



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA TOR
VERGATA
MACROAREA DI SCIENZE MM. FF. NN.**

Dipartimento di Fisica

Corso di laurea triennale in Fisica

**OSSERVAZIONE QUANTITATIVA DI FORBUSH
DECREASES DURANTE ALCUNE TEMPESTE
GEOMAGNETICHE CON IL RIVELATORE
HEPD (HIGH-ENERGY PARTICLE
DETECTOR) A BORDO DEL SATELLITE
CSES-01**

RELATORE

Prof.ssa Roberta Sparvoli
Dr. Matteo Martucci

CANDIDATO

Arianna Vannucci
Matricola n° 0233461

A.A. 2020/2021

*Affinché io possa ricordare sempre
i risultati che sono in grado di raggiungere
e quali sono i miei limiti in quanto essere umano.*

Indice

Introduzione	1
1 Raggi cosmici ed effetto Forbush	3
1.1 Radiazione cosmica	3
1.1.1 Caratteristiche dei raggi cosmici	4
1.2 L'Effetto Forbush	7
2 Il satellite CSES-01	10
2.1 La missione CSES/Limadou	10
2.1.1 Gli obiettivi scientifici	11
2.2 Struttura e orbite del satellite	12
2.2.1 Strumenti a bordo di CSES-01	13
3 HEPD (High-Energy Particle Detector)	17
3.1 Il rivelatore	17
3.2 Trigger e raccolta dati	20
3.2.1 Fattore geometrico	23
3.2.2 Particle identification e contaminazione	24
4 Analisi Dati	27
4.1 L-shell e configurazioni di trigger	28

4.2	Osservazione di effetti Forbush durante alcune tempeste geomagnetiche	29
4.2.1	L'evento di Agosto 2018	33
4.2.2	L'evento di Maggio 2021	38
4.2.3	Gli eventi di Aprile 2020 e Dicembre 2020	40
	Conclusioni	43
	Elenco delle figure	45
	Bibliografia	47

Introduzione

L'effetto Forbush (o *Forbush Decrease*) è una diminuzione nell'intensità dei raggi cosmici di origine galattica che avviene in concomitanza del passaggio delle Emissioni di Massa Coronale - o *Coronal Mass Ejections (CMEs)*. Queste ultime sono composte da grandi quantità di plasma carico proveniente dalla corona solare e vengono trasportate nell'eliosfera dal vento solare, assieme al campo magnetico. Quando raggiunge la Terra, il plasma ionizzato interagisce con la magnetosfera terrestre - generando tempeste geomagnetiche - e può, inoltre, schermare l'arrivo delle particelle presenti nella radiazione cosmica, appunto causando una decrescita nel flusso misurato.

Dovendo essere ancora compreso interamente, l'effetto Forbush viene studiato da più strumentazioni che si trovano sulla superficie terrestre, come *neutron monitor* e riometri, ma anche da satelliti in orbita attorno al nostro pianeta. Uno di questi è il satellite *CSES-01*, primo di un network di satelliti prodotti dalla collaborazione fra le agenzie spaziali cinese e italiana nell'ambito della missione *CSES/Limadou*. A bordo di CSES-01 si trova il rivelatore di particelle *HEPD (High-Energy Particle Detector)*, di design e costruzione interamente italiani. L'intera missione, tra gli altri obiettivi, mira ad ottenere dati per migliorare le conoscenze sull'ambiente Sole-Terra.

Il mio lavoro di tesi si è incentrato sull'individuazione e lo studio quantitativo di possibili effetti Forbush nel periodo 2018-2021, osservando i profili temporali dei vari contatori (*rate meters*) di particelle di HEPD; per fare ciò ho analizzato i dati di

HEPD - in formato ROOT - con procedure in linguaggio C.

Nel Capitolo 1 verranno definiti i concetti di raggi cosmici ed effetto Forbush, introducendo la storia delle loro osservazioni e le conoscenze che abbiamo acquisito al giorno d'oggi.

Nel Capitolo 2 saranno descritti la missione *CSES/Limadou* e gli obiettivi scientifici che essa persegue, assieme al satellite *CSES-01*, la sua struttura e le sue caratteristiche principali.

Il Capitolo 3 sarà incentrato sulla presentazione dello strumento *HEPD*, utilizzato per l'analisi dati di questa tesi. Verranno mostrate, in breve, le sue componenti e la sua configurazione di lavoro.

Infine, il Capitolo 4 sarà dedicato all'analisi vera e propria dei dati ottenuti concentrandomi in particolare sugli eventi solari di Agosto 2018 e Maggio 2021. Saranno presentati i grafici dei dati del *rate meter* di *HEPD* e verranno confrontati con i risultati ottenuti sia da alcuni *neutron monitor* che da alcuni riometri. Una discussione quantitativa verrà svolta sui profili temporali ottenuti, valutando brevemente le caratteristiche degli effetti Forbush osservati, tenendo conto della loro ampiezza, della durata del tempo di recupero, etc.

Capitolo 1

Raggi cosmici ed effetto Forbush

1.1 Radiazione cosmica

La scoperta dei raggi cosmici è avvenuta all'inizio del secolo scorso grazie ad un esperimento di Wilson, Elster e Geitel [1, 2, 3] che presentava risultati inattesi. Il loro lavoro era incentrato sui gas considerati isolanti. Nonostante vennero prese tutte le precauzioni per evitare qualsiasi contaminazione all'interno delle camere a ionizzazione che stavano utilizzando, i gas presentavano ancora un comportamento da conduttori. Decidendo di schermare i laboratori con pannelli di piombo ottennero finalmente una riduzione nella conducibilità dei gas: era quindi presente una sorgente esterna di radiazioni. L'origine cosmica di questa radiazione fu confermata dallo scienziato austriaco Victor Hess [4] che nel 1912 volò con un pallone aerostatico fino in cima alla Torre Eiffel. Qui notò che il tempo di scarica di un elettroscopio a foglie era minore rispetto che a terra, confutando l'idea che la radiazione potesse provenire dalla crosta terrestre e dimostrando così la presenza, in tale radiazione, di particelle aventi una carica, per la maggior parte positiva. Quando ripeté l'esperimento volando fino ad un'altitudine di circa 5 km, trovò una diminuzione nel livello di radiazioni fino ad un'altitudine di 1 km, per poi ottenere un raddoppio salendo ulteriormente di quota. In questo modo poté confermare l'origine di tipo spaziale e definì questa radiazione co-

me *radiazione cosmica*; successivamente fu Millikan [5] ad attribuirle definitivamente il nome di *raggi cosmici (RC)*.

1.1.1 Caratteristiche dei raggi cosmici

Al giorno d'oggi ormai sappiamo che i protoni costituiscono buona parte dei raggi cosmici (86%), seguiti da nuclei di ${}^4\text{He}$ (11%) e nuclei più pesanti (1%). Ulteriori particelle cariche presenti sono antiprotoni, elettroni e positroni (la scoperta di questi ultimi ha permesso la vincita del Premio Nobel per Carl David Anderson, fisico americano, nel 1932) [6]. Infine una componente neutra è rappresentata da raggi γ , provenienti da nebulose interplanetarie, in aggiunta ai più elusivi neutrini e antineutrini, che risultano essere i prodotti - tra le altre cose - delle reazioni nucleari solari [7].

I raggi cosmici hanno un'energia che varia da circa 10^7 eV fino a 10^{20} eV. Con questa estensione energetica così ampia, l'origine delle particelle che li compongono è molto varia. La parte di energia più bassa ($E \leq 10^9$ eV) risente del potere modulante del Sole ed è quella più variabile nel tempo. I raggi cosmici di energia più elevata del GeV, invece, hanno origine da fenomeni che avvengono nelle novae e supernovae [8]. Quelli con energia $E \geq 10^{18}$ eV sono detti *Ultra-High Energy Cosmic Ray (UHECR)* e la loro origine sembra risalire a nuclei galattici attivi. Vi è però necessità di ulteriori studi per approfondire questo ramo della cosmologia, poiché finora sono stati pochi gli eventi di incidenza di particelle con energia così elevata [9].

Lo spettro energetico dei raggi cosmici cosiddetti primari, che si estende per quasi 14 ordini di grandezza, segue la legge di potenza: $\phi \propto E^{-\alpha}$; questo vuol dire che raggi di energia minore sono in numero maggiore, e viceversa raggi di energia maggiore sono meno numerosi. Il valore α è una costante che vale $\alpha = 2.7$ per protoni di energia

$E \leq 10^{15}$ eV. Per $E = 10^{18}$ eV la costante aumenta fino a $\alpha = 3$, ottenendo un cambiamento di pendenza detto "ginocchio" (*knee*). Ad energie superiori scende invece al valore $\alpha \simeq 2.8$ e tale cambiamento viene chiamato "caviglia" (*ankle*). Queste due caratteristiche denotano una diversa origine delle popolazioni che compongono le due zone dello spettro stesso. Un esempio di spettro di raggi cosmici è riportato in Figura 1.1.

I raggi cosmici primari, urtando le molecole negli strati superiori dell'atmosfera, danno origine ad un'altra popolazione di raggi cosmici, ossia i raggi cosmici secondari, divisi a loro volta nelle componenti *hard* e *soft* (a livello del mare). La prima è data dai protoni di alta energia che, a seguito delle interazioni adroniche con i nuclei nell'atmosfera, producono pioni (o mesoni π), molti dei quali decadono a loro volta in muoni (o mesoni μ). La seconda ha origine dal decadimento di questi muoni in elettroni e positroni. Le interazioni con l'atmosfera della radiazione cosmica primaria generano anche particelle neutre come i neutroni, che possono essere utilizzati a terra come un ottimo *proxy* indiretto per lo studio delle variazioni della componente primaria, i.e. *neutron monitors*.

Una diminuzione nell'intensità dei raggi cosmici rivelati a Terra fu notata per primo da Scott E. Forbush nel 1937 [10]. Inizialmente si pensò che tale alterazione fosse dovuta a perturbazioni nel campo magnetico terrestre durante tempeste geomagnetiche. Simpson e colleghi [11], nei primi anni '50, analizzarono ulteriormente i raggi cosmici utilizzando rivelatori a terra noti come *neutron monitor*, che - come accennato in precedenza - misurano il numero di particelle neutre generate dall'atmosfera terrestre. I risultati mostrarono decrescite non ricorrenti e maggiori per particelle di bassa energia durante periodi di elevata attività solare. Conclusero quindi che la causa non

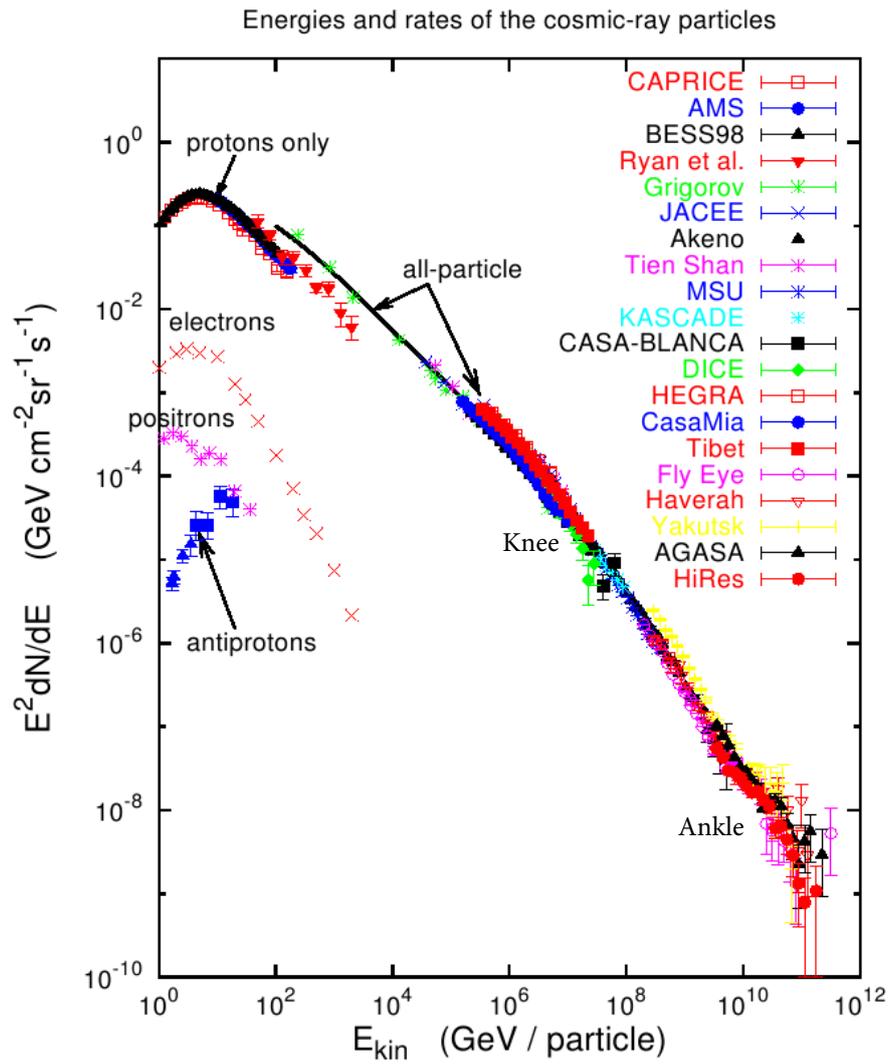


Figura 1.1: Spettro energetico dei raggi cosmici galattici.

fosse legata al campo geomagnetico, bensì al Sole. Tali diminuzioni vennero chiamate *Forbush Decreases (FDs)* (o effetti Forbush) [12].

1.2 L'Effetto Forbush

Viene definito *Forbush Decrease* il decremento nel flusso di particelle dei raggi cosmici, misurato nell'intorno del nostro pianeta, che compare a seguito di attività intense sulla corona solare. Tale diminuzione è la conseguenza di un aumento di quantità di plasma nel vento solare, che scherma l'arrivo delle particelle. L'accrescimento di questo plasma può essere causato da *Coronal Mass Ejections (CMEs)* o da *Corotating Interaction Regions (CIRs)*. Nel primo caso, si tratta di eventi durante i quali vengono espulse dalla corona solare bolle di gas e plasma ionizzati contenenti elettroni e protoni. Tali bolle sono assimilabili a linee di campo magnetico a forma di corda (quindi elicoidali) e avvolte attorno ad un cilindro piegato a ferro di cavallo, con entrambi gli estremi chiusi sulla superficie solare. Nel secondo caso, le *CIRs* consistono in strutture plasmatiche che compaiono nell'eliosfera a seguito dell'interazione di due correnti solari, una veloce ($\simeq 800$ km/h) e l'altra più lenta ($\simeq 400$ km/h) [13].

