

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

Dipartimento di Fisica

Corso di laurea triennale in Fisica

Classificazione quantitativa di alcuni eventi di SEP osservati dal detector HEPD-01 nel 2021 e 2022

RELATORI Prof.ssa Roberta Sparvoli Dr. Matteo Martucci

CORRELATORE Dr. Francesco Palma

CANDIDATO

Rachele Cesaroni Matricola n° 0272813

A.A. 2021/2022

Scegli la strada in salita, è quella che ti porterà alla felicità.

Indice

In	Introduzione 1 Raggi cosmici e SEP			1
1				3
	1.1	Radia	zione cosmica	3
		1.1.1	Caratteristiche dei raggi cosmici	4
	1.2	Solar (Energetic Particles	6
2	Il sa	atellite	CSES-01	9
	2.1	La mi	ssione CSES/Limadou	9
		2.1.1	Gli obiettivi scientifici	10
	2.2	Strutt	ura e orbite del satellite	11
		2.2.1	Strumenti a bordo di CSES-01	14
3	HE	PD-01	(High-Energy Particle Detector)	16
	3.1	Il rive	latore	16
3.2 Selezione dei dati in HEPD-01		one dei dati in HEPD-01	19	
		3.2.1	Configurazione di Trigger	19
		3.2.2	Particle identification e contaminazione	20
		3.2.3	Tempo vivo, intervallo energetico ed efficienze di selezione	22
		3.2.4	Fattore geometrico	24

4	4 Analisi Dati		26
	4.1	Eventi di SEP	27
	4.2	Osservazioni da spacecraft	31
Conclusioni			42
Elenco delle figure			47
Bibliografia			49

Introduzione

Le particelle energetiche solari o SEP (Solar Energetic Particles) sono una famiglia di particelle cariche emesse dal Sole in concomitanza con le *flare* (o brillamenti) - ossia emissioni intense e improvvise di radiazione elettromagnetica localizzate sul disco solare. Le SEP furono osservate per la prima volta negli anni '40 e sono per lo più composte da protoni, elettroni e ioni HZE (nuclei con carica elettrica > 1) con un'energia tra le poche decine di keV e il GeV. Il mio lavoro di tesi è incentrato proprio sullo studio di alcune SEP, registrate tra il 2021 e il 2022, utilizzando lo strumento High-Energy Particle Detector (HEPD-01) - con design e costruzione completamente italiani - che si trova a bordo del satellite cinese CSES-01 (China Seismo-Electromagnetic Satellite), lanciato nel febbraio del 2018.

HEPD-01 è stato ottimizzato per la misura di elettroni (3-100 MeV), protoni (30-250 MeV) e nuclei leggeri (30-250 MeV/n) e sono proprio i protoni, emessi durante le SEP, la famiglia di particelle cariche che ho analizzato durante il mio lavoro. Viene fornita una breve descrizione delle caratteristiche fondamentali delle SEP (Capitolo 1), e verranno poi descritti il satellite e la missione CSES (Capitolo 2) e il detector HEPD-01 (Capitolo 3) prima di passare all'analisi dati vera e propria (Capitolo 4). In quest'ultimo capitolo, viene riportata una descrizione quantitativa di 6 eventi SEP, analizzando - oltre ai dati di HEPD-01 - anche le informazioni raccolte da altri strumenti quali magnetometri, rivelatori di raggi X e altri strumenti adibiti alla misura di particelle

cariche (come EPHIN ed ERNE a bordo dello spacecraft SOHO). Viene affrontata la suddivisione tra eventi impulsivi e graduali e viene fatto un tentativo preliminare di costruzione di uno spettro differenziale esteso da pochi MeV fino a ~ 250 MeV, combinando i dati di vari strumenti in orbita nel periodo 2021-2022 con quelli di HEPD-01 da me analizzati. In questo quadro generale, viene sottolineata l'importanza di un detector come HEPD-01 che può fornire misure precise di particelle con energie fino ad alcune centinaia di MeV, fungendo da ponte tra le misure svolte *in-situ* in prossimità del Sole e quelle svolte a terra da strumenti come i Neutron Monitors. HEPD-01 si può considerare, inoltre, come un degno successore del detector PAMELA - attivo tra il 2006 e il 2016 - il quale ha fornito anche ottimi risultati proprio sulle SEP.

Vale la pena ricordare che HEPD-01 è solo il primo di una costellazione di detector, previsti nei prossimi anni, per lo studio dell'ambiente Sole-Terra e delle perturbazioni che avvengono continuamente in esso (*Space Weather*).

Capitolo 1 Raggi cosmici e SEP

1.1 Radiazione cosmica

Le prime scoperte degli effetti dei raggi cosmici avvennero tra l'inizio del secolo XIX e il secolo XX grazie ad una serie di esperimenti che mostravano risultati diversi da quanto atteso. Il primo di questi fu l'osservazione di una spontanea e inattesa scarica tra le lamine di un elettroscopio, osservata da Coulomb nel 1796. Tale set-up sperimentale venne riprodotto e perfezionato circa 100 anni dopo da Wilson, Elster e Geitel [Wilson, 1912, Elster, 1902, Elster and Geitel, 1900] ma, anche con schermature più efficaci atte ad isolare le camere a ionizzazione che stavano utilizzando, si osservavano comunque delle contaminazioni provenienti dall'esterno, segno della presenza di sorgenti di radiazione con origine sconosciuta.

Quest'ultima fu investigata e isolata dallo scienziato austriaco Victor Hess [Hess, 1908] il quale, nel 1912, volò con un pallone aerostatico fino in cima alla Torre Eiffel registrando una maggior quantità di particelle cariche (e quindi di radiazione) rispetto a quella a terra. Pertanto Hess concluse che la radiazione responsabile degli effetti osservati da Coulomb prima e Wilson, Elster e Geitel poi non provenisse dalla crosta terrestre ma bensì dall'esterno. Successivi esperimenti indicarono l'ambiente oltre l'atmosfera come il vero luogo di origine di questa radiazione carica contaminante che prese il nome di *radiazione cosmica*, anche se questo termine fu coniato da Millikan solo più avanti [Millikan, 1925].

1.1.1 Caratteristiche dei raggi cosmici

Ad oggi si sa che i protoni costituiscono buona parte dei raggi cosmici carichi (~ 86%), seguiti da nuclei di ⁴He (~ 11%) e nuclei più pesanti (2%). Antiprotoni, elettroni e positroni (la scoperta di questi ultimi ha permesso la vincita del Premio Nobel per Carl David Anderson nel 1932) costituiscono il rimanente ~1% del computo finale [Compton and Bethe, 1934]. Una componente neutra è comunque presente, formata in gran parte da raggi γ , neutrini e antineutrini.

I raggi cosmici carichi hanno energie che variano in un intervallo molto ampio. La loro energia si esprime nell'unità di misura chiamata elettronvolt (eV) e varia da circa 10^7 eV fino a 10^{20} eV. Con questa estensione energetica così ampia, la loro origine è estremamente eterogenea: ad esempio i raggi cosmici con energie maggiori del GeV hanno origine da fenomeni che avvengono nelle *novae* e *supernovae* [Blasi, 2008], mentre per quelli di altissima energia (> PeV) molte ipotesi sono in gioco, ma non è ancora stata individuata una sorgente ben definita [Rodrigues et al., 2021]. I raggi cosmici di energia più bassa (ordine di grandezza del MeV) vengono invece pesantemente influenzati da sorgenti più vicine, come il Sole e si muovono all'interno dei campi magnetici che permeano l'Eliosfera, ossia quella regione di spazio dominata dagli effetti modulanti del Sole stesso, perdendo molte informazioni riguardanti la loro origine.

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 particelle di energia minore sono in numero maggiore, e viceversa particelle di energia maggiore sono meno numerose. Il valore α è una costante che vale $\alpha = 2.7$ per protoni



Energies and rates of the cosmic-ray particles

Figura 1.1: Spettro energetico differenziale di varie specie di raggi cosmici galattici carichi. Si distinguono varie zone caratteristiche: una compresa tra 10^{15} e 10^{16} eV chiamata *knee* (ginocchio) e una attorno a 10^{19} eV chiamata *ankle* (caviglia). Ad energie $< 10^3$ eV, invece, lo spettro risulta curvato verso il basso, a causa del potere modulante del Sole.

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 sono indicate nella Figura1.1.

La porzione di spettro che si trova più in alto nel plot - con energie < GeV - non presenta più il caratteristico andamento a legge di potenza, ma risulta essere invece "curvata". Tale effetto è appunto dovuto alla presenza del Sole e dei suoi campi magnetici che influenzano il percorso delle particelle cariche provenienti dall'esterno dell'Eliosfera. L'ampiezza e la forma di tale curvatura sono particolarmente variabili nel tempo, a differenza del resto dello spettro: questa caratteristica deriva direttamente dalle periodicità intrinseche del ciclo solare (11 e 22 anni) [Potgieter, 2013]. E' proprio questa sezione dello spettro che viene studiata da strumenti in orbita nello spazio come l'High-Energy Particle Detector (HEPD-01). In particolare però, una grande variabilità nei raggi cosmici con energie < GeV è legata a transienti di natura impulsiva, non direttamente legati alla modulazione periodica del Sole; questi fenomeni sono chiamati Solar Particle Events o SPE e causano iniezioni di particelle solari direttamente nella popolazione di raggi cosmici galattici, causando ulteriori cambiamenti nello spettro differenziale.

