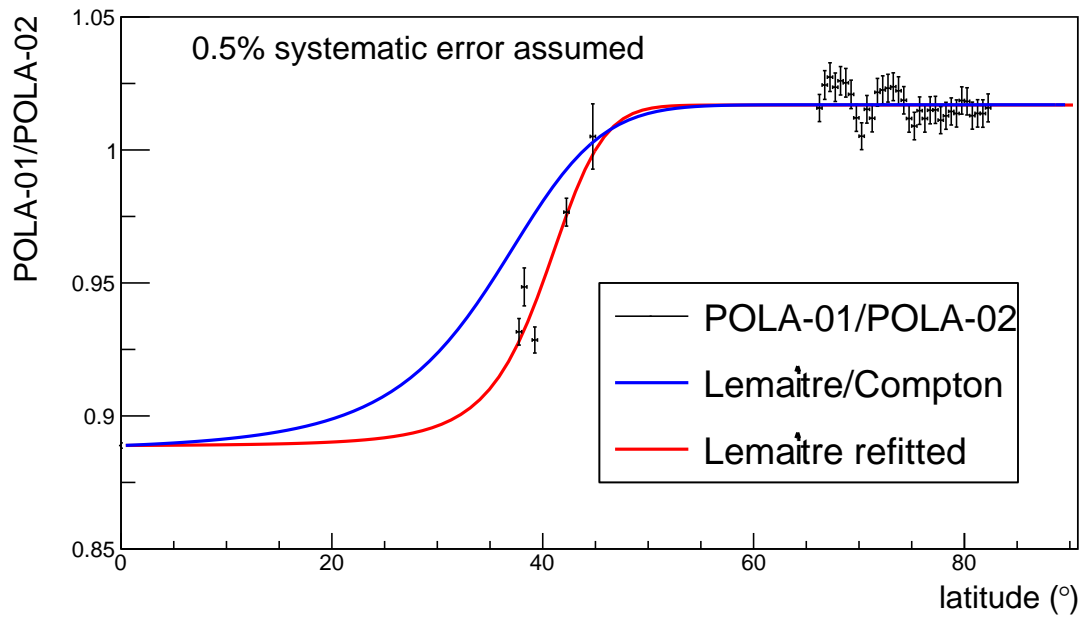


Figura 3.15: Curva di Lemaître confrontata ai dati. In blu vediamo la curva di Lemaître con il fit di Compton. In rosso vediamo la curva di Lemaître adattata ai nostri dati. Stimiamo un errore sistematico sui dati dello 0,5%, in modo da giustificare le fluttuazioni evidenti nella zona di plateau. Con questa considerazione otteniamo un χ^2 (chi quadro) pari a 1,426, vicino all'unità.

Conclusioni

In questa tesi sono stati analizzati i dati del rivelatore POLA-01 dell'esperimento Polar-qEEEst.

I dati sono stati raccolti in due periodi: dal 21 luglio al 5 settembre 2018, a bordo dell'imbarcazione Nanuq in viaggio intorno alle isole Svalbard, e dal 27 novembre 2018 al 31 gennaio 2019 in un viaggio lungo la penisola italiana, coprendo in totale latitudini tra i 38° e gli 82° di latitudine Nord.

I dati sono stati corretti per:

- Orientazione dell'imbarcazione,
- Effetti di Pressione,
- Effetti di rumore elettrico durante la presa dati.

È stata infine applicata una correzione per effetti stagionali dividendo il rate di POLA-01, a diverse latitudini, per quello acquisito contemporaneamente da POLA-02, posizionato per tutto il periodo in Norvegia.

I risultati finali, ottenuti come descritto, riportano il flusso di raggi cosmici verso il tempo e verso la latitudine. Quest'ultimo risultato conferma le previsioni teoriche formulate da Lemaître nel 1929.

Ringraziamenti

Questo percorso di laurea è stato bellissimo e molto difficile, e le persone da ringraziare sono davvero tantissime.

Innanzitutto vorrei ringraziare chi mi è stato piú vicino nel lavoro di tesi. Innanzitutto un gigantesco grazie al dottor Noferini, che ha avuto una pazienza infinita nello spiegare, nel correggere e nell'incoraggiarmi, grazie per la sua grande professionalità e disponibilità. Grazie al dottor Nania, per i suoi molteplici consigli che mi hanno aiutato ad arricchire il contenuto. Infine grazie alla professoressa Scioli, per la sua energia esplosiva e il suo costante entusiasmo, e per essere per me un grande punto di riferimento sia come scienziato che come donna.

