



Università degli studi di Roma Tor Vergata

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA IN FISICA

TESI DI LAUREA TRIENNALE

---

# Primi risultati in volo del rivelatore HEPD a bordo del satellite CSES

---

*Candidato:*  
Alessio Zanni

*Relatore:*  
Prof.ssa Roberta Sparvoli

*Co-Relatori:*  
Dott. Alessandro Sotgiu  
Dott. Matteo Martucci

A.A. 2017/2018

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>iii</b>
<b>1 La struttura della Terra, la ionosfera e i precursori sismici</b>	<b>1</b>
1.1 La struttura interna della terra e l'attività sismica . . . . .	2
1.2 Atmosfera e Magnetosfera . . . . .	4
1.3 La struttura della ionosfera . . . . .	6
1.4 I precursori ionosferici . . . . .	8
1.5 I precursori geologici . . . . .	10
1.6 La Fisica dell'accoppiamento sismo-ionosferico . . . . .	11
1.6.1 Introduzione all'accoppiamento sismo-ionosferico . . . . .	11
1.6.2 L'accoppiamento sismo-ionosferico . . . . .	14
1.6.3 Interazione tra le emissioni elettromagnetiche EME e le Fasce di Van Allen . . . . .	16
<b>2 La missione CSES-Limadou e il satellite</b>	<b>19</b>
2.1 Scopo della missione e collaborazioni . . . . .	19
2.2 Il Satellite CSES . . . . .	20
2.3 Il rivelatore HEPD . . . . .	22
2.3.1 Specifiche tecniche del rivelatore . . . . .	22
2.3.2 Componenti di HEPD . . . . .	23
2.3.3 Il Tracker . . . . .	24
2.3.4 Il Trigger . . . . .	27
2.3.5 Il Calorimetro . . . . .	27
2.3.6 Il VETO . . . . .	29
2.4 Elettronica di HEPD . . . . .	30
<b>3 Analisi preliminare del rate di acquisizione dello strumento HEPD</b>	<b>31</b>
3.1 Le configurazioni di Acquisizione . . . . .	33
3.2 Il rate in funzione del tempo . . . . .	36
3.3 Il rate in funzione di latitudine e longitudine . . . . .	40

3.4 Modellizzazione del campo magnetico . . . . .	47
<b>Conclusioni</b>	<b>50</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>51</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>55</b>

# Introduzione

Durante il mio lavoro di tesi mi sono occupato di studiare i primi dati di volo del rivelatore HEPD a bordo del satellite CSES, frutto della collaborazione italo-cinese CSES-LIMADOU. Ho preso confidenza con i dati di livello 0 e con il software di Quicklook che serve ad effettuare un'analisi preliminare sui dati di volo e sul funzionamento dei vari componenti del detector.

Ho studiato la risposta del detector al variare di diversi valori per la soglia dei chip EASIROC, responsabili della lettura dei dati dei fotomoltiplicatori. Una volta fissata la soglia ho studiato l'andamento del rate di acquisizione in funzione di diverse grandezze come il tempo, la zona orbitale, la latitudine e longitudine e il parametro L-shell, che corrisponde all'insieme delle linee del campo magnetico terrestre che attraversano l'equatore magnetico a una distanza di L raggi terrestri.

Infine ho effettuato uno studio del valore del campo magnetico al variare di altitudine, latitudine e longitudine con l'ausilio del modello IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*).

# Capitolo 1

## La struttura della Terra, la ionosfera e i precursori sismici

L'obiettivo principale della missione CSES-Limadou è lo studio dei disturbi ionosferici, e in particolare la ricerca di una possibile correlazione temporale tra un evento sismico e una perturbazione di tipo elettromagnetico nella parte superiore della ionosfera stessa. In questo capitolo analizzeremo i parametri più importanti per questo tipo di analisi e daremo una spiegazione agli effetti responsabili dell'accoppiamento sismo-ionosferico, il fenomeno che costituisce l'oggetto dello studio. Partiremo da una descrizione della struttura interna della Terra e della stratificazione dell'atmosfera, in particolare della ionosfera. In seguito analizzeremo i precursori sismici, sia di carattere geologico che ionosferico, e vedremo come possono essere legati.

## 1.1 La struttura interna della terra e l'attività sismica

La struttura interna della Terra può essere suddivisa secondo le proprietà chimiche o secondo quelle meccaniche. Nel nostro caso siamo interessati alle proprietà meccaniche [1], per cui distinguiamo cinque zone: litosfera, astenosfera, mesosfera e nuclei esterno (fuso) e interno (solido). Tra queste, le prime due sono interessate da fenomeni sismici. La litosfera è infatti suddivisa in placche (o zolle) tettoniche [2], che possono collidere, scivolare o allontanarsi. Nel primo caso possono crearsi catene montuose o fosse oceaniche. Il secondo caso è un fenomeno conservativo, poichè non viene creata o distrutta crosta terrestre durante il processo. Al contrario, nel caso dell'allontanamento delle placche, la zona lasciata vuota viene riempita dal magma delle zone inferiori creando nuova crosta terrestre.

Tutti e tre i processi causano un accumulo di energia elastica che, dopo aver superato il punto di rottura, viene rilasciata sotto forma di onde elastiche (onde sismiche) casuando il terremoto.

L'energia rilasciata da un terremoto è comparabile a quella prodotta da un'esplosione nucleare e i sismologi la calcolano tramite la Magnitudo  $M$ , cioè una misura di energia meccanica basata sull'ampiezza delle onde sismiche. Più in particolare si usa la magnitudo riferita alle onde in superficie  $M_s$ , che è messa in relazione all'energia tramite una legge ricavata di Gutenberg e Richter [3]:

$$\log E = 1.56M_s + 11.8$$

Tutti i modelli e le interpretazione sulle cause di formazione di un terremoto sono d'accordo con il fatto che un evento sismico è preceduto da accumuli di deformazioni nella zona di frattura. L'aumento di sforzo in questa zona è

accompagnato da alcuni fenomeni naturali che sono detti *precursori* [4]

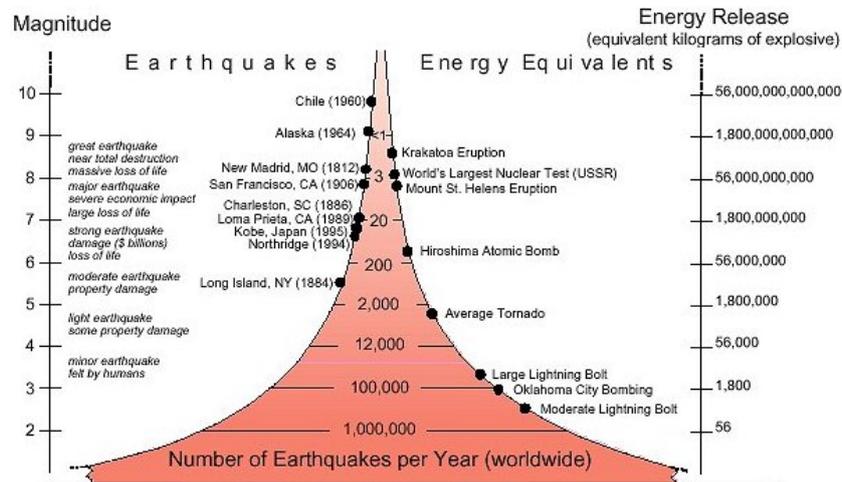


Figura 1.1: Confronto tra l'energia rilasciata da alcuni terremoti e da alcuni fenomeni sismici o eventi avvenuti, in kg di TNT equivalente.

Tra questi precursori sono presenti le emissioni elettromagnetiche sismogenetiche o *seismogenic electromagnetic emissions* (SEMEs), che possono essere studiate a terra ma anche con esperimenti su satelliti. Le EMEs di origine sismica sono presumibilmente connesse a terremoti nella litosfera e durante la loro propagazione attraverso la crosta terrestre e l'atmosfera le onde vengono attenuate, e solo le onde a frequenza estremamente bassa (ELF, *extremely low frequencies* con frequenza tra 3 e 30 Hz) e ultra bassa (ULF, *ultra low frequencies* con frequenza tra 300 e 3000 Hz) raggiungono la superficie della Terra e riescono a essere propagate nello spazio fino alle quote LEO (*Low Earth Orbit*) cui si trovano i satelliti come CSES. In particolare, se l'ipocentro è a una profondità di 10 km dalla superficie, le ULF con una frequenza di circa 10 Hz raggiungono la superficie terrestre con un'attenuazione minore di 10 Db. [5]

L'interazione delle EMEs con l'ambiente ionosferico può causare diversi tipi di perturbazioni, tra questi, le variazioni del flusso delle particelle intrappolate nelle Fasce di Van Allen, che verranno descritte nel dettaglio nel prossimo paragrafo, possono essere misurate attraverso il rivelatore di particelle HEPD.

## 1.2 Atmosfera e Magnetosfera

Anche l'atmosfera terrestre ha una struttura a strati: la *troposfera* è lo strato più interno e si estende fino a 20 km, la *stratosfera* fino a 50 km, la *mesosfera*, che parte dalla zona di *stratopausa*, ovvero il limite della stratosfera, la *termosfera*, che si estende fino a 85 km, e l'*esosfera*, dopo la quale inizia, per convenzione, lo *spazio*.

La Ionosfera si estende tra 50 km e 500 km di altitudine, comprendendo quindi parte della mesosfera e della termosfera. È una zona ricca di elettroni e ioni in un numero abbastanza alto da farli interagire con il campo magnetico terrestre, ed è formata da gas ionizzato da radiazioni e raggi X solari, e raggi cosmici.

Parlando di campo magnetico terrestre è bene introdurre anche un'altra zona, la *magnetosfera*, che si estende per 500 km e che comprende il campo magnetico terrestre originato dalle correnti elettriche del nucleo della Terra, le cui zone più esterne interagiscono con il vento solare. Esso è un gas altamente ionizzato formato da elettroni, protoni e ioni di elio a pochi keV proveniente dal Sole. Dunque il campo magnetico terrestre funge da schermo per il vento solare, risultando in una compressione del campo geomagnetico nella parte rivolta verso il Sole e in un'espansione nel lato opposto. Una conseguenza del campo magnetico terrestre è l'esistenza di particolari regioni dello spazio dove le particelle cariche rimangono intrappolate nel campo geomagnetico.

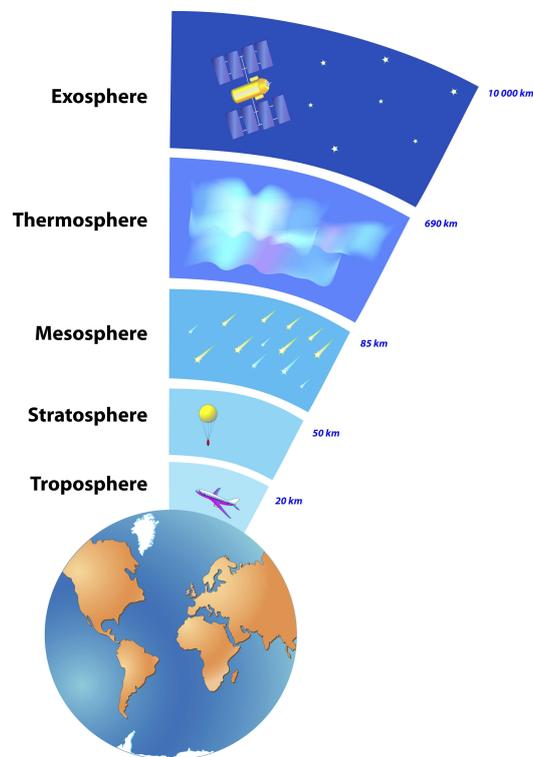


Figura 1.2: *Struttura dell'atmosfera terrestre*

Tali regioni, dette *Fasce di Van Allen* sono costituite da una fascia interna stabile ricca di protoni fino a centinaia di MeV ed elettroni fino a qualche MeV, e da una esterna più ricca di elettroni con energia tra 0.1 MeV e 10 MeV. Queste particelle sono sottoposte a tre tipi di movimento periodico che si sovrappongono all'interno delle fasce: la rotazione intorno alle linee di forza del campo magnetico, l'oscillazione tra due *mirror point* di una stessa linea di forza attorno al piano equatoriale e un moto di *drift* che fa muovere le particelle positive verso ovest e le negative verso est. I *mirror point* sono le posizioni in cui il vettore velocità della particella nella direzione del campo vale zero e le particelle invertono il proprio moto. Per una certa particella la posizione del punto specchio è determinata dal *pitch angle*, l'angolo tra la direzione della velocità e la linea di campo magnetico. Il pitch angle è

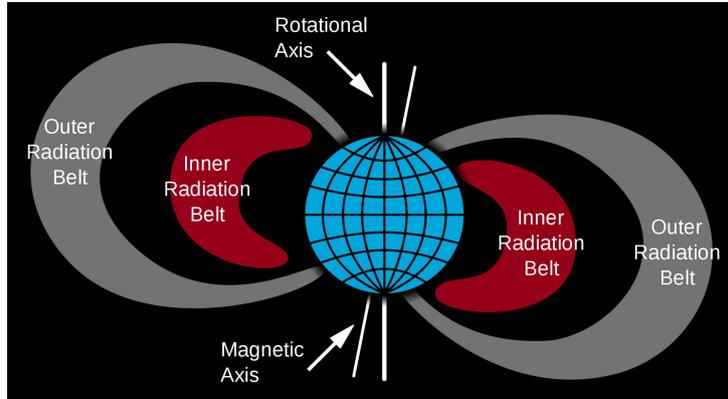


Figura 1.3: *Le fasce di Van Allen interna ed esterna rispetto agli assi rotazionale e magnetico*

definito come:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}}$$

e se misurato all'equatore permette di definire il "loss cone", cioè l'insieme dei valori del pitch angle equatoriale per cui i mirror point giacciono troppo in profondo nell'atmosfera e la particella corrispondente non è più intrappolata nella magnetosfera.

### 1.3 La struttura della ionosfera

La ionosfera è la regione più ionizzata dell'atmosfera e quella che più interagisce con il campo geomagnetico ed è divisa in regioni a seconda della concentrazione degli elettroni e dell'altitudine. Delle tre regioni in questione, D E e F, la più interessata dall'accoppiamento sismo-ionosferico è la F, che a sua volta si divide in F1 (da 140 a 200-250 km di altezza) e F2 (fino a 500 km). Nello strato F2 si trova una grande densità di plasma ( $10^{12}$  particelle/ $m^3$ ), è quindi necessario definire una grandezza, detta *lunghezza*

di Debye, che definisca la lunghezza minima entro cui le particelle che fanno parte del plasma possono diffondere [6]:

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k T}{N q^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica nel vuoto,  $k$  la costante di Boltzmann,  $T$  la temperatura,  $N$  la densità di carica e  $q$  la carica.

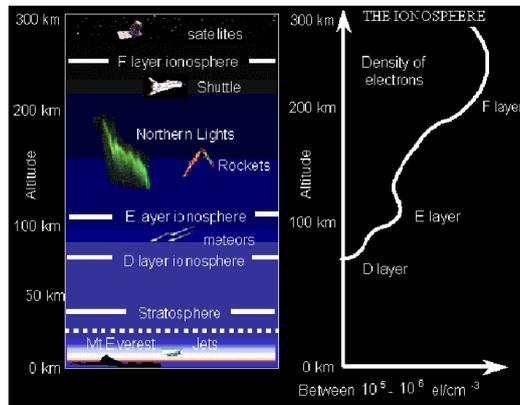


Figura 1.4: *Suddivisione e relativa altitudine dei vari strati della ionosfera*

Un'altra caratteristica del plasma è quella di poter riflettere onde di frequenza minore o uguale alla frequenza di plasma  $f_0$ , che è data da:

$$f_0 = 8.98\sqrt{n}$$

dove  $n$  è la concentrazione di elettroni.

