

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria dei Processi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Nucleare



**Studio delle caratteristiche del rivelatore HEPD
installato a bordo del satellite CSES per l'analisi dei
precursori sismici provenienti dallo spazio**

Relatore: Dott. Marco CARESANA

Correlatore: Prof.ssa Roberta Sparvoli

Tesi di Laurea Magistrale di:

Lorenzo Granato

Matr. 816822

Anno Accademico 2015-2016

Indice

1	Fisica dell'accoppiamento sismo-ionosferico	3
1.1	Sismologia	4
1.1.1	La struttura interna della Terra	4
1.1.2	L'attività sismica	5
1.2	La Ionosfera	10
1.2.1	L'Atmosfera e la Magnetosfera	10
1.2.2	La struttura della Ionosfera	14
1.2.3	Variazioni ionosferiche regolari	18
1.3	Precursori di un terremoto	18
1.3.1	I precursori geologici	19
1.3.2	I precursori ionosferici	22
1.4	Introduzione all'accoppiamento sismo-ionosferico	27
1.5	L'accoppiamento sismo-ionosferico	33
1.6	Principali aspetti fenomenologici dei precursori	38
2	La missione spaziale CSES-Limadou e la strumentazione nucleare	43
2.1	La missione spaziale CSES-Limadou	44
2.1.1	Il satellite CSES	45
2.2	Il rivelatore HEPD	51
2.2.1	Il Tracker	54
2.2.2	Il Trigger	59
2.2.3	Il Calorimetro	60
2.2.4	VE TO	60

INDICE

2.3	Cenni di fisica delle misure e della strumentazione nucleari . . .	61
2.3.1	Interazione radiazione-materia	61
2.3.2	Rivelatori plastici e inorganici a scintillazione	67
2.3.3	Rivelatori a semiconduttore	72
2.3.4	La risoluzione energetica	76
2.3.5	Le accettanze	78
2.4	Altre missioni spaziali	78
2.5	HEPD realizzato	79
3	Realizzazione della geometria del rivelatore HEPD con GEANT4	82
3.1	GEANT4	83
3.2	Definizione della Geometria del rivelatore HEPD	87
3.3	Realizzazione del Satellite	88
3.4	Realizzazione del Tracker	89
3.5	Realizzazione del Trigger	91
3.6	Realizzazione del Calorimetro	97
3.7	Realizzazione del VETO e del contenimento laterale	100
3.8	La geometria realizzata	101
3.9	La produzione dei dati col simulatore	102
4	Simulazione ed analisi dei risultati	104
4.1	Obiettivi della simulazione	105
4.2	Parametri della simulazione	107
4.2.1	Energie di simulazione	107
4.2.2	Geometria di simulazione	111
4.3	Analisi della simulazione	113
4.3.1	ROOT	119
4.3.2	Accettanza angolare	120
4.3.3	Accettanza totale	124
4.3.4	Risoluzione energetica	129
4.3.5	Discriminazione di elettroni e protoni	133
4.3.6	Stopping plane	138
4.3.7	La definizione del trigger	144

4.4	Discussione dei risultati	150
5	Conclusioni e sviluppi futuri	152
5.1	Conclusioni	152
5.2	Sviluppi futuri	154
	Bibliografia	163

Elenco delle figure

1.1	La struttura interna della Terra.	5
1.2	Mappa delle placche tettoniche della Terra.	6
1.3	A partire da sinistra, esempio di scorrimento tra placche, placche divergenti e placche convergenti.	6
1.4	Mappa delle attività sismiche e vulcaniche sviluppatasi nell'ultimo milione di anni (NASA).	7
1.5	Esempi di faglia diretta, una faglia trascorrente ed una inversa.	8
1.6	Confronto tra l'energia rilasciata da alcuni terremoti e alcuni fenomeni fisici o eventi avvenuti, in kg di TNT equivalente.	10
1.7	La struttura dell'atmosfera.	12
1.8	Il campo magnetico terrestre e la magnetosfera, interazione del campo magnetico con il vento solare.	12
1.9	Le Fasce di Van Allen, interna ed esterna.	13
1.10	I tre moti delle particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen.	14
1.11	A sinistra, alcune L-shells in due dimensioni (in tre dimensioni hanno aspetto toroidale). A destra, alcune L-shells proiettate sulla superficie terrestre	14
1.12	In rosso, raffigurazione del <i>pitch angle</i> ϑ per una particella nel campo geomagnetico.	15
1.13	Le regioni che compongono la ionosfera caratterizzati dalla diversa concentrazione di elettroni e dalle diverse specie ioniche presenti.	15
1.14	Sviluppo verticale di un'onda elettromagnetica con conseguente ExB drift.	17

1.15	In alto, la media annua del valore della frequenza critica, in basso l'andamento dell'attività solare in flussi radio provenienti dal Sole.	18
1.16	Concentrazione di Radon nella falda acquifera prima e dopo il terremoto di Kobe, Giappone, del 16 Gennaio 1995.	20
1.17	Variazioni in percentuale della frequenza critica a diverse ore di distanza dal terremoto, secondo i dati raccolti da Alouette-1: In rosso, variazioni positiva, in blu, variazioni negative. In alto, 30 ore prima dell'evento sismico. Al centro, 6 ore prima dell'evento sismico. In basso, 18 ore dopo l'evento sismico.	23
1.18	Esempio della variazione della concentrazione di elettroni a diverse altitudini prima di un terremoto. La linea individuata dai triangoli indica il profilo modificato, la linea individuata dai quadrati indica il profilo indisturbato. In questo caso la deviazione è negativa dunque.	25
1.19	Luce tellurica emanata prima del terremoto del 2008 nel Sichuan, Cina.	27
1.20	Andamento della concentrazione di radon in aria (linea individuata dai triangoli), in relazione con la frequenza critica rilevata alle 6 di mattina (linea continua) e alle 18 (linea individuata dai cerchi), rilevate prima del terremoto di Nazarbek (Uzbekistan) del 11 Dicembre 1980.	28
1.21	Cariche positive e negative vicino alla superficie terrestre, come risultato dell'effetto elettrodo. L'area individuata dalla linea ovale prende il nome di <i>electrode layer</i>	30
1.22	Il meccanismo di interazione tra ULF - VLF EME e particelle intrappolate nelle Fasce di Van Allen.	33
1.23	Nell'immagine in alto, le particelle intrappolate nelle VAB. Al centro, le ULF - VLF EME emesse che viaggiano come onde Alfvén catturate dal campo geomagnetico. In basso, le particelle intrappolate precipitano dopo l'interazione con le onde Alfvén.	34
1.24	Schema del modello dell'accoppiamento sismo-ionosferico.	37

ELENCO DELLE FIGURE

1.25	Numero di anomalie medie riscontrate nei 169 terremoti analizzati, a partire da 15 giorni prima del terremoto fino a 15 giorni dopo. In nero, gli istogrammi con media giornaliera, in grigio, gli istogrammi con media nel periodo di 5 giorni.	39
1.26	Dipendenza della variazione massima della frequenza critica in relazione all'ora locale di rilevamento per i 59 terremoti osservati. . .	39
2.1	La piattaforma CAST 2000 nella versione utilizzata per CSES. . .	46
2.2	Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in 1 giorno. . . .	46
2.3	Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in 5 giorni. . . .	47
2.4	Ora locale in relazione alla latitudine a cui passa il satellite.	47
2.5	La struttura del satellite.	48
2.6	In <i>verde</i> , i bordi che delimitano la regione tra $+65^\circ$ e -65° di latitudine. In <i>rosso</i> , i bordi che delimitano la latitudine coperta da CSES con <i>payload</i> attivo.	49
2.7	Flussi di particelle stimati per la missione CSES-Limadou in relazione alla posizione geografica e del range energetico.	49
2.8	Area di riferimento monitorata in modalità burst.	50
2.9	Distribuzione di terremoti con magnitudine $M > 5$ tra il 1900 e il 2008 sul suolo cinese.	50
2.10	Stazioni di raccolta dati a terra sul suolo cinese.	51
2.11	Locazione del satellite e degli assi.	52
2.12	La scatola contenente il rivelatore e le sue unità.	54
2.13	L'interno della scatola del satellite contenente il rivelatore HEPD con le relative <i>power box</i> ed <i>electronic box</i>	55
2.14	Profilo laterale del rivelatore HEPD.	56
2.15	Il rivelatore HEPD e i vari piani che lo compongono.	56
2.16	L'interno della scatola del satellite privo sei piani di semiconduttori al silicio.	57
2.17	Secondo piano di Trigger e torre di scintillatori: si noti la disposizione sfalsata dei fotomoltiplicatori.	57
2.18	Il rivelatore HEPD con tutti i sostegni e le sezioni che lo compongono. .	58

2.19	Differenze di perdita di energia specifica in relazione all'energia della particella, per vari tipi di particelle. Si noti il punto di minima ionizzazione.	63
2.20	Potere frenante di una particella carica pesante in relazione alla profondità del mezzo attraversato.	63
2.21	Curva integrale e curva differenziale del numero di particelle cariche pesanti attenuate con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbitore.	64
2.22	Numero di elettroni attenuati con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbitore.	66
2.23	Effetto dominante in relazione al numero atomico del materiale del mezzo attenuatore Z , e all'energia del fotone $h\nu$	67
2.24	Livelli energetici in una molecola organica e fenomeni associati all'interazione con la radiazione.	68
2.25	Probabilità di bremsstrahlung per vari materiali.	70
2.26	Struttura delle bande energetiche degli scintillatori cristallini con attivatore.	71
2.27	Schema del funzionamento di un fotomoltiplicatore.	72
2.28	Struttura a bande di un semiconduttore intrinseco (a) e di un semiconduttore con drogaggio di tipo n (b,c) e di tipo p (d,e).	73
2.29	Giunzione p-n e relativi potenziale e campo elettrico.	75
2.30	Scatola esterna in alluminio del rivelatore HEPD.	80
2.31	Apparato interno alla scatola con power supply ed electronic box e involucro del rivelatore.	80
2.32	Il calorimetro senza fotomoltiplicatori.	81
2.33	Il rivelatore con un fotomoltiplicatore sul primo scintillatore di Trigger.	81

ELENCO DELLE FIGURE

3.1	Esempio dell'interazione tra la geometria realizzata del rivelatore HEPD e alcune particelle sparate in direzione casuale dal centro di essa. In questo caso, in <i>verde</i> è rappresentata la radiazione γ , la cui energia fa sì che superi nella maggior parte dei casi lo spessore del rivelatore che le si propone, tranne in alcuni casi in cui, per effetto fotoelettrico, genera degli elettroni, in figura in colore <i>rosso</i>	86
3.2	Versione in SolidEdge della struttura anteriore del satellite realizzata con la finestra lasciata per la collocazione del piano di mylar: si noti in <i>rosso</i> , la struttura in alluminio.	89
3.3	Versione in SolidEdge della struttura posteriore del satellite realizzata con il piano di mylar: si noti in <i>rosso</i> , la struttura in alluminio, ed in <i>grigio</i> , il piano di mylar.	90
3.4	Versione in SolidEdge della struttura del tracker: si notino le finestre lasciate in fronte ai semiconduttori e lo spazio lasciato all'elettronica.	91
3.5	Versione in SolidEdge della struttura del tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio (in blu) e della parte elettronica (in rosso).	92
3.6	Versione in SolidEdge della struttura del tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio, dei pezzi in poron (giallo) e con in evidenza le parti di kapton (azzurro).	92
3.7	Versione in SolidEdge della struttura del tracker dopo la replica del secondo volume di semiconduttore. Si può notare qui il particolare dei 2 segmenti dedicati all'elettronica anziché uno unico relativo ad un solo semiconduttore.	93
3.8	Versione in SolidEdge della struttura del primo piano di Trigger con i sostegni in fibra di carbonio, le barre in fibra di carbonio e la barra in poron.	94
3.9	Versione in SolidEdge della struttura del primo piano di Trigger con la collocazione dello scintillatore.	95
3.10	Versione in SolidEdge della struttura del secondo piano di Trigger con la croce in fibra di carbonio, le croci anteriore e posteriore in poron, i cuscinetti in poron e i supporti in fibra di carbonio.	96

3.11	Versione in SolidEdge della struttura del secondo piano di Trigger con collocato il piano di scintillatore.	96
3.12	Versione in SolidEdge dello scintillatore: è possibile vedere la divisione in prismi e parallelepipedo di cui è composto.	97
3.13	Versione in SolidEdge del piano replicato per la realizzazione della torre di 15 scintillatori. Si noti la croce in fibra di carbonio di diversa conformazione rispetto a quella del Trigger S2.	98
3.14	Versione in GEANT4 del piano replicato per la realizzazione della torre di 15 scintillatori.	98
3.15	Versione in GEANT4 del LYSO e della piastra finale forata.	99
3.16	Versione in GEANT4 delle coperture laterali (a, c) e finale (b) col VETO scintillatore.	101
4.1	Flusso di elettroni generato per l'analisi con le leggi di potenza. . .	110
4.2	Flusso di protoni generato per l'analisi con le leggi di potenza. . .	110
4.3	Vista laterale della superficie di generazione, in <i>rosso</i> in alto, e del rivelatore HEPD realizzato in GEANT4.	111
4.4	Vista in prospettiva della superficie di generazione, in <i>rosso</i> , e del rivelatore HEPD.	112
4.5	Il colore mostra il numero di particelle generate per ogni punto della superficie di generazione, sia nel caso di elettroni che in quello di protoni, qui raffigurato per una simulazione con la legge di potenza. Come si può notare, il numero di particelle generate è pressoché uniforme su tutta la superficie.	113
4.6	La condizione di trigger. Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2.	114
4.7	La condizione di <i>good hit</i> . Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2.	116

ELENCO DELLE FIGURE

4.8	Il colore mostra il numero di particelle generate per ogni punto della superficie di generazione che vengono considerate valide, e dunque in accettazione (in questo caso è rappresentata la superficie della simulazione in legge di potenza). Come si può notare, il colore varia molto a seconda che ci si trovi in una zona di fronte alla finestra di mylar, piuttosto che in una zona remota della superficie.	117
4.9	L'illustrazione del significato della accettazione angolare in 2 dimensioni. In 3 dimensioni, figurerebbe come un cono. Si noti che i lati che vanno a formare l'angolo, e quindi il cono, partono dagli estremi di S2 per giungere agli estremi opposti del primo semiconduttore del tracker comprendendo così la massima accettazione angolare possibile.	118
4.10	L'illustrazione del significato di <i>pitch angle</i> per il rivelatore HEPD.	121
4.11	Andamento dell'accettazione angolare per elettroni a varie energie.	123
4.12	Andamento dell'accettazione angolare per elettroni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO.	125
4.13	Andamento dell'accettazione angolare per protoni a varie energie.	126
4.14	Andamento dell'accettazione angolare per protoni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO.	127
4.15	Accettazione totale in funzione dell'energia per elettroni (a sinistra) e protoni A destra).	128
4.16	Accettanze in funzione dell'energia per elettroni e protoni.	129
4.17	Risoluzione energetica degli elettroni in funzione dell'energia di sparo.	131
4.18	Risoluzione energetica dei protoni in funzione dell'energia di sparo.	132
4.19	Energia depositata da un protone di 150 MeV all'interno del rivelatore. Si può notare il picco di Bragg, caratteristico per particelle cariche pesanti.	133
4.20	Energia rilasciata dagli elettroni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore.	134
4.21	Energia rilasciata dai protoni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore.	135
4.22	A sinistra, il numero dato dalla percentuale del segnale elettronico, a destra la rispettiva funzione.	136

4.23	Discriminazione al 90 per cento.	137
4.24	Discriminazione al 95 per cento.	137
4.25	Discriminazione al 99 per cento.	137
4.26	Stopping plane per il flusso di elettroni.	140
4.27	Stopping plane per il flusso di elettroni.	141
4.28	Stopping plane per il flusso di protoni.	142
4.29	Stopping plane per il flusso di protoni.	143
4.30	Risultati delle varie configurazioni di Trigger per elettroni.	146
4.31	Risultati delle varie configurazioni di Trigger per protoni.	146
4.32	Risultati delle varie configurazioni di Trigger per elettroni.	148
4.33	Risultati delle varie configurazioni di Trigger per protoni.	149

Estratto

Lo sviluppo di nuove tecniche di rivelazione delle radiazioni dipende sempre più da una crescente necessità di ottimizzare e perfezionare le misurazioni e la strumentazione nucleare.

A tale scopo, sono stati progettati pacchetti software sempre più rigorosi in grado di simulare l'interazione tra radiazione e materia, per ricercare in modo sempre più dettagliato la miglior configurazione di uno specifico rivelatore in un certo ambito fisico.

Numerose e recenti scoperte scientifiche in ambito geofisico e astrofisico hanno condotto all'individuazione di un processo che lega queste due aree di indagine, attraverso un accoppiamento fenomenologico che si produce immediatamente prima di un terremoto di una certa entità tra *litosfera*, *atmosfera*, *ionosfera* e *magnetosfera*.

Nell'ottica di studio di tale fenomeno e di acquisizione di informazioni circa la teoria fisica che ne è alla base e che coinvolge numerosi effetti *precursori* all'evento sismico, è stata studiata la configurazione di un rivelatore di alta energia, chiamato HEPD, nell'ambito della missione spaziale italo-cinese CSES-Limadou che sarà operativa da Settembre 2016 e che avrà il compito di rilevare dati con l'obiettivo scientifico futuro di predizione temporale e geografica di un fenomeno tellurico.

Questo strumento avrà lo scopo di identificare il tipo di particelle con cui interagisce, la direzione e l'angolo di incidenza delle medesime, oltre a chiarirne l'energia col fine di correlarle con quelle intrappolate nelle *Fasce di Van Allen*, la cui precipitazione sotto forma di *burst* è prevista dal modello di riferimento in caso di imminente terremoto.

La tesi ha pertanto comportato la costruzione virtuale della geometria del rivelatore HEPD tramite la piattaforma di simulazione GEANT4 e la successiva esecuzione di una simulazione Monte Carlo con fasci di elettroni e di protoni.

I risultati dell'elaborazione sono stati in seguito analizzati tramite il software ROOT, sviluppato dal CERN, al fine di ricostruire i parametri fisici fondamentali del rivelatore HEPD, ovvero: effettive finestre di accettazione,

risoluzione energetica, capacità di discriminazione tra un evento prodotto da un elettrone ed uno prodotto da un protone, e metodi di validazione di un segnale raccolto dallo strumento.

La tesi si articola in cinque Capitoli: i primi due teorici inerenti al fenomeno fisico di accoppiamento tra un evento sismico e parametri ionosferici, oltre che alla fisica dei rivelatori di radiazione e a informazioni generali circa la missione spaziale dedicata; altri due, focalizzati sul lavoro di sei mesi svolto presso il gruppo WiZard dell'Università di Tor Vergata, e riguardanti la codificazione della struttura del rivelatore HEPD e la successiva analisi dei dati ricavati dalla simulazione. Per concludere, il capitolo finale illustra i risultati conseguiti dall'attività descritta in questa tesi e i futuri sviluppi relativi all'ambito approfondito.

Capitolo 1

Fisica dell'accoppiamento sismo-ionosferico

Introduzione

Il fenomeno fisico oggetto di questa tesi e degli obiettivi scientifici raggiunti cui essa si pone di fornire una base teorica è caratterizzato da una peculiarità: la necessità di avere nozioni in una vasta gamma di campi scientifici. Una trattazione completa che caratterizzi in modo esaustivo il fenomeno dell'accoppiamento che avviene tra un evento sismico e alcune grandezze rilevabili nella ionosfera dovrebbe infatti includere capitoli di introduzione a discipline quali sismologia, fisica e chimica della ionosfera, fisica dell'atmosfera, fisica del plasma, oltre che fornire elementi di astrofisica. Questa tesi si propone di predisporre gli elementi che ne permettano la comprensione totale, pertanto in questo capitolo vengono fornite le basi, seppur sismo-ionosferico.

Si apre il sipario dunque presentando innanzitutto una parte relativa alla sismologia, presente nella Sezione 1.1, in cui sono considerati i parametri principali legati ad un terremoto oltre alla fisica che lo governa; è presente poi una parte dedicata alla ionosfera, ovvero la Sezione 1.2, in cui viene descritta la regione interessata maggiormente dagli effetti legati ai precursori dei terremoti. Segue poi la Sezione 1.3 relativa ai precursori dei terremoti, sia di origine interna alla crosta terrestre che di origine ionosferica, ed infine è

illustrata la modalità di accoppiamento sismo-ionosferico in due Sezioni (1.4 e 1.5), la prima propedeutica e la seconda più riassuntiva, in cui viene reso chiaro l'obiettivo che ha spinto ad intraprendere la missione spaziale relativa a questa tesi. A chiudere, la Sezione 1.6 che fornisce aspetti quantitativi dei precursori per dare un'idea più precisa e completa della teoria alla base di questo studio.

1.1 Sismologia

1.1.1 La struttura interna della Terra

La fisica relativa ad un terremoto è un argomento piuttosto complesso e ampio che affonda le radici nelle dinamiche relative alla crosta terrestre [1] per svilupparsi in processi che interessano anche l'atmosfera e che possono comportare l'insorgenza di molti altri fenomeni chiamati genericamente *precursori*.

Prima di tutto è necessario presentare la struttura interna della Terra. Esistono varie classificazioni e suddivisioni delle regioni interne alla Terra, in questa tesi viene adottata quella legata a proprietà meccaniche analoghe all'interno della stessa regione [2]. In base a questa, si può avere una divisione in 5 zone: la litosfera, l'astenosfera, la mesosfera, il nucleo esterno, composto da materiale fuso, ed il nucleo interno solido (Figura 1.1).

Le prime due zone sono quelle maggiormente interessate dal fenomeno sismico. L'insorgenza di un terremoto è legata alla dinamica della crosta terrestre, composta da una parte *continentale*, spessa circa 50 km, e una *oceanica*, spessa circa 5-10 km, più densa e più pesante. La crosta terrestre e la parte più esterna del mantello, lo strato che si trova tra nucleo e crosta terrestre (Figura 1.1), formano uno strato piuttosto duro e rigido, la cosiddetta *litosfera*, spessa mediamente 100 km per un massimo di 200 km, che poggia su uno strato più fluido ed interno, l'*astenosfera*.

La litosfera, in base alla teoria ed al modello della Tettonica delle placche, è suddivisa in una decina di *placche tettoniche* (o *zolle tettoniche*) [3] (Figura 1.2) che galleggiano sull'astenosfera e possono arrivare a collidere, scorrere

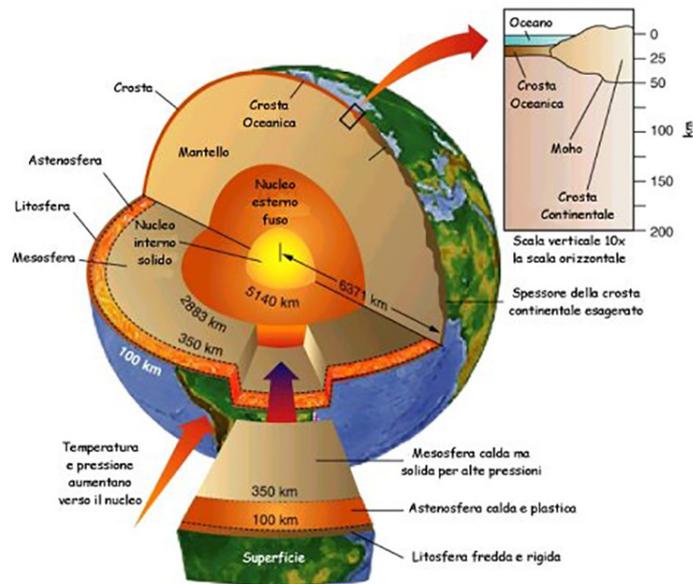


Figura 1.1: La struttura interna della Terra.

l'una sull'altra oppure allontanarsi a causa dei loro movimenti tettonici dovuti per lo più a moti convettivi.