Ringrazio molto la mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto sia moralmente che economicamente.

Grazie a mio papà che si è sempre interessato al mio lavoro e ha sempre cercato di aiutarmi. Grazie a mia mamma che ha provato ad ascoltarmi quando le spiegavo ciò che studiavo, nonostante, a detta sua, di fisica non abbia mai capito un tubo. Grazie a Gio, mio fratello e migliore amico per aver sempre creduto in me e per tutto il tempo passato insieme con i nostri passatempi preferiti. Grazie a mio cugino Alessandro, che non faceva altro che chiedere *quando avessi intenzione di laurearmi*, e a tutti gli altri cugini Alice, Aurora, Luca e Andrea, vi voglio bene. Grazie ai miei zii Tommaso e Laura, e alla mia fantastica cugina Marta, che mi hanno tenuto compagnia nei fine settimana a Bologna. Ringrazio mia zia Eugenia, per il suo affetto, per i suoi massaggi decontratturanti e per le passeggiate in montagna. Un gigantesco grazie a mio cugino Michele, per avermi insegnato a programmare con tanta encomiabile pazienza, e per avermi incoraggiato a fare sempre ciò che voglio fare. Grazie mille infine ai miei nonni Alfia, Luigi, Delia ed Enrico (anche se lui non è piú qui) per avermi insegnato l'importanza di studiare.

Vorrei inoltre ringraziare Fi, senza cui non sarei mai arrivata a questo traguardo. Grazie per aver sempre creduto in me anche quando ero a terra e volevo mollare tutto, e anche per i tuoi frullati mattutini, e per tutto il tempo trascorso insieme.

Grazie mille a Luca e Gaia, con i quali ho cominciato questo viaggio; anche se poi ci siamo un po' persi di vista, è stato davvero importante per me avervi accanto all'inizio. Ringrazio inoltre le mie coinquiline Simona, Lelle, Lucia e Matilde, per tutte le nostre avventure e disavventure domestiche.

Grazie anche a Philip Pullman per la sua trilogia *Queste oscure materie* (consigliatissima!) che credo abbia avuto un ruolo determinante nella mia scelta del corso di laurea.

Infine, vorrei ringraziare i miei colleghi:

Grazie a Chiara, per almeno un milione di motivi! Ma so che scrivere ti voglio bene basterà a farti capire. Grazie ad Alessandro, per il suo umorismo tagliente che mi fa tanto ridere, e perchè ci capiamo al volo. Grazie a Luigi che dopo tanto tempo mi ha riportato nel mondo del D&D. Grazie a Laura per i suoi dolcetti buonissimi. Grazie a Lorenzo per la sua infinita ospitalità e per tutte le serate nerd, e grazie a lui e Riccardo, che mi lasciano stupefatta davanti ai loro pazzeschi giochi di magia. E grazie a tutti gli altri, se mi avete aiutato con qualcosa che non capivo, o se mi siete stati vicino; penso che senza colleghi fare l'università non avrebbe avuto alcun senso.

Elenco delle figure

1.1	<i>Abbondanze di elementi presenti nei raggi cosmici a confronto con il Sistema solare. \circ = abbondanze nei raggi cosmici. \bullet = abbondanze nel Sistema solare. [13]</i>	7
1.2	<i>Spettro energetico dei raggi cosmici primari. Sono visibili due zone di transizione: il ginocchio (pendenza più ripida) e la caviglia (pendenza meno ripida) [12]</i>	9
1.3	<i>Spirale di Archimede. La funzione che la descrive è: $r(\theta) = a + b\theta$ dove il parametro a provoca la rotazione della spirale, mentre il parametro b controlla la distanza tra i bracci. Essa è un buon modello per descrivere la forma del campo magnetico dato dal flusso di particelle di plasma provenienti dal Sole. [11]</i>	10
1.4	<i>Schema di uno sciame di raggi cosmici. [14]</i>	14
2.1	<i>La barca a vela Nanuq alle isole Svalbard. [7]</i>	18
2.2	<i>Struttura base del rivelatore POLA-01. A sinistra: schema riassuntivo delle dimensioni, A destra: POLA-01 in assemblaggio.[4]</i>	20
2.3	<i>Elettronica di POLA01. Nella parte sinistra vediamo, dall'alto: la batteria di backup, il GPS/GNSS-Ublox e i sensori vari, e infine la CPU Raspberry PI. Sulla destra è collocata la scheda elettronica che interfaccia il raspberry al rivelatore.[7]</i>	21
2.4	<i>Il rivelatore POLA01 a Cosenza. Nella foto vediamo degli studenti del liceo Scorza insieme a due insegnanti e ai dottori (da sinistra) M. Garbini, F. Noferini e C. Pellegrino</i>	24
3.1	<i>Rate vs time, istogramma bidimensionale e suo profile (mediana). I dati riportati sono stati acquisiti alle isole Svalbard (in blu), a Vigna di Valle (Bracciano, RO, in rosso), a Cosenza (in verde), a Cefalù (PA, in marrone), e a infine a Catania (in rosa). Si nota già un lieve abbassamento del rate per le acquisizioni in Italia, anche se i dati devono essere corretti per</i> . . .	26