Se un'onda verticale ha una frequenza maggiore della frequenza di plasma, essa può continuare a propagarsi verticalmente o al limite essere riflessa in zone ad altezza superiore poichè la concentrazione di elettroni tende ad aumentare fino 400 km, cioè nello strato F2. L'altitudine detta *altezza critica*  $h_m F2$  corrisponde al limite oltre il quale un'onda con frequenza maggiore di

quella della zona in cui si trova (quindi  $f_0F2$ ) può passare attraverso la ionosfera e propagarsi nello spazio. Questa frequenza è detto *frequenza critica*. Superata l'altezza critica le particelle sono controllate dal campo geomagnetico quindi diffondono lungo le sue linee di campo perpendicolarmente al campo elettrico nella ionosfera.

## 1.4 I precursori ionosferici

La prima volta in cui sono state osservate anomalie in alcuni parametri analizzati antecedenti ad un evento sismico è stato in occasione del terremoto di magnitudo  $M_w=9$  ( $M_w$ =magnitudo del momento sismico) in Alaska il 27 Marzo 1964. I dati sono stati presi con strumenti a terra e con il supporto del satellite canadese Alouette-1, che fu in grado di misurare il valore di  $f_0F2$  trovando discrepanze tra i valori antecedenti al terremoto e quelli registrati nei giorni precedenti. Inoltre furono trovate variazioni nelle concentrazioni di elettroni nella ionosfera e dunque mutamenti del plasma. La deviazione rispetto alla media della stessa ora calcolata con i valori dei 30 giorni precedenti all'evento è:

$$\Delta f_0F2 = (f_0F2_c - f_0F2_r) \times \frac{100}{f_0F2_r}$$

con  $f_0F2_c$  valore della frequenza corrente e  $f_0F2_r$  valore della frequenza di riferimento, ossia la media.

Sono stati riscontrati però alcuni problemi: la variazione può essere sia positiva che negativa, presentando quindi un doppio comportamento; inoltre la posizione dell'epicentro non coincide con la massima irregolarità rilevata, quindi il comportamento non è costante. Altri satelliti lanciati nelle LEO (*low earth orbit*, tra 160 e 2000 km di altitudine) hanno confermato questo tipo di comportamento in concomitanza di un terremoto: la variazione può

essere positiva o negativa e può presentarsi in zone e in tempi differenti.

Un'altro fenomeno precursore nella ionosfera è la grossa variazione delle concentrazioni di elettroni nella regione F. Unendo i dati raccolti in 40 anni (dal terremoto in Alaska del 1964 fino al 2004), sono stati catalogati tutti questi fenomeni precursori atmosferici (e in particolare ionosferici), classificandoli in quattro gruppi [7]:

- **Campi elettromagnetici:** include le onde ULF e VLF nelle linee di forza geomagnetiche in corrispondenza dell'epicentro del terremoto. In un range temporale che va da decine di minuti a decine di ore (con un picco di 12-24 ore per terremoti con magnitudo  $M \geq 5$ ) aumentano via via di intensità. Si è verificata la presenza di queste onde anche in zone della magnetosfera.
- **Irregolarità del plasma:** comprende la variazione della concentrazione di elettroni che abbiamo già menzionato e che sono state riscontrate sopra le zone di preparazione di un terremoto. È stata notata la correlazione tra variazione di densità ionica nel plasma tra 300 e 500 km e l'attività sismica, con un aumento di ioni leggeri  $H^+$  e  $He^+$  nei passaggi del satellite attorno all'epicentro ottenendo una diminuzione della massa media degli ioni. Irregolarità come questa sono sempre accompagnate da emissioni di ULF e VLF.
- **Precipitazione di particelle:** sono burst di particelle provenienti dalle fasce di Van Allen con un aumento di flusso di un'ordine di grandezza rispetto a condizioni normali e precedenti di circa 3 ore un terremoto di magnitudo  $M \geq 4$ . Il burst sembra essere composto da elettroni con energie di pochi MeV. Questo è l'effetto che si intende studiare con il rivelatore HEPD.

- Emissioni ottiche: le luci telluriche sono emissioni di luce che compaiono in cielo qualche secondo prima di un evento sismico. Il processo fisico che le genera è ancora oggetto di studio.



Figura 1.5: *Emissioni ottiche: un esempio di luce tellurica*

## 1.5 I precursori geologici

Sono fenomeni antecedenti al terremoto che avvengono nelle zone interne alla Terra o che provengono da essa. Il più noto è l'emissione di gas Radon [Rn] che si libera in presenza di fratture della crosta. Il Radon però può subire aumenti di concentrazione molto elevati precedentemente a un terremoto e questi aumenti possono presentarsi anche due settimane prima dell'evento e in zone non esattamente concomitanti con la faglia. Inoltre possono esserci aumenti e diminuzioni di queste concentrazioni a causa della continua compressione ed espansione delle faglie durante l'accumulo di energia elastica. Un altro fenomeno è la formazione di bolle gassose formate da  $CO_2$  e He, che comporta altri due fenomeni:

- La generazione di onde acustiche di gravità (*acoustic gravity wave AGW*), emissioni acustiche a frequenza superbassa SLF di circa 50 Hz modu-

late da onde a frequenza estremamente bassa ELF di pochi Hz che si generano quando interagiscono terreno e moto dell'aria.

- Trasporto di aerosoli di gas pesanti come Hg, As, Sb da parte delle bolle di gas

Un altro fenomeno precursore è legato alla propagazione di ULF (da 0.3 kHz a 3 kHz) e VLF (da 3 KHz a 30 kHz) che accompagna la variazione della componente verticale del campo elettrico terrestre  $E_z$ , che ha un valore di  $100 \frac{V}{m}$  in condizioni di tempo sereno e che può aumentare fino a  $1 \frac{kV}{m}$  prima che si verifichi un terremoto di magnitudo  $M \geq 5$  [8] [9]

## 1.6 La Fisica dell'accoppiamento sismo-ionosferico

### 1.6.1 Introduzione all'accoppiamento sismo-ionosferico

Tutti i fenomeni finora descritti erano noti già negli anni '70 [10] ma non si era in possesso di una teoria capace di legarli insieme, in particolare le anomalie del campo elettrico e l'emissione di Radon. Inizialmente si postulò un legame tra la concentrazione di Radon e la variazione di frequenza critica, basandosi puramente su una correlazione temporale tra i due fenomeni: infatti all'aumentare della concentrazione del gas la frequenza critica  $f_0F2$  diminuisce. Studi successivi tramite satelliti rilevarono nelle zone di preparazione di un terremoto un certo incremento di ULF e VLF e confermarono la presenza di burst particellari dalle fasce di Van Allen.

Prima di descrivere la fisica dell'accoppiamento sismo-ionosferico è bene parlare del modello utilizzato per spiegare la ionizzazione dell'aria e la generazione di un campo elettrico capace di comportare un'anomalia in quello terrestre.

Questo modello descrive la formazione di ioni  $O_2^+$  sotto l'azione ionizzante del gas precursori precedentemente descritti e rilasciati in atmosfera, risultato di ionizzazione diretta e scambio di cariche tra uno ione  $N_2^+$  e ioni  $O^-$  e  $O_2^-$ . Gli ioni nella troposfera possono subire idratazione (vista la massiccia presenza di vapore acqueo) e formare aggregati di ioni, positivi o negativi, detti *cluster*. La parte di gas più vicino alla superficie terrestre viene ionizzato prima e prende il nome di *near ground plasma*. Poichè ioni positivi e negativi hanno mobilità diverse si crea una carica sulla superficie che distorce il campo elettrico vicino al terreno. Questo fenomeno si chiama *Effetto Elettrodo* (Hoppler, 1967): gli ioni positivi migrano verso la superficie terrestre a causa del campo elettrico diretto verso il basso e si ricombinano creando uno strato di carica positiva; gli elettroni fanno lo stesso verso l'alto creando uno strato di carica negativa. In questo modo si crea un elettrodo con campo elettrico locale  $E_l$  rivolto verso l'alto che diminuisce l'intensità di quello terrestre e che forma una carica sulla superficie. Nella zona interessata da questo fenomeno, detta *electrode layer*, il campo locale è minore di quello normale mentre nella zona superiore è maggiore per la presenza di carica elettrica. Questa carica può continuare a ricombinarsi con gli ioni o essere intensificata dagli aerosoli.

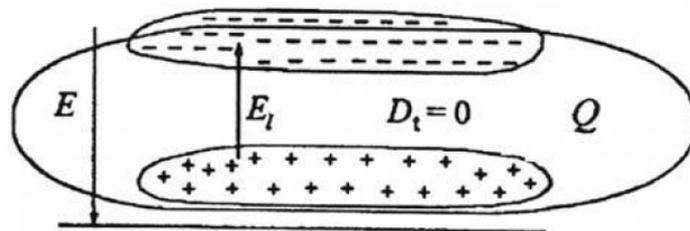


Figura 1.6: *Schematizzazione dell'effetto elettrodo*

A questo punto bisogna collegare questo fenomeno con l'emissione di ULF e VLF: una prima spiegazione vide l'impiego delle AGW generate prima del terremoto, ipotizzando che potessero eccitare le molecole in aria e quindi contribuire a creare il campo elettrico anomalo. Questa teoria è stata smentita poiché le onde AGW sono poco o per nulla penetranti nella ionosfera, ma essendovi comunque presenti si è cercata una nuova strada: si è rilevato sperimentalmente e poi modellizzato il campo elettrico anomalo nelle regioni E e F della ionosfera, osservando che mantiene un verso di propagazione verticale. A seconda della direzione (verso l'alto o verso il basso) ci può essere una diminuzione o un aumento della concentrazione di ioni nella regione E, motivo per cui la variazione di frequenza critica può essere positiva o negativa. [11]

Nella regione F si è addirittura ipotizzata una generazione di onde AGW da parte del campo elettrico, che propagandosi crea correnti elettriche e moti d'aria turbolenti oltre che moti di componenti neutre e ionizzate che provocano variazioni di densità degli ioni con conseguente irregolarità del plasma. Inoltre le AGW potrebbero essere la causa delle emissioni ottiche. Inoltre è stata provata una coesistenza spaziale di queste irregolarità del plasma e della presenza di emissioni ULF e VLF: le irregolarità creano un condotto per le ULF e VLF favorendone la propagazione e la loro concentrazione in alcune L-shells. A questo punto interagiscono tra di loro (aiutate dal fatto di essere più o meno nello stesso range di basse frequenze) come onde *Alfven*, ossia onde magnetoidrodinamiche, modificando il pitch-angle delle particelle intrappolate nella ionosfera [12]. L'interazione con i protoni e gli elettroni ne provoca lo scattering e la precipitazione sotto forma di burst rilevati a 500-800 km.

## 1.6.2 L'accoppiamento sismo-ionosferico

L'accoppiamento sismo-ionosferico lega tutti i meccanismi e i fenomeni che abbiamo descritto in precedenza. Nell'area di preparazione di un terremoto si accumula energia elastica per effetto delle contrazioni della crosta e si rilascia gas Radon, in particolare il suo isotopo  $^{222}\text{Rn}$  che ionizza la parte dell'atmosfera più vicina alla terra creando il *near ground plasma*, formato da cluster di ioni a bassa velocità di ricombinazione (a causa della ingente quantità di vapore acqueo presente e dunque per l'alto momento di dipolo dell'acqua). Gli ioni positivi migrano verso il basso seguendo il campo elettrico, mentre i negativi si spostano in zone superiori: si crea così l'effetto elettrodo, che crea un campo elettrico diretto verso l'alto. Questo campo lega le due zone di carica opposta generando con quello terrestre un campo elettrico anomalo. Tra le due zone è presente un cluster neutro di ioni che viene distrutto dalle onde AGW favorendo un'ulteriore ionizzazione della parte di atmosfera più vicina alla superficie terrestre. Il campo elettrico anomalo comporta inoltre variazioni nelle concentrazioni di ioni provocando irregolarità nel plasma più vicino al terreno, il *near ground plasma*, irregolarità che si manifestano tramite emissioni di ULF e VLF.

La componente del campo anomalo perpendicolare alle linee geomagnetiche penetra nello strato E della ionosfera variando la concentrazione di elettroni, la cui variazione può essere positiva o negativa con conseguente cambiamento nel valore della frequenza critica  $f_0F2$ .

Gli effetti nello strato F della ionosfera sono più importanti: la formazione di onde AGW da parte dei moti turbolenti conseguenza del campo elettrico anomalo e successiva creazione di irregolarità del plasma con il supporto dell'*effetto Joule* (la temperatura degli ioni aumenta in presenza del campo), e la generazione di grosse variazioni nella concentrazione degli elettroni nella

regione F2 che portano a variazioni della massa degli ioni.

Di questi due effetti il primo è quello più importante poichè si crea il famoso condotto per le ULF e VLF, emesse grazie alle irregolarità del near ground plasma e dirette verso l'alto interagendo con le particelle intrappolate nelle L-shells e provocandone la caduta come burst nella regione D. Secondo i risultati preliminari di esperimenti precedenti [13], questi burst sembrano avvenire circa 2-5 ore prima di un terremoto e un satellite che si trovasse nella L-shell interessata potrebbe rivelare le particelle misurando un'incremento nel flusso.

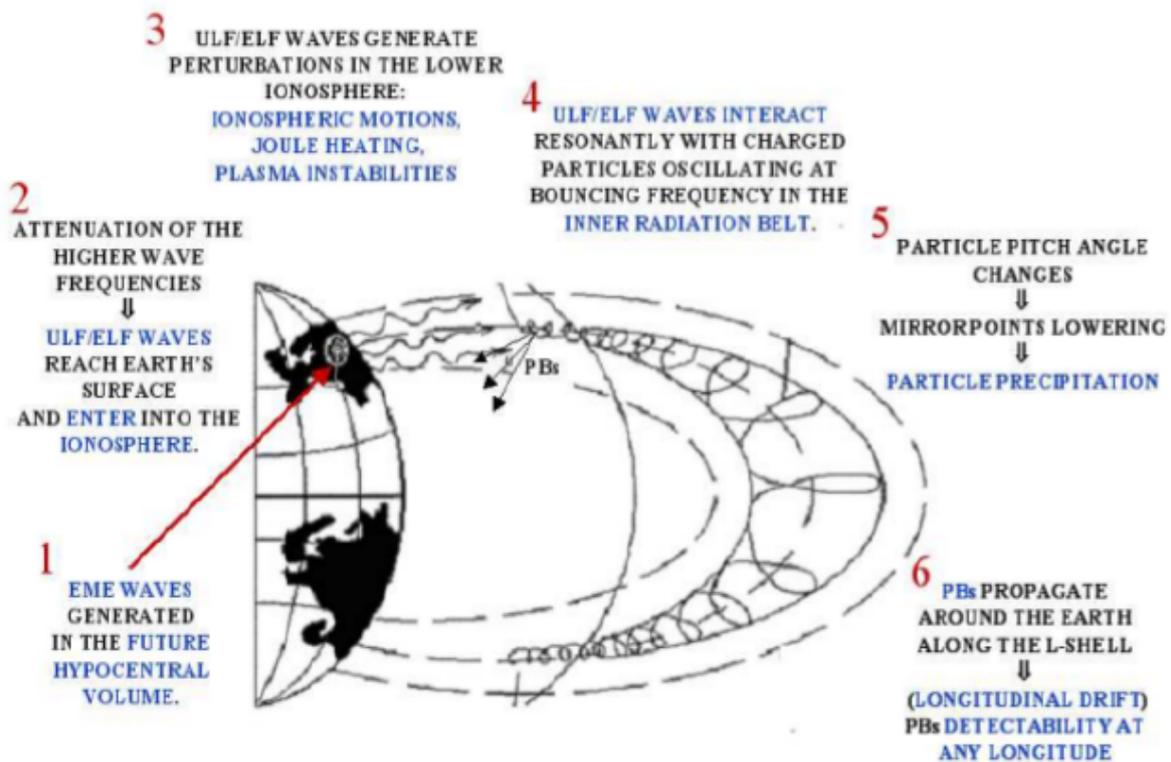


Figura 1.7: *Rappresentazione schematica del processo dei burst di particelle*[14]

### **1.6.3 Interazione tra le emissioni elettromagnetiche EME e le Fasce di Van Allen**

Parlando delle EMEs, abbiamo detto che possono essere generate nella zona di un terremoto tempo prima dell'evento (anche parecchie ore prima) e possono propagarsi nella ionosfera sotto forma di onde a basse frequenze. Arrivate nella ionosfera possono essere catturate dal campo geomagnetico e propagarsi lungo le sue linee di campo. A questo punto possono interagire con le particelle intrappolate nella fascia interna e farle precipitare. La correlazione tra i burst di particelle cariche ad alta energia e l'attività sismica è stata sottolineata per la prima volta verso la fine degli anni ottanta. Addirittura fu trovato che le variazioni del flusso di particelle apparivano parecchie ore prima dello shock iniziale. La caratteristica rilevante è che, a causa del drift delle particelle intrappolate, il burst di origine sismica può essere osservato non solo sopra l'epicentro dell'evento, ma anche a una longitudine in cui il satellite attraversa la L-shell disturbata.

