UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
TOR VERGATA

DIPARTIMENTO DI FISICA

Corso di Laurea Triennale in Fisica

OSSERVAZIONE QUANTITATIVA DEGLI EFFETTI DELLA TEMPESTA GEOMAGNETICA DEL 25 AGOSTO 2018 CON LO STRUMENTO HIGH-ENERGY PARTICLE DETECTOR (HEPD) A BORDO DEL SATELLITE CSES-01

Relatori:
Prof.ssa Roberta Sparvoli
Dr. Francesco Palma

Candidato:
Samuel Scacco

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

"Niente va temuto, dev'essere solamente compreso.

Ora è tempo di comprendere di più, così possiamo temere di meno."

(Marie Curie)

INDICE

Introduzione **1**

1 Tempeste geomagnetiche **6**

1.1 Introduzione al concetto di tempesta geomagnetica 6

1.2 Storia delle osservazioni 7

1.3 Interpretazione moderna 9

1.3.1 Definizione e cause 9

1.3.2 Il caso della tempesta del 1-2 Settembre 1859 11

1.3.3 Correlazione tra *SFs, CMEs, SEPs* e tempeste geomagnetiche 14

2 La missione *CSES/Limadou* **15**

2.1 Caratteristiche generali della missione 15

2.2 Obiettivi scientifici 16

2.3 Il satellite *CSES-01* 18

2.3.1 Strumenti a bordo di *CSES-01* 19

3 Lo strumento *HEPD (High-Energy Particle Detector)* **22**

3.1 Descrizione dello strumento 22

3.2 Configurazioni di trigger 25

3.3 Fattore geometrico 26

3.4 Contaminazioni e correzioni 27

4 Analisi dati **29**

4.1 Variabili e configurazioni utilizzate 29

4.2 La tempesta geomagnetica di Agosto 2018 34

4.2.1 Caratteristiche della tempesta 34

4.2.2 La risposta di *HEPD* 36

Conclusione **42**

Bibliografia **43**

Elenco delle figure **46**

Elenco delle tabelle **47**

Ringraziamenti **47**

INTRODUZIONE

Con il lancio del satellite *CSES-01 (China Seismo-Electromagnetic Satellite)*, avvenuto con successo il 2 Febbraio 2018, la missione sino-italiana *CSES/Limadou* ha avuto inizio; essa rappresenta il frutto della collaborazione tra la *China National Space Administration (CNSA)* e l'*Agenzia Spaziale Italiana (ASI)*.

Come si vedrà, uno degli obiettivi della missione è quello di monitorare l'ambiente attorno alla Terra. A questo scopo, a bordo del satellite *CSES-01* sono stati installati diversi strumenti scientifici, tra cui un rivelatore di particelle sviluppato e integrato interamente in Italia, indicato con l'acronimo *HEPD (High-Energy Particle Detector)*. Lo scopo di questo lavoro è stato quello di valutare in che modo *HEPD* risponde ad eventi di provenienza solare, come le tempeste geomagnetiche e, più specificatamente, la tempesta G3 del 25 Agosto 2018. Per far questo sono stati analizzati i dati raccolti dallo strumento mediante il pacchetto *ROOT* del CERN. Da un punto di vista operativo è stata studiata l'evoluzione dei *rate meter* di *HEPD* in funzione del tempo e del parametro di McIlwain (*L-shell*): tali *rate meter* forniscono il numero di particelle al secondo che sono state rivelate dallo strumento per una data configurazione di trigger.

Il capitolo 1 introdurrà il concetto di tempesta geomagnetica, descriverà brevemente la storia delle loro osservazioni e qual è l'interpretazione moderna

di questi fenomeni.

Il capitolo 2 sarà incentrato sulla missione *CSES/Limadou* descrivendo, in particolare, il satellite *CSES-01* (come le sue caratteristiche strutturali e la sua orbita) e gli obiettivi che ci si propone di perseguire con questa missione.

Il capitolo 3 sarà dedicato completamente al rivelatore *HEPD*: ne verranno descritte in breve le varie componenti e le rispettive funzioni.

Infine, nel capitolo 4, verrà illustrata l'analisi eseguita sui dati raccolti da *HEPD* mostrando come esso sia stato effettivamente in grado di rispondere alla tempesta geomagnetica del 25 Agosto 2018.

CAPITOLO 1

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

1.1 Introduzione al concetto di tempesta geomagnetica

Una tempesta geomagnetica è un disturbo della magnetosfera terrestre, cioè quella zona attorno alla Terra nella quale il campo magnetico generato dal pianeta stesso domina il moto delle particelle cariche che si muovono in essa. Tali tempeste rappresentano uno dei fenomeni più importanti studiati nell'ambito dello *Space Weather*. Quest'ultimo, infatti, è particolarmente importante per prevenire e prepararsi adeguatamente alle eventuali conseguenze che queste tempeste potrebbero causare all'uomo e alle sue attività nello spazio o sulla Terra. È noto, infatti, come queste possano causare danni di un certo rilievo ai satelliti e mandare fuori uso la rete delle telecomunicazioni [Ree]. Come esempio, a riprova di ciò, si segnala quello che è avvenuto il 13 Marzo 1989 nella regione canadese del Quebec, quando una tempesta geomagnetica ha messo fuori uso l'intero sistema elettrico della provincia causando disagi per molte ore.

1.2 Storia delle osservazioni

L'inizio del *Geomagnetismo* come disciplina scientifica si potrebbe far risalire al 1600, anno in cui William Gilbert pubblicò *De Magnete* avanzando per la prima volta l'idea che la Terra agisce come un grande magnete. Tuttavia, il fenomeno della tempesta geomagnetica, per come lo intendiamo oggi, venne scoperto circa 200 anni fa grazie al lavoro di Alexander Von Humbolt; egli riuscì a registrare la declinazione magnetica locale (Berlino) ogni mezz'ora partendo da mezzanotte fino al mattino, da Maggio del 1806 a Giugno del 1807. Notò che durante la notte del 21 Dicembre 1806, per 6 ore consecutive, si verificò una forte deflessione magnetica accompagnata dalla comparsa nei cieli delle *northern lights*, o aurore boreali; quando queste scomparvero anche la perturbazione magnetica terminò. Da queste osservazioni fu in grado di capire che esiste una correlazione diretta tra le perturbazioni magnetiche e i fenomeni luminosi che appaiono nei cieli polari e che entrambi i fenomeni erano dovuti a ciò che lui definì *tempesta geomagnetica*. Non si era ancora arrivati, però, a stabilire una connessione tra l'attività geomagnetica e l'attività solare. Questi due fenomeni iniziarono tuttavia ad essere studiati, sebbene indipendentemente [LT16].

Dal 1826 Heinrich Schwabe, un astronomo tedesco amatoriale, iniziò a osservare le macchie solari e nel 1843 segnalò una periodica variazione di 10 anni nella loro formazione (figura 1.1). Era stata intuita così l'esistenza del *ciclo solare*. L'attività solare, infatti, aumenta e diminuisce di intensità con regolarità; in particolare oggi è noto che essa possiede una periodicità di 11 anni. Durante un periodo di massimo l'attività solare è più intensa e un maggior numero di macchie - o *sunspots*[1] - appaiono nella fotosfera del Sole. A ciò è associato un aumento di eventi come i *Solar Flares (SFs)* o le *Coronal Mass Ejections (CMEs)* e un conseguente aumento della radiazione emessa (in maggioranza UV e X)[Hat15]. Un *SF* è un'improvvisa esplosione che avviene

[1] Regioni a temperatura inferiore che, contrastando con l'elevata luminosità circostante, appaiono scure.

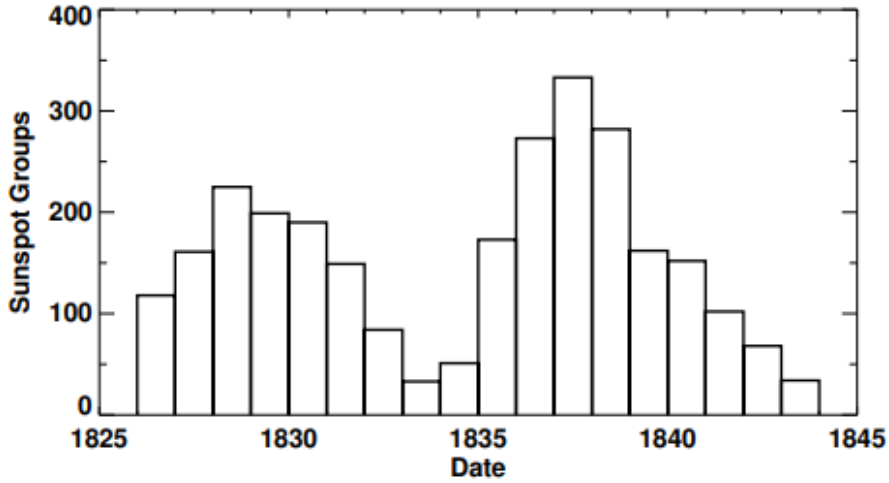

Figura 1.1: L'istogramma mostra il numero di macchie solari annuali registrato da Schwabe dal 1826 al 1843.

nei pressi delle macchie solari e che è in grado di rilasciare fino a 10^{25}J di energia mediante emissione di radiazione elettromagnetica che va dai raggi gamma alle onde radio. Invece le *CMEs* sono emissioni molto vaste di plasma dalla corona solare, il quale trasporta con sé parte del campo magnetico; nel caso in cui queste emissioni arrivino a propagarsi nello spazio interplanetare si parla di *Interplanetary Coronal Mass Ejections (ICMEs)* [Mit20]. Durante un periodo di minimo, viceversa, l'attività del Sole è molto bassa, il che si traduce in un ridotto numero, o assenza totale, di *sunspots* e, di conseguenza, di eventi solari estremi. Come è ben illustrato nella figura 1.2, il periodo dal lancio del satellite *CSES-01* (2018 in poi) coincide con una fase di minimo del ciclo solare, per cui non ci aspettiamo di trovare un numero elevato di eventi significativi [LT16].