Il fenomeno delle *CMEs* si manifesta intorno alla Terra con due componenti: lo shock interplanetario, che arriva per primo, e la successiva controparte interplanetaria della *CME*, la *Interplanetary Coronal Mass Ejection (ICME)*. Quest'ultima è a sua volta suddivisa in due tipologie: le nuvole magnetiche (o *magnetic clouds*) che presentano una temperatura inferiore del plasma e una rotazione del campo magnetico, e gli *ejecta*. Gli effetti Forbush possono essere causati sia esclusivamente dagli shock, sia solamente dalle *ICMEs*, sia da entrambe le manifestazioni [14]. Quelli con intensità maggiori presentano entrambi gli *step* di shock interplanetario e *ICMEs*, ma il contri-

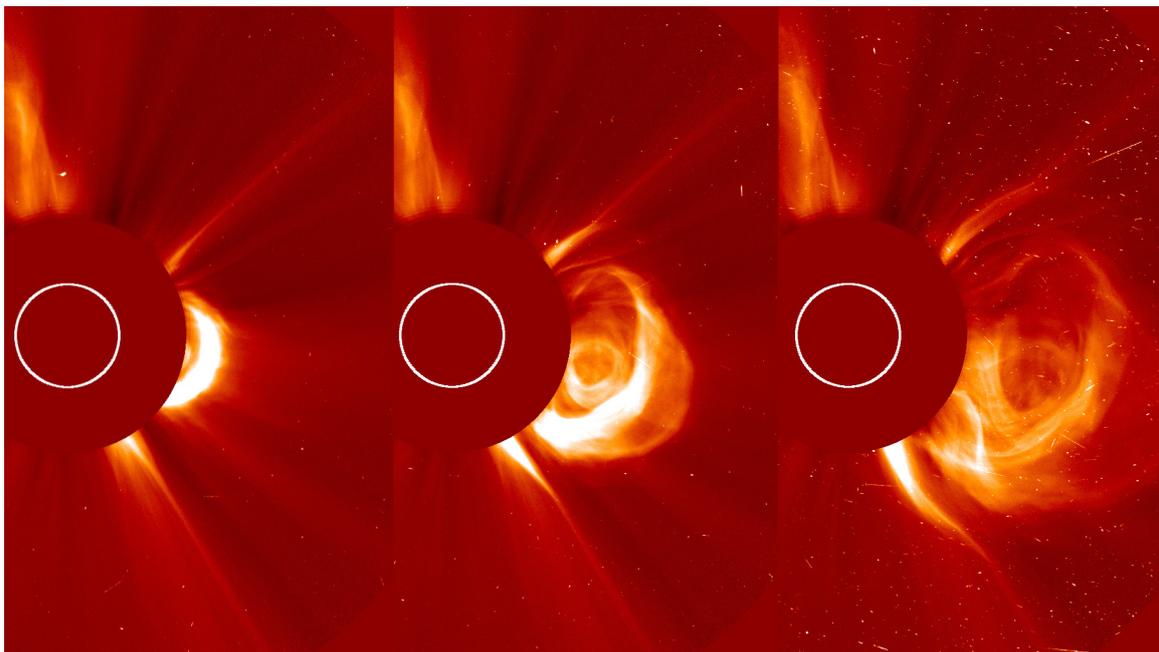


Figura 1.2: Immagini dello sviluppo di una *CME* ottenuta dallo strumento LASCO a bordo del satellite SOHO.

buto dovuto allo shock e quello dovuto alla *ICME* è ancora in fase di discussione [15]. Oltre a generare *FDs* per particelle dei *CRs* nel range energetico dei MeV e GeV, il fenomeno dello shock interplanetario comporta un'accelerazione delle particelle solari dirette verso la Terra. Questo potrebbe sottoporre satelliti e astronauti in orbita intorno al pianeta a pericoli non indifferenti. Per approfondire le conoscenze riguardo questi transienti e arrivare - in un futuro - a poter modellizzare tali fenomeni e poterli prevedere, negli ultimi anni molte missioni spaziali si sono dedicate allo studio dello *Space Weather* e delle interazioni tra Sole e Terra. Il satellite CSES-01, che verrà trattato approfonditamente nel prossimo Capitolo, si propone di effettuare misure di protoni ed elettroni di bassa energia anche per individuare gli effetti che questi eventi solari hanno nelle vicinanze della Terra. Dal lancio del satellite ad oggi (2018-2021), il Sole è in un periodo di quiete e gli eventi solari rilevanti sono stati pochi. Dal 2022 in poi, però, il Sole inizierà la sua risalita verso un periodo di massima attività e il nu-

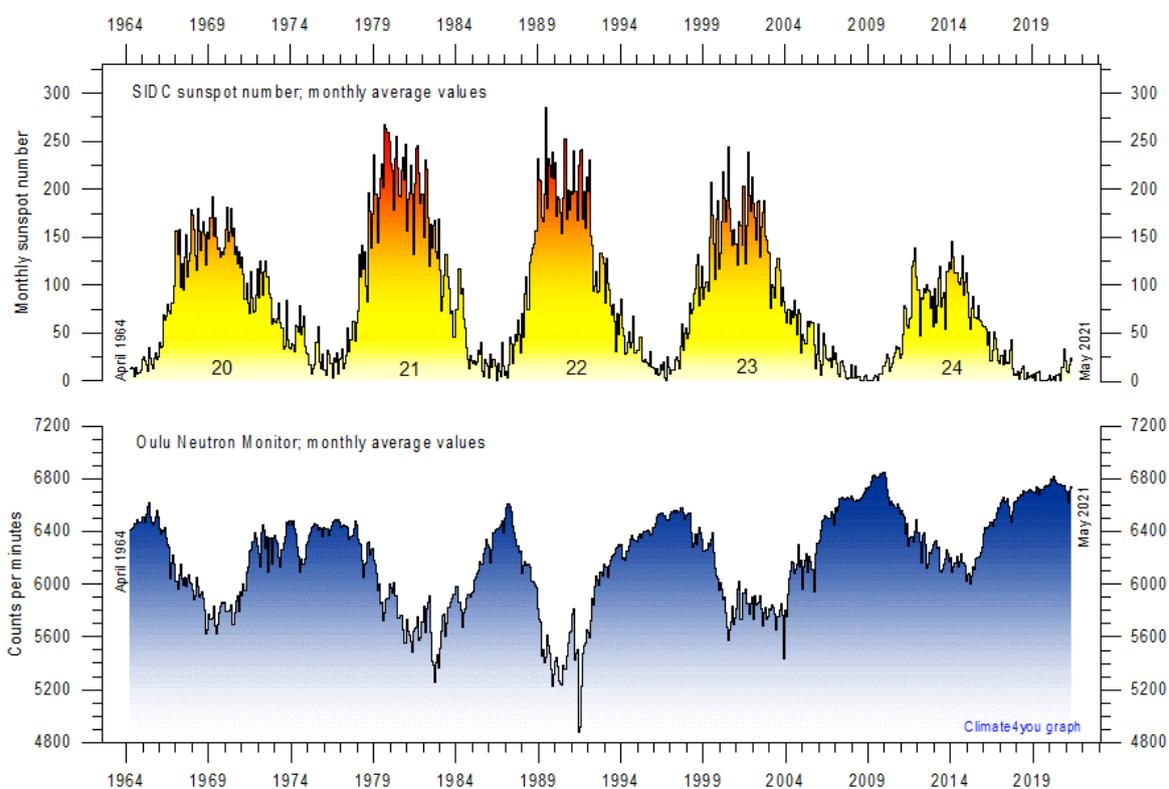


Figura 1.3: Numero medio di macchie solari mensili (in giallo) e andamento nell'intensità del flusso dei raggi cosmici (in blu) per gli ultimi cinque cicli solari di 11 anni, fino a Maggio 2021. È evidente la dipendenza del numero di particelle rivelate dal *neutron monitor* Oulu in funzione del periodo di minima o massima attività solare. Immagine adattata da [16].

mero di fenomeni di questo tipo, anche molto energetici, sarà sicuramente maggiore, come si può notare dalla Figura 1.3.

Capitolo 2

Il satellite CSES-01

2.1 La missione CSES/Limadou

La missione scientifica *CSES/Limadou* è nata dalla collaborazione tra le agenzie spaziali cinese *CNSA* (*China National Space Administration*) e italiana *ASI* (*Agenzia Spaziale Italiana*), ed è stata successivamente sviluppata dalla *CEA* (*China Earthquake Administration*) e dall'*INFN* (*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*). Contribuiscono al progetto numerose università cinesi e italiane, tra le quali spiccano l'Università di Roma Tor Vergata e le Università di Bologna e Trento, le Sezioni *INFN* di Roma Tor Vergata e Frascati, Bologna, Napoli e Perugia, oltre agli Istituti *INAF-IAPS* e *INGV*. In particolare, la componente italiana si è occupata della progettazione e costruzione di *HEPD* (*High-Energy Particle Detector*), uno degli strumenti progettati per lo studio delle particelle energetiche che si trovano a bordo del satellite *CSES-01* (*China Seismo-Electromagnetic Satellite*).

Il lancio di quest'ultimo, avvenuto il 2 Febbraio 2018 dal *Jiuquan Satellite Launch Center* nel deserto del Gobi (Mongolia, Cina), ha segnato l'inizio della missione [17]. Con una durata prevista di più di 5 anni, l'obiettivo principale è monitorare i campi elettromagnetici e le perturbazioni nella iono-magnetosfera e la loro possibile correlazione con l'attività geofisica terrestre. Ad esso si aggiungono lo studio dei raggi

cosmici e delle variazioni delle fasce di Van Allen.

2.1.1 **Gli obiettivi scientifici**

Idealmente, la missione *CSES/Limadou* si propone di proseguire gli studi sulle particelle già avviati da precedenti missioni come *PAMELA* (*A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*), *DEMETER* (*Detection of Electromagnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions*) e *Van Allen Probes*, lavorando in orbita *LEO* (*Low-Earth Orbit*) e in un range energetico basso (3-100 MeV per elettroni, 30-250 MeV per protoni, >50 MeV/n per i nuclei). La missione, e *HEPD* in particolare, si sono rivelate adatte al *monitoring* dell'attività solare nell'ambito dello *Space Weather* [18].

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, si è riusciti a studiare gli effetti di alcune tempeste geomagnetiche sulla magnetosfera terrestre e sul campo magnetico/particelle che in essa risiedono. Il termine *Space Weather*, infatti, si riferisce alle condizioni presenti nell'ambiente Sole-Terra e alle variazioni nel tempo. Le interazioni fra i fenomeni solari e la Terra possono influenzare le strumentazioni scientifiche e le attività umane; ad esempio, rapidi cambiamenti nel campo magnetico possono condizionare la navigazione basata sul *GPS* (*Global Positioning System*), e le emissioni di particelle solari energetiche (*SEPs*) possono essere dannose sia per i satelliti sia per gli astronauti [19]. Si spera che lo studio di suddette condizioni e variazioni, grazie anche alla missione *CSES/Limadou*, possa portare in un futuro non lontano a previsioni più certe e dettagliate di tali fenomeni, in modo tale da ridurre le conseguenze legate ad essi. Tuttavia, poiché l'emissione di *SEPs* è legata al ciclo solare, divenendo un fenomeno raro nel periodo di minima attività solare e aumentando in frequenza e intensità durante le fasi di massimo, finora sono stati registrati eventi piuttosto deboli, in quanto ci troviamo

in una fase di quiete del ciclo solare. Ci sono, però, alcuni eventi solari, anche di grado molto basso, che liberano nell'ambiente circostante grandi quantità di plasma - emissioni di massa coronale (*CMEs*) - che comportano comunque effetti rilevabili a terra; uno di questi è una decrescita dei flussi di particelle cosmiche (*GCRs*), note come *Forbush Decreases* o effetti Forbush, descritti nel Capitolo 1.

Tra gli altri obiettivi della missione, troviamo lo studio della variabilità temporale delle fasce di Van Allen; esse sono zone di forma toroidale che avvolgono la Terra e nelle quali sono intrappolate le particelle cariche a loro volta generate da interazioni fra raggi cosmici e le molecole dell'atmosfera. La fascia più interna è composta da protoni ($10 \text{ MeV} \leq E \leq 1 \text{ GeV}$) e si estende tra 1000 km e 12000 km, mentre le due fasce esterne (una a Sud e una a Nord) sono composte in maggioranza da elettroni ($1 \text{ MeV} \leq E \leq 50 \text{ MeV}$) e si estendono da un'altitudine di circa 13000 km ad un'altitudine di circa 65000 km al di sopra della superficie terrestre. La missione *CSES* ha un ruolo cruciale nello studio della distribuzione ed accelerazione delle particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen, specialmente per i protoni in quanto opera esattamente in quell'intervallo energetico [20].

2.2 **Struttura e orbite del satellite**

Il satellite *CSES-01*, basato sul modello cinese CAST2000, ha una massa di circa 700 kg e il corpo principale ha dimensioni pari a $145\text{cm}(Y) \times 144\text{cm}(Z) \times 143\text{cm}(X)$. La regione di lavoro dei *payload* a bordo di *CSES-01* è compresa fra le latitudini di -65° e $+65^\circ$, come mostrato in Figura 2.2: qui lo strumento raccoglie dati e li trasmette a terra. Oltre queste latitudini i *payload* vengono posti in *standby* e vengono permesse alcune manovre orbitali o vengono effettuate operazioni per risolvere problemi e otti-

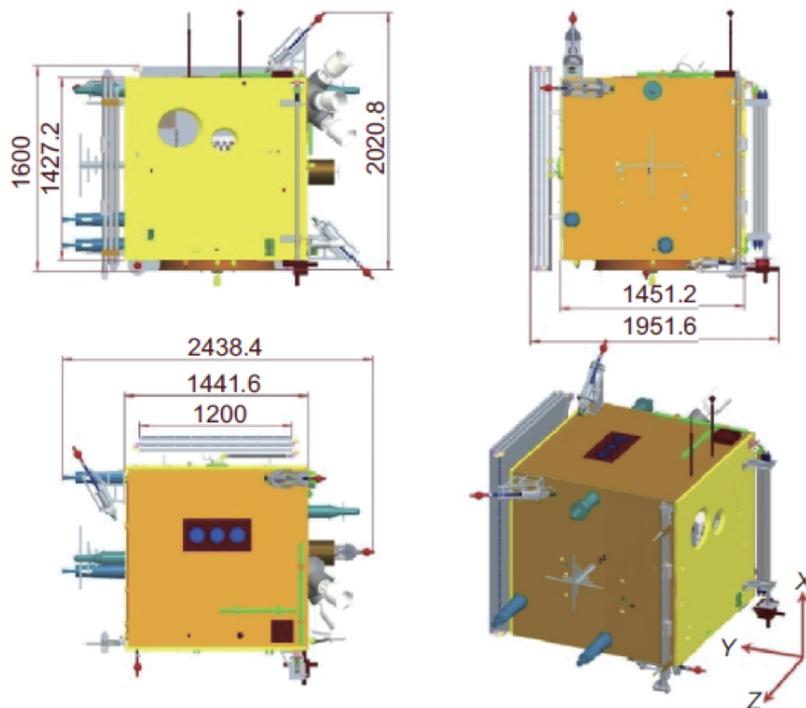


Figura 2.1: Struttura esterna del satellite CSES-01 vista da 3 lati e in una visione isometrica (in basso a destra).

mizzare le prestazioni della strumentazione a bordo. Da Novembre 2019 tale regione di lavoro è stata ampliata fino a raggiungere i $\pm 70^\circ$.