1.2 Solar Energetic Particles

Le particelle solari iniettate dal Sole durante i transienti sopra-citati prendono il nome di SEP (Solar Energetic Particles). Esse si presentano di solito contemporaneamente a esplosioni intense e improvvise - chiamate *flare* o brillamenti - che hanno luogo nei vari livelli dell'atmosfera solare. Le energie di queste particelle variano da circa 10 keV a energie relativistiche di diversi GeV [Reames, 2021]. Oltre ai protoni, che risultano essere dominanti, queste SEP contengono molti altri elementi chimici, dall'He all'Au e al Pb, anche se in misura minore. Le SEP possono essere classificate come impulsive o graduali sulla base delle loro proprietà, composizione e sorgente. Sono stati osservati però anche eventi ibridi. Le prime sono meno intense e associate ad emissione di raggi X *soft* di breve durata provenienti da basse altitudini. Sono il risultato del brillamento e presentano grandi quantità di ³He e ioni pesanti come Fe. Quelle graduali, invece, sono caratterizzate da emissioni radio di tipo II e accelerate nella corona solare da



Figura 1.2: Un'immagine composita dei telescopi EIT e LASCO a bordo della sonda SOHO che mostra un brillamento e una CME espulsa in direzione sud-ovest.

shock derivanti dal passaggio delle cosiddette CME o Coronal Mass Ejections. Queste ultime possono essere considerate come enormi masse di plasma e materiale solare espulse dal Sole e immesse nello spazio interplanetario. Se queste CME colpiscono la Terra, possono interagire anche pesantemente con il campo geomagnetico generando tempeste [Palma et al., 2021] e dando origine a effetti Forbush¹ [Forbush, 1938]. Una immagine composita dei telescopi EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) e LA-SCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) a bordo dello spacecraft SOHO (Figura 1.2) mostra un brillamento con relativa CME.

Le SEP presentano caratteristiche peculiari a seconda del luogo dove vengono prodotte, della potenza del brillamento che le ha generate, della sua durata e di moltissimi altri fattori - molti dei quali ancora poco noti. In particolare, la potenza del brillamento assume un ruolo preponderante nella caratterizzazione di una SEP.

¹Decrescita temporanea - con durata e ampiezza variabili - del livello di intensità dei raggi cosmici galattici in prossimità dell'impatto della CME con il campo geomagnetico

I brillamenti solari sono organizzati in cinque classi di potenza a seconda della loro luminosità nei raggi X, misurata a Terra in W/m^2 e nella banda tra 0.1 e 0.8 nm. In ordine crescente di potenza sono A, B, C, M e X. Ogni classe è dieci volte più potente di quella precedente, con la più potente X che è ulteriormente suddivisa linearmente in 9 classi, numerate da 1 a 9. Inoltre, l'estensione energetica individua eventi di SEP particolari, chiamati GLE o Ground-Level Enhancement. Queste GLE hanno la capacità di penetrare gli strati di atmosfera terrestre e causare *shower* di particelle secondarie che vengono rilevate anche a livello del mare da strumenti dedicati chiamati Neutron Monitors.

Lo studio delle caratteristiche delle SEP è molto importante perché può aiutare a capire meglio i meccanismi di produzione, accelerazione e propagazione delle particelle dal Sole fino alla Terra, arrivando - un giorno - ad un possibile *forecasting* di eventi particolarmente potenti e pertanto pericolosi per l'uomo. In passato alcuni eventi di SEP molto potenti hanno avuto luogo e in alcuni casi i danni causati a infrastrutture e comunicazioni sono stati ingenti [Schwenn, 2006]. Eventi estremi, invece, sono molto più rari, ma il loro potenziale distruttivo sarebbe molto elevato. Maggiori dettagli sulle caratteristiche di alcune SEP durante il ciclo solare 24 possono essere trovate in [Bruno et al., 2018], mentre uno studio dettagliato su quella di ottobre 2021 (un evento molto raro per alcune sue caratteristiche) è riportata in [Martucci et al., 2023]. Nel Capitolo 4 di questo lavoro di tesi, verranno caratterizzati alcuni eventi di SEP che hanno avuto luogo tra il 2021 e il 2022 (25-esimo ciclo solare) e verranno descritte brevemente le loro caratteristiche.

Capitolo 2 Il satellite CSES-01

2.1 La missione CSES/Limadou

Grazie alla cooperazione tra il principale ente spaziale cinese CNSA (China National Space Administration) e italiano ASI (Agenzia Spaziale Italiana) è nata la missione scientifica CSES/Limadou. Tale missione è stata poi supportata sia dalla CEA (China Earthquake Administration) che dall'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). Tra le istituzioni italiane che hanno partecipato - e continuano a partecipare - a questo progetto, spiccano le Università di Roma "Tor Vergata", Bologna e Trento, le Sezioni INFN di Roma "Tor Vergata", Bologna, Napoli e Perugia, i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, oltre agli Istituti INAF-IAPS (Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali) e INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia). Il ruolo delle istituzioni italiane ha riguardato design, realizzazione, test e consegna di un payload, il rivelatore di particelle HEPD-01 (High-Energy Particle Detector), progettato per lo studio delle particelle cariche e che si trova a bordo del satellite CSES-01 (China Seismo-Electromagnetic Satellite). A ciò si aggiunge anche la partecipazione nella realizzazione di un ulteriore rivelatore, chiamato EFD-01 (Electric Field Detector), progettato per lo studio della variabilità dei segnali elettrici nell'ambiente circumterrestre. Con il lancio del satellite, avvenuto il 2 Febbraio 2018 dal Jiuquan Satellite Launch Center nel deserto del Gobi (Mongolia, Cina), ha inizio la missione vera e propria [Shen, 2018].

2.1.1 Gli obiettivi scientifici

La missione CSES/Limadou nasce con lo scopo principale di identificare possibili precursori sismici attraverso l'analisi delle perturbazioni che avvengono a livello di ionosfera, magnetosfera e litosfera in prossimità di terremoti molto potenti. Inoltre, essa ha l'ulteriore scopo di monitorare con continuità e precisione l'attività solare e le relative variazioni (a breve e lungo termine) dei flussi di particelle - in particolare protoni, elettroni e nuclei leggeri - sia in ambiente galattico che all'interno delle fasce di Van Allen¹. Pertanto, la missione si ripropone di proseguire gli studi sulle particelle già iniziati da precedenti missioni come PAMELA (A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics), DEMETER (Detection of Electro-Magnetic 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 electroni, 30-250 MeV per protoni, >50 MeV/n per i nuclei leggeri).In ultimo, essa è in grado di investigare la struttura e la dinamica della parte superiore della ionosfera, i meccanismi di interazione tra quest'ultima e la magnetosfera e le variazioni temporali del campo geomagnetico in condizioni di quiete e non. HEPD-01, in particolare, si è rivelato particolarmente sensibile a eventi di Space Weather anche di medio-bassa intensità - quali tempeste geomagnetiche, eventi di SEP, CME e Forbush (cfr. Capitolo 1). Come accennato nel capitolo precedente, le interazioni fra i

¹Coppia di strutture toroidali all'interno della magnetosfera terrestre in cui si accumulano particelle cariche (plasma); la fascia interna è molto stabile ed è costituita da plasma di elettroni e di ioni positivi ad alta energia, mentre quella esterna (suddivisa in una fascia esterna Nord e una Sud) è costituita da soli elettroni con energia <10 MeV ed è caratterizzata da un comportamento molto più dinamico

fenomeni solari e la Terra possono influenzare anche pesantemente le attività umane, ad esempio condizionando la navigazione basata sul GPS (Global Positioning System) o mettendo in pericolo direttamente le vite degli atsronauti in orbita [Schwenn, 2006].

2.2 Struttura e orbite del satellite

Fulcro della missione CSES/Limadou è il satellite CSES-01 (China Seismo-Electromagnetic Satellite), basato sulla piattaforma cinese CAST2000. L'orbita è circolare ed eliosincrona, ossia un'orbita geocentrica tale da permettere che il satellite sorvoli un dato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora locale, con durata complessiva di circa 97 minuti. Ha un'inclinazione di 97.3° ed è posto ad un'altitudine di circa 507 km. La massa del satellite è di circa 730 kg con un consumo di picco di circa 900 W. I dati scientifici sono trasmessi in banda X a 120 Mbps. Nella Figura 2.1 sono mostrate 3 semi-orbite esemplificative seguite dal satellite intorno alla Terra nel giorno 1° agosto 2018.