3.2	<i>La barca a vela Nanuq inclinata a 45° durante una secca. L'inclinazione della barca fa sì che POLA-01 acquisisca la maggior parte dei dati non più dallo zenit ma da una diversa zona di cielo. In questo caso il percorso in atmosfera che i muoni devono compiere per raggiungere POLA-01 perpendicolarmente alle piastre di scintillatore sarà più lungo, con maggiore probabilità di assorbimento e quindi con conseguente abbassamento del rate acquisito.[7]</i>	28
3.3	<i>Fit di Rate vs $\frac{g_z}{g}$. Il parametro 1 corrisponde allo slope utilizzato per correggere il rate come illustrato nella formula 3.1</i>	28
3.4	<i>Grafici rate vs pressure per quattro periodi di acquisizione alle Svalbard. Il coefficiente barometrico per ogni grafico è lo slope del fit esponenziale</i> .	29
3.5	<i>Coefficienti barometrici per quattro diversi periodi di acquisizione alle Svalbard messi a confronto. Il fit ci permette di ottenere la miglior stima del coefficiente barometrico. Tale valore è stato utilizzata nella formula per la correzione per effetti di pressione.</i>	30
3.6	<i>Schema dei SiPM sulle 8 piastre del rivelatore POLA01 La numerazione qui mostrata è mantenuta anche nella descrizione dei TOT. (cortesia del Dr. Flavio Cacciari)</i>	31
3.7	<i>Sono riportati i TOT di acquisizione con inverter (in nero) a confronto con quelli corretti per numero di tracce = 1 (in rosa). Ogni Tot si riferisce ad un singolo SiPM. Il numero di entries riportato corrisponde all'istogramma che ha subito una correzione. Il maggior rumore si trova in corrispondenza dei SiPM numero 4, 6, 9 e 11, probabilmente per via della posizione dell'interfaccia a cui era collegato l'inverter. La correzione utilizzata è molto soddisfacente, in quanto stabilizza notevolmente l'andamento del TOT e taglia solamente l'1.23% dei dati validi.</i>	33
3.8	<i>Schema della convenzione nel passaggio di muoni. In alto a sinistra: configurazione perpendicolare (4), in alto a destra: configurazione verticale (1, 7), in basso a sinistra: configurazione orizzontale (3, 5), in basso destra: configurazione diagonale (0, 2, 6, 8). Il rate maggiore si ha per la direzione ortogonale (4), poi per la direzione verticale (1,7), quindi per la direzione orizzontale (3,5), e infine il rate minore si ha per la direzione diagonale (0, 2, 6, 8)</i>	34
3.9	<i>In figura vediamo i fit esponenziali di rate direzionale vs pressione per le quattro possibili direzioni descritte in precedenza. Il coefficiente barometrico per ciascun grafico è dato dallo slope del fit.</i>	36
3.10	<i>In figura vediamo il grafico che mette in relazione il coefficiente barometrico per le diverse direzioni di incidenza con l'angolo di incidenza. Possiamo affermare che non c'è alcuna relazione tra le due grandezze.</i>	37