Nel 1851, invece, Lamont riportò una periodicità di 10 anni nella variazione giornaliera della declinazione magnetica. Non fu però ancora in grado di collegare questa al ciclo delle macchie solari; fu Edward Sabine il primo a stabilire tale connessione. Proprio in quegli anni si verificò la più forte tempesta geomagnetica finora registrata, ossia quella del 1 Settembre 1859 - nota come evento Carrington. Mentre si dedicava all'osservazione delle macchie

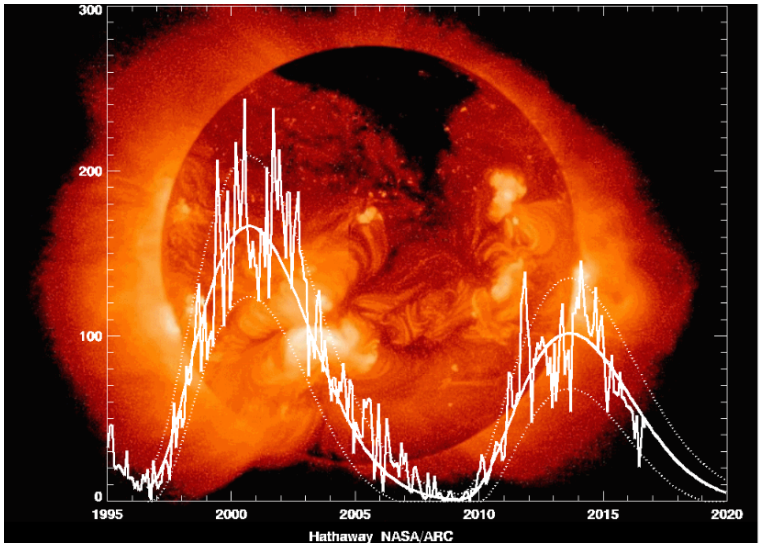

Figura 1.2: Andamento dell'intensità dell'attività solare in funzione del tempo (1995-2020). L'alternanza delle fasi di minimo e massimo è evidente.

solari, Richard Carrington notò quello che fu il primo *SF* osservato. Nei giorni a seguire fu registrata una forte tempesta geomagnetica, ma ci vollero molti anni ancora prima che la comunità scientifica capisse che esiste una correlazione tra l'attività solare e le tempeste geomagnetiche. Ciò è stato possibile solo con l'avvento dell'era spaziale che ha largamente contribuito alla comprensione della connessione tra Sole e Terra [LT16].

1.3 Interpretazione moderna

1.3.1 Definizione e cause

In base agli studi moderni, una tempesta magnetica è caratterizzata da una fase principale durante la quale la componente orizzontale del campo magnetico terrestre, alle basse latitudini, viene depressa per un tempo dell'ordine delle ore. La causa di questo è rintracciabile nell'intensificazione della *ring current*, un anello che circonda la Terra, posto sul piano equatoriale a una distanza da 3 a 8 R_E (raggi terrestri), formato da ioni intrappolati nella magnetosfera e circolanti in senso orario (vedendo da nord). L'intensità di una

tempesta può essere misurata dall'indice *Disturbance storm-time (Dst)* che monitora - in tempo reale e ogni ora - l'andamento del disturbo geomagnetico.

Sono state registrate circa 300 tempeste significative (con $Dst < -100$ nT), circa l'11% del totale [Mit20]. Per essere invece definite *Super Magnetic Storms (SMSs)* esse devono avere indice $Dst < -500$ nT. Queste ultime sono, in realtà, piuttosto rare e durante l'era spaziale se ne è verificata solo una, quella del 13-14 Marzo 1989 ($Dst = -589$ nT).

All'origine di una tempesta geomagnetica vi è il flusso di radiazioni e particelle energetiche cariche che si sprigionano dalla superficie del Sole in seguito ad un'improvvisa attività del Sole, come un *SF*, e che vanno ad aggiungersi al già presente e normale vento solare. Quando ciò avviene, i fotoni sono i primi a raggiungere la Terra: in particolare, i raggi X, i raggi ultravioletti estremi *EUV* e i raggi ultravioletti *UV* causano la ionizzazione dell'atmosfera e impiegano circa 8 minuti a raggiungere la Terra [LT16]. In seguito, con un ritardo che va dai minuti alle ore, possono arrivare le *Solar Energetic Particles (SEPs)*. Con questo termine ci si riferisce ad elettroni con range energetico che va dai KeV ai MeV, ai protoni e agli ioni pesanti con energie dai MeV ai GeV. Le *SEPs* penetrano nella magnetosfera terrestre nelle regioni polari e il ritardo rispetto ai fotoni è dovuto al fatto che, sebbene la velocità con cui esse viaggino sia prossima a quella della luce, nel cammino verso la Terra devono seguire le cosiddette *linee di campo magnetico di Parker*, compiendo, dunque, un tragitto più lungo [LT16]. Si ritiene che alla loro formazione concorrano sia i *flares* che le *CMEs* [Mit20].

Può capitare anche che intere parti della corona solare vengano espulse e si dirigano verso la Terra, andando a formare una *ICME* la quale, invece, può impiegare dalle ore fino anche a diversi giorni per arrivare sul nostro pianeta. L'impatto con quest'ultimo causa una compressione della magnetosfera terrestre dalla parte della Terra illuminata dal Sole ed una espansione dalla parte opposta (figura 1.3).

Tutto ciò porta, come già anticipato, ad un aumento dell'intensità della *ring current*. Poiché questa corrente induce un campo magnetico in

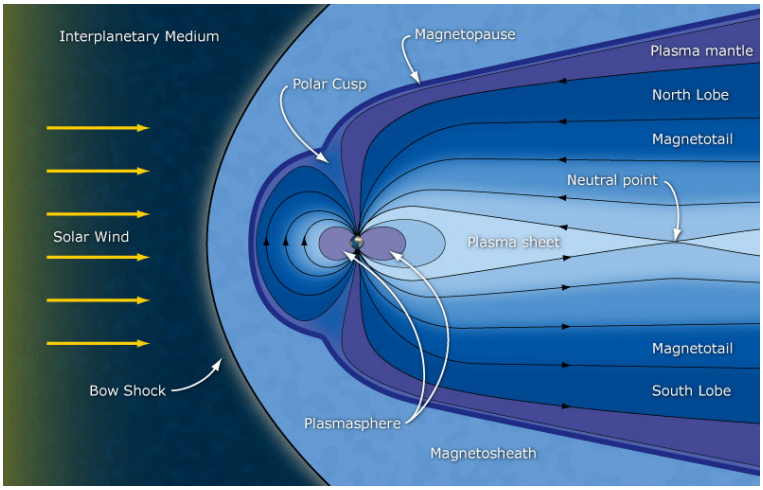

Figura 1.3: Raffigurazione in sezione della magnetosfera terrestre.

opposizione a quello terrestre, la sua intensificazione porta ad una repressione del campo magnetico terrestre [LT16].

Sebbene non ci sia una correlazione diretta tra i *flares* e le emissioni di massa coronale, in occasione delle super tempeste entrambi i fenomeni si verificano con maggiore frequenza: questo perché a livelli molto intensi la *riconnessione magnetica* sul Sole è responsabile di entrambi i fenomeni. Essa comporta un cambiamento nella topologia di un set di linee di campo magnetico per raggiungere una nuova configurazione di equilibrio, ad energia più bassa; ciò provoca un rilascio di energia magnetica che può essere convertita in energia cinetica tramite l'accelerazione delle particelle cariche [YKJ10]. In figura 1.4 è riportato un esempio schematizzato del processo.

1.3.2 Il caso della tempesta del 1-2 Settembre 1859

Il 1° Settembre 1859 sia Hodgson che Carrington segnalarono un *flare*; questo fu seguito lo stesso giorno e il giorno successivo da una tempesta geomagnetica. I due eventi furono separati da 17 h 40 min. Secondo le registrazioni effettuate durante l'evento, la massima depressione della componente orizzontale del campo magnetico terrestre è stata $\Delta H \approx -1600$

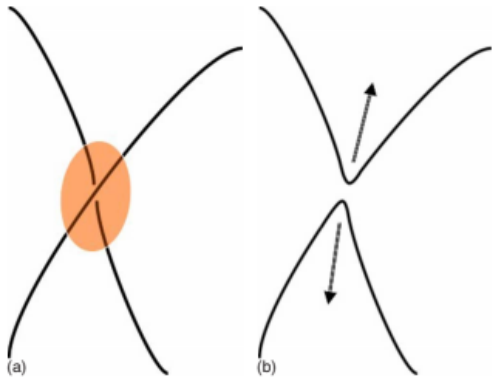

Figura 1.4: Rappresentazione schematica della riconnessione magnetica.

nT [LT16]. Durante questo fenomeno così estremo la localizzazione del limite

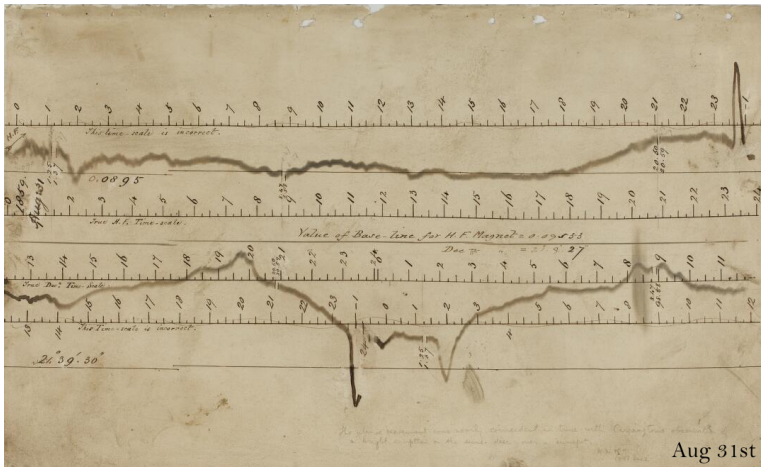

Figura 1.5: Magnetogramma originale dell'evento Carrington del 1859.

esterno della magnetosfera interna - noto come plasmapausa - durante la fase principale della tempesta, è stata stimata trovarsi a *L-shell* = 1.3[2], molto più in basso di quello che accade di solito con la maggior parte degli eventi di media o grande intensità. La normale configurazione delle *L-shell* in funzione della longitudine e della latitudine è riportata in figura 1.6. Esiste una relazione analitica che lega la distanza in raggi planetari (R_E), la *L-shell* (L) e la latitudine magnetica (λ), valida in approssimazione dipolare [McI61]:

[2] L'*L-shell*, o parametro di McIlwain, descrive un particolare set di linee di campo magnetico che attraversano l'equatore terrestre ad un determinato numero di raggi terrestri.

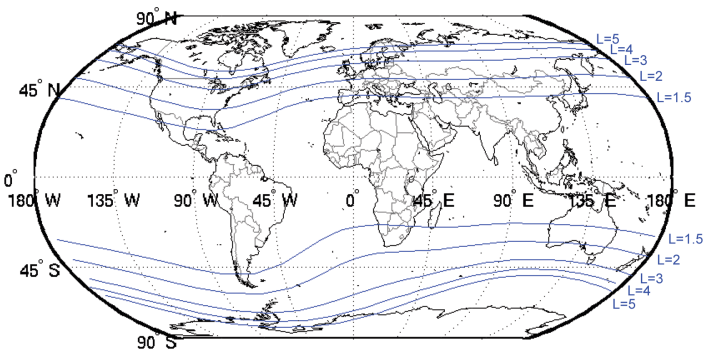

Figura 1.6: Configurazione normale delle *L-shell* in funzione delle coordinate geografiche; ad ogni linea di campo chiusa corrisponde un particolare valore della *L-shell* individuabile sulla Terra.

$$R_E = L \times cos^2\lambda \tag{1.1}$$

Da questa relazione è possibile verificare come un valore di *L-shell* pari a 1.3 stia ad indicare un valore molto basso della latitudine magnetica (circa 45°); l'abbassamento del limite esterno della magnetosfera interna, in conseguenza della tempesta del 1859, ha fatto sì che fossero visibili tracce di aurore boreali anche nell'Europa continentale.