Esistono due diverse zone di operazione lungo l'orbita: la zona di acquisizione dati e la zona di controllo di assetto della piattaforma. Gli strumenti raccolgono dati nell'intervallo di latitudine magnetica di $\pm 65^{\circ}$. A latitudini maggiori è previsto lo spegnimento dei rivelatori al fine di svolgere le attività di controllo e manutenzione dell'assetto orbitale del satellite (AOCS). Da novembre 2019 tale regione di lavoro è stata ampliata fino a raggiungere i $\pm 70^{\circ}$. Gli strumenti raccolgono dati con due modalità operative: la "modalità burst" e quella "survey". Nella prima i dati sono acquisiti in generale con frequenza e risoluzione maggiori. La modalità burst infatti viene attivata sul territorio cinese e sulle regioni del pianeta più attive sismicamente. La modalità survey è invece prevista per raccogliere dati su tutte le altre aree.



Figura 2.1: Tre esempi di semi-orbite seguite dal satellite CSES-01 (in rosso) nel giorno 1° agosto 2018.



Figura 2.2: Struttura esterna del satellite CSES-01 vista da 3 lati e in una visione isometrica (in basso a destra).

2.2.1 Strumenti a bordo di CSES-01

La strumentazione a bordo del satellite è costituita complessivamente da nove payload: due rilevatori di particelle (HEPD-01, HEPP) per misurare il flusso e gli spettri energetici delle particelle; un magnetometro search-coil (SCM), due magnetometri fluxgate ed uno scalare (facenti parte dello strumento HPM) per misurare componenti ed intensità totale del campo magnetico; un rivelatore di campo elettrico (EFD); un analizzatore di plasma ed una Langmuir Probe (LP) per misurare le perturbazioni del plasma ionosferico; un ricevitore GNSS per l'occultazione ed un Tri-band beacon per misurare la densità degli elettroni. Per le manovre orbitali sono presenti sistemi di gestione di dati a bordo (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 80 Ah.

Maggiori dettagli sulla missione CSES/Limadou e sul satellite CSES-01 possono essere trovati in [Cheng et al., 2018, Zhang et al., 2018, Yan et al., 2018, Picozza, 2018, Shen, 2018]



Figura 2.3: Ensemble di strumenti scientifici a bordo del satellite CSES-01.

Capitolo 3

HEPD-01 (High-Energy Particle Detector)

3.1 Il rivelatore

Il payload HEPD-01 è un rivelatore di particelle cariche installato a bordo del satellite CSES-01. È stato progettato e costruito dalla componente italiana della collaborazione, indicata con "Limadou" dal nome cinese di Matteo Ricci, missionario ed esploratore in Cina nel XVI secolo. Tale collaborazione 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-01 e CSES-01; lo 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) durante numerose campagne di test-beam. Informazioni ulteriori su questi test di calibrazione sono riportati in [Ambrosi et al., 2020].

Il detector è contenuto all'interno di un box di alluminio di dimensioni 40.36 cm \times 53.00 cm \times 38.15 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



Figura 3.1: Visione isometrica (sinistra) e visione laterale (destra) del rivelatore HEPD-01 con le sue componenti costitutive principali (sub-detectors).

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 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. Come già accennato nel Capitolo 2, a partire da novembre 2019, la soglia in latitudine è stata leggermente estesa fino a $\pm70^{\circ}$. Due immagini schematizzate del rivelatore sono riportate in Figura 3.1.

Il detector 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 mm × 214.8 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 cm × 18 cm × 0.5 cm) diviso in sei *paddles*. Localizzato subito sotto il TRACKER, quando è attraversato da una particella genera un segnale di *trigger* che dà inizio al-l'acquisizione dei dati. Tale piano produce anche informazioni aggiuntive sulla particella incidente riguardanti la posizione, la perdita di energia e, in caso, la presenza di eventi multi-particella 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 cm × 15 cm × 1 cm) di scintillatore plastico che diventa luminescente se colpito da particelle cariche. Ciascun piano è letto da due PMT (Photo Multiplier Tubes) posizionati agli angoli opposti dello scintillatore. La seconda sezione, invece, consta di una matrice 3 × 3 di scintillatori inorganici LYSO (Ortosilicato di Lutezio e Ittrio), per una dimensione totale 15 cm × 15 cm × 4 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 (LATERAL & BOTTOM) che circonda completamente il calorimetro e che include 5 piani di scintillatori plastici, letti ciascuno da due PMT. 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 3.2.4).

La struttura di HEPD-01 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 PMT.

3.2 Selezione dei dati in HEPD-01

3.2.1 Configurazione di Trigger

Una particella che incide su HEPD-01 è considerata un evento valido se, attraversando l'apparato, 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. La configurazione di *trigger* usata per i run di volo di HEPD è T & P₁ & P₂, dove T indica il TRIGGER, cfr Figura 3.1 (destra) e paragrafo 3.1, e P₁, P₂ indicano il primo e il secondo piano della TOWER, rispettivamente. Le *paddles* del TRIGGER e i piani della TOWER vengono considerati colpiti se almeno uno dei PMT che li leggono genera un segnale - proporzionale all'energia depositata dalla particella incidente - che superi una certa soglia. Si indica con T l'OR dei dodici PMT corrispondenti alle sei *paddles* del piano di TRIGGER. Similmente, con P₁ e P₂ si intende l'OR dei due PMT del primo e del secondo piano della TOWER, rispettivamente. Basterà quindi che almeno uno dei due PMT 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 [Bartocci et al., 2020].

Una volta che una particella ha passato la condizione di *trigger* appena descritta, essa può essere un "buon" candidato o meno per il tipo di fisica che si vuole studiare. In caso positivo, queste particelle "buone" sono parte di un *sample* che andrà a costituire un flusso Φ , grandezza fisica fondamentale su cui ho basato la mia analisi dati che verrà descritta nel Capitolo 4. Un flusso di particelle è descritto dalla seguente equazione:

$$\Phi(E) = \frac{N(E)}{GF(E) \times \Delta T \times \Delta E \times \epsilon(E)},$$
(3.2.1)

dove N(E) è il numero di particelle che risultano essere buoni candidati (ad esempio protoni solari nel caso della mia analisi), GF(E) è il fattore geometrico dello strumento, ΔT è il tempo vivo (o *live time*) strumentale, ΔE è l'intervallo energetico e $\epsilon(E)$ è l'efficienza di selezione. Queste grandezze verranno descritte in dettaglio nei prossimi paragrafi.

3.2.2 Particle identification e contaminazione

Il primo passo da effettuare per ottenere un flusso $\Phi(E)$ è ricavare N(E) ossia individuare un sample buono e coerente con quanto si vuole studiare. Nel mio caso, per lo studio degli eventi di SEP, ho dovuto selezionare innanzitutto protoni e in secondo luogo protoni galattici (le particelle energetiche solari sono in maggioranza protoni e provengono dall'esterno della magnetosfera terrestre). Per la prima condizione, ho usato il segnale ADC letto dai PMT del piano P₁ in funzione dell'energia totale rilasciata dal protone che attraversa il rivelatore e vi rimane contenuto. A causa del diverso comportamento di elettroni e protoni nell'attraversare il materiale plastico



Figura 3.2: Deposito di segnale ADC nel piano P_1 della TOWER in funzione dell'energia totale rilasciata dalla particella incidente nel sub-detector TOWER+LYSO. Come si vede, le popolazioni di protoni e di elettroni sono ben separate.

di TOWER e LYSO, le due popolazioni sono ben separate in plot di questo tipo e pertanto si possono sfruttare per avere una selezione molto pulita di un campione di protoni. In Figura 3.2 è riportato proprio il segnale ADC su P_1 in funzione dell'energia totale rilasciata all'interno di HEPD-01 (TOWER+LYSO).

Le curve blu nel plot rappresentano la selezione operativa effettivamente usata per dividere la popolazione di protoni da quella di elettroni e positroni, presente in basso a sinistra, a bassi segnali ADC sul piano P₁. Eventuali elettroni/positroni possono erroneamente essere inclusi nel *sample* di protoni - generando una contaminazione ma essa viene stimata e corretta attraverso l'uso di simulazioni dedicate di tipo Monte Carlo. Altro step per la definizione del campione N(E) è la richiesta che i protoni, isolati in questo modo, siano effettivamente galattici; infatti, quando il satellite compie le sue orbite attorno alla Terra può anche essere investito da particelle che non provengono dall'esterno della magnetosfera, ma dal suo interno (particelle intrappolate). Pertanto, per fare ciò, si selezionano solo i protoni che si trovano in una determinata zona dell'orbita. Infatti, nelle regioni ad alta latitudine, il campo magnetico terrestre è più debole e quindi permette ai protoni di natura galattica di penetrare ad altitudini piuttosto basse - vicine a quelle del satellite CSES-01 - e quindi possono essere "catturate" da HEPD-01. Questo *cut-off* geomagnetico cresce sempre di più man mano che si scende in latitudine, schermando l'arrivo dei protoni cosmici di bassa energia e impedendo così al detector di rivelarli. Dal punto di vista strettamente operativo, esiste un parametro fisico, chiamato parametro L di McIlwain (conosciuto anche come L-shell o L-value) che descrive un particolare insieme di linee di flusso del campo magnetico terrestre e che può essere utilizzato per determinare la provenienza di una particella. Nel caso di HEPD-01, seguendo quanto fatto in [Martucci et al., 2023], ho selezionato solo la regione di L-shell > 7. In pratica, questo vuole dire selezionare protoni solo in prossimità delle calotte polari Nord e Sud. Nonostante - come detto nel Capitolo 2 - tutti i payload vengano spenti sopra i 70°, HEPD-01 ha comunque un quantitativo di tempo sufficiente per registrare protoni galattici e formare un sample statisticamente valido. La Figura 3.3 mostra appunto la distribuzione del parametro L in funzione di latitudine e longitudine geografiche terrestri.