1.1.2 L'attività sismica

I diversi tipi di movimenti riguardanti due placche comportano ovviamente effetti diversi, a seconda che vi sia collisione, scorrimento o allontanamento.

Nel primo caso si ha un avvicinamento iniziale tra le placche con un successivo contatto: è il cosiddetto fenomeno in cui ci sono *subduction boundaries* o margini convergenti (Figura 1.3, c). Quando una placca continentale si scontra con una oceanica avviene la formazione di una fossa oceanica dalla parte dell'oceano, e di una catena montuosa di solito vulcanica, dalla parte continentale. Se sono due placche continentali invece a collidere, una delle due viene coinvolta dal fenomeno della *subduzione* e quindi si insinua al di sotto dell'altra oppure, più raramente sale al di sopra dell'altra. Questo è il caso che riguarda la formazione della catena dell'Himalaya. Se infine due placche oceaniche convergono, per una delle due avviene subduzione, e di

1.1 Sismologia

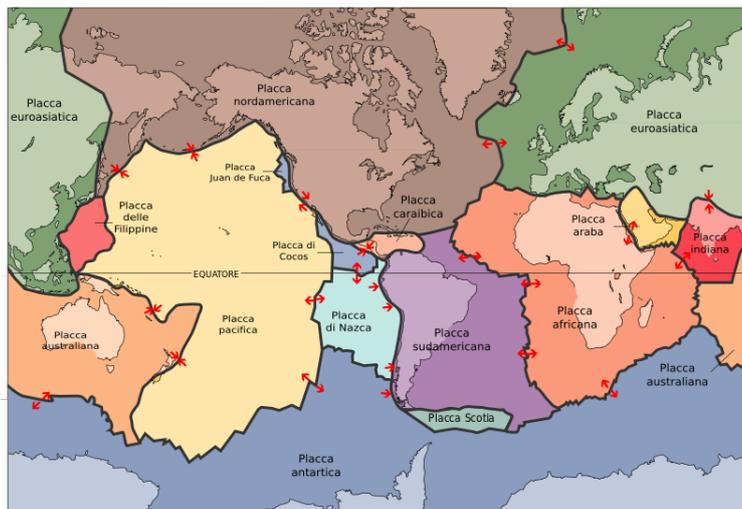


Figura 1.2: Mappa delle placche tettoniche della Terra.

solito si forma un arco insulare con un arcipelago di isole vulcaniche, grazie al magma che risale in superficie.

Il secondo caso riguarda lo scorrimento che può avvenire tra due placche in cui una delle due scivola lungo l'altra senza creare né distruggere parte della crosta terrestre (Figura 1.3, a). È dunque un fenomeno conservativo, del quale è interessata la celebre Faglia di Sant'Andrea (California, USA).

Infine vi è il caso dell'allontanamento tra le placche, ovvero il fenomeno in cui i margini sono divergenti (Figura 1.3, b). Questo meccanismo dà luogo alla generazione di nuova crosta terrestre che va a formarsi nella zona lasciata vuota tra le due placche e riempita dal magma presente negli strati inferiori.

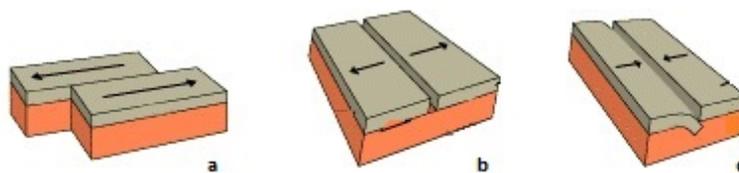


Figura 1.3: A partire da sinistra, esempio di scorrimento tra placche, placche divergenti e placche convergenti.

1. FISICA DELL'ACCOPIAMENTO SISMO-IONOSFERICO

Tutti e tre questi tipi di movimenti tra placche portano ad un accumulo di energia elastica ai margini della placca stessa che, una volta superato il carico di rottura delle rocce delle placche interessate, genera il terremoto, in cui si sprigiona l'energia elastica accumulata. Da un punto di vista meccanico quindi, un terremoto avviene quando il carico cui sono sottoposte le rocce ai margini delle placche supera il carico limite. Si può dunque descrivere il terremoto come un evento di deformazione, frattura e trasformazione della crosta terrestre che si manifesta nella liberazione di energia elastica accumulata nelle rocce della litosfera, tramite onde elastiche (le *onde sismiche*).

Poiché i terremoti sono il risultato del moto delle placche tettoniche, proprio come le eruzioni vulcaniche, la loro distribuzione globale e geografica non è uniforme ma si concentra lungo i confini delle placche (Figura 1.4).

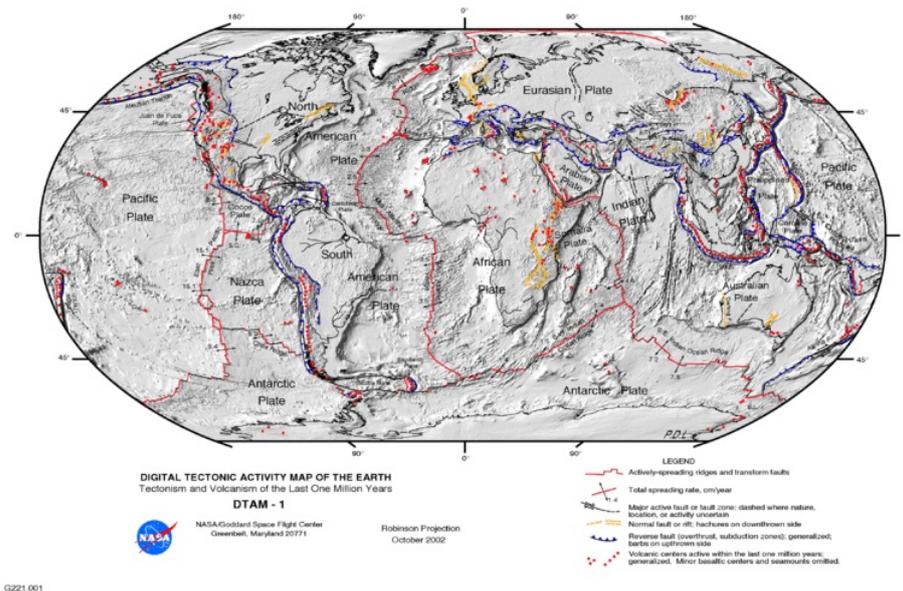


Figura 1.4: Mappa delle attività sismiche e vulcaniche sviluppatesi nell'ultimo milione di anni (NASA).

La frattura che si origina come risultato del moto tra due placche è chiamata *faglia* [4] e può essere, sulla base del moto delle placche, trascorrente (*strike-slip fault*), nel caso in cui due placche scivolino l'una lungo l'altra, di-

retta (*normal fault*), se una placca scende sotto l'altra, oppure infine inversa (*reverse fault*), se una placca sale sopra l'altra (Figura 1.5). Queste faglie possono inoltre estendersi per centinaia di chilometri o essere locali ed avere un'estensione di qualche chilometro.

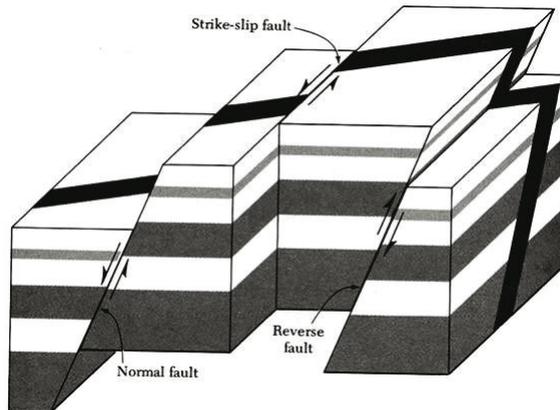


Figura 1.5: Esempi di faglia diretta, una faglia trascorrente ed una inversa.

Per quantificare l'intensità di un terremoto si utilizza una grandezza: la *magnitudo locale* M_L . La magnitudo locale esprime l'energia liberata da un terremoto all'*ipocentro*, cioè il punto in cui si frattura la crosta terrestre, ed è una grandezza che è stata istituita dal fisico statunitense Charles Richter negli anni '30: per tale motivo, sulla base di questa grandezza si è istituita la *scala Richter*. Tale magnitudo si misura come:

$$M_L = \log_{10} A + 2,56 \log_{10}(\Delta) - 1,67$$

con A , ampiezza di un evento di riferimento, e Δ , distanza dall'ipocentro.

Un'altra grandezza analoga utilizzata è quella riferita alle onde in superficie comportate da un terremoto, e prende il nome di *surface wave magnitude*, M_s , che si misura come:

$$M_s = \log_{10} A/T + 1,66 \log_{10}(\Delta) + 3,3$$

dove T è l'intervallo di tempo in cui si propagano le onde dall'epicentro.

Questo tipo di magnitudo è legato all'energia liberata dal terremoto tramite la seguente formula:

$$\log E = 1,56 M_s + 11,8 \text{ [erg]}$$

Inoltre, in base sempre alla teoria proposta da Richter, la frequenza con cui avviene un terremoto caratterizzato da una certa magnitudo è valutabile grazie alla seguente formula:

$$\log_{10} N = a - bM_s$$

con N , numero di terremoti con magnitudo in un range fissato attorno a M_s , e a e b costanti.

A partire dagli anni '70 è stata introdotta la grandezza *momento sismico* M_0 , una evoluzione della magnitudo descritta dal sistema previsto dalla scala Richter, definita come:

$$M_0 = \mu S \langle u \rangle \tag{1.1}$$

con μ , modulo di taglio delle rocce coinvolte nel terremoto, S , area di rottura lungo la faglia interessata dal fenomeno sismico, $\langle u \rangle$, spostamento lungo la faglia. La *magnitudo del momento* M_w è un numero adimensionale che indica l'energia coinvolta nel terremoto ed è basata su M_0 :

$$M_w = \frac{2}{3}(\log_{10} M_0 - 9,1) \tag{1.2}$$

Da qui in poi, quando ci si riferirà ad un terremoto parlando della sua magnitudo, si intenderà la magnitudo del momento, se non specificato diver-

1.2 La Ionosfera

samente.

L'energia che viene liberata da un terremoto di grosse proporzioni è enorme e può essere paragonata a quella prodotta in un'esplosione nucleare.

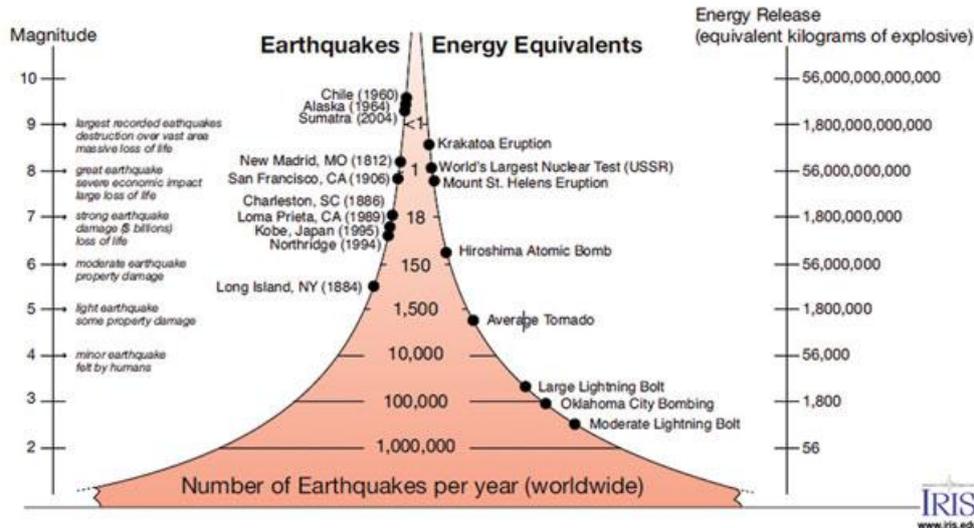


Figura 1.6: Confronto tra l'energia rilasciata da alcuni terremoti e alcuni fenomeni fisici o eventi avvenuti, in kg di TNT equivalente.

In figura 1.6 è possibile notare come ad esempio l'energia sprigionata dalla bomba nucleare sganciata su Hiroshima il 6 Agosto 1945 sia sostanzialmente analoga a quella liberata dal terremoto avvenuto a L'Aquila il 6 Aprile 2009, di magnitudo 6,3 .

1.2 La Ionosfera

1.2.1 L'Atmosfera e la Magnetosfera

L'atmosfera è la parte gassosa che avvolge la Terra e a terra si presenta con una percentuale di circa il 78% di N_2 , il 21% di O_2 e un 1% di altri gas.

La radioattività naturale gioca un ruolo molto importante nella morfologia dell'atmosfera così come nella determinazione di grandezze come il campo elettrico terrestre.

L'atmosfera terrestre è infatti sottoposta a ionizzazione da più sorgenti: a basse altitudini prevalentemente dalla radioattività naturale presente in aria (emettitori β^- come ^{85}Kr , ^{90}Sr e ^{90}Y) o nella terra (principalmente ^{222}Rn , ^{220}Rn che hanno un decadimento α e ^{40}K che nella maggior parte dei casi presenta un decadimento β^-), a maggiori altitudini da radiazione solare e raggi cosmici, particelle di alta e altissima energia che provengono da zone al di fuori del sistema solare (prevalentemente protoni, ioni e nuclei atomici).

Anche l'atmosfera è composta da più involucri, caratterizzati da proprietà termiche diverse tra loro (Figura 1.7) [5]. La *troposfera* è lo strato più interno dell'atmosfera, si estende fino ad un'altitudine di 20 km circa e presenta una temperatura che diminuisce con l'aumentare dell'altezza essendo poco influenzata da radiazione solare. In questo strato è racchiusa gran parte della totalità della massa gassosa presente nell'atmosfera e si formano le nuvole. Sopra alla troposfera si estende la *stratosfera* fino a circa 50 km d'altitudine, caratterizzata da un basso gradiente di temperatura e scarsa umidità. È presente poi, oltre la zona di stratopausa che pone il limite della stratosfera, lo strato chiamato *mesosfera*: una zona molto turbolenta a bassa temperatura (160 K). Oltre 85-100 km di altitudine si estende la termosfera dove la temperatura cinetica cresce all'aumentare dell'altezza fino addirittura ad arrivare a 1800 K durante periodi di alta attività solare. Fino a 105-110 km di altitudine, venti e correnti mescolano in modo omogeneo l'aria che pertanto ha sostanzialmente la stessa composizione ed è formata principalmente da azoto, ossigeno ed argon molecolari. Oltre la termosfera si trova infine la *esosfera*.

La linea di Karman, posta ad un'altezza di 100 km, segna convenzionalmente l'inizio dello *spazio*.

La *ionosfera*, parte dell'atmosfera superiore appartenente alla mesosfera ed alla termosfera, si estende tra 50 km fino a circa 500 km di altitudine ed ha la proprietà di contenere abbastanza elettroni e ioni da interagire con il campo magnetico terrestre. Oltre a ciò, è un mezzo ad alta conducibilità elettrica ed è formato da gas ionizzato, soggetto alle leggi del plasma. Il gas presente viene ionizzato dalla radiazione ultravioletta solare principalmente, e con minor effetto da raggi X solari, raggi cosmici e particelle che precipitano

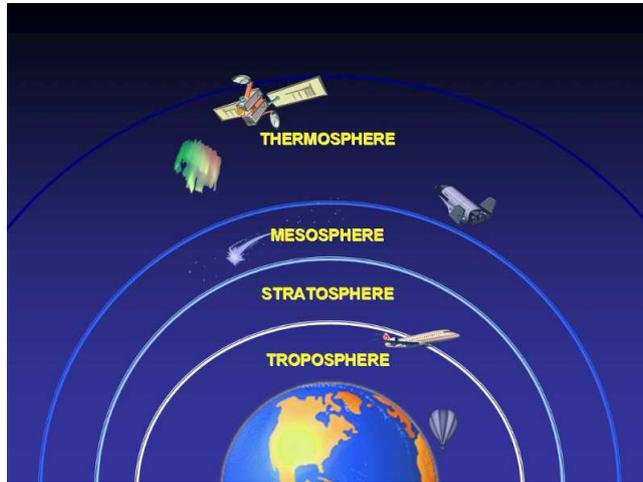


Figura 1.7: La struttura dell'atmosfera.

da altitudini maggiori, come ad esempio dalle Fasce di Van Allen (VAB), in seguito descritte.

La *magnetosfera* è invece la regione dello spazio che comprende il campo magnetico terrestre (Figura 1.8, a), originato da correnti elettriche che scorrono entro il nucleo nella Terra, le cui zone più esterne interagiscono con il *vento solare* (Figura 1.8, b), un gas altamente ionizzato e contenente per lo più elettroni, protoni e ioni di elio (emessi come risultato di un'espansione supersonica della corona solare) che trasporta un campo magnetico e proviene dal Sole. Il campo magnetico terrestre agisce quindi da schermo per il vento solare, oltre che per altri raggi cosmici.

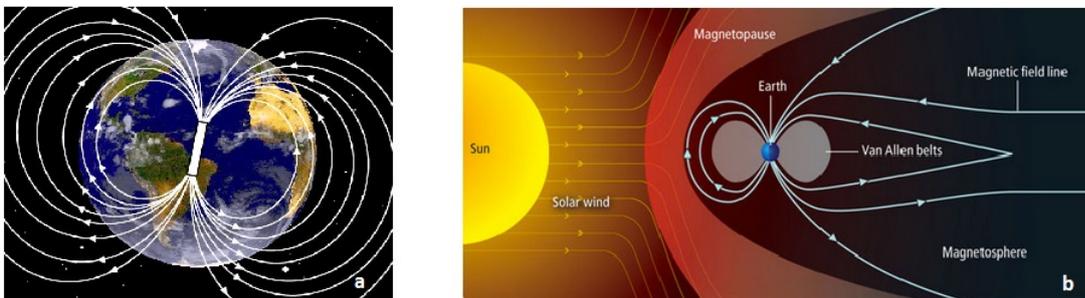


Figura 1.8: Il campo magnetico terrestre e la magnetosfera, interazione del campo magnetico con il vento solare.

Questa fascia si estende pertanto da circa 500 km di altitudine e può arrivare ad addirittura 10^6 km. L'interazione del vento solare con il campo geomagnetico provoca la compressione del lato rivolto al Sole e l'espansione di quello opposto, come visibile in Figura 1.8. Poiché ai poli le linee del campo si chiudono, queste sono le zone che costituiscono l'ingresso preferenziale entro l'atmosfera per le particelle dei raggi cosmici e solari: questo meccanismo è alla base del fenomeno delle aurore polari.

La caratteristica del campo magnetico terrestre di agire come una sorta di scudo per le particelle dirette verso la Terra, fa sì che si creino due zone toroidali ricche di particelle intrappolate, le *Fasce di Van Allen* (Figura 1.9), una interna molto stabile, con una grossa presenza di protoni (con energie dell'ordine delle centinaia di MeV) ed elettroni (con energie dell'ordine delle centinaia di keV fino a qualche MeV), l'altra esterna dotata di una ingente concentrazione di elettroni con energie comprese tra 0,1 MeV e 10 MeV.

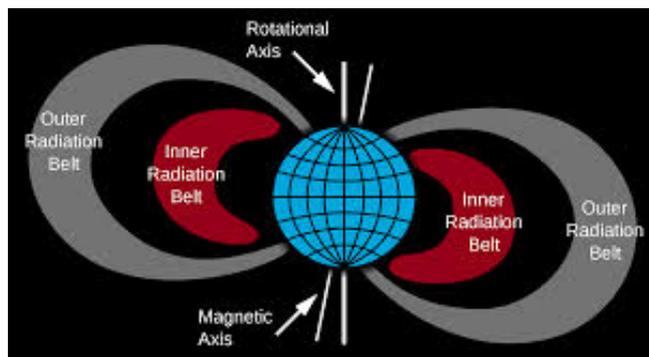


Figura 1.9: Le Fasce di Van Allen, interna ed esterna.

Le particelle intrappolate delle fasce di Van Allen subiscono tre diversi moti periodici (Figura 1.10): la rotazione attorno alle linee di forza del campo geomagnetico, l'oscillazione tra due punti specchio di una stessa linea di forza attorno al piano equatoriale, e il moto di *drift*, per cui le particelle positive muovono verso ovest, al contrario le negative verso est.

Va inoltre menzionato il concetto di *L-shell* (o *L-value*), un parametro comprende tutte le linee del campo magnetico che intercettano l'equatore magnetico ad una distanza dal centro della Terra pari al valore L in raggi terrestri. Ovvero, $L = 2$ descrive tutte quelle linee del campo magnetico che

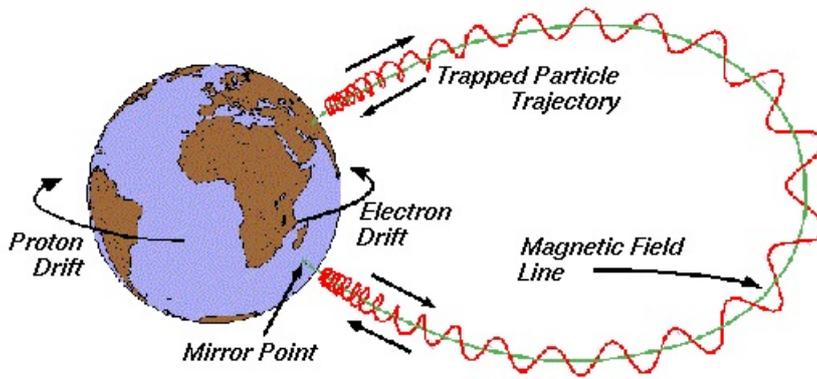


Figura 1.10: I tre moti delle particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen.

hanno una distanza pari a 2 volte il raggio terrestre, partendo dal nucleo della Terra, valutate nella zona in cui incontrano l'equatore magnetico.

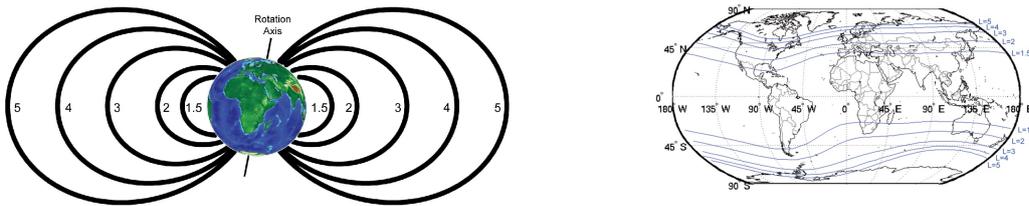


Figura 1.11: A sinistra, alcune L-shells in due dimensioni (in tre dimensioni hanno aspetto toroidale). A destra, alcune L-shells proiettate sulla superficie terrestre .

Un'ultima grandezza da definire è il *pitch angle* ϑ , l'angolo che si produce tra il vettore velocità legato al moto di una particella ed il campo magnetico locale presente (Figura 1.12).