Da studi successivi sull'evento di Carrington è stato possibile calcolare un valore della velocità della *ICME* pari a $V_{shock} = 2380\frac{km}{s}$; nonostante si tratti della tempesta più forte mai registrata, questa velocità non è tra le più alte. Ad esempio, il 4 Agosto 1972, l'*ICME* ebbe una velocità di transito di ben $2850\frac{km}{s}$; oppure, il 28 Ottobre 2003 ebbe una velocità di $2000\frac{km}{s}$, ma la tempesta magnetica ebbe solo $Dst = -358$ nT [LT16].

È evidente, così, come questi fenomeni siano legati solo in parte all'intensità di una tempesta magnetica; per produrre una *SMS*, un *ICME* deve possedere, oltre che una grande velocità, un forte campo magnetico.

1.3.3 Correlazione tra *SFs, CMEs, SEPs* e tempeste geomagnetiche

Per capire più in dettaglio quale relazione esista tra *SFs, CMEs, SEPs* e tempeste geomagnetiche (*GSs*), possiamo far riferimento alla tabella 1.1, costruita a partire da un'analisi condotta su 50 dei maggiori eventi solari degli ultimi anni. Nonostante siano legati in qualche maniera, si può notare come non esiste una relazione precisa che possa dare una visione omogenea dei fenomeni in questione [Mit20].

Phenomenon	SFs	CMEs	SEP flux	SEP fluence	GSs
SFs	-	9/19	6/8[10/13]	5/8	7/17
CMEs	9/38	-	4/7[15/27]	4/7	4/13
SEP flux	6/43	4/20	-	46/50	8/23
SEP fluence	5/43	4/21	46/50	-	8/20
GSs	7/20	4/12	8/13	8/13	-

Tabella 1.1: Relazione tra i vari eventi solari e le tempeste geomagnetiche.

Questo indica come le caratteristiche intrinseche dei fenomeni che avvengono sul Sole non sono omogenee e, quindi, le risposte della magnetosfera terrestre non sono ancora del tutto prevedibili. Avere strumenti nello spazio che riescano a rilevare gli effetti dell'arrivo di questi eventi è, pertanto, di capitale importanza in ambito *Space Weather* allo scopo di ottenere, un giorno, un processo di *forecasting* affidabile e preciso.

CAPITOLO 2

LA MISSIONE *CSES/LIMADOU*

2.1 Caratteristiche generali della missione

CSES/Limadou è una missione scientifica avviata il 2 Febbraio 2018 con il lancio del satellite *CSES-01 (China Seismo-Electromagnetic Satellite)* che si propone di monitorare i campi elettromagnetici e le perturbazioni nella iono-magnetosfera indotte da sorgenti naturali e/o artificiali e la loro possibile correlazione con l'attività geofisica. Essa rappresenta uno dei principali risultati della collaborazione tra la *CNSA (China National Space Administration)* e l'*ASI (Agenzia Spaziale Italiana)*, ed è stata sviluppata dalla *CEA (China Earthquake Administration)* e dall'*INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)* in collaborazione anche con numerose università cinesi e italiane [Car21]. In particolare la componente italiana della missione, rappresentata dalla collaborazione denominata *Limadou* (che include le Sezioni *INFN* di Bologna, Napoli, Perugia, Roma Tor Vergata e Frascati, oltre alle Università di Bologna, Trento, Roma Tor Vergata e agli Istituti *INAF-IAPS* e *INGV*), si è occupata dell'intero processo di progettazione, costruzione e integrazione di uno degli strumenti a bordo del satellite, chiamato *HEPD*, che verrà descritto in dettaglio nel prossimo capitolo.

Durante il suo moto lungo l'orbita, grazie ai numerosi e vari strumenti ad alta precisione a bordo, il satellite riesce a monitorare i campi elettromagnetici, il plasma e le particelle cariche che si trovano in orbita bassa (*LEO, Low Earth Orbit*) e ciò lo rende uno strumento ottimale anche per lo *Space Weather*. La durata prevista per questa missione è di più di 5 anni [Pic+19].

Verranno ora trattati più in dettaglio gli obiettivi principali della missione.

2.2 Obiettivi scientifici

Un primo obiettivo della missione è lo studio della fascia di Van Allen. Questa consiste in un toroide formato da elettroni e protoni intrappolati dal campo magnetico terrestre. Più dettagliatamente, in base ai più recenti studi, la fascia di Van Allen può essere separata in due zone distinte che si estendono da un'altitudine di circa 1000 km a circa 65000 km sopra la superficie terrestre: una zona più interna dominata da protoni altamente energetici (10 MeV $\leqslant E_k \leqslant$ 1 GeV) e una zona più esterna dominata invece da elettroni ultrarelativistici (1 MeV $\leqslant E_k \leqslant$ 50 MeV), come è visibile in figura 2.1 [Pic+19]; elettroni con energie più basse possono invece popolare entrambe le fasce [Bak+14]. La missione *CSES* ha un'importanza cruciale per quanto riguarda la comprensione dei meccanismi di accelerazione e la distribuzione globale delle particelle in queste fasce; essa è in grado, infatti, di fornire ulteriori informazioni riguardo questa zona, andando a completare le rivelazioni fatte da missioni precedenti, tra cui *PAMELA*: questo è possibile grazie al fatto che lo strumento *HEPD* permette di rivelare particelle con energie intermedie tra quelle rivelate dagli strumenti a bordo delle *Van Allen Probes* e *PAMELA* [Pic+19]. A maggior ragione, essendo le *Van Allen Probes* non più operative, *HEPD* è uno dei pochissimi strumenti che è in grado di monitorare l'ambiente spaziale alle energie del MeV con precisione e stabilità nel tempo.

Un secondo obiettivo che si tenta di raggiungere è una maggiore comprensione dei meccanismi di accoppiamento della litosfera con l'atmosfera,

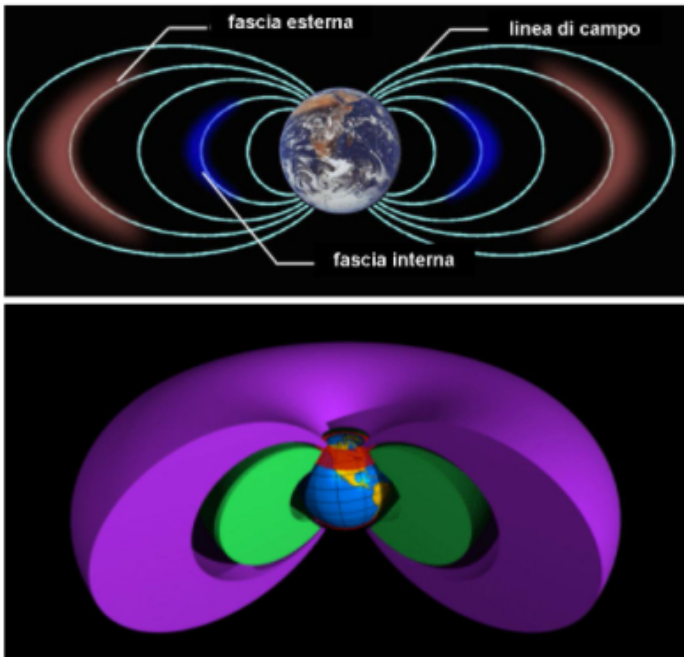

Figura 2.1: Raffigurazioni delle fasce di Van Allen.

neutra o ionizzata (ionosfera), e la magnetosfera, i quali rappresentano una questione molto vasta e complessa, non ancora pienamente compresa, e che coinvolge molti fenomeni fisici ed interazioni. Lo studio di questi processi è di fondamentale importanza per la comprensione del sistema Terra, il monitoraggio dell'ambiente elettromagnetico vicino ad essa e per capire quale relazione esiste tra quest'ultimo e i disastri naturali, come i terremoti [Car21]. Tuttavia molti dei fenomeni studiati sono causati da sorgenti naturali di origine non sismica o addirittura da sorgenti artificiali; è necessario, pertanto, riuscire a distinguere quali siano quelli originati in occasione di terremoti, o in prossimità di essi, e quali no.

Il terzo obiettivo della missione è raccogliere informazioni riguardo alle diverse classi di eventi solari, grazie al lungo periodo di raccolta dati. Con la rivelazione delle *SEPs*, introdotte nel capitolo precedente, si potrebbero approfondire meglio i meccanismi di produzione e accelerazione delle particelle sul Sole; in particolare, se questi avvengano a basse latitudini, e quindi tramite

la riconnessione magnetica, o ad altitudini maggiori nella zona della corona. Tuttavia, poiché ci troviamo in una fase di estrema quiete, finora non sono stati registrati eventi significativi.

Come già anticipato, il satellite è anche uno strumento ottimale per lo *Space Weather*. Il termine *Space Weather* si riferisce alle condizioni presenti sul Sole, nel vento solare, nella magnetosfera terrestre, nella ionosfera e nella termosfera che possono influenzare le strumentazioni scientifiche e in generale la vita dell'uomo [Sch06]. Per esempio, durante forti tempeste geomagnetiche, la variazione del campo magnetico, in intensità e direzione, può influenzare la navigazione basata sulle mappe magnetiche o sul *GPS (Global Positioning System)*. Inoltre, le *SEPs* possono essere dannose sia per i satelliti che per gli astronauti. Nella società moderna diventa perciò sempre più importante riuscire a prevedere l'andamento di questi fenomeni; la missione *CSES* assume un grande valore in questo senso grazie alla capacità del satellite di effettuare misurazioni simultanee del plasma e dei campi elettrico e magnetico [Car21].

2.3 Il satellite *CSES-01*

CSES-01 è un satellite con stabilizzazione triassiale basato sulla piattaforma cinese CAST2000 con una massa di circa 700 kg (figura 2.2), ed è posto su un'orbita eliosincrona[1] ad una altitudine di 507 km e un'inclinazione di 97°. La dimensione del corpo principale (escludendo il pannello solare) è di 145 cm × 144 cm × 143 cm [Amb+20]. Il pannello solare è posto con un'inclinazione di 12° rispetto all'asse perpendicolare alla direzione del moto e può ruotare attorno ad esso. L'orbita ha un periodo di 97 min.

I dati vengono tramessi a terra nella banda X a una velocità di 120 Mbps [Car21].

[1] Un'orbita eliosincrona è un'orbita geocentrica tale che un oggetto posto su di essa sorvoli un dato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora locale.

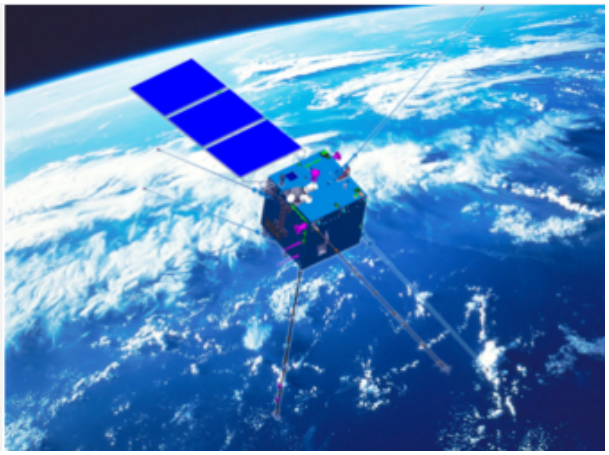

Figura 2.2: Il satellite *CSES-01*.