3.2.3 Tempo vivo, intervallo energetico ed efficienze di selezione

Come visto nell'equazione 3.2.1, una volta ottenuto N(E) bisogna ricavare ΔE , ΔT , $\epsilon(E) \in GF(E)$. Per ΔE basta semplicemente considerare la distribuzione N(E) come

L AACGM



Figura 3.3: Valore delle L-shell in funzione della longitudine e della latitudine geografiche terrestri. Per la mia analisi, ho preso solo le regioni con valore di L-shell > 7.

binnata in energia e quindi dividere ciascun bin del sample N(E) per il relativo "canale" energetico. La risoluzione in energia di HEPD-01 risulta essere ~20%, quindi vanno scelti degli intervalli non troppo piccoli, per ottimizzare le capacità osservative dello strumento. Per ottenere degli spettri (o profili) energetici stabili - vedi Capitolo 4 - ho scelto un numero di bin non superiore a 10. Per ottenere il tempo vivo ΔT ho diviso il mio sample N(E) per il numero di secondi in cui lo strumento era effettivamente in grado di registrare l'arrivo di una particella, dopo aver finito di processare le informazioni relative alla particella precedente e prima di essere in grado di registrare la successiva. In condizioni di *rate* molto elevata - come nel caso delle alte latitudini - il tempo a disposizione del detector tra l'arrivo di una particella e la successiva diminuisce e devo tener conto di ciò per pesare correttamente il valore di N(E). Nel mio caso ho accumulato il tempo vivo ΔT nella stessa zone geografica in cui ho selezionato il mio *sample* N(E), ossia nelle regioni definite da L-shell > 7. Per ottenere $\epsilon(E)$, ho sfruttato di nuovo una simulazione Monte Carlo per stimare la bontà della mia selezione mostrata in Figura 3.2. Così come la regione compresa fra le due curve blu nel plot in questione può contenere una certa contaminazione di elettroni/positroni, così può accadere che le due curve escludano dei protoni validi. Una buona selezione prevede una alta efficienza, ossia un valore di $\epsilon(E)$ molto vicino ad 1.

La stima del fattore geometrico GF(E), invece, viene descritta nel paragrafo successivo.

3.2.4 Fattore geometrico

Il fattore geometrico GF è una condizione di tipo strumentale per definire se una particella (o evento) è all'interno dell'accettanza strumentale o meno. Prevede la richiesta che una particella incidente rimanga completamente contenuta all'interno del volume sensibile del rivelatore durante il passaggio attraverso i vari sub-detector (TRACKER+TRIGGER+TOWER+LYSO). Non vengono, invece, accettati eventi nei quali la particella tocca, ad esempio, il LATERAL VETO o il BOTTOM VETO, così da poter ottenere una stima precisa dell'energia della particella primaria incidente. Il fattore geometrico dipende dal tipo di particella e dalla sua energia, così come dalla geometria dello strumento. Il suo valore è quindi maggiore nei piani superiori del calorimetro e minore in quelli inferiori. Strumenti compatti come HEPD-01 non hanno una risposta uniforme a tutte le energie; ad esempio, nel caso dei protoni che andrò a studiare nella mia analisi, il fattore geometrico ha un picco a ~90 MeV. Ciò significa che per tutte le particelle con energie diverse il fattore geometrico è più piccolo, con una salita e una discesa molto ripide rispetto a questo valore (a causa delle interazioni che avvengono all'interno del detector). Il fattore geometrico di HEPD-01 per protoni



Figura 3.4: Fattore geometrico di HEPD-01 in funzione dell'energia per protoni (in nero) ottenuto nella configurazione di *trigger* T & P_1 & P_2 .

con energia tra 40 MeV e ${\sim}300$ MeV è riportato in Figura 3.4

Esso è stato ottenuto usando una simulazione Monte Carlo dedicata di protoni (isotropicamente generati) nel range energetico 10 MeV-10 GeV, che sfrutta le potenzialità del software GEANT4.

Capitolo 4 Analisi Dati

L'obiettivo del mio lavoro di tesi è stato quello di analizzare i dati di protoni galattici ottenuti da HEPD-01 durante alcuni eventi di SEP nel biennio 2021-2022. Più precisamente - seguendo i passi descritti nel Capitolo 3 - ho ricavato i flussi (profili temporali e flussi differenziali integrati) e studiate alcune caratteristiche di sei di questi eventi, legati alle relative *flare*: quella del 28 ottobre 2021, del 20 gennaio 2022, del 16 febbraio 2022, del 20 aprile 2022, del 10 maggio 2022 e del 13 giugno 2022. Dal confronto tra le singole osservazioni, sono arrivata a trarre alcune conclusioni sulla natura degli eventi di SEP sopra elencati. Durante il mio lavoro, ho maneggiato file in formato ROOT, un framework di analisi sviluppato al CERN e scritto in linguaggio C++. Per quanto riguarda i dati da altri esperimenti, invece, ho analizzato file di tipo .dat ottenuti dal sito OMNIWEB (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/) e SpaceWeather (https://spaceweather.com/) oltre a file di tipo .fits ottenuti dal database di GOES-16, liberamente disponibili e scaricabili dal sito della NOAA (https: //www.ngdc.noaa.gov/stp/).

Data	Ora	Potenza	Zona
28 ottobre 2021	15:35	X1	AR2887
20 gennaio 2022	05:41	M5.5	AR2929
15 febbraio 2022	17:54	M1.3	AR2941
20 aprile 2022	03:41	X2.2	AR2992
10 maggio 2022	13:50	X1.5	AR3006
13 giugno 2022	02:58	M3.4	AR3032

Tabella 4.1: Classificazione delle 6 *flare* secondo giorno, mese, anno, ora, minuto, potenza e regione attiva dove ha avuto inizio il brillamento.

4.1 Eventi SEP durante il biennio 2021-2022

Nonostante HEPD-01 sia stato in orbita dalla prima metà 2018, nel periodo fino all'ottobre 2021 l'attività del Sole è stata quasi del tutto assente e in virtù di questo fatto non sono stati osservati eventi di SEP ma solo alcune tempeste geomagnetiche di grado medio/alto. A partire da ottobre 2021 - in concomitanza con l'avvicinamento verso il massimo solare del 25-esimo ciclo - sono state registrate circa 9 SEP con un'intensità superiore o uguale a M. Di queste 9, ho scelto le 6 che avevano delle caratteristiche particolari o interessanti. Alcune di queste caratteristiche sono riportate nella Tabella 4.1

Ad ogni *flare* è associata la data (giorno, mese, anno, ora e minuto) in cui è stata osservata l'esplosione sul Sole, la sua potenza - secondo la classificazione fornita nel paragrafo 1.2 - e la zona del disco solare dove è apparso il brillamento (indicata con AR che sta per *Active Region*).

Per meglio caratterizzare il sito del brillamento, in Figura 4.1, vengono mostrate le posizioni delle varie AR rispetto alla porzione del disco solare rivolto verso la Terra; per facilitarne la visualizzazione, ognuna di queste AR è stata cerchiata di blu. Le 6 immagini son state ottenute dallo spacecraft SDO (Solar Dynamics Observatory) in particolare dallo strumento HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) che si trova a bordo e scaricate dal sito https://spaceweather.com/.



Figura 4.1: Immagini del disco solare per le 6 *flare* riportate in Tabella 4.1, ossia ottobre 2021, gennaio 2022, febbraio 2022, aprile 2022, maggio 2022 e giugno 2022. L'evento di aprile 2022 è avvenuto nella porzione del disco nascosta alla Terra e pertanto non viene cerchiata alcuna AR.

La *flare* del 28 ottobre 2021, iniziata alle 15:17 e terminata alle 15:48 con un picco di intensità alle 15:35, è considerata un evento molto raro in quanto la SEP che ne è seguita rientra nella categoria delle GLE (cfr paragrafo 1.2). L'evento in questione è stato seguito da un Forbush nei giorni immediatamente successivi (3/4 novembre) a causa di una serie di CME emesse nei pressi della AR2887. La *flare* del 20 gennaio 2022 è iniziata alle 05:41, terminata alle 06:12 con un picco alle 06:01. La *flare* del 15 febbraio 2022 è iniziata alle 17:54, terminata alle 18:31 con un picco alle 18:15.