1.2.2 La struttura della Ionosfera

Come si è visto, la ionosfera, la parte dell'atmosfera che più interagisce col campo geomagnetico, è la regione maggiormente ionizzata. A seconda della concentrazione degli elettroni e della natura degli ioni presenti nei vari strati della ionosfera, viene effettuata una suddivisione in regioni D, E ed F (F1 ed F2), come visibile in Figura 1.13 [6].

1. FISICA DELL'ACCOPIAMENTO SISMO-IONOSFERICO

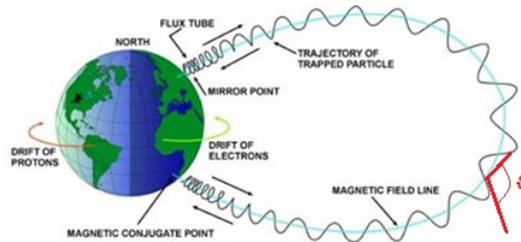


Figura 1.12: In rosso, raffigurazione del *pitch angle* ϑ per una particella nel campo geomagnetico.

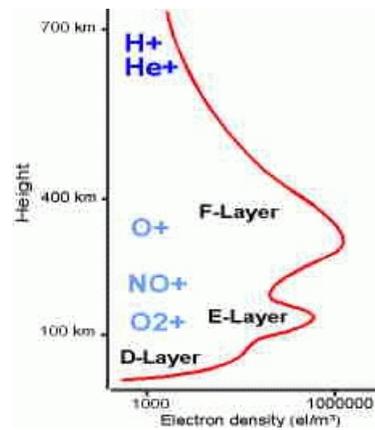
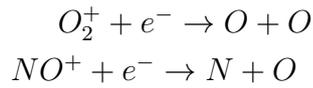


Figura 1.13: Le regioni che compongono la ionosfera caratterizzati dalla diversa concentrazione di elettroni e dalle diverse specie ioniche presenti.

Una regione interessata molto dal fenomeno dell'accoppiamento sismo-ionosferico è quella caratterizzata dalla lettera F, che si divide in due sotto-regioni: F1 ed F2, le quali si estendono a partire da 140 km di altitudine. La zona F1 si estende fino a 200-250 km circa, per poi lasciare spazio alla zona F2 che si estende fino a circa 500 km di altitudine. Le molecole maggiormente ionizzate che si trovano nella regione F sono quelle dell'ossigeno e dell'azoto, inoltre anche l'ossigeno atomico O viene ionizzato, pertanto l'azione ionizzante avrà come risultato la presenza massiccia di ioni O_2^+ ed NO^+ , oltre che di O^+ .

Lo strato F2, il più dinamico, è caratterizzato da una grande densità di plasma (10^{12} particelle per metro cubo), maggiore di 2 ordini di grandezza rispetto alla regione E, e dal fenomeno di ricombinazione dissociativa per cui:



Questo fenomeno fa sì che la velocità con cui avviene la perdita di ionizzazione sia molto maggiore che negli altri strati.

In un mezzo altamente ionizzato con altissima conducibilità, quale è il plasma, è presente neutralità di carica. Esiste una grandezza, la *lunghezza di Debye*, che definisce il minimo spazio entro cui le particelle all'interno di una plasma possono diffondere:

$$\lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_0 k T}{N q^2}\right)^{1/2} \quad (1.3)$$

con ε_0 , costante dielettrica nel vuoto, k , costante di Boltzmann, T , temperatura, n , densità di carica e q , la carica. Il plasma presenta inoltre la peculiarità di essere in grado di riflettere onde di frequenza inferiore o uguale alla frequenza di plasma che è:

$$f_0 = 8,98\sqrt{n} \quad (1.4)$$

con n , concentrazione degli elettroni.

Per quanto riguarda la ionosfera quindi, si può concludere che finché un'onda elettromagnetica che si sviluppa verticalmente non ha una frequenza maggiore della frequenza di plasma relativa ad una altitudine con la propria concentrazione di elettroni (da cui dipende la frequenza critica), viene riflessa, altrimenti si può propagare verticalmente e può essere riflessa semmai da livelli superiori: come mostrato in Figura 1.13, la concentrazione di elettroni aumenta fino a circa 400 km, cioè lo strato F2. L'altitudine designata come $h_m F2$ pone il limite oltre cui un'onda con frequenza maggiore di quella lì presente, cioè $f_0 F2$, ha la possibilità di passare attraverso la ionosfera e propagarsi nello spazio. Tale frequenza prende il nome di *frequenza critica*.

Una volta superata l'*altezza critica* $h_m F2$, le particelle sono sostanzialmente controllate dal campo geomagnetico per cui esse si diffondono lungo le sue linee di campo perpendicolarmente al campo elettrico presente nella ionosfera ($E \times B$ drift).

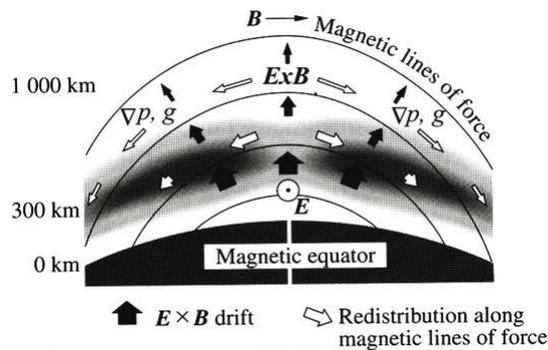


Figura 1.14: Sviluppo verticale di un'onda elettromagnetica con conseguente $E \times B$ drift.

1.2.3 Variazioni ionosferiche regolari

La ionosfera presenta numerose e diverse variazioni periodiche dipendenti da vari fenomeni [7].

Come è noto, l'attività solare ha una ciclicità di circa 11 anni (Figura 1.15) basata sulla ricorrenza di eventi come straordinari *flares* o *coronal mass ejections* CME. La ionosfera è influenzata da questa attività: ad esse, di solito segue un'emissione di onde elettromagnetiche, EME, e onde acustiche, AW, con una presenza di irregolarità nella concentrazione del plasma.

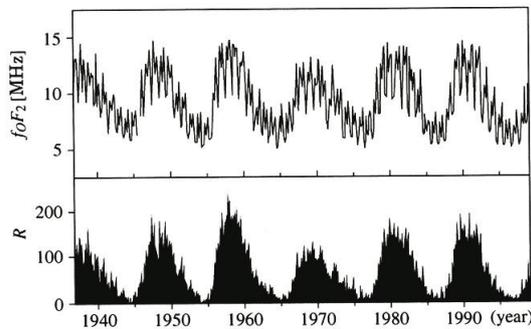


Figura 1.15: In alto, la media annua del valore della frequenza critica, in basso l'andamento dell'attività solare in flussi radio provenienti dal Sole.

Il Sole ha inoltre influenza sulla ionosfera tramite fenomeno della tempesta geomagnetica, in cui si produce un forte vento solare che, quando interagisce col campo geomagnetico, comporta la dissipazione dell'energia trasportata dal vento in cambiamenti della concentrazione, della composizione e della temperatura del plasma nella ionosfera, con una frequenza critica che risulta ridotta. Oltre alle variazioni dovute alle attività del Sole, esistono variazioni stagionali, giornaliere, orarie e locali con dipendenza anche dai moti dell'aria come ad esempio nel caso delle maree atmosferiche [8].

1.3 Precursori di un terremoto

I precursori di un terremoto sono dei fenomeni che si manifestano come anomalie di alcuni parametri geofisici osservate prima che si manifesti l'evento sismico, e possono interessare parametri legati alla crosta terrestre oppure

all'atmosfera [9]. Proprio per la loro caratteristica di essere temporalmente antecedenti al terremoto sono da decenni e studiati ed analizzati col fine ultimo di poter dare indicazioni utili circa la previsione di un terremoto [10].

Ad oggi, l'unico evento sismico predetto che ha comportato l'adozione di alcune misure e di alcuni provvedimenti volti a ridurre il danno è stato quello che ha interessato il terremoto di magnitudo 7,3 del 1975 di Haicheng, in Cina, in cui circa un milione di persone fu evacuato dalla propria abitazione sulla base di alcuni fenomeni precursori rilevati [11].

L'approccio classico per la previsione degli eventi sismici per anni è consistito solo nella concezione di una ciclicità dell'evento stesso data dal continuo immagazzinamento e rilascio di energia elastica, come previsto dalla teoria elastica [12]. Altri modelli sono stati sviluppati più recentemente, il cui più importante e completo è il *dilatancy-diffusion (DD) model*, secondo cui anche la presenza di acqua è di grande interesse, poiché penetrando nelle fratture e agendo come lubrificante in esse può far diminuire l'attrito tra le rocce, aumentandone però la pressione porosa e facilitando così la rottura delle stesse dovuta a microfratture. Da queste microfratture sono state osservate emissioni di onde acustiche (AW).

In realtà studi condotti più recentemente hanno confermato come un terremoto sia un evento estremamente più complesso: questa verifica ha comportato l'abbandono dei modelli sviluppati, in particolare quello ciclico, per favorire invece un'analisi più dettagliata dei fenomeni precursori, sia geologici che ionosferici.

1.3.1 I precursori geologici

Con precursori geologici si vuole intendere tutti quei fenomeni cronologicamente antecedenti al terremoto, che si instaurano in zone interne alla struttura della Terra o provengono dalle medesime zone.

Uno di essi, forse il più celebre, è l'emanazione del gas Radon (Rn) [13], un gas radioattivo molto volatile e di origine naturale che ha 26 diversi isotopi, i cui più importanti sono il ^{220}Rn (thoron) e il ^{222}Rn , prodotto di decadimento nella catena del ^{238}U , con un tempo di dimezzamento è di 3,82 giorni, e che

1.3 Precursori di un terremoto

decade in ^{218}Po emettendo una particella α con potere ionizzante. Questo gas contenuto nel terreno, la cui concentrazione locale è più o meno costante, può subire un aumento in concentrazione anche di 4-8 volte rilevato in aria nei momenti precedenti all'instaurarsi di un terremoto (Figura 1.16) [14]. Questa variazione si registra in particolare anche una o due settimane prima dell'evento sismico, pur geograficamente non in perfetta concomitanza con la faglia responsabile dell'evento sismico e presentando un comportamento che oscilla tra aumento e diminuzione in concentrazione: il motivo è dovuto a dinamiche di compressione ed espansione delle faglie stesse durante le fasi di accumulo di energia elastica.

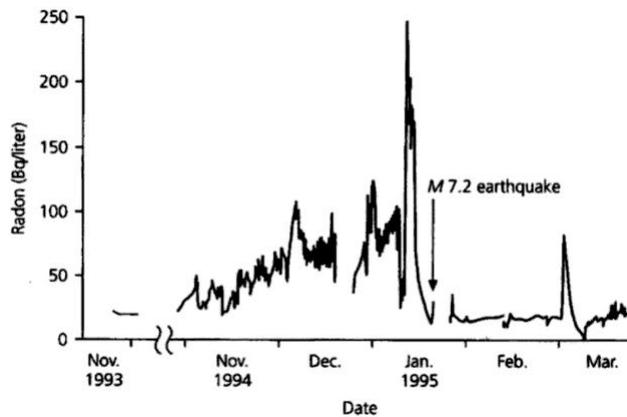


Figura 1.16: Concentrazione di Radon nella falda acquifera prima e dopo il terremoto di Kobe, Giappone, del 16 Gennaio 1995.

Un altro fenomeno precursore di un terremoto e di recente scoperta è dovuto alla formazione di enormi bolle di gas nella crosta terrestre come risultato della convezione e dei moti tra placche [15] (è stato anche proposto un modello secondo cui le bolle non sono l'effetto dell'energia elastica immagazzinata ma la causa), che comporta la fuoriuscita dei gas, tra cui principalmente CO_2 ed He , la cui origine è più profonda nella crosta e può indicare la presenza del flusso magmatico che risale. Il rilascio di questi gas comporta due fenomeni molto importanti.

Il primo è la generazione di onde acustiche di gravità (*acoustic gravity waves*) AGW, emissioni acustiche a frequenza super bassa (SLF) di circa 50

Hz modulate da onde a frequenza estremamente bassa (ELF) di pochi Hz che si producono nell'interazione tra il moto dell'aria ed il terreno. Il secondo è legato al fatto che di solito i gas portano con sé aerosoli di gas pesanti presenti nella crosta quali *Hg*, *As* e *Sb*.

Un ulteriore fenomeno precursore è legato alla propagazione di onde elettromagnetiche (EME) a frequenza ultra bassa (ULF - da 0,3 a 3 kHz) e molto bassa (VLF - da 3 a 30 kHz) che accompagna la variazione del campo elettrico verticale E_z , cioè la componente verticale del campo elettrico terrestre [16].

Questa grandezza ha un valore medio di circa 100 V/m in condizioni di tempo sereno e sperimentalmente si è notato che, prima che si verifichi un terremoto di una certa entità ($M \geq 5$), varia e può incrementare anche fino a 1 kV/m [17].

Per concludere, per quanto concerne i fenomeni precursori legati al terreno, si può individuare prevalentemente due tipi: rilasci gassosi, che sono emanazione di Radon, altri gas e aerosoli metallici, cui sono legate le emissioni di onde AGW, e variazioni del campo elettrico verticale, cui sono associate le generazioni di ULF e VLF EME.

La zona in cui vengono registrati questi effetti prende il nome di *zona di preparazione* di un terremoto, la cui dimensione dipende dall'entità del terremoto. Va fatta menzione del fatto che il campo elettrico viene caricato sostanzialmente da tre sorgenti: principalmente fulmini, ma anche dal meccanismo a dinamo che si instaura tra vento solare e magnetosfera e infine moti di maree atmosferiche che coinvolgono particelle cariche. Il campo elettrico inoltre, le cui linee di campo vanno dall'elettrodo positivo al negativo, è diretto verso terra e comporta dunque un moto di elettroni verso l'alto e un moto di ioni positivi verso il basso che può portare al cosiddetto fenomeno dell'effetto elettrodo, indagato per la prima volta dal fisico statunitense Hoppe nel 1967, per cui, se dalla terra avviene una bassa ionizzazione, il flusso di elettroni dalla terra diventa scarso e vi sarà un accumulo di carica positiva sulla superficie con grosse conseguenze sul campo elettrico, come sarà illustrato in seguito (Sezione 1.4, Figura 1.21) [18] [19].

Si accenna brevemente al fatto che pur esistendo una variazione verticale

di potenziale di una certa entità, essa non è utilizzabile per la produzione di potenza elettrica data la scarsissima conducibilità elettrica dell'aria (circa 2 pA/m²).

1.3.2 I precursori ionosferici

Il terremoto del 27 Marzo 1964 in Alaska (USA) di magnitudo $M_w=9$ è stato un momento storico per quanto riguarda la concezione dei precursori ed il loro studio: per la prima volta infatti, sono state osservate anomalie in vari parametri analizzati e cronologicamente antecedenti all'evento sismico, non solo grazie a strumenti installati a terra ma anche grazie al satellite canadese Alouette-1, allora orbitante, spedito due anni prima per studi riguardanti la ionosfera.

In particolare, il satellite è stato in grado di rilevare il valore di f_0F2 riscontrando nelle orbite verticalmente vicine all'epicentro e in tempi immediatamente precedenti al terremoto significative differenze, in confronto con le medie dei dati dei giorni precedenti, anche tenute conto delle variazioni giornaliere, grazie alle registrazioni rilevate dal satellite in tutti i passaggi precedenti (Figura 1.17).

Oltre alla differenza evidente nel valore della frequenza critica misurato, in concomitanza sono risultate manifeste le variazioni della concentrazione ionosferica degli elettroni e quindi mutamenti del plasma. I risultati dei dati raccolti da Alouette-1 sono organizzati presentando le deviazioni rispetto alla media della stessa ora valutata coi valori dei 30 giorni precedenti, ovvero:

$$\Delta f_0F2 = (f_0F2_{curr} - f_0F2_{ref}) \times 100 / f_0F2_{ref} [\%]$$

con f_0F2_{curr} , valore della frequenza critica registrato, e f_0F2_{ref} , valore di quella di riferimento, cioè la media.

Le tre immagini della Figura 1.17 sono riferite a tre ore diverse e come si evince da esse, è possibile riscontrare una significativa variazione nel valore di f_0F2 , anche parecchie ore prima dell'evento sismico. Oltre a ciò, alcune considerazioni sono però da aggiungere: la prima è legata al fatto che

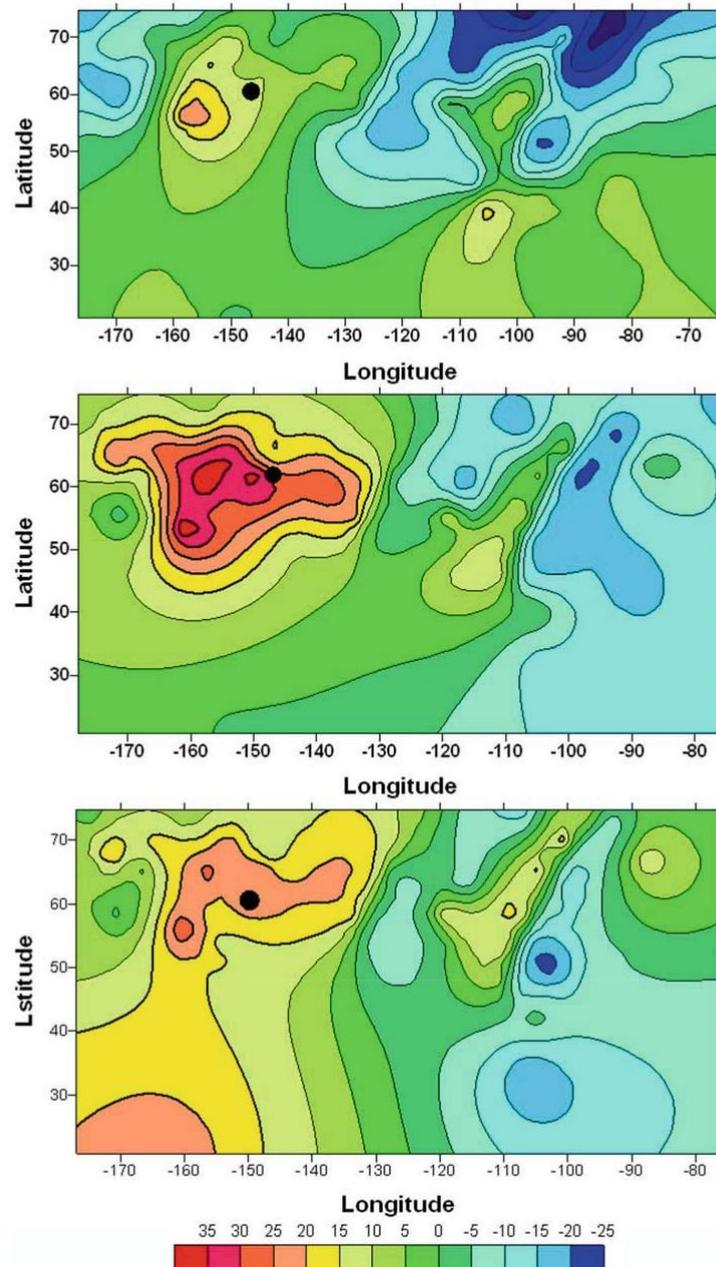


Figura 1.17: Variazioni in percentuale della frequenza critica a diverse ore di distanza dal terremoto, secondo i dati raccolti da Alouette-1: In *rosso*, variazioni positiva, in *blu*, variazioni negative. In *alto*, 30 ore prima dell'evento sismico. *Al centro*, 6 ore prima dell'evento sismico. *In basso*, 18 ore dopo l'evento sismico.

la deviazione può essere positiva ma anche negativa e quindi presenta un doppio comportamento, la seconda riguarda il fatto che la posizione dell'epicentro non coincide con la massima irregolarità rilevata e non ha comunque un comportamento costante. Tuttoggi, una spiegazione completa a tali comportamenti non esiste, anche se più avanti verranno illustrati possibili motivi. Nonostante ciò, si è potuto comunque concludere che la variazione del parametro f_0F_2 è legata all'evento sismico, pur non essendo ancora stato spiegato totalmente il meccanismo fisico.

Numerosi altri satelliti lanciati in anni successivi in orbite *Low Earth Orbit* (LEO, tra 160 km e 2000 km di altitudine) e ionosonde installate a terra hanno fornito altri dati utili allo studio della frequenza critica con il risultato che è stato possibile solamente confermare la loro varietà di comportamento in concomitanza di un terremoto: alla volte la deviazione è solo positiva, altre volte solo negativa, altre volte entrambe in zone e tempi diversi, con l'ipotesi che ciò fosse dovuto alla differenza nei meccanismi di formazione di un terremoto, delle zone di formazione, delle variazioni meteorologiche e temporali, dell'attività solare e geomagnetica oltre che della latitudine e longitudine e dall'ora del giorno.

Grazie ad altre missioni compiute, è stato inoltre possibile riscontrare delle presenza di onde VLF, sempre in fasi precedenti ad un terremoto, nella regione D della ionosfera in concomitanza di onde AGW [20]: è stata pertanto ipotizzata una possibile interazione tra i due tipi di onda.

Un altro fenomeno interessante analizzato è la formazione di *sporadic E layers*, ovvero delle micro regioni interne alla regione E della ionosfera, costituite da nuvole di gas ionizzato [21].

Nella regione F, infine, si è dimostrata una ingente variazione nella concentrazione degli elettroni, sempre come fenomeno precursore (Figura 1.18) [22].

Si faccia presente che alle medie ed alte latitudini, ove le linee geomagnetiche hanno una componente verticale significativa, il campo elettrico penetra più facilmente nella ionosfera e le variazioni sopra descritte sono meno pronunciate, al contrario delle latitudini equatoriali dove invece la variazione è

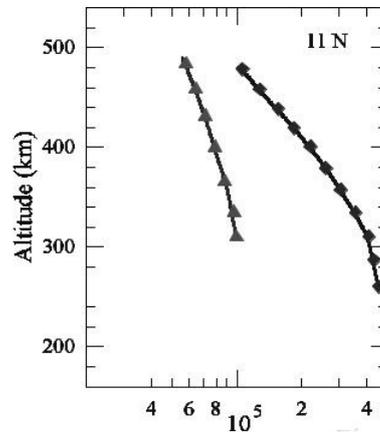


Figura 1.18: Esempio della variazione della concentrazione di elettroni a diverse altitudini prima di un terremoto. La linea individuata dai triangoli indica il profilo modificato, la linea individuata dai quadrati indica il profilo indisturbato. In questo caso la deviazione è negativa dunque.

più rimarcata.

Si introduce inoltre una zona chiamata *Anomalia Sud Atlantica SAA*, una regione estesa sopra l'America del Sud e l'Oceano Atlantico che presenta un valore del campo geomagnetico inferiore rispetto al resto della Terra e irregolarità in concentrazione di elettroni: questa zona è piuttosto critica per i satelliti che vi orbitano, i cui dati raccolti sono spesso considerati irrilevanti da un punto di vista scientifico [23].

Uno studio condotto da altri satelliti, tra cui principalmente quelli del programma spaziale Intercosmos, ha poi rivelato quantitativamente la deviazione, alle volte positiva, alle volte negativa, nella concentrazione di elettroni al variare dell'altitudine ed in concomitanza di un terremoto.

Si sono dunque discussi già alcuni fenomeni precursori legati all'atmosfera, quali la variazione della frequenza critica f_0F2 , la presenza di onde VLF e AGW e la loro possibile interazione, la formazione di *sporadic layers* nella regione E e una significativa variazione della concentrazione di elettroni, in particolare nella regione F.