Quest'ultima è un parametro che comprende un certo set di linee di campo magnetico, in particolare quelle che intercettano l'equatore magnetico a una distanza dal centro della Terra pari a  $L$  raggi terrestri: un valore di  $L=2$ , per esempio, descrive tutte le linee di campo a una distanza pari a 2 volte il raggio terrestre.

Esperimenti durante gli anni novanta hanno confermato questo fenomeno, la cui spiegazione si basa sul disturbo locale del flusso di particelle causato dalle emissioni elettromagnetiche ULF di origine sismica. Queste EME si possono propagare verso l'alto attraverso la ionosfera e nella magnetosfera. Ad una certa altitudine possono essere catturate nel campo geomagnetico e propagarsi come onde Alfvén lungo le linee del campo geomagnetico. Una volta raggiunta la fascia di Van Allen interna, le onde Alfvén iniziano a interagire

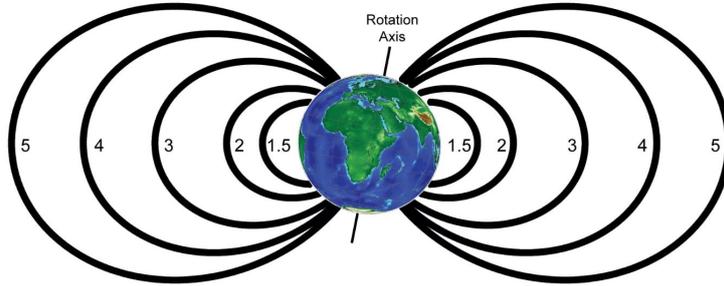


Figura 1.8: *Mappa delle L-Shell*

con le particelle intrappolate, causandone una modifica del *pitch angle*.

Le particelle precipitate driftano verso la terra lungo la L-shell corrispondente alla posizione dell'epicentro del terremoto. Da quanto detto, il burst di origine sismica può essere osservato non solo sopra l'epicentro ma anche a una qualunque longitudine in cui il satellite attraversa la L-shell disturbata [15].

È stata studiata la correlazione temporale tra burst di particelle e un set di terremoti con magnitudo  $M > 4$  in una L-shell minore di 2 (poichè la parte principale dei terremoti è localizzata nella regione equatoriale) e il valore di  $\Delta T$  è stato definito come:

$$\Delta T = T_E - T_B$$

dove  $T_E$  e  $T_B$  sono i tempi in cui avvengono rispettivamente un terremoto e un burst. Un risultato positivo ci dice che i burst di particelle sono buoni precursori a breve termine di un terremoto. Allo stesso modo è stata studiata anche la correlazione spaziale tra terremoto e burst:

$$\Delta L = L_E - L_B$$

dove  $L_E$  è la L-shell del terremoto e  $L_B$  quella del satellite in corrispondenza del burst. Per  $L_E$  si intende la coordinata L del punto a una certa

altitudine sopra l'epicentro del terremoto. Questa altitudine coincide con quella della regione in cui la EME è catturata dal campo geomagnetico e si propaga nella magnetosfera lungo le linee di campo, ed è circa 300 km. Dunque il burst di particelle e la EME devono avere la stessa L-shell (che può essere ricavata dai dati sperimentali delle osservazioni dei burst)

L'analisi dei dati mostra che la distribuzione di  $\Delta T$  non presenta picchi quando  $\Delta L > 0.5$ , cioè la L-shell del terremoto differisce profondamente da quella del burst, supportando quindi una correlazione temporale e spaziale tra terremoto e precipitazione.

## Capitolo 2

# La missione CSES-Limadou e il satellite

### 2.1 Scopo della missione e collaborazioni

La missione spaziale CSES-Limadou <sup>1</sup>, si occupa di uno studio quinquennale sui legami tra fenomeni elettromagnetici e attività geofisica, con lo scopo di trovare una correlazione spazio-temporale tra le variazioni di grandezze fisiche nello spazio e l'evento di terremoti di grande intensità [16].

La missione vede la collaborazione delle agenzie spaziali Italiana (ASI) e Cinese (CNSA), oltre alla partecipazione di enti di ricerca come l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). L'apporto principale della divisione italiana della missione è stata la realizzazione del rivelatore di particelle HEPD (High Energy Particle Detector), l'unico interamente a responsabilità italiana tra i rivelatori

---

<sup>1</sup>CSES è l'acronimo di *China Seismo Electromagnetic Satellite*, Limadou è la translitterazione in Mandarino del nome del missionario italiano del *XVI*° secolo Matteo Ricci

presenti sul satellite.

## 2.2 Il Satellite CSES

Il Satellite CSES è basato sulla piattaforma cinese CAST2000 [17], dotata di un sistema di stabilizzazione a tre assi, di un'unità di alimentazione a batterie di ioni di Litio, pannelli fotovoltaici (la cui potenza erogata è di 330 W per far funzionare i *payload*, il carico utile costituito dai rivelatori e dall'elettronica), e un sistema di quattro propulsori per il mantenimento dell'orbita.

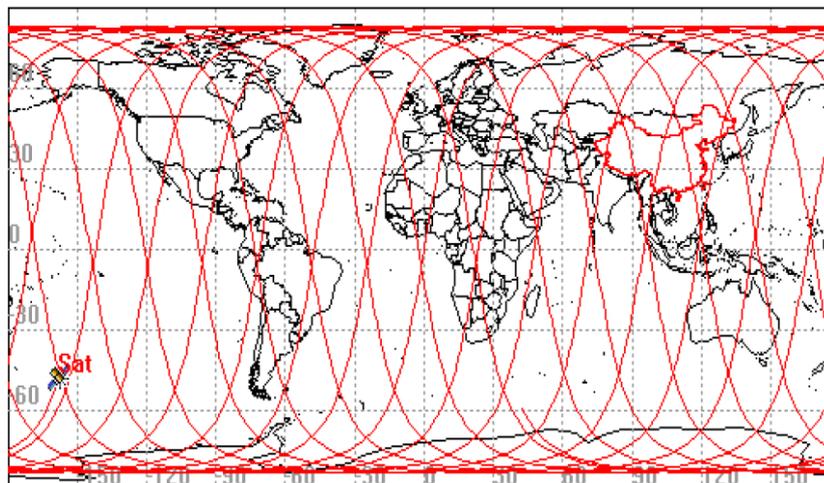


Figura 2.1: *Percorso di CSES dopo 1 giorno*

Parlando dell'orbita, essa è quasi eliosincrona, cioè il satellite passerà sopra lo stesso punto della Terra sempre alla stessa ora solare locale; l'altitudine è compresa tra 497 e 523 km, con un'inclinazione orbitale di circa  $97.4^\circ$  e un periodo di 94 minuti [18]. In tutto vengono eseguite 15 orbite al giorno e una stessa orbita viene ripetuta ogni 5 giorni. Tutto ciò permette al satellite di coprire quasi tutta la superficie terrestre e quindi ha un'alta probabilità di

individuare un'evento sismico.

La strumentazione di cui è dotato il satellite è sensibile a vari tipi di radiazioni, ad esempio raggi cosmici o particelle provenienti da flare solari e altre particelle anche non provenienti dalla magnetosfera. C'è bisogno dunque di un'analisi accurata per discriminare la provenienza delle particelle rivelate.

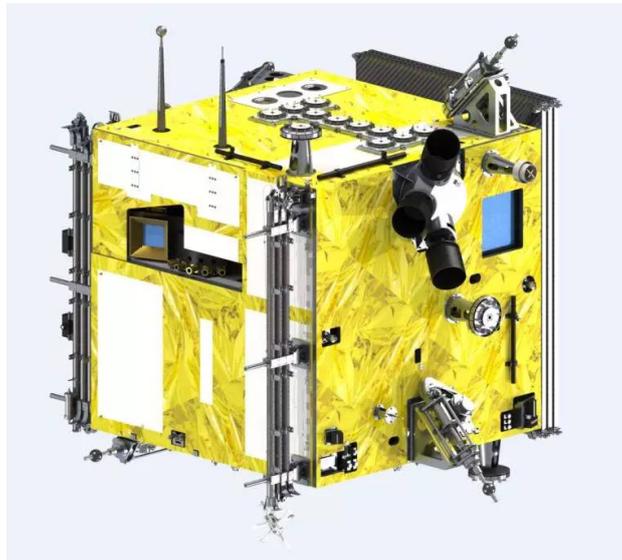


Figura 2.2: *Il satellite CSES*

La struttura principale del satellite ha dimensioni 145 cm (Y)×144 cm (Z)×143 cm (X), ma in configurazione di volo con l'apertura dei pannelli solari e con i *boom* spiegati può arrivare a circa 10 m. Il sistema di riferimento del satellite una volta in orbita è tale che: l'asse X rappresenta la direzione dello stesso mentre l'asse Z punta verso lo zenith.

Per ridurre le possibilità di interferenza per i payload (la rotazione dei pannelli solari o il sistema di propulsione possono causarle), il satellite ha due regioni di lavoro: la *payload working zone* ( $-65^\circ < \text{latitudine} < 65^\circ$ ) in cui la strumentazione è in funzione, e la *platform adjustment zone* (*latitudine* >

$65^\circ e < -65^\circ$ ) in cui i payload sono spenti e si attivano i sistemi di propulsione e stabilizzazione.

## 2.3 Il rivelatore HEPD

### 2.3.1 Specifiche tecniche del rivelatore

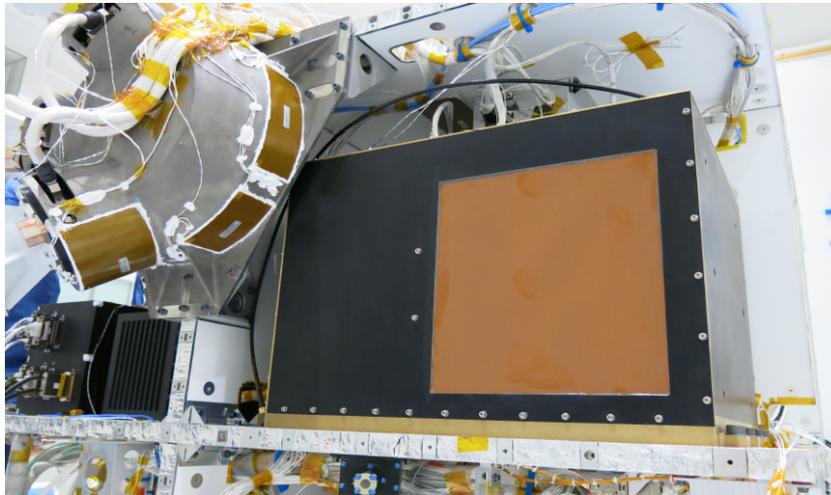


Figura 2.3: *HEPD montato a bordo del satellite CSES*

Il rivelatore *High Energy Particle Detector* (HEPD), contenuto in una scatola di alluminio  $20 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ , è l'unico strumento non cinese presente sul satellite. È stato costruito da una collaborazione italiana tra varie sezioni dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e alcune università nel territorio. Ha lo scopo di discriminare i vari tipi di particelle entranti nell'apparato, fornirne direzione e verso, misurarne il *pitch angle* e l'energia. L'obiettivo principale è la correlazione tra le particelle misurate e quelle presenti nella fascia di Van Allen per determinarne la regione magnetosferica di provenienza e ottenere lo spettro energetico del *burst*. Il range energetico è di

3-100 MeV per gli elettroni e di 30-200 MeV per i protoni. HEPD funziona tra  $-10^\circ$  e  $+45^\circ$ , necessitando di una potenza minore di 30 W; il suo peso è di circa 43 kg (elettronica inclusa).

In tutto sono stati realizzati e testati quattro modelli per HEPD: *Electrical Model* (EM), *Structural and Thermal Model* (STM), *Qualification Model* (QM), *Flight Model* (FM) [19].

### 2.3.2 Componenti di HEPD

HEPD è diviso in vari sotto detector che insieme permettono di rivelare elettroni, protoni e nuclei leggeri [20]. In tutto HEPD è costituito da:

- un sistema di *tracking* costituito da due piani di semiconduttori al silicio, adibiti alla ricostruzione della traiettoria della particella incidente e al calcolo del valore assoluto della carica tramite misure della ionizzazione prodotta nei layer. Inoltre è usato per discriminare il tipo di particella passante tramite il rilascio energetico nel silicio in funzione dell'energia totale depositata nel calorimetro.
- un sistema di *trigger* costituito da un layer di scintillatori plastici diviso in sei *paddle*, ognuna letta da due fotomoltiplicatori che generano un segnale di trigger che sincronizza l'acquisizione dati per tutto il rivelatore.
- un *calorimetro* composto da una prima sezione di 16 piani di scintillatori plastici e una matrice  $3 \times 3$  di cristalli di LYSO che ha lo scopo di misurare l'energia depositata.
- un *sistema di anticoincidenza*, composto da 5 piani di scintillatori plastici (4 laterali e uno in fondo al calorimetro) letti da fotomoltiplicatori

che ha lo scopo di rivelare particelle che non sono contenute interamente nel calorimetro o che ne entrano lateralmente.

L'*housing* di HEPD è in fibra di carbonio e Nomex (una sostanza con alta resistività termica), mentre il resto del contenitore (compresa la parte elettronica) è in alluminio alveolare (*aluminium honeycomb*). La finestra da cui entrano le particelle è isolata termicamente da uno strato di mylar, un polietilene che riflette il calore di irraggiamento che altrimenti potrebbe interferire con la rivelazione.