Una caratteristica del satellite è quella di avere due differenti zone di lavoro. Ciò permette, durante il funzionamento degli strumenti, che questi non vengano disturbati dalla rotazione del pannello solare o dalle manovre orbitali che può essere necessario compiere. La raccolta dei dati e la trasmissione avvengono infatti solo alle latitudini comprese tra $-65°$ e $+65°$. Al di fuori di questa regione gli strumenti vengono posti in modalità *standby* [Amb+20]. In figura 2.3 (in alto) è rappresentata una singola semi-orbita del satellite *CSES-01* in funzione delle coordinate geografiche. All'interno della regione operativa degli strumenti alcuni di essi possono raccogliere i dati in due differenti modalità: la *burst mode*, che è attivata quando il satellite passa sopra la Cina o in altre regioni a elevato rischio sismico, e la *survey mode*, attivata in tutte le altre regioni. In 24 h, il tempo in cui uno strumento (che ha le due modalità di funzionamento possibili) lavora in *burst mode* è di 2 h, mentre in *survey mode* è di 15.6 h [Amb+20].

2.3.1 Strumenti a bordo di *CSES-01*

A bordo di *CSES-01* sono installati otto strumenti, la cui disposizione è mostrata in figura 2.4, e che sono: un *Search-Coil Magnetometer (SCM)*

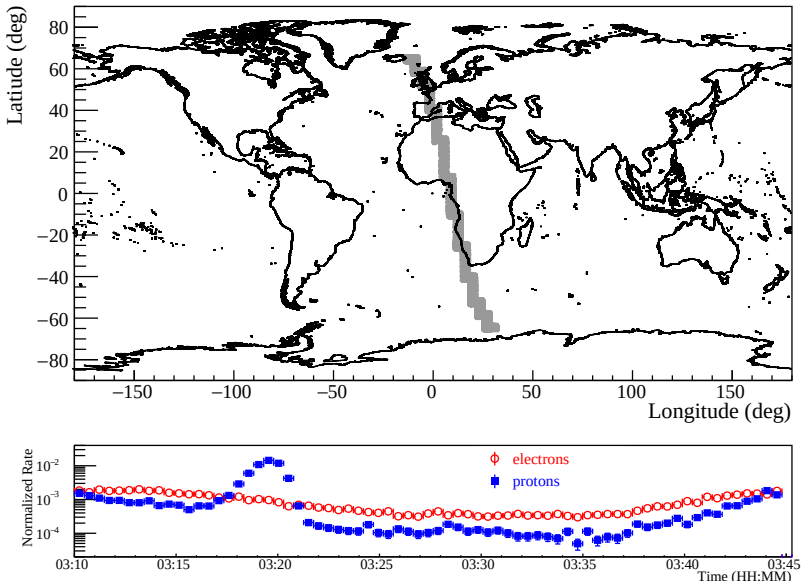

Figura 2.3: In alto: rappresentazione di una singola semi-orbita del satellite *CSES-01* in funzione delle coordinate geografiche. In basso: profili temporali per protoni (quadrati blu) ed elettroni (cerchi rossi) lungo tale semi-orbita.

e un *High Precision Magnetometer (HPM)* per misurare rispettivamente le componenti e l'intensità totale del campo magnetico, un *Electric Field Detector (EFD)* per misurare il campo elettrico, un *Plasma Analyzer Package (PAP)* e una *Lagmuir Probe (LP)* per misurare i parametri del plasma nella ionosfera, un *Global Navigation Satellite System (GNSS)*, un *High-Energy Particle Detector (HEPD)* e un *High-Energy Particle Package (HEPP)* per misurare il flusso e lo spettro delle particelle [Amb+20].

HEPD sarà trattato in dettaglio nel prossimo capitolo [Car21].

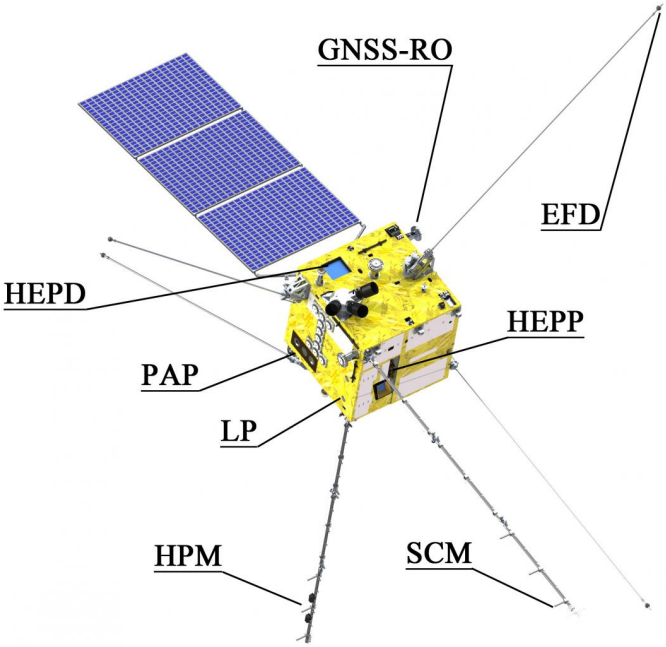

Figura 2.4: Raffigurazione della disposizione degli strumenti scientifici a bordo del satellite *CSES-01*.

CAPITOLO 3

LO STRUMENTO *HEPD* *(HIGH-ENERGY PARTICLE DETECTOR)*

3.1 Descrizione dello strumento

HEPD è un rivelatore di particelle installato sul satellite *CSES-01* allo scopo di identificare i diversi tipi di particelle incidenti nonché la loro direzione e il loro spettro energetico. È stato sviluppato, in particolare, con una buona risoluzione energetica per elettroni nel range di energia 3-100 MeV, protoni nel range 30-250 MeV e nuclei leggeri. Lo strumento ha una massa di 45 kg e assorbe una potenza media (dipende dallo stato in cui si trova) di 30 W. Può lavorare a temperature che vanno da $-10°$C a $45°$C e tutti i sotto-componenti più sensibili sono protetti da un contenitore di alluminio che misura approssimativamente 20 cm $\times$ 20 cm $\times$ 40 cm.

HEPD è costituito dai seguenti sotto-rivelatori (figura 3.1):

- due piani di microstrip al silicio a doppia lettura da 213.2 mm $\times$ 214.8 mm $\times$ 0.3 mm che costituiscono il sistema di tracciamento per risalire

alla direzione della particella incidente;

- un sistema di trigger costituito da un piano di scintillatore plastico (20 cm × 18 cm × 0.5 cm) diviso in sei *paddles*;
- un calorimetro per la determinazione dell'energia della particella diviso a sua volta in due sezioni: una superiore, detta *TOWER*, composta da 16 piani di scintillatori plastici (ciascuno di dimensioni 15 cm × 15 cm × 1 cm) e una inferiore formata da una matrice 3 × 3 di cristalli scintillatori inorganici di Ortosilicato di Lutezio e Ittrio (*LYSO*), di dimensione totale 15 cm × 15 cm × 4 cm;
- un sistema di *VETO* che circonda l'intero strumento e costituito da 5 piani di scintillatori plastici, ciascuno di spessore 0.5 cm (4 laterali e 1 posto sotto la matrice di *LYSO*).

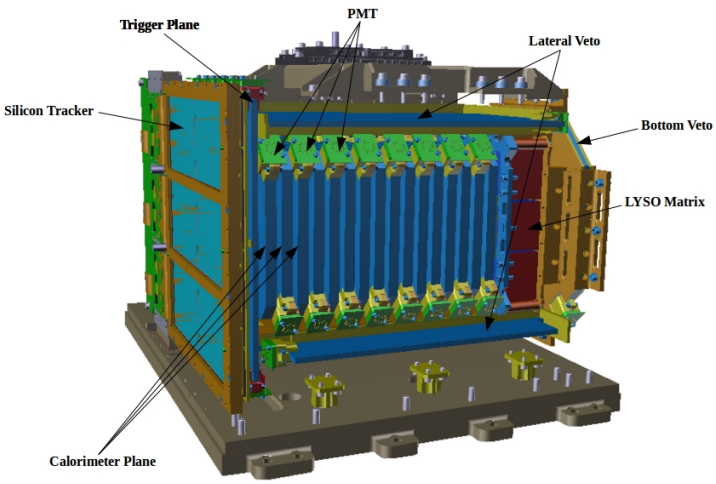

Figura 3.1: Modello *CAD (Computer-Aided Design)* del rivelatore *HEPD* con i vari sotto-rivelatori.

Il piano di trigger è collocato subito sotto i piani in silicio del tracciatore ed è caratterizzato dalla capacità di generare un segnale che dà inizio al

processo di registrazione di un evento all'interno dello strumento e rigettare possibili eventi multipli. Ulteriori dettagli al riguardo verranno specificati nel paragrafo 3.2.

Il sistema *VETO* ha la funzione di escludere tutti gli eventi che non sono interamente contenuti nel calorimetro e le particelle secondarie generate all'interno di quest'ultimo.

Per gli scintillatori plastici, che compongono il trigger, il calorimetro e il sistema *VETO*, è stato scelto il modello EJ-200 che consiste in un polimero luminescente nel momento in cui viene attraversato da particelle ionizzanti con un tempo di risposta rapido. Ciascuna *paddle* del piano di trigger e ciascuno dei 16 piani della torre di calorimetro sono letti da due fotomoltiplicatori (*PMTs, Photo Multiplier Tubes*). Ciascuno dei 9 cristalli di *LYSO* è letto, invece, da un singolo *PMT*.

Il modello scelto per i *PMTs* è il R9880-210 il quale possiede un'efficienza quantica (rapporto tra il numero di elettroni di output e fotoni incidenti) che ha un picco a 425 nm, corrispondente al picco dello spettro di emissione degli scintillatori EJ-200 utilizzati. Inoltre, si tratta di un modello piccolo, leggero e resistente a temperature estreme.

I cristalli di *LYSO* utilizzati per la parte inferiore del calorimetro sono costituiti da un materiale inorganico ad alta densità ($7.3\frac{g}{cm^3}$), il che consente la rivelazione di eventi in un ampio range energetico [Car21].

Due principali sotto-sistemi completano lo strumento:

- un sotto-sistema elettronico composto da quattro schede per la gestione del trigger, l'acquisizione dei dati, *OBDH (On-Board Data Handling)* e distribuzione di potenza a basso voltaggio;

- un sotto-sistema di alimentazione che fornisce bassi voltaggi all'elettronica del rivelatore (unità principale di alimentazione) e alti voltaggi ai *PMTs* (unità secondaria di alimentazione).