Dai dati raccolti dai satelliti in missioni che hanno compreso un arco di tempo di circa 40 anni, ovvero tra il 1964 (terremoto in Alaska analizzato dal satellite Alouette-1) e il 2004 (utilizzando le stazioni spaziali orbitanti ISS e

MIR), si è potuto catalogare con precisione l'insieme di fenomeni precursori sperimentalmente individuati e che interessano l'atmosfera (in particolare la ionosfera), classificandoli in 4 gruppi: il primo riguardante campi elettromagnetici, il secondo parametri del plasma, il terzo concernente flussi di particelle, il quarto emissione ottiche.

Il primo gruppo include sostanzialmente le onde elettromagnetiche ULF e VLF rilevate nelle linee di forza geomagnetiche in corrispondenza dell'epicentro del terremoto e che aumentano notevolmente [24] di intensità precedentemente ad un terremoto ed in particolare con una finestra temporale che va da decine di minuti a decine di ore (il picco è di solito 12-24 ore prima di terremoto di magnitudo $M \geq 5$), soprattutto a basse e medie latitudini. Oltre a quelle individuate in presenza di anomalie del campo elettrico e quelle rilevate nella regione D della ionosfera, si è verificata quindi anche la presenza di queste onde in zone superiori e appartenenti alla magnetosfera: di qui, l'ipotesi che in qualche modo questi tre rilevamenti a diverse altitudini fossero in qualche modo connesse, se non addirittura diverse misurazioni di una stessa grandezza.

Irregolarità del plasma presente nella ionosfera, come la diversa concentrazione di elettroni menzionata precedentemente, sono state poi riscontrate sopra le zone di preparazione del terremoto [25] e si è notata una certa corrispondenza tra variazioni di densità ionica nel plasma tra 300 e 500 km di altitudine (estremamente più rilevanti tra 450 e 500 km di altitudine) e attività sismica accompagnate da un aumento di ioni leggeri H^+ e He^+ nei passaggi del satellite attorno all'epicentro col risultato finale di una diminuzione della massa media degli ioni presenti. Queste irregolarità sono state sempre accompagnate da emissioni ULF-VLF e avvengono da qualche ora a qualche giorno prima di un terremoto: nel caso del terremoto di L'Aquila del 2009 si è notata un'anomalia nella concentrazione di elettroni tre giorni prima all'evento sismico [26].

Un altro fenomeno registrato in prossimità di un evento sismico e di estrema importanza è la precipitazione di particelle che provengono dalle fasce di Van Allen (*particle burst*), con un aumento del flusso di più di un ordine di grandezza rispetto a condizioni normali, temporalmente in anticipo di al-

meno 3 ore rispetto al verificarsi di un terremoto di magnitudo maggiore o uguale a 4 [27]. La maggior parte del flusso, come mostrato dai satelliti Meteor-3, Aleshina-92, Aureol-3 ed Intercosmos-24, è costituito da protoni con solitamente energie attorno a 100 MeV e comunque minori di 300 MeV, e da elettroni con energie di pochi MeV (di solito circa 5 MeV) e comunque inferiori a 50 MeV.

Menzione va fatta anche per fenomeni precursori di emissione ottiche, come ad esempio le *luci telluriche*, fenomeni di emissione di luce che avvengono in cielo alcuni secondi prima di un sisma [28], la cui dinamica precisa è ancora sotto studio.



Figura 1.19: Luce tellurica emanata prima del terremoto del 2008 nel Sichuan, Cina.

1.4 Introduzione all'accoppiamento sismo-ionosferico

Le anomalie presenti nel campo elettrico e l'emissione di Radon come precursori di un terremoto erano noti alla comunità scientifica dagli anni '70 [29] ma non esisteva alcuna teoria che legava i due fenomeni, pur essendo già chiara all'epoca la possibilità del gas radon di influenzare la conducibilità elettrica dell'aria. Le prime ipotesi che ricollegavano i due fenomeni vennero sviluppate all'inizio degli anni '80 quando fu postulato sulla base di analisi sperimentali che ci fosse correlazione tra la concentrazione di radon e la variazione della frequenza critica, vista anche la coerenza temporale dei due fenomeni (Figura 1.20).

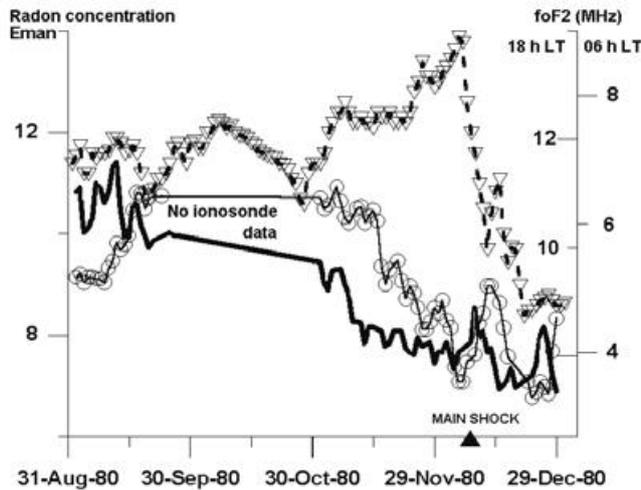


Figura 1.20: Andamento della concentrazione di radon in aria (linea individuata dai triangoli), in relazione con la frequenza critica rilevata alle 6 di mattina (linea continua) e alle 18 (linea individuata dai cerchi), rilevate prima del terremoto di Nazarbek (Uzbekistan) del 11 Dicembre 1980.

L'anticorrelazione che si nota in Figura 1.20 tra i due eventi appare evidente: all'aumentare della concentrazione del radon in aria corrisponde una diminuzione della frequenza critica f_0F_2 . Questo caso suggerì l'esistenza di un legame tra i due fenomeni, pur non essendo chiaro il comportamento della frequenza critica (si rammenta che la sua deviazione può avere sia comportamento positivo che negativo). Simili risultati vennero ottenuti analizzando l'area colpita dal disastro all'impianto nucleare di Chernobyl del 1985, e rafforzati da andamenti analoghi rilevati da diversi strumenti e satelliti per diversi terremoti che rilevarono in particolare la presenza incrementata di ULF-VLF EME nella ionosfera passando sopra a regioni di preparazione del terremoto.

Le missioni spaziali degli anni '90 inoltre, oltre a confermare i flussi di particelle precipitate dalle Fasce di Van Allen, fornirono più indizi circa la possibilità che queste precipitazioni fossero stimulate nella magnetosfera dalle emissioni delle onde elettromagnetiche ULF e VLF, che come si è visto vengono riscontrate in più zone della ionosfera, interagenti con le particelle stesse.

Negli ultimi 20 anni sono state portate avanti campagne di misure, missioni spaziali ed esperimenti scientifici volti a vagliare la possibilità di un meccanismo globale, seppur complesso, capace di legare tutti i precursori di un terremoto, fenomeno all'apparenza di non facile correlazione. Prima di spiegare in modo compiuto il modello elaborato, è necessario fare cenno del modello sviluppato per la spiegazione dei meccanismi di ionizzazione dell'aria e della successiva generazione di un campo elettrico che comporta l'anomalia del campo elettrico terrestre.

Tale modello, risultato finale di un assemblaggio di vari altri precedenti, descrive la formazione di ioni O_2^+ sotto l'azione ionizzante dei gas precursori rilasciati in atmosfera come risultato della ionizzazione diretta e come risultato di uno scambio di carica tra uno ione iniziale N_2^+ e ioni O^- e O_2^- , formati da elettroni legati ad atomi di ossigeno.

In particolare si trovano nella troposfera i seguenti ioni: O^- , O_2^- , NO_2^- , NO_3^- , CO_3^- , O_2^+ , NO^+ , H_3O^+ che possono subire il fenomeno dell'*idratazione*, vista la grossa concentrazione di molecole d'acqua presente sottoforma di vapore (10^{17} cm^{-3}), e formare complessi di ioni, chiamati *cluster*, caricati positivamente o negativamente. Lo strato d'aria vicino alla superficie, e quindi più ionizzato dall'azione dei gas rilasciati dalla crosta terrestre, a maggior ragione subisce effetti di ionizzazione e quindi di formazione di cluster. Questo gas più vicino alla superficie terrestre e ionizzato prende il nome di *near ground plasma*. A causa della differenza nella mobilità per i due tipi di ioni (i negativi hanno una mobilità 1,4 volte maggiore rispetto ai positivi), si crea una carica sulla superficie che distorce il campo elettrico vicino al terreno.

Tale fenomeno prende il nome di *effetto elettrodo*, descritto dal fisico Hoppe nel 1967 (Figura 1.21). Consiste nel moto degli ioni positivi verso la superficie terrestre, a causa del campo elettrico terrestre diretto verso il suolo, dove si ricombinano solo in parte a causa della scarsa mobilità, creando uno strato di carica positiva. Gli elettroni che invece muovo verso l'alto creano analogamente una zona di carica negativa formando una sorta di elettrodo con campo elettrico locale E_l , minore di quello terrestre, rivolto verso l'alto che diminuisce di intensità quello terrestre già presente e che come prima conseguenza forma una carica sulla superficie.

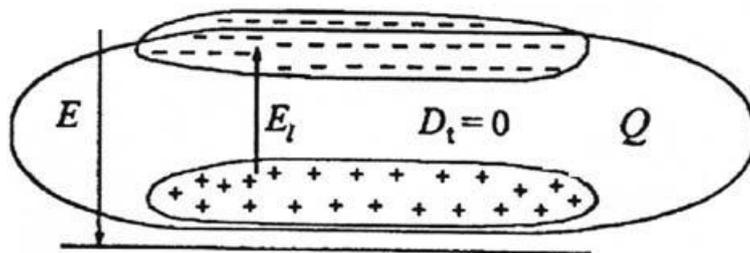


Figura 1.21: Cariche positive e negative vicino alla superficie terrestre, come risultato dell'effetto elettrodo. L'area individuata dalla linea ovale prende il nome di *electrode layer*.

Nell' *electrode layer*, la regione di atmosfera interessata dal fenomeno, il campo elettrico è quindi minore rispetto a quello normale ($E - E_t$) essendo i due campi diretti in verso opposto, nello strato superiore invece il campo elettrico è maggiore per la presenza di carica elettrica non compensata e concentrata. Questa carica può subire movimenti dati da venti o moti turbolenti che tendono a ricombinare le cariche mescolando i vari ioni. In tale processo prendono parte anche gli aerosoli metallici che, avendo alta affinità con gli elettroni, possono intensificare la concentrazione di ioni negativi e quindi l'effetto.

A questo punto, descritto il meccanismo che lega il flusso di gas dal terreno con l'insorgenza delle anomalie nel campo elettrico dovute a diverse concentrazioni di ioni in diverse zone, e tenendo sempre in considerazione la presenza degli altri fenomeni precursori visti, quali la precipitazione di particelle dalla magnetosfera, ULF e VLF EME, variazioni nella concentrazione di ioni ed emissioni ottiche, è necessario fornire una teoria che possa legare tutti questi fenomeni. Le prime ipotesi sviluppate con tale scopo hanno riguardato le onde AGW generate dal terreno prima di un terremoto, il cui ruolo si ipotizzò essere quello di legante tra tutti i fenomeni. Tramite vari modelli (specialmente quello *piston-like*) e verifiche sperimentali, si è infatti spiegato come una AGW possa eccitare le molecole in aria e quindi, insieme ai gas ionizzanti, contribuire a creare un campo elettrico anomalo.

La presenza inoltre di questo particolare tipo d'onda nella ionosfera (in

particolare nella regione D) portò alla teoria che vedeva le onde AGW penetranti nei vari strati dell'atmosfera, fino a giungere nella magnetosfera dove le onde VLF, sempre presenti come rumore elettromagnetico, interagirebbero con esse comportando una penetrazione delle ultime nelle zone superiore ed un'interazione con le particelle intrappolate.

In realtà, tutti i modelli e calcoli basati sulla teoria secondo cui le onde AGW si propagano per tutta la ionosfera fino alla magnetosfera sono stati condotti considerando l'atmosfera come ambiente isotermico privo di dissipazioni e inoltre non esiste alcuna evidenza sperimentale e scientifica né alcun articolo pubblicato che confermi la possibilità che le AGW si possano propagare in tal modo, pur essendo stata per anni la teoria più accreditata.

A partire dagli anni 2000 la popolarità di questa teoria è andata scemando sull'idea che la penetrazione di onde AGW nella ionosfera sia molto improbabile se non impossibile. Si è reso necessario dunque spiegare in modo valido ma alternativo la presenza di queste onde nella ionosfera e si è indagato il processo a partire dal campo elettrico anomalo ed in particolare dagli effetti che esso ha nella ionosfera. Innanzitutto è stato prima rilevato sperimentalmente e poi modellizzato, tramite calcoli e valutazioni fisiche, il fenomeno della propagazione del campo elettrico anomalo nelle regioni della ionosfera, in particolare E ed F. Nella fattispecie, è risultato evidente come un campo elettrico sviluppatosi a partire da una zona del terreno piuttosto ampia, 100 km di raggio almeno, e che presenti valori superiori a 500 V/m possa svilupparsi verticalmente comprendendo le fasce della ionosfera. Questa propagazione è ancor più evidente durante le ore notturne, anche se i motivi sono ancora ignoti.

Una volta stabilita la presenza del campo elettrico in queste fasce dell'atmosfera, si è passati a valutarne gli effetti.

A seconda che il campo elettrico verticale a terra E_z sia diretto verso l'alto o verso il basso, sperimentalmente, si è notata una diminuzione, oppure un aumento nel secondo caso, della concentrazione di ioni nella regione E della ionosfera: questo è uno dei motivi per cui la deviazione di frequenza critica, che si ricorda essere dipendente dalla radice della concentrazione di elettroni, presenta valori positivi e negativi.

Nella regione E, inoltre, la formazione di *sporadic layers* si è verificata esser dovuta all'interazione tra ioni NO^+ , N_2^+ ed O_2^+ con il plasma contenente ioni metallici M^+ trasportati dal campo elettrico, la cui concentrazione incrementa notevolmente durante la sua presenza. La presenza di queste zone è stata confermata da recenti analisi condotte anche per terremoti di magnitudo compresa tra 5,5 e 6 [30].

Per quanto riguarda la regione F della ionosfera, gli effetti che si manifestano qui sono decisamente più importanti. In particolare, si è sviluppata l'ipotesi attualmente più accreditata circa la generazione di onde AGW in questo strato dell'atmosfera [31]. Il campo elettrico che si propaga a questa altezza infatti, causando correnti elettriche e moti d'aria turbolenti, può essere in grado di generare queste onde e quindi di instaurare un processo che provoca il moto di componenti neutre e ionizzate dell'atmosfera con velocità diverse, le quali possono portare a oscillazioni della densità degli ioni e della pressione locale, e dunque irregolarità del plasma: questo fenomeno è ingente a latitudini equatoriali e meno pronunciato ai poli, pur essendo ancora evidente. Queste onde AGW sono inoltre le responsabili di eventuali emissioni ottiche [32].

Infine, si è comprovata la coesistenza spaziale delle irregolarità del plasma e delle ULF - VLF EME registrate prima di un terremoto; in particolare proprio le onde AGW creano zone di irregolarità nel plasma e provocano la creazione di una sorta di condotto privilegiato per onde a bassissima frequenza, favorendone la propagazione: quindi le ULF - VLF EME registrate dai satelliti prima di un evento sismico e che si sono generate nell'area sismica, si propagano nella ionosfera grazie ad eventi di scattering con irregolarità del plasma date da onde AGW. Le onde ULF e VLF vanno così a concentrarsi in alcune L-shells e, poiché dotate delle medesime frequenze, vanno ad interagire, come onde *Alfven* (onde magnetoidrodinamiche), con le particelle lì intrappolate modificandone il *pitch angle* (l'angolo tra il vettore velocità della particella e il campo magnetico locale). La frequenza di risonanza delle onde ULF - VLF fa sì che avvenga l'interazione con gli elettroni e i protoni presenti, che hanno frequenza uguale a quella delle onde, che ne provoca lo scattering ed infine la precipitazione nell'atmosfera inferiore, sotto forma di

particle bursts rilevati dai satelliti ad un'altitudine di 500-800 km (Figura 1.23) [33].

Si può riassumere concludendo che la precipitazione di particelle energetiche precedenti un terremoto ed osservata dai satelliti è causata da interazioni tra esse e onde VLF intrappolate nelle L-shells (Figura 1.22) e con quest'ultime propagate grazie a irregolarità del plasma ionosferico dovuto a onde AGW generate da un campo elettrico anomalo che si origina negli strati dell'atmosfera vicino al terreno e si propaga fino alla magnetosfera. Le particelle che precipitano lungo le L-shells creano infine un aumento della concentrazione degli elettroni nello strato D della ionosfera con conseguente aumento di ionizzazione e anomalie nella trasmissione di onde radio.

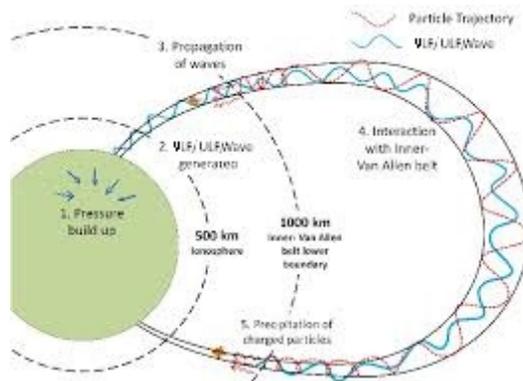


Figura 1.22: Il meccanismo di interazione tra ULF - VLF EME e particelle intrappolate nelle Fasce di Van Allen.

1.5 L'accoppiamento sismo-ionosferico

Si illustrerà ora l'intero meccanismo che lega tutti i fenomeni precursori di un terremoto spiegando il sistema dell'accoppiamento tra un fenomeno sismico e la mutazione di alcune caratteristiche della ionosfera. Si fa presente che ontologicamente è corretto chiamare un fenomeno fisico *precursore* solo nel momento in cui esso viene dotato di spiegazione scientifica e non semplicemente basandosi su un riscontro cronologicamente antecedente al terremoto,

1.5 L'accoppiamento sismo-ionosferico

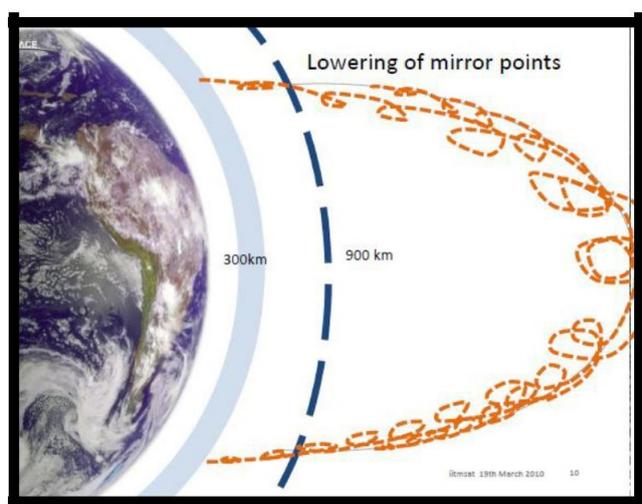
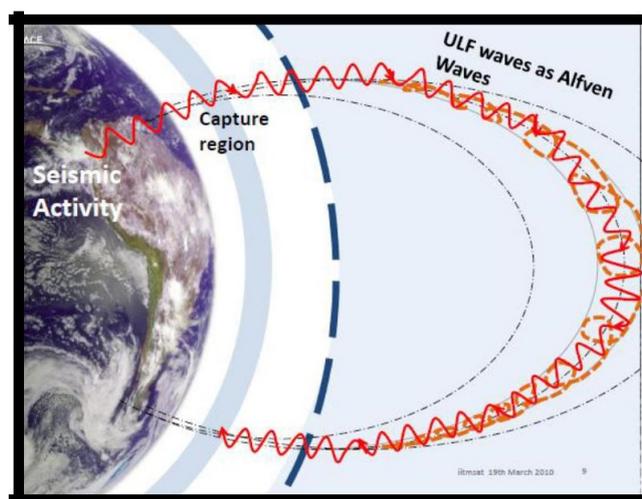
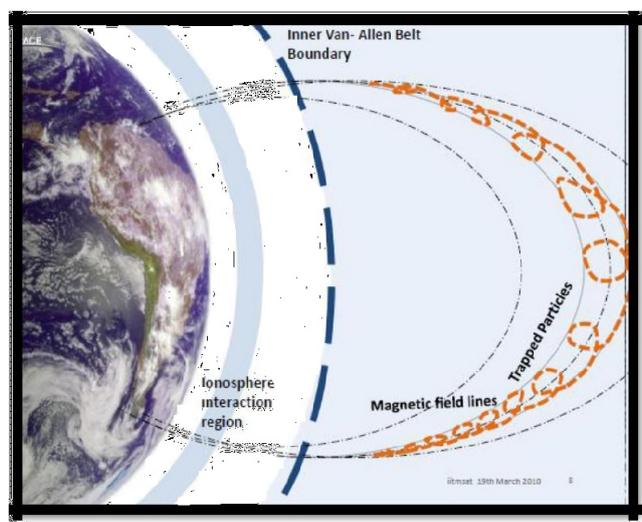


Figura 1.23: Nell'immagine in alto, le particelle intrappolate nelle VAB. Al centro, le ULF - VLF EME emesse che viaggiano come onde Alfvén catturate dal campo geomagnetico. In basso, le particelle intrappolate precipitano dopo l'interazione con le onde Alfvén.

pur essendo esso ripetitivo e legato sempre a tale circostanza.

Nell'area di preparazione di un terremoto oltre all'accumulo di energia elastica, si verificano trasformazioni meccaniche che comportano il rilascio di gas, tra cui il radon Rn . Questi gas, ed in particolare l'isotopo del radon ^{222}Rn , ionizzano la parte inferiore dell'atmosfera, quella vicina alla terra, creando un *near ground plasma* i cui ioni, data la grande quantità d'acqua presente sotto forma di vapore, si aggregano in ioni più complessi, i *cluster* di ioni, con bassa velocità di ricombinazione dovuta all'alto momento di dipolo delle molecole d'acqua. Gli ioni negativi, a causa del campo elettrico terrestre diretto verso il basso, tendono a portarsi in una zona superiore rispetto a quelli positivi, che seguono l'orientamento del campo elettrico. Si crea così il cosiddetto effetto elettrodo per cui vicino alla superficie terrestre si crea un altro campo elettrico, diretto verso l'alto, che lega le due zone di opposta carica e che rende il campo elettrico terrestre localmente anomalo.

Esiste inoltre uno strato tra le due zone dato da cluster neutri di ioni che si sono ricombinati, pur avendo velocità molto diverse.

Un altro fattore che determina l'anomalia del campo elettrico terrestre è costituito dall'emissione di onde AGW, prodotte dai moti d'aria che si instaurano quando avvengono emissioni gassose dal terreno, e che distrugge i cluster neutri, a causa della scarsa forza dell'interazione coulombiana che li lega, andando quindi a ionizzare ulteriormente o strato d'atmosfera più prossimo alla superficie, a cui un ulteriore contributo è dato dagli aerosoli.

Si instaura così un campo elettrico anomalo, che può avere verso rivolto in alto o in basso, che si può sviluppare fino nelle zone più alte della ionosfera e che, comportando delle variazioni di concentrazione di ioni positivi ed elettroni (le concentrazioni possono arrivare ad essere analoghe a quelle del plasma ionosferico), provoca irregolarità nel plasma che si è creato in prossimità del terreno, il *plasma near ground*, le quali si manifestano tramite l'emissione di ULF e VLF EME, la cui natura fisica è ancora poco chiara [34].