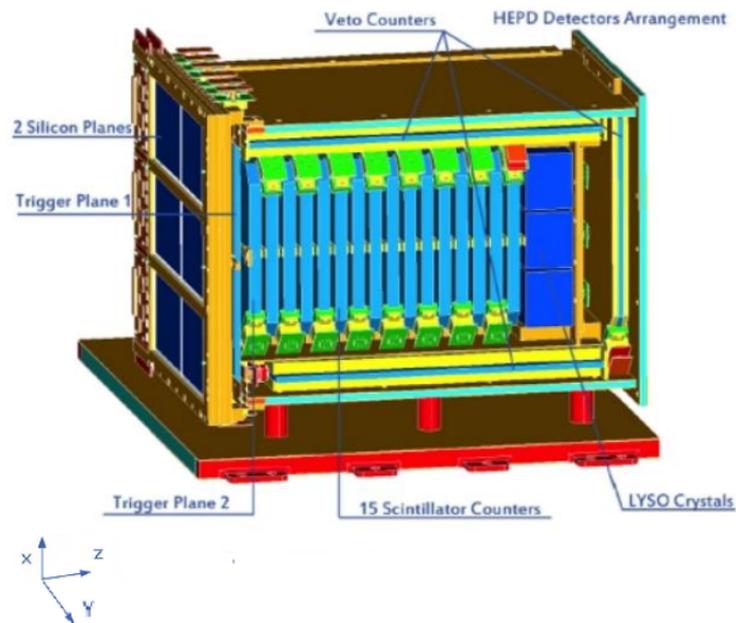


Figura 2.4: *Modello CAD del rivelatore HEPD. È possibile notare i vari sotto detector*

### 2.3.3 Il Tracker

Il sistema di tracking è composto da due piani (esterno e interno) di rivelatori al silicio a doppia faccia posizionati nella parte superiore dell'intero apparato

e separati di 1 cm. Entrambi sono larghi 213.2 mm e alti 214.8 mm. Il vantaggio maggiore dell'impiego di rivelatori a doppia faccia invece che a faccia singola sta nello spessore totale più piccolo, che porta a una riduzione di effetti indesiderati come lo scattering multiplo Coulombiano [21].

Il rivelatore al silicio è un rivelatore a semiconduttore, un solido che gode di proprietà particolari. In generale nei solidi i livelli di energia sono distribuiti in bande di energia separate da bande proibite: la banda di energia più alta è detta *banda di conduzione* ed è costituita da elettroni separati dall'atomo genitore e liberi di muoversi nel cristallo; gli elettroni nella *banda di valenza*, la banda più bassa (l'ultima riempita), sono invece legati di più al rispettivo atomo; queste due bande sono separate da una *banda proibita* che ha una grandezza variabile a seconda del tipo di solido. Nei conduttori questa gap è inesistente e le bande di conduzione e di valenza si sovrappongono, negli isolanti è molto grande. Nei semiconduttori la gap è di dimensioni intermedie permettendo a pochi elettroni di passare in banda di conduzione per energia termica. Il motivo dell'impiego dei semiconduttori nell'elettronica e nella fisica delle particelle è spiegato dal fatto che le loro proprietà elettroniche possono essere controllate mediante una pratica detta *drogaggio*, che consiste nell'aggiunta di piccole quantità di "impurità" (dette appunto "droganti"), che possono creare un eccesso di elettroni nella banda di conduzione o di lacune in banda di valenza.

A seconda del drogaggio si indicano rispettivamente come semiconduttori di tipo n o di tipo p. Il funzionamento dei semiconduttori nella rivelazione di particelle dipende molto dal concetto di *giunzione*, cioè la creazione di un contatto tra due semiconduttori drogati in modo diverso: a causa della presenza di lacune e di elettroni nei due lati della giunzione c'è una migrazione di lacune nella direzione della regione n e una uguale di elettroni nella

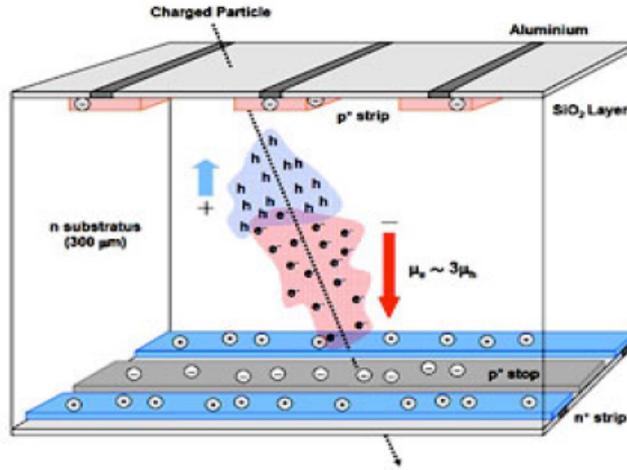


Figura 2.5: Una particella carica attraversa il sensore producendo coppie elettrone/lacuna che driftano in direzioni opposte

direzione della regione p. Come conseguenza gli elettroni riempiono le buche della zona p e le buche catturano gli elettroni della zona n, causando dunque una carica, un conseguente campo elettrico e quindi una differenza di potenziale nella giunzione (*potenziale di contatto*). La regione in cui il potenziale cambia è detta *depletion region*. In HEPD, quando una particella ionizzante attraversa i sensori, nella *depletion region* si crea una coppia elettrone-lacuna, le cui componenti driftano in direzioni opposte: le lacune sono raccolte dalla zona p e gli elettroni dalla zona n. Dalla distribuzione della carica di ionizzazione raccolta dalle due zone si può ricostruire la coordinata del punto di attraversamento [22].

Nel tracker ogni piano di silicio è diviso lungo l'asse X in 3 sezioni indipendenti e identiche chiamate *top*, *central* e *bottom ladder*. Ogni ladder è a sua volta diviso nei due sensori di spessore 300 μm che consistono nella zona p e nella zona n.

### 2.3.4 Il Trigger

Il sistema di trigger è formato da un piano sottile di scintillatori plastici di dimensioni  $20 \times 18 \times 0.5 \text{ cm}^3$ , diviso in 6 segmenti di dimensioni  $20 \times 3 \times 0.5 \text{ cm}^3$ , a loro volta letti da due fotomoltiplicatori (PMTs) per segmento posizionati agli estremi [19]. I compiti del trigger sono:

- dare il segnale di inizio presa dati agli altri rivelatori (necessita quindi di un tempo di risposta molto basso)
- una determinazione della perdita di energia per ionizzazione prodotta
- la possibilità di rimuovere eventi con più di una particella coinvolta (eventi multiparticella)

### 2.3.5 Il Calorimetro

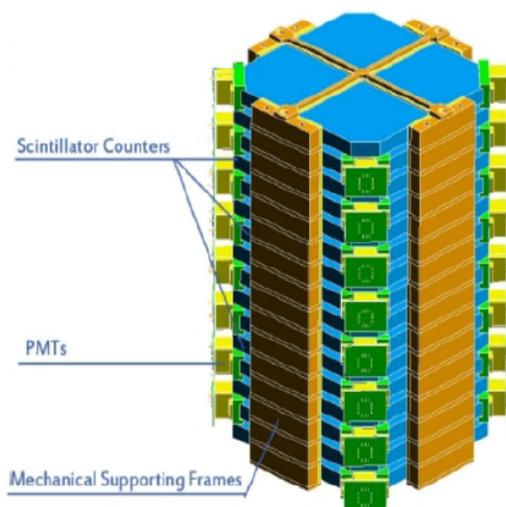


Figura 2.6: *Schema del calorimetro di HEPD*

I 16 piani di scintillatori formano la parte superiore del calorimetro, hanno dimensioni  $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$  e sono accoppiati a due PMTs per piano posti ad angoli alternati. La parte inferiore consiste in una matrice di  $3 \times 3$  cristalli di LYSO (un cristallo scintillatore organico, Ortosilicato di Ittrio e Lutezio dopato al Cerio), che forma un ulteriore piano di  $15 \times 15 \times 4 \text{ cm}^3$ . [23] Lo scopo del calorimetro è la misura del deposito di energia e del range delle particelle incidenti. Il LYSO contribuisce ad aumentare il range energetico rivelabile dalla torre, essendo più denso di un normale scintillatore plastico e dotato di uno spessore maggiore con alta densità ( $d = 7.3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ). In fisica delle particelle i fotomoltiplicatori sono utilizzati per convertire la luce in corrente elettrica misurabile: sono costituiti da un catodo fatto di materiale fotosensibile (detto *fotocatodo*), da una serie di dinodi (che costituiscono la *sezione moltiplicatrice*) e da un anodo da cui il segnale viene preso. Quando un fotone (proveniente ad esempio da uno scintillatore) colpisce il fotocatodo, un elettrone viene emesso per effetto fotoelettrico; grazie al voltaggio applicato, l'elettrone viene accelerato e diretto verso il primo dinodo, agli elettroni del quale passa tutta la sua energia. Vengono quindi emessi elettroni secondari, a loro volta accelerati verso il dinodo successivo creando un processo a cascata.

Il fattore di amplificazione, o *guadagno*, di un fotomoltiplicatore dipende dal numero di dinodi nella sezione moltiplicatrice e dal fattore di emissione secondaria  $\delta$ , che è funzione dell'energia dell'elettrone primario. Assumendo che il voltaggio sia ugualmente diviso tra gli  $n$  dinodi, il guadagno  $G$  totale del fotomoltiplicatore è [22]:

$$G = \delta^n$$

I fotomoltiplicatori del rivelatore HEPD sono composti da un layer fotosensibile che ne costituisce il fotocatodo e che emette elettroni quando colpito

da luce in un range specifico di lunghezza d'onda. In seguito sono presenti i dinodi e l'anodo, tenuto ad alto voltaggio. Gli elettroni emessi dal fotocatodo sono accelerati da forti campi elettrici verso il primo dinodo causando poi emissione secondaria di altri elettroni. Arrivando infine sull'anodo formano l'impulso di corrente. Il guadagno dei fotomoltiplicatori montati su HEPD è di  $10^5 - 10^6$ .

### 2.3.6 Il VETO

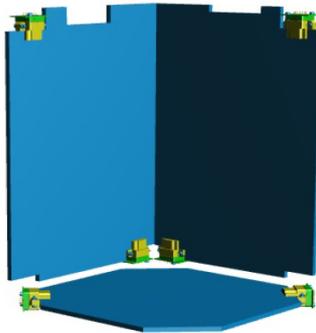


Figura 2.7: *Schema del bottom layer e di due layer laterali dei cinque che costituiscono il VETO*

I cinque scintillatori che costituiscono il VETO sono posti ai lati (quattro) e alla base (uno). Quelli paralleli all'asse X hanno dimensioni  $199.72 \times 5 \times 322.40 \text{ cm}^3$ , quelli paralleli all'asse Y  $5 \times 170 \times 322.4 \text{ cm}^3$  e quello alla base è alto 150 mm con uno spessore di 5 mm. Per ogni piano ci sono due fotomoltiplicatori, dunque dieci in totale. Il VETO ha la funzione di anticoincidenza: se un evento rivelato ha un'interazione con il VETO, viene scartato [23]. Infatti tutte le particelle che entrano da direzioni laterali o dal fondo vengono scartate, e con esse tutte quelle che non depositano la loro intera energia nel rivelatore.

## 2.4 Elettronica di HEPD

Il detector HEPD è possiede un sottosistema di elettronica (*electronics subsystem* ELS), composto dalle seguenti schede:

- Power Control Board: responsabile dell'alimentazione elettrica da fornire agli altri componenti dell'ELS.
- CPU Board: responsabile del controllo dello stato dell'intero detector e della comunicazione con la piattaforma del satellite.
- EASIROC/Trigger Board (figura 2.8): responsabile della generazione dell'impulso di trigger per l'acquisizione. È composta da due chip EASIROC, responsabili della lettura dei due canali dei PMT del detector.
- Data Acquisition Board (DAQ): responsabile del processamento, della compressione e delle formattazione degli eventi durante l'acquisizione.

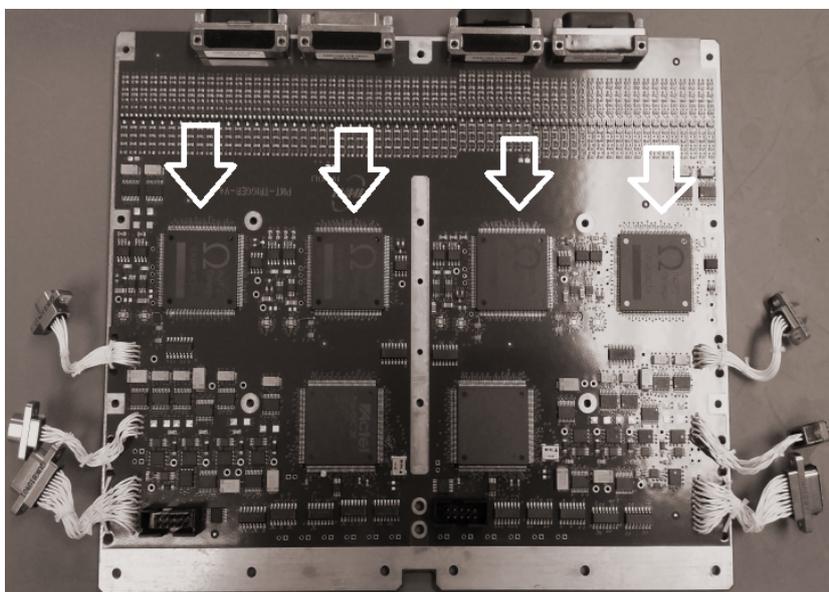


Figura 2.8: La EASIROC/trigger board. I chip EASIROC sono indicati dalle frecce, insieme agli altri due da usare in caso di guasti

## Capitolo 3

# Analisi preliminare del rate di acquisizione dello strumento HEPD

In questo capitolo viene descritta un'analisi preliminare che ho svolto sui dati di volo dal rivelatore HEPD. Questi vengono inviati a terra in formato binario, successivamente vengono processati e convertiti in formato leggibile per l'analisi. Ho svolto quest'ultima utilizzando il pacchetto software ROOT sviluppato dal CERN di Ginevra.

Il satellite CSES è stato lanciato il 2 Febbraio 2018. Subito dopo il lancio è iniziata la fase di *commissioning* del rivelatore HEPD, durante la quale sono state testate diverse configurazioni dello stesso. Queste configurazioni corrispondono a diversi modi di acquisizione per lo strumento, ognuna può discriminare particelle in modo da registrare solo quelle che arrivano oltre un certo piano di calorimetro (si parla in questo caso di *maschera di trigger*) e può riferirsi a una soglia diversa di voltaggio dei due chip EASIROC (*Extended Analogue SiPM Integrated Read Out Chips*), visibili in figura 2.8 e di

cui abbiamo parlato nel capitolo 2, ossia chip a 32 canali (uno per ogni fotomoltiplicatore dello strumento), responsabili della generazione dell'impulso di trigger per l'acquisizione e della lettura dei dati dei PMT.

Dal 12 Febbraio 2018 il rivelatore HEPD è stato testato con diverse configurazioni per:

- studiare il rate di acquisizione lungo le orbite in diverse configurazioni di trigger
- studiare e definire una soglia di trigger ottimale in volo
- effettuare la calibrazione di volo da confrontare con i risultati dei test a terra

È necessario infatti verificare la risposta del rivelatore a un ambiente spaziale. I test a terra prevedevano test presso acceleratori di elettroni e protoni, in cui il rivelatore veniva colpito da una certa direzione (perpendicolare al rivelatore per esempio). Nello spazio il rivelatore può essere colpito da qualunque direzione e da particelle con diverse energie, e questa differenza tra ambiente spaziale e terrestre ha come conseguenza la necessità di testare nuovamente soglie e maschere di trigger diverse.

