

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

**Corso di Laurea in Fisica**

ANNO ACCADEMICO 2015/2016



Tesi di Laurea

**Caratterizzazione dell'elettronica di  
acquisizione del calorimetro del  
rivelatore HEPD della missione  
CSES-Limadou**

**Relatori:**  
Dr. Giuseppe Osteria

**Candidato:** Marco Mese  
**Matricola:** N85/131

Prof. Alberto Aloisio

*“Siamo forti!”*

## Sommario

Il progetto Limadou nasce dal lavoro di collaborazione italiana alla missione CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite), che si propone di studiare le correlazioni fra eventi sismici e le variazioni del campo elettromagnetico nella ionosfera che precedono tali eventi, allo scopo di sviluppare modelli teorici che permettano di prevedere – a breve termine – lo sviluppo di terremoti di magnitudo  $M \geq 6$  entro il territorio cinese e di magnitudo  $M \geq 7$  su scala globale.

A tale scopo il satellite CSES provvederà a misurare – fra numerose altre grandezze – le variazioni nel flusso delle particelle intrappolate nelle fasce di van Allen (particelle provenienti da raggi cosmici di bassa energia), in concomitanza con eventi sismici sulla superficie terrestre.

Questa tesi sarà articolata in 4 capitoli: nei primi si provvederà a dare una iniziale descrizione dei raggi cosmici a bassa energia e delle particelle intrappolate nelle fasce di van Allen; in seguito si descriverà l'interazione che si suppone avvenga fra eventi sismici e alterazioni nel campo elettromagnetico terrestre (accoppiamento sismo-ionosferico); verrà poi data una descrizione approfondita della struttura e dell'elettronica del rilevatore HEPD (High-Energy Particle Detector) che verrà installato a bordo del CSES ed infine mostrata l'attività di laboratorio svolta al fine di individuare i parametri ottimali da impostare per l'elettronica.

# Indice

<b>1</b>	<b>Raggi cosmici e fasce di van Allen</b>	<b>1</b>
1.1	I raggi cosmici . . . . .	1
1.2	Fasce di van Allen . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Accoppiamento sismo-ionosferico</b>	<b>7</b>
2.1	Struttura della ionosfera . . . . .	7
2.2	Precursori sismico-elettromagnetici . . . . .	11
<b>3</b>	<b>La missione CSES-Limadou ed il rivelatore HEPD</b>	<b>14</b>
3.1	Panoramica della missione . . . . .	14
3.2	HEPD: Caratteristiche generali . . . . .	15
3.3	HEPD: Calorimetro . . . . .	18
3.4	HEPD: Elettronica . . . . .	21
3.5	HEPD: PMT/TRIGGER Board . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Caratterizzazione</b>	<b>29</b>
4.1	Introduzione . . . . .	29
4.2	Determinazione delle tensioni di soglia . . . . .	30
4.3	Determinazione dei valori delle capacità di feedback . . . . .	36
4.4	Determinazione dello shaping time . . . . .	41
4.5	Conclusioni e sviluppi futuri . . . . .	45

**Bibliografia**

**46**

# Capitolo 1

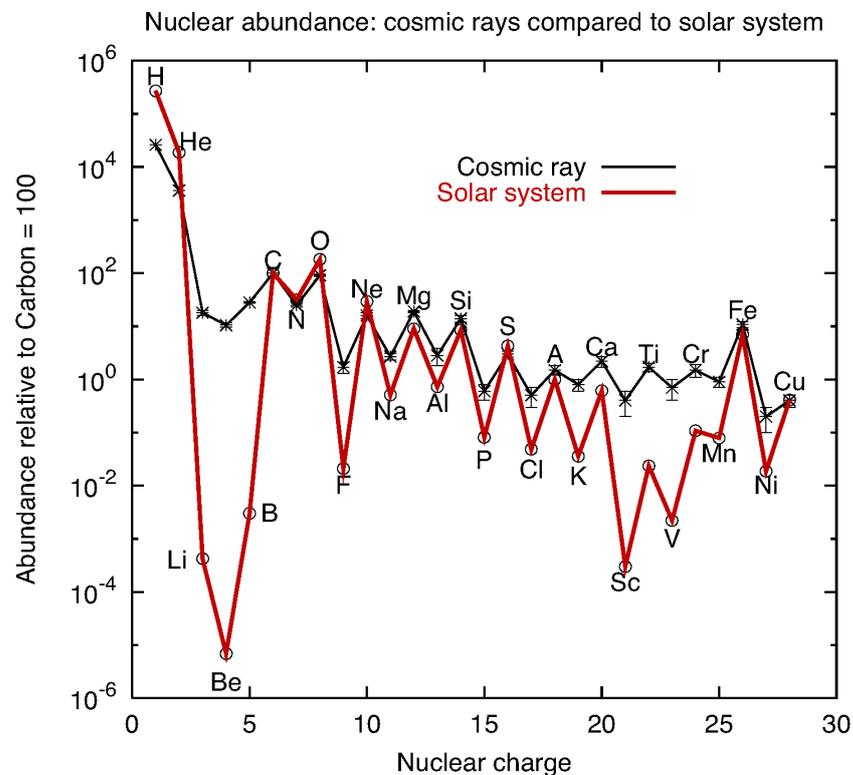
## Raggi cosmici e fasce di van Allen

### 1.1 I raggi cosmici

I raggi cosmici sono particelle subatomiche provenienti da varie sorgenti nello spazio e sono costituiti principalmente (circa il 98%) da protoni, particelle alfa e nuclei più pesanti (hanno quindi prevalentemente carica positiva), mentre in minima parte da elettroni, positroni, neutrini e  $\gamma$  (circa il 2%); possono essere suddivisi in primari e secondari: i primari sono quelli che incidono sugli strati più alti dell'atmosfera mentre i secondari sono l'insieme delle particelle prodotte dall'interazione dei primari con le molecole che compongono l'atmosfera.

I nuclei più pesanti nei raggi cosmici sono distribuiti con un andamento piuttosto diverso rispetto alla distribuzione degli stessi elementi nel sistema solare (figura 1.1) ed è proprio da questo che possiamo dedurre la loro provenienza extrasolare, in particolare la presenza di nuclei come Li e Be, in quantità decisamente maggiore rispetto alla loro abbondanza nel sistema solare, permette di ipotizzare che questi ultimi si producano a seguito dell'interazione di nuclei più pesanti (come C e O) su idrogeno ed elio interstellare [1].

Lo spettro di energia dei raggi cosmici primari si estende in un range che va da



**Figura 1.1:** *Abbondanza relativa degli elementi nei raggi cosmici confrontata con quella degli elementi nel sistema solare (il Carbonio è preso come riferimento con abbondanza convenzionalmente posta a 100)*<sup>1</sup>.

$10^6$  eV a  $10^{20}$  eV e segue l'andamento riportato in figura 1.2.

È possibile riconoscere nel grafico relativo allo spettro di energia alcuni punti in cui si ha variazione della pendenza: il primo punto corrisponde ad energie nell'ordine dei  $10^{10}$  eV ed è la zona in cui il flusso dei raggi cosmici dipende principalmente dalla variazione dell'intensità del vento solare (modulazione solare); intorno a  $10^{16}$  eV si ha un'altra variazione di pendenza e il punto in cui avviene questa variazione viene chiamato "ginocchio"; l'ultima variazione si ha per energie superiori ai  $10^{19}$  eV ed il punto corrispondente è chiamato "caviglia".

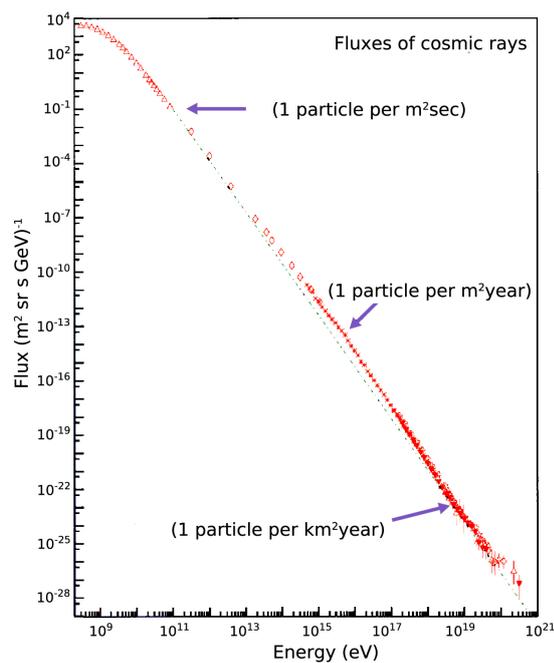
<sup>1</sup>Immagine tratta da <http://w3.iihe.ac.be/~aguilar/PHYS-467/composition.png>

Come si può osservare dal grafico la variazione relativa al ginocchio porta ad un aumento della pendenza, mentre dalla caviglia si ha di nuovo una riduzione della pendenza. Dall'analisi dei dati relativi a tale andamento si ricava una dipendenza del flusso dei raggi cosmici dall'energia del tipo

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (1.1)$$

con

$$\alpha = \begin{cases} 2.7 & \text{per } E < 3 \cdot 10^{15} \text{ eV} \\ 3 & \text{per } 3 \cdot 10^{15} \text{ eV} < E < 10^{18} \text{ eV} \\ 2.7 & \text{per } E > 3 \cdot 10^{18} \text{ eV} \end{cases}$$



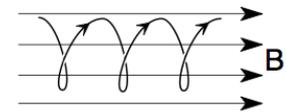
**Figura 1.2:** *Spettro di energia dei raggi cosmici primari*<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Immagine tratta da <https://inspirehep.net/record/1232171/files/flux.png>

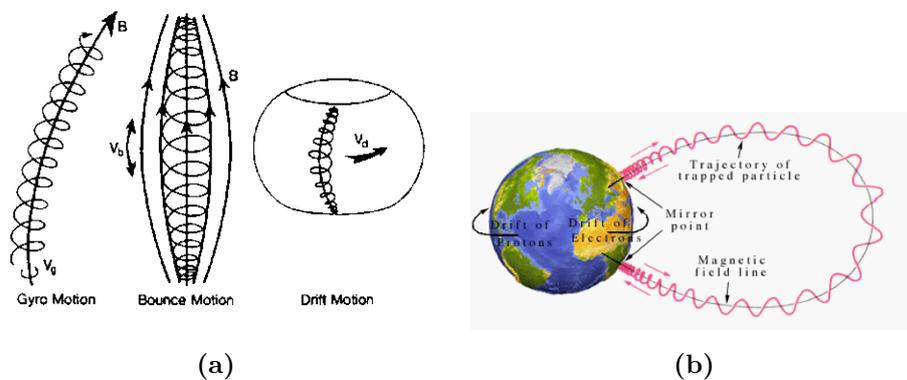
## 1.2 Fasce di van Allen

Ora osserviamo cosa succede quando raggi cosmici ad energie basse ( $E < 10^9$  eV, dovuti quindi in gran parte al vento solare) interagiscono col campo magnetico terrestre<sup>3</sup>.

Innanzitutto ricordiamo che i raggi cosmici sono costituiti principalmente da protoni e da una minima parte di elettroni. Questo vuol dire che quando tali particelle incontrano delle linee di campo magnetico subiscono una deflessione dovuta alla nota relazione di Lorentz:  $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ , assumendo un moto elicoidale intorno ad esse (figura 1.3). Nel caso del campo magnetico terrestre la geometria delle linee di campo fa sì che le particelle subiscano una combinazione di tre moti diversi (figura 1.4 (a) e (b)):



**Figura 1.3**



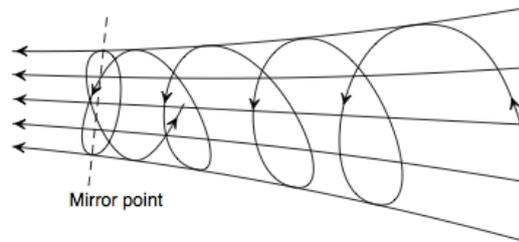
**Figura 1.4:** *Moti delle particelle cariche nel campo magnetico terrestre*

- un primo moto, come abbiamo visto, è quello elicoidale intorno alle linee di campo;
- il secondo moto è quello di oscillazione fra due punti prossimi alla superficie

<sup>3</sup>In questo paragrafo useremo l'approssimazione di dipolo per il campo magnetico terrestre.

terrestre posti in maniera simmetrica rispetto al piano equatoriale (*mirror point*). Tale moto è dovuto al fatto che quando il vettore velocità delle particelle assume un angolo di  $90^\circ$  rispetto ad una linea di campo magnetico (angolo chiamato *pitch angle*), il moto si inverte e la particella ripercorre elicoidalmente la linea di campo magnetico in verso opposto (figura 1.5);

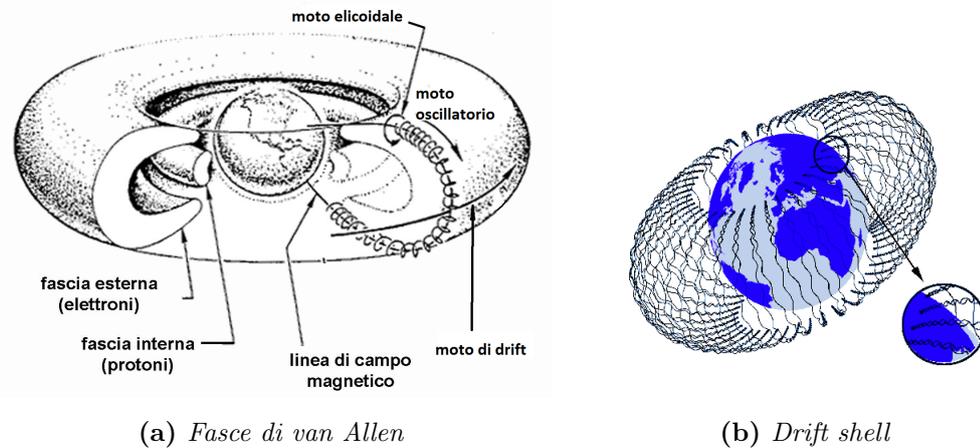
- il terzo moto è il moto di drift per il quale le particelle positive (quindi i protoni) si spostano verso ovest mentre quelle negative (elettroni) verso est proprio a causa dell'orientamento del campo magnetico terrestre.