Entrambi questi eventi sono risultati essere piuttosto standard e confrontabili tra loro: durata simile, intensità comparabile (M5.5 e M1.3 rispettivamente) e medesima porzione del disco solare da cui hanno avuto origine (estremità nord-est). La *flare* del **20 aprile 2022**, invece, è particolare. Essa è iniziata alle 03:41 per terminare alle 04:04 (picco alle 03:57). La particolarità di questo evento è che è avvenuto quasi totalmente nella porzione di disco solare opposta alla Terra (quasi *backside*), quindi le informazioni che abbiamo sono piuttosto parziali. Sappiamo che, dal punto di vista dell'intensità, è stato probabilmente uno degli eventi più potenti del biennio 2021-2022 - una X2.2 dai dati di GOES-16 ma probabilmente sottostimata - ma che non è risultata in una SEP altrettanto potente, come vedremo nel paragrafo successivo.

Le ultime due *flare*, quella del 10 Maggio 2022 e quella del 13 Giugno 2022 sono interessanti in quanto hanno caratteristiche assai diverse tra loro. La prima è un evento impulsivo, con inizio alle 13:50 e fine alle 13:59 (solo 9 minuti di durata), mentre la seconda è stata graduale con durata molto estesa (inizio alle 02:58 e fine alle 05:12, più di 2 ore complessive). Per la definizione di impulsiva e graduale si veda il paragrafo 1.2.

4.2 Osservazioni da spacecraft: HEPD-01, GOES-16, SOHO/ERNE e SOHO/EPHIN

Per quanto riguarda i dati sperimentali presi dai vari spacecraft, satelliti e detector in orbita, ho iniziato dai profili temporali del payload GOES-16 o Geostationary Operational Environmental Satellites [Machol et al., 2020], ottenibili dal sito della NOAA (https://www.ngdc.noaa.gov/stp/). GOES-16, oltre a fornire immagini della Terra ad alta risoluzione spaziale e temporale attraverso 16 bande spettrali nel visibile e nell'infrarosso, fornisce anche dati molto utili per la caratterizzazione delle emissioni di raggi X da parte di eventi solari: lo strumento adibito a questo tipo di misure è l'XRS (X-Ray Sensor). I profili temporali di due diversi canali - uno relativo all'emissione X in banda corta (short, che in figura è rappresentato dal colore azzurro) e l'altro in banda lunga (long, che in figura è rappresentato dal colore arancione) per ognuna delle 6 *flare* descritte nel paragrafo precedente, sono mostrati nelle Figure 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7.



Figura 4.2: Profilo temporale per la *flare* di ottobre 2021 ottenuta dallo strumento XRS a bordo del satellite GOES-16. Nella legenda sono mostrate le lunghezze d'onda della banda corta, disegnata in azzurro, e della banda lunga, disegnata in arancione.



Figura 4.3: Profilo temporale per la *flare* di gennaio 2022 ottenuta dallo strumento XRS a bordo del satellite GOES-16. Nella legenda sono mostrate le lunghezze d'onda della banda corta, disegnata in azzurro, e della banda lunga, disegnata in arancione.



Figura 4.4: Profilo temporale per la *flare* di febbraio 2022 ottenuta dallo strumento XRS a bordo del satellite GOES-16. Nella legenda sono mostrate le lunghezze d'onda della banda corta, disegnata in azzurro, e della banda lunga, disegnata in arancione.



Figura 4.5: Profilo temporale per la *flare* di aprile 2022 ottenuta dallo strumento XRS a bordo del satellite GOES-16. Nella legenda sono mostrate le lunghezze d'onda della banda corta, disegnata in azzurro, e della banda lunga, disegnata in arancione.



Figura 4.6: Profilo temporale per la *flare* di maggio 2022 ottenuta dallo strumento XRS a bordo del satellite GOES-16. Nella legenda sono mostrate le lunghezze d'onda della banda corta, disegnata in azzurro, e della banda lunga, disegnata in arancione.



Figura 4.7: Profilo temporale per la *flare* di giugno 2022 ottenuta dallo strumento XRS a bordo del satellite GOES-16. Nella legenda sono mostrate le lunghezze d'onda della banda corta, disegnata in azzurro, e della banda lunga, disegnata in arancione.

Da una prima osservazione di questi profili, si vede come le 6 *flare* abbiano una forma ed una durata diverse tra loro. In particolare, l'evento di maggio 2022 in Figura 4.6 e quello di giugno 2022 in Figura 4.7 mostrano le tipiche caratteristiche di un evento impulsivo e graduale, rispettivamente, come detto nel paragrafo precedente. La presenza di numerosi picchi secondari che emergono prima e dopo il picco primario in ogni plot indicano le numerose *flare* di bassa intensità (classe B o C) che hanno continuamente luogo sul Sole.

Si può vedere anche come nel caso di aprile 2022, nonostante la natura quasi backside

dell'evento, si apprezzi comunque un picco in entrambe le bande attorno alle 3 del mattino. Probabilmente, però, la stima dell'intensità registrata risulta essere minore di quella vera a causa dell'ostacolo fornito dal Sole stesso.

Il fulcro del mio lavoro di tesi è stato, però, l'analisi dei dati di HEPD-01. Per prima cosa, utilizzando quanto descritto nel Capitolo 3, ho utilizzato i risultati dei protoni galattici nell'intervallo di energia 40-250 MeV per costruire 32 profili temporali di flussi - con risoluzione temporale oraria - complessivi nell'intero periodo ottobre 2021 - luglio 2022. Questi profili sono riportati in Figura 4.8 e ognuno è stato scalato per rendere più chiara la figura. La barra colorata a destra del plot codifica la corrispondenza tra colore e canale energetico (blu per le energie di ~40 MeV e rosso per quelle di ~250 MeV).



Figura 4.8: Profili temporali di flussi di protoni galattici ottenuti con HEPD-01 nel periodo ottobre 2021 - luglio 2022 (risoluzione oraria). Tali profili sono stati scalati per chiarezza. La barra colorata a destra del plot codifica la corrispondenza tra colore e canale energetico (blu per le energie di ~40 MeV e rosso per quelle di ~250 MeV).

E' immediato notare come sia presente una serie di picchi nei flussi, ognuno dei quali corrisponde ad una diversa SEP avvenuta nel biennio da me analizzato. Alcuni di questi picchi sono più pronunciati di altri, come ad esempio quello dell'ottobre 2021: ad esso è legata la GLE di cui abbiamo parlato più volte in precedenza. Nonostante esso non sia stato l'evento più intenso, per la sua natura è stato un evento "magneticamente ben connesso"; ossia - nel momento dell'emissione delle particelle energetiche dal Sole - la *Active Region* della *flare* e la Terra si trovavano "connessi" dalla medesima linea di campo magnetico, causando un massiccio arrivo di protoni di bassa energia senza particolari perdite lungo il percorso Sole-Terra a causa di fenomeni di *scattering*.

Si può notare come la dipendenza energetica di questa GLE faccia sì che, man mano che l'energia aumenta, il picco invece tende a diminuire; questo vuol dire che l'iniezione dei protoni solari nel flusso è maggiore a basse energie. Nonostante questa *feature* sia più evidente in questa occasione, essa è riscontrabile in tutti gli altri eventi, come ci si aspetta dalla letteratura.

Altri eventi, come quello di giugno 2022, sono stati poco intensi e dunque difficilmente visibili nel plot. Inoltre, per eventi come quello di aprile 2022, non risulta esserci alcun picco nei profili, a causa dell'origine quasi *backside* della *flare*. Si nota, inoltre, particolarmente nel canale ad alta energia, un *trend* decrescente del flusso. Si potrebbe pensare che sia dovuto ad un problema di efficienza, ossia che con il passare del tempo lo strumento riesca a rilevare sempre meno protoni a causa dei processi di *aging* (invecchiamento). In realtà, questo *trend* è legato ad un effetto di modulazione solare in quanto stiamo andando verso un periodo di massimo solare e i protoni galattici durante questo periodo sono fisicamente più ostacolati nel raggiungere la Terra. Di conseguenza, man mano che passa il tempo e ci si avvicina ai picchi del massimo, il flusso sarà sempre più decrescente.

La presenza degli spazi bianchi nel plot è invece dovuta ad una mancanza di dati analizzabili, legata a problemi nel funzionamento del detector. Ho scelto poi di confrontare due di questi 6 eventi, ossia quello di maggio e di giugno 2022, per mostrare come alcune caratteristiche dei raggi X emessi, evidenziate nelle Figure 4.6 e 4.7, si traducano in diverse forme dei profili temporali delle particelle cariche accelerate. Questo confronto, svolto con l'analisi dei protoni solari di HEPD-01, è riportato nei due pannelli in Figura 4.9.