Il satellite *CSES-01* è posto a 507 km di altitudine e con un'inclinazione di 97° su un'orbita eliosincrona (un'orbita geocentrica tale da permettere che il satellite sorvoli un dato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora locale) della durata di circa 97 minuti.

2.2.1 Strumenti a bordo di CSES-01

Il satellite *CSES-01* include diversi sottosistemi per le manovre orbitali e otto strumenti scientifici per le misurazioni.

Sono presenti, per il primo tipo di strumentazione, sistemi di gestione di dati a bordo

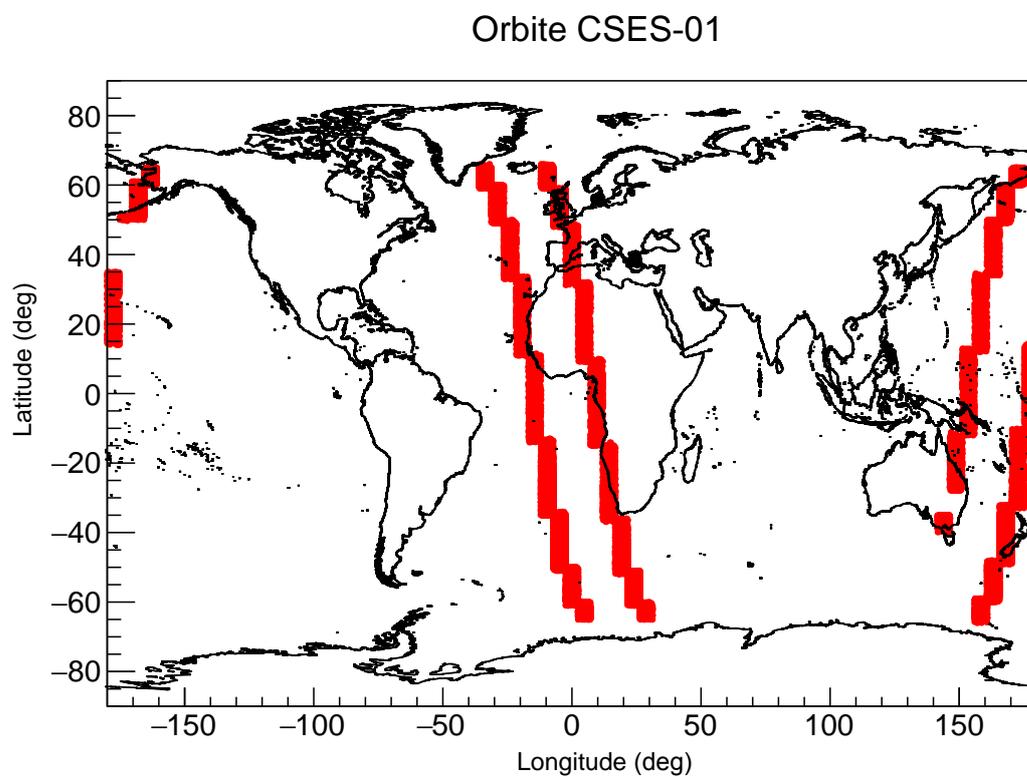


Figura 2.2: Esempi di orbite seguite dal satellite CSES-01 (in rosso).

(*OBDH*); controllo orbitale (*AOC*) tramite tre localizzatori stellari, due gruppi di giroscopi e un sensore solare digitale; monitoraggio, telemetria e comando (*TTC*); alimentazione tramite pannelli solari e una batteria a ioni litio da 80Ah.

Gli otto strumenti scientifici sono invece: il magnetometro ad alta precisione *High Precision Magnetometer (HPM)* per misurare le componenti e l'intensità del campo magnetico; il detector *Electric Field Detector (EFD)* atto alla misurazione delle tre componenti del campo elettrico; due strumentazioni per lo studio della composizione del plasma e la temperatura e la densità di ioni ed elettroni nella ionosfera: il pacchetto di analizzatori *Plasma Analyzer Package (PAP)* e il *Langmuir Probe (LP)*; un *Global Navigation Satellite System (GNSS)* e un *Search-Coil Magnetometer (SCM)*; e infine un *High-Energy Particle Package (HEPP)* e *High-Energy Particle Detector (HEPD)* per misurare il flusso e lo spettro delle particelle [18].

Il satellite *CSES-01* è solo il primo di una costellazione di satelliti che verranno lanciati nei prossimi anni (*CSES-02* è già in fase avanzata di progettazione) e che avranno il compito di monitorare l'ambiente Sole-Terra con sempre maggiore precisione e sotto numerosi aspetti.

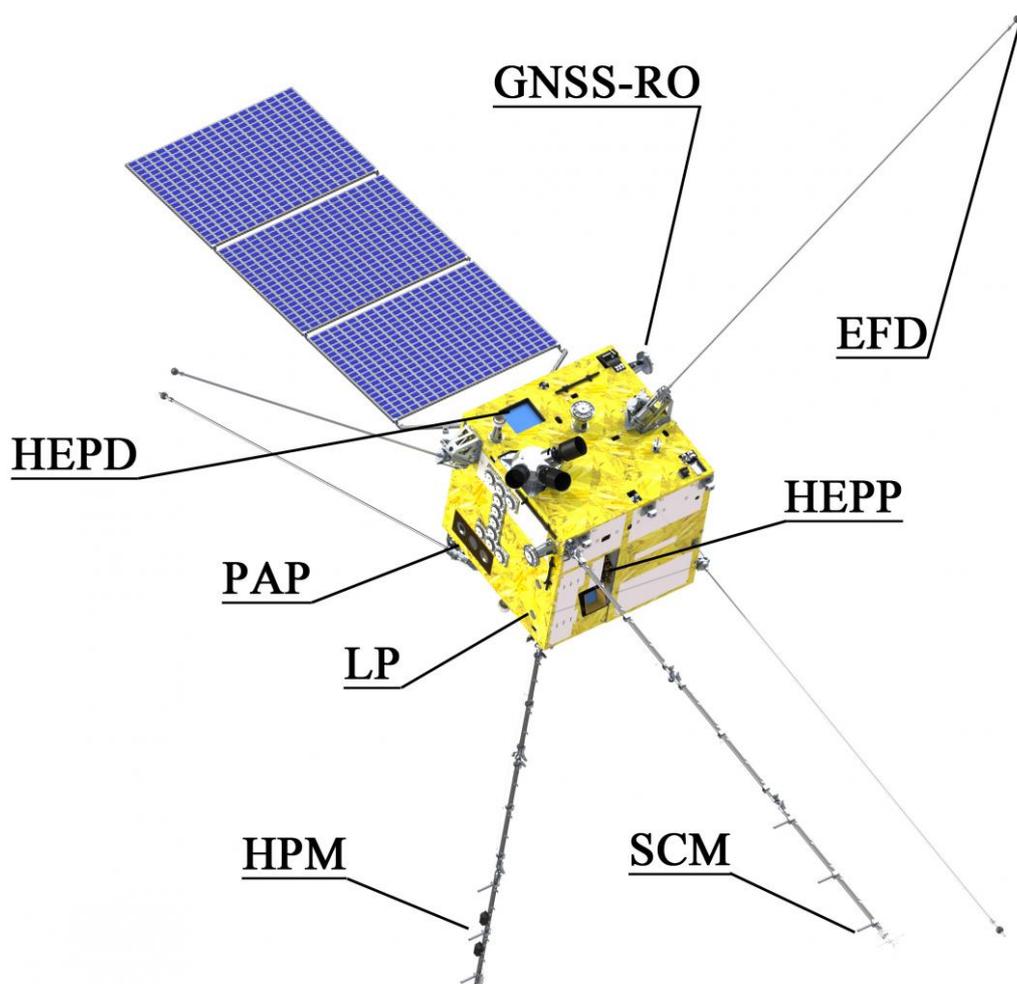


Figura 2.3: *Ensemble* di strumenti a bordo di CSES-01.

Capitolo 3

HEPD (High-Energy Particle Detector)

3.1 Il rivelatore

HEPD (High-Energy Particle Detector) è un rivelatore di particelle installato a bordo del satellite *CSES-01*. È stato progettato e costruito dalla componente italiana della collaborazione, *Limadou*, la quale ha fornito quattro differenti modelli per effettuare test prima del lancio: l'*Electrical Model (EM)*, con le sole componenti di trasmissione per validare le connessioni elettriche tra *HEPD* e *CSES-01*; il *Structural and Thermal Model (STM)*, per verificare la struttura e la conduttività termica; il *Qualification Model (QM)*, per calibrare lo strumento e sottoporlo a diversi stress test; il *Flight Model (FM)*, esposto a fasci di elettroni (30-120 MeV), protoni (37-228 MeV) e raggi cosmici (muoni) [21].

HEPD è contenuto all'interno di un box di alluminio di dimensioni $40.36\text{cm} \times 53.00\text{cm} \times 38.15\text{cm}$, per una massa totale di 45 kg. Il suo consumo energetico è sempre al di sotto della soglia di 30 W, ma dipende dallo stato in cui si trova il rivelatore stesso. Esso, infatti, può lavorare in tre modalità: *SAFE*, *STAND-BY*, *NOMINAL*. La prima è stata sfruttata solo per poche ore alla prima accensione per permettere le operazioni

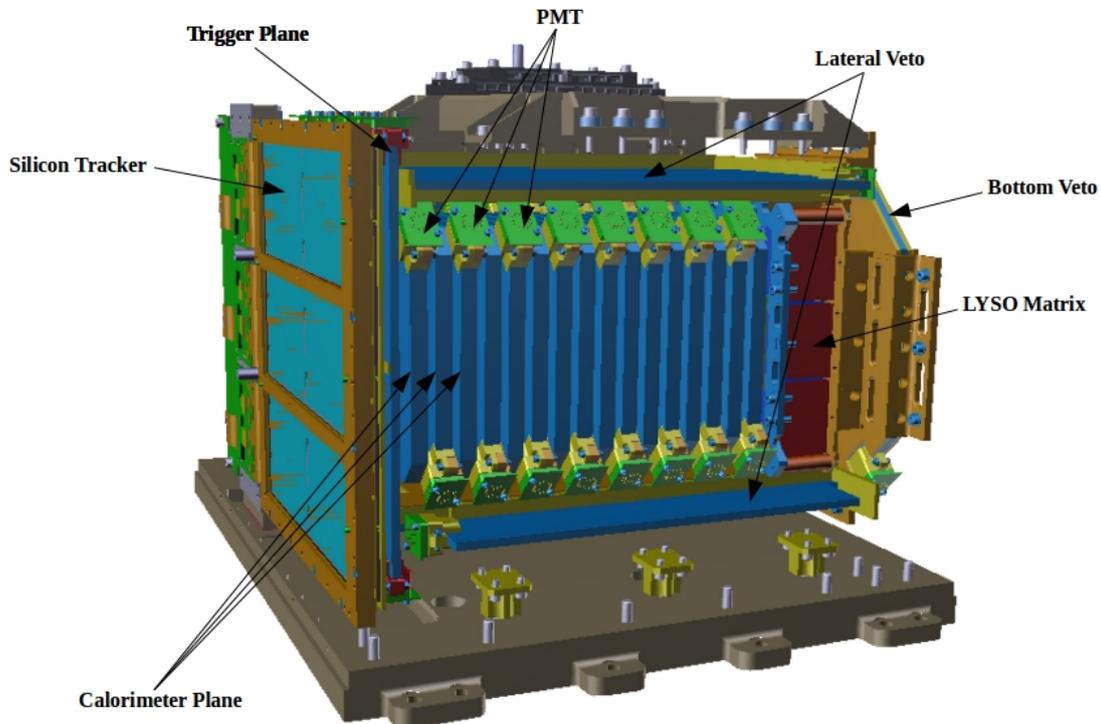


Figura 3.1: Il rivelatore *HEPD* e le sue componenti.

di calibrazione; la seconda viene utilizzata a latitudini superiori a $+65^\circ$ e inferiori a -65° per consentire manovre satellitari; la terza, infine, è la modalità attivata durante la presa dati. Da Novembre 2019, la soglia in latitudine è stata leggermente aumentata fino a $\pm 70^\circ$. Un'immagine schematica del rivelatore è mostrata in Figura 3.1.

Il rivelatore *HEPD* è così costituito (dall'alto al basso):

- Un *TRACKER* composto di due piani di microstrip di silicio, distanti 1 cm. Ogni piano, di dimensioni $213.2\text{mm} \times 214.8\text{mm}$, è diviso in tre sezioni identiche chiamate *ladders*. È utilizzato per ricostruire la direzione di incidenza della

particella utilizzando il segnale raccolto su entrambi i piani (le strisce di questi sono poste ortogonalmente le une rispetto alle altre per fornire coordinate X e Y);

- Un *TRIGGER* costituito da un piano di scintillatore plastico ($20\text{ cm} \times 18\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$) diviso in sei *paddles*. Localizzato subito sotto il *Tracking System*, quando è attraversato da una particella genera un segnale di *trigger* che dà inizio all'acquisizione dei dati. Tale piano ottiene anche informazioni aggiuntive sulla particella incidente riguardanti la posizione, la perdita di energia e, in caso, la presenza di eventi multiparticella che vanno rigettati;
- Un calorimetro, per la misura dell'energia depositata dalla particella incidente. Esso consiste di due sezioni, una superiore e una inferiore. La prima sezione, detta *TOWER*, è composta da 16 piani ($15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 1\text{ cm}$) di scintillatore plastico che diventa luminescente se colpito da particelle cariche. Ciascun piano è letto da due *Photo Multiplier Tubes (PMTs)* posizionati agli angoli opposti dello scintillatore. La seconda sezione invece consta di una matrice 3×3 di scintillatori inorganici *LYSO* (Ortosilicato di Lutezio e Itrio), per una dimensione totale $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 4\text{ cm}$. Ogni cristallo di *LYSO* è letto a sua volta da un *PMT* posto al di sotto della sua superficie inferiore. La matrice di *LYSO* permette di estendere il range energetico rivelabile dal detector: aumentando con la sua presenza lo spessore e la densità del materiale incontrato dalla particella incidente, permette di rivelare anche particelle più energetiche;
- Un sistema *VETO* che circonda completamente il calorimetro e che include 5 piani di scintillatori plastici, letti anch'essi da due *PMTs*. Questi piani sono circondati a loro volta da piastre in fibra di carbonio che prevengono qualsiasi

possibile problema generato da shock, urti o stress applicati al rivelatore. Inoltre, il *VETO* è utile anche per rigettare particelle non interamente contenute nel calorimetro o che non rispettano le condizioni di *trigger*, come ad esempio particelle entranti lateralmente o particelle secondarie prodotte all'interno del calorimetro (si veda il Paragrafo 3.2.1).