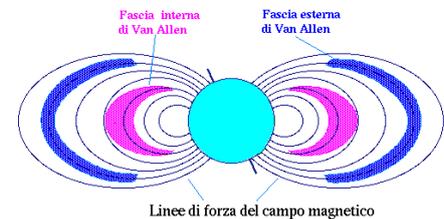
**Figura 1.5:** Particolare del moto di oscillazione delle particelle fra i mirror point

Le traiettorie di queste particelle sono quindi tutte contenute in regioni di spazio di forma toroidale che circondano la Terra (figura 1.6.(a)), e vanno a definire delle superfici chiamate *drift shell* di cui un esempio è rappresentato in figura 1.6.(b). Protoni ed elettroni, provenienti da raggi cosmici, restano quindi intrappolati in tali regioni che prendono il nome di *fasce di van Allen*.

Il concetto di drift shell è legato a quello di L-shell, che è il luogo geometrico delle linee di campo magnetico la cui distanza dal centro della terra (misurata dall'intersezione delle linee stesse col piano equatoriale) è pari ad un numero L di raggi terrestri. Quindi ad esempio una drift shell con  $L=2$  sarà una shell caratterizzata dal moto delle particelle intorno a linee di campo magnetiche poste ad una distanza dal centro della terra pari a 2 raggi terrestri.


**Figura 1.6**

Tornando alla descrizione delle fasce di van Allen possiamo distinguere due fasce (figura 1.7): quella più interna, che si estende fra i 1000 km ed i 6000 km dalla superficie terrestre, è costituita principalmente da un plasma di protoni molto energetici (con energie nell'ordine delle centinaia di MeV) ed elettroni di basse energie (da un centinaio di keV a qualche MeV); la fascia più esterna, che si estende fra i 10 000 km ed i 60 000 km, è invece composta da elettroni con energie che variano in un range che va da 0.1 MeV a 10 MeV [2].


**Figura 1.7**

Nel prossimo capitolo vedremo che l'emissione di onde elettromagnetiche (con frequenze basse ed ultrabasse), che precede un evento sismico, può provocare una variazione del pitch angle (che ricordiamo essere l'angolo fra il vettore velocità di una particella e una linea di campo magnetico) delle particelle all'interno di una drift-shell. Questo comporta una precipitazione delle particelle e quindi un aumento del flusso nella regione della ionosfera terrestre che potrà essere quindi misurato da un satellite in orbita.

## Capitolo 2

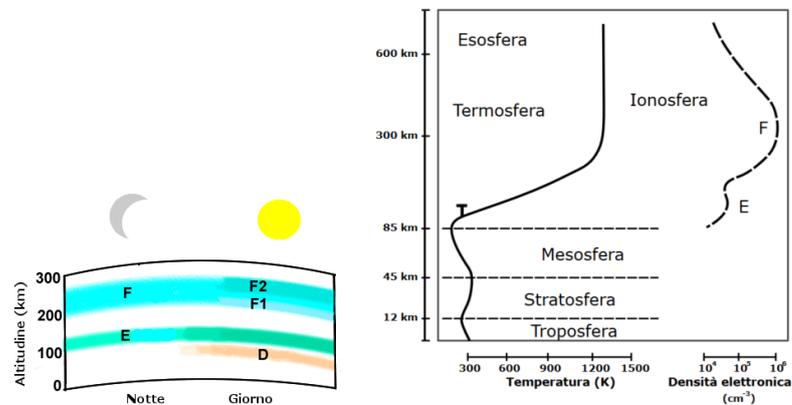
# Accoppiamento sismo-ionosferico

### 2.1 Struttura della ionosfera

La ionosfera è la parte dell'atmosfera caratterizzata da una forte ionizzazione del gas di cui è composta. Si estende fra 50 km e 500 km circa e quindi comprende in parte sia mesosfera che termosfera. Il gas ionizzato di cui è composta, essendo costituito da un gran numero di elettroni e ioni, va trattato utilizzando la fisica dei plasmi. La ionizzazione di questo gas è dovuta principalmente alla radiazione ultravioletta proveniente dal sole e, in parte minore, da raggi cosmici e particelle che precipitano dalle fasce di van Allen. In figura 2.1.(b) è possibile osservare l'andamento della temperatura e della densità elettronica per alcuni strati dell'atmosfera.

La caratteristica della ionosfera di riflettere onde elettromagnetiche con determinate frequenze – proprietà che permette la trasmissione a grande distanza di onde radio – dipende, come vedremo più dettagliatamente in seguito, dalla densità elettronica del plasma e quindi dalla ionizzazione del gas.

È possibile dividere la ionosfera in vari strati individuati con le lettere D, E ed F, caratterizzati da diversa composizione chimica e diversa capacità di riflettere



(a) Strati della ionosfera<sup>1</sup> (b) Andamento della temperatura e della densità elettronica nei vari strati dell'atmosfera

**Figura 2.1**

onde elettromagnetiche incidenti [3]:

- Lo strato D si estende fra i 50 km e i 90 km ed è principalmente composto da ossido di azoto ( $\text{NO}^+$ ) ionizzato.

Il livello di ionizzazione in questo strato dipende in maniera diretta dalla luce solare. Infatti, quando gli elettroni in questo strato sono investiti da radiazione solare, acquistano energia cinetica ed aumenta la probabilità di ricombinazione con gli ioni. Questo comporta una diminuzione del livello di ionizzazione nelle ore di massima luminosità e quindi non vi è riflessione, soprattutto per frequenze basse ( $\nu < 3 \text{ MHz}$ );

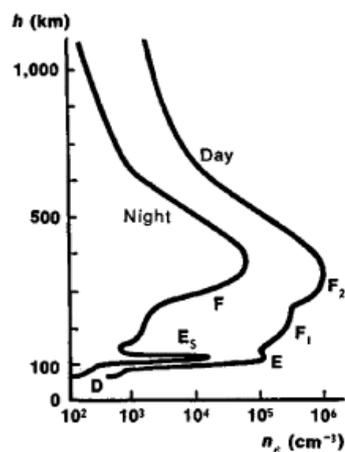
- Lo strato E si estende fra i 90 km e i 150 km ed è composto per lo più da ossigeno molecolare ionizzato ( $\text{O}_2^+$ ).

Come per lo strato D non si ha riflessione per frequenze basse nelle ore centrali della giornata, ma la densità di elettroni è maggiore. Tale densità

<sup>1</sup>Immagine tratta da <http://www.weather.nps.navy.mil/~psgust/>

consente un incurvamento progressivo delle onde a frequenze alte, per coprire distanze fino a 2500 km [4];

- Lo strato F è quello maggiormente interessato dal fenomeno dell'accoppiamento sismo-ionosferico ed è anche quello che presenta una maggiore riflessione per le onde elettromagnetiche, permettendo la riflessione fino a migliaia di chilometri di distanza. È composto principalmente da  $O_2^+$ ,  $NO^+$  ed  $O^+$ . Si può dividere in due ulteriori strati:
  - lo strato F1 si estende fra i 150 km ed i 250 km, è presente solo di giorno ed è caratterizzato da una densità elettronica compresa fra  $2 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$  e  $5 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$ ;
  - lo strato F2, invece, si estende fra i 250 km ed i 500 km, è presente sia di giorno che di notte ed è caratterizzato da una densità elettronica nell'ordine di  $2 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$  di giorno, mentre  $3 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$  di notte. È lo strato che maggiormente si presta alla riflessione delle onde elettromagnetiche (proprio grazie a questa elevata densità di elettroni), permettendo di coprire distanze fra i 15 000 km ed i 20 000 km.



**Figura 2.2:** Particolare dell'andamento della densità elettronica nei vari strati della ionosfera e durante le ore diurne e notturne

Quando un'onda incide su di un plasma (nel nostro caso su di uno degli strati visti prima), il suo campo elettrico andrà ad interagire in maniera molto più significativa con particelle cariche e leggere come gli elettroni, piuttosto che con gli ioni.

Questa interazione induce un moto oscillatorio negli elettroni e si può dimostrare che, una volta che la perturbazione causata dal campo elettrico cessa, l'energia acquisita viene riemessa verso la superficie terrestre e si ha quindi la riflessione dell'onda. Questo è possibile solo se la frequenza è tale da permettere agli elettroni di reagire al campo elettrico e quindi di seguirne le variazioni, altrimenti l'onda penetrerà quasi indisturbata il plasma senza essere riflessa. Infatti, se la frequenza è tanto alta da non indurre negli elettroni una variazione di velocità tale da permettergli di seguire le variazioni del campo elettrico, agli elettroni non viene trasmesso alcun moto oscillatorio.

Possiamo trascurare l'interazione del campo elettrico con gli ioni in quanto la loro massa è decisamente superiore a quella degli elettroni e quindi la variazione di velocità che subiscono è molto bassa e si può dire che sono trasparenti all'onda incidente. Lo stesso si può dire nel caso di un basso livello di ionizzazione, ossia una bassa densità di elettroni, infatti in questo caso si ha un gran numero di particelle neutre (dovute alla ricombinazione di ioni ed elettroni nel plasma) che non interagiscono affatto col campo.

La frequenza al di sotto della quale è possibile la riflessione è detta *frequenza di plasma* ed è espressa dalla relazione:

$$\nu_p = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \varepsilon_0}} \quad (2.1)$$

dove:

- $n_e$  è la densità elettronica del plasma;
- $e$  è la carica dell'elettrone;
- $m_e$  è la massa a riposo dell'elettrone;
- $\varepsilon_0$  è la costante dielettrica del vuoto.

Sostituendo i valori numerici delle costanti ed esprimendo la frequenza in Hz e la densità elettronica in  $\text{m}^{-3}$ , possiamo scrivere:

$$\nu_p = 8.98 \cdot \sqrt{n_e} \quad (\text{Hz}) \quad (2.2)$$

Finchè un'onda elettromagnetica mantiene una frequenza inferiore alla frequenza di plasma di un determinato strato è, come abbiamo visto, riflessa da quello strato, mentre, una volta che supera la frequenza di plasma può propagarsi oltre ed essere eventualmente riflessa da strati superiori.

Esiste però un limite oltre il quale l'onda non può più essere riflessa, infatti come abbiamo visto, lo strato con densità elettronica maggiore è lo strato F2, quindi, un'onda che avesse una frequenza superiore alla frequenza di plasma di questo strato (chiamata per questo motivo *frequenza critica* ed indicata con  $\nu_{p,F2}$ ) lo attraverserebbe indisturbata e si propagherebbe nello spazio.

La frequenza critica, come vedremo in seguito, è un indice delle variazioni che subisce la ionosfera a causa di diversi fenomeni che andremo ad indagare nel prossimo paragrafo.

## 2.2 Precursori sismico-elettromagnetici

Delineiamo ora un iniziale quadro d'insieme dei principali processi fisici che precedono un terremoto (chiamati *precursori di un terremoto*).

Un terremoto è dovuto, come sappiamo, allo spostamento di placche tettoniche che possono collidere, scorrere fra loro o allontanarsi provocando un accumulo di energia elastica nella zona di delimitazione fra le placche. Superato il carico di rottura della roccia, l'energia accumulata si sprigiona causando il terremoto. Le fratture causate da tale fenomeno vengono chiamate faglie. Tutto ciò può portare ad una serie di eventi che possiamo schematizzare nel seguente modo:

1. Durante la fase di accumulo di energia elastica si possono generare delle microfrazture in prossimità della zona di faglia dalle quali si può liberare gas radon ed in particolare l'isotopo  $^{222}\text{Rn}$ . Questo particolare isotopo decade in  $^{218}\text{Po}$  emettendo  $\alpha$  con elevato potere ionizzante;
2. La parte inferiore dell'atmosfera viene quindi ionizzata e si forma il cosiddetto *near ground plasma*;
3. Gli ioni negativi di questo plasma, dato che il campo elettrico terrestre è diretto verso la superficie terrestre, tendono ad andare verso l'alto mentre quelli positivi verso il basso. Si ha quindi l'*effetto elettrodo*, ossia una separazione di carica che produce un campo elettrico diretto verso l'alto che va a causare anomalie nel campo locale;
4. Tali anomalie provocano irregolarità nel near ground plasma, responsabili dell'emissione di onde elettromagnetiche a frequenza molto bassa (*Very Low Frequency* indicate con VLF) o ultrabassa (*Ultra Low Frequency* o ULF);
5. Queste onde elettromagnetiche possono propagarsi fino agli strati E ed F della ionosfera provocando la formazione di *sporadic E layers* e andando a variare la frequenza critica  $\nu_{p,F2}$ . In particolare, nello strato F il plasma presente è soggetto a moti turbolenti causati dal campo elettrico anomalo e quindi vengono prodotte *Acoustic Gravity Waves* o AGW, onde acustiche a frequenza molto bassa (circa 50 Hz), che provocano irregolarità nel plasma;
6. L'irregolarità nel plasma va a creare un condotto privilegiato per le onde VLF

ed ULF che possono propagarsi fino alle L-shell e quindi interagire con le particelle intrappolate nelle fasce di van Allen, causandone la precipitazione.