Nella figura 3.1 è mostrata la risposta di un singolo fotomoltiplicatore posto su una barra di trigger. In nero è riportata la distribuzione del segnale con dati in volo, in rosso la distribuzione di un'acquisizione pre-lancio di muoni. È possibile notare che i piedistalli (cioè i picchi più a sinistra, relativi al valore misurato quando non c'è segnale elettrico in input) e i picchi delle MIP (particelle a minima ionizzazione, che in volo corrispondono principalmente a protoni molto energetici o elettroni) sono nella stessa posizione in entrambi i casi. Ciò conferma un comportamento simile del rivelatore a terra

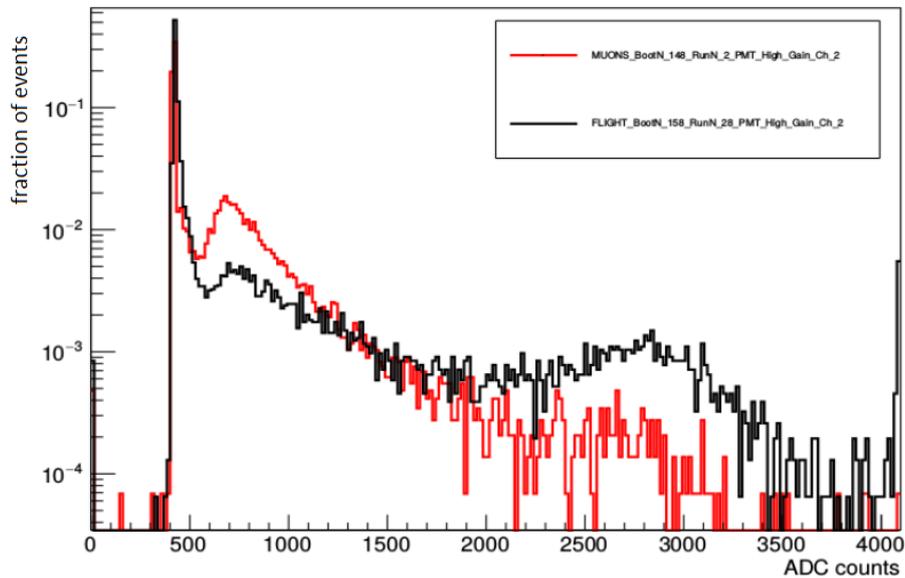


Figura 3.1: *Confronto delle distribuzioni del segnale su una barra di trigger tra un'acquisizione pre-lancio di muoni (ROSSO) e i dati in volo (NERO)*

e in volo. Nei segnali in volo si può notare un terzo picco a circa 2500-3000 conteggi ADC, dovuto al segnale rilasciato da protoni di bassa energia.

### 3.1 Le configurazioni di Acquisizione

L'analisi esposta in questo capitolo si riferisce ai dati presi dal 18 Aprile 2018 al 18 Maggio 2018 con l'ausilio di tre configurazioni applicate in periodi diversi:

- Dal 18 Aprile al 23 Aprile.
- Dal 23 Aprile all'11 Maggio.
- Dal 14 Maggio al 18 Maggio.

Queste configurazioni differiscono principalmente nelle soglie dei due chip EASIROC, che sono:

- 1.5 V e 1.5 V
- 1.7 V e 1.7 V
- 1.75 V e 1.8 V

I chip EASIROC della trigger board sono responsabili dell'acquisizione da parte dei PMT e della generazione dell'impulso di trigger. In particolare viene generato un segnale di trigger quando un segnale su un certo PMT è sopra la soglia desiderata. Le soglie sono diverse per ogni configurazione utilizzata in questa analisi poichè l'obbiettivo della fase di commissioning è quello di configurare la soglia dei chip EASIROC che possa adattarsi meglio all'ambiente spaziale. Infatti una soglia troppo bassa potrebbe portare alla generazione di trigger spuri, difficili da notare durante i test presso fasci di elettroni e protoni.

La maschera di trigger è T&P1&P2&P3 ed è uguale per tutte le configurazioni usate in questa analisi. Questo significa che un evento viene salvato quando c'è un rilascio di segnale al di sopra della soglia in almeno un PMT del trigger e un PMT di ognuno dei primi tre piani del calorimetro.

Nelle figure 3.2, 3.3 e 3.4 sono riportate le distribuzioni dei 6 PMT dei primi tre piani. In ogni figura, per le tre coppie di soglie utilizzate, nella prima riga sono riportati i PMT letti dal primo chip EASIROC, nella seconda riga i PMT letti dal secondo. In blu sono graficati tutti gli eventi registrati dal PMT, mentre in verde solamente quelli con un segnale maggiore della soglia. Si noti che nelle prime quattro righe è ancora presente il picco del piedistallo nelle distribuzioni verdi, segno che le soglie sono ancora troppo basse. Infatti una soglia maggiore riduce la possibilità di avere il picco del piedistallo poichè vengono registrati solo i segnali maggiori della soglia in questione.

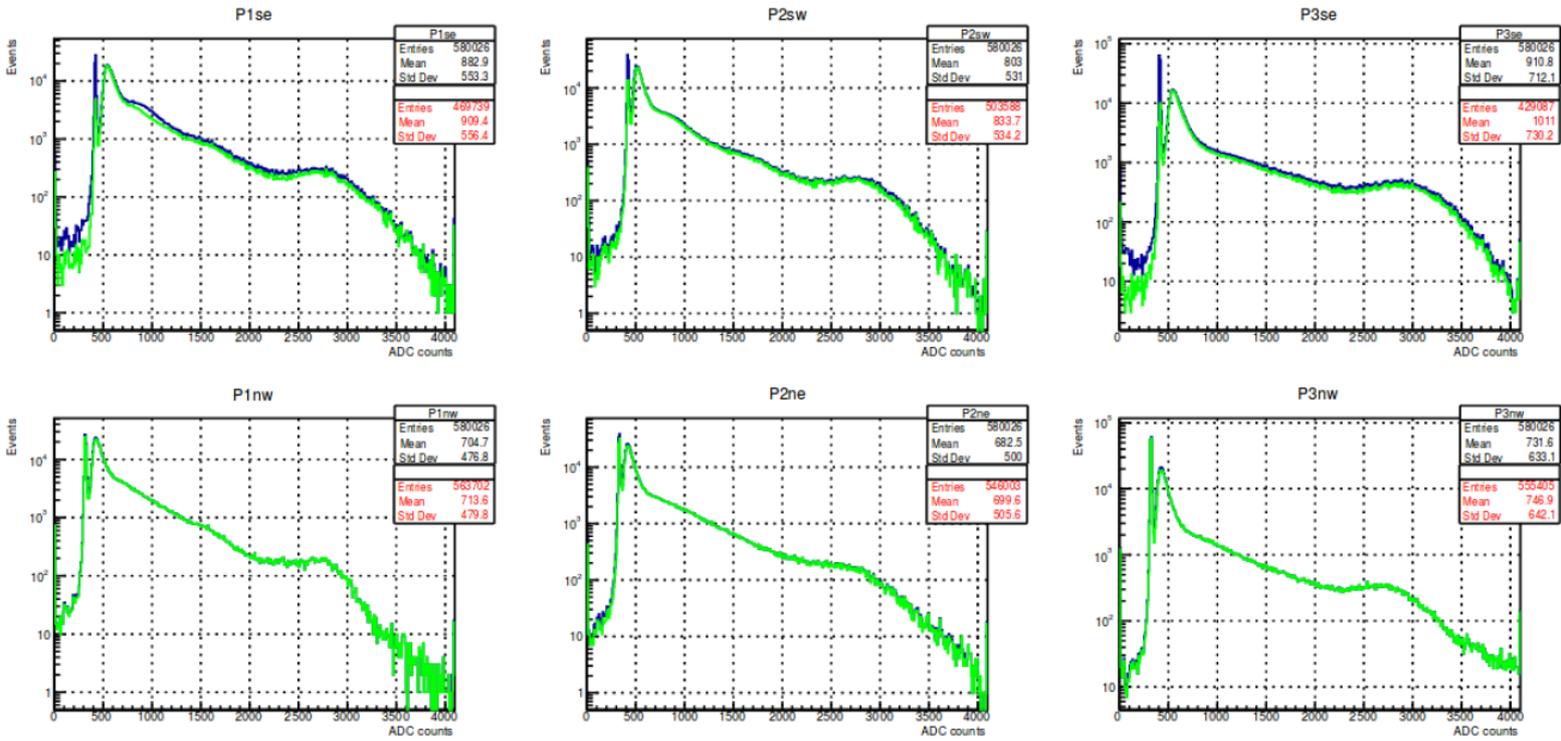


Figura 3.2: Distribuzioni dei segnali dei PMT dei primi tre piani. Le soglie dei due chip EASIROC sono 1.5V. È ben visibile il picco del piedistallo

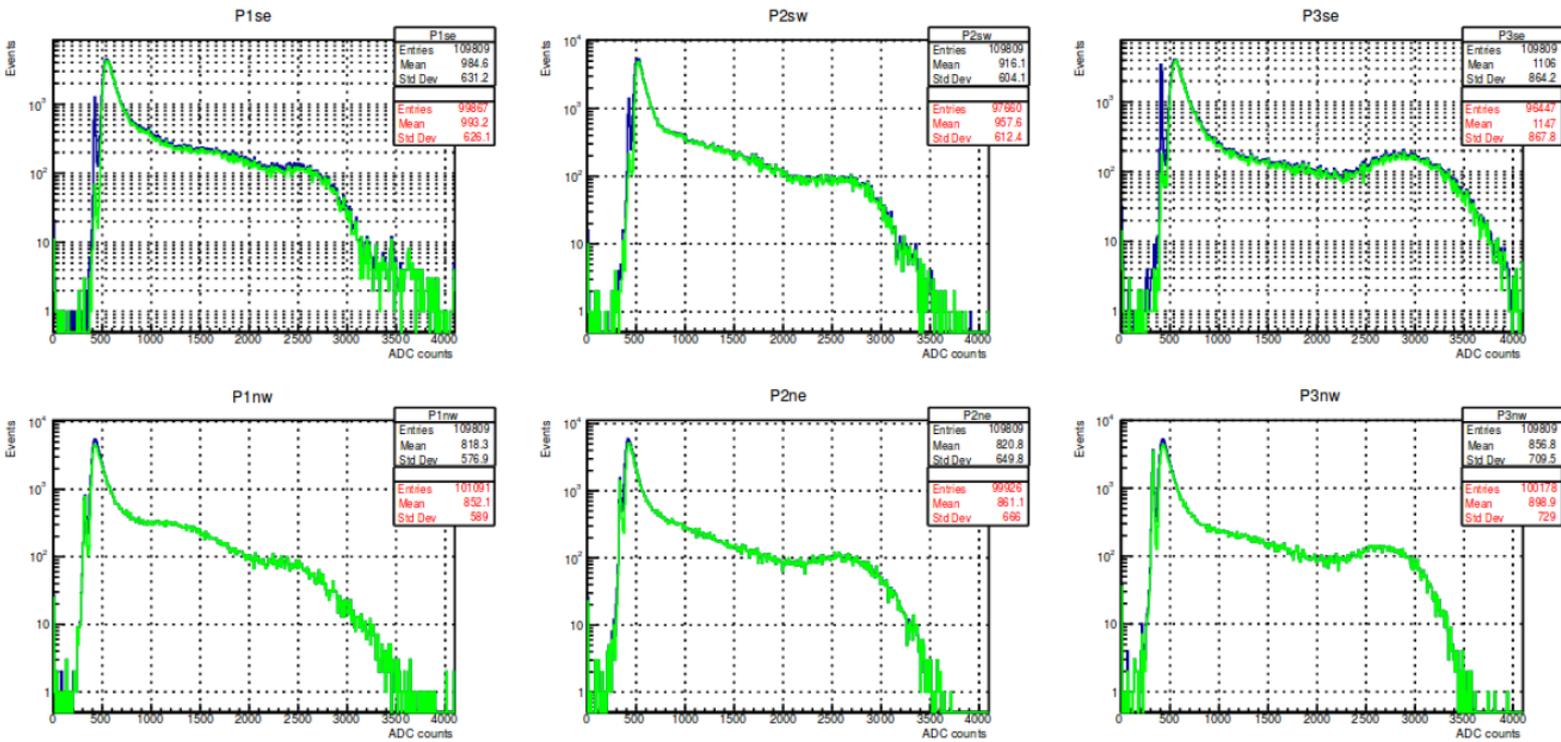


Figura 3.3: Distribuzione dei segnali dei PMT dei primi tre piani. Le soglie dei chip sono ora 1.7V. Il piedistallo è più basso rispetto alle distribuzioni precedenti

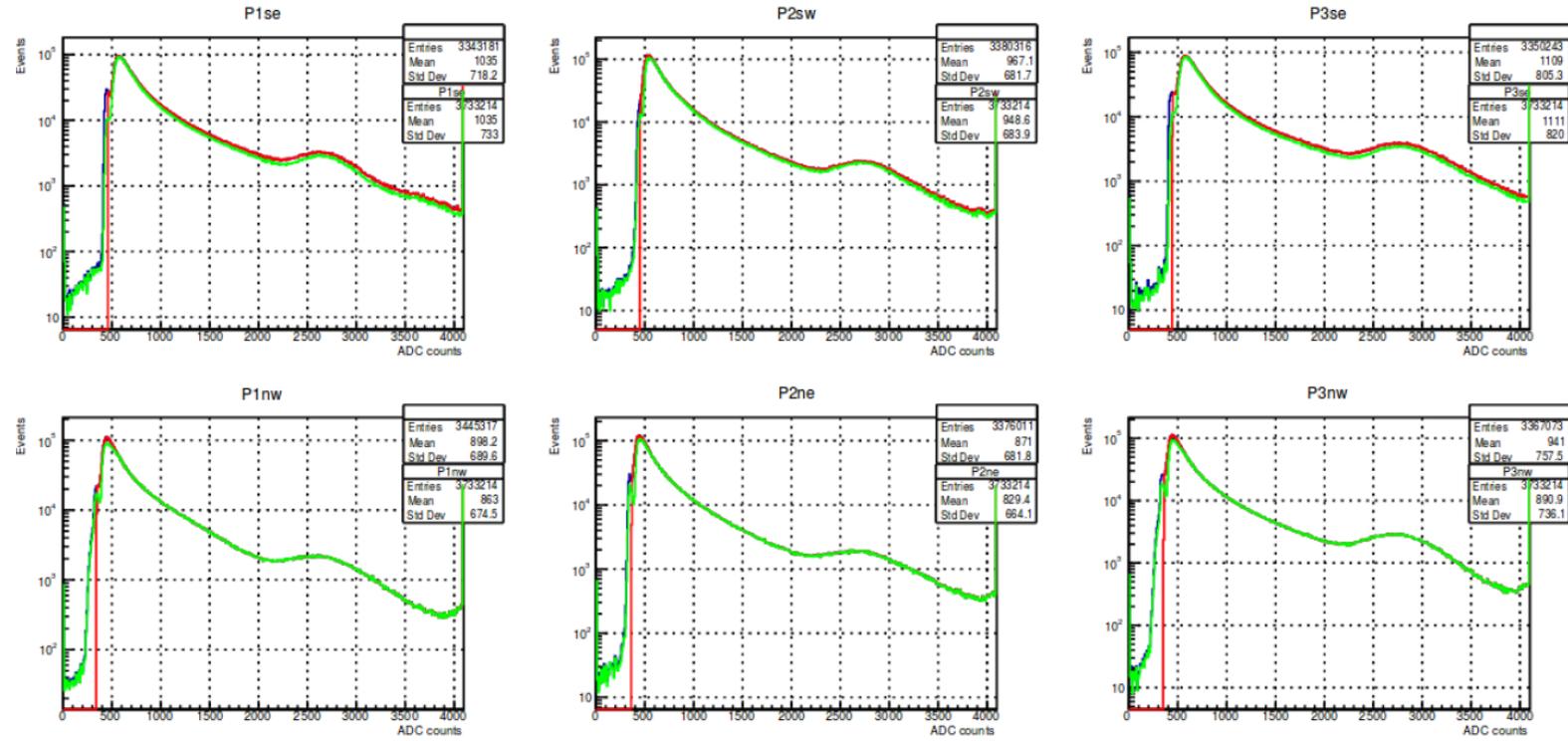


Figura 3.4: *Distribuzioni dei segnali dei PMT dei primi tre piani. Le soglie sono 1.75V e 1.8V. Il piedistallo non è più presente*

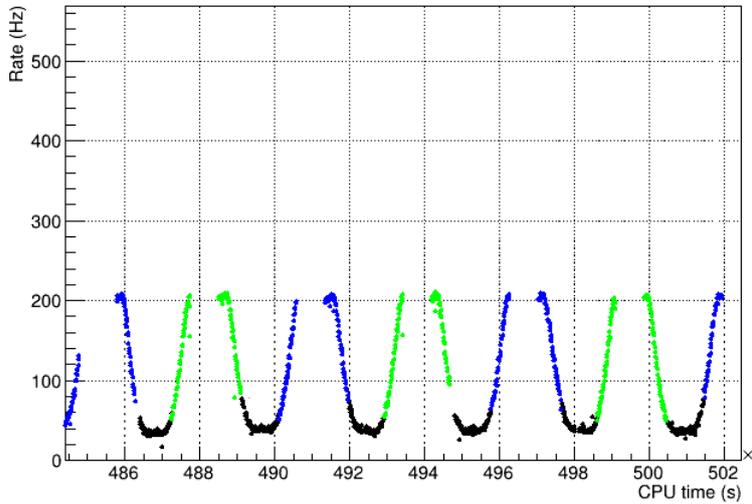
Infatti nella figura 3.4 (dove la soglia è a 1.75V e 1.8 V, la maggiore di quelle di questa analisi) il picco non è presente.