HEPD prevede tre modalità di funzionamento: la modalità *SAFE*, la modalità *STAND-BY* e la modalità *NOMINAL*. La modalità *SAFE* è stata

utilizzata alla prima accensione solo per poche ore e allo scopo di calibrare lo strumento. La modalità *STAND-BY* è utilizzata invece alle latitudini polari ($> 65°$ e $< -65°$) ed è necessaria per consentire manovre satellitari in queste regioni e per proteggere la strumentazione dall'alto *rate* di particelle che investono il rivelatore. Infine, in modalità *NOMINAL* tutte le schede sono accese e lo strumento può effettivamente prendere dati.

3.2 Configurazioni di trigger

Il sistema di trigger permette di avviare l'acquisizione dei dati soltanto quando vengono soddisfatte certe condizioni, in modo da selezionare gli eventi di maggior interesse.

Le diverse configurazioni di trigger che è possibile impostare sono le seguenti (dalla più superficiale alla più profonda):

1. T
2. T & P_1
3. T & (P_1 || P_2)
4. (T_3 || T_4) & (P_1 || P_2)
5. T & P_1 & P_2
6. T & P_1 & P_2 & P_3
7. T & (P_1 || P_2) & (P_{15} || P_{16})
8. T & (P_1 || P_2) & L

T significa l'*OR* dei 12 *PMTs* che leggono le 6 *paddles* del piano di trigger, mentre T_3 e T_4 significano rispettivamente l'OR dei 2 *PMTs* della terza e quarta *paddle*, cioè le sezioni centrali del piano di trigger. Per quanto riguarda la torre di scintillatori plastici, P_1 indica l'*OR* dei 2 *PMTs* del primo piano della torre e analogamente per gli altri *layers*. Infine, L rappresenta l'*OR* dei 9 *PMTs* che leggono i cristalli di *LYSO* [Car21].

In seguito ai diversi test eseguiti su *HEPD* nei mesi successivi al lancio di *CSES-01*, nel Luglio 2018, fu impostata la configurazione di trigger T & P_1 & P_2. In tale condizione, per avere un trigger valido, una particella deve colpire il piano di trigger T e almeno i primi due piani della parte superiore del calorimetro, P_1 e P_2. Una *paddle* del trigger ed un piano della *TOWER* vengono considerati colpiti dalla particella se i *PMTs* generano un segnale, proporzionale all'energia depositata, oltre una certa soglia; quest'ultima non è fissata ma può essere variata secondo le esigenze. Vengono quindi salvate e scaricate le informazioni relative solamente alle particelle che soddisfano la condizione di trigger che è stata impostata. Tuttavia, *HEPD* è in grado di contare le particelle che soddisfano simultaneamente le diverse condizioni di trigger; tutte le configurazioni sono quindi presenti contemporaneamente e alcune di esse saranno oggetto dell'analisi del prossimo capitolo.

3.3 Fattore geometrico

Il fattore geometrico dello strumento, e in generale dei rivelatori di particelle, ha dimensioni fisiche di una superficie moltiplicata per un angolo solido (cm^2 sr) e può essere definito come la capacità del rivelatore di accettare particelle provenienti da diversi angoli e direzioni. Dipende solo dalla geometria dello strumento, dal tipo e dall'energia delle particelle.

Per *HEPD* il fattore geometrico è stato stimato mediante una simulazione Monte Carlo di un flusso isotropo sia di protoni che di elettroni, in un range energetico tra 1 MeV e 10 GeV per i protoni e 1 MeV e 120 MeV per gli elettroni. In figura 3.2 sono mostrati i fattori geometrici per elettroni (sinistra) e protoni (destra) interamente contenuti nel *detector* e per tre differenti configurazioni di trigger. È evidente la forte dipendenza del valore dell'accettanza dall'energia della particella incidente. Ad esempio, considerando i protoni, si ha un picco di accettanza intorno a 90 MeV e una ripida discesa per energie superiori, a causa delle interazioni adroniche, e inferiori, a causa della ristretta apertura geometrica [Bar+20].

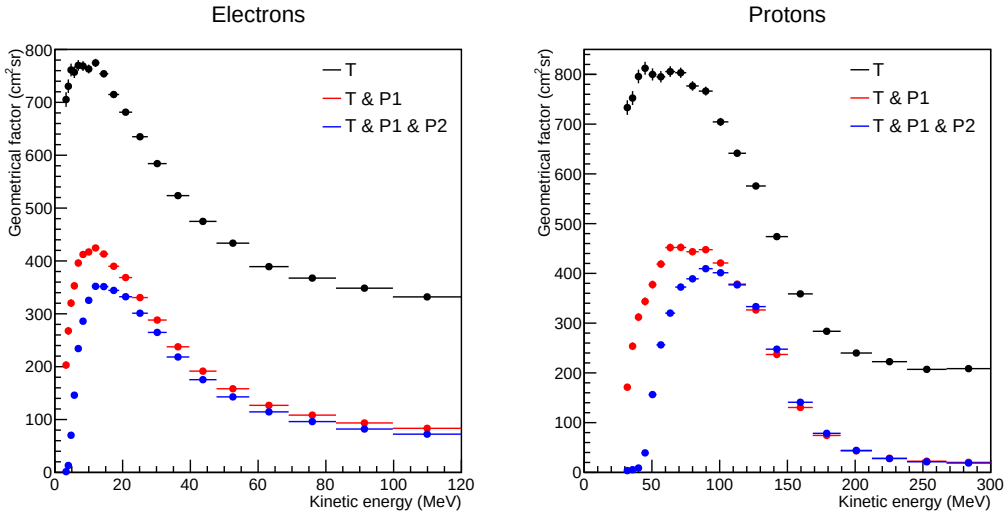

Figura 3.2: Il fattore geometrico di *HEPD*, per elettroni (sinistra) e per protoni (destra) entrambi interamente contenuti nel *detector*, in funzione dell'energia e per tre configurazioni di trigger.

3.4 Contaminazioni e correzioni

La maggiore fonte di contaminazione per i campioni di protoni a bassa energia deriva dagli elettroni con $E \geqslant 40$ MeV. Va notato, però, che l'energia che questi ultimi rilasciano nel primo piano di scintillatore - se incidenti con piccolo angolo - è bassa e quindi possono essere facilmente riconosciuti ed eliminati grazie ad una tecnica di selezione legata al rilascio del segnale nel primo piano della *TOWER* e dell'energia rilasciata in tutto il calorimetro (*TOWER+LYSO*). La distribuzione di elettroni e protoni in funzione dell'energia totale rilasciata e la relativa selezione di cui sopra è mostrata in figura 3.3. Tuttavia, quando essi arrivano con una traiettoria inclinata, l'energia che rilasciano può essere elevata e questo può contaminare il campione di protoni. Allo stesso modo protoni di alta energia possono rilasciare un'energia molto bassa nei piani di scintillatore (e quindi un segnale molto piccolo) e possono essere confusi per elettroni, contaminando quindi il campione di questi ultimi. Stime di contaminazione vengono svolte con simulazioni dedicate.

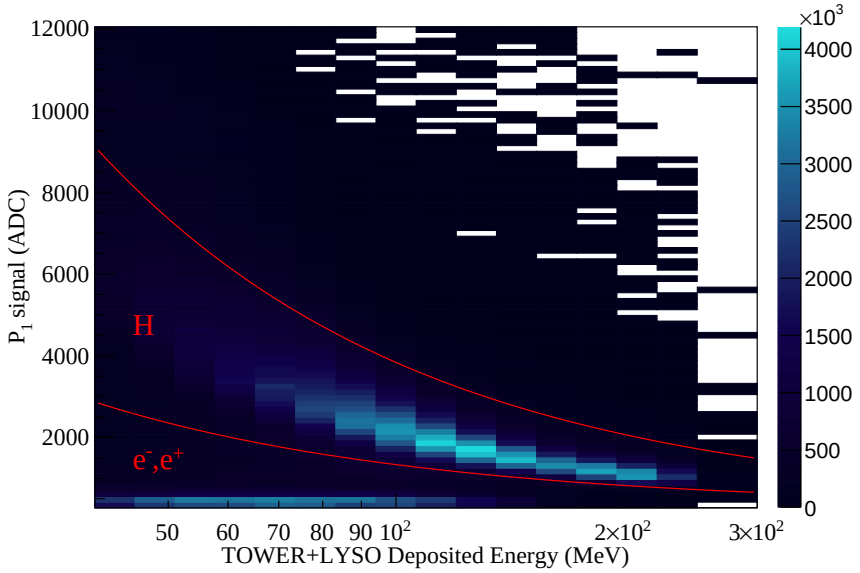

Figura 3.3: Il segnale generato dalle particelle sul piano P_1 in funzione dell'energia totale rilasciata nel calorimetro; in rosso le curve che discriminano protoni ed elettroni.

Inoltre è neccesario tenere conto dell'energia persa dalla particella nel piano di trigger e nei materiali passivi che compongono lo strumento, ma che non fanno parte del calorimetro; per tener conto di ciò viene applicata una procedura di de-convoluzione spettrale [Bar+20].

Possibili fonti di incertezze sistematiche risiedono sia nella procedura di de-convoluzione che nel confronto tra i dati in volo e quelli simulati mediante il metodo Monte Carlo.

Per l'analisi dati vera e propria - che verrà descritta a breve - della tempesta geomagnetica del 25 Agosto 2018 non sono state richieste solo particelle contenute nel detector (non essendo necessaria una valutazione precisa delle energie in gioco) e pertanto i fattori geometrici cumulativi (elettroni + protoni) sono diversi e verranno mostrati nel capitolo successivo. Inoltre non è stata fatta alcuna discriminazione tra protoni ed elettroni (le popolazioni maggiormente affette dalla tempesta geomagnetica in questione sono elettroni) e non sono state richieste stime di incertezze sistematiche.

CAPITOLO 4

ANALISI DATI

L'obiettivo di questa tesi è mostrare la risposta del rivelatore *HEPD* all'arrivo della tempesta geomagnetica del 25 Agosto 2018 tramite l'analisi quantitativa dell'andamento del *rate* di particelle in funzione del tempo e dell'*L-shell*.

4.1 Variabili e configurazioni utilizzate

Le variabili utilizzate per l'analisi e per la produzione dei grafici che verranno mostrati nei prossimi paragrafi sono:

- *rate meter*;
- *L-shell* ;
- tempo.