La struttura di *HEPD* è completata da due sottosistemi:

- Un sistema elettronico composto di quattro schede utile a gestire l'acquisizione dei dati a bordo (*On-Board Data Handling*) e il *trigger*;
- Un *Low-Voltage Power Supply (LVPS)* per fornire bassi voltaggi all'elettronica del rivelatore, e un *High-Voltage Power Supply (HVPS)* per fornire alti voltaggi ai *PMTs*.

Maggiori informazioni sul detector si trovano in [18].

3.2 Trigger e raccolta dati

Una particella che incide su *HEPD* è considerata un evento valido se, attraversando la strumentazione, dà il via all'acquisizione dei dati. Tale processo è definito dalla *configurazione di trigger*, la quale richiede un rilascio di energia da parte della particella in uno o più piani della strumentazione che costituisce il rivelatore, e solo se ciò avviene inizia il processamento ed il download a terra delle informazioni. Le configurazioni di *trigger* disponibili per *HEPD* sono:

1. T
2. $T \ \& \ P_1$
3. $T \ \& \ (P_1 \ || \ P_2)$

4. $(T_3 \parallel T_4) \& (P_1 \parallel P_2)$
5. $T \& P_1 \& P_2$
6. $T \& P_1 \& P_2 \& P_3$
7. $T \& (P_1 \parallel P_2) \& (P_{15} \parallel P_{16})$
8. $T \& (P_1 \parallel P_2) \& L$

Le *paddles* del piano di *trigger* e i piani della *TOWER* vengono considerati colpiti se almeno uno dei *PMTs* che li leggono genera un segnale, proporzionale all'energia depositata dalla particella incidente, che superi una certa soglia. Pertanto, ad esempio, si indica con T l'*OR* dei dodici *PMTs* corrispondenti alle sei *paddles* del piano di *trigger*; con T_3 e T_4 l'*OR* dei quattro *PMTs* che leggono le due *paddles* centrali; con P_1 e P_2 , ad esempio, l'*OR* del primo e del secondo piano del calorimetro (analogamente per gli altri piani P_n). Basterà quindi che almeno uno dei due *PMTs* del piano definito nella configurazione rilasci un segnale affinché questo piano venga considerato attraversato dalla particella, e si dia il via all'acquisizione dei dati sull'evento [22].

Utilizzando la configurazione che richiede un segnale solo da uno dei dodici *PMTs* del piano di *trigger* (T) sono stati graficati i valori di *rate meter* ottenuti, ossia i conteggi di particelle al secondo rivelate, in funzione della longitudine e della latitudine, nell'Agosto 2018. Il risultato è visibile nella Figura 3.2. In questo grafico sono evidenti le due fasce rosse a Nord e a Sud (fasce di van Allen esterne), già introdotte nel paragrafo 2.1.1. Si nota anche la cosiddetta Anomalia del Sud Atlantico (*SAA*), una regione che si estende dal Sud America al Sud Africa, in cui l'intensità del campo geomagnetico è inferiore (a causa del disallineamento fra l'asse magnetico e l'asse

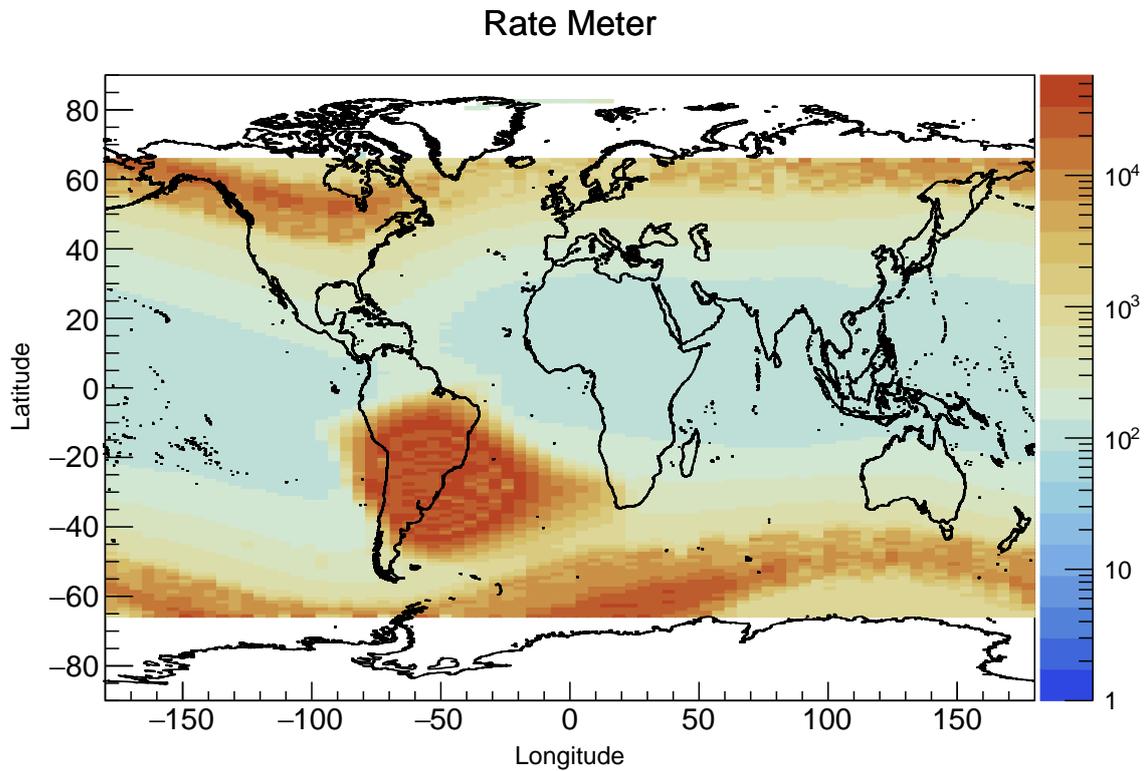


Figura 3.2: *Rate meter* in funzione di longitudine e latitudine geografiche, ottenuto da HEPD nell'Agosto 2018.

di rotazione del pianeta) e la fascia di Van Allen interna è più vicina alla superficie terrestre.

Per l'analisi dati che verrà descritta nel Capitolo 4 si utilizzeranno i *rate meter* relativi alle configurazioni di *trigger*:

1. $T \& P_1 \& P_2$
2. $T \& P_1 \& P_2 \& P_3$
3. $T \& (P_1 \parallel P_2) \& (P_{15} \parallel P_{16})$

in quanto più profonde e meno sensibili alle variazioni legate alla riconfigurazione degli elettroni di bassa energia durante gli eventi solari analizzati.

Vengono descritte di seguito ulteriori caratteristiche tipiche dello strumento, tra cui il fattore geometrico (paragrafo 3.2.1) e la separazione fra protoni ed elettroni con relativa breve discussione sulla contaminazione reciproca (paragrafo 3.2.2).

3.2.1 Fattore geometrico

Il fattore geometrico è un'ulteriore condizione di tipo strumentale per definire se una particella (o evento) è all'interno dell'accettanza o meno. Prevede la richiesta che una particella incidente rimanga completamente contenuta all'interno del volume del rivelatore durante il passaggio attraverso i vari piani *TRACKER+TRIGGER+TOWER++LYSO*. Non vengono quindi accettati eventi nei quali la particella tocca, ad esempio, il *VETO* inferiore o i laterali.

Il fattore geometrico di *HEPD* è stato valutato tramite due simulazioni Monte Carlo, la prima con protoni generati isotropicamente di energia compresa fra 10 MeV e 10 GeV, e la seconda con un fascio di elettroni anch'essi generati isotropicamente ma con energia tra 1 MeV e 200 MeV. Entrambe le simulazioni sono state svolte nella configurazione di *trigger T&P₁&P₂*. Il risultato è mostrato in Figura 3.3.

Poiché l'angolo e la direzione di incidenza possono essere vari, il fattore geometrico dipende dal tipo di particelle e dalla loro energia, così come dalla geometria dello strumento. La sua dimensione è quindi minore nei piani superiori del calorimetro e maggiore in quelli inferiori. Come si nota nella Figura 3.3, il fattore geometrico assume valori piccoli per basse energie. Questo perché particelle incidenti con poca energia difficilmente accenderanno i piani più profondi del calorimetro; alcune tenderanno anche ad essere deviate andando a toccare i *VETO* laterali. Più l'energia delle particelle incidenti cresce e più sono le particelle che accendono i piani più profondi. Per i protoni, l'accettanza geometrica assume un valore massimo intorno a 90 MeV;

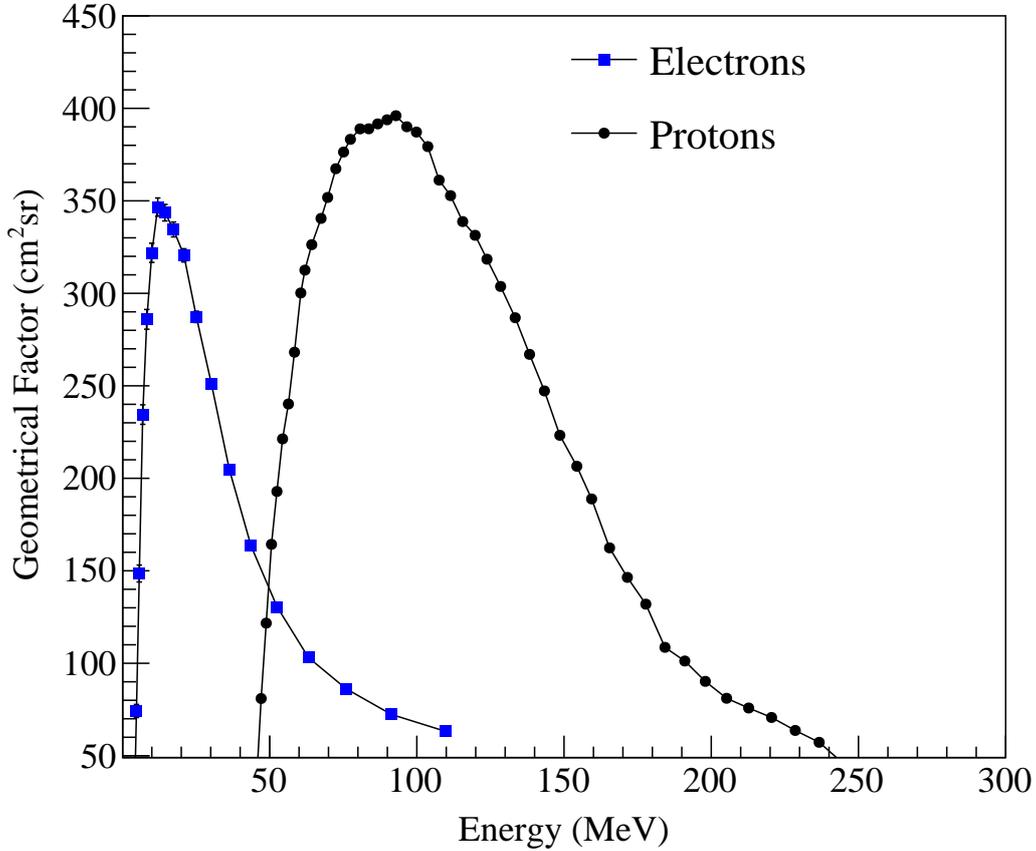


Figura 3.3: Fattore geometrico di HEPD per elettroni (in blu) e per protoni (in nero) ottenuto nella configurazione di trigger $T&P_1&P_2$.

per gli elettroni, invece, il valore massimo cade intorno a 15 MeV. Entrambe le curve decrescono poi rapidamente: a causa delle interazioni adroniche o delle *showers* elettromagnetiche che generano fasci di particelle secondarie che possono incidere sui *VE TO* laterali [22].

3.2.2 Particle identification e contaminazione

Come introdotto nel paragrafo 2.1.1, la missione *CSES/Limadou* opera con elettroni in un range energetico di 3-100 MeV e con protoni di energia da 30 MeV a 250 MeV. Ciò è ben evidenziato nella Figura 3.4, in cui viene graficato il deposito del segnale

ADC generato dai *PMTs* del piano P_1 in funzione dell'energia totale rilasciata da una particella che attraversa il rivelatore.

Dalla Figura 3.4 si può anche notare, però, come vi sia la possibilità di contaminazione fra le due popolazioni di particelle. Infatti, ipotizzando che un elettrone incida sul calorimetro con un angolo grande rispetto alla normale del piano stesso, esso attraverserà più materiale rilasciando una maggiore quantità di energia. Così facendo finirà per contaminare il campione dei protoni di bassa energia. Al contrario, nel caso in cui dovesse colpire il piano P_1 con un angolo di incidenza piccolo, l'elettrone può essere riconosciuto facilmente, confrontando l'energia rilasciata nel primo piano della *TOWER* con l'energia rilasciata in tutto il sistema *TOWER+LYSO*. Per quanto riguarda il campione di elettroni e positroni, esso può essere contaminato da protoni di alta energia, i quali rilasciano una quantità piccola di energia incidendo sui piani del calorimetro. La curva dell'idrogeno incontra allora la retta di $e^- + e^+$ lungo la coda che segue le alte energie e bassi depositi di segnale ADC. Ulteriori contaminazioni possono provenire da atomi di deuterio e isotopi dell'idrogeno che non possono essere separati dal flusso di particelle con carica positiva [22].