Queste particelle precipitate (che sono costituite prevalentemente da elettroni di energia maggiore o uguale ai 4 MeV), possono essere rivelate da un satellite in orbita in un lasso di tempo fra le 2 e le 5 ore prima del terremoto [5] [6].

La figura 2.3 mostra l'intero processo appena descritto.

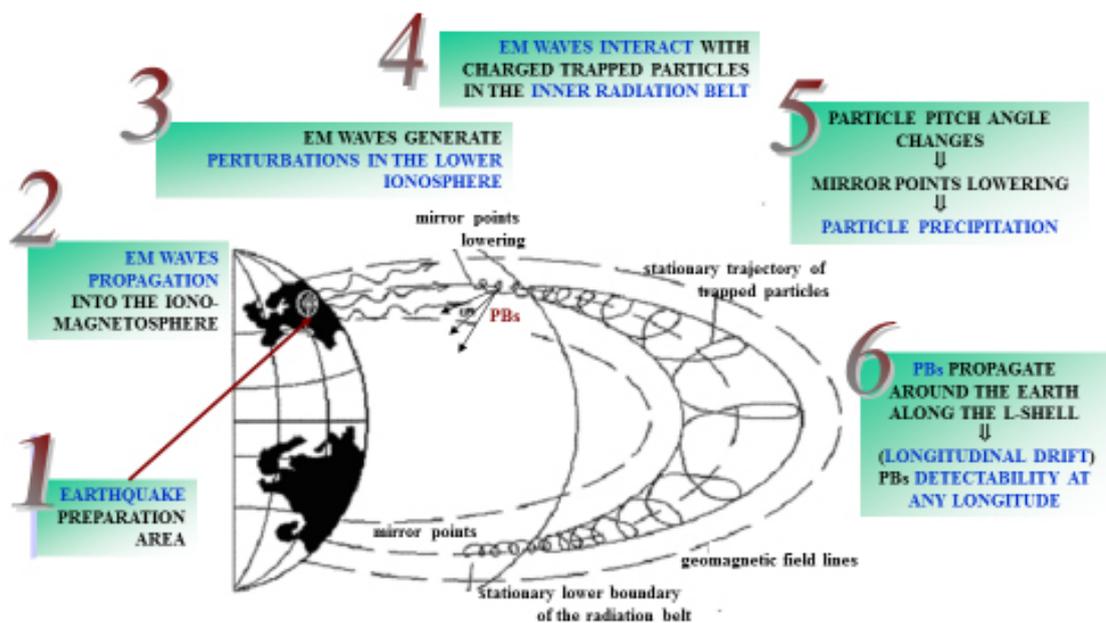


Figura 2.3

# Capitolo 3

## La missione CSES-Limadou ed il rivelatore HEPD

### 3.1 Panoramica della missione

La missione CSES-Limadou si pone l'obiettivo di monitorare le perturbazioni ionosferiche, causate da eventi sismici di magnitudine  $M \geq 6$  nel territorio cinese e magnitudine  $M \geq 7$  a livello globale. Lo scopo è quello di poter sviluppare nuovi metodi per la previsione di terremoti a breve termine e di sviluppare nuovi modelli teorici che spieghino i meccanismi di preparazione dei terremoti.

Tali misure devono essere discriminate dal rumore di fondo causato da eventi atmosferici e dall'attività solare. Quest'ultima gioca infatti un ruolo molto importante nelle variazioni dei parametri ionosferici e magnetosferici tramite le espulsioni di massa coronale (*Coronal Mass Ejections*) e brillamenti solari (*Solar Flares*).

A tale scopo il satellite CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) dispone di una strumentazione che gli permette di misurare i seguenti parametri: perturbazioni del campo magnetico ed elettrico nella ionosfera; irregolarità del plasma; misura del flusso e dello spettro di energie delle particelle nelle fasce di van Allen;

misura della densità di elettroni.

Uno schema dei parametri misurati e delle strumentazioni adottate a tale scopo è riportato nella tabella seguente:

Parametri misurati	Strumentazione
Misura delle perturbazioni del campo elettrico e magnetico nella ionosfera	Search-Coil Magnetometer Fluxgate Magnetometer Electric Field Detector (EFD)
Misura delle irregolarità del plasma nella ionosfera	Plasma analyzer Langmuir probe
Misura del flusso e dello spettro di energia delle particelle nelle fasce di van Allen	High-Energy Particle Detector (HEPD) High-Energy Particle Package (HEPP)
Misura della densità di elettroni	GNSS Occultation Receiver Tri-Band Beacon

Il satellite si basa sulla piattaforma CAST2000, un sistema stabilizzato a tre assi che orbiterà alla quota di 500 km (quindi entro lo strato F2) e verrà lanciato nel settembre del 2016 [7].

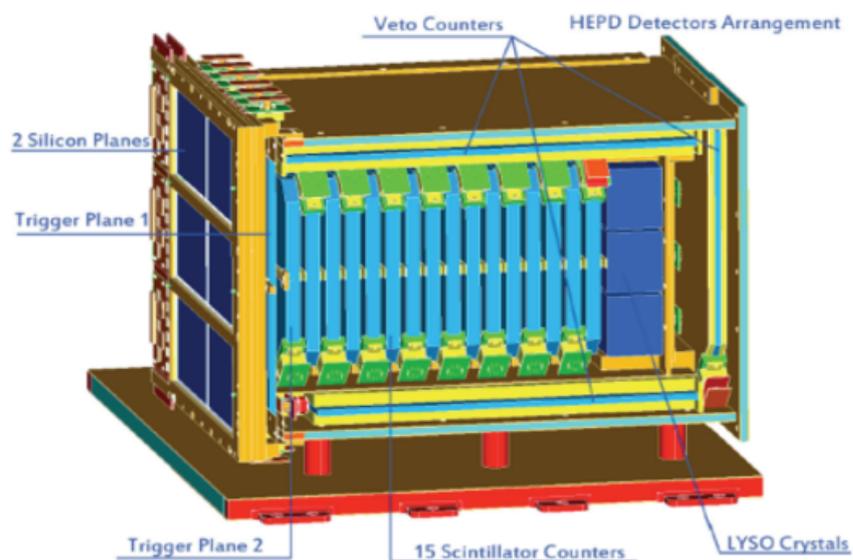
Nei prossimi paragrafi ci concentreremo in particolare sulla descrizione del rivelatore HEPD – frutto della collaborazione italiana alla missione CSES nell’ambito del progetto Limadou – delle sue caratteristiche fisiche e dell’elettronica ad esso associata.

## 3.2 HEPD: Caratteristiche generali

Il rivelatore HEPD è adibito alla rivelazione di elettroni e protoni in un range di energie che va dai 3 ai 100 MeV, per gli elettroni e dai 30 ai 200 MeV per i protoni.

Oltre a distinguere il tipo di particella rivelata (fra elettroni e protoni), lo HEPD permette di misurarne l'energia e la direzione.

Le misure della direzione permettono di valutare il pitch angle della particella rispetto alle linee di campo magnetico terrestre locale (misurate dai magnetometri a bordo del satellite). Spettro energetico e pitch angle ricavati, permettono di ottenere informazioni sulla provenienza della particella in esame e sul flusso delle particelle che precipitano dalle fasce di van Allen.



**Figura 3.1:** *Struttura interna del rivelatore HEPD*

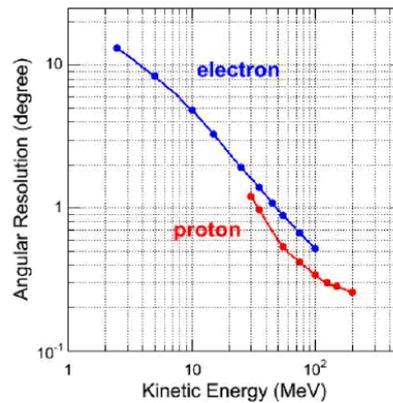
Il rivelatore è rappresentato in figura 3.1 ed è costituito da:

- Due piani di rivelatori a microstrip di silicio a doppia faccia.

Ognuno di questi piani permette di individuare il punto in cui viene attraversato dalla particella con una risoluzione spaziale di  $50\ \mu\text{m}$ . I due punti individuano quindi una retta che rappresenta la traiettoria di entrata della particella. Da questa è possibile ricavare l'angolo fra la direzione della particella e gli assi del satellite, che conducono alla determinazione del

pitch angle.

In figura 3.2 è possibile vedere l'andamento della risoluzione angolare di elettroni e protoni in funzione della loro energia cinetica;



**Figura 3.2:** Risoluzione angolare per protoni ed elettroni

- Due piani di scintillatori plastici adibiti alla funzione di *trigger*.

Il primo piano è costituito da 6 scintillatori contigui, ognuno dei quali possiede due tubi fotomoltiplicatori (*PMT*). Il secondo è un unico piano, delle stesse dimensioni di quelli che vanno a costituire il calorimetro, al quale sono collegati due *PMT*.

Il segnale di *trigger* permette di segnalare l'attraversamento di una particella all'elettronica di acquisizione in modo da far partire la lettura e l'elaborazione dei valori misurati.

- Una serie di 15 scintillatori plastici ed una matrice 3x3 di blocchi di *LYSO*. Tali oggetti vanno a costituire il calorimetro.

Ad ognuno degli scintillatori sono collegati due *PMT* mentre ad ogni blocco di *LYSO* è collegato un *PMT*.

Il *LYSO* è un materiale scintillatore più denso di quello degli scintillatori plastici e con una resa in luce maggiore, cosa che permette di aumentare

il range energetico dello strumento (per questo motivo è posto in fondo al calorimetro). Tramite questi scintillatori è possibile conoscere l'energia della particella incidente e la sua natura (quest'ultima va ricavata in combinazione con i rivelatori al silicio come vedremo più in dettaglio nel paragrafo successivo;

- L'intero calorimetro è circondato da pareti di scintillatore plastico che costituiscono il sistema di VETO.

Ad ogni parete sono collegati due PMT. Il segnale generato dall'attraversamento di queste pareti da parte di una particella, viene elaborato dall'elettronica del rivelatore. È così possibile distinguere particelle che entrano nel rivelatore con angoli troppo grandi, che porterebbero la particella a fuoriuscire dallo HEPD senza che sia possibile il rilascio di tutta la sua energia all'interno del calorimetro.

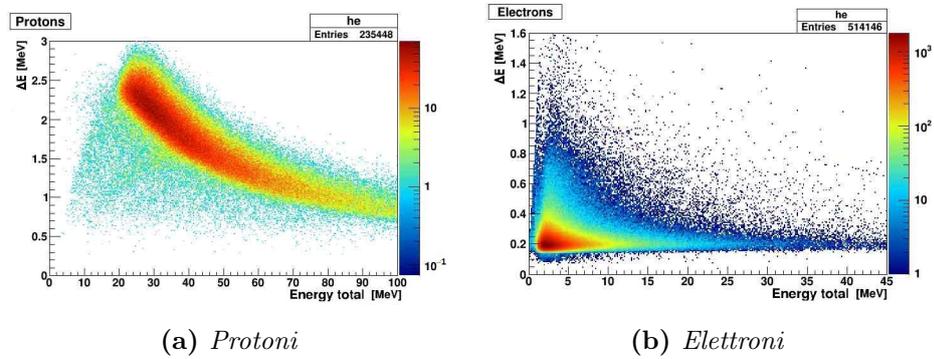
Allo stesso modo, grazie alla parete posta sul fondo del calorimetro, si possono distinguere particelle troppo energetiche che, pur entrando con angolo giusto, fuoriuscirebbero dal fondo dello HEPD.

### 3.3 HEPD: Calorimetro

Vedremo ora, con maggiore dettaglio, il funzionamento del calorimetro, il metodo di discriminazione fra protoni ed elettroni ed il sistema col quale vengono scartate particelle che non rispondono alle condizioni di trigger e alle condizioni di confinamento imposte dal VETO.

Le emissioni luminose degli scintillatori e dei LYSO, che costituiscono il calorimetro, vengono lette dai PMT che forniscono un segnale proporzionale all'energia persa dalla particella. In questo modo è possibile ottenere lo spettro dell'energia del flusso di particelle interagenti con il calorimetro.

Per distinguere fra eventi prodotti da protoni o da elettroni si utilizza un metodo che richiede l'utilizzo dei dati forniti dai due piani di rivelatori al silicio, oltre alle misure provenienti dal calorimetro. Infatti graficando l'energia persa nei piani dei rivelatori al silicio – che hanno spessore piccolo rispetto ad un singolo piano di scintillatore plastico – in funzione dell'energia totale persa nel calorimetro, si osserva che elettroni e protoni hanno comportamenti diversi e da queste considerazioni è possibile distinguere gli eventi dovuti agli elettroni da quelli dovuti ai protoni (si veda figura 3.3) [8].