Figura 4.9: Confronto tra i profili temporali di una SEP impulsiva (in alto) e una graduale (in basso) con HEPD-01. I due profili temporali sono stati studiati nell'intervallo energetico più basso di HEPD-01, ossia 40-45 MeV. La SEP di maggio 2022 è quella in alto rappresentata dal colore nero, mentre quella di giugno è quella in rosso.

L'evento di SEP in nero (in alto, relativo a maggio 2022) risulta essere di breve durata, con una rapida salita iniziale, un picco pronunciato molto vicino all'inizio dell'iniezione solare e una discesa altrettanto ripida - tipica delle SEP impulsive. Questa caratteristica è legata al fatto che la *flare* che l'ha causata è stata anch'essa molto breve in durata (solo 9 minuti). Al contrario, l'evento di SEP in rosso (in basso, relativo a giugno 2022) risulta essere più ampio in durata, al pari della relativa *flare*, che era prettamente graduale. Inoltre, anche l'intensità delle *flare* e la loro posizione sul disco solare - vedi Figura 4.1 - hanno effetti diversi sulle particelle solari generate. La *flare* di maggio 2022 è stata più potente di quella di giugno 2022 (X1.5 contro una M3.4) ed è avvenuta in una porzione più centrale del disco solare e - pertanto - risulta essere meglio connessa magneticamente rispetto alla seconda che invece era più spostata verso la porzione sinistra del disco.

Lo studio delle particelle energetiche emesse dal Sole in concomitanza con una *flare* è molto importante, in quanto i meccanismi di produzione, accelerazione e propagazione nello spazio interplanetario sono ancora non completamente noti (cfr 1.2). Inoltre, molte informazioni sulla natura e le caratteristiche delle SEP in questione possono essere ricavate dall'analisi del flusso differenziale in funzione dell'energia.

Per questa ragione e per completare la caratterizzazione dei 6 eventi scelti, ho ricavato dei profili energetici per i protoni di HEPD-01, unendo alle sue capacità osservative ad alta energia (~250 MeV) le osservazioni fatte ad intervalli energetici più bassi (< 40 MeV) da altri strumenti in orbita attivi durante le SEP. Tali strumenti sono ER-NE (Energetic and Relativistic Nuclei and Electron experiment) ed EPHIN (Electron Proton Helium Instrument) che si trovano a bordo dello spacecraft SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) [Torsti et al., 1991, Domingo et al., 1995].

Integrando le informazioni temporali in uno stesso intervallo - scelto per ogni evento di SEP nel range ± 12 ore rispetto al picco - si sono ricavati i profili energetici estesi (3 MeV - 250 MeV) mostrati in Figura 4.10.



Figura 4.10: Spettri differenziali integrati ed estesi ottenuti unendo i dati di EPHIN (verde), ERNE (blu) e HEPD-01 (rosso) da 3 MeV a 250 MeV per le SEP di ottobre 2021, gennaio 2022, febbraio 2022, aprile 2022, maggio 2022 e giugno 2022. Il flusso differenziale dei protoni galattici misurato da HEPD-01 in un intervallo di tempo quieto (nero) è riportato per confronto.

I punti sperimentali verdi si riferiscono ai protoni misurati da EPHIN, quelli blu ad ERNE (entrambi scaricati da https://omniweb.gsfc.nasa.gov/), mentre i rossi sono quelli ricavati dai profili temporali di HEPD-01. Per confronto, ho riportato anche il flusso differenziale dei protoni galattici misurato in un intervallo di tempo quieto, precedente all'inizio dell'evento di SEP relativo. Dall'analisi dei 6 pannelli, si possono fare alcune osservazioni di carattere quantitativo. Per la maggior parte degli eventi l'accordo fra ERNE, EPHIN e HEPD-01 è abbastanza buono. La discrepanza in alcuni punti potrebbe essere legata al differente posizionamento degli strumenti in quanto ERNE ed EPHIN si trovano nel punto lagrangiano L1, posto a $\sim 1.500.000$ km dalla Terra, mentre HEPD-01 si trova in orbita a ~ 500 km. Potrebbe essere che ERNE ed EPHIN registrino un maggior numero di protoni rispetto ad HEPD-01, a causa del possibile *scattering* di alcuni protoni dal punto L1 all'orbita LEO. Vale la pena ricordare che ai punti sperimentali non sono state aggiunte le incertezze sistematiche di HEPD-01, che andranno valutate con attenzione in futuro. Per la SEP di maggio 2022, l'accordo è migliore entro gli errori statistici, probabilmente per una miglior connessione magnetica tra il sito della *flare* e la Terra; ulteriori studi saranno necessari per capire meglio la natura di tali differenze. Come accennato all'inizio di questo capitolo, l'evento di aprile 2022 non mostra un innalzamento del flusso solare (in rosso) rispetto a quello quieto (in nero) nel range energetico > 40 MeV. Per ERNE ed EPHIN, invece, sembrerebbe che ci sia una certa iniezione solare, ma probabilmente potrebbe essere legata alla presenza di una certa componente di protoni anomali che sappiamo popolare gli spettri ad energie ≤ 20 MeV.

La pendenza degli spettri differenziali (o indice spettrale γ) è un'altra caratteristica distintiva degli eventi di SEP. Ad esso è legato un meccanismo di accelerazione piuttosto che un altro. Il fit con forme funzionali ben definite come la Weibull [Laurenza et al., 2016], la Ellison-Ramaty [Ellison and Ramaty, 1985] o la Band [Tylka et al., 2010] può dirimere la questione, ma ciò evince dallo scopo di questo lavoro preliminare. Questo argomento è trattato più dettagliatamente in [Martucci et al., 2023] in relazione all'evento GLE di ottobre 2021; in esso possono essere trovati anche altri studi interessanti che si possono svolgere analizzando gli spettri di protoni solari durante una SEP.

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di analizzare e caratterizzare quantitativamente alcuni eventi di SEP legati a brillamenti (o *flare* solari) nel biennio 2021-2022. Ciò è stato possibile utilizzando i dati di protoni galattici ottenuti con HEPD-01, un rivelatore di particelle posizionato a bordo del satellite CSES-01, in orbita LEO a partire dal Febbraio 2018.

In questi due anni, andando sempre più verso il massimo del ciclo solare, l'attività del Sole è aumentata gradualmente, con conseguente aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi di SEP. HEPD-01 ha osservato nove eventi di SEP in totale, ma in questo lavoro di tesi ne ho approfonditi sei - in quanto portatori di caratteristiche peculiari quali durata, sito del brillamento e intensità (cfr 4.1) - ossia: Ottobre 2021, Gennaio 2022, Febbraio 2022, Aprile 2022, Maggio 2022 e Giugno 2022. Utilizzando le metodologie descritte nei paragrafi 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4, ho ricavato come prima cosa i profili temporali di flussi in 32 canali energetici con risoluzione temporale oraria (Figura 4.8).

In seguito, per caratterizzare meglio il profilo temporale di ciascun evento, mi sono servita dei dati di raggi X del detector XRS a bordo dello spacecraft GOES-16 (vedi Figure da 4.2 a 4.7); grazie al confronto tra questi ultimi e il profilo dei protoni carichi di HEPD-01, ho potuto verificare il legame che esiste tra le caratteristiche di emissione dei fotoni X durante un brillamento e l'iniezione dei protoni solari accelerati durante il brillamento stesso. Inoltre, attraverso le immagini del disco solare prese dallo strumento HMI sullo spacecraft SDO (cfr Figura 4.1) - ho individuato la posizione della Active Region da cui ha avuto origine la flare, verificando ad esempio l'assenza di una chiara segnatura di particelle solari cariche durante un evento quasi backside come quello di Aprile 2022. Di queste sei SEP che ho considerato, due sono risultate essere molto particolari, in quanto rappresentative di due categorie ben note in letteratura: le SEP impulsive (Maggio 2022) e le SEP graduali (Giugno 2022). Ciò è chiaramente visibile in Figura 4.9. La shape dei profili temporali osservati da HEPD-01 per entrambi rispecchia la forma dei relativi profili X, contribuendo a rinforzare il legame tra l'emissione dei fotoni e la produzione di protoni di alta energia. Infine, la parte finale della mia analisi è consistita nell'ottenere - per ciascuna delle sei SEP - gli spettri energetici differenziali (integrati in un periodo di ~ 12 ore attorno al picco dell'evento) estendendoli attraverso l'utilizzo dei dati di protoni raccolti da altri strumenti in orbita, come SOHO/ERNE e SOHO/EPHIN, ad energie minori di 40 MeV. Sono stata così in grado di ricomporre uno spettro composito, da pochi MeV a ~ 250 MeV, unendo le capacità osservative di HEPD-01 ad alta energia in orbita LEO, con quelle di energia più bassa e nel punto lagrangiano L1 (vedi Figura 4.10). Da un'osservazione preliminare di questi spettri differenziali, ho constatato come ognuno abbia una pendenza e una estensione energetica diverse, i quali assumono un ruolo centrale nell'ambito degli studi sui meccanismi di accelerazione e propagazione delle SEP dal Sole alla Terra.