A questo punto, si valutano gli effetti nella ionosfera, ricordando che essa è composta sostanzialmente da plasma, gas estremamente ionizzato. Il campo

elettrico anomalo, in particolare la sua componente perpendicolare alle linee geomagnetiche, riesce a penetrare nello strato E della ionosfera, come visto sperimentalmente, e può provocare la formazione di layer sporadici, oltre a generare variazioni della concentrazione di elettroni, la cui deviazione è positiva o negativa, a seconda del verso del campo elettrico, e comporta la variazione della frequenza critica f_0F2 .

Inoltre, ci sono grosse ripercussioni nello strato F della ionosfera, i cui effetti sono principalmente due: i moti turbolenti generati dal campo elettrico anomalo portano alla formazione di onde AGW che danno irregolarità al plasma (*small scale irregularities*) nella regione F, anche col concorso dell'effetto Joule per cui la temperatura degli ioni nella ionosfera aumenta in presenza di un campo elettrico ingente, e la generazione di grosse variazioni di concentrazioni di elettroni (*large scale irregularities*) nella regione F2 (motivo per cui sussistono problemi con metodi di navigazione satellitare, quali GPS), che possono portare ad un fenomeno di variazione della massa media da parte degli ioni.

Il primo effetto è di gran lunga più importante perché va a creare un condotto per le ULF e VLF EME, emesse grazie alle irregolarità del *plasma near ground*, propagatesi verticalmente verso le L-shells della magnetosfera ove interagendo con le particelle lì intrappolate (elettroni e protoni), ne provocano la caduta principalmente nella regione D. Un satellite può osservare le particelle che precipitano come *burst* nel momento in cui attraversa la L-shell interessata dal fenomeno, di solito da 2 a 5 ore prima che si verifichi un terremoto [35], con in particolare riscontri di elettroni di energia ≥ 4 MeV, circa 4 ore prima dell'evento tellurico [36].

Si faccia riferimento allo schema della Figura 1.24 per un sunto di quanto spiegato.

1.6 Principali aspetti fenomenologici dei precursori

La teoria illustrata sembra ad oggi quella più valida e in grado di spiegare il meccanismo di accoppiamento sismo-ionosferico. Vanno però tuttavia individuati alcuni parametri per cui questo meccanismo risulta essere effettivamente valido, tenendo in considerazione che i fenomeni descritti come precursori possono anche avvenire singolarmente non in concomitanza di un evento sismico o essere ricorrenti anche in condizioni normali. Va dunque data una risposta alla domanda: quando un fenomeno registrato come precursore è da ricondursi alla fase di preparazione di un terremoto?

Innanzitutto, calcoli teorici hanno mostrato che il campo elettrico verticale può propagarsi nella ionosfera e creare irregolarità riguardante la concentrazione elettronica solo quando il campo elettrico anomalo copre un'area a terra di almeno circa 200 km di diametro. Utilizzando la formula di Dobrovolsky [37], secondo cui

$$\rho = 10^{0,43M} \quad (1.5)$$

con ρ , raggio della zona di preparazione del terremoto ed M , magnitudo, imponendo $\rho = 100$ km, si ottiene una magnitudo teorica di 4,65. Pertanto, già a livello teorico ci si aspetta che gli effetti nella ionosfera si verifichino solo in presenza di terremoti con magnitudo maggiore a tale soglia.

In secondo luogo, sono stati analizzati 169 terremoti con magnitudo maggiore o uguale a 6, tra il 1994 e il 2000, e si sono considerate tutte le anomalie del plasma riscontrate in un arco di tempo che va da 15 giorni prima a 15 giorni dopo un evento sismico. Una volta contate, è stata eseguita una analisi statistica ed è emerso che la grande maggioranza di anomalie dovute ad un tale evento si concentra nei 5 giorni precedenti al terremoto.

Nella figura 1.25, si nota chiaramente come, pur essendo sempre presente un rumore, sia possibile considerare valida dal punto di vista di eventi precursori riguardanti la densità del plasma la finestra temporale di 5 giorni. In particolare, studi ed analisi statistiche più recenti hanno concluso che per

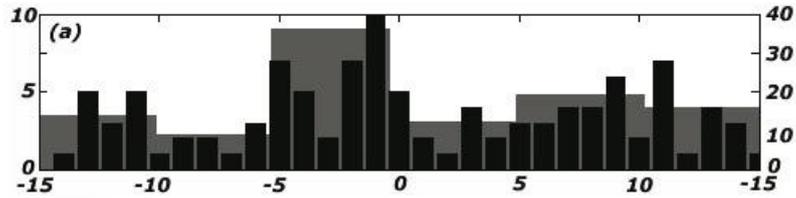


Figura 1.25: Numero di anomalie medie riscontrate nei 169 terremoti analizzati, a partire da 15 giorni prima del terremoto fino a 15 giorni dopo. In nero, gli istogrammi con media giornaliera, in grigio, gli istogrammi con media nel periodo di 5 giorni.

un terremoto di magnitudo maggiore o uguale 6, nei 5 giorni antecedenti la concentrazione delle anomalie dovute a fenomeni precursori avviene nel 100% dei casi, per un terremoto di magnitudo attorno a 5, invece, solo nel 73% dei casi [26].

Oltre a ciò, è stata sperimentalmente notata una certa dipendenza tra alcuni comportamenti dei precursori e l'ora locale [38]. In particolare, si è mostrato che esiste una relazione, non ancora spiegata, tra la variazione di frequenza critica e l'ora in cui è avvenuta: sulla base di 59 terremoti con magnitudo maggiore a 6, si è riscontrato che la deviazione $\Delta f_0 F_2$ oscilla tra un andamento positivo e uno negativo (Figura 1.26).

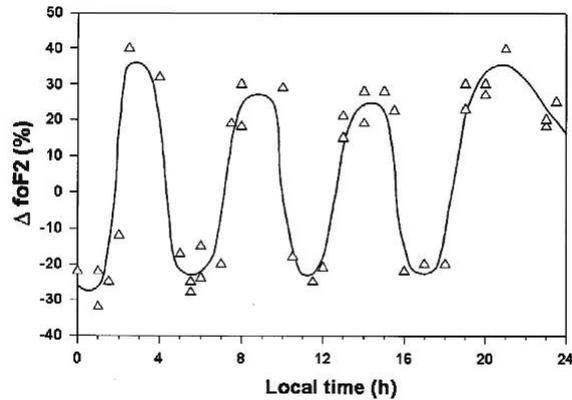


Figura 1.26: Dipendenza della variazione massima della frequenza critica in relazione all'ora locale di rilevamento per i 59 terremoti osservati.

È stato poi dimostrato il *conjugated effect* [39], l'effetto secondo cui, come ci si aspetta, le particelle che precipitano lungo la L-shell, lo fanno in entrambi

i versi della shell: si riscontrano quindi particelle provenienti dalle VAB sia in una zona boreale che in una zona australe. La posizione di un futuro evento sismico pertanto può essere designata riscontrando le anomalie sopra ad una certa zona.

Bisogna specificare che, poiché queste anomalie si possono verificare consistentemente anche 5 giorni prima al terremoto, ci può essere una zona piuttosto vasta affetta da fenomeni precursori: questa area in particolare può distribuirsi in 10° di latitudine e longitudine [34]. Acquisizioni statistiche sempre maggiori di dati relativi a questi fenomeni possono portare ad un miglioramento della precisione nella determinazione delle coordinate di un terremoto. È in corso di studio anche la possibilità di correlare geograficamente le due zone affette da *particle burst* e l'epicentro del terremoto: in particolare, la latitudine dell'epicentro del futuro terremoto corrisponde alla proiezione verticale della L-shell (Figura 1.11) interessata da *burst* sulla superficie terrestre [34], mentre la correlazione con la longitudine è ancora in fase di studio.

Sono stati studiati inoltre gli effetti delle tempeste geomagnetiche nella ionosfera [39], le quali non solo presentano effetti simili a quelli riscontrati precedentemente ad un terremoto, ma addirittura con ordini di grandezza delle variazioni di alcuni parametri, come la concentrazione di ioni, del tutto analoghe. La differenza che ci permette di poter attribuire una variazione ad una causa piuttosto che ad un'altra sta nel fatto che durante le tempeste geomagnetiche, la temperatura degli ioni e degli elettroni in date zone atmosferiche può raggiungere 1000-2000 K, mentre non avviene ciò prima di un terremoto, se non con effetto minimo.

Oltre a ciò, si è notato come la deviazione in concentrazione degli ioni O^+ , NO^+ e O_2^+ durante le fasi precedenti al terremoto sia sempre positiva o negativa per tutti e tre gli ioni, mentre durante tempeste geomagnetiche presenta andamenti tra loro diversi e scorrelati.

Infine è da tener sempre presente che un effetto geomagnetico è su scala globale, un effetto dovuto all'accoppiamento sismo-ionosferico si mantiene solo a livello locale.

Dallo studio di altri terremoti, si è poi riscontrato che, in concomitanza di

un fenomeno sismico, l'altezza critica $h_m F2$ può aumentare da 50 a 150 km, mentre al massimo può variare di 80 km se affetta da tempeste geomagnetiche. È dunque possibile discriminare le variazioni dovute ad un terremoto e quelle dovute a disturbi geomagnetici.

Indagini circa le variazioni periodiche che si verificano nella ionosfera e la possibilità che possano intaccare quindi il rilevamento e la distinzione dei fenomeni precursori ionosferici hanno portato alla conclusione che, in realtà, questi ultimi si presentano in modo ingente da 1 a 5 ore prima del terremoto e che possono comportare variazioni del 100%, al contrario delle variazioni giornaliere che al massimo differiscono del 30%.

La questione circa la generazione di terremoti sottomarini nella crosta oceanica, e quindi il fenomeno relativo a maremoti, è stata trattata di recente, concludendo che la ionizzazione che comporta la formazione del campo elettrico anomalo è sempre generata dal radon, presente lungo la superficie dell'oceano [40].

Altri esperimenti ed in particolare la missione spaziale DEMETER hanno poi portato a stabilire che i comportamenti, positivi o negativi, di effetti ionosferici precursori a terremoti sono simili all'interno di stesse regioni geografiche [26] [30].

Pertanto, in conclusione, è possibile stabilire che effetti che variano la densità del plasma per terremoti di magnitudo $M \geq 5$ sono riscontrabili da 1 a 5 giorni prima di un terremoto, che alcune deviazioni possono avere carattere positivo ma anche negativo (anche a seconda dell'ora locale in cui avviene la misurazione), che la soglia oltre cui gli effetti nella ionosfera sono osservabili è data da una magnitudo di almeno 5. È stato anche notato come l'estensione dell'area della ionosfera che viene interessata da fenomeni precursori, in particolare nella regione F, sia di 40° in latitudine e longitudine rispetto all'epicentro, per terremoti di una certa entità ($M > 6-7$), pur non essendo spesso la variazione massima coincidente con la proiezione verticale dell'epicentro.

Pertanto un buon punto di partenza per una missione spaziale volta allo studio di questo fenomeno deve prevedere un satellite orbitante attorno alla Terra con altitudine compresa tra 500 km e 1000 km, che oscilli tra latitudini

1.6 Principali aspetti fenomenologici dei precursori

$L \leq \pm 40^\circ$ ed in grado di rivelare, tramite la strumentazione nucleare a bordo, elettroni con energie $E_e \sim 5$ MeV e protoni con energie $E_p > 50$ MeV e $E_p < 300$ MeV. Ovviamente, il tempo morto dei rivelatori va minimizzato il più possibile e va ricercata la maggiore accettazione angolare possibile [33], come sarà in seguito chiarito.

Capitolo 2

La missione spaziale CSES-Limadou e la strumentazione nucleare

Introduzione

Questo capitolo tratta argomenti teorici legati alla missione cui questa tesi fa riferimento. Si accendono all'inizio i riflettori pertanto sulla missione stessa, con una presentazione nella prima Sezione di questo capitolo, e sul satellite CSES che avrà il ruolo di ospitare tutta la strumentazione.

Uno degli strumenti più importanti a bordo, e l'unico di realizzazione esclusivamente italiana, è il rivelatore HEPD, il vero protagonista di questa tesi, che verrà descritto nella Sezione 2.2, con una focalizzazione sulle varie parti di cui è composta.

Nella terza Sezione vengono presentate delle nozioni di fisica dell'interazione tra radiazione e materia e di fisica della strumentazione per la rivelazione di radiazioni, con cenni ai rivelatori adoperati nella missione e una parte riguardante due caratteristiche importanti per un rivelatore: la risoluzione energetica e l'accettanza.

Infine ci sarà un veloce *excursus* su alcune missioni analoghe a quella qui presentata (Sezione 2.4), per terminare questo capitolo con alcune foto del

rivelatore HEPD creato (Sezione 2.5).

2.1 La missione spaziale CSES-Limadou

La missione spaziale CSES-Limadou, che verrà svolta dal satellite cinese CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) a partire da Settembre 2016, data prevista per il lancio nello spazio, avrà come compito per 5 anni lo studio dei fenomeni di natura elettromagnetica correlati con l'attività geofisica, nell'ottica di un monitoraggio dei terremoti. Il nome Limadou è stato assegnato in onore a Matteo Ricci, missionario italiano andato in Cina nel sedicesimo secolo (Limadou è la translitterazione in cinese mandarino).

La missione è frutto di una collaborazione tra CNSA (China National Space Agency) e ASI (Agenzia Spaziale Italiana) che hanno firmato un protocollo intesa nel 2011, a seguito della dichiarazione congiunta sulla cooperazione spaziale siglata dai governi cinese ed italiano nel 2006, ed un memorandum nel 2013. Essa prevede inoltre la partecipazione di numerosi altri enti universitari e di ricerca, quali INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), INAF-IAPS (Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali) e INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) ed è il punto di incontro di numerose altre ricerche congiunte tra enti dei due paesi, come ad esempio le precedenti con CEA (China Earthquake Administration), CSA (Chinese Space Academy) e CDI (Crustal Dynamics Institute). L'INFN inoltre ha già effettuato in passato una missione preparatoria che ha portato all'installazione di un dimostratore tecnologico sulla ISS, chiamato LAZIO-Sirad.

Lo scopo della missione CSES-Limadou è quello di cercare possibili correlazioni spazio-temporali che colleghino la variazioni di grandezze fisiche, tipicamente osservabili dallo spazio, all'avvento di terremoti di grande intensità, nonché di studiare i meccanismi alla base di queste correlazioni e investigare nuovi approcci metodologici per la predizione a breve termine di fenomeni tellurici.

Un altro obiettivo di questa missione sarà quello legato al coordinamento e rafforzamento del sistema di monitoraggio terrestre con quello satellitare e all'ottenimento di riscontri più precisi circa la localizzazione dell'epicentro

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

del terremoto a seguito di *bursts* rilevati, in particolare per fenomeni tellurici di magnitudo $M \geq 6$ su scala locale e $M \geq 7$ su scala globale. Una possibile utilità della missione potrà essere riscontrata anche nello studio dello *space weather*, cioè nello studio delle condizioni ambientali nello spazio.

Il successo del programma CSES potrebbe aprire poi la strada alla realizzazione di una serie di satelliti dotati di questo tipo di sensori, in vista della creazione di una costellazione satellitare e di un sistema di coordinamento tra le misure spaziali e terrestri destinato alla prevenzione degli effetti dei terremoti e di altri tipi di catastrofi naturali.

Le responsabilità dell'ASI in questa missione prevedono, tra le altre, la realizzazione di un rivelatore di particelle energetiche denominato High Energetic Particle Detector (HEPD). Un rivelatore più piccolo, a responsabilità cinese, (LEPD, Low Energy Particle Detector) completerà la copertura energetica ed angolare di HEPD in modo da rispondere a tutte le specifiche del progetto.

2.1.1 Il satellite CSES

Il satellite CSES è basato sulla piattaforma cinese CAST2000, dotata di sistemi di stabilizzazione per tutti e 3 gli assi, il cui *payload*, il carico utile, è composto da una serie di strumenti scientifici, tra cui il rivelatore HEPD, un rivelatore LEPD ed un EFD (Electric Field Detector), una serie di unità di controllo termico e di pre-processamento di dati a bordo, oltre che di telemetria e di memoria dati (di circa 160 Gbit). È previsto anche un sistema di propulsione per il mantenimento dell'orbita che consta di 4 propulsori. Le unità di alimentazione presenti sono fornite da batterie agli ioni di Litio (Li-ion) e da pannelli solari fotovoltaici e devono erogare una potenza di circa 330 W per il funzionamento della piattaforma e del payload. Il peso totale dell'intero satellite si aggira attorno a 700 kg.

L'orbita seguita dal satellite sarà quasi eliosincrona, ovvero sorvolerà ogni punto sempre all'incirca alla stessa ora solare locale, ed è posta a circa 507 km di altitudine con un'inclinazione orbitale di $97,4^\circ$ ed un periodo di circa

2.1 La missione spaziale CSES-Limadou

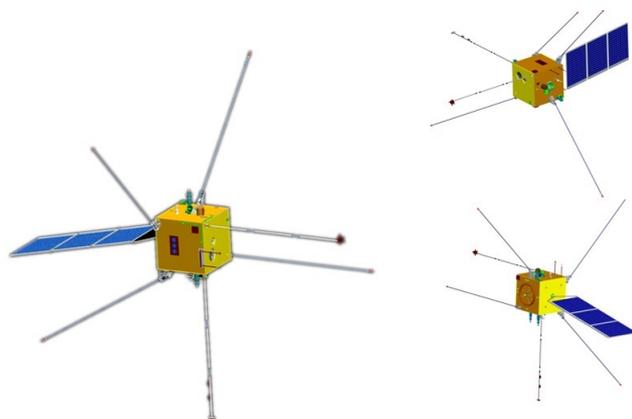


Figura 2.1: La piattaforma CAST 2000 nella versione utilizzata per CSES.

94 minuti tale che esegua poco più di 15 orbite al giorno. Una stessa orbita si ripete ogni 5 giorni.

Poiché l'inclinazione non è precisamente di 90° , a seconda della latitudine l'ora locale varia ed in particolare si presenta come in Figura 2.4.

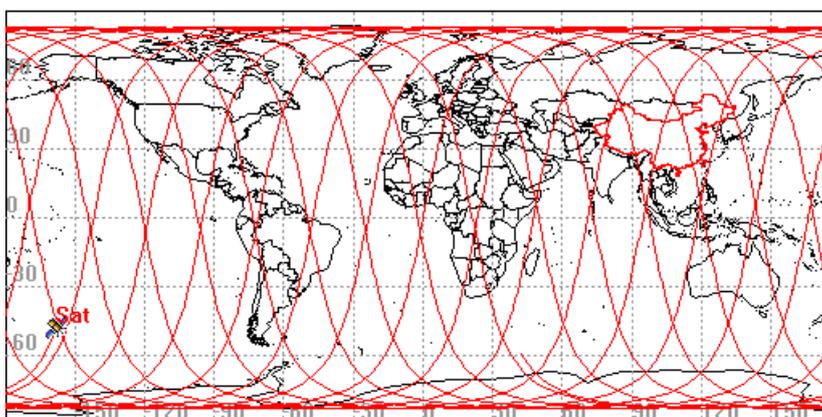


Figura 2.2: Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in 1 giorno.

Dalle Figure 2.2 e 2.3, che mostrano le orbite percorse dal satellite in un giorno ed in 5 giorni, si può facilmente comprendere come il satellite riesca a coprire gran parte della superficie terrestre e quindi ad individuare con alta probabilità i fenomeni interessati, che si ricordano essere per la maggior parte entro 5 giorni da un evento sismico di magnitudo $M > 5$. La distanza tra due

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

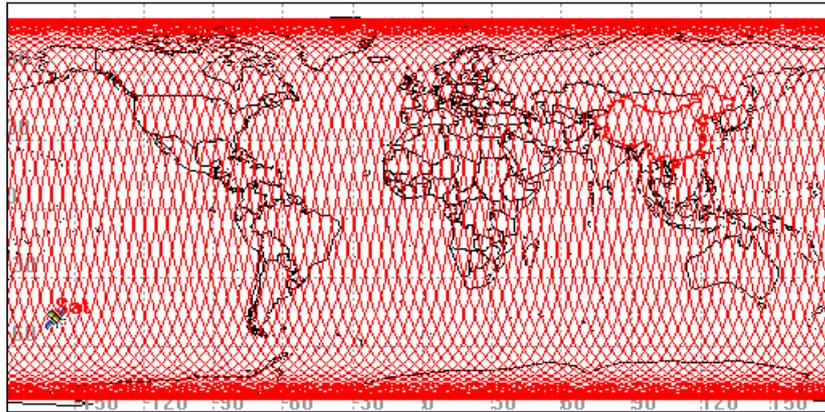


Figura 2.3: Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in 5 giorni.

passaggi contigui è di circa 2650 km, mentre quella rilevata tenendo conto di tutti i passaggi in 5 giorni è di circa 530 km.

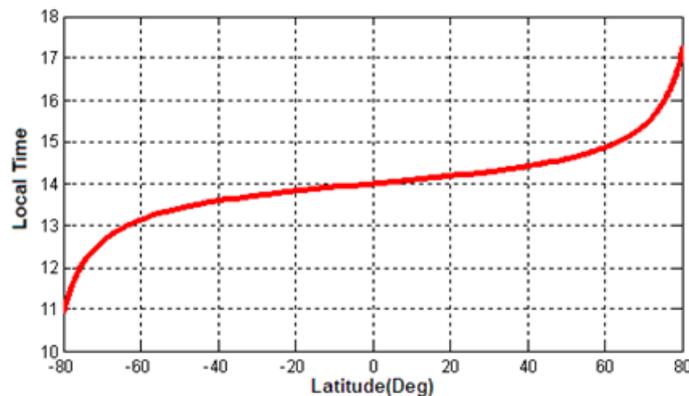


Figura 2.4: Ora locale in relazione alla latitudine a cui passa il satellite.

La struttura esterna del satellite, di colore giallo nelle Figure 2.1 e 2.5, è sostanzialmente cubica ($1427,2\text{mm} \times 1451,2\text{mm} \times 1441,6\text{mm}$) ma una volta avvenuta l'apertura di tutti gli apparati in orbita, la lunghezza massima che avrà il satellite sarà attorno ai 10 metri, considerando i pannelli spiegati e le antenne aperte. Il satellite è inoltre ricoperto da un isolante termico in configurazione MLI (*multi layer insulation*) [41].