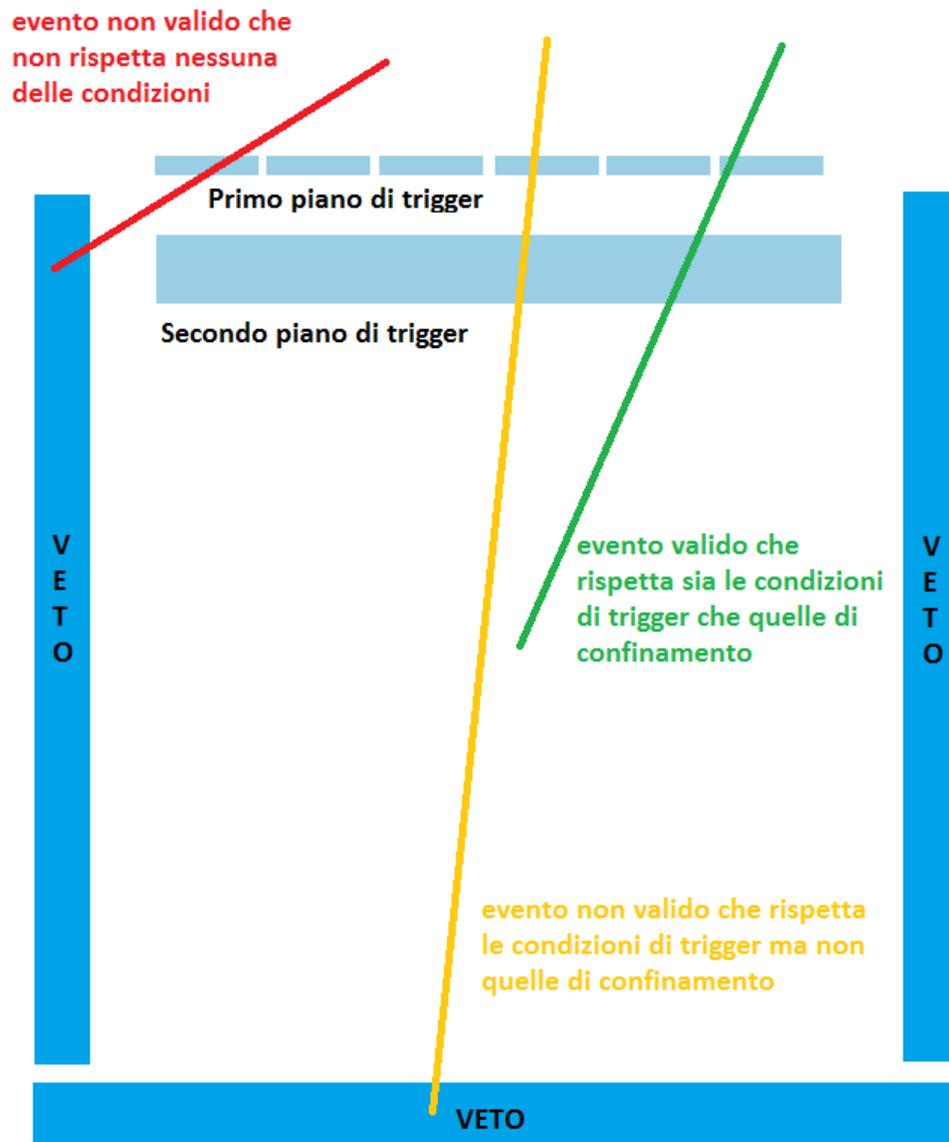
**Figura 3.3:** Distribuzione dell'energia persa nei piani di silicio in funzione dell'energia totale persa nel calorimetro per protoni ed elettroni

Per quel che riguarda la selezione delle particelle da acquisire, vengono considerati validi gli eventi che rispettino determinate condizioni di trigger e di VETO.

Per quel che riguarda il VETO, possono essere ignorati i segnali prodotti da particelle che attraversino uno qualsiasi dei piani che circondano il calorimetro, in modo da tener conto solo delle particelle che perdano tutta la loro energia all'interno del calorimetro.

La scelta di quella che si definisce *maschera di trigger*, invece, dipende dalla zona orbitale, dal rate massimo di eventi ammissibile dall'elettronica, dal tipo di particella e dal range di energia che interessa.

In figura 3.4 è mostrato un esempio delle condizioni descritte.



**Figura 3.4:** Esempio di una possibile maschera di trigger in cui sono considerati validi solo i segnali generati da particelle che attraversano entrambi i piani di trigger ma non le pareti di VETO

### 3.4 HEPD: Elettronica

Il sistema elettronico del rivelatore HEPD è rappresentato schematicamente in figura 3.5.

Si può dividere l’elettronica dello HEPD in quattro blocchi: il sistema di alimentazione, il blocco dei rivelatori al silicio, il blocco degli scintillatori (che comprende il trigger, il VETO ed il calorimetro) ed il sistema di controllo ed elaborazione dati.

Il sistema di alimentazione provvede a fornire l’alimentazione a basso voltaggio (LVPS) all’elettronica dei rivelatori e quella ad alto voltaggio (HVPS) ai PMT (che necessitano di una tensione nell’ordine di 800 V) ed ai rivelatori al silicio (che richiedono 80 V). L’alimentazione viene prelevata dal satellite che fornisce 29.5 V.

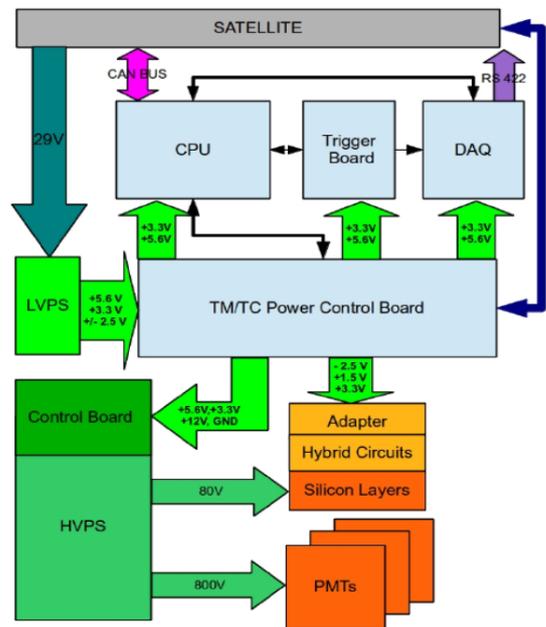


Figura 3.5

Osservando la figura 3.6 è possibile farsi una idea di come lavorino i vari blocchi dei rivelatori al silicio e degli scintillatori. Prima di analizzarne il funzionamento però, verrà data una spiegazione dei nomi che compaiono nello schema o che comunque si incontreranno in seguito:

- EASIROC sta per “Extended Analogue Silicon photomultiplier Integrated Read Out Chip” ed è l’integrato adibito alla lettura dei segnali dagli scintillatori. In particolare si tratta di un ASIC, “Application Specific Integrated

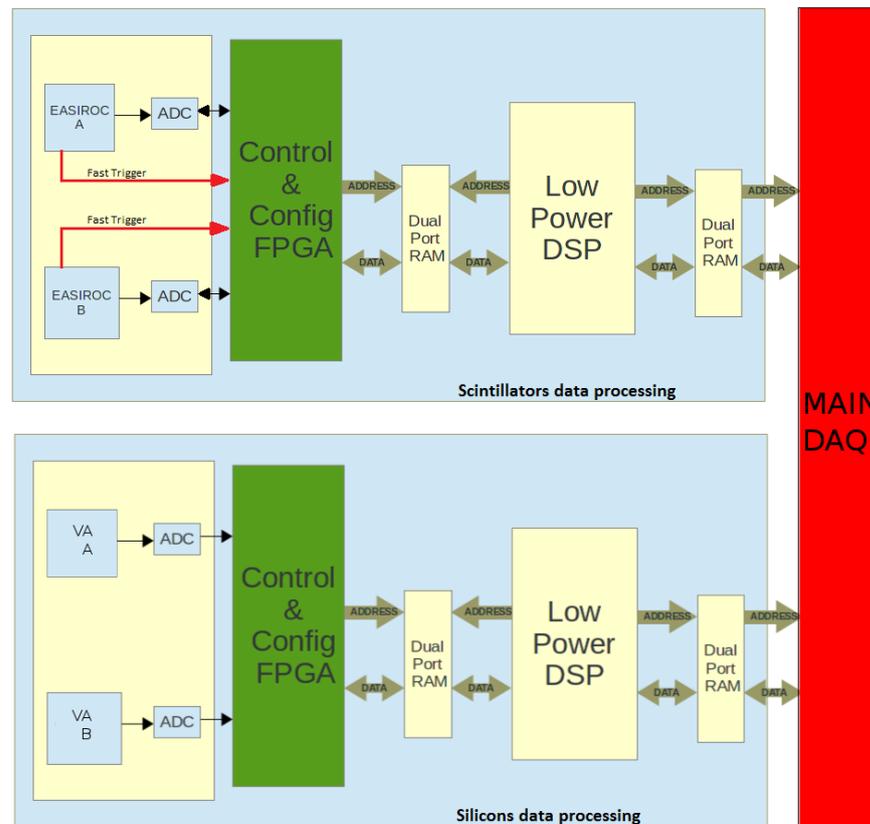


Figura 3.6: Schema a blocchi dello HEPD

Circuit”, ovvero un integrato realizzato appositamente allo scopo di risolvere un compito preciso.

Data l’importanza di questo componente verrà data una descrizione più accurata nel paragrafo successivo.

- VA sta per “Viking Access” ed è un altro ASIC che svolge lo stesso compito dell’EASIROC ma lo fa per i rivelatori al silicio;
- ADC sta per “Analog to Digital Converter” ed è un integrato che si occupa di convertire un segnale analogico in una serie di valori numerici;
- DAC sta per “Digital to Analog Converter” ed è un integrato che si occupa di generare un preciso valore di tensione in uscita, determinato dal valore

digitale posto in ingresso;

- FPGA sta per “Field Programmable Gate Array” ed è un integrato costituito da un array di porte logiche che possono essere programmate per realizzare sistemi anche molto complessi;
- DAQ sta per “Data Acquisition” ed è l’insieme dei dispositivi elettronici che si occupano dell’acquisizione dei dati e dell’invio di questi al satellite;
- DSP sta per “Digital Signal Processor” ed è il dispositivo che si occupa di elaborare i segnali digitali.

Si può schematizzare il funzionamento dell’elettronica dello HEPD nel seguente modo (possiamo concentrarci solo sul blocco degli scintillatori plastici data la quasi simmetria del sistema):

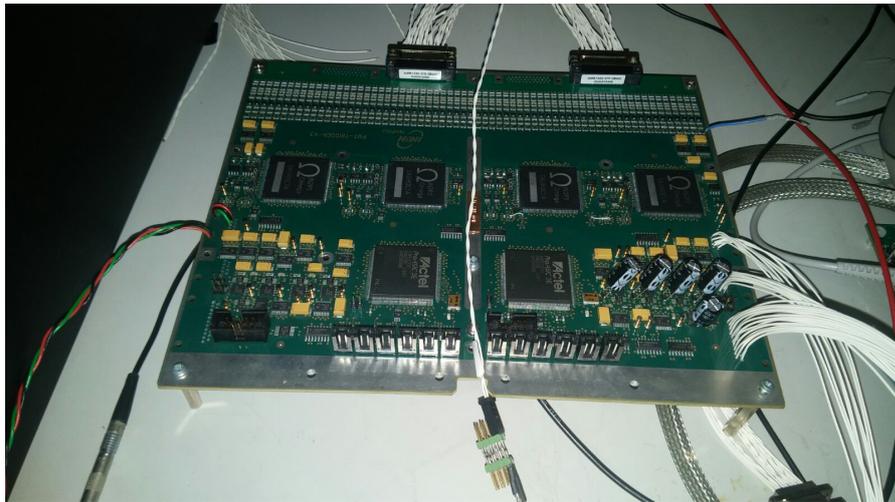
1. Il segnale in uscita dai PMT viene inviato all’EASIROC. Dato che ogni piano scintillatore possiede due PMT i due segnali provenienti da questi vengono mandati a due EASIROC diversi;
2. L’EASIROC produce (come vedremo in dettaglio nel prossimo paragrafo) un segnale di trigger (chiamato *fast trigger*) che viene letto da una FPGA indicata come “Control & Config FPGA”;
3. Se le condizioni di trigger, determinate dalle trigger mask, sono rispettate la Control & Config FPGA abilita gli ADC ed il segnale analogico in uscita dalle EASIROC viene convertito in un segnale digitale;
4. Tale segnale viene passato alla Main DAQ che si occupa dell’elaborazione di questi segnali, della compressione dei dati e dell’invio di questi al satellite e quindi a Terra.

Nel prossimo paragrafo descriveremo la scheda che si occupa di gestire gli EASIROC e di interfacciarsi con la DAQ. Tale scheda è indicata col nome di PMT/TRIGGER Board ed è il principale soggetto di questa tesi.

### 3.5 HEPD: PMT/TRIGGER Board

La figura 3.7 mostra la PMT/TRIGGER Board. I quattro integrati ben visibili nella zona superiore sono gli EASIROC mentre i due integrati nella zona inferiore, sono le Control & Config FPGA.