I *rate meters* forniscono i tassi di conteggio per le diverse configurazioni di trigger di *HEPD*, permettendo di dare una stima dei *rates* di eventi relativi alle diverse popolazioni di particelle che attraversano lo strumento. Più specificatamente, il *rate meter* fornisce il numero di particelle al secondo che genera un segnale per una data configurazione di trigger. Prima di passare

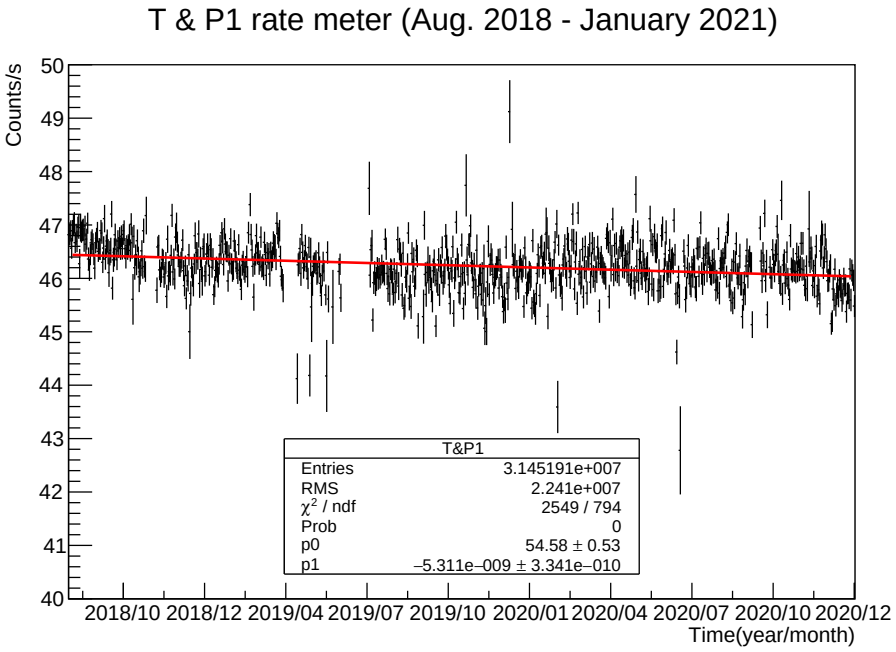

Figura 4.1: Andamento nel tempo della variabile *rate meter* per la configurazione di trigger T & P_1 nel periodo Agosto 2018-Gennaio 2021. La linea rossa rappresenta un fit polinomiale di primo ordine.

all'analisi della tempesta è stato effettuato un ampio controllo sulla stabilità di tali *rates* a basse latitudini (tra $-5°$ e $+5°$), ossia in una zona geografica dove la variabilità legata a fenomeni fisici è, in teoria, esclusa. In figura 4.1 è mostrato come esempio un grafico dell'andamento del *rate meter* relativo alla configurazione di trigger T & P_1 tra Agosto 2018 e Gennaio 2021. Facendo un fit. polinomiale di primo ordine (retta rossa) è stato possibile calcolare la variazione percentuale del conteggio durante questo arco temporale, la quale è risultata essere soltanto di -0.87%.

Come già accennato nel precedente capitolo, lo strumento riesce a raccogliere e memorizzare i conteggi degli eventi in tutte le otto configurazioni di trigger. Plot analoghi a quelli di figura 4.1 sono stati prodotti per tutte le configurazioni di trigger, allo scopo di individuare eventuali malfunzionamenti dello strumento.

Le configurazioni sulle quali ci si è maggiormente concentrati per l'analisi della tempesta sono state le seguenti (le più superficiali tra tutte quelle

possibili):

- T;
- T & P_1;
- T & P_1 & P_2.

La prima, T, possiede la soglia energetica più bassa (>3 MeV per gli elettroni): una particella deve generare un segnale oltre una certa soglia stabilita solo nel piano di trigger. Richiedendo una maggiore penetrazione della particella nel rivelatore verranno rivelate solo quelle con energia maggiore (elettroni di energia >4.5 MeV e >8 MeV rispettivamente per T & P_1 e per T & P_1 & P_2); inoltre, come si può facilmente capire osservando la geometria del rivelatore (figura 3.1), richiedendo una maggiore penetrazione delle particelle, l'accettanza geometrica dello strumento si riduce. Questo è mostrato nella figura 4.2.

Nell'analisi di controllo dei *rates*, mostrata in figura 4.1, e anche nello studio della tempesta di Agosto 2018, è stata eliminata dai dati la regione ad altissimo *rate*, nota come Anomalia del Sud Atlantico (*SAA, South Atlantic Anomaly*). In questa zona l'anisotropia di arrivo delle particelle è molto alta e ciò comporterebbe una non-uniformità dei profili temporali dei vari *rates*, oltre a portare problemi di saturazione per le configurazioni di trigger più superficiali. L'esclusione di questa regione è fatta imponendo un limite inferiore al valore del campo magnetico, molto basso nella regione che definisce la *SAA*. Per la stima del campo magnetico terrestre è stato implementato il modello *IGRF-12 (International Geomagnetic Reference Field)* [Thé+15]. Un esempio di mappa dei valori del campo in funzione delle coordinate geografiche è riportato in figura 4.3 per l'anno 2018. Il modello *IGRF-12* prevede lo sviluppo in armoniche sferiche del potenziale magnetico $V(r, \phi, \theta)$ come segue:

$$V(r, \phi, \theta) = R \sum_{n=1}^{k} (\frac{R}{r})^{n+1} \sum_{m=0}^{n} [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m sin(m\phi)] P_n^m(\cos\theta), \quad (4.1)$$

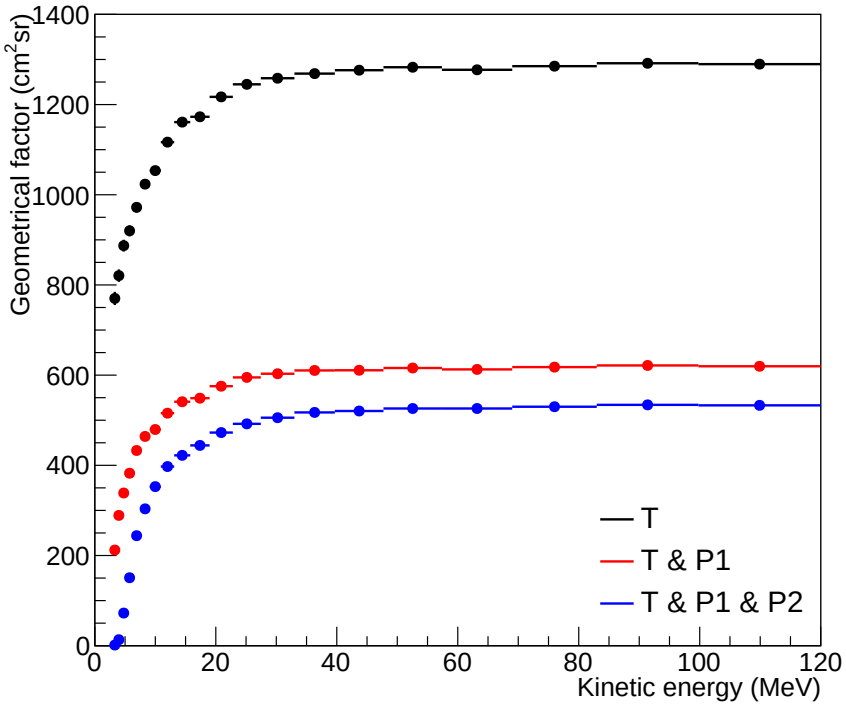

Figura 4.2: Accettanza geometrica totale per elettroni+protoni - ottenuta tramite simulazioni Monte Carlo - in funzione dell'energia cinetica della particella incidente e della configurazione di trigger.

dove r, θ, ϕ sono le coordinate sferiche del punto di osservazione, R è il raggio equatoriale della Terra (6371.2 km), g_n^m e h_n^m sono i coefficienti di Gauss (aggiornati ogni 5 anni a causa della variazione secolare del campo magnetico terrestre) e P_n^m è la funzione associata di Legendre di grado n e ordine m.

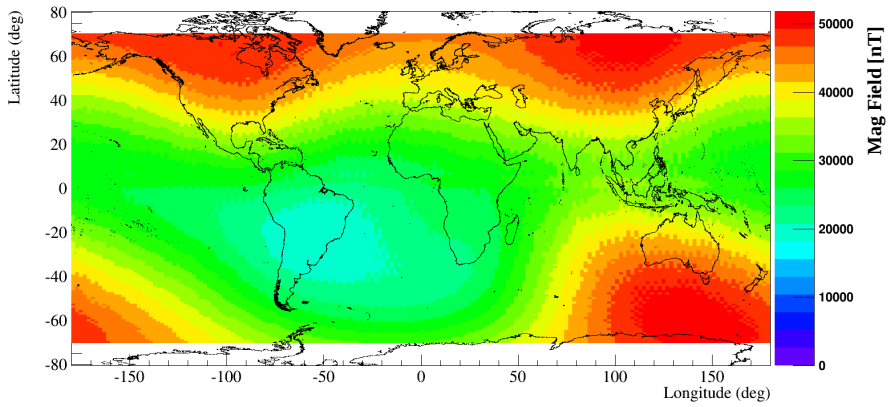

Figura 4.3: Intensità totale del campo magnetico terrestre (in nT) nel 2018 in funzione delle coordinate geografiche.

Dalla figura 4.3 si vede come la regione a più basso valore di campo magnetico (B<23000 nT) sia circoscritta in una zona sopra l'Oceano Atlantico: questa regione è appunto la *SAA*. Il valore B<23000 nT è appunto la selezione scelta per l'esclusione della *SAA* dai dati sperimentali.

Il calcolo delle *L-shell*, in approssimazione dipolare, è invece stato portato avanti utilizzando le librerie *IRBEM*.

I dati raccolti da *HEPD* vengono convertiti da un formato *RAW* al formato *ROOT*, un framework di analisi scritto in *C++* e sviluppato al CERN, di ampio utilizzo nella fisica moderna. I dati in questione, dopo essere stati scaricati a terra, sono ri-organizzati in *bunch* da due minuti e raccolti in una farm di calcolo dell'*INFN*, il CNAF, che si trova a Bologna. Ognuno di questi file con estensione *.root* contiene al suo interno sia le informazioni sulle particelle che hanno soddisfatto il trigger che i dati relativi alle telemetrie del

satellite (metadata), il tutto strutturato con una gerarchia computazionale di *trees*, *branches* e *leaves*.

4.2 La tempesta geomagnetica di Agosto 2018

Nel periodo di presa dati del satellite *CSES-01* (2018-2021) pochissime tempeste geomagnetiche hanno avuto luogo e una sola è risultata essere abbastanza energetica da essere rivelata da *HEPD*, quella del 25 Agosto 2018, la cui descrizione e analisi verranno riportate dettagliatamente nel prossimo paragrafo.

4.2.1 Caratteristiche della tempesta

Il 20 Agosto 2018 si è verificata un'eruzione solare che ha scatenato una *ICME* la quale ha raggiunto la Terra qualche giorno dopo, a partire dal 25 Agosto, provocando la terza tempesta geomagnetica più significativa del 24-esimo ciclo solare.

La figura 4.4 mostra i parametri del vento solare registrati dal satellite *ACE* dal 23 al 31 Agosto 2018.

La *Magnetic Cloud (CM)* colpisce la magnetosfera terrestre tra le $\sim$ 12:15 UT del 25 Agosto e le $\sim$ 10:00 UT del 26 Agosto.