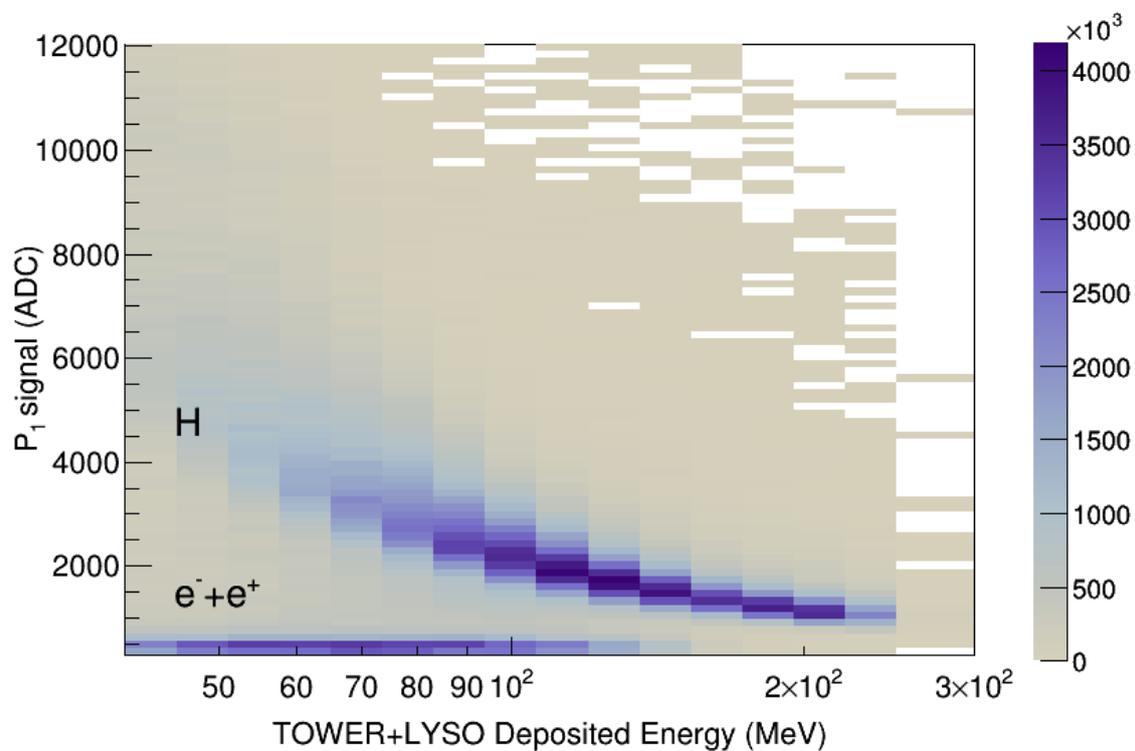


Figura 3.4: Deposito di segnale ADC nei *PMTs* del piano P_1 in funzione dell'energia totale rilasciata dalla particella incidente nel calorimetro. Le due popolazioni di protoni e leptoni sembrano ben separate anche se effetti di contaminazione sono possibili, ma vengono studiati ed eliminati attraverso simulazioni Monte Carlo.

Capitolo 4

Analisi Dati

L'obiettivo del mio lavoro di tesi è stato verificare la presenza di una variazione percentuale nel flusso di particelle dei raggi cosmici galattici durante quattro fra i maggiori eventi solari del periodo 2018-2021 (Agosto 2018, Aprile 2020, Dicembre 2020 e Maggio 2021) nei dati di *HEPD*. Considerando che il satellite *CSES-01* è in orbita *LEO*, le particelle rivelate da *HEPD* non subiscono attenuazione dovuta alla presenza degli strati più densi dell'atmosfera, al contrario di altre strumentazioni a terra (come riometri e *neutron monitor*). Ciò permette una stima migliore del numero delle particelle provenienti da fuori la magnetosfera, senza un'eccessiva contaminazione da parte di particelle secondarie generate dalle dagli sciame elettromagnetici o dalle interazioni tra i raggi cosmici primari e i nuclei presenti nell'atmosfera stessa. Per altitudini paragonabili a quelle di *CSES-01*, inoltre, il *cut-off* geomagnetico¹ è minore, permettendo - assieme all'ampio fattore geometrico di *HEPD* - una statistica maggiore di quella ottenibile dalla maggior parte degli strumenti a terra, anche se l'orbita è limitata alla zona $\pm 65^\circ$.

¹Esso descrive la capacità di una particella galattica di penetrare o meno all'interno della magnetosfera; un valore alto del *cut-off* scherma dall'arrivo dei raggi cosmici di bassa energia, mentre un valore basso ne facilita la diffusione e la penetrazione verso la Terra.

4.1 L-shell e configurazioni di trigger

Per questo lavoro di tesi, ho analizzato i dati di livello 2 di *HEPD*; questi sono il risultato di una conversione dal formato RAW (scaricato direttamente dal satellite) al formato ROOT, un framework di analisi sviluppato al *CERN* e scritto in linguaggio *C++*. Tali dati processati sono poi raccolti in una farm di calcolo dell'*INFN*, il *CNAF*, tramite file con estensione *.root*. All'interno di questi file le informazioni riguardo gli eventi sono organizzate in pacchetti temporali di un secondo e suddivise in *trees*, *branches* e *leaves*.

Dal punto di vista strettamente operativo, ho utilizzato i *rate meter* di *HEPD*, che forniscono un conteggio di eventi al secondo che hanno acceso un segnale nella strumentazione di *HEPD*, senza applicare nessuna tecnica esplicita di *particle identification* per separare i protoni dagli elettroni. Essendo interessata solo a particelle galattiche sopra il *cut-off*, infatti, il rapporto tra protoni ed elettroni cosmici è 100:1 circa, rendendo, quindi, la presenza di elettroni quasi trascurabile e lasciando nel campione osservato quasi esclusivamente protoni.

Per l'analisi sono state scelte le seguenti tre configurazioni di *trigger*:

- $T \ \& \ P_1 \ \& \ P_2$;
- $T \ \& \ P_1 \ \& \ P_2 \ \& \ P_3$;
- $T \ \& \ (P_1 || P_2) \ \& \ (P_{15} || P_{16})$.

Esse sono infatti le più profonde tra quelle configurabili con il detector *HEPD* e dunque sono quelle che richiedono una soglia energetica maggiore per essere attivate. Ciò garantisce una minor contaminazione del campione da parte degli elettroni di bassa energia, provenienti direttamente dal Sole o legati alle riconfigurazioni delle linee

di campo magnetico dopo l'arrivo della nube di plasma a seguito dell'evento solare a cui ero interessata.

Una maggiore attenzione, invece, ha richiesto la valutazione della regione geografica ottimale per minimizzare la contaminazione da parte di particelle *re-entrant* o intrapolate, o più in generale le popolazioni di *sub-cutoff*. A tal proposito, ho utilizzato un criterio di selezione sul parametro di McIlwain o *L-shell*.

La *L-shell* rappresenta una suddivisione in "gusci" del campo magnetico terrestre, in cui ogni guscio (o *shell*) è delimitato dalle linee di campo che si trovano ad una distanza pari a L raggi terrestri dal centro della Terra. Un valore di L maggiore denota latitudini elevate, dunque linee di campo parallele tra loro e, di conseguenza, un valore del *cut-off* geomagnetico minore. Una selezione sulla *L-shell* seleziona indirettamente anche la natura della particella incidente sullo strumento; un valore di $L-shell > 6$ garantisce un valore di *cut-off* pari a 31 MV (e una energia di ~ 50 MeV). Unendo questa selezione geografica alla scelta delle configurazioni di *trigger* più profonde di *HEPD*, assicura che le particelle rivelate sono principalmente protoni galattici con energia > 50 MeV, che sono quelle interessate maggiormente dall'effetto Forbush.

4.2 Osservazione di effetti Forbush durante alcune tempeste geomagnetiche

A partire dal lancio di *CSES-01*, avvenuto il 2 Febbraio 2018, si sono verificate alcune tempeste geomagnetiche generate da eventi solari di maggiore o minore intensità. Tra queste, ne ho analizzate 7 tra le più potenti: Agosto 2018, Maggio 2019, Novembre 2019, Aprile 2020, Dicembre 2020, Gennaio 2021 e Maggio 2021. Purtroppo, durante gli eventi di Maggio 2019, Novembre 2019 e Gennaio 2021 il rivelatore è stato parzialmente spento oppure si sono verificati problemi di trasmissione dei dati a terra,

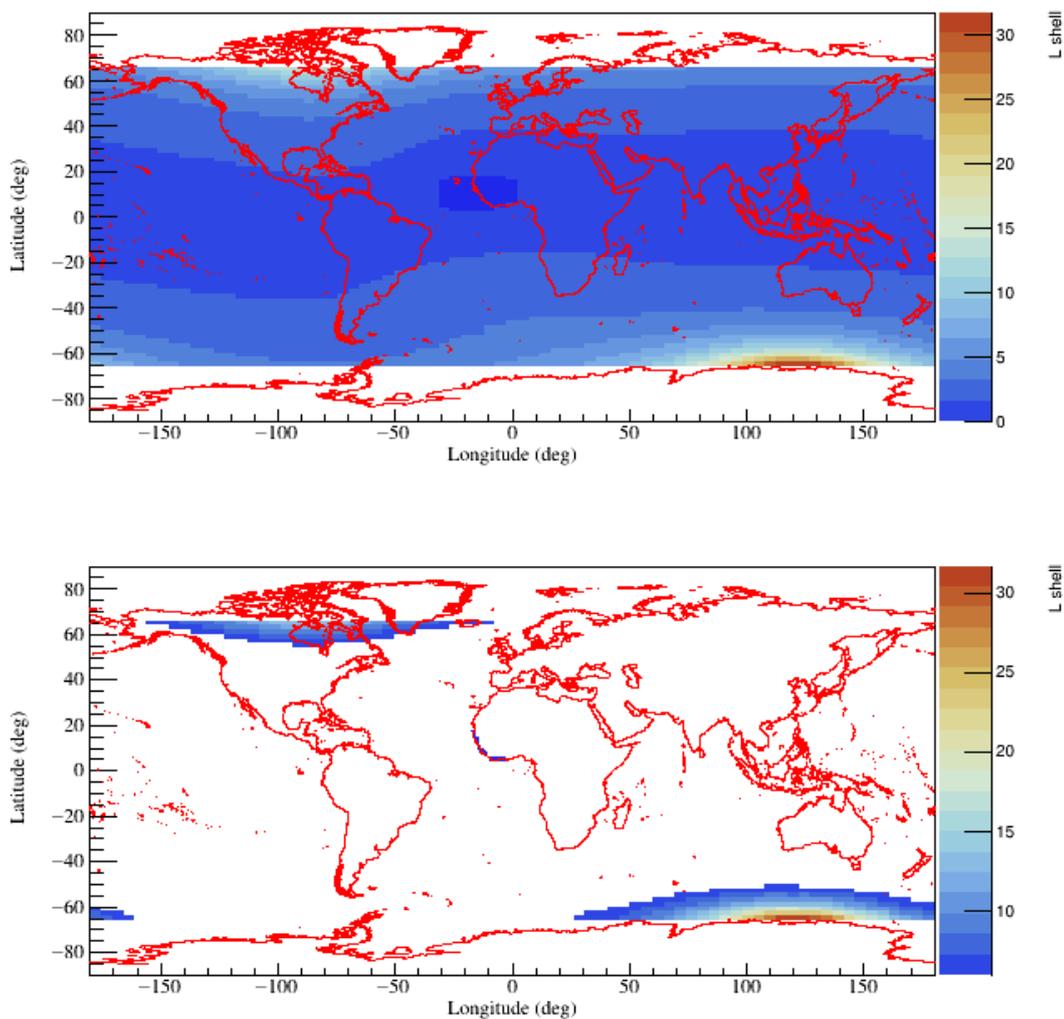


Figura 4.1: Valore della L -shell in funzione della latitudine e della longitudine geografiche. Nel grafico superiore si vedono tutte le L -shell attraversate dall'orbita del satellite; nel grafico inferiore sono scelte solo le L -shell > 6 , che garantiscono la presenza di particelle galattiche. Il calcolo dei valori di L -shell è stato ottenuto utilizzando la libreria IRBEM.

Disturbance Time (UT)	ICME Plasma Start (UT)	ICME Plasma Stop (UT)	DST index
2018/08/25 02:00	2018/08/25 12:00	2018/08/26 12:00	-174
2020/04/20 02:31	2020/04/20 09:00	2020/04/21 04:00	-59
2020/12/10 02:10	2020/12/10 23:00	2020/12/13 04:00	-10
2021/05/12 06:43	2021/05/12 12:58	2021/05/13 17:59	-61

Tabella 4.1: Dettagli temporali e variazione nel campo magnetico terrestre (indice *DST*) per ognuna delle 4 tempeste analizzate.

perciò il loro studio è stato trascurato. Pertanto, ho focalizzato la ricerca degli effetti Forbush ai 4 eventi rimanenti, ossia Agosto 2018, Aprile 2020, Dicembre 2020 e Maggio 2021. Di norma, trovandoci in una fase di minima attività solare, le tempeste sono state poco frequenti e generalmente di bassa intensità. Le due di Agosto 2018 e Maggio 2021, però, sono state classificate come tempeste di classe G3 (ossia *strong*): in queste l'effetto a terra è stato maggiormente visibile. Per ognuna delle 4 tempeste analizzate si riportano nella Tabella 4.1 le date (in formato YYYY/MM/DD seguendo lo standard UT) di inizio della perturbazione, di arrivo del plasma e della fine del disturbo; nella quarta colonna è segnato il valore dell'indice *DST*, un indice che misura la deflessione negativa della componente z del campo magnetico terrestre: esso è un indicatore dell'intensità con cui la *ICME* incide sulla magnetosfera perturbandola, quindi maggiore è il suo valore in modulo e maggiore sarà il disturbo.

La tempesta di Agosto 2018 è stata la terza tempesta geomagnetica più intensa del 24° ciclo solare. L'eruzione di massa coronale è avvenuta il 20 Agosto sulla superficie solare e ha causato l'inizio di una perturbazione cinque giorni dopo alle 02:00. La *ICME* ha urtato il campo magnetico terrestre dieci ore dopo, alle 12:00 del 25 Agosto, e il plasma ha continuato ad essere trasportato dal vento solare fino alle 10:00 del 26 Agosto, data di termine del disturbo.

La tempesta di Maggio 2021 è finora la più significativa del recente 25° ciclo solare, iniziato a Dicembre 2019. Intorno alle 10:00 del 9 Maggio è stata emessa una massa coronale che ha generato la perturbazione iniziata il 12 Maggio alle 06:43. La conseguente *ICME* ha perturbato il campo magnetico terrestre dalle 12:58 dello stesso giorno, e il flusso di plasma è terminato il 13 Maggio alle 17:59.

Nella Figura 4.2 e nella Figura 4.3 sono visualizzati gli andamenti del valore dell'indice *DST* per queste due tempeste geomagnetiche. In entrambi i grafici sono ben visibili le deflessioni negative al momento dell'arrivo del plasma trasportato dalla *ICME*.

Per ognuno dei quattro eventi verranno proposti i profili temporali della variazione percentuale nel conteggio dei protoni galattici che ho ottenuto analizzando i dati di *HEPD*. Gli istogrammi sono divisi temporalmente in intervalli di tre ore, a partire dalle 24 ore precedenti all'arrivo del plasma e concludendo 24 ore dopo la fine dell'effetto del passaggio del plasma. Sono presentati gli andamenti del *rate meter* per tutte e tre le configurazioni di *trigger* prescelte e descritte precedentemente. In ogni pannello sono presenti tre rette verticali, una verde e due rosse: la prima indica il momento di inizio del disturbo geomagnetico, le altre due rappresentano l'arco di tempo in cui il plasma ha interagito con il campo magnetico terrestre, provocando

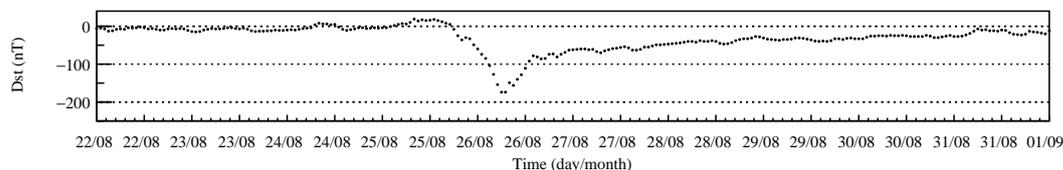


Figura 4.2: Andamento dell'indice *DST* per l'evento di Agosto 2018. Il minimo raggiunge il valore di -174 nT.