- 3.11 *Rate corretto vs time, istogramma bidimensionale e suo profile. I dati riportati sono stati acquisiti alle isole Svalbard (in blu), a Vigna di Valle (Bracciano, RO, in rosso), a Cosenza (in verde), a Cefalù (PA, in marrone), e a infine a Catania (in rosa).* 38
- 3.12 *Grafico Rate POLA-01/POLA-02 vs Time. Sull'asse delle ascisse c'è un numero puro; la divisione tra i rate dei due rivelatori permette un riassorbimento dell'effetto stagionale.* 39
- 3.13 *Nei grafici sono sovrapposti gli istogrammi bidimensionali Rate Vs Time per tutti i dati raccolti, e per i soli dati raccolti alle isole Svalbard. In rosso vediamo il rate corretto per orientazione e pressione vs time, mentre in blu vediamo il rate non corretto vs time. Le fluttuazioni risultano notevolmente smorzate.* 40
- 3.14 *Riportiamo il profile di Rate Vs Latitude per tutti i dati a disposizione. Osserviamo che i dati acquisiti alle Svalbard si trovano già in una zona di plateau. Sull'asse delle ordinate abbiamo un numero puro in quanto il rate acquisito da POLA-01 è stato diviso per il rate di POLA-02, collocato in Norvegia. Notiamo che il rapporto al plateau si avvicina all'unità, in quanto il flusso alle Svalbard risulta simile a quello in Norvegia. Tale rapporto consente un riassorbimento degli effetti stagionali. NB: utlizziamo la convenzione già nota: Rosa per Catania, Marrone per Cefalù, Verde per Cosenza, Rosso per Vigna di Valle, Blu per Svalbard. Aggiungiamo un punto per Bra (CN), da dati acquisiti con il rivelatore POLA-03, in Grigio nel grafico.* 41
- 3.15 *Curva di Lemaître confrontata ai dati. In blu vediamo la curva di Lemaître con il fit di Compton. In rosso vediamo la curva di Lemaître adattata ai nostri dati. Stimiamo un errore sistematico sui dati dello 0,5%, in modo da giustificare le fluttuazioni evidenti nella zona di plateau. Con questa considerazione otteniamo un χ^2 (chi quadro) pari a 1,426, vicino all'unità.* 42

Elenco delle tabelle

1.1	<i>Classificazione dei raggi cosmici primari in base alla loro energia.</i>	8
3.1	<i>Legenda per lettura matrice</i>	35

Indice

1	Raggi cosmici: cenni storici e aspetti teorici	5
1.1	Che cosa sono?	5
1.1.1	La scoperta dei raggi cosmici: un laboratorio a cielo aperto	5
1.1.2	Classificazione e composizione	6
1.1.3	Extensive air showers	13
1.2	Da dove vengono?	15
2	Apparato sperimentale e acquisizione dati	17
2.1	Il dirigibile Italia e la spedizione Polarquest2018	17
2.1.1	Nanuq: la barca a vela-laboratorio sostenibile	18
2.1.2	PolarquEEEst	18
2.2	Il rivelatore POLA-01	19
2.2.1	Struttura ed elettronica	19
2.2.2	La condizione di trigger per l'acquisizione	21
2.3	I viaggi di POLA-01	22
3	Analisi dati	25
3.1	Correzioni applicate ai dati	27
3.1.1	Effetti di orientazione	27
3.1.2	Effetti di Pressione	29
3.1.3	Molto rumore per un cavo inverter	30
3.2	Direzioni di incidenza e coefficiente barometrico	33
3.3	Effetti stagionali	37
3.4	Rate versus Time	37
3.5	Osservazione dell'effetto latitudine	41

Bibliografia

- 1 Todor Stanev - High energy cosmic rays
- 2 Michael W. Friedlander - Cosmic rays
- 3 T. Gaisser, R. Engel, E. Resconi - Cosmic Rays and particle physics
- 4 M. Santoro - Studio preliminare della geometria per l'accoppiamento SiPM-scintillatore per il progetto PolarquEEEst
- 5 L. Tomba - Study with cosmic rays of the SiPM-Scintillator coupling for the PolarquEEEst project.
- 6 Volantino Polarquest2018
- 7 Aperitivo scientifico 26/10/2018
- 8 http://igloo.sailworks.net/boat_e.htm
- 9 D. Perkins - Particle Astrophysics
- 10 A. De Angelis - L'enigma dei raggi cosmici
- 11 <http://www.matematicamente.it>
- 12 F. Maragliulo - Studio del flusso di raggi cosmici ad altissima energia
- 13 <http://www.astrofisica.altervista.org>
- 14 <http://www.physicsopenlab.org>