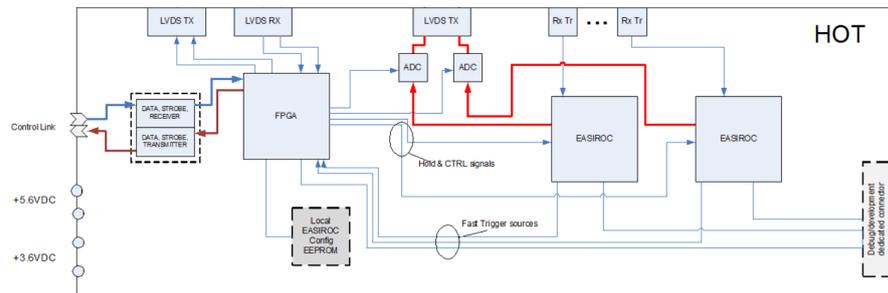
La scheda è divisa in due sezioni, chiamate HOT e COLD, con uno schema elettrico identico, stessi componenti ed identiche funzionalità. Normalmente la sezione HOT è quella attiva mentre la sezione COLD è spenta. Grazie a questa ridondanza, in caso di malfunzionamento nella sezione HOT è possibile spegnerla ed attivare la sezione COLD.



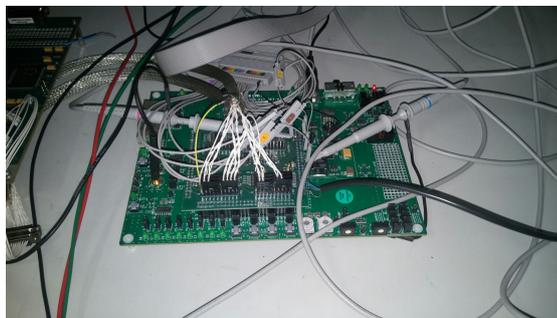
**Figura 3.7:** *PMT/TRIGGER Board: come si può vedere tutti i componenti sono duplicati per via della ridondanza HOT/COLD. Sono quindi presenti 4 EASIROC anzichè 2 e 2 FPGA.*

Uno schema della sezione HOT è mostrato in figura 3.8 [9].

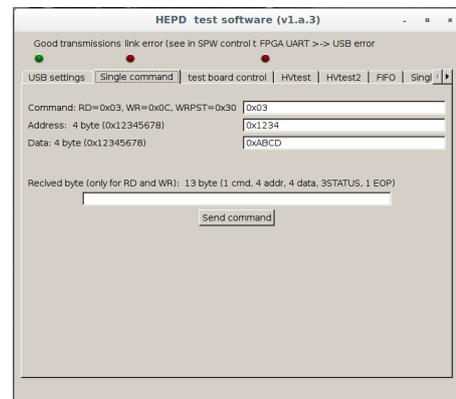
Un'altra scheda permette di emulare la DAQ e la CPU del sistema e di interfacciarsi con la PMT/TRIGGER Board tramite computer, utilizzando un software appositamente scritto chiamato *HEPD test software*. In figura 3.9 sono mostrati il software e la scheda.



**Figura 3.8:** Schema a blocchi della sezione HOT



(a) Scheda di emulazione DAQ



(b) HEPD test software

**Figura 3.9**

Passiamo ora a descrivere lo schema interno dell'EASIROC ed il suo funzionamento.

Come si può osservare dallo schema a blocchi in figura 3.10, l'EASIROC possiede 32 canali di ingresso ai quali è possibile collegare i segnali provenienti dai PMT. Tali segnali vengono inviati a due preamplificatori: il primo a basso guadagno (Low Gain), il secondo ad alto guadagno (High Gain).

Questi preamplificatori permettono di integrare il segnale in corrente in ingresso e restituire un segnale in tensione.

Il guadagno (ossia il rapporto fra segnale in uscita dal preamplificatore e segnale in ingresso) è dato dal rapporto fra capacità in ingresso ( $C_i$ ) e la capacità di

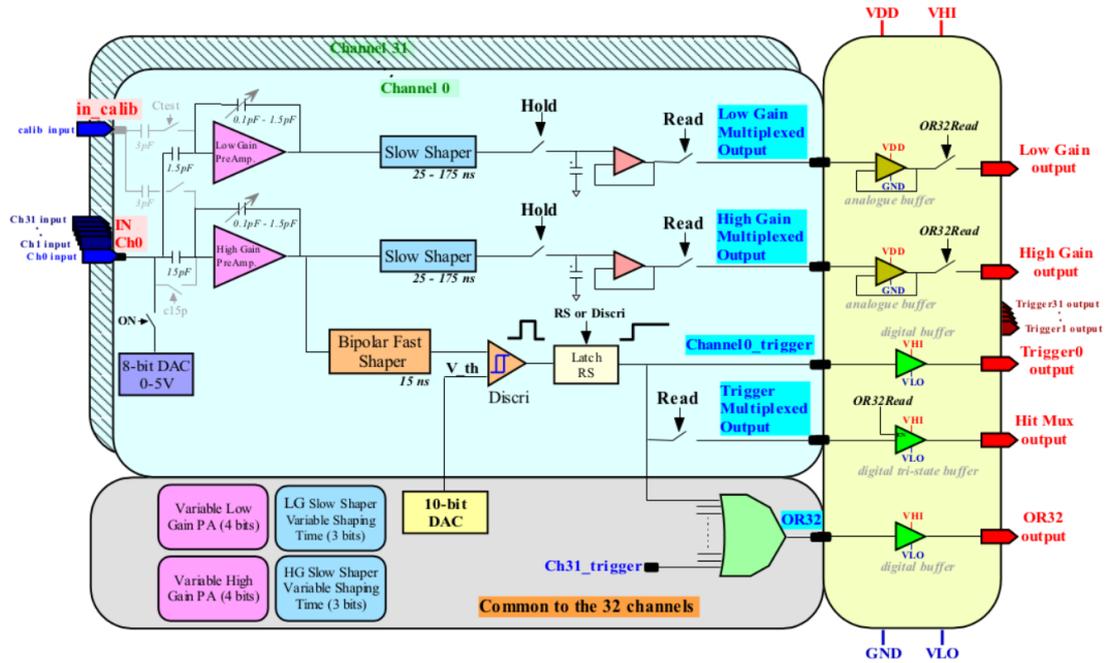


Figura 3.10: Schema a blocchi della EASIROC

feedback ( $C_F$ ):

$$G = \frac{C_i}{C_F}. \quad (3.1)$$

La capacità in ingresso è fissata ed è di 1.5 pF per il preamplificatore a basso guadagno e di 15 pF per quello ad alto guadagno. La capacità di feedback è invece variabile tramite 4 bit di configurazione, e può variare in un range che va da 0.1 pF a 1.5 pF per entrambi i preamplificatori.

Con tali valori per le capacità, il guadagno varia nei seguenti range: da 1 a 15 per il Low Gain, da 10 a 150 per l'High Gain.

La determinazione di questo parametro è uno dei principali obiettivi dell'attività di laboratorio e verrà descritto nel capitolo successivo.

Il segnale uscente dal preamplificatore passa per uno *shaper* che si occupa di filtrare il segnale dall'eventuale rumore e dargli una forma adatta alle successive elaborazioni (*Slow Shaper*). Il tempo di formazione di tale segnale, detto *shaping*

*time*, può essere variato – in un range compreso fra 25 ns e 175 ns – tramite 3 bit di configurazione.

Come per le capacità di feedback dei preamplificatori, anche l’ottimizzazione di questo parametro verrà discussa nel capitolo successivo.

Un secondo shaper più veloce è collegato al solo preamplificatore High Gain, per fornire un segnale di trigger per il singolo canale (*Bipolar Fast Shaper*). Il segnale in uscita da questo shaper viene collegato ad un discriminatore.

La soglia per questo discriminatore viene fornita da un DAC a 10 bit. Nel caso il segnale dello shaper abbia un picco ad una tensione inferiore a quella del DAC, il discriminatore mantiene una uscita bassa e quindi non si ha segnale di trigger. In caso contrario invece il segnale di trigger generato viene passato in uscita attraverso un *latch rs*. Quest’ultimo permette di mantenere lo stato di uscita alto anche quando il segnale del discriminatore torna basso, finchè non viene applicato il segnale di reset.

Anche la determinazione dei 10 bit del DAC verrà discussa in seguito.

Per conservare i valori di tensione in uscita dagli slow shaper è presente un circuito di *track & hold* con il quale è possibile conservare tali valori in due condensatori. Il segnale di *Hold* permette di abilitare il salvataggio di questi valori e quello di *Read* permette di passarli in uscita.

Le uscite della catena High Gain e Low Gain sono multiplexate, la lettura di ogni canale avviene quindi sequenzialmente. Sono presenti dei buffer per ridurre l’impedenza di uscita.

I segnali di trigger provenienti da tutti e 32 i canali sono collegati in OR per fornire una uscita che segnali un trigger per un qualsiasi evento avvenga in uno qualsiasi degli ingressi, questa uscita è chiamata OR32 [10].

La configurazione degli EASIROC avviene modificando i valori contenuti in alcuni registri a 32 bit della FPGA presente sulla PMT/TRIGGER Board.

I registri da utilizzare, per la configurazione dei parametri di interesse per questa tesi, sono quelli ai seguenti indirizzi:

- 0x00000005, relativo al registro per la configurazione del DAC;
- 0x00000007, relativo al registro per la configurazione dello shaping time;
- 0x00000009, relativo al registro per la configurazione delle capacità di feedback.

Nel prossimo capitolo ci occuperemo della caratterizzazione dell'elettronica di acquisizione appena descritta.

# Capitolo 4

## Caratterizzazione

### 4.1 Introduzione

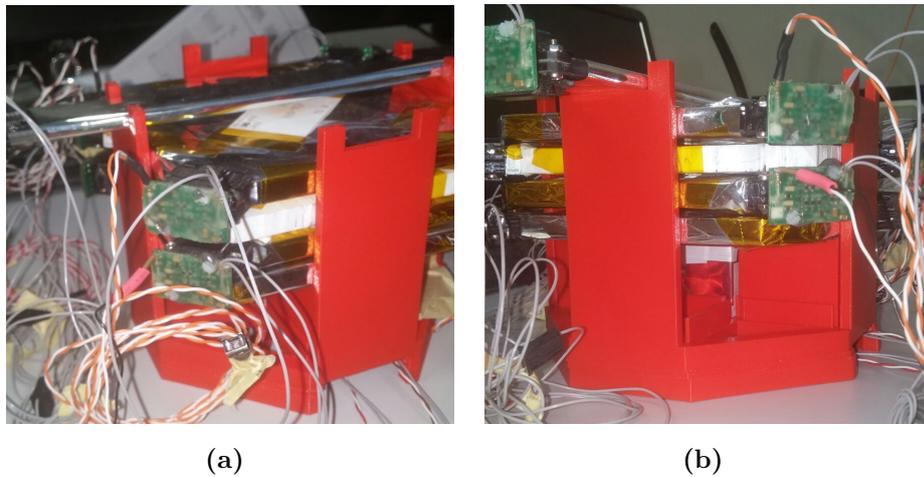
In questo capitolo si descriverà l'attività di laboratorio svolta al fine di caratterizzare l'elettronica di acquisizione del rivelatore HEPD.

Tale attività è consistita nella determinazione dei seguenti parametri delle EASIROC, con le conseguenti misure ed analisi dati:

- Tensioni di soglia dei discriminatori posti in uscita al fast shaper;
- Capacità di feedback poste sui preamplificatori;
- Tempo di formazione del segnale prodotto dallo shaper.

In figura 4.1 è possibile vedere il prototipo di rivelatore con il quale sono state effettuate le misure. Consiste in quattro piani di scintillatore plastico impilati, alla sommità dei quali è posta una delle sei lastre che andrebbero a costituire uno dei piani di trigger. Sotto il piano più basso è montato uno dei nove blocchi di LYSO (visibile in figura 4.1.(b)).

Il tutto è montato all'interno di una dark box.



**Figura 4.1:** *Prototipo dello HEPD*

È stata scelta la configurazione di trigger indicata con T & P1, nella quale si collega in AND il piano di scintillatore posto più in alto con l'OR di tutti gli altri piani, del LYSO e della lastrina superiore.

## 4.2 Determinazione delle tensioni di soglia

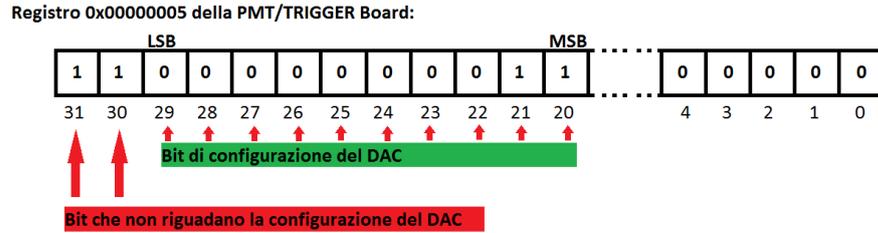
Come mostrato dalla figura 3.10 del capitolo precedente, in uscita al fast shaper è posto un discriminatore a cui è collegato un DAC a 10 bit.

Per impostare i 10 bit del DAC, bisogna scrivere il valore desiderato nel registro a 32 bit con indirizzo 0x00000005 della FPGA posta sulla PMT/TRIGGER Board. Tale FPGA si occupa di configurare il DAC con il valore binario scelto.