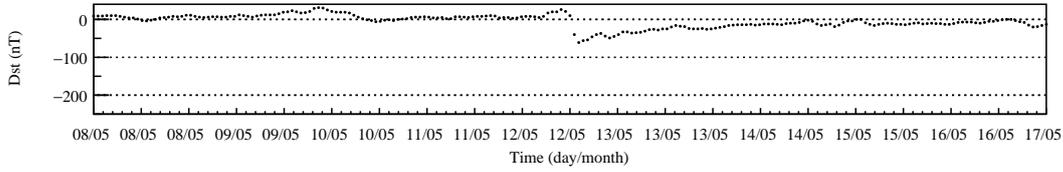


Figura 4.3: Andamento dell'indice *DST* per l'evento di Maggio 2021. Il minimo tocca il valore di -61 nT.

un possibile effetto Forbush. Inoltre, per analizzare la variazione percentuale, i valori del *rate meter* ottenuti da *HEPD* dopo l'arrivo del plasma sono normalizzati al valore più vicino a livello temporale a tale data. L'errore relativo è stato calcolato propagando solo gli errori statistici delle singole misure, in quanto l'errore sistematico è di difficile valutazione, ma comunque al di sotto del 15%. Definendo la grandezza f come la percentuale di variazione rispetto ad un valore di riferimento - ossia la misura temporalmente più vicina (t_0) al momento di arrivo del plasma - si ha

$$f = 100 \times \frac{A - B}{B} \quad (4.2.1)$$

dove A è la misura del *rate meter* al tempo t e B è la misura del *rate meter* al tempo t_0 . L'errore è valutato tramite la formula:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2} \times |f|, \quad (4.2.2)$$

in cui σ_A e σ_B sono gli errori statistici sulle misure dei *rate meter* ad ogni tempo t e al tempo di riferimento t_0 , rispettivamente.

4.2.1 L'evento di Agosto 2018

La variazione percentuale del *rate meter* durante la tempesta geomagnetica di Agosto 2018 è mostrata in Figura 4.4. È evidente un calo nel numero di protoni galattici

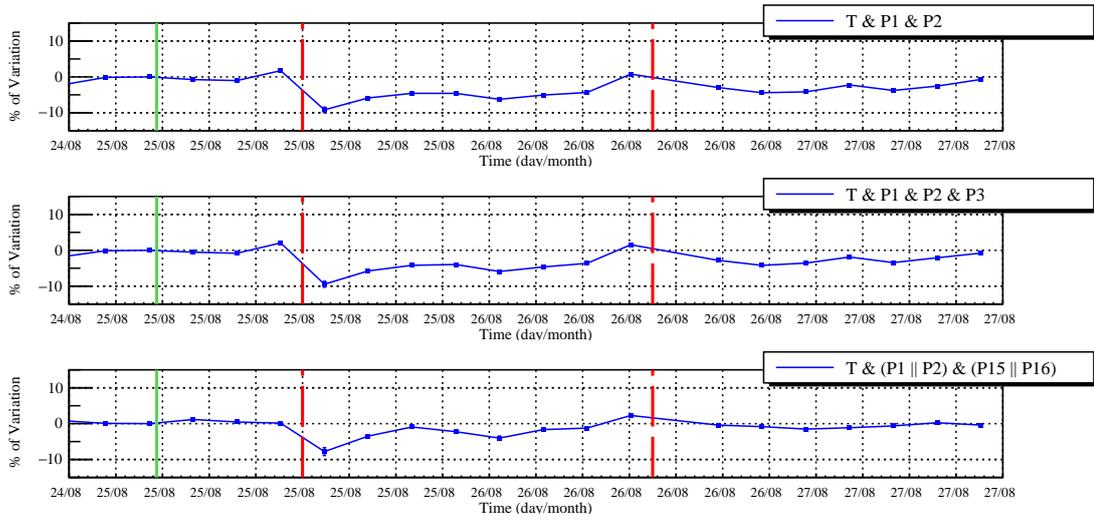


Figura 4.4: Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Agosto 2018.

al secondo rivelati da *HEPD* a partire dall'arrivo del plasma. È interessante notare come in questo caso sia presente una dipendenza dall'energia delle particelle incidenti. Il *rate meter* di particelle meno energetiche (e più superficiale) ha infatti raggiunto il valore minimo di $-10\% \pm 1\%$. Al contrario, per la configurazione più profonda e quindi per particelle più energetiche, il valore minimo è $-8\% \pm 1\%$.

Un altro parametro dipendente dall'energia delle particelle incidenti è il cosiddetto tempo di recupero (o *recovery time*). Esso rappresenta il tempo che impiega il *rate meter* per tornare ai valori precedenti alla perturbazione. Il periodo è più breve per protoni di energie maggiori e più lungo per particelle meno energetiche. Da un'analisi preliminare e quantitativa si nota infatti un tempo di recupero di circa un giorno per la prima configurazione di *trigger*, mentre per la configurazione più profonda invece bastano circa 12 ore.

Per un'analisi più completa è possibile confrontare i dati di *HEPD* con quelli ottenuti da altre strumentazioni, come *neutron monitor* e riometri. Entrambi i tipi di

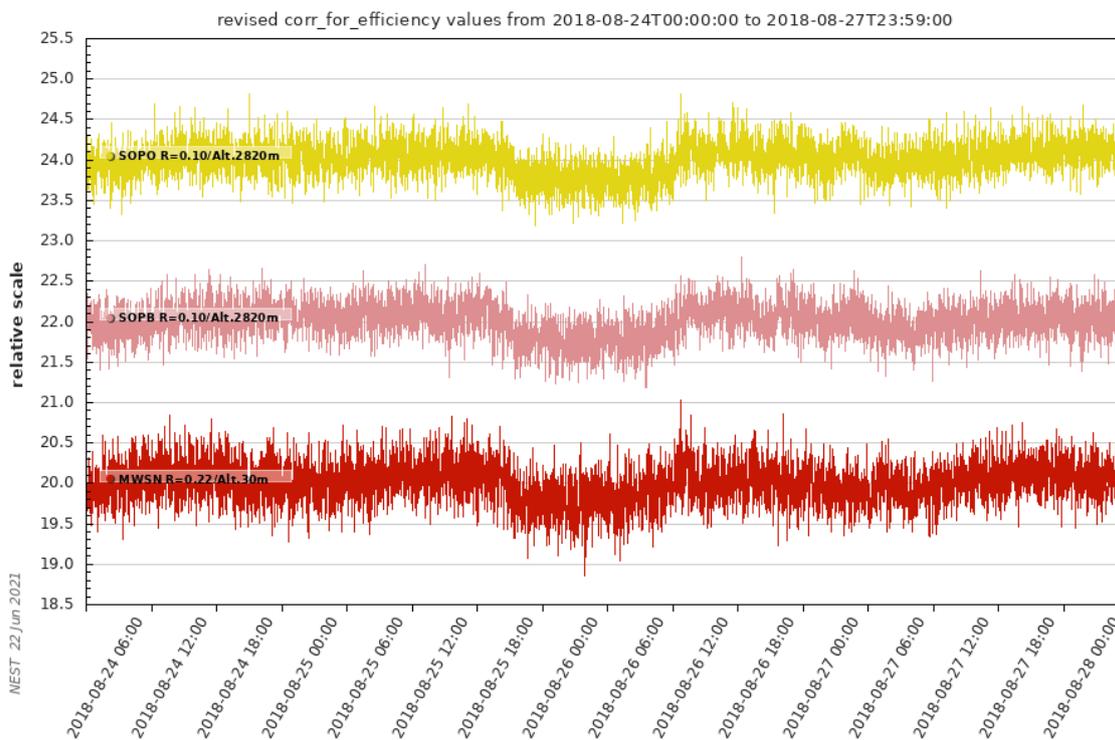


Figura 4.5: Decremento nelle rivelazioni di tre *neutron monitor* in Antartide durante la tempesta geomagnetica di Agosto 2018.

dispositivi sono strumenti a terra e vengono posizionati normalmente ad alte latitudini, ove le linee del campo magnetico terrestre si addensano permettendo un passaggio in numero maggiore per particelle incidenti nell'atmosfera. Come già accennato nel Capitolo 1.1.1, un *neutron monitor* è uno strumento che rivela i neutroni prodotti dall'interazione fra i raggi cosmici primari e i nuclei dell'atmosfera. I *neutron monitor* sfruttano, per rivelare i neutroni, i differenti modi con cui questi adroni di alta e bassa energia possono interagire con la materia. I riometri, invece, sono strumenti utilizzati per misurare l'assorbimento, da parte dell'atmosfera, di segnali radio emanati da sorgenti cosmiche. Normalmente l'andamento nei dati è stazionario, ma nel momento in cui avvengono eruzioni solari aumenta la ionizzazione nelle particelle dell'atmosfera e la curva cambia rapidamente pendenza.

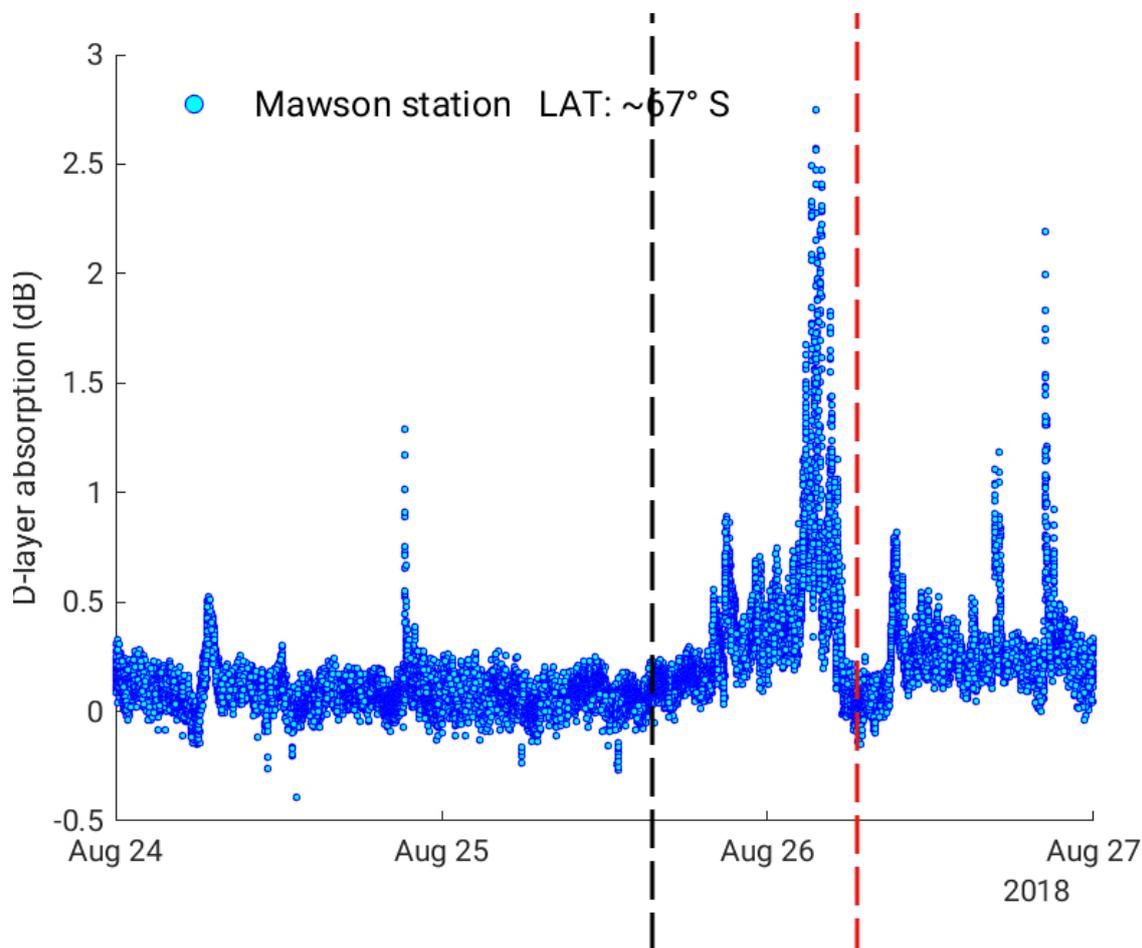


Figura 4.6: Assorbimento delle onde radio emesse da sorgenti cosmiche da parte dell'atmosfera misurato dal riometro *Mawson* in Antartide in concomitanza dell'evento solare di Agosto 2018.

Nella Figura 4.5 è riportato l'andamento dei dati ottenuti da tre *neutron monitor* posti in Antartide: *SOPO* (*South Pole Neutron Monitor*), *SOPB* (*South Pole Neutron Monitor*) e *Mawson*. È ben visibile per tutti e tre una decrescita coincidente con il periodo di incidenza del plasma. Ciò vuol dire che nell'atmosfera sono stati prodotti meno neutroni, in quanto hanno inciso meno protoni galattici, essendo stati schermati dall'arrivo del plasma solare. La percentuale di variazione è comunque minore rispetto a quella ottenuta per il *rate meter*, in quanto l'assenza di atmosfera nello spazio permette una minore contaminazione negli eventi rivelati da *HEPD*.

Nella Figura 4.6 vengono presentati i valori di assorbimento misurati dal riometro

Mawson, che opera sempre in Antartide. La retta nera indica l'orario in cui *HEPD* registra l'inizio di un effetto Forbush, la retta rossa invece il momento in cui l'indice *DST* assume il suo valore minimo. È evidente il cambio di pendenza nella curva che, partendo da un valore prossimo allo zero, raggiunge il suo massimo intorno a 2.5 nelle prime dodici ore del 26 Agosto.

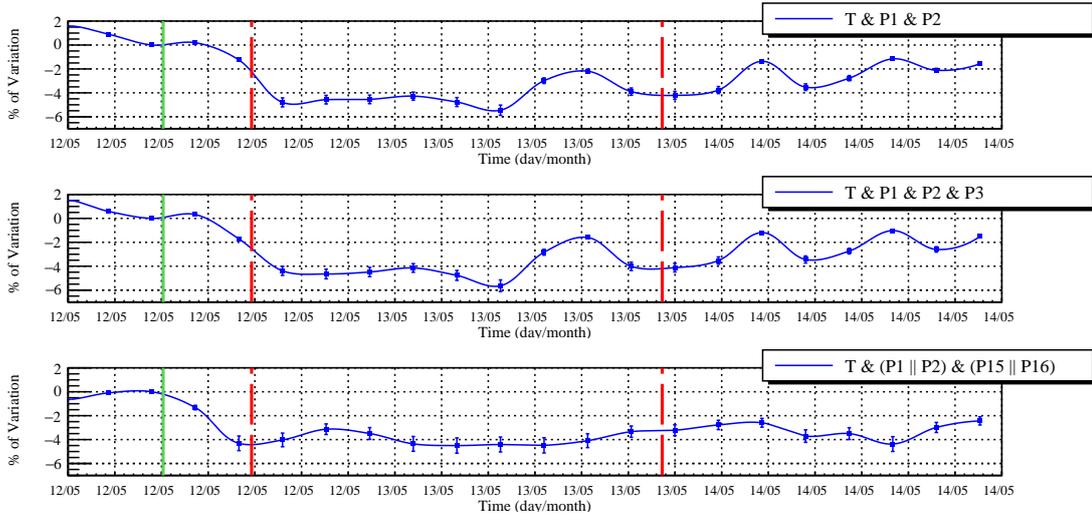


Figura 4.7: Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Maggio 2021.