### 3.2 Il rate in funzione del tempo

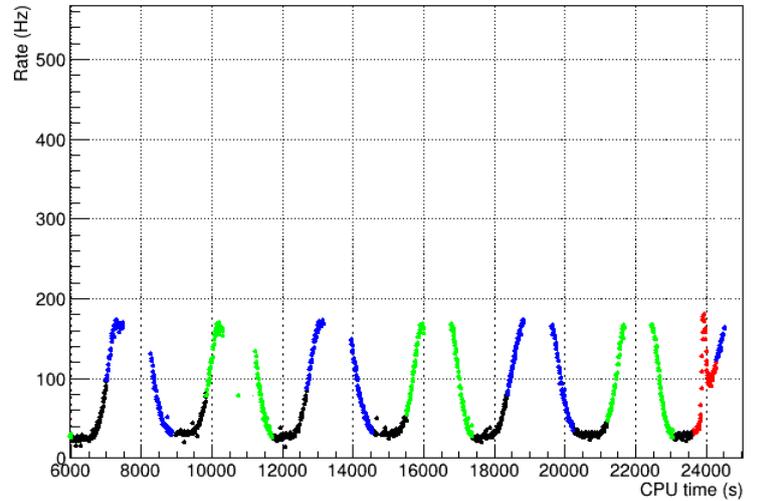
Una volta fissato il valore ottimale per la soglia ho studiato il rate di acquisizione del detector HEPD in funzione del tempo e dell'orbita. Il rate dello strumento è ovviamente variabile a seconda della zona in cui il satellite si trova in quel momento.

Le quattro configurazioni di volo, avendo soglie diverse nel voltaggio dei chip EASIROC, comportano dei rate diversi. Questa differenza è ben evidenziata

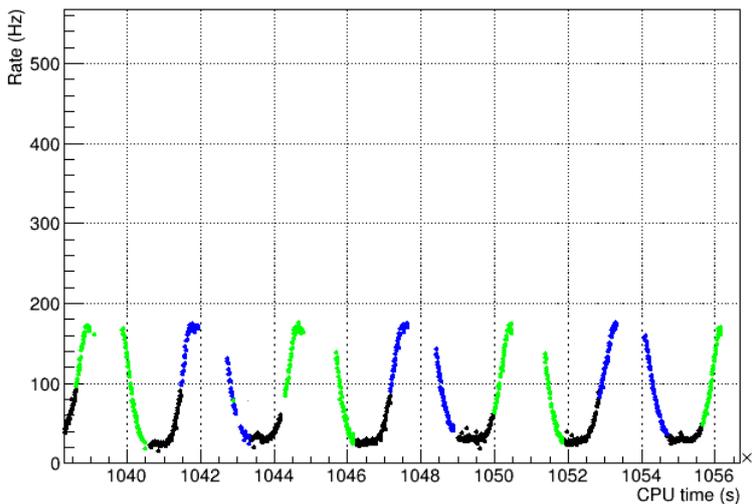
BootN\_167\_orbital\_rate\_time - rate (Hz) vs CPU time [Integ\_time=10 s]



BootN\_168\_orbital\_rate\_time - rate (Hz) vs CPU time [Integ\_time=10 s]



BootN\_168\_orbital\_rate\_time - rate (Hz) vs CPU time [Integ\_time=10 s]



BootN\_169\_orbital\_rate\_time - rate (Hz) vs CPU time [Integ\_time=10 s]

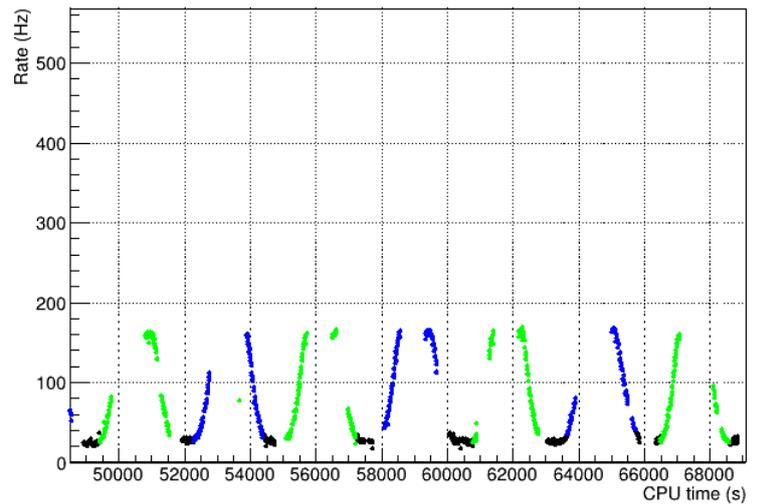


Figura 3.5: *Rate in funzione del tempo della CPU. In verde e blu abbiamo emisfero sud e emisfero nord, in nero l'equatore*

se andiamo a graficare il rate in funzione del tempo (dove il tempo, in ascissa, è quello di attività della CPU di HEPD).

Dalla Figura 3.5 si vede che a una soglia maggiore delle EASIROC è associato un rate minore. È visibile infatti come la configurazione con soglia di

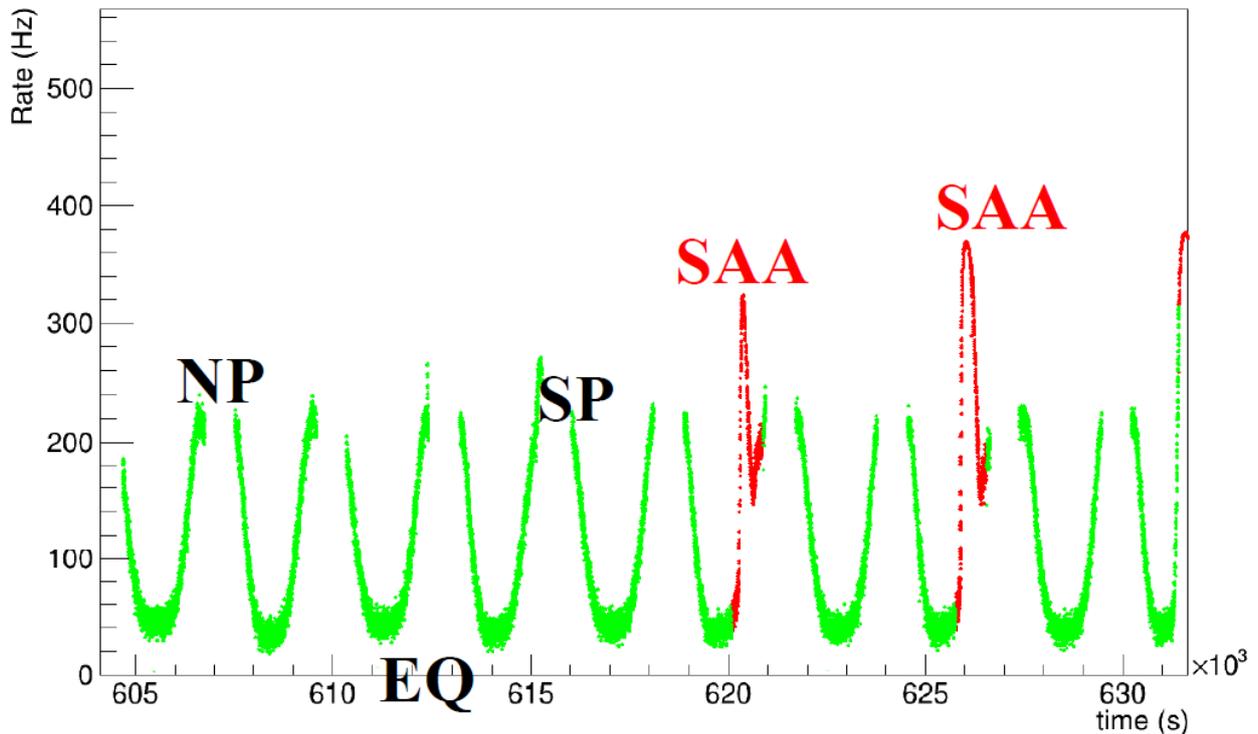


Figura 3.6: *Rate in funzione del tempo. I picchi rossi si riferiscono alla South Atlantic Anomaly*

entrambi i due chip a 1.5V mostrò un rate massimo di circa 210 Hz mentre la configurazione con soglie a 1.75V e 1.8V ha un rate massimo inferiore di 180 Hz. Questo conferma di nuovo la presenza di trigger spuri nella configurazione con le soglie più basse, che non sono coinvolti al passaggio di particelle nel rivelatore. I colori in figura corrispondono alle diverse zone orbitali: in verde e blu abbiamo emisfero sud e emisfero nord, in nero l'equatore.

Possiamo vedere in figura 3.6 dei picchi dovuti al passaggio del satellite sopra la South Atlantic Anomaly SAA. Quest'ultima è una zona localizzata geograficamente nel Sud America e in parte dell'Oceano Atlantico, in cui la parte inferiore delle Fasce di Van Allen è più vicina alla superficie terrestre; ciò risulta in una più alta intensità delle radiazioni delle Fasce rispetto al

resto del pianeta e in un rate acquisito maggiore. Vedremo in seguito come l'anomalia sud atlantica è ben visibile quando si grafica il rate in funzione di latitudine e longitudine.

Nelle figure 3.5 e 3.6 possiamo anche notare come all'equatore il rate acquisito da HEPD sia minore rispetto a quello acquisito all'emisfero sud e all'emisfero nord. Questo poichè in tale regione il cutoff geomagnetico assume valori più elevati, cioè il campo magnetico scherma maggiormente la componente galattica dei raggi cosmici.

Si definisce *orizzonte magnetico locale* di un punto il piano tangente alla linea di campo geomagnetico passante nel punto stesso. Lo *zenith magnetico* è la normale all'orizzonte magnetico locale in quel punto, e l'*azimuth magnetico* è la direzione che giace sull'orizzonte magnetico ed è orientato convenzionalmente verso l'est magnetico.

Störmer ha calcolato nel 1930 il cutoff per un campo dipolare e la formula, che da lui prende il nome, esprime la rigidità minima necessaria ad una particella carica per arrivare a un punto distante  $r$  dal centro del dipolo e a latitudine magnetica  $\lambda$  (se proviene da una direzione asintotica definita dall'angolo magnetico zenitale  $\zeta$  e dall'angolo magnetico azimutale  $\epsilon$ ):

$$R_s = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{M \cos^4 \lambda}{r^2 [1 + (1 - \cos^3 \lambda \cos \epsilon \sin \zeta)^{\frac{1}{2}}]^2}$$

dove  $r$  è espresso in raggi terrestri.

Si può calcolare  $R_s$  alla distanza di un raggio terrestre dal centro del dipolo ( $r = R_E \approx 6357 \times 10^3 m$ ), all'equatore di dipolo ( $\lambda = 0^\circ$ ), per una particella in arrivo lungo lo zenith magnetico locale ( $\zeta = 0^\circ$ ), ponendo il momento di dipolo  $M = 7.647 \times 10^{22} Am^2$ , il raggio terrestre equatoriale  $R_E \approx 6356 km$  e  $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{N}{A^2}$ . Si calcola allora;

$$R_S(r = R_E, \lambda = 0^\circ, \zeta = 0^\circ) \approx 4.7 \times 10^{-8} \frac{N}{A} = 14.1 \frac{GV}{c}$$

Possiamo unire il concetto di cutoff verticale con le L-shell (o parametro L di McIlwain), di cui abbiamo parlato nel capitolo 1. Nel caso di un campo dipolare, il parametro L di McIlwain corrisponde al raggio equatoriale di una drift shell; esso vale:

$$L = \frac{r}{\cos^2 \lambda}$$

e dunque sostituendo nella formula del cutoff verticale si trova:

$$R = \frac{14.9}{L^2}$$

che è nel caso di un campo dipolare del tutto equivalente alla formula trovata in precedenza, poichè in questo caso è valida l'espressione di L.

### 3.3 Il rate in funzione di latitudine e longitudine

In figura 3.7 è rappresentato il rate di acquisizione di HEPD in funzione della posizione del satellite. Si può notare come il rate acquisito in funzione della longitudine e della latitudine varia continuamente. Abbiamo già visto questo comportamento in figura 3.5 nel paragrafo precedente. Come già accennato nel capitolo 2, il satellite effettua 15 orbite al giorno e riesce quindi a coprire tutta la superficie terrestre. Con i dati ottenuti dalle configurazioni ho potuto mappare completamente il rate acquisito nel mese dal 18 Aprile al 18 Maggio 2018. Il risultato è visibile in figura 3.8, dove tutti i dati sono stati graficati su una mappa della terra.

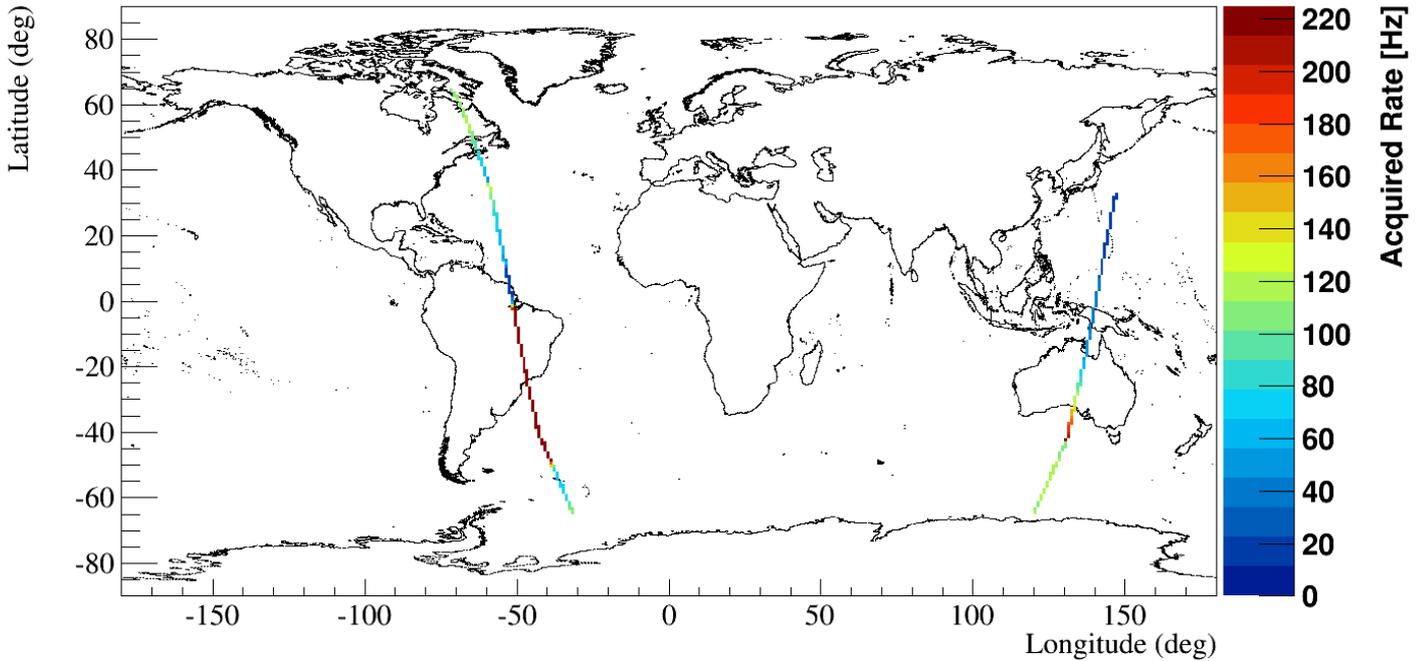


Figura 3.7: Grafico di un'orbita del satellite con relativo rate acquisito

Possiamo vedere in rosso l'anomalia sud Atlantica SAA, relativa ad un rate di acquisizione estremamente alto. Questo risultato era già visibile in figura 3.6. Ovviamente i dati coprono la latitudine solo da  $-65^\circ$  a  $+65^\circ$ , poichè questo, come già accennato nel capitolo 2, è il range della zona di lavoro per HEPD. I risultati visti fin'ora nella figura 3.8 non tengono tuttavia conto della differenza tra il tipo di particelle che colpiscono il rivelatore.