Una considerazione va aggiunta circa la modalità funzionamento: col fine di assicurare la buona operatività, tutti i sistemi che possono indurre interfe-

2.1 La missione spaziale CSES-Limadou

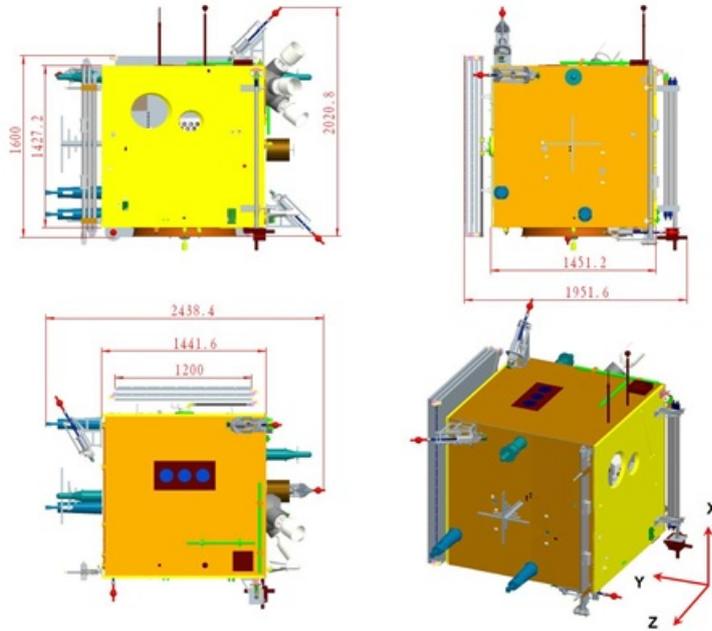


Figura 2.5: La struttura del satellite.

renza vengono sospesi (ad esempio, la rotazione dei pannelli fotovoltaici e il sistema di propulsione) mentre il *payload* è in funzione. Pertanto si divide il funzionamento del satellite in due zone: una di *payload working zone* ($-65^\circ < \text{latitudine} < 65^\circ$) i cui confini sono illustrati in Figura 2.6 (in colore verde), in cui la strumentazione è attiva, e una di *platform adjustment zone* (latitudine $> 65^\circ$ o $< -65^\circ$), dove il *payload* smette di funzionare e sistemi come propulsori e stabilizzatori sono attivati. Si fa presente che questa linea è adottata in generale da tutti i sistemi satellitari che prevedono strumentazione a bordo. Alcuni sistemi come ad esempio il GPS saranno invece sempre attivi.

I flussi di particelle in condizioni normali che ci si aspettano riscontrati nella missione, considerando raggi cosmici e particelle che precipitano dalle VAB, sono di circa $10^2 - 10^3$ elettroni al secondo, in un range energetico che va da 2,5 MeV a 100 MeV, mentre di circa 2-3 ordini di grandezza in meno per protoni in un range energetico che va da 30 a 200 MeV, a latitudini comprese tra i valori sopra indicati. Si noti infine l'enorme variazione nella *data rate* che si prospetta sopra la SAA (Figura 2.7) e che pregiudica qualsiasi volontà di tener conto di tali dati rilevati.

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

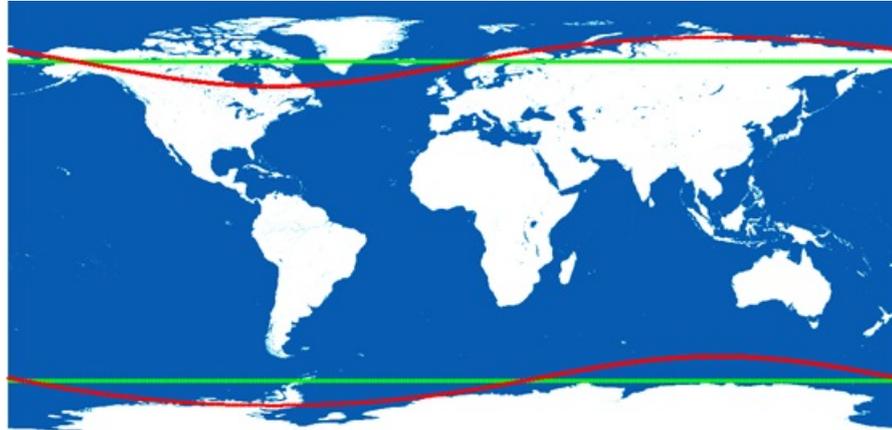


Figura 2.6: In *verde*, i bordi che delimitano la regione tra $+65^\circ$ e -65° di latitudine. In *rosso*, i bordi che delimitano la latitudine coperta da CSES con *payload* attivo.

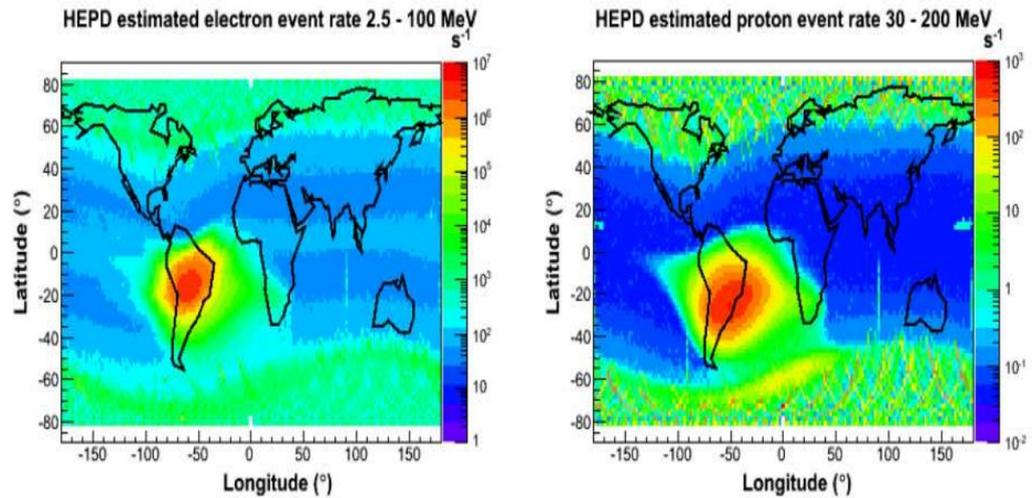


Figura 2.7: Flussi di particelle stimati per la missione CSES-Limadou in relazione alla posizione geografica e del range energetico.

2.1 La missione spaziale CSES-Limadou

A seconda che la frequenza di rilevamento dei dati sia desiderata molto elevata, il payload potrà operare in modalità *burst* oppure *survey*: quando il satellite sorvolerà la Cina e le regioni caratterizzate da un'elevata attività sismica (in colore verde nella Figura 2.8), area che comprende anche l'Italia, tutta la strumentazione del payload sarà in modalità *burst*; in tutti gli altri casi opererà in modalità *survey*. Il territorio sorvolato in modalità "burst" corrisponde a circa 2/5 del territorio mondiale.

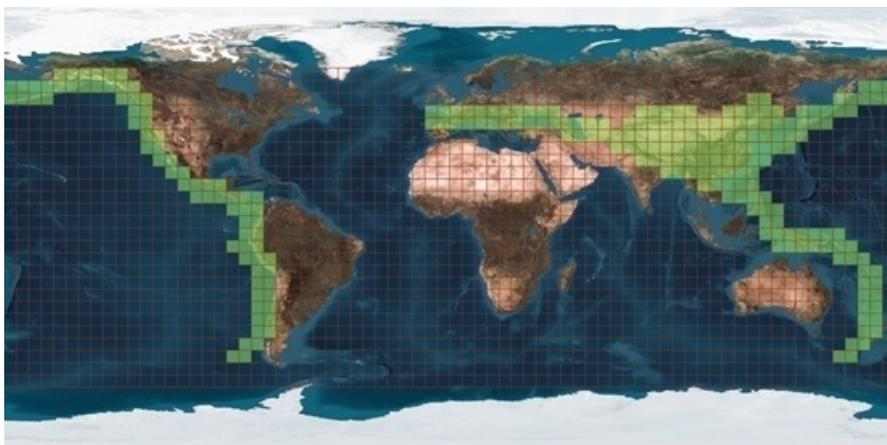


Figura 2.8: Area di riferimento monitorata in modalità burst.

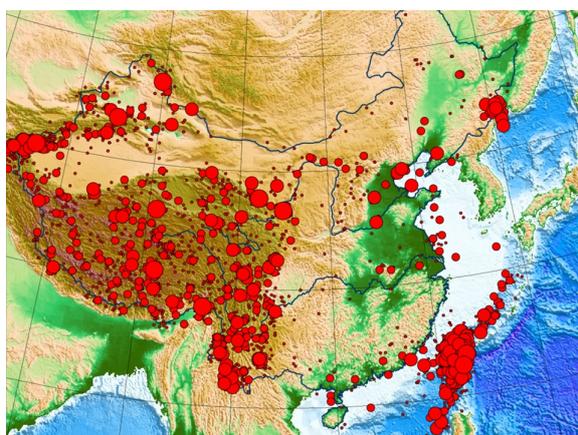


Figura 2.9: Distribuzione di terremoti con magnitudine $M > 5$ tra il 1900 e il 2008 sul suolo cinese.

Il *payload* ha una banda X di trasmissione dei dati e, per rendere il monitoraggio del territorio cinese più veloce e preciso, sono state installate 5 stazioni che raccolgono dati a terra in tempo reale (Figura 2.10).

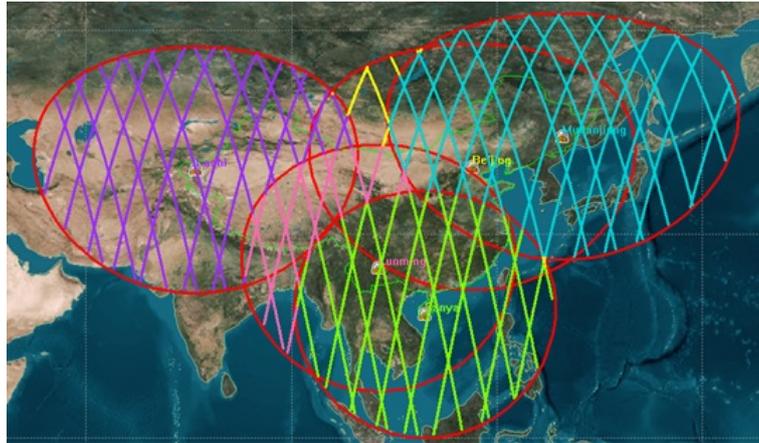


Figura 2.10: Stazioni di raccolta dati a terra sul suolo cinese.

La strumentazione a bordo di CSES è sensibile a tutta la radiazione presente, quale raggi cosmici e altre particelle energetiche associate a fenomeni come i *solar flares* e CME, e non solo a quella proveniente dalle particelle che precipitano dalla magnetosfera. Ecco la necessità di una analisi accurata dei dati per comprendere compiutamente la provenienza dei segnali rilevati dagli strumenti e paragonarli col fondo riscontrato.

2.2 Il rivelatore HEPD

Il rivelatore di particelle HEPD installato a bordo ha lo scopo di identificare il tipo di particella (protone, elettrone) con un'efficienza di almeno il 90%, fornire una misura della direzione e verso di provenienza della particella in modo da potere stabilire l'angolo tra la sua traiettoria ed il campo magnetico terrestre (il *pitch angle*), avere un'*accettanza angolare* (che verrà descritta più avanti in questo capitolo) estesa per almeno 70° del *pitch angle* (in base alle specifiche richieste dalla CNSA), e di rivelare l'energia delle particelle.

L'obiettivo è quello di correlare le particelle misurate con le fasce di Van Allen e quindi di determinare con la massima accuratezza la regione ma-

2.2 Il rivelatore HEPD

gnetosferica di provenienza, col fine di ottenere lo spettro energetico e la composizione delle particelle delle fasce da cui precipitano improvvisamente nell'atmosfera (il fenomeno detto *burst*). Per raggiungere il risultato migliore è necessario avere la massima accettazione geometrica a parità di peso e potenza assorbita.

Il rivelatore di particelle in questa missione spaziale ad alta energia ha pertanto il compito di studiare elettroni in un range energetico compreso tra 3 e 200 MeV, e protoni in un range energetico compreso tra 30 e 300 MeV; la scatola che lo contiene è collocata allo zenith del satellite. Ha inoltre un peso di circa 38 kg (inclusa l'elettronica), necessita di una potenza di 43 W e garantisce la sua operatività tra -10°C e $+45^{\circ}\text{C}$.

Nel corso della descrizione del rivelatore, verrà inteso come asse Z, quello che durante la fase di funzionamento della missione punterà verso il centro della Terra e quindi parallelo alla linea di campo geomagnetico, come asse X, quello che una volta in fase di volo sarà diretto come il vettore velocità del satellite, e come asse Y, quello perpendicolare ad entrambi gli altri assi (Figura 2.11).

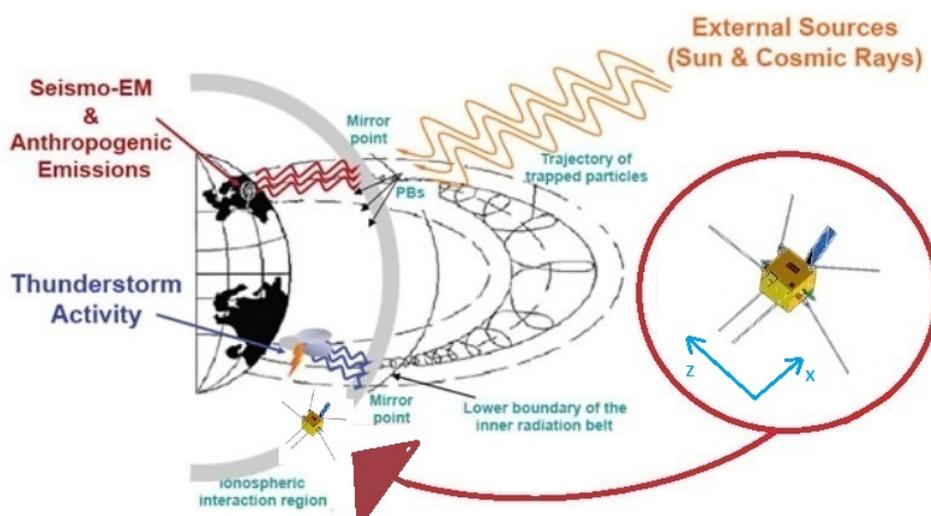


Figura 2.11: Locazione del satellite e degli assi.

Il rivelatore HEPD è organizzato in vari layer sensibili alla radiazione e in ordine si presenta (Figura 2.15), in vista X-Y, con 2 piani di semiconduttori

al silicio adibiti a *Tracker*, due piani di scintillatori plastici adibiti a *Trigger* e una serie di 15 piani di scintillatori plastici che assieme ad un blocco di LYSO (uno scintillatore inorganico) posto alla base, formano il calorimetro. Questo rivelatore verrà posto parallelo all'asse Z di riferimento, pertanto si intenderà d'ora in poi una struttura verticale, con la radiazione che interagisce dall'alto con la serie di piani sopra menzionati: i 15 piani di scintillatori plastici del calorimetro formano pertanto una sorta di torre. Il calorimetro è poi circondato da un altro scintillatore plastico che prende il nome di VETO. Tutti questi segmenti del rivelatore verranno poi spiegati in seguito.

L'involucro che contiene il rivelatore HEPD (Figura 2.18) è in fibra di carbonio (CF honeycomb) e Nomex (un materiale ad alta resistività termica), mentre l'intera scatola contenente anche l'elettronica e la power supply è in alluminio (in Figura 2.12, in azzurro); in particolare sono costituiti da pannelli in alluminio con struttura alveolare (*aluminium honeycomb*). La superficie esterna è inoltre coperta da uno strato in poliimmide sottoposto ad alluminizzazione che ne assicura l'isolamento termico (in figura 2.12, in arancio). Uno strato di fibra di vetro è posto poi sotto ogni piedino della base di alluminio sempre per isolare e viene inoltre posto del kapton ai sostegni dell'elettronica attaccata ai semiconduttori per motivi analoghi.

La funzione di isolante termico per la finestra da cui penetrano le particelle è svolta da uno strato immediatamente successivo in mylar che agisce da *space blanket* (Figura 2.12), riflettendo quindi il calore che proviene tramite irraggiamento e la luce esterna che diversamente interagirebbe coi piani di Tracker. Il mylar viene utilizzato grazie alla sua alta resistenza in ambienti ostili come quello spaziale. La piattaforma base in alluminio (*base plate aluminium*, Figura 2.14) su cui poggiano le strutture di supporto del rivelatore, del sistema elettronico e della *power supply* (Figure 2.13 e 2.14) è montata sulla base interna del satellite tramite 8 viti.

Gli scintillatori sono organizzati verticalmente a formare una torre, come si vede in Figura 2.17, e sono separati da varie croci di sostegno in fibra di carbonio (in Figura 2.17, in arancio), che ha un'elevata resistenza meccanica, un'alta resistenza a sollecitazioni termiche oltre che una bassa densità che non appesantisce la struttura; oltre alle croci in fibra di carbonio, sono

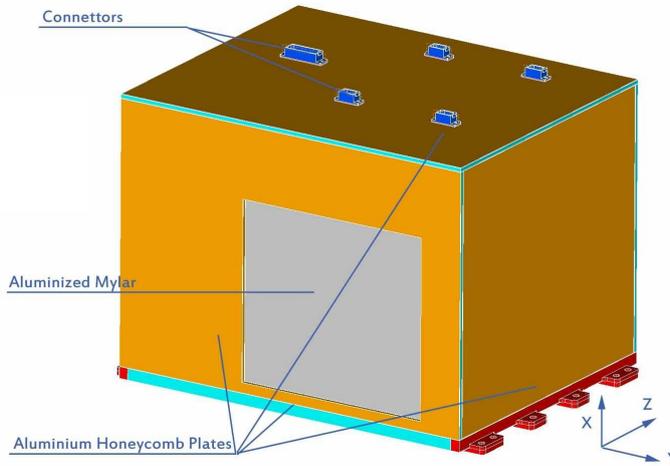


Figura 2.12: La scatola contenente il rivelatore e le sue unità.

presenti attaccate ad esse croci in poron (in Figura, in giallo), un materiale con un'eccellente resistenza a sforzi meccanici, soprattutto di compressione. In mezzo 4 lati dello scintillatore sono presente 4 cuscinetti, uno per lato, in poron con al di sopra delle costole in fibra di carbonio (*Mechanical Supporting Frame*, Figura 2.17), cui sono attaccate le croci in fibra di carbonio.

Gli scintillatori che compongono il VETO (Figura 2.18) che circonda completamente il rivelatore sono racchiusi da uno strato interno in fibra di carbonio (a contatto con le costole), uno in poron a contatto con quello in fibra di carbonio, ed uno esterno sempre in poron.

La dimensione finale del rivelatore HEPD sarà di circa 20 cm di larghezza per 20 cm di altezza per uno spessore di circa 40 cm.

Tutta la struttura è tenuta insieme da dei sostegni in fibra di carbonio entro cui sono fissate delle vite di ancoraggio.

2.2.1 Il Tracker

Il Tracker consta di 2 rivelatori a semiconduttore al silicio, entrambi larghi 213,2 mm e alti 214,8 mm, spessi circa 300 μm , posti ad una distanza di 10 mm l'uno dall'altro. Ognuno dei due piani di Tracker è costituito da 3 diverse parti (i *ladders*) (Figura 2.13) larghe 213,2 mm e alte 71,6 mm, ognuna

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

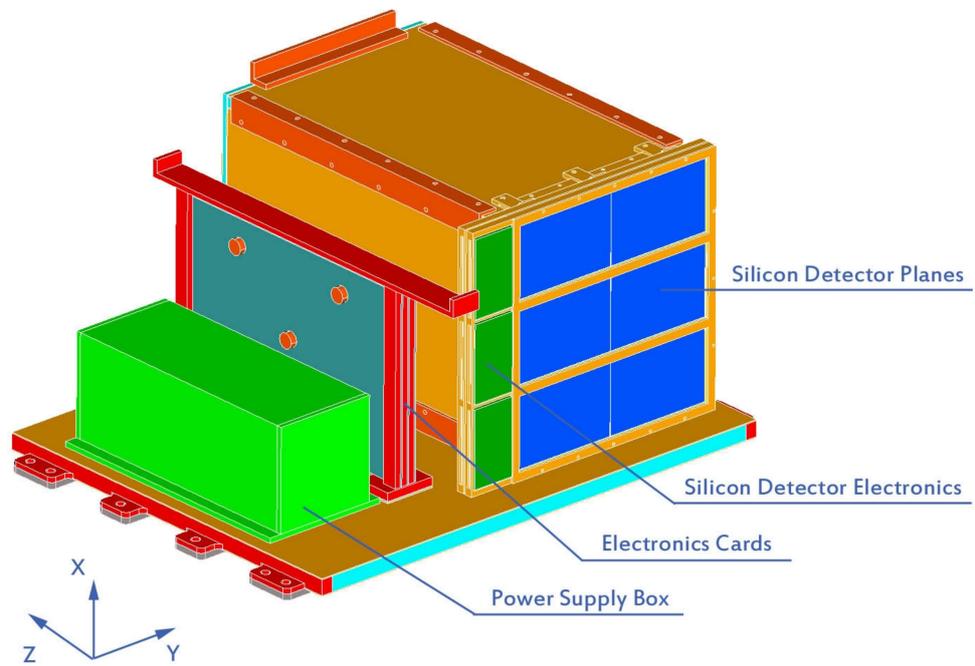


Figura 2.13: L'interno della scatola del satellite contenente il rivelatore HEPD con le relative *power box* ed *electronic box*.

2.2 Il rivelatore HEPD

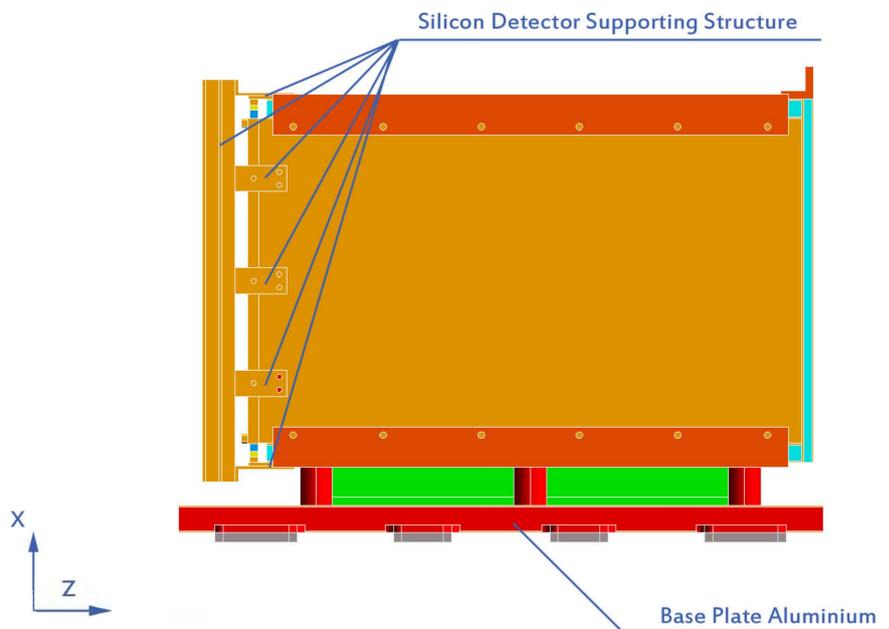


Figura 2.14: Profilo laterale del rivelatore HEPD.

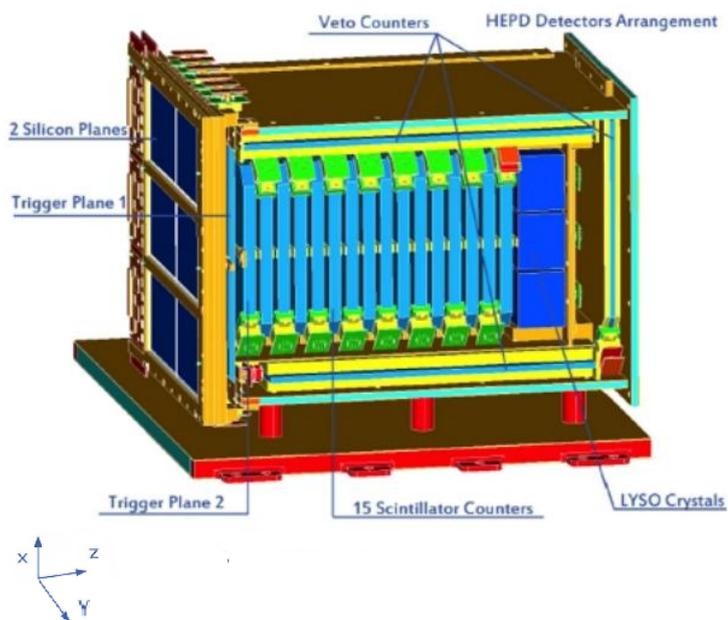


Figura 2.15: Il rivelatore HEPD e i vari piani che lo compongono.