4.2.2 L'evento di Maggio 2021

La *Forbush decrease* che ha seguito l'eruzione solare del 9 Maggio 2021 è visibile in Figura 4.7. Ugualmente per questa tempesta, anch'essa di tipo G3, è presente una apparente decrescita nel numero di protoni galattici rivelati da *HEPD*.

Per quanto riguarda il rate meter però non è possibile affermare che la sua variazione percentuale dipenda dall'energia dei protoni incidenti. Infatti, per la configurazione di *trigger T & P₁ & P₂* si raggiunge il valore minimo di $-5\% \pm 1\%$, mentre per i piani più bassi del calorimetro (con soglia energetica maggiore) il decremento raggiunge un valore minimo pari a $-4.5\% \pm 1\%$. Tenendo conto dell'errore i due valori possono essere assolutamente compatibili fra loro, e quindi non mostrare alcuna differenza nella variazione che sia dipendente dall'energia.

Non è possibile fare, in questo caso, un'analisi quantitativa del tempo di recupero a causa degli andamenti poco chiari nel valore del *rate meter* nel periodo temporale prossimo alla fine del passaggio del plasma. È difficile valutare una possibile dipendenza del tempo di recupero dall'energia dei protoni incidenti, e quindi una differenza

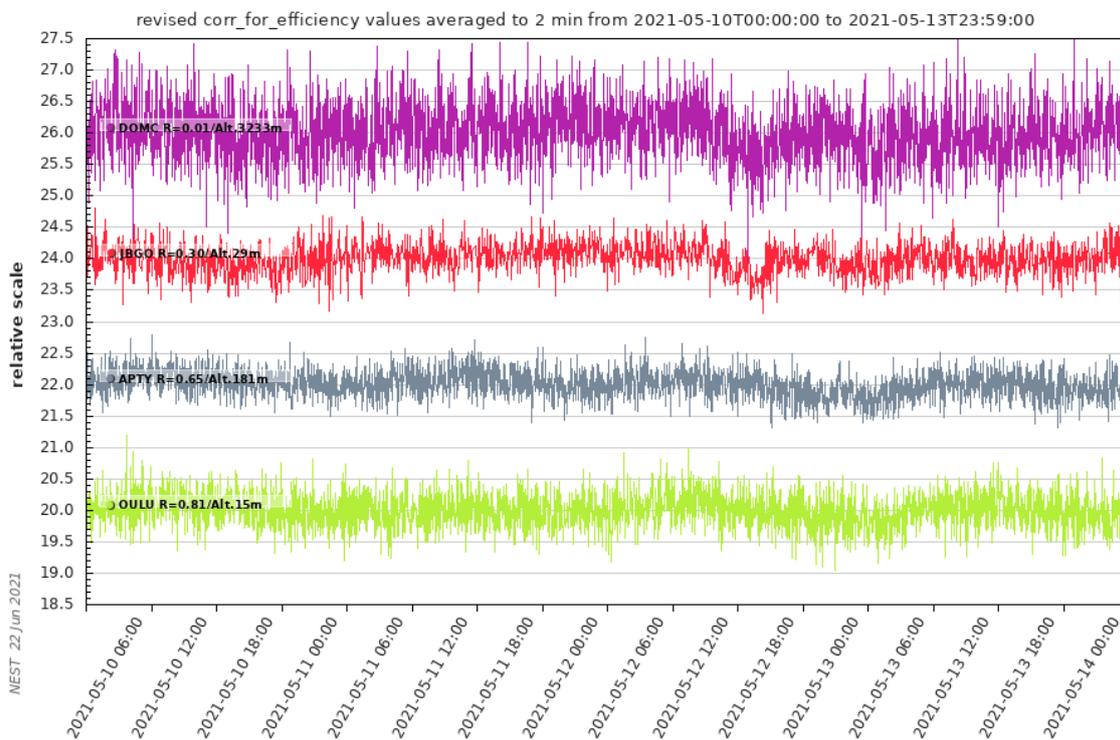


Figura 4.8: Decremento nelle rivelazioni di quattro *neutron monitor* in Antartide durante la tempesta geomagnetica di Maggio 2021.

nelle tre configurazioni di *trigger*.

Per lo studio degli effetti della tempesta in questione a terra, sono stati utilizzati, stavolta, quattro *neutron monitor*: *DOMC* e *JBGO* entrambi in Antartide, *APTY* che si trova invece in Russia, e *OULU* che opera al Polo Nord. Tutti e quattro gli strumenti hanno riportato una diminuzione nel numero di neutroni rivelati, a partire dalle 12:00 circa del 12 Maggio 2021, data di arrivo del plasma, fino alle prime ore del 13 Maggio 2021. L'andamento è visibile in Figura 4.8. Si tratta comunque di un decremento poco evidente, in quanto la tempesta è stata meno potente e gli effetti sui rivelatori a terra sono ancora più schermati dalla presenza dei nuclei atmosferici.

La Figura 4.9 riporta invece i dati ottenuti dal riometro *Mawson*. L'assorbimento delle onde emesse da sorgenti cosmiche da parte della ionosfera sfiora il valore di 3

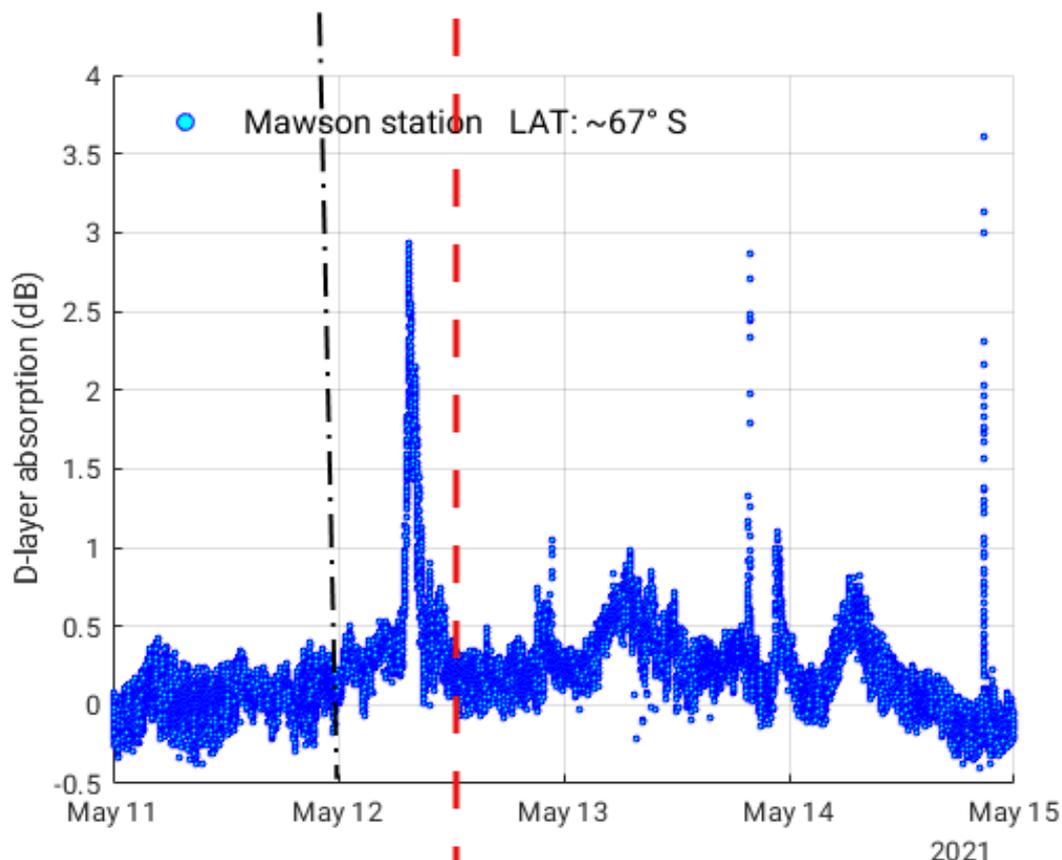


Figura 4.9: Valori registrati dal riometro *Mawson* in Antartide in concomitanza dell'evento solare di Maggio 2021.

dB al di sopra della *quiet day curve*.

4.2.3 Gli eventi di Aprile 2020 e Dicembre 2020

Gli ultimi *Forbush decrease* riguardano gli eventi di Aprile 2020 e Dicembre 2020, tempeste più deboli rispetto alle due precedentemente analizzate. I profili temporali delle variazioni percentuali nel *rate meter* sono riportate nelle Figure 4.10 e 4.11.

Anche in questo caso è evidente una differenza nella variazione percentuale dipendente dall'energia dei protoni incidenti. Per la tempesta di Aprile 2020 si sono raggiunti i valori minimi di $-5\% \pm 1\%$ e $-2.5\% \pm 1\%$, rispettivamente per la prima e la terza configurazione (primo e terzo pannello). Un divario ancora maggiore si nota

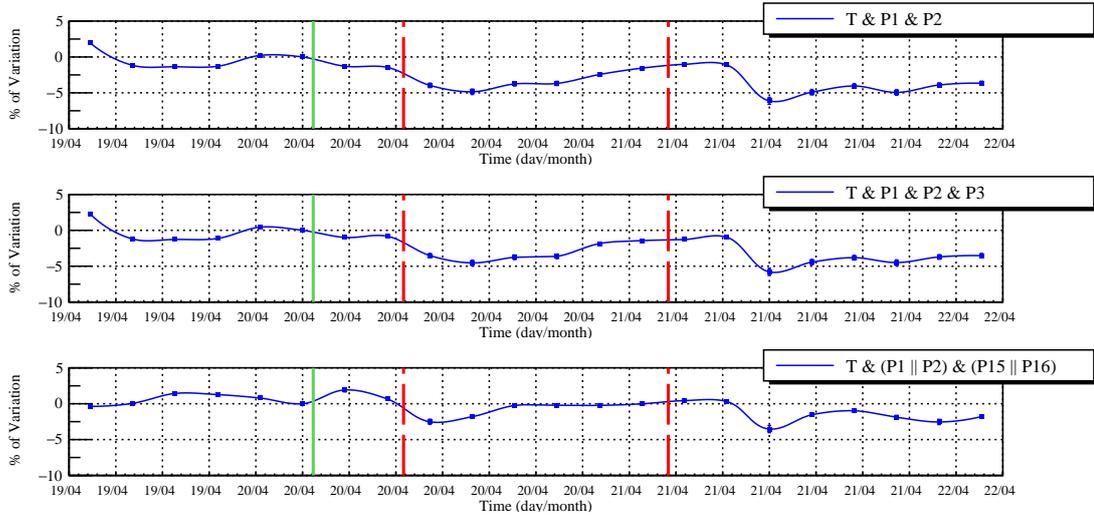


Figura 4.10: Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Aprile 2020.

nella tempesta di Dicembre 2020, ove la configurazione più superficiale delle tre arriva ad assumere il valore minimo di $-7\% \pm 1\%$ e la configurazione più profonda scende fino a $-4.5\% \pm 1\%$.

Per quanto riguarda il tempo di recupero è interessante notare una certa dipendenza dall'energia per l'evento di Aprile 2020. I protoni meno energetici infatti hanno un tempo di recupero più lungo, visibile nell'istogramma relativo alla configurazione T & P_1 & P_2 (primo pannello), che arriva fino ad un giorno e mezzo dall'arrivo del plasma. Per la configurazione che richiede più energia (terzo pannello), invece, il tempo di recupero è di circa 12 ore. Al contrario, per il *Forbush decrease* di Dicembre 2020 non è possibile studiare quantitativamente il tempo di recupero. Infatti, così com'è stato per l'evento di Maggio 2021, anche qui si presentano degli andamenti piuttosto variabili nel *rate meter* che non permettono di individuare il periodo necessario per tornare ai valori non perturbati.

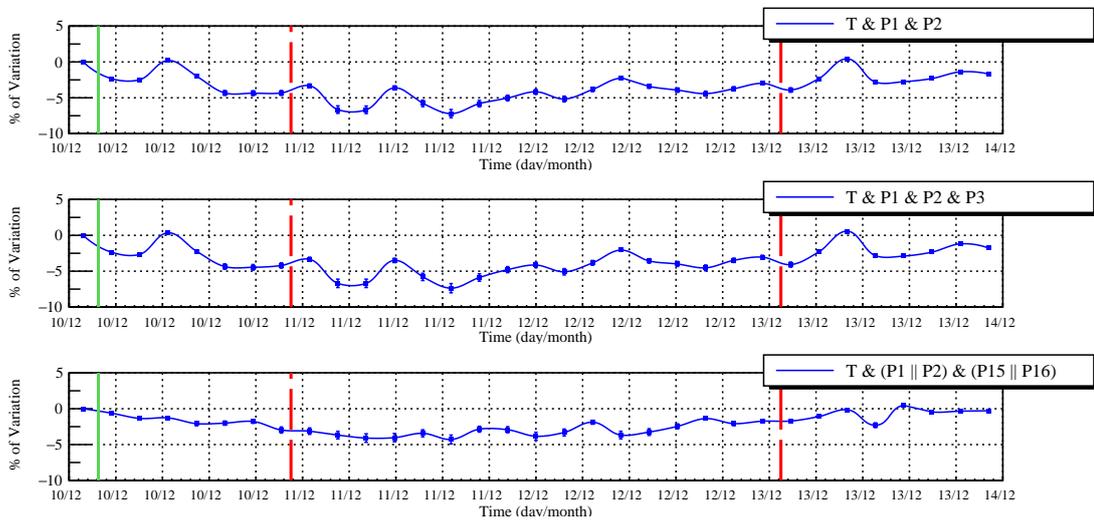


Figura 4.11: Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Dicembre 2020.

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di analizzare quantitativamente più effetti Forbush causati da diverse tempeste geomagnetiche nel periodo 2018-2021. Ciò è stato possibile utilizzando i dati di *HEPD*, un rivelatore di particelle posizionato a bordo di *CSES-01*, satellite in orbita *LEO* e gestito dalle agenzie spaziali cinese e italiana. Le informazioni ottenute dal rivelatore sono state immagazzinate, analizzate e graficate tramite il pacchetto *ROOT* e programmi scritti in linguaggio *C++*.