Ulteriori e più approfonditi studi saranno comunque necessari per una maggiore caratterizzazione degli eventi di SEP e per estrarre informazioni utili per un possibile obiettivo futuro legato al *forecasting* di eventi solari nell'ambito dello *Space Weather*.

Ringraziamenti

Grazie alla professoressa Roberta Sparvoli per essere stata disponibile, comprensiva ma soprattutto per avermi dato la possibilità e la fiducia per lavorare nel suo team. Il tempo a disposizione non è stato molto ma in questi mesi ho avuto modo di ampliare le mie conoscenze su molti fronti. Grazie Francesco per aver curato ogni minimo dettaglio del mio lavoro e grazie Matteo per essermi stato accanto in questo breve periodo. Ho osservato il modo in cui lavori, la passione che metti nelle cose che fai e ne sono rimasta affascinata. Sei stato paziente e sempre pronto ad aiutarmi, hai saputo capire le mie ansie e di questo ti ringrazio. Sappi che sarai un esempio per il mio futuro.

A nonno, il mio eroe. Se mi dovessero chiedere cos'è l'amore per me risponderei che era il modo in cui mi guardavi fiero e orgoglioso tutte le volte che mi vedevi arrivare. Era la volontà di volermi vedere sempre felice e sistemata come dicevi tu, era la cura e la dedizione che mettevi in ogni cosa che facevi per me, era la tua risata dopo una mia battuta, il tuo difendermi sempre anche quando non avevo ragione. Grazie per avermi fatto sentire amata come non ha mai fatto nessuno, per avermi trasmesso i tuoi valori e i tuoi insegnamenti. Avrei fatto l'impossibile per averti qui oggi.

Alla mia famiglia, ma soprattutto a mamma. Non sono tanto capace di dimostrare affetto, mi arrabbio spesso e non dico quasi mai che vi voglio bene. Sappiate però che siete fondamentali per me, ognuno a modo vostro e che ognuno ricopre un ruolo importante. Grazie mamma per tutto, tu ed io siamo il giorno e notte, litighiamo tutti i giorni ma come ben sai non possiamo stare separate. Siamo una cosa sola. Anche se non te lo dico mai amo passare il mio tempo con te.

A Cori, la persona più diversa ma più affine a me. Il mio porto sicuro o meglio il mio posto felice perché so che non importa il luogo in cui siamo, per me l'importante è stare accanto a te. Sei la sorella maggiore che non ho, quella che non ha mai smesso di credere in me, che chiamo nei momenti peggiori, che sa essere severa con me quando serve ma allo stesso tempo non mi abbandona mai. Sei l'altra metà della mela.

A Elli, il mio angelo custode, una delle persone più buone che io conosca. Sono stata davvero tanto fortunata ad averti incontrata, insieme ne abbiamo vissute tante e forse sei l'unica che veramente è riuscita a capirmi in certe occasioni. Ma soprattutto so che se devo fare una delle mie pazzie avrò sempre il tuo appoggio. Sei l'amica che tutti vorrebbero.

A Miha, la mia compagna di vita. È assurdo ma le nostre vite sembrano andare di pari passo e questa cosa ci lega ancora di più. Grazie a te ho capito che nella vita le seconde possibilità sono sempre migliori delle prime, che la distanza può solo che consolidare quei rapporti puri e veri come il nostro, che se due persone sono destinate a condividere la propria vita allora il modo di ritrovarsi lo trovano.

Ad Andrea, il mio amore grande. Sei il regalo più bello che la vita potesse farmi. Da quando ti ho visto per la prima volta ho capito che saremmo stati legati a vita. Grazie a te ho capito cosa significhi amare incondizionatamente, mettere il bene di un'altra persona davanti al proprio e sperare che l'altra sia sempre felice.

A Giuli, un pezzo del mio cuore. Il nostro rapporto è nato per puro caso, è stato del tutto inaspettato, ma è proprio così che nascono le cose più belle. All'apparenza non sembra ma siamo molto simili, hai un'anima pura che ha saputo riconoscere subito la mia. Sei ciò di cui ho bisogno quotidianamente, la mia forza, il mio sorriso e grazie per tutte le volte che hai creduto in me anche quando io non ne ero in grado, per le volte in cui mi hai protetta e tutelata. Non saprò mai come sdebitarmi.

A Silvi, al suo sorriso che sa mettermi di buon umore. Alla sua dolcezza, alla sua generosità e alla sua presenza costante nella mia vita anche se non ci sentiamo tutti i giorni. È bastato veramente poco per imparare a volerti bene, non dimenticherò mai le risate fatte insieme in montagna. È stato uno dei momenti migliori della mia vita.

A Luisa, la mia ancora di salvezza all'inizio di questo percorso, che grazie a te ho maledetto un po' meno. Avrei voluto finirlo insieme e probabilmente mi sarei evitata tantissime crisi di pianto, ma tu comunque sei sempre stata presente anche se distante. Sei la mia fonte di energia.

A Jacopo, Seba, Giordano e Ginevra, i miei piccolini senza i quali molte delle mie giornate sarebbero state buie e tristi. Anche un solo vostro abbraccio per me vale tanto e grazie per avermi fatto sorridere quando l'unica cosa che volevo fare era piangere. Siete ossigeno.

Alla mia seafamily, un pezzo del mio cuore. La maggior parte dei miei momenti più sereni e spensierati sono con voi nel nostro posto del cuore. Per me rappresentate casa e so che anche se distanti noi troviamo sempre il modo di rimanere uniti.

A filo e al nostro rapporto speciale, a tutte le litigate urlandoci in faccia le peggio cose ma anche a tutti i momenti indimenticabili passati con te. Hai il dono di sapermi leggere dentro, ti basta guardami per capire quello che penso. Ne abbiamo passate tante insieme e come già ti ho detto una volta avrai sempre un posto speciale nel mio cuore. So di poter essere me stessa con te ma soprattutto so che ci saremo sempre l'uno per l'altra.

A Pepe, il mio cucciolo monello. Non saprò mai spiegare a parole quanto bene mi

ha fatto il tuo ingresso nella mia vita, sei amore puro.

A Reb, separarmi da te è stata dura. Abbiamo legato sin da subito ma soprattutto capito che eravamo complici su tutto. Grazie per avermi fatto conoscere Marco senza il quale non avrei combinato nulla in questi mese. Siete stati entrambi pazienti con te, è davvero fortunato ad averti nella sua vita.

Elenco delle figure

1.1	Spettro energetico differenziale di varie specie di raggi cosmici galattici	
	carichi	5
1.2	Brillamento solare e CME (immagine composita EIT/LASCO)	7
2.1	Esempi di semi-orbite del satellite CSES-01	12
2.2	Struttura esterna del satellite CSES-01	13
2.3	<i>Ensemble</i> di strumenti scientifici a bordo di CSES-01 \ldots	15
3.1	Visione isometrica (sinistra) e visione laterale (destra) del rivelatore	
	HEPD-01	17
3.2	Deposito di segnale ADC nel piano \mathbf{P}_1 della TOWER in funzione del-	
	l'energia totale rilasciata nel sub-detector TOWER+LYSO \hdots	21
3.3	Valore delle L-shell in funzione di longitudine e latitudine geografiche	
	terrestri	23
3.4	Fattore geometrico di HEPD-01 in funzione dell'energia per protoni $% \mathcal{A}$.	25
4.1	Dischi solari per le 6 <i>flare</i> , con relative AR	29
4.2	Profilo temporale per la <i>flare</i> di ottobre 2021 (XRS, GOES-16 \ldots	31
4.3	Profilo temporale per la <i>flare</i> di gennaio 2022 (XRS, GOES-16	32
4.4	Profilo temporale per la <i>flare</i> di febbraio 2022 (XRS, GOES-16	32

4.5	Profilo temporale per la <i>flare</i> di aprile 2022 (XRS, GOES-16	32
4.6	Profilo temporale per la <i>flare</i> di maggio 2022 (XRS, GOES-16	33
4.7	Profilo temporale per la <i>flare</i> di giugno 2022 (XRS, GOES-16	33
4.8	Profili temporali dei flussi di protoni galattici (HEPD-01)	34
4.9	Profili temporali di una SEP impulsiva (in alto) e una graduale (in	
	basso) con HEPD-01	37
4.10	Spettri differenziali integrati ed estesi ottenuti unendo i dati di EPHIN,	
	ERNE e HEPD-01	39

Bibliografia

- [Ambrosi et al., 2020] Ambrosi, G., Bartocci, S., Basara, L., Battiston, R., Burger, W., Campana, D., Carfora, L., Castellini, G., Cipollone, P., Conti, L., Contin, A., Donato], C. D., Persio], F. D., Santis], C. D., Follega, F., Guandalini, C., Ionica, M., Iuppa, R., Laurenti, G., Lazzizzera, I., Lolli, M., Manea, C., Martucci, M., Masciantonio, G., Mergè, M., Osteria, G., Pacini, L., Palma, F., Palmonari, F., Panico, B., Parmentier, A., Patrizii, L., Perfetto, F., Picozza, P., Piersanti, M., Pozzato, M., Puel, M., Rashevskaya, I., Ricci, E., Ricci, M., Ricciarini, S., Scotti, V., Sotgiu, A., Sparvoli, R., Spataro, B., Vitale, V., Zoffoli, S., and Zuccon, P. (2020). 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.
- [Bartocci et al., 2020] Bartocci, S., Battiston, R., Burger, W., Campana, D., Carfora, L., Castellini, G., Conti, L., Contin, A., De Donato, C., De Persio, F., et al. (2020). 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.
- [Blasi, 2008] Blasi, P. (2008). Origin of high energy cosmic rays: A short review. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 588(1-2):166–170.