Essendo il registro a 32 bit, solo una sezione di questo è interessato alla configurazione del DAC.

Rappresentando il registro come una serie di 32 celle, numerate come in figura 4.2, la disposizione dei bit di configurazione nel registro prevede che il bit di configurazione meno significativo (LSB) occupi la ventinovesima cella mentre quello più significativo (MSB) la ventesima.

Di seguito, per scrivere i valori di configurazione, si utilizzerà la notazione esadecimale. Verranno rappresentati solo i 3 byte più significativi corrispondenti ai 12 bit più significativi fra i 32 del registro.



**Figura 4.2:** In questo esempio è possibile notare che, mentre nel registro i primi tre byte sono 0xC03, il valore di configurazione del DAC corrisponde a 0x300, data la peculiare disposizione dei bit.

La prima operazione effettuata è stata quella di verificare la linearità del DAC e ricavare la relazione che lega i bit di configurazione con il valore di tensione in uscita.

A tale scopo è stata misurata la tensione di soglia – su entrambi gli EASIROC – per alcune configurazioni, scelte in modo da poter indagare l’intero range fra 0xC00 e 0xFFFF.

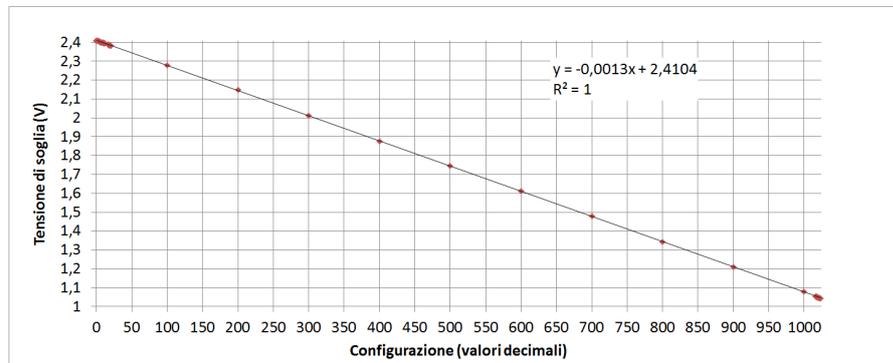
Il risultato di tali misure, riferito ad uno degli EASIROC che indicheremo con la lettera B, è riportato nel grafico di figura 4.3.

È stato effettuato un fit lineare di questi dati, con il metodo dei minimi quadrati, dal quale è stata ricavata la seguente relazione fra bit di configurazione e tensione:

$$V_B = -0.0013 \cdot C_{DAC} + 2.4104 \quad (V) \quad (4.1)$$

Dove:

- $V_B$  è la tensione in uscita dal DAC;



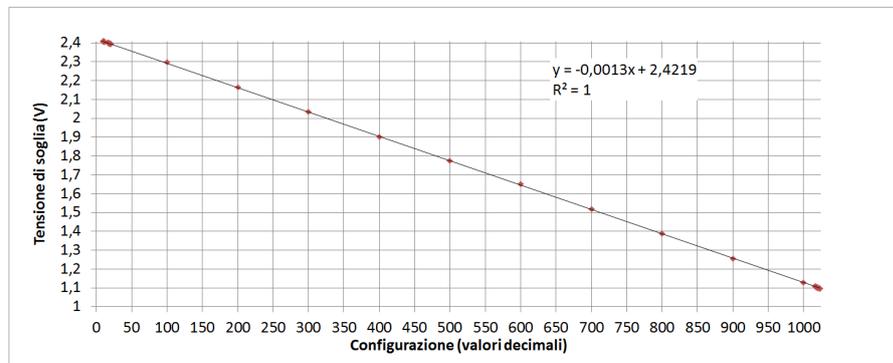
**Figura 4.3:** *Fit lineare EASIROC B*

- $C_{DAC}$  è il valore di configurazione – in decimale – del DAC.

L'errore standard per il coefficiente di  $C_{DAC}$  è  $\sigma_{c,B} = 4.7 \cdot 10^{-7}$  mentre per il termine noto è  $\sigma_{t,B} = 2.7 \cdot 10^{-4}$  V.

Dal valore di  $R^2$  è possibile osservare l'ottimo accordo fra i dati sperimentali e il fit lineare.

Per l'altro EASIROC, indicato con la lettera C, i risultati sono i seguenti:



**Figura 4.4:** *Fit lineare EASIROC C*

La relazione ottenuta è quindi:

$$V_C = -0.0013 \cdot C_{DAC} + 2.4219 \quad (V) \quad (4.2)$$

Con  $\sigma_{c,C} = 5.5 \cdot 10^{-7}$  e  $\sigma_{t,C} = 3.1 \cdot 10^{-4}$  V.

Per poter scegliere più facilmente le configurazioni da impostare, per ottenere un determinato valore di soglia, è stato scritto un programma in C (figura 4.5).

```

marco@ma
File Modifica Visualizza Cerca Terminale Aiuto
marco@marcomputer:~$ conversione
Inserire 1 per stampare tutte le configurazioni con rispettive soglie;
Inserire 2 per scegliere di stampare le configurazioni relative ad un range di soglie;
2
Inserimento del range di valori di soglia di cui conoscere le configurazioni:
Min: 1.550
Max: 1.555
Le possibili configurazioni per una soglia compresa fra 1.550 e 1.555 sono:
H: 0xf85fffc0 Soglia: 1.551 +- 0.006 V
H: 0xe85fffc0 Soglia: 1.554 +- 0.005 V
H: 0xe45fffc0 Soglia: 1.551 +- 0.005 V
H: 0xd85fffc0 Soglia: 1.552 +- 0.005 V
H: 0xc85fffc0 Soglia: 1.555 +- 0.004 V
H: 0xc45fffc0 Soglia: 1.552 +- 0.004 V
Scegliere altre soglie? (s/n)

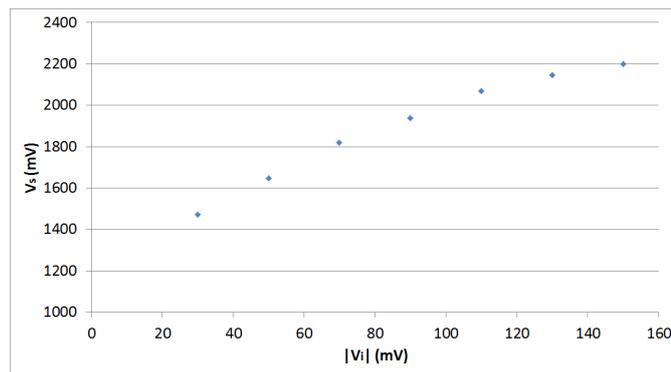
```

**Figura 4.5**

Una volta ottenuta la corrispondenza fra bit di configurazione e tensione, si è proceduto con una seconda serie di misure nelle quali è stato impulsato un canale della sola EASIROC B, cambiando ogni volta l'ampiezza dell'impulso.

Per ogni valore di ampiezza (indicato con  $V_i$ ) si è valutato il valore di soglia in corrispondenza del quale non si osservavano più conteggi (indicato con  $V_s$ ). In questo modo è possibile farsi un'idea del valore di picco che assume il segnale in uscita dallo shaper.

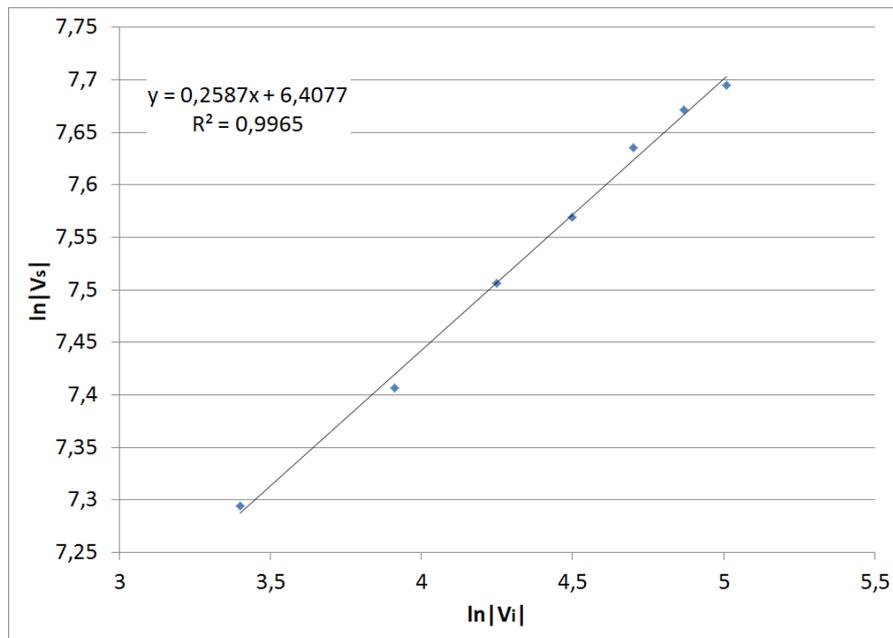
I risultati relativi a queste misure sono riportati nel grafico seguente:



**Figura 4.6:** *Relazione fra tensioni di soglia e valori di picco del segnale prodotto dall'impulsatore. I segnali provenienti dall'impulsatore hanno valore di picco negativo, per convenienza sono riportati i valori assoluti in mV*

Come si può vedere da figura 4.6, i dati suggeriscono un andamento del tipo:  $|V_s| = C \cdot |V_i|^A$  (si utilizzeranno, per le successive analisi, solo i valori numerici delle tensioni, privi delle unità di misura).

Per ottenere i termini C ed A si effettua un fit lineare sui logaritmi naturali dei dati (figura 4.7).



**Figura 4.7**

Il fit lineare fornisce la relazione:  $\ln|V_s| = 0.2587 \cdot \ln|V_i| + 6.4077$ . L'errore per il coefficiente di  $\ln|V_i|$  è  $\sigma_c = 0.0068$  mentre per il termine noto è  $\sigma_t = 0,0301$ .

La relazione fra l'impulso in ingresso all'EASIROC B e il valore in uscita dallo shaper è quindi la seguente:

$$V_s = 606.5 \cdot |V_i|^{0,2587} \quad (mV) \quad (4.3)$$

Passiamo ora a stabilire il valore di soglia da impostare per le successive misure.

Dato che precedenti analisi avevano mostrato che i segnali analogici, provenienti dai PMT, presentavano segnali con un valore minimo di  $-30$  mV, si è deciso

di scegliere una soglia in un range compreso fra 1.385 V e 1.400 V, ovvero una soglia inferiore a 1.5 V ma sufficientemente alta da escludere l'eventuale rumore dei fototubi.

Il passo successivo è stato quello di misurare la differenza fra le tensioni di soglia delle due EASIROC per scegliere la configurazione che presentasse la minore differenza fra le due. La figura 4.8.(a) mostra l'andamento delle due tensioni al variare della configurazione, mentre la figura 4.8.(b) quello della differenza fra le due tensioni.

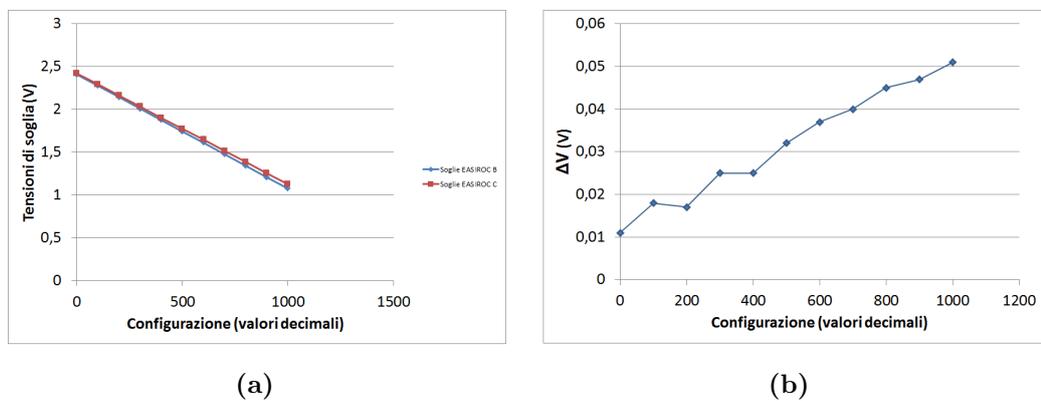


Figura 4.8

Si può osservare che i valori più bassi di differenza fra le tensioni di soglia (indicata con  $\Delta V$ ), si trovano per configurazioni con valori decimali fra 0 e 200. Tali valori però comportano tensioni di soglia nell'ordine di 2 V. Siamo quindi al di sopra del limite, precedentemente stabilito, di 1.5 V. Sono state perciò valutate tutte le configurazioni che fornissero una tensione di soglia fra 1.385 V e 1.400 V ed è stata scelta la configurazione con  $\Delta V$  minore.

A parità di  $\Delta V$  è stata scelta la configurazione che presentasse la soglia minore per la EASIROC C.

Di seguito è riportata una tabella che mostra le possibili configurazioni relative al range scelto ed i valori di soglia misurati sulle due EASIROC.