Di sette eventi inizialmente presi in considerazione, tre sono stati tralasciati in quanto i dati soffrivano di problemi occorsi alla strumentazione. Gli studi sulle altre quattro tempeste (Agosto 2018, Aprile 2020, Dicembre 2020 e Maggio 2021) sono stati riportati in questo lavoro di tesi; due analisi più approfondite sono state dedicate alle due tempeste di classe G3, ossia quella di Agosto 2018 e quella di Maggio 2021. Per ognuno dei quattro eventi sono stati presentati i profili temporali di variazione percentuale nel numero di protoni galattici raccolti da *HEPD*; gli andamenti sono stati studiati per le tre configurazioni di *trigger* più profonde del detector. Tutte e quattro le tempeste hanno evidenziato la presenza di un maggiore o minore *Forbush decrease*, ossia un decremento nel numero di particelle rivelate, causato dal passaggio del plasma della *ICME*.

Per i due eventi di Agosto 2018 e Maggio 2021, i risultati ottenuti con *HEPD* sono stati confrontati con i dati raccolti da altri due tipi di strumentazioni a terra, i

neutron monitor e i riometri. Entrambi questi ultimi hanno confermato la presenza di un *Forbush decrease* per tutti e due gli eventi.

È stato inoltre interessante analizzare il cosiddetto tempo di recupero, parametro che indica il tempo impiegato dal flusso di raggi cosmici per tornare ai valori antecedenti alla perturbazione, per le tempeste di Agosto 2018 e Aprile 2020. L'importanza di questo studio è dovuta al fatto che la dipendenza del tempo di recupero dall'energia dei protoni incidenti è ancora in fase di discussione. In precedenti studi, infatti, sono stati ottenuti risultati contrastanti: per alcuni il ritorno ai valori standard coincideva con il termine del disturbo interplanetario, per altri si otteneva una dipendenza dalla polarità del campo magnetico interplanetario che porta ad un moto differente per i protoni galattici dipendente dall'energia [23]. Nella mia analisi, entrambi gli effetti Forbush di Agosto 2018 e Aprile 2020 hanno evidenziato una dipendenza dall'energia delle particelle incidenti.

Ulteriori studi sono comunque necessari per ottenere indizi sempre più certi sui vari aspetti che caratterizzano gli effetti Forbush. A tal proposito, la durata stimata per la missione *CSES/Limadou* - >5 anni - aiuterà nell'analisi delle future tempeste geomagnetiche. Vale la pena ricordare anche che, nei prossimi anni, il satellite *CSES-01* verrà affiancato da un network di altri satelliti gemelli - ognuno con un detector molto simile ad *HEPD-01* a bordo - permettendo uno studio di tali e di altri fenomeni solari per un periodo di tempo molto prolungato.

Ringraziamenti

Ringrazio la mia Relatrice, la Prof.ssa Roberta Sparvoli, per avermi dato fiducia all'inizio di questo lavoro e avermi permesso di lavorare a stretto contatto ogni giorno con Lei e i Suoi Colleghi: è stata una delle esperienze più stimolanti di tutto il mio percorso.

Un ringraziamento speciale va a Matteo, il mio Correlatore. Porterò sempre nel cuore la pazienza e la dedizione spese per aiutarmi in questo lavoro.

Grazie alla mia famiglia, ai miei amici e ai miei parenti. Grazie a chiunque abbia aspettato con me questo momento, a chi mi ha aiutato, supportato e sopportato in questi anni, che sia stato per un breve periodo o per un tempo lungo. C'è un pezzetto di ognuno di voi in questo traguardo.

Elenco delle figure

1.1	Spettro energetico dei raggi cosmici galattici.	6
1.2	Immagini dello sviluppo di una <i>CME</i> ottenuta dallo strumento LASCO a bordo del satellite SOHO.	8
1.3	Numero medio di macchie solari mensili (in giallo) e andamento nell'intensità del flusso dei raggi cosmici (in blu) per gli ultimi cinque cicli solari di 11 anni, fino a Maggio 2021. É evidente la dipendenza del numero di particelle rivelate dal <i>neutron monitor</i> Oulu in funzione del periodo di minima o massima attività solare. Immagine adattata da [16].	9
2.1	Struttura esterna del satellite CSES-01 vista da 3 lati e in una visione isometrica (in basso a destra).	13
2.2	Esempi di orbite seguite dal satellite CSES-01 (in rosso).	14
2.3	<i>Ensemble</i> di strumenti a bordo di CSES-01.	16
3.1	Il rivelatore <i>HEPD</i> e le sue componenti.	18
3.2	<i>Rate meter</i> in funzione di longitudine e latitudine geografiche, ottenuto da <i>HEPD</i> nell'Agosto 2018.	22
3.3	Fattore geometrico di <i>HEPD</i> per elettroni (in blu) e per protoni (in nero) ottenuto nella configurazione di <i>trigger</i> $T&P_1&P_2$	24
3.4	Deposito di segnale ADC nei <i>PMTs</i> del piano P_1 in funzione dell'energia totale rilasciata dalla particella incidente nel calorimetro. Le due popolazioni di protoni e leptoni sembrano ben separate anche se effetti di contaminazione sono possibili, ma vengono studiati ed eliminati attraverso simulazioni Monte Carlo.	26

4.1	Valore della <i>L-shell</i> in funzione della latitudine e della longitudine geografiche. Nel grafico superiore si vedono tutte le <i>L-shell</i> attraversate dall'orbita del satellite; nel grafico inferiore sono scelte solo le <i>L-shell</i> >6, che garantiscono la presenza di particelle galattiche. Il calcolo dei valori di <i>L-shell</i> è stato ottenuto utilizzando la libreria IRBEM.	30
4.2	Andamento dell'indice <i>DST</i> per l'evento di Agosto 2018. Il minimo raggiunge il valore di -174 nT.	32
4.3	Andamento dell'indice <i>DST</i> per l'evento di Maggio 2021. Il minimo tocca il valore di -61 nT. . .	33
4.4	Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Agosto 2018.	34
4.5	Decremento nelle rivelazioni di tre <i>neutron monitor</i> in Antartide durante la tempesta geomagnetica di Agosto 2018.	35
4.6	Assorbimento delle onde radio emesse da sorgenti cosmiche da parte dell'atmosfera misurato dal riometro <i>Mawson</i> in Antartide in concomitanza dell'evento solare di Agosto 2018.	36
4.7	Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Maggio 2021.	38
4.8	Decremento nelle rivelazioni di quattro <i>neutron monitor</i> in Antartide durante la tempesta geomagnetica di Maggio 2021.	39
4.9	Valori registrati dal riometro <i>Mawson</i> in Antartide in concomitanza dell'evento solare di Maggio 2021.	40
4.10	Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Aprile 2020.	41
4.11	Profilo temporale della variazione percentuale nel conteggio di protoni galattici per l'evento di Dicembre 2020.	42

Bibliografia

- [1] C. T. R. Wilson. On an Expansion Apparatus for Making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and Some Results Obtained by Its Use. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 87(595):277–292, September 1912.
- [2] Julius Elster. Messungen des electrischen Potentialgefälles auf Spitzbergen und Juist. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity (Journal of Geophysical Research)*, 7(1):9, January 1902.
- [3] J. Elster and H. Geitel. Ueber Elektrizitätszerstreuung in der Luft. *Annalen der Physik*, 307(7):425–446, January 1900.
- [4] V. F. Hess. Über eine allgemeine Beziehung zwischen Volumkontraktion und den drei üblichen Formen des Refraktionsvermögens bei Flüssigkeitsgemischen. *Annalen der Physik*, 332(13):589–625, January 1908.
- [5] R. A. Millikan. High Frequency Rays of Cosmic Origin. *Nature*, 116(2927):823–825, December 1925.
- [6] A. H. Compton and H. A. Bethe. Composition of Cosmic Rays. *Nature*, 134(3393):734–735, November 1934.
- [7] Manuel Masip. High energy neutrinos from the sun. *Astroparticle Physics*, 97:63–68, January 2018.

-
- [8] Pasquale Blasi. Origin of high energy cosmic rays: A short review. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 588(1-2):166–170, April 2008.
- [9] Xavier Rodrigues, Jonas Heinze, Andrea Palladino, Arjen van Vliet, and Walter Winter. Active Galactic Nuclei Jets as the Origin of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays and Perspectives for the Detection of Astrophysical Source Neutrinos at EeV Energies. *Phys. Rev. Lett.*, 126(19):191101, May 2021.
- [10] S. E. Forbush. On World-Wide Changes in Cosmic-Ray Intensity. *Physical Review*, 54(12):975–988, December 1938.
- [11] J. A. Simpson, W. Fonger, and L. Wilcox. A Solar Component of the Primary Cosmic Radiation. *Physical Review*, 85(2):366–368, January 1952.
- [12] John A. Lockwood. Forbush Decreases in the Cosmic Radiation. *Sp. Sci. Rev.*, 12(5):658–715, December 1971.
- [13] B. Heber, T. R. Sanderson, and M. Zhang. Corotating interaction regions. *Advances in Space Research*, 23(3):567–579, January 1999.
- [14] K. P. Arunbabu, H. M. Antia, S. R. Dugad, S. K. Gupta, Y. Hayashi, S. Kawakami, P. K. Mohanty, T. Nonaka, A. Oshima, and P. Subramanian. High-rigidity Forbush decreases: due to CMEs or shocks? *Astron. & Astrophys.*, 555:A139, July 2013.
- [15] P. Subramanian, H. M. Antia, S. R. Dugad, U. D. Goswami, S. K. Gupta, Y. Hayashi, N. Ito, S. Kawakami, H. Kojima, P. K. Mohanty, P. K. Nayak, T. Nonaka, A. Oshima, K. Sivaprasad, H. Tanaka, S. C. Tonwar, and Grapes-3 Collaboration. Forbush decreases and turbulence levels at coronal mass ejection fronts. *Astron. & Astrophys.*, 494(3):1107–1118, February 2009.

- [16] SIDC. Andamento nell'intensità del flusso dei *GCRs* in funzione del ciclo solare di 11 anni, per gli ultimi 5 cicli dal 1964 al 2021., 2021.
- [17] X. Shen and et al. The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission. *Science China Technological Sciences*, 61(5):634, may 2018.
- [18] P. Picozza, R. Battiston, G. Ambrosi, S. Bartocci, L. Basara, W. J. Burger, D. Campana, L. Carfora, M. Casolino, G. Castellini, P. Cipollone, L. Conti, A. Contin, C. De Donato, C. De Santis, F. M. Follega, C. Guandalini, M. Ionica, R. Iuppa, G. Laurenti, I. Lazzizzera, M. Lolli, C. Manea, L. Marcelli, M. Martucci, G. Masciantonio, M. Mergé, G. Osteria, L. Pacini, F. Palma, F. Palmonari, B. Panico, A. Parmentier, L. Patrizii, F. Perfetto, M. Piersanti, M. Pozzato, M. Puel, I. Rashevskaya, E. Ricci, M. Ricci, S. Ricciarini, V. Scotti, A. Sotgiu, R. Sparvoli, B. Spataro, V. Vitale, P. Zuccon, and S. Zoffoli. Scientific Goals and In-orbit Performance of the High-energy Particle Detector on Board the CSES. *Astrophys. J. Suppl.*, 243(1):16, July 2019.
- [19] Rainer Schwenn. Space weather: The solar perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 3(1):1–72, 2006.
- [20] Matteo Martucci, Roberta Sparvoli, Simona Bartocci, Roberto Battiston, William Jerome Burger, Donatella Campana, Luca Carfora, Guido Castellini, Livio Conti, Andrea Contin, Cinzia De Donato, Cristian De Santis, Francesco Maria Follega, Roberto Iuppa, Ignazio Lazzizzera, Nadir Marcelli, Giuseppe Masciantonio, Matteo Mergé, Alberto Oliva, Giuseppe Osteria, Francesco Palma, Federico Palmonari, Beatrice Panico, Alexandra Parmentier, Francesco Perfetto, Piergiorgio Picozza, Mirko Piersanti, Michele Pozzato, Ester Ricci, Marco Ricci, Sergio Bruno Ricciarini, Zouleikha Sahnoun, Valentina Scotti, Alessandro Sotgiu,

- Vincenzo Vitale, Simona Zoffoli, and Paolo Zuccon. Trapped proton fluxes estimation inside the south atlantic anomaly using the nasa ae9/ap9/spm radiation models along the china seismo-electromagnetic satellite orbit. *Applied Sciences*, 11(8), 2021.
- [21] G. Ambrosi, S. Bartocci, L. Basara, R. Battiston, W.J. Burger, D. Campana, L. Carfora, G. Castellini, P. Cipollone, L. Conti, A. Contin, C. [De Donato], F. [De Persio], C. [De Santis], F.M. Follega, C. Guandalini, M. Ionica, R. Iuppa, G. Laurenti, I. Lazzizzera, M. Lolli, C. Manea, M. Martucci, G. Masciantonio, M. Mergè, G. Osteria, L. Pacini, F. Palma, F. Palmonari, B. Panico, A. Parmentier, L. Patrizii, F. Perfetto, P. Picozza, M. Piersanti, M. Pozzato, M. Puel, I. Rashevskaya, E. Ricci, M. Ricci, S. Ricciarini, V. Scotti, A. Sotgiu, R. Sparvoli, B. Spataro, V. Vitale, S. Zoffoli, and P. Zuccon. Beam test calibrations of the hepd detector on board the china seismo-electromagnetic satellite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 974:164170, 2020.
- [22] S Bartocci, R Battiston, WJ Burger, D Campana, L Carfora, G Castellini, L Conti, A Contin, C De Donato, F De Persio, et al. Galactic cosmic-ray hydrogen spectra in the 40–250 mev range measured by the high-energy particle detector (hepd) on board the cses-01 satellite between 2018 and 2020. *The Astrophysical Journal*, 901(1):8, 2020.
- [23] R. Munini, M. Boezio, A. Bruno, E. C. Christian, G. A. de Nolfo, V. Di Felice, M. Martucci, M. Merge', I. G. Richardson, J. M. Ryan, S. Stochaj, O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, C. De San-

tis, A. M. Galper, A. V. Karelin, S. V. Koldashov, S. Koldobskiy, S. Y. Krutkov, A. N. Kvashnin, A. Leonov, V. Malakhov, L. Marcelli, A. G. Mayorov, W. Menn, V. V. Mikhailov, E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, G. Osteria, B. Panico, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, M. Ricci, S. B. Ricciarini, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, Y. I. Stozhkov, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. Vasilyev, S. A. Voronov, Y. T. Yurkin, G. Zampa, N. Zampa, and M. S. Potgieter. Evidence of energy and charge sign dependence of the recovery time for the 2006 december forbush event measured by the PAMELA experiment. *The Astrophysical Journal*, 853(1):76, jan 2018.