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

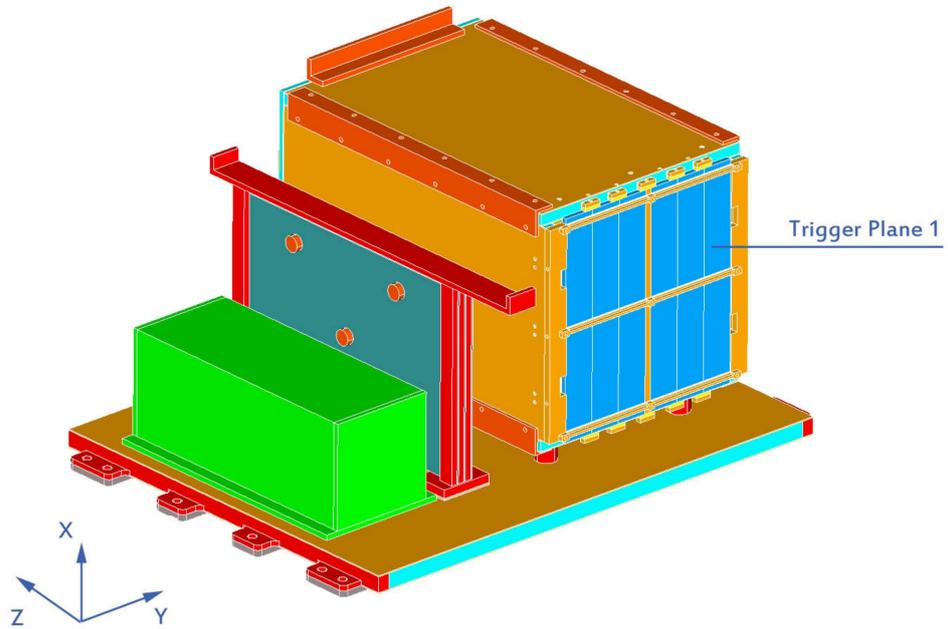


Figura 2.16: L'interno della scatola del satellite privo sei piani di semiconduttori al silicio.

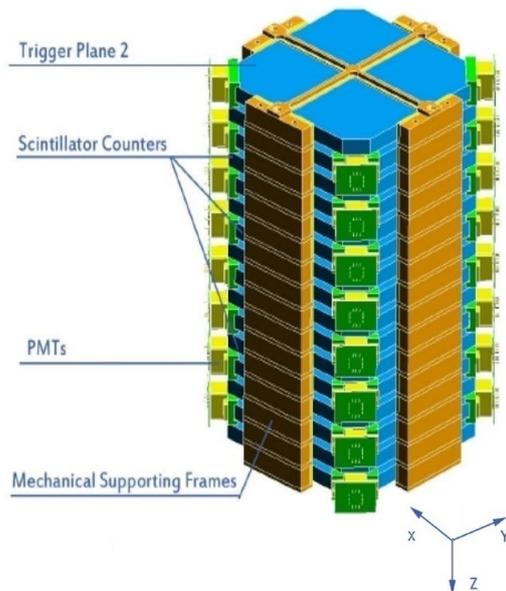


Figura 2.17: Secondo piano di Trigger e torre di scintillatori: si noti la disposizione sfalsata dei fotomoltiplicatori.

2.2 Il rivelatore HEPD

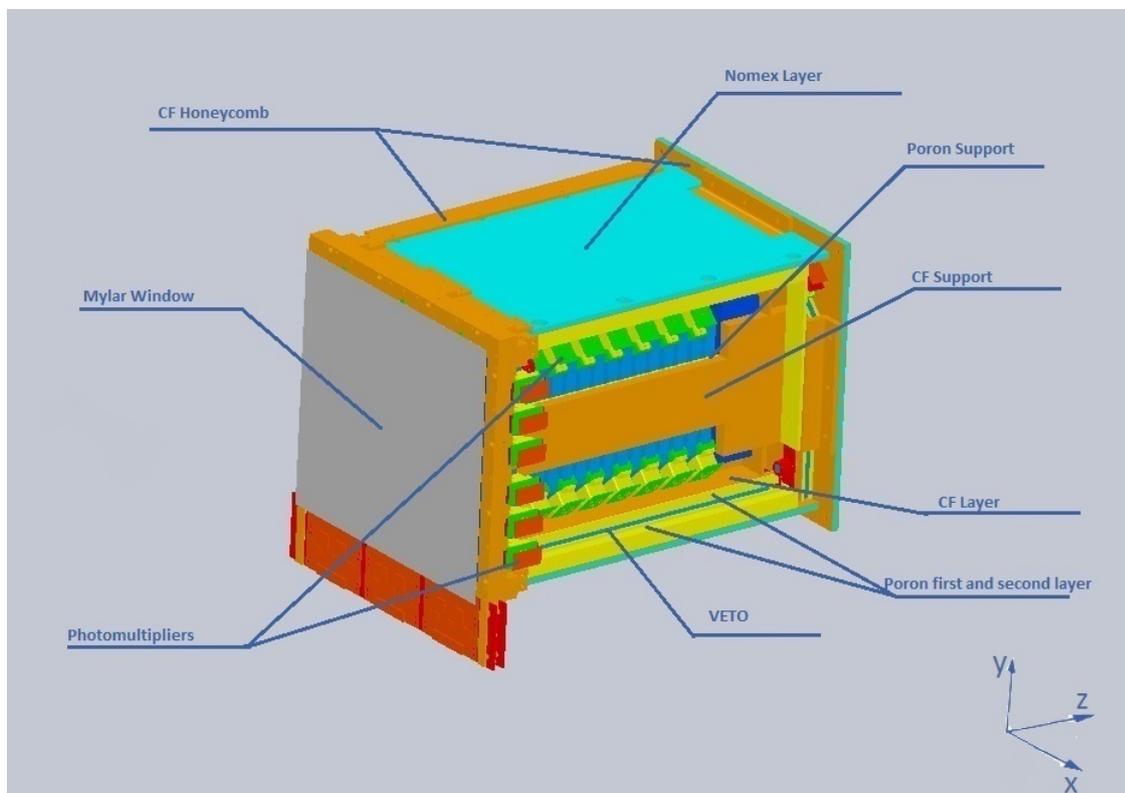


Figura 2.18: Il rivelatore HEPD con tutti i sostegni e le sezioni che lo compongono.

composta da due moduli, larghi 106,6 mm e alti 71,6 mm. Il Tracker è collocato nella parte superiore del rivelatore stesso, da cui entrano le particelle, e quindi è il primo rivelatore soggetto ad interazione con la radiazione.

Ogni singolo modulo viene letto da 12 chip (VLSI), per un totale di 72 chip. I due rivelatori al silicio sono posti in un supporto rigido in fibra di carbonio, poron e kapton che sostiene l'elettronica associata (Figura 2.13). Il motivo per cui sono stati utilizzati rivelatori a semiconduttore è da ricondursi alla loro alta risoluzione, alla possibilità di averli segmentati e alla loro velocità di lettura.

In particolare, nella missione CSES-Limadou hanno il compito di fornire la direzione di provenienza e l'angolo di incidenza delle particelle rivelate e ha un ruolo importante nella discriminazione del tipo di particella (come si vede nel Capitolo 4).

2.2.2 Il Trigger

Il Trigger è formato da due diversi scintillatori plastici la cui lettura è affidata a dei fotomoltiplicatori. Il primo piano, S1, è largo 200 mm, alto 180 mm e spesso 5 mm ed è segmentato in 6 diversi pannelli ($200 \times 30 \times 5 \text{ mm}^3$) ognuno dei quali ha attaccati due fotomoltiplicatori; il secondo, S2, costituito da un solo scintillatore largo e alto 150 mm con uno spessore di 10 mm, è collocato immediatamente sopra alla torre di scintillatori ed è a sua volta uno scintillatore del tutto uguale a quelli del calorimetro (largo e alto 150 mm con uno spessore di 10 mm). Anche quest'ultimo viene letto da due fotomoltiplicatori, connessi in due angoli opposti. Il numero totale di canali per i fotomoltiplicatori è di 14 quindi.

La totalità del Trigger, nell'ambito della missione CSES-Limadou, sarà impiegata per determinare i tempi di volo (TOF) delle particelle, cioè il tempo impiegato da esse nel percorrere una certa distanza, in questo caso i due piani di Trigger appunto.

2.2.3 Il Calorimetro

I 15 scintillatori plastici del calorimetro sono larghi e alti 150 mm ed hanno uno spessore di 1 cm, inoltre presentano gli angoli tagliati per lasciare il posto ai fotomoltiplicatori, 2 per ogni piano di scintillatore, montati su due angoli opposti con una configurazione che si ripete ogni altro scintillatore (Figura 2.17). Saranno presenti quindi 30 fotomoltiplicatori in totale.

Il LYSO (lutetium-yttrium oxyorthosilicate) al fondo della torre e del rivelatore (Figura 2.15) è composto da una matrice 3×3 blocchi di scintillatore inorganico per un volume totale di $(150 \times 150 \times 40) \text{ mm}^3$; ogni blocco, esclusi gli apparati meccanici, misura $(48 \times 48 \times 40) \text{ mm}^3$. Ad ognuno dei blocchi è connesso un fotomoltiplicatore, per un totale di 9. Il compito del LYSO, composto di un materiale più denso rispetto allo scintillatore plastico, è quello di aumentare il range energetico rilevabile dallo strumento. Ogni blocco di LYSO è ricoperto da uno strato sottile di Teflon con lo scopo di migliorarne la resa ottica [42]. Ai blocchi di LYSO è attaccata al fondo una piastra in fibra di carbonio con dei fori per lasciare spazio ai relativi fotomoltiplicatori, posti sopra ai vari layer che racchiudono il VETO in fondo, alla base.

2.2.4 VETO

Il VETO è formato da dei piani di scintillatori plastici (Figura 2.17). Quelli posti sul lato parallelo all'asse X hanno una larghezza di 199,72 mm, un'altezza di 5 mm e uno spessore di 322,40 mm. Quelli posti sul lato parallelo all'asse Y hanno una larghezza di 5 mm, un'altezza di 170 mm ed uno spessore di 322,40 mm. Quello posto sul fondo è largo e alto 150 mm con uno spessore di 5 mm. Per ogni piano sono predisposti due fotomoltiplicatori, per un totale di 10. La funzione del VETO è quella di *anticoincidenza*: se infatti verrà rilevato un evento con un'interazione nel VETO, l'evento sarà scartato, andando quindi a rimuovere tutte le particelle che entrano lateralmente e dal fondo, oltre a tutte quelle che non rilasciano l'intera energia all'interno del rivelatore (o perché escono lateralmente, o perché talmente energetiche da uscire dal fondo): altrimenti non si avrebbe modo di rivelare l'energia della particella incidente.

2.3 Cenni di fisica delle misure e della strumentazione nucleari

Questa sezione si propone il fine di trattare l'argomento delle misure e della strumentazione nucleari, fornendo gli elementi sufficienti di fisica e le nozioni fondamentali dell'interazione tra radiazione e materia, e quindi dei sistemi di misurazione, come base per la comprensione a fondo del Capitolo 4.

2.3.1 Interazione radiazione-materia

La radiazione, sia di natura elettricamente carica (particelle α , particelle β^+ , particelle β^- , ed altre particelle cariche), sia di natura neutra (radiazione X, radiazione γ , altri fotoni, neutroni), interagisce con la materia. Si distinguono i tipi di interazione a seconda che si tratti di una particella carica pesante, un elettrone veloce, un fotone oppure un neutrone. La radiazione che interagisce con la materia lo fa tramite reazioni con elettroni orbitali, oppure nuclei e nucleoni, o infine col campo elettrico nucleare.

Le particelle cariche pesanti, come le particelle α (nuclei di 4He), ma anche protoni e ioni, interagiscono prima di tutto tramite la forza di Coulomb F_C che si instaura tra la loro carica e la carica negativa degli elettroni orbitali presenti negli atomi del mezzo assorbitore:

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

con ϵ_0 , costante dielettrica nel vuoto, q_i , le cariche in gioco, ed r , la distanza tra le due cariche.

È inoltre possibile l'interazione coi nuclei, come nel caso dello scattering Rutherford, ma è un caso molto raro. L'interazione con gli elettroni atomici, a seconda dell'energia che viene scambiata, può dar luogo a fenomeni di ionizzazione (cioè rimozione dell'elettrone dall'atomo) oppure di eccitazione (promuovendo l'elettrone in un orbitale più energetico): l'energia fornita per

tali processi è a spese della particella interagente che dunque vedrà ridurre la propria velocità, ed è al massimo:

$$E_{max} = \frac{4Em_0}{m} \quad (2.2)$$

con E e m , energia cinetica e massa della particella interagente, m_0 , massa dell'elettrone. Il risultato di questa interazione sarà una coppia di ioni nel caso avvenga ionizzazione, il cui elettrone se sufficientemente energetico può ancora creare ionizzazione (raggio δ), oppure un atomo eccitato, nel caso avvenga eccitazione. A causa del basso valore di E_{max} , tenute conto le differenze delle masse in gioco (la massa dell'elettrone è circa 1800 volte inferiore a quella di un protone e 7300 volte inferiore a quella di una particella α), è chiaro che sarà molto grande il numero di interazioni per queste particelle.

La perdita di energia lungo un percorso, ovvero lo *stopping power* S per un tale tipo di particella, è data dalla formula di Bethe:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \quad (2.3)$$

con e , carica elettronica, z , carica della particella incidente, m_0 , massa a riposo dell'elettrone, v , velocità della particella, N , densità atomica del mezzo, B , parametro contenente correzioni relativistiche e dipendente da Z , numero atomico medio, oltre che da m_0 , da v^2 e dal reciproco di I , potenziale medio di ionizzazione ed eccitazione.

A parità di energia cinetica, quindi, le particelle tendono a perdere energia lungo il percorso in dipendenza dalla loro carica: particelle con carica maggiore hanno una perdita di energia specifica maggiore.

Ad un maggiore numero atomico e una maggiore densità del materiale del mezzo assorbitore corrisponde un maggior stopping power.

La Figura 2.19 mostra come oltre una certa energia, lo stopping power per tutte le particelle abbia un andamento circa costante e si parla pertanto di *punto di minima ionizzazione* MIP; inoltre mostra la differenza circa i poteri frenanti di elettroni e protoni: su tale differenza si basa il metodo di discriminazione tra le due particelle del rivelatore HEPD.

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

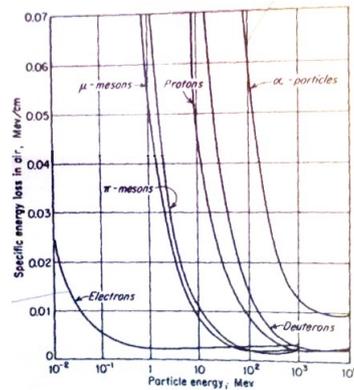


Figura 2.19: Differenze di perdita di energia specifica in relazione all'energia della particella, per vari tipi di particelle. Si noti il punto di minima ionizzazione.

La formula di Bethe fallisce alle basse energie dove iniziano ad essere consistenti processi continui di cattura e perdita di elettroni.

Un andamento dell'energia specifica persa lungo il tragitto è data dalla curva di Bragg (Figura 2.20), in cui si mostra che la maggior dell'energia persa questo tipo di particella avviene verso la fine del tragitto (picco di Bragg), dove avviene un massiccio fenomeno di *pick up* di elettroni, coi quali si lega.

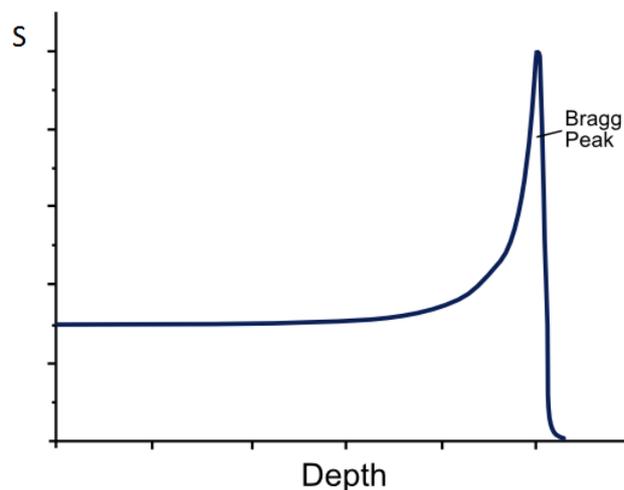


Figura 2.20: Potere frenante di una particella carica pesante in relazione alla profondità del mezzo attraversato.

Per quanto riguarda il range di queste particelle (Figura 2.21), si può

2.3 Cenni di fisica delle misure e della strumentazione nucleari

affermare che per bassi spessori l'unico effetto sarà una perdita di energia, tenendo in considerazione che hanno un tragitto piuttosto rettilineo pur essendo fortemente assorbite dal mezzo; con l'aumentare dello spessore oltre una certa soglia si assiste invece ad una attenuazione nel numero di particelle che penetrano in un mezzo attenuatore, poiché trattenute nello spessore percorso, fino ad avere un valore nullo.

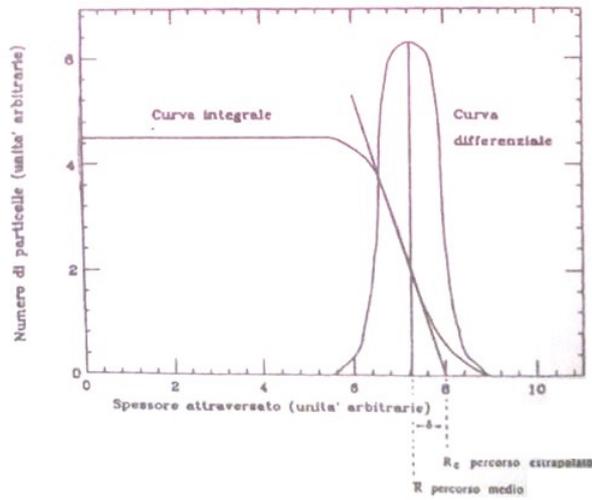


Figura 2.21: Curva integrale e curva differenziale del numero di particelle cariche pesanti attenuate con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbente.

A causa dello *straggling*, fenomeno di natura aleatoria per cui due particelle di carica ed energia uguale possono non avere lo stesso range, si effettua una distinzione tra *range medio*, profondità alla quale viene contato il 50% delle particelle incidenti, e *range extrapolato*, punto dato dall'intersezione della tangente alla curva integrale nel punto di massima pendenza con l'asse delle ascisse.

Gli elettroni veloci sono invece caratterizzati da un cammino più erratico rispetto a quello delle particelle cariche pesanti, venendo deflesse per collisione con estrema facilità dagli elettroni orbitali del mezzo con cui interagiscono. È inoltre possibile che la direzione dell'elettrone sia variata da un'interazione

elettrone-nucleo. Si può dimostrare che nell'urto elastico di due particelle, l'energia cinetica trasferita che deflette la particella di un angolo θ è pari a:

$$E_r = \frac{4mM}{(M + m^2)} T_{inc} \cos^2(\theta) \quad (2.4)$$

con m , massa dell'elettrone incidente, M , massa del bersaglio, T_{inc} , energia cinetica dell'elettrone incidente.

Oltre all'interazione coulombiana, gli elettroni possono perdere energia tramite un processo di irraggiamento di radiazione elettromagnetica che prende il nome di *bremsstrahlung* o *radiazione di frenamento*, per cui ad una accelerazione (decelerazione, in questo caso) corrisponde dell'energia irraggiata sotto forma di onde elettromagnetiche. Questo processo radiativo ha un potere frenante che dipende dal reciproco del quadrato della massa della particella interagente, e pertanto è del tutto trascurabile per particelle cariche pesanti. Il rapporto tra perdite di energia per frenamento e per ionizzazione, per cui esiste una formula derivata dalla Bethe, si può dimostrare essere:

$$\frac{-dE/dx_{fren}}{-dE/dx_{ion}} \simeq \frac{EZ}{800} \quad (2.5)$$

con E , energia cinetica della particella, Z , numero atomico del mezzo assorbitore.

Si può quindi dedurre come le perdite energetiche per frenamento siano soprattutto importanti per elettroni alle alte energie in materiali ad alto numero atomico. Il range elettronico, che può essere anche 4 volte inferiore rispetto al percorso effettivo di un elettrone nella materia a causa dello *scattering nucleare multiplo*, ha un andamento come quello descritto in Figura 2.22.

Energia persa sotto forma di radiazione elettromagnetica può avvenire anche quando si verifica l'*effetto Cerenkov*, per cui se l'elettrone viaggia ad una velocità maggiore a quella della luce nel mezzo viene emessa la caratteristica luce blu.

Come si nota dalla figura 2.22, anche attenuatori di piccolo spessore comportano una perdita di elettroni dal fascio a causa delle interazioni di scattering: la trasmissione va poi gradualmente a zero. Poiché il potere frenante

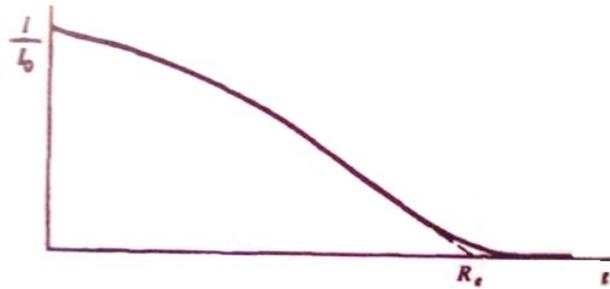


Figura 2.22: Numero di elettroni attenuati con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbente.

degli elettroni è molto inferiore a quelle delle particelle cariche pesanti, il loro percorso è generalmente centinaia di volte maggiore (una particella α da 3 MeV percorre circa 1,7 cm, un elettrone da 3 MeV percorre circa 10 m). Da tenere in considerazione è anche il fenomeno del *backscattering*, per cui un elettrone che interagisce con una superficie può riemergere da essa senza superarla se subisce una deflessione ingente.

I fotoni possono interagire con la materia tramite principalmente tre effetti: l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton e la creazione di coppie. Il primo effetto prevale alle basse energie e prevede un'interazione con un elettrone legato che assorbe il fotone e viene scalzato dall'atomo, con successiva emissione di raggi X ed elettroni Auger per diseccitare l'atomo. La probabilità di questo fenomeno dipende da Z^5 , cioè dalla quinta potenza del numero atomico del materiale del mezzo attenuatore.

L'effetto Compton prevede l'interazione di un fotone con un elettrone libero e nella reazione di scattering tra i due, i quali sono deflessi e la cui totalità dell'energia di cui era dotato il fotone è spartita tra le due particelle. La probabilità con cui questo fenomeno può verificarsi dipende da Z , cioè dal numero atomico del materiale del mezzo attenuatore.