Utilizzando l'interfaccia realizzata dall'ESA (*European Space Agency*) SPENVIS (*SPace ENVironment Information System*) si possono utilizzare modelli di simulazione dell'ambiente spaziale e dei suoi effetti.

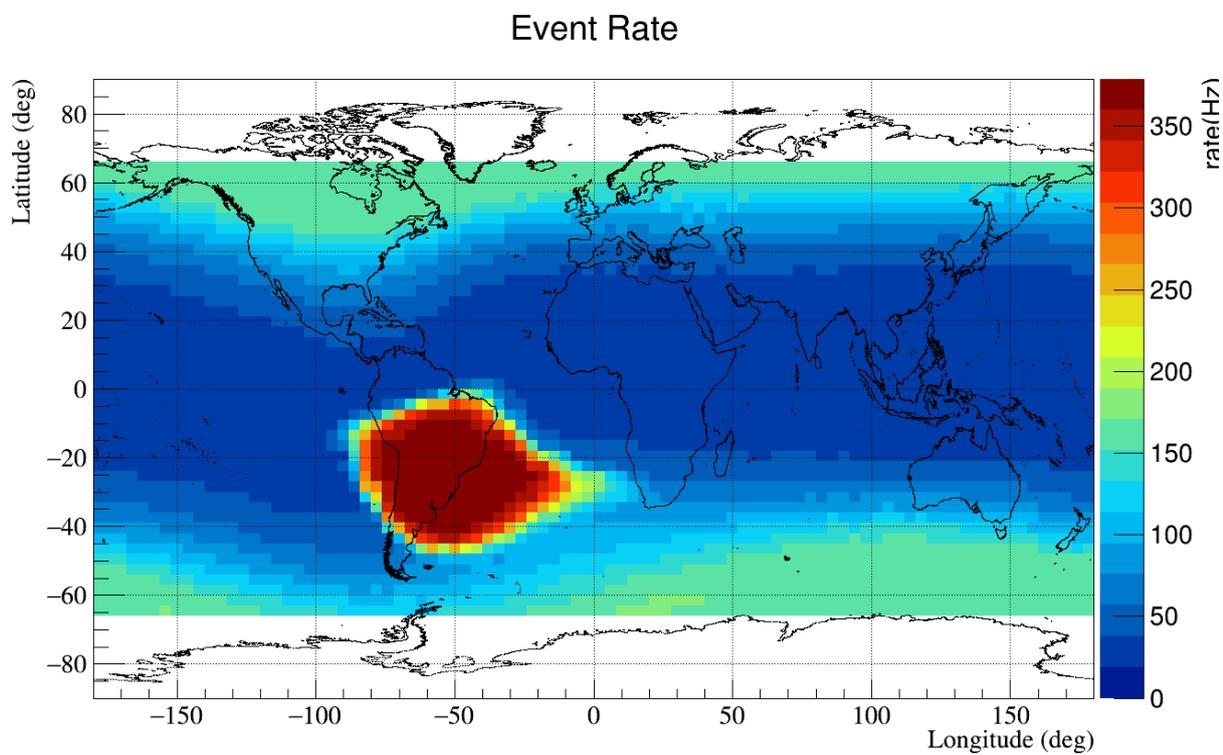


Figura 3.8: *Mappatura completa di tutte le configurazioni di presa dati con relativo rate di acquisizione*

Ho utilizzato SPENVIS per graficare il rate di elettroni a circa 500 km di altitudine, che corrisponde al valore medio di altitudine per CSES. Il risultato è ben visibile nella figura seguente dove vediamo il rate di elettroni con dati di volo e una sua modellizzazione con SPENVIS:

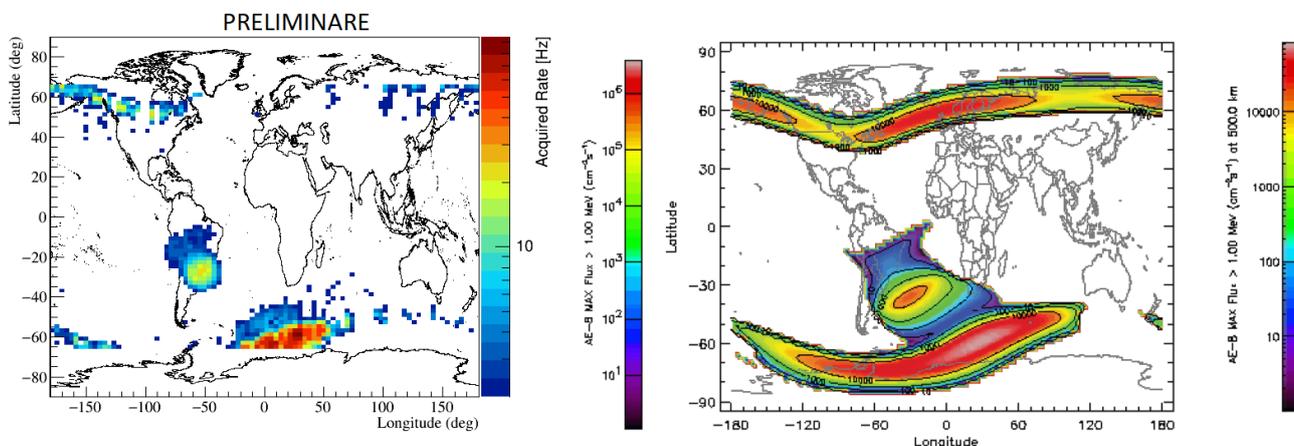


Figura 3.9: *Rate di elettroni con dati di volo (a) e relativa modellizzazione (b) in funzione di latitudine e longitudine*

La figura 6.a è stata realizzata su dati presi in volo applicando una selezione molto preliminare sulle particelle al fine di isolare gli elettroni. Ricordiamo come il picco delle MIP, le particelle a minima ionizzazione, comprendano protoni molto energetici ed elettroni. Selezionando particelle nel range di energia delle MIP e richiedendo che queste siano contenute nel detector, si possono identificare come elettroni tutte le particelle che sopravvivono alla selezione.

Nella figura 6.b, sull'asse Z abbiamo il flusso di elettroni a 500 Km di altitudine con energia maggiore di 10 MeV. In generale, nonostante sia un'analisi ancora grezza, i dati in volo sono coerenti con il modello di SPENVIS: in entrambi i casi è visibile la SAA e, anche se parzialmente, si nota l'aumento del rate nell'emisfero sud. Quest'ultimo è riferito alla zona in cui le fasce esterne di Van Allen si avvicinano di più alla superficie terrestre, come si vede nella figura 1.3 nel capitolo 1.

Nel paragrafo precedente abbiamo parlato del parametro L di McIlwain, o

L-shell, e abbiamo visto come esso descriva l'insieme delle linee del campo magnetico terrestre che attraversano l'equatore magnetico a una distanza di  $L$  raggi terrestri. In figura 3.10 vediamo uno schema delle L-shell ottenuto con le posizioni del satellite CSES.

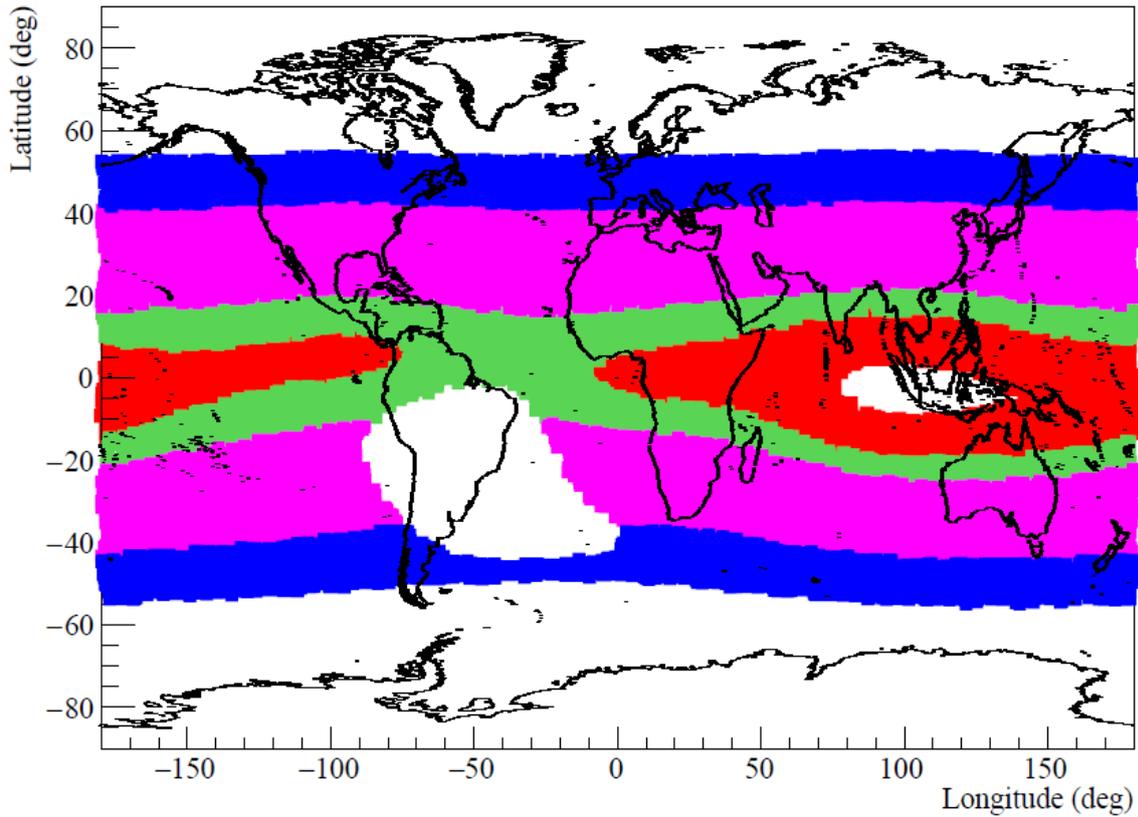


Figura 3.10: *Schema delle L-shell ottenuto dalle posizioni del satellite CSES: in blu  $2 < L < 3$ , in rosa  $1.2 < L < 2$ , in verde  $1.1 < L < 1.2$  e in rosso  $1 < L < 1.1$*

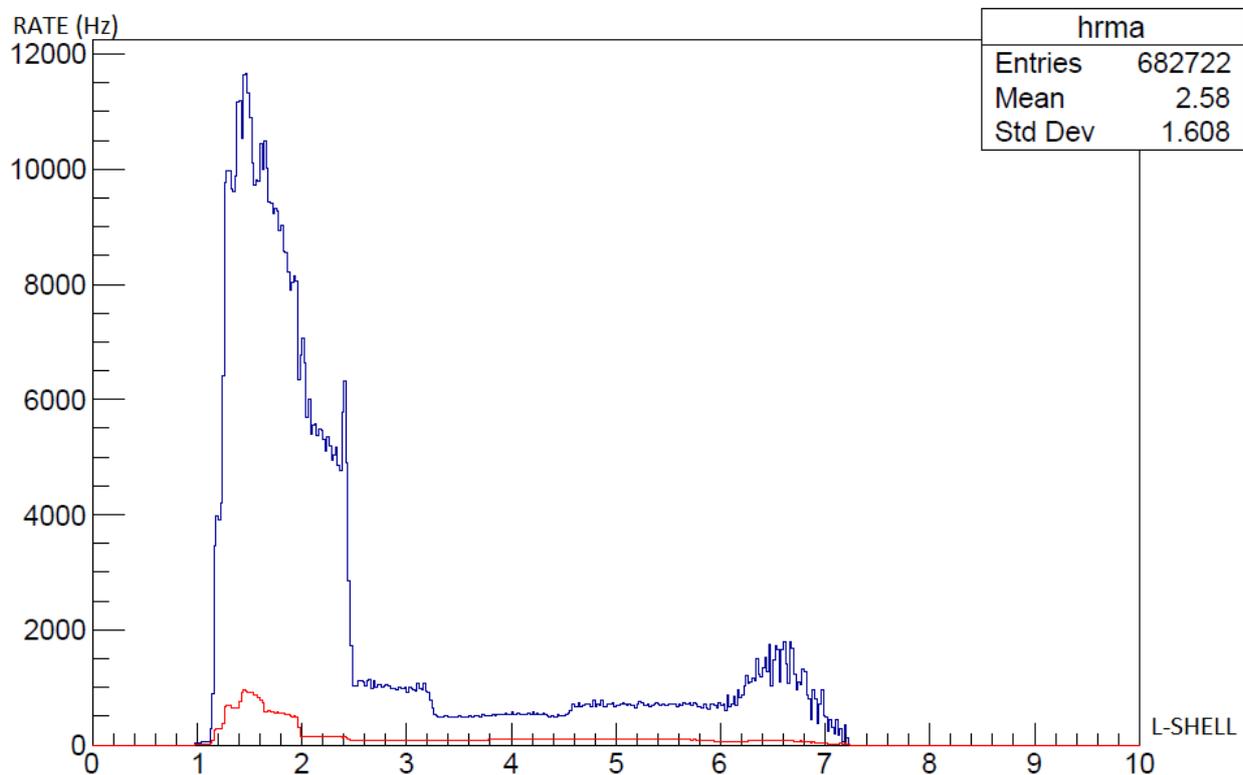


Figura 3.11: Rate acquisito in funzione delle L-shell. La distribuzione blu si riferisce alla maschera di trigger  $T \& P1$ , la distribuzione rossa alla maschera  $T \& (P1 || P2) \& (P15 || P16)$

Dopo aver studiato il rate in funzione della latitudine e della longitudine ho analizzato il rate in funzione delle L-shell con l'ausilio di due maschere di trigger diverse rispetto a quelle usate nelle analisi precedenti.