- [Bruno et al., 2018] Bruno, A., Bazilevskaya, G. A., Boezio, M., Christian, E. R., de Nolfo, G. A., Martucci, M., Merge', M., Mikhailov, V. V., Munini, R., Richardson, I. G., Ryan, J. M., Stochaj, S., Adriani, O., Barbarino, G. C., Bellotti, R., Bogomolov, E. A., Bongi, M., Bonvicini, V., Bottai, S., Cafagna, F., Campana, D., Carlson, P., Casolino, M., Castellini, G., De Santis, C., Di Felice, V., Galper, A. M., Karelin, A. V., Koldashov, S. V., Koldobskiy, S., Krutkov, S. Y., Kvashnin, A. N., Leonov, A., Malakhov, V., Marcelli, L., Mayorov, A. G., Menn, W., Mocchiutti, E., Monaco, A., Mori, N., Osteria, G., Panico, B., Papini, P., Pearce, M., Picozza, P., Ricci, M., Ricciarini, S. B., Simon, M., Sparvoli, R., Spillantini, P., Stozhkov, Y. I., Vacchi, A., Vannuccini, E., Vasilyev, G. I., Voronov, S. A., Yurkin, Y. T., Zampa, G., and Zampa, N. (2018). Solar Energetic Particle Events Observed by the PAMELA Mission. Astrophys. J., 862(2):97.
- [Cheng et al., 2018] Cheng, B., Magnes, W., Zhou, B., Lammegger, R., Pollinger, A., Ellmeier, M., Hagen, C., and Jernej, I. (2018). Geomagnetic exploration in China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES) mission. In 42nd COSPAR Scientific Assembly, volume 42, pages S.1–2–18.
- [Compton and Bethe, 1934] Compton, A. H. and Bethe, H. A. (1934). Composition of Cosmic Rays. Nature, 134(3393):734–735.
- [Domingo et al., 1995] Domingo, V., Fleck, B., and Poland, A. I. (1995). The SOHO Mission: an Overview. Solar Physics, 162:1–37.
- [Ellison and Ramaty, 1985] Ellison, D. C. and Ramaty, R. (1985). Shock acceleration of electrons and ions in solar flares. Astrophysical Journal, 298:400–408.

- [Elster, 1902] Elster, J. (1902). Messungen des electrischen Potentialgefälles auf Spitzbergen und Juist. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity (Journal of Geophysical Research), 7(1):9.
- [Elster and Geitel, 1900] Elster, J. and Geitel, H. (1900). Ueber Elektricitätszerstreuung in der Luft. Annalen der Physik, 307(7):425–446.
- [Forbush, 1938] Forbush, S. E. (1938). On World-Wide Changes in Cosmic-Ray Intensity. *Physical Review*, 54(12):975–988.
- [Hess, 1908] Hess, V. F. (1908). Über eine allgemeine Beziehung zwischen Volumkontraktion und den drei üblichen Formen des Refraktionsvermögens bei Flüssigkeitsgemischen. Annalen der Physik, 332(13):589–625.
- [Laurenza et al., 2016] Laurenza, M., Consolini, G., Storini, M., Pallocchia, G., and Damiani, A. (2016). The Weibull functional form for the energetic particle spectrum at interplanetary shock waves. In *Journal of Physics Conference Series*, volume 767 of *Journal of Physics Conference Series*, page 012015.
- [Machol et al., 2020] Machol, J. L., Eparvier, F. G., Viereck, R. A., Woodraska, D. L., Snow, M., Thiemann, E., Woods, T. N., McClintock, W. E., Mueller, S., Eden, T. D., Meisner, R., Codrescu, S., Bouwer, S. D., and Reinard, A. A. (2020). Chapter 19 - goes-r series solar x-ray and ultraviolet irradiance. In Goodman, S. J., Schmit, T. J., Daniels, J., and Redmon, R. J., editors, *The GOES-R Series*, pages 233–242. Elsevier.
- [Martucci et al., 2023] Martucci, M., Laurenza, M., Benella, S., Berrilli, F., Del Moro, D., Giovannelli, L., Parmentier, A., Piersanti, M., Albrecht, G., Bartocci, S., Battiston, R., Burger, W. J., Campana, D., Carfora, L., Consolini, G., Conti, L.,

Contin, A., De Donato, C., De Santis, C., Follega, F. M., Iuppa, R., Lega, A., Marcelli, N., Masciantonio, G., Mergé, M., Mese, M., Oliva, A., Osteria, G., Palma, F., Panico, B., Perfetto, F., Picozza, P., Pozzato, M., Ricci, E., Ricci, M., Ricciarini, S. B., Sahnoun, Z., Scotti, V., Sotgiu, A., Sparvoli, R., Vitale, V., Zoffoli, S., and Zuccon, P. (2023). The First Ground-Level Enhancement of Solar Cycle 25 as Seen by the High-Energy Particle Detector (HEPD-01) on Board the CSES-01 Satellite. Space Weather, 21(1):e2022SW003191.

- [Millikan, 1925] Millikan, R. A. (1925). High Frequency Rays of Cosmic Origin. Nature, 116(2927):823–825.
- [Palma et al., 2021] Palma, F., Sotgiu, A., Parmentier, A., Martucci, M., Piersanti, M., Bartocci, S., Battiston, R., Burger, W. J., Campana, D., Carfora, L., Castellini, G., Conti, L., Contin, A., Dâ€[™]Angelo, G., De Donato, C., De Santis, C., Follega, F. M., Iuppa, R., Lazzizzera, I., Marcelli, N., Masciantonio, G., Mergé, M., Oliva, A., Osteria, G., Palmonari, F., Panico, B., Perfetto, F., Picozza, P., Pozzato, M., Ricci, E., Ricci, M., Ricciarini, S. B., Sahnoun, Z., Scotti, V., Sparvoli, R., Vitale, V., Zoffoli, S., and Zuccon, P. (2021). The august 2018 geomagnetic storm observed by the high-energy particle detector on board the cses-01 satellite. *Applied Sciences*, 11(12).
- [Picozza, 2018] Picozza, P. (2018). Overview of the CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) mission. In 42nd COSPAR Scientific Assembly, volume 42, pages S.1–28–18.
- [Potgieter, 2013] Potgieter, M. S. (2013). Solar Modulation of Cosmic Rays. Living Reviews in Solar Physics, 10(1):3.

- [Reames, 2021] Reames, D. V. (2021). Solar Energetic Particles. A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation, volume 978.
- [Rodrigues et al., 2021] Rodrigues, X., Heinze, J., Palladino, A., van Vliet, A., and Winter, W. (2021). 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.
- [Schwenn, 2006] Schwenn, R. (2006). Space weather: The solar perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 3(1):1–72.
- [Shen, 2018] Shen, X. (2018). The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission. Science China Technological Sciences, 61(5):634.
- [Torsti et al., 1991] Torsti, J. J., Valtonen, E., Lumme, M., Peltonen, J., Eronen, T., Kelhä, V., and Leppälä, K. (1991). Scientific performance of ERNE sensors. Advances in Space Research, 11(1):401–404.
- [Tylka et al., 2010] Tylka, A. J., Dietrich, W., and Atwell, W. (2010). Band function representations of solar proton spectra in ground-level events. 38th COSPAR Scientific Assembly, 38:4.
- [Wilson, 1912] Wilson, C. T. R. (1912). 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.
- [Yan et al., 2018] Yan, R., Shen, X., Huang, J., Wang, Q., Chu, W., Liu, D., Yang, Y., Lu, H., and Xu, S. (2018). Examples of unusual ionospheric observations by the CSES prior to earthquakes. *Earth and Planetary Physics*, 2(6):515–526.

[Zhang et al., 2018] Zhang, X., Frolov, V., Zhao, S., Zhou, C., Wang, Y., Ryabov, A., and Zhai, D. (2018). The first joint experimental results between SURA and CSES. *Earth and Planetary Physics*, 2(6):527–537.