Dalla figura 4.4 è possibile dedurre le caratteristiche della *ICME* osservando il comportamento dell'*IMF (Interplanetary Magnetic Field)* (a), della temperatura (c) e della pressione dinamica (d) del vento solare. Alle $\sim$ 14:30 UT del 25 Agosto la temperatura scende da $\sim 9 \times 10^4$ K a $\sim 1.5 \times 10^4$ K, mentre l'intensità del campo magnetico aumenta di 18 nT approssimativamente per 12 h e allo stesso tempo inverte la propria orientazione (b) per circa 22 h. Infine la pressione aumenta da $\sim$ 4 nPa a $\sim$ 10 nPa. Il giorno successivo si forma una *Co-rotating Interaction Region (CIR)*. Quest'ultima è una struttura che si forma quando un flusso veloce di vento solare incontra uno più lento e sono caratterizzate da una maggiore densità e temperatura. Infatti, è stato registrato un incremento di temperatura da

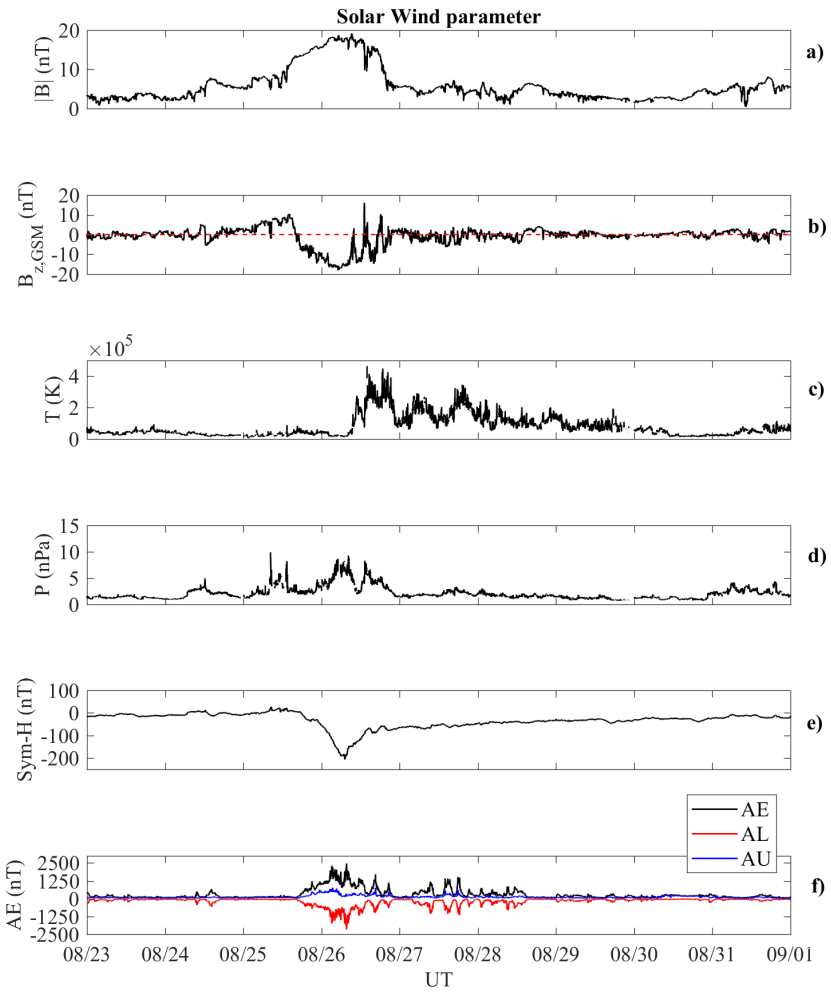

Figura 4.4: Parametri del vento solare raccolti dalla sonda *ACE*: a) intensità dell'*IMF*; b) componente B_z dell'*IMF*; c) temperatura dei protoni; d) pressione dinamica; e) indice *Sym-H*; f) indici aurorali *AE* (nero), *AL* (rosso), *AU* (blu). I parametri sono espressi nel sistema di coordinate *Geocentric Solar Magnetospheric*.

$\sim 4 \times 10^4$ K a $\sim 30 \times 10^4$ K alle $\sim$ 12:20 UT e di pressione da $\sim$ 2 nPa a $\sim$ 8 nPa.

Per valutare gli effetti della *ICME* sulla magnetosfera terrestre sono stati utilizzati l'indice *Sym-H* e l'indice *AE*, il quale fornisce una misura indiretta dell'energia depositata nella ionosfera polare. Il 26 Agosto questo indice raggiunge il suo minimo con un valore di $\sim$ -200 nT alle 07:57 UT. L'andamento del *Sym-H* appare ben correlato a quello della componente B_z dell'*IMF* che mostra un periodo di circa 10 h di valore stabilmente negativo. Quest'ultima circostanza ha permesso al plasma del vento solare di penetrare all'interno della magnetosfera terrestre a causa della riconnessione magnetica nella zona della magnetopausa tra l'*IMF* e il campo magnetico della Terra.

4.2.2 La risposta di *HEPD*

La figura 4.5 mostra un confronto tra la mappa del *rate* di conteggio di *HEPD* in funzione di longitudine e latitudine, prima della tempesta, dal 20 al 23 Agosto (immagine superiore) e dopo l'impatto della tempesta, dal 25 al 27 Agosto (immagine inferiore). Nella figura in basso è evidente un incremento nel *rate* di conteggio sia alle alte latitudini nord che in quelle sud (in quest'ultime in misura maggiore) come conseguenza dell'arrivo della tempesta. La differenza tra nord e sud è legata al *tilt* del campo magnetico rispetto all'asse terrestre.

Entrambe le mappe si riferiscono alla configurazione di trigger T, la quale permette di rivelare le particelle con energia più bassa (elettroni >3 MeV) rispetto a tutte le altre configurazioni, richiedendo infatti un segnale sopra-soglia solo nel piano di trigger. La zona chiara corrisponde alla *SAA* la quale è stata esclusa dall'analisi, come spiegato nel paragrafo 4.1.

Vale la pena notare che l'assenza di *SEPs* in questa tempesta geomagnetica ha fatto sì che non ci fosse alcuna iniezione diretta di protoni solari di alta energia nel campione misurato da *HEPD*; pertanto il *rate* misurato da *HEPD* si riferisce, per la maggior parte, ad elettroni.

L'aumento del *rate* è visibile anche nella figura 4.6 in funzione del parametro *L-shell*. Le prime tre immagini (dall'alto) mostrano i *rate meters*

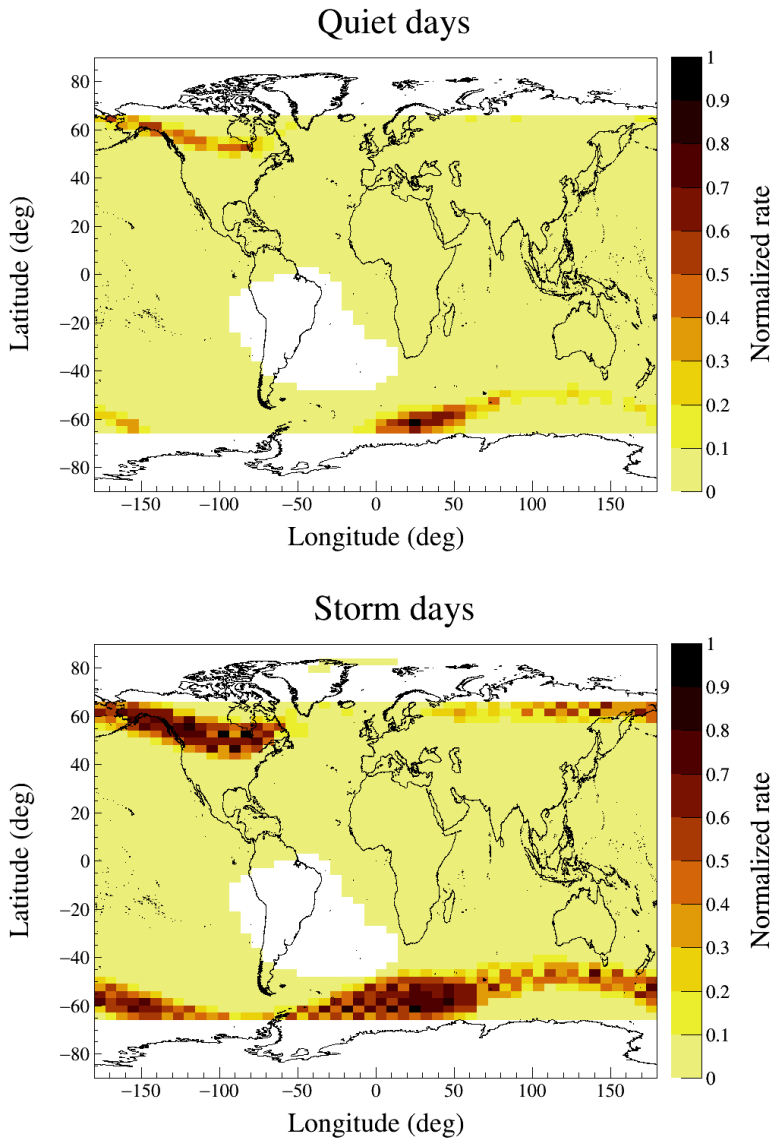

Figura 4.5: Confronto tra una mappa del *rate* di conteggio per un trigger di *HEPD* prima della tempesta geomagnetica (20-23 Agosto 2018) e dopo l'arrivo della tempesta (25-27 Agosto). Questa mappa si riferisce alla configurazione di trigger T, alla quale corrisponde la più bassa soglia energetica sufficiente a generare un segnale (per gli elettroni > 3 MeV).

corrispondenti a tre diverse configurazioni di trigger: T, T & P_1, T & P_1 & P_2. Incrementando il numero di piani del calorimetro in *AND* con T aumenta l'energia di soglia per la rivelazione degli elettroni (>3 MeV per T, >4.5 MeV per T & P_1, >8 MeV per T & P_1 & P_2). Ciò comporta, come si può osservare, una progressiva diminuzione del *rate* dovuta alla soglia energetica della tempesta stessa (la scala di colore sull'asse z è la stessa per tutti e tre i pannelli superiori).

Quando una *ICME* colpisce la magnetosfera, le linee del campo magnetico vengono compresse nel lato della Terra rivolto verso il Sole; invece, nel lato opposto, le linee vengono stirate. Allo stesso tempo, la magnetopausa è forzata ad avvicinarsi alla Terra. Tale effetto è apprezzabile nel pannello in alto della figura 4.6 nel quale si osserva un abbassamento dei valori di *L-shell* in concomitanza dell'arrivo della tempesta e dell'aumento di *rate* di particelle registrato da *HEPD*. Tale incremento è una chiara evidenza del transitorio riarrangiamento degli elettroni relativistici nell'ambiente di radiazione attorno alla Terra come conseguenza della compressione della magnetosfera.

Infine, nell'ultima immagine in basso è mostrato l'andamento del *Dst index*, già introdotto nel capitolo 1. Osservando quando è avvenuta la diminuzione del *Dst* (che ha raggiunto un minimo di ~ -180 nT) è possibile concludere che la fase principale della tempesta è iniziata nella tarda giornata del 25 Agosto, proprio in corrispondenza dell'aumento dei *rate* di trigger di *HEPD*.