In figura 3.11 sono graficate due distribuzioni del rate in funzione della L-shell. Esse si riferiscono a due maschere di trigger diverse: la maschera  $T \& P1$  e la maschera  $T \& (P1 || P2) \& (P15 || P16)$ . La prima comprende tutti gli eventi registrati dai PMT che passano per il trigger e almeno per il primo piano del calorimetro, la seconda comporta una restrizione maggiore selezionando solo gli eventi che passano per il trigger, per i primi due piani del calorimetro e

per gli ultimi due piani. Quindi le particelle registrate sono quelle che attraversano interamente il rivelatore, e sono particelle molto più energetiche. Il plot mostra infatti che la distribuzione blu ha in generale un rate più alto di quella rossa poichè le particelle registrate non devono necessariamente attraversare tutto il rivelatore e dunque la soglia è più bassa. Le energie coinvolte sono infatti, per la distribuzione blu, oltre 3 MeV e 30 MeV rispettivamente per elettroni e protoni e, per la distribuzione rossa, oltre 30 MeV e 100 MeV. Entrambe le distribuzioni presentano un picco intorno al valore 1.5 della L-Shell; questo picco corrisponde alla South Atlantic Anomaly, che, come visto in precedenza, comporta un aumento considerevole del rate di acquisizione. Il secondo picco della distribuzione blu (non visibile invece nella distribuzione rossa proprio perchè le particelle registrate devono essere più energetiche e devono attraversare l'intero calorimetro) si riferisce invece alle particelle presenti in corrispondenza della zona in cui la fascia esterna di Van Allen si avvicina di più alla terra. In figura 3.11 possiamo vedere il rate in funzione di latitudine e longitudine riferito alle due maschere di trigger:

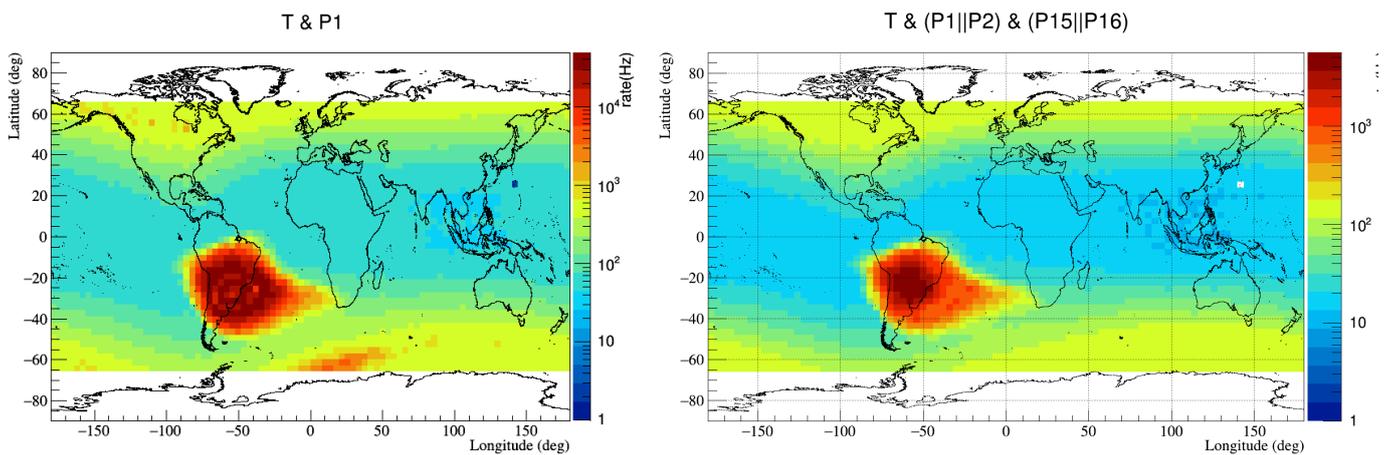


Figura 3.12: *Rate in funzione di latitudine e longitudine per le maschere  $T \& P1$  e  $T \& (P1||P2) \& (P15||P16)$*

Si vede infatti come il rate relativo alla maschera  $T\&(P1||P2)\&(P15||P16)$  abbia in generale valori minori rispetto ai valori del rate in figura della maschera T&P1. Manca inoltre la zona relativa alla fascia esterna di Van Allen, ben visibile in figura di T&P1.

### 3.4 Modellizzazione del campo magnetico

Per arrivare ad un calcolo di flussi di particelle è fondamentale dare una descrizione dell'orbita di CSES in funzione delle regioni di campo magnetico attraversato. Per fare questo è necessario ricorrere a dei modelli. All'ordine zero si può usare l'IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) creato dall'*International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)*.

IGRF è un modello che descrive la distribuzione dell'intensità del campo magnetico terrestre in funzione di parametri come altitudine, latitudine e longitudine. Questo modello viene aggiornato periodicamente negli anni poichè il campo magnetico terrestre è variabile nel corso del tempo (ad esempio, l'asse del campo magnetico può spostarsi causando alcune variazioni). IGRF è stato sviluppato da modellisti del campo magnetico tramite satelliti, osservatori e istituti finalizzati alla collezione di dati. Una volta correlata la posizione di CSES con le informazioni del campo a partire dal modello IGRF è stato possibile studiare le sue variazioni in funzione di latitudine e longitudine. Ho effettuato questo studio partendo dai dati processati in un periodo di 120 s in un range temporale che va dal 15 Maggio al 3 Giugno 2018. Ho estratto dal file ROOT le informazioni orbitali e partendo dalle componenti  $B_x, B_y, B_z$  ho calcolato il modulo del campo magnetico, che ho in seguito graficato in funzione di latitudine e longitudine. Il risultato è in figura 3.13:

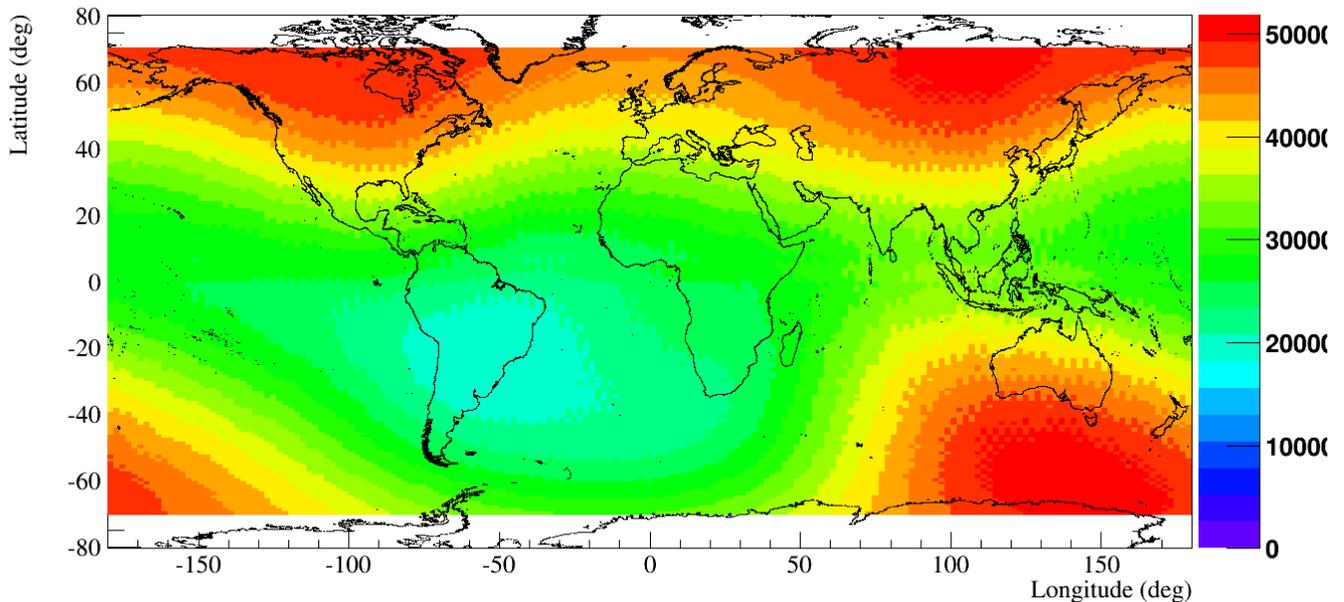


Figura 3.13: *Intensità del campo magnetico terrestre secondo la scala di colori riportata a destra*

Possiamo vedere come ai poli il campo sia molto più intenso rispetto alla South Atlantic Anomaly, che corrisponde invece a un'intensità più bassa. Questo perchè le linee di campo magnetico si addensano soprattutto ai poli, mentre si trovano a una distanza maggiore rispetto all'equatore.

Con il modello di IGRF è quindi possibile ad esempio isolare le particelle che provengono dalle zone polari e quelle che sono nella SAA. Questo permette di investigare varie specie di particelle "intrappolate", ossia quelle che vengono catturate dalle linee di campo magnetico, spiraleggiano attorno ad esse e vanno ad alimentare la popolazione delle particelle sub-cutoff. Lo studio di queste specie risulta molto utile per questioni di space-weather (poichè fornisce una misura della radiazione che un satellite può sopportare nel passaggio in zone ad altissima radiazione, quali la SAA) e anche per vedere come tale

popolazioni si modificano nel tempo a causa del cambiamento del ciclo solare o a causa di transienti come le flare o il passaggio delle espulsioni di massa coronale (CME).

# Conclusioni

Sono stati studiati tre diversi valori per le soglie dei chip EASIROC al fine di configurare il detector per lavorare in ambiente spaziale. Le distribuzioni dei segnali dovute ai dati in volo confermano il comportamento del detector HEPD durante i test effettuati a terra prima del lancio del satellite: sono infatti visibili il picco delle particelle a minima ionizzazione MIP e degli elettroni e il picco dei protoni a bassa energia.

Sono state testate soglie diverse al fine di abbassare il picco del piedistallo ed evitare la generazione di trigger spuri, difficili da notare nei test a terra. Una volta fissato il valore ottimale della soglia è stato studiato il rate di acquisizione rispetto al tempo, alla zona orbitale, alla latitudine e longitudine e L-shell. L'analisi del rate rispetto al tempo ha confermato la presenza dei trigger spuri nelle configurazioni con soglia più bassa. È possibile notare la presenza della South Atlantic Anomaly SAA, oltre alla diminuzione del rate nella zona equatoriale, dovuta al cutoff geomagnetico, e si può vedere come diverse maschere di trigger abbiano dato distribuzioni simili del rate di acquisizione, come aspettato.

Con i dati in volo e con l'ausilio dell'interfaccia SPENVIS è stato possibile graficare, seppur in modo preliminare, il rate di elettroni. Anche qui sono visibili la SAA e la zona in cui le fasce esterne di Van Allen incontrano la superficie terrestre. In generale tutte le analisi dei dati in volo rispecchiano

gli andamenti attesi.

# Bibliografia

- [1] I. Lehmann. Inner Earth. 1936, pp. 160 165
- [2] N. Oreskes. Plate Tectonics: An Insider's History Of The Modern Theory Of The Earth. 2003, p. 424
- [3] B. Gutenberg e C. F. Richter. Magnitude and energy of Earthquakes. 1955
- [4] J. Milne. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena
- [5] V.I. Larkina et al. Seismicity and seismic hazard forecast by the results of observation of the low frequency noise-like emissions at the altitudes of upper atmosphere. In: Vulkanologiya i seismologiya 6 (1988), pp. 94 102
- [6] I. Hutchinson. Principles of Plasma Diagnostics
- [7] S. Pulinetz e K Boyarchuck. Ionospheric precursors of earthquakes
- [8] B. Bandyopadhyay et al. Studies on the Precursors of an Earthquake as the VLF Electromagnetic Sferics. In: Earth Physics 56.9-10 (2010), pp. 1208 1227

- [9] E.A. Chernyavsky. The atmosphere-electric precursors of earthquakes in Meteorology and hydrology in Uzbekistan. In: Science, Technology and Society 12 (1955), pp. 2635
- [10] C.H. Scholtz. Earthquake prediction: A physical basis. In: Science 181 (1973), pp. 803 809
- [11] K. P. Spies, J. Waits. Mode Calculations For VLF Propagations In The Earth-Ionosphere Waveguide (1961)
- [12] R. L. Lysak, Y. Song. Magnetosphere–ionosphere coupling by Alfvén waves: Beyond current continuity
- [13] S. Yu. Aleksandrin. High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors (2002)
- [14] V. Sgrigna, L. Conti. A Deterministic Approach to Earthquake Prediction (2012)
- [15] C. E. McIlwain. Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles
- [16] P. Picozza et al. Contributo italiano alla progettazione del satellite CSES (2014)
- [17] R. Sparvoli. Heliospheric and Magnetospheric Physics with the CSES/LIMADOU mission (2017)
- [18] P. Picozza et al. HEPD: a particle detector for the CSES space mission (2017)
- [19] A. Sotgiu. Development of the control and data handling software for the High-Energy Particle Detector and preliminary data analysis (2017)

- [20] P. Picozza, R. Sparvoli et al HEPD: a particle detector for the CSES space mission (2017)
- [21] F. Palma, A. Sotgiu, V. Vitale. The High-Energy Particle Detector on board of the CSES mission (2017)
- [22] W. Leo. Techniques for nuclear and particle physics experiments (1987)
- [23] L. Granato. Studio delle caratteristiche del rivelatore HEPD installato a bordo del satellite CSES per l'analisi dei precursori sismici provenienti dallo spazio (2014)

# Ringraziamenti

Vorrei ringraziare innanzitutto il Professor Picozza e la Professoressa Sparvoli per avermi dato l'opportunità di lavorare con il loro gruppo di ricerca, grazie al quale ho imparato a utilizzare metodi e programmi finalizzati all'analisi di dati sperimentali. Ringrazio inoltre tutto il team Wizard: Cristian De Santis, Alessandro Sotgiu, Matteo Martucci, Matteo Mergè, Luca Carfora, Francesco Palma, Cinzia De Donato, Laura Marcelli, Simona Bartocci, Marco Casolino, Giorgio Cambiè, Giuseppe Masciantonio e Mirko Piersanti. Lavorare con loro è stato un privilegio oltre che un piacere. Grazie per avermi accettato in questa grande famiglia e per il bellissimo clima instaurato giorno dopo giorno.

Ovviamente un grande ringraziamento va a tutti i miei amici e compagni di Università, con cui ho passato alcuni (forse pure troppi) degli anni più belli della mia vita: Adriano, Andrea, Daniele, Fabiola, Gabriele (Camilli), Gabriele (Pirozzi, vrrr), Giorgia (Pompeo), Giorgio, John, Lorenzo, Marco (grazie per il posto), Matteo, Mattia e Simone. Dei ringraziamenti speciali vanno a Dario e Gianluca, per esserci sempre stati nei momenti facili e in quelli difficili, per essere stati *nu piezz' 'e core* e per aver riempito di risate le mie giornate: grazie! (mentre scrivevo questi ringraziamenti, parlando del giocatore di calcio Ozil, Dario ha detto "Ozil Osbourne".. forse la parte sulle risate la toglierò nella versione finale).

Un grande grazie anche a Nadir, per i tanti consigli che mi ha dato e per il grande legame che abbiamo sviluppato in poco tempo.

Un ringraziamento speciale va a Giorgia, per avermi insegnato a fissare gli obiettivi e a non mollare mai davanti a nessun ostacolo e a nessun tipo di avversità: tutti insegnamenti di cui ho fatto tesoro e per cui la ringrazio profondamente.

Non vorrei farlo ma devo ringraziare anche Renato. Grazie per essere stato come un fratello per me e per avermi passato lo scettro di capo, l'ho apprezzato molto.

Infine, un ringraziamento enorme alla mia famiglia, mio padre, mia madre e mia sorella, per essere sempre stati una fonte di felicità e di supporto per me. Grazie per tutto quello che mi avete dato e insegnato. Grazie per avermi reso la persona che sono e per avermi dato la possibilità di andare avanti nella vita nonostante tutte le difficoltà. Grazie di tutto quello che è stato, di tutto quello che è e di tutto quello che verrà.