Configurazione	EASIROC B (V)	EASIROC C (V)
0xC03FFFC0	1.386	1.428
0xFFDFFFC0	1.388	1.431
0xDFDFFFC0	1.389	1.432
0xEFDFFC0	1.390	1.434
0xC7DFFC0	1.398	1.440

La scelta è quindi ricaduta sulla configurazione relativa al valore 0xC03 che, pur comportando una certa asimmetria (di 41 mV) fra le due EASIROC, rispetta le condizioni descritte prima.

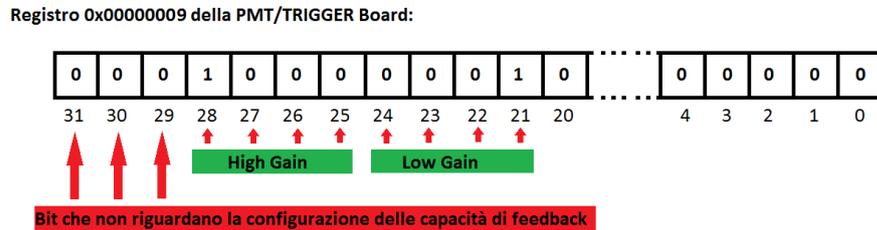
Il registro 0x00000005 va quindi impostato con il valore 0xC03FFFC0.

### 4.3 Determinazione dei valori delle capacità di feedback

Una volta impostata la tensione di soglia per le EASIROC, si può procedere alla determinazione del guadagno da impostare per i preamplificatori delle EASIROC. Per far ciò andiamo a modificare il valore contenuto nel registro 0x00000009. I bit che interessano la configurazione delle capacità di feedback sono in totale 8 – 4 per il preamplificatore ad alto guadagno e 4 per quello a basso guadagno – e sono quelli che vanno dal ventottesimo più significativo al ventunesimo.

I quattro bit per configurare la capacità di feedback del preamplificatore High Gain sono disposti in maniera speculare a quelli del Low Gain nel registro. Quindi per impostare entrambi i preamplificatori al minimo valore possibile di guadagno, cioè con il solo bit meno significativo ad 1, bisogna scrivere 1000 nella parte di configurazione del High Gain e 0001 in quella del Low Gain (figura 4.9). Tale configurazione verrà indicata con la notazione 8H1L e con notazione analoga verranno

indicate tutte le altre configurazioni prese in esame.



**Figura 4.9**

Per la determinazione del guadagno sono state raccolte le letture degli ADC, posti un uscita alle EASIROC, per un grande numero di eventi di trigger. Per avere la certezza che tale numero di eventi fosse sufficientemente grande, al variare di tutte le configurazioni prese in esame, le prese dati sono durate 16 minuti ognuna.

Sono state prese in esame le seguenti configurazioni:

- 8H1L, corrispondente ad un guadagno pari ad 1 per il preamplificatore di Low Gain e 10 per il preamplificatore di High Gain;
- 4H2L, corrispondente ad un guadagno pari ad 1.07 per il preamplificatore di Low Gain e 10.7 per il preamplificatore di High Gain;
- 2H4L, corrispondente ad un guadagno pari ad 1.25 per il preamplificatore di Low Gain e 12.5 per il preamplificatore di High Gain;
- 1H8L, corrispondente ad un guadagno pari ad 1.875 per il preamplificatore di Low Gain e 18.75 per il preamplificatore di High Gain;

Il valore di shaping time impostato in queste misure è quello caricato di default dalla FPGA, corrispondente ad un tempo di formazione del segnale di 150 ns.

Prima di mostrare i risultati dell'analisi dei dati, verrà descritta la notazione usata per identificare i PMT provenienti dai vari scintillatori:

- I segnali che provengono da PMT collegati agli ingressi della stessa EASIROC, sono indicati con la lettera che individua l'EASIROC stessa (quindi B o C);
- I vari piani scintillatori sono individuati dai numeri cardinali, indicando con 1 il piano posto più in alto e 4 quello posto più in basso;
- La lastrina di scintillatore è unica, quindi vengono indicati solo i segnali dei PMT con le seguenti lettere: D (collegato alla EASIROC B) ed E (collegato alla EASIROC C).

Esempio: il PMT del secondo piano, collegato alla EASIROC con soglia più alta è indicato come C2.

Come si potrà constatare in seguito, il PMT B2 non è stato alimentato poichè, una verifica preliminare, aveva evidenziato dei malfunzionamenti relativi all'alimentazione.

Gli istogrammi 2D mostrati di seguito sono relativi all'uscita High Gain del terzo scintillatore, al variare delle configurazioni delle capacità di feedback. Sono rappresentati, sugli assi coordinati, i conteggi ADC effettuati. Sull'asse delle ordinate sono riportati i conteggi relativi all'EASIROC B mentre, su quello delle ascisse, i conteggi relativi all'EASIROC C. La scala dei colori permette di conoscere il numero di eventi in cui si è ripresentato lo stesso conteggio.

Tramite questi istogrammi è possibile ricavare, oltre ai conteggi ADC del singolo EASIROC, anche il rapporto fra l'efficienza dei due PMT. Infatti, in una situazione ideale in cui entrambi i PMT generano lo stesso segnale, in contemporanea, al passaggio di una particella, i punti sull'istogramma andrebbero a disporsi lungo la bisettrice degli assi coordinati. Nel caso reale invece la differente efficienza dei PMT porta ad uno sparpagliamento dei dati. In questa tesi, comunque, non verrà quantificata la differente efficienza dei PMT, ma solo evidenziata laddove presente.

In particolare, negli istogrammi che seguiranno, è possibile osservare una distribuzione verticale di fianco alla distribuzione che ci si aspettava di vedere. Questa distribuzione è stata imputata a due fattori: la differenza fra le soglie dei due EASIROC (differenza, ricordiamo, di 41 mV), in concomitanza con una eventuale differenza fra i fattori di amplificazione.

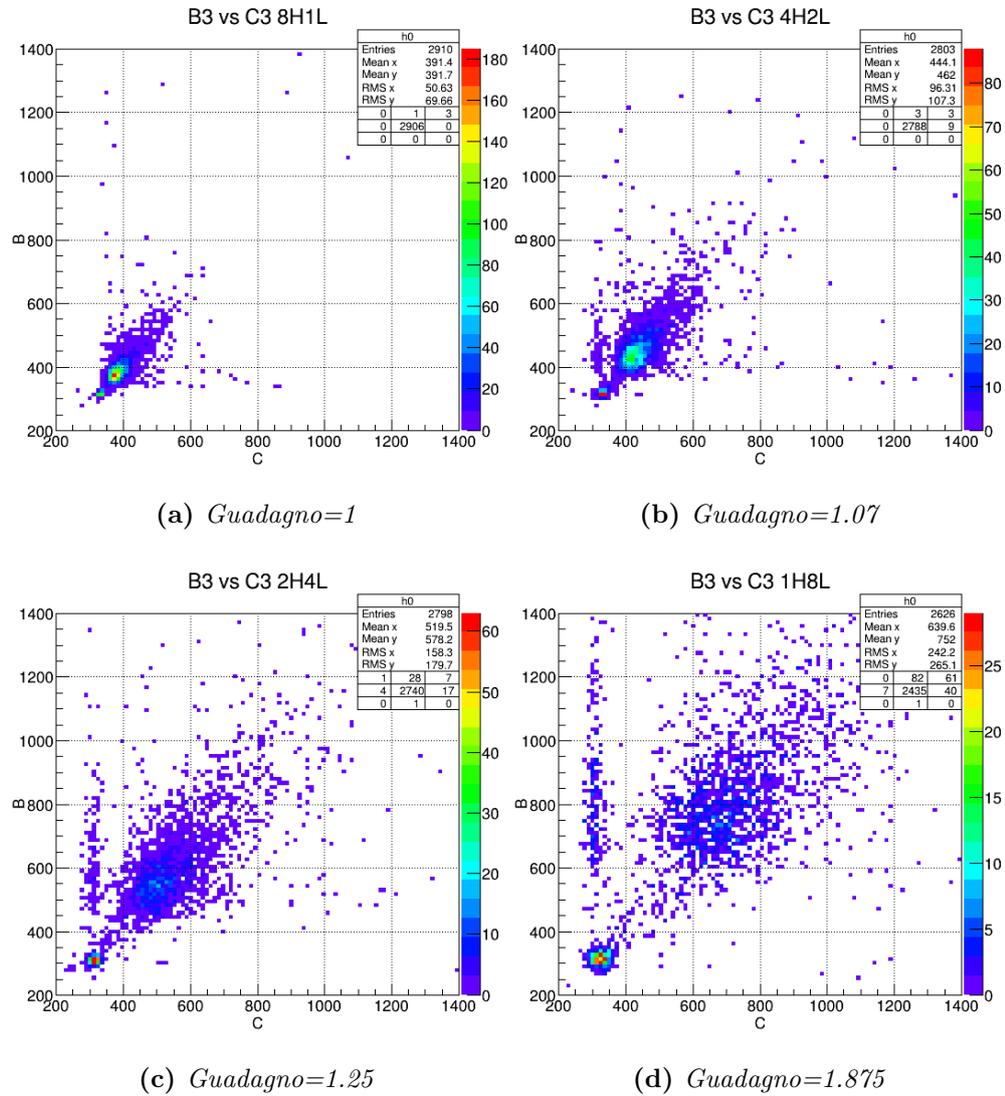
Quest'ultima differenza può essere dovuta al fatto che i valori delle capacità di ingresso e di feedback possono non essere esattamente uguali. Inoltre, dato che i segnali in uscita dall'EASIROC necessitano di essere adattati al range di valori che possono ricevere in ingresso gli ADC, l'elettronica utilizzata a tale scopo può contribuire a queste discrepanze.

Invertendo le connessioni dei PMT non si vedeva alcuno spostamento di tale distribuzione, è quindi possibile escludere i PMT come causa di questo effetto.

La scelta della configurazione da adottare, si baserà sulla separazione che si rileva fra il picco della distribuzione relativa ai conteggi causati dal passaggio effettivo di particelle attraverso lo scintillatore, con il picco della distribuzione chiamata *pedistallo* che rappresenta i conteggi ADC ottenuti in assenza di segnale e causati quindi dal rumore elettrico.

Tale separazione è sempre più evidente all'aumentare del guadagno. Questo perchè i conteggi ADC causati dal rumore non variano al variare del guadagno, dato che in ingresso non c'è alcun segnale che dipenda da esso. I conteggi dovuti al segnale vero e proprio, invece, aumentano all'aumentare del guadagno proprio perchè il segnale viene amplificato.

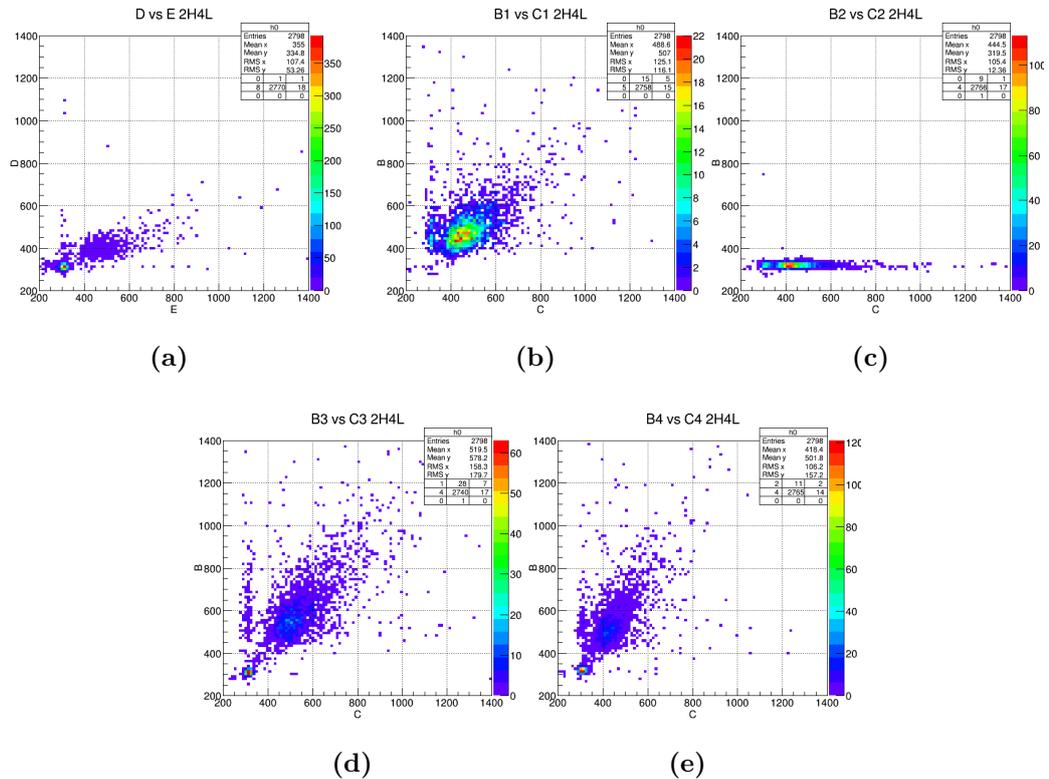
Tali istogrammi sono stati ottenuti utilizzando l'applicazione ROOT sviluppata al CERN. Sono stati scelti bin quadrati, larghi 12x12 e l'intervallo di conteggi ADC mostrato va da 200 a 1400.