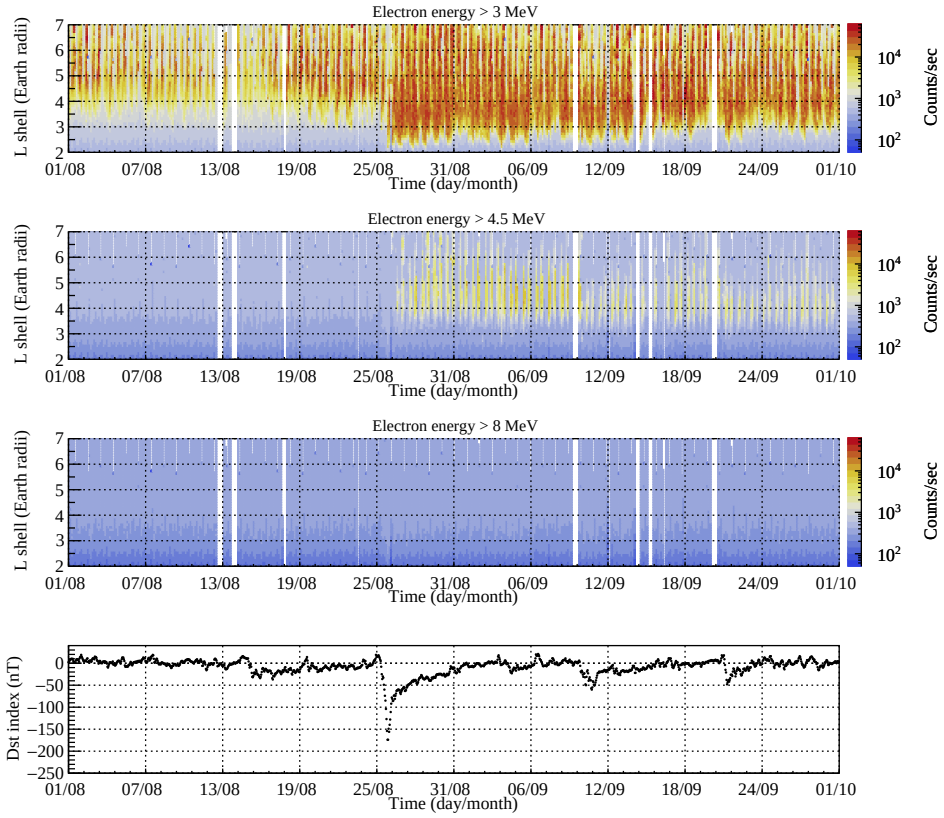

Figura 4.6: I tre pannelli in alto mostrano l'andamento dei *rate meters* in funzione del tempo e di *L-shell* rispettivamente per le configurazioni T, T & P_1, T & P_1 & P_2. L'ultima immagine in basso mostra l'andamento in funzione del tempo dell'indice *Dst*.

CONCLUSIONE

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato osservare come il rivelatore *HEPD*, a bordo del satellite cinese *CSES-01* in orbita bassa a partire dal 2 Febbraio 2018, rispondesse ad eventuali tempeste solari, in particolare alla tempesta del 25 Agosto 2018. Attraverso il framework *ROOT* è stato analizzato l'andamento dei *rate meter* più superficiali di *HEPD* - T, T & P_1 e T & P_1 & P_2 - in funzione del tempo e del parametro *L-shell*. Preliminarmente all'analisi vera e propria, è stata testata la stabilità dei vari *rate meter* nel tempo in una zona orbitale priva di variabilità di tipo fisico (regione tra $-5°$ e $+5°$ di latitudine), verificando, dunque, anche la bontà del detector. L'assenza di tempeste geomagnetiche oltre una certa intensità non ha permesso uno studio statistico su più eventi, ma lo studio quantitativo su quello del 25 Agosto 2018 ha comunque permesso di valutare la risposta di *HEPD* all'impatto con una tempesta geomagnetica. Grazie allo strumento *HEPD* si è potuto notare come, in corrispondenza dell'arrivo dell'*ICME* (una vasta porzione di plasma che è stata espulsa dalla superficie del Sole e che trasporta parte del campo magnetico), si sia verificato un aumento iniziale del conteggio delle particelle ben visibile nelle configurazioni T e T & P_1, in quanto quelle che richiedono un'energia sopra-soglia non troppo elevata - >3 MeV e >4.5 MeV, rispettivamente. L'investigazione di questi fenomeni non è finalizzata solo ad una maggiore comprensione scientifica delle tempeste solari, ma risulta

particolarmente importante per la sicurezza dell'uomo e la funzionalità di molte reti elettriche e infrastrutture situate sia a terra che nello spazio. Il periodo analizzato è coinciso con una fase di minimo solare per cui l'unica attività interessante che abbiamo potuto monitorare è stata quella del 25 Agosto 2018; tuttavia, man mano che ci avvicineremo ad un nuovo massimo solare ci saranno sempre più tempeste e *HEPD* avrà sempre più possibilità di testare le sue potenzialità in ambito di *Space Weather*.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare innanzitutto la Professoressa Roberta Sparvoli per l'opportunità che mi ha dato di svolgere questo lavoro.

Un grande ringraziamento anche al Dr. Francesco Palma e al Dr. Matteo Martucci per l'enorme disponibilità che hanno dimostrato in questi mesi, i preziosi consigli e la passione che hanno messo nello svolgere il loro lavoro.

Un grazie anche al Dr. Mirko Piersanti, sempre disponibile ogni qualvolta si sia reso necessario un suo aiuto.

Grazie a Silvia, utile supporto per la mia tesi.

Grazie infine a mio padre e mia madre: il loro sostegno mi ha permesso di arrivare fin qui.

BIBLIOGRAFIA

[Amb+20] G Ambrosi et al. «Beam test calibrations of the HEPD detector on board the China Seismo-Electromagnetic Satellite». In: *Nuclear instruments and methods in physics research section a: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment* 974 (2020), p. 164170.

[Bak+14] DN Baker et al. «An impenetrable barrier to ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts». In: *Nature* 515.7528 (2014), pp. 531–534.

[Bar+20] S Bartocci 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». In: *The Astrophysical Journal* 901.1 (2020), p. 8.

[Car21] Luca Carfora. *Calibration of the HEPD detector on board CSES and preliminary analysis on galactic proton flux*. 2021.

[Hat15] David H Hathaway. «The solar cycle». In: *Living reviews in solar physics* 12.1 (2015), p. 4.

[LT16] Gurbax S Lakhina e Bruce T Tsurutani. «Geomagnetic storms: historical perspective to modern view». In: *Geoscience Letters* 3.1 (2016), pp. 1–11.

[McI61] Carl E McIlwain. «Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles». In: *Journal of Geophysical Research* 66.11 (1961), pp. 3681–3691.

[Mit20] Rositsa Miteva. «On extreme space weather events: Solar eruptions, energetic protons and geomagnetic storms». In: *Advances in Space Research* 66.8 (2020), pp. 1977–1991.

[Pic+19] P Picozza et al. «Scientific goals and in-orbit performance of the High-energy Particle Detector on board the CSES». In: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 243.1 (2019), p. 16.

[Ree] Whitham D. Reeve. *Observations of the 26 August 2018 Geomagnetic Storm.*

[Sch06] Rainer Schwenn. «Space weather: The solar perspective». In: *Living Reviews in Solar Physics* 3.1 (2006), pp. 1–72.

[Thé+15] Erwan Thébault et al. «International geomagnetic reference field: the 12th generation». In: *Earth, Planets and Space* 67.1 (2015), pp. 1–19.

[YKJ10] Masaaki Yamada, Russell Kulsrud e Hantao Ji. «Magnetic reconnection». In: *Reviews of Modern Physics* 82.1 (2010), p. 603.

ELENCO DELLE FIGURE

1.1 L'istogramma mostra il numero di macchie solari annuali registrato da Schwabe dal 1826 al 1843. 8

1.2 Andamento dell'intensità dell'attività solare in funzione del tempo (1995-2020). L'alternanza delle fasi di minimo e massimo è evidente. . . . 9

1.3 Raffigurazione in sezione della magnetosfera terrestre. 11

1.4 Rappresentazione schematica della riconnessione magnetica. 12

1.5 Magnetogramma originale dell'evento Carrington del 1859. 12

1.6 Configurazione normale delle *L-shell* in funzione delle coordinate geografiche; ad ogni linea di campo chiusa corrisponde un particolare valore della *L-shell* individuabile sulla Terra. 13

2.1 Raffigurazioni delle fasce di Van Allen. 17

2.2 Il satellite *CSES-01*. 19

2.3 In alto: rappresentazione di una singola semi-orbita del satellite *CSES-01* in funzione delle coordinate geografiche. In basso: profili temporali per protoni (quadrati blu) ed elettroni (cerchi rossi) lungo tale semi-orbita. . . 20

2.4 Raffigurazione della disposizione degli strumenti scientifici a bordo del satellite *CSES-01*. 21

3.1 Modello *CAD (Computer-Aided Design)* del rivelatore *HEPD* con i vari sotto-rivelatori. 23

3.2 Il fattore geometrico di *HEPD*, per elettroni (sinistra) e per protoni (destra) entrambi interamente contenuti nel *detector*, in funzione dell'energia e per tre configurazioni di trigger. 27

3.3 Il segnale generato dalle particelle sul piano P_1 in funzione dell'energia totale rilasciata nel calorimetro; in rosso le curve che discriminano protoni ed elettroni. 28

4.1 Andamento nel tempo della variabile *rate meter* per la configurazione di trigger T & P_1 nel periodo Agosto 2018-Gennaio 2021. La linea rossa rappresenta un fit polinomiale di primo ordine. 30

4.2 Accettanza geometrica totale per elettroni+protoni - ottenuta tramite simulazioni Monte Carlo - in funzione dell'energia cinetica della particella incidente e della configurazione di trigger. 32

4.3 Intensità totale del campo magnetico terrestre (in nT) nel 2018 in funzione delle coordinate geografiche. 33

4.4 Parametri del vento solare raccolti dalla sonda ACE: a) intensità dell'IMF; b) componente B_z dell'IMF; c) temperatura dei protoni; d) pressione dinamica; e) indice *Sym-H*; f) indici aurorali AE (nero), AL (rosso), AU (blu). I parametri sono espressi nel sistema di coordinate *Geocentric Solar Magnetospheric*. 35

4.5 Confronto tra una mappa del *rate* di conteggio per un trigger di *HEPD* prima della tempesta geomagnetica (20-23 Agosto 2018) e dopo l'arrivo della tempesta (25-27 Agosto). Questa mappa si riferisce alla configurazione di trigger T, alla quale corrisponde la più bassa soglia energetica sufficiente a generare un segnale (per gli elettroni > 3 MeV). . . 37

4.6 I tre pannelli in alto mostrano l'andamento dei *rate meters* in funzione del tempo e di *L-shell* rispettivamente per le configurazioni T, T & P_1, T & P_1 & P_2. L'ultima immagine in basso mostra l'andamento in funzione del tempo dell'indice *Dst*. 39

ELENCO DELLE TABELLE

1.1 Relazione tra i vari eventi solari e le tempeste geomagnetiche. 14