**Figura 4.10:** *Istogrammi relativi al terzo piano scintillatore, nelle varie configurazioni.*

Come si può vedere, la maggiore separazione fra picco della distribuzione e piedistallo è presentata dalla configurazione 1H8L, al costo però di un maggiore sparpagliamento dei dati. Un buon compromesso fra separazione dal piedistallo e distribuzione dei punti è dato dalla configurazione 2H4L, per cui tale configurazione sarà quella adottata in seguito per la determinazione dello shaping time.

Sono di seguito mostrati gli istogrammi relativi a tutti gli scintillatori nella configurazione 2H4L.



**Figura 4.11:** *Istogrammi relativi ai quattro piani di scintillatore e alla lastrina. Come si può vedere dal secondo istogramma, il PMT B2 è spento. Si osserva inoltre una marcata differenza di efficienza fra il PMT D ed il PMT E. Il PMT B1 non presenta piedistallo perchè ha la funzione di trigger*

In base a ciò, nel registro 0x00000009 va scritto il valore 0x04800000.

## 4.4 Determinazione dello shaping time

I due slow shaper posti dopo il preamplificatore possono essere configurati ognuno attraverso 3 bit di configurazione. È possibile in questo modo variare il tempo di

formazione del segnale per passi di 25 ns, fra 25 ns e 175 ns.

Per far ciò, va utilizzato il registro 0x00000007. I bit di configurazione utilizzati sono quelli che vanno dal trentesimo al ventottesimo, per il Low Gain e dal venticinquesimo al ventitreesimo per l'High Gain (figura 4.12).



Figura 4.12

L'ottimizzazione del parametro di shaping time, è legata al tempo di formazione del segnale di trigger.

La formazione del segnale di trigger, infatti, avviene in un lasso di tempo che dipende dalla logica utilizzata per generarlo. Il segnale in uscita dallo shaper viene quindi letto dall'ADC solo dopo tale lasso di tempo (che possiamo indicare con  $t_{tr}$ ). La scelta dello shaping time è quindi determinata dal valore che assume il segnale dello shaper nell'istante  $t_{tr}$ .

Un tipico segnale in uscita dallo shaper può essere quello mostrato in figura 4.13.

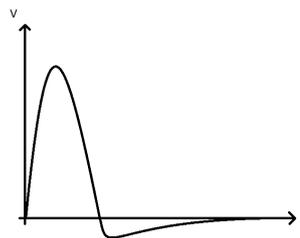


Figura 4.13

Come si può vedere, tale segnale presenta una coda che assume valori negativi di tensione.

Questo significa che, se il tempo di formazione è sufficientemente breve da portare in ingresso all'ADC proprio la coda del segnale, i conteggi potrebbero presentare un picco che precede quello del piedistallo (che, ricordiamolo, rappresenta i conteggi dell'ADC in assenza di segnale).

Tale comportamento è dovuto al fatto che il valore di tensione della coda, essendo negativo, va a ridurre quello del rumore e quindi il segnale letto dall'ADC è inferiore a quello corrispondente al piedistallo.

Un caso simile si è presentato impostando un valore di shaping time di 75 ns.

Per determinare il valore di shaping time sono state raccolte le letture degli ADC, nella configurazione di guadagno 2H4L, variando lo shaping time da 75 ns a 150 ns.

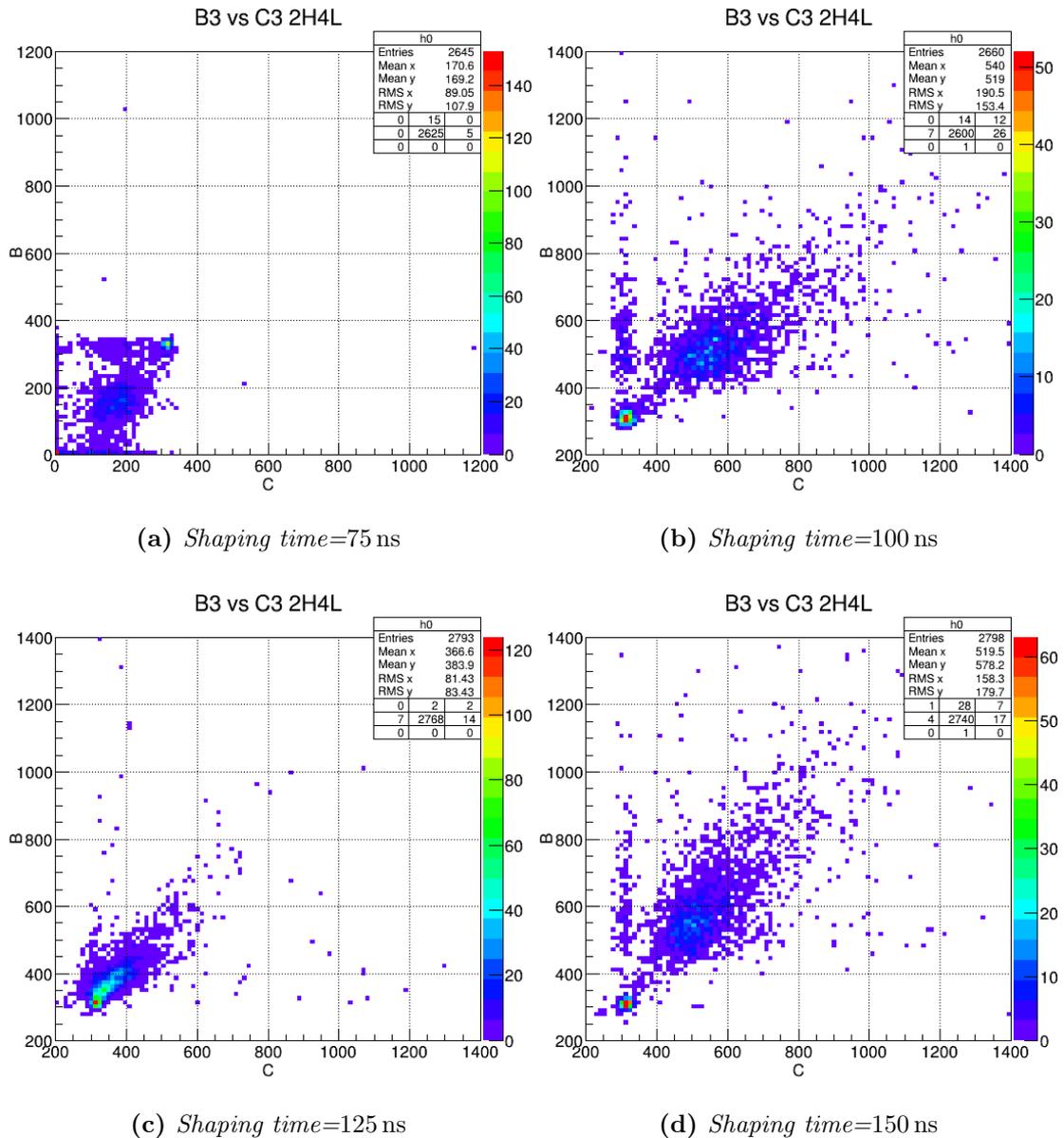
La scelta del valore da impostare si basa sul valore di shaping time corrispondente alla maggiore separazione fra piedistallo e picco del segnale.

Di seguito sono mostrati gli istogrammi 2D relativi agli scintillatori, nella configurazione 2H4L, al variare dello shaping time.

Si è mantenuta la scelta del binnaggio e degli estremi degli assi operata nel paragrafo precedente, eccetto per la configurazione con 75 ns di shaping time i cui estremi sono stati spostati da 0 a 1200 per mostrare al meglio il picco della distribuzione che precede il piedistallo.

Si può osservare come per shaping time di 125 ns, il grafico manifesti un comportamento non previsto.

In questa tesi non è stato possibile esaminare approfonditamente le cause di questa anomalia, successive misure incentrate su questo particolare valore di shaping time potrebbero far luce su questa problematica.



**Figura 4.14:** Istogrammi relativi ai quattro piani di scintillatore e alla lastrina. Si può osservare, nel caso di shaping time pari a 75 ns, che il primo picco appare a circa 200 conteggi ADC, inferiore ai circa 320 conteggi tipici del piedistallo.

Il valore scelto per lo shaping time è di 150 ns. Il registro 0x00000007 va impostato quindi a 0x0001EF7D.

## 4.5 Conclusioni e sviluppi futuri

L'attività di laboratorio svolta per la stesura di questa tesi, si è concentrata sulla caratterizzazione dell'elettronica di acquisizione per il rivelatore HEPD. Tale rivelatore verrà montato sul satellite CSES della missione CSES-Limadou ed avrà lo scopo di misurare, fra molti altri parametri, la variazione del flusso di protoni ed elettroni che precipitano dalle fasce di van Allen più interne, a causa dell'interazione con le perturbazioni ionosferiche dovute ai precursori sismo-ionosferici.

Una volta caratterizzata l'elettronica, è stato possibile scegliere le configurazioni ottimali da impostare per ottimizzare la lettura dei segnali provenienti dai PMT.

Le configurazioni scelte sono le seguenti:

- Per i valori di soglia dei discriminatori si è scelta la configurazione corrispondente a 1.386 V per la EASIROC B e 1.428 V per la EASIROC C. Va quindi impostato il registro 0x00000005 con il valore 0xC03FFFC0;
- Per i guadagni dei preamplificatori è stata scelta la configurazione 2H4L corrispondente ad un guadagno di 1.25 per il Low Gain e di 12.5 per l'High Gain. Nel registro 0x00000005 va quindi scritto il valore 0x04800000;
- Per lo shaping time si è scelto un tempo di 150 ns che si imposta scrivendo nel registro 0x00000005 il valore 0x0001EF7D.

Successive misure potranno essere effettuate utilizzando configurazioni di trigger diverse da quella scelta in questa tesi. Si potrà considerare l'opportunità di impostare guadagni diversi per le due EASIROC, in modo da tentare di colmare la differenza di funzionamento fra le due EASIROC causata dalla differenza dei valori di soglia. Si potrebbe inoltre tentare di quantificare la differente efficienza dei due PMT applicati allo stesso scintillatore ed esaminare il comportamento anomalo osservato per shaping time di 125 ns.

# Bibliografia

- [1] T. K. Gassier, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, pp. 6-10, 1990.
- [2] G. Benuzzi, Università di Trento, *Introduction to magnetosphere and Van Allen Belts*, Trento, 08/10/2013.
- [3] T. W. Schlatter, *Atmospheric Composition and Vertical Structure*, AMB Publications, pp. 34-40, 2009.
- [4] K. Davies, *Ionospheric radio*, P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1989.
- [5] N. Sivadas, *High Energy Particle Bursts as Seismic Precursors*, iitmsat, 2010.
- [6] S. Pulinet, *Ionospheric precursors of earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications*, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science 15, 2004.
- [7] “CSES - China Seismo Electromagnetic Satellite”, <http://ceses.roma2.infn.it/> .
- [8] S. Carboni et al. *Particle identification using the DE-E technique and pulse shape discrimination with the silicon detectors of the FAZIA*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, pp. 253, 2012.
- [9] A. Bruno, CSES-HEPD Technical Specifications, s.n., 2015.
- [10] OMEGA, EASIROC Datasheet, 2011, Disponibile all’indirizzo <http://omega.in2p3.fr/> .

# Ringraziamenti

Per i preziosi insegnamenti e per avermi pazientemente seguito durante la stesura di questa tesi e nell'attività di laboratorio, ringrazio il Dr. Giuseppe Osteria, il Dr. Francesco Perfetto, la Dr.ssa Valentina Scotti, la Dr.ssa Beatrice Panico e il Prof. Alberto Aloisio.

Ringrazio Antonio Anastasio, Alfonso Boiano, Paolo Di Meo, Vincenzo Masone, Antonio Pandalone, Luigi Parascandolo e Antonio Vanzanella per la disponibilità, l'amicizia e per tutto quello che mi hanno insegnato durante i due anni che ho trascorso al SER.

Voglio inoltre ringraziare le persone che in tutti questi anni mi sono state vicino, sostenendomi, sopportandomi e andando ad incidere in maniera determinante su quel che sono diventato:

Guido, per avermi insegnato l'arte che ha riempito gli anni più importanti della mia vita.

Danilo, per avermi aiutato a crescere con lo sport e con i suoi consigli.

Fabio, Giorgio, Anna, Daniele, Maurizio, Luca, Roberta, Michele, per aver reso piacevoli anche gli esami più duri.

Giacomo, Ambra, Alessandro, Carmen, senza i quali il mio percorso universitario sarebbe durato, forse, di meno ma sarebbe stato molto meno divertente.

Gino e Marco, per aver trascorso con me gli anni più belli.

Monica, per quello che credo sia affetto ma più probabilmente autolesionismo.

Ilaria, Tiziana, Stefania, per la pazienza.

Irene, per l'enorme pazienza.

Nonna Vittoria, per i dolci più buoni che abbia mai assaggiato.

Nonna Anna, per tutti gli insegnamenti.

Zia Irma, zio Umberto, zio Paolo, zia Adele, zio Alberto e zia Tina, per i bei ricordi che ho delle serate in famiglia.

Mio fratello, per avermi cercato.

Mia nonna, per aver dedicato tutta la sua vita alla mia.

Mio nonno, per aver aggiustato tutti i miei giocattoli.

Mio padre, per avermi sempre ascoltato.

Mia madre, per avermi insegnato a sorridere.