La creazione di coppie è un fenomeno che prevale alle alte energie (7 - 10 MeV), a soglia (il fotone deve avere un'energia di almeno 1022 keV), che prevede l'interazione del fotone col campo coulombiano del nucleo e che dà luogo ad una coppia di un elettrone con un positrone. La sezione d'urto di

questo effetto aumenta con Z^2 , ovvero il quadrato del numero atomico del materiale del mezzo attenuatore. Altri effetti come l'effetto Rayleigh e la fotodisintegrazione sono di minore importanza.

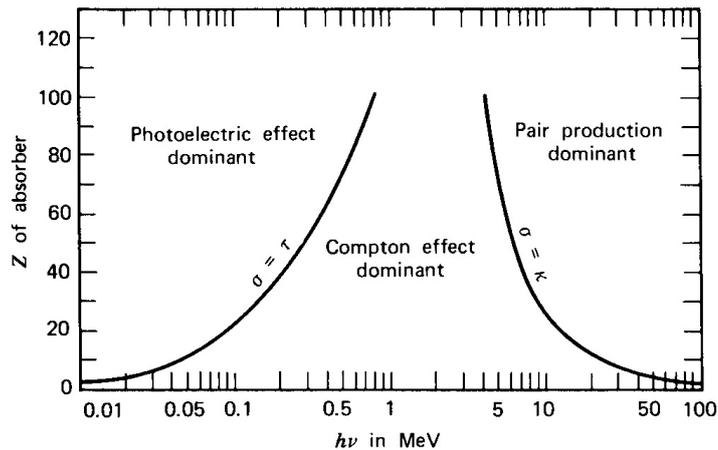


Figura 2.23: Effetto dominante in relazione al numero atomico del materiale del mezzo attenuatore Z , e all'energia del fotone $h\nu$.

I principali tipi di interazione dei neutroni con la materia sono lo scattering elastico con un nucleo, lo scattering anelastico con un nucleo, che prevale ad alte energie (sopra 1 MeV), oppure la reazione di cattura per cui il nucleo che cattura il neutrone viene eccitato e decade emettendo raggi γ , che prevale a basse energie (fino a 0,1 eV). Sono poi da considerare altri processi in cui avviene l'emissione dal nucleo di altre particelle (si parla, tra le altre, di reazioni (n,α) , (n,p) , $(n,2n)$) e la reazione di fissione nucleare.

2.3.2 Rivelatori plastici e inorganici a scintillazione

In questa sottosezione e nella successiva verranno trattate le tipologie di rivelatori presenti all'interno del rivelatore HEPD, ovvero gli scintillatori plastici, quelli inorganici e in seguito i rivelatori a semiconduttore. La rivelazione di radiazione ionizzante tramite luce emessa in alcuni materiali è una delle tecniche di misurazione più antiche e note. La categoria di questo tipo di rivelatore è vasta e include principalmente scintillatori inorganici e organici,

questi ultimi in soluzione solida (plastici) o liquida (liquidi). Gli scintillatori inorganici hanno generalmente una resa in luce maggiore e presentano un andamento prossimo alla linearità tra luce emessa ed energia della radiazione; i rivelatori organici hanno soprattutto un'ottima velocità nel tempo di risposta. In questa sezione tratteremo gli scintillatori organici plastici e inorganici, gli unici presenti nel rivelatore HEPD.

Il processo fisico su cui gli scintillatori organici sono basati è la *fluorescenza* per cui l'energia della radiazione incidente può essere assorbita dagli atomi della molecola organica e permettere ad un elettrone di portarsi in uno stato eccitato di singoletto S_1 o S_i (se eccitato a livelli più alti) (Figura 2.24), con distanza di 3-4 eV tra S_1 e quello fondamentale. Ogni configurazione elettronica è suddivisa in una serie di sottolivelli dipendenti dallo stato vibrazionale della molecola, distanziati energeticamente 0,15 eV circa.

L'elettrone una volta eccitato ai livelli più alti, con tempi dell'ordine dei picosecondi, si diseccita per conversione interna (IC) ad arrivare al livello S_1 , e successivamente per motivi termici al livello S_{10} lasciando come risultato una grossa popolazione di elettroni in tale livello.

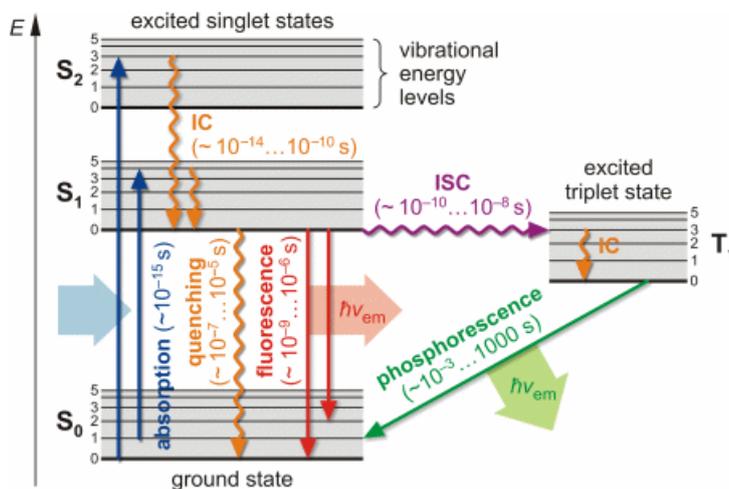


Figura 2.24: Livelli energetici in una molecola organica e fenomeni associati all'interazione con la radiazione.

A questo punto tramite un processo chiamato *intersystem crossing* può avvenire una transizione allo stato di tripletto T_1 , con differente molteplicità di spin. Se l'elettrone si diseccita dallo stato di singoletto S_1 occorre la

cosiddetta *fluorescenza*, se ciò avviene dallo stato di tripletto T_1 la *fosforescenza*, con in entrambi i casi emissione di radiazione elettromagnetica, di lunghezza d'onda superiore nel secondo caso, dato che il livello energetico di T_1 è inferiore a quello di S_1 . Nel caso in cui termicamente un elettrone venga eccitato dallo stato T_1 allo stato S_1 , nella successiva diseccitazione si parla di *fluorescenza ritardata*.

L'efficienza di un tale tipo di scintillatore è data dal rapporto tra emissione di luce ed energia della radiazione incidente: tale rapporto viene degradato dalla presenza di tutti gli altri processi di diseccitazione delle molecole, il cosiddetto *quenching*, tra cui l'emanazione di calore, dovuto anche a presenza di impurità.

Quando uno scintillatore organico è disciolto in un solvente e successivamente polimerizzato, si chiama *scintillatore plastico* che, non essendo economicamente caro e soprattutto essendo facilmente modellabile, presenta un utilizzo piuttosto diffuso. Questi scintillatori sono dotati di una resa in luce piuttosto elevata e tempi di diseccitazione di pochi nanosecondi, oltre che buone risoluzioni spaziali.

Un motivo per cui sono stati utilizzati scintillatori organici nel rivelatore HEPD è legato a motivi di risoluzione energetica: nel range energetico in oggetto, infatti, la frazione energetica persa per *bremsstrahlung* (*radiation yield* in Figura 2.25) è sensibilmente minore rispetto agli altri scintillatori, con conseguente riduzione del possibile effetto fotoelettrico.

Gli scintillatori plastici utilizzati nel HEPD sono realizzati dalla ELJEN Technology con il nome di EJ-200, con una base polimerica di Poliviniltoluene. Ha un'efficienza di scintillazione di 10000 fotoni emessi per ogni MeV di energia ceduto agli elettroni, un tempo di decadimento di 2.1 nanosecondi e una lunghezza di attenuazione alta che ne permettono un buon utilizzo per rilevare i tempi di volo [43].

Il meccanismo di scintillazione degli cristalli inorganici si basa sulle bande discrete di energia presenti nei materiali semiconduttori. La banda di valenza rappresenta lo stato degli elettroni di valenza legati al *crystal lattice*, l'insieme dei punti che formano la struttura cristallina, mentre la banda di conduzione

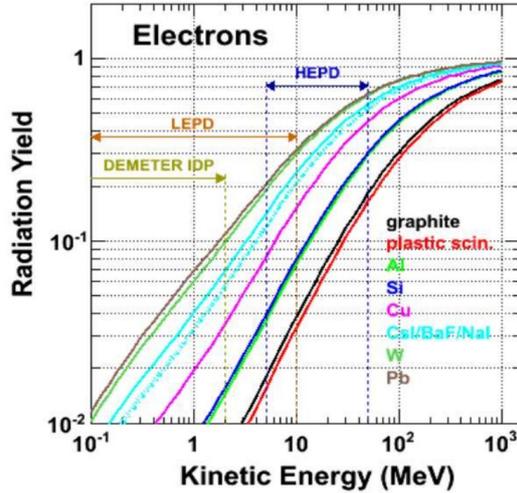


Figura 2.25: Probabilità di bremsstrahlung per vari materiali.

rappresenta lo stato degli elettroni con energia sufficiente al moto all'interno del cristallo (Figura 2.26). L'energia assorbita dall'elettrone può permettere il passaggio dalla banda di valenza a quella di conduzione tramite il *gap*, lasciando così una lacuna in banda di valenza.

Il ritorno dell'elettrone alla banda di valenza comporta un'emissione di un fotone di energia troppo elevata per essere nel range di luce visibile e vengono pertanto aggiunte impurità, chiamate *attivatori*, che creano dei *siti di attivazione* di energia intermedi tra le due bande (centri di luminescenza) attraverso i quali gli elettroni possono diseccitarsi verso la banda di valenza. Poiché l'energia rilasciata in questi nuovi processi di diseccitazione è minore, essendo i gap energetici tra i due stati a diversa energia minori, la probabilità che vi sia resa in luce visibile è maggiore.

La radiazione che interagisce con questi rivelatore crea un gran numero di coppie elettrone-lacuna. La lacuna, intesa come carica positiva, si porta quindi in un sito di attivazione ionizzandolo; l'elettrone, libero di muoversi nel cristallo, nel suo moto incontra prima o poi uno di questi siti con cui interagisce e forma una carica neutra nel sito di attivazione, con vari stati di energia possibili. Se il sito ha uno stato di energia eccitato, avviene un processo di diseccitazione molto rapido con l'emissione di un fotone, che

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

può essere nel range del visibile, con un'opportuna scelta dell'attivatore. La fosforescenza, processo spiegato in precedenza, ed effetti di *quenching* sono anche qui dei fenomeni paralleli che competono con quello appena descritto.

Il LYSO (lutetium-yttrium oxyrhosilicate) utilizzato nel HEPD è uno scintillatore inorganico drogato con cerio, che ne è l'attivatore, e viene realizzato dalla azienda Scionix. La particolarità di questi materiali attivati al cerio è quella di creare due centri di luminescenza con una resa in luce che risulta maggiore anche se a discapito di un'efficienza energetica che subisce una perdita [44]. Le sue caratteristiche lo rendono un buon rivelatore per quanto concerne l'alta resa in luce, l'alta densità (il motivo per cui è posto sul fondo del HEPD è proprio per estenderne il range energetico), il basso tempo di decadimento e una accettabile efficienza energetica per un costo basso [45].

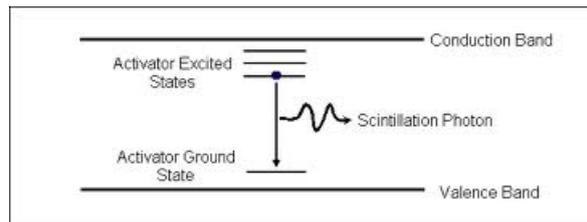


Figura 2.26: Struttura delle bande energetiche degli scintillatori cristallini con attivatore.

L'utilizzo dei rivelatori a scintillazione sarebbe impossibile senza uno strumento in grado di convertire la resa in luce molto debole di scintillazione in un corrispondente segnale elettrico: il fotomoltiplicatore.

I fotoni emessi da uno scintillatore sono infatti convogliati tramite una guida di luce su un fotocatodo, di solito in vetro al cerio o comunque una sostanza a basso potenziale di estrazione, all'interno del fotomoltiplicatore, in cui viene fatto il vuoto per evitare la riflessione (Figura 2.27). Per effetto fotoelettrico, i fotoni assorbiti dal fotocatodo generano elettroni che, tramite elettrodi focalizzatori, migrano verso un dinodo in tensione a potenziale positivo rispetto al fotocatodo. Una volta che gli elettroni interagiscono col dinodo, si genera una quantità molto superiore di elettroni: tale processo si ripete per 10-14 volte, con un guadagno finale di 10^5 - 10^9 , in tempi di cir-

ca 10^{-9} secondi. La valanga è accolta alla fine da un anodo posto a massa da una resistenza ai capi della quale si genera una differenza di potenziale proporzionale all'energia della radiazione.

Tutti i fotomoltiplicatori utilizzati nel rivelatore HEPD sono stati costruiti dalla azienda Hamamatsu ed hanno il nome tecnico R9880U-210.

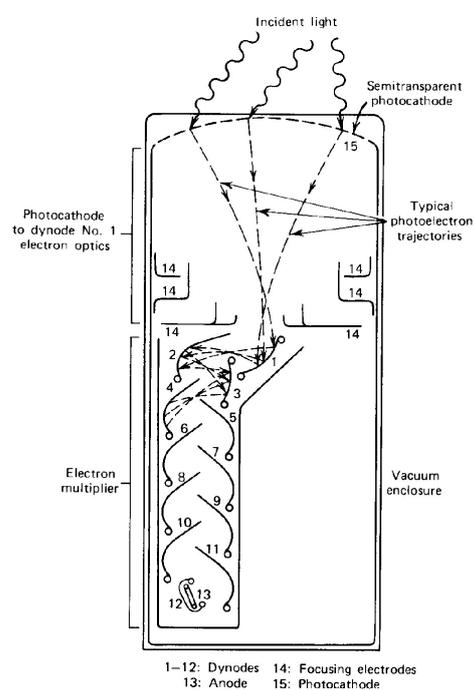


Figura 2.27: Schema del funzionamento di un fotomoltiplicatore.

2.3.3 Rivelatori a semiconduttore

Uno degli svantaggi principali dei rivelatori a scintillazione sta nella risoluzione piuttosto bassa. Un modo che consente di aumentarla, migliorando la statistica, consiste nell'aumento del numero dei portatori di carica che formano il segnale in corrente. Con tale scopo infatti vengono utilizzati i rivelatori a semiconduttore, i cui portatori di carica che costituiscono il segnale sono le coppie elettrone-lacuna che si formano nell'interazione con la radiazione.

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

Riprendendo la struttura a bande descritta in Figura 2.26 per un semiconduttore, si può stabilire che il reticolo periodico di un materiale cristallino permette due diverse bande energetiche per gli elettroni: la banda di valenza e quella di conduzione, entrambe presentate sopra, separate da un gap. La promozione di un elettrone dalla prima banda alla seconda lascia come risultato nella banda di valenza una lacuna dando vita alla coppia elettrone-lacuna, in cui entrambe le particelle possono essere mosse da un campo elettrico per andare a formare un segnale elettrico. In particolare, gli elettroni si muovono in direzione opposta al campo elettrico, le lacune nella stessa direzione, con una velocità più o meno analoga, trattandosi di semiconduttori. Con valori del campo elettrico maggiori, la velocità aumenta non linearmente e si può arrivare ad una *velocità di saturazione* di circa 10^7 cm/s che permette ad un semiconduttore di avere tempi caratteristici dell'ordine dei nanosecondi. Si fa presente che la corrente delle lacune e degli elettroni fluisce in direzioni opposte, che dunque sono additive, essendo di carica opposta.

In un ideale semiconduttore puro, tutti gli elettroni sono promossi in banda di conduzione e tutte le lacune sono presenti in banda di valenza solo grazie all'eccitazione termica: ciò non si realizza nella realtà a causa delle impurità presenti sempre presenti nei semiconduttori, anche nel caso di silicio o germanio, i semiconduttori con la massima purezza ottenibili.

Uno dei motivi principali per cui i semiconduttori vengono utilizzati in ambito nucleare e in elettronica è legato alle possibilità offerte dal *drogaggio*, che può essere di *tipo n* o di *tipo p* (Figura 2.28).

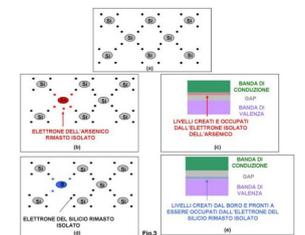


Figura 2.28: Struttura a bande di un semiconduttore intrinseco (a) e di un semiconduttore con drogaggio di tipo *n* (b,c) e di tipo *p* (d,e).

Si consideri il silicio (discorso analogo si può effettuare per il germanio), il cui atomo è tetravalente e quindi tende a formare legami covalenti con altri 4

atomi, e si supponga che vi sia nel reticolo un'impurità pentavalente, di modo che un elettrone resti spaiato e poco legato al sito dove è collocata l'impurità. Questo elettrone necessita pertanto di una quantità esigua di energia per collocarsi nella banda di conduzione, senza che la corrispondente lacuna si formi. Questa impurità prende il nome di *donatore*, e si colloca nel gap energetico tra banda di valenza e di conduzione, molto vicino a quest'ultima, tanto che può avvenire la promozione grazie a eccitazione termica.

La concentrazione di impurezze è molto alta di solito tanto che il numero di elettroni nella banda di conduzione è sostanzialmente dato da questo contributo: l'aumento nella concentrazione di elettroni comporta un aumento nel rateo di ricombinazione con le lacune intrinseche del materiale. L'effetto complessivo di un drogaggio di questo tipo è quindi la creazione di una situazione in cui il numero di elettroni di conduzione è molto maggiore di quello delle lacune, ove quindi la conduttività è dominata dagli elettroni (*majority carriers*).

Il drogaggio di *tipo p* è concettualmente analogo a quello di *tipo n*, considerando però un'impurità trivalente, anziché pentavalente. Verrà a crearsi pertanto un legame covalente in meno con gli atomi di silicio, ovvero una lacuna energeticamente vicina alla banda di valenza del tutto simile a quella lasciata da un elettrone promosso dalla banda di valenza a quella di conduzione. Queste impurità prendono il nome di *accettori* e si ricombinano con gli elettroni intrinseci eccitati termicamente e creano un ambiente in cui le lacune sono i (*majority carriers*).

Il drogaggio di fatto rimuove il perfetto equilibrio tra elettroni e lacune e rende dominante un portatore di carica; un drogaggio maggiore inoltre comporta la concentrazione maggiore di portatori di carica maggioritari con una conseguente conduttività elettrica che aumenta in maniera sostanziale.

Quando una particella carica ionizzante passa attraverso un semiconduttore, avviene la produzione di molte coppie, anche dovuta a raggi δ che possono formarsi. La peculiarità dei semiconduttori è che l'energia di ionizzazione è di circa 3 eV contro i 30 eV necessari per creare una coppia di ioni in un rivelatore a gas: ciò comporta un aumento di un ordine di grandezza nel numero di cariche, che limita la fluttuazione statistica e l'importanza del

rumore elettrico di fondo nell'elettronica.

I rivelatori a semiconduttore sono basati sulle proprietà che si creano operando una *giunzione p-n* tra un materiale drogato di tipo n ed un altro drogato di tipo p. I portatori di carica possono migrare attraverso tale giunzione e si crea una migrazione di elettroni al materiale con drogaggio di tipo p da quello di tipo n dove si ricombinano con le lacune, viceversa avviene per le lacune presenti nel materiale p. Tale diffusione lascia una grossa quantità di lacune nella regione n, dovute alla migrazione di elettroni verso la zona p, e una grossa quantità di elettroni nella regione p, dovuta alla migrazione di lacune alla zona n. L'effetto finale è quello di avere una carica netta negativa nella regione p, e positiva nella regione n.

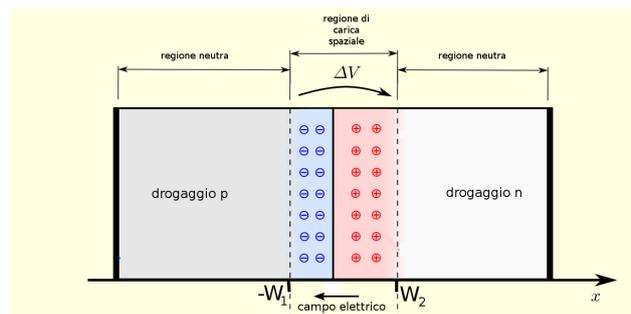


Figura 2.29: Giunzione p-n e relativi potenziale e campo elettrico.

La regione del materiale in cui c'è uno squilibrio di carica prende il nome di *depleted region* e dipende dal livello di drogaggio di un lato della giunzione rispetto ad un altro: perché le cariche presenti nel materiale maggiormente drogato si ricombinano, devono percorrere una distanza maggiore nel materiale meno drogato, in tal modo la regione interessata da squilibri aumenta.

Il passaggio di cariche dalla giunzione comporta la formazione di un potenziale e quindi di un campo elettrico che si estende per tutta la regione interessata dallo squilibrio e che è di grande interesse per i rivelatori. Il campo elettrico infatti fa sì che tutti gli elettroni che si creano, dovuti alla radiazione nella giunzione, o vicino ad essa siano rimandati nella zona n, al contrario delle lacune che migrano verso la zona p. La *depleted region*

pertanto rimane con solo le cariche date dai donatori e dagli accettori e gli elettroni e le lacune vanno a formare il segnale elettrico.

I rivelatori a semiconduttore al silicio presentano pertanto un'elevata risoluzione energetica, stabilità, dimensioni piuttosto compatte, tempi caratteristici bassi e possono essere molto sottili: proprio su quest'ultima particolarità si basa il metodo di discriminazione del HEPD, illustrato nel Capitolo 4.

I rivelatori a semiconduttore al silicio presenti nel HEPD sono realizzati dall'azienda FBK come moduli personalizzati.

2.3.4 La risoluzione energetica

Per i rivelatori che si propongono di misurare con precisione l'energia della particella interagente, una delle caratteristiche più importanti è la risoluzione energetica, ovvero la capacità del rivelatore di distinguere due eventi di energia diversa. La risoluzione di uno strumento per la misurazione in ambito nucleare può essere rilevata facendolo interagire un fascio monoenergetico di radiazione e analizzando lo spettro che idealmente dovrebbe essere un picco come una funzione delta di Dirac, ma che in realtà si presenta in forma gaussiana (*funzione di risposta*), essendo il rilascio energetico un fenomeno stocastico.

La risoluzione R si misura generalmente tramite la larghezza a metà altezza (FWHM) del picco della funzione di risposta, tramite la formula:

$$R = \frac{FWHM}{E} [\%] \quad (2.6)$$

con E , energia corrispondente al picco della gaussiana. Minore è la risoluzione energetica, maggiore è la capacità del rivelatore nel distinguere due eventi di radiazione con energia prossima. Ipotizzando il fenomeno come un processo poissoniano, se N è il numero totale delle particelle con energia E (o il numero di ionizzazioni date dall'energia E divisa il potenziale di ionizzazione w), la deviazione standard σ è pari a \sqrt{E} . Questa grandezza è legata a FWHM tramite la relazione:

$$\text{FWHM} = 2,35 \sigma$$

Poiché la risposta per molti rivelatori è lineare, E può essere dato dalla moltiplicazione di N per K , costante di proporzionalità. La deviazione standard sarà dunque pari a $K\sqrt{N}$ e pertanto la FWHM sarà pari a $2,35 K \sqrt{N}$ con una risoluzione dovuta solo alla statistica pari a $2,35/\sqrt{N}$. Pertanto la risoluzione migliora con l'aumentare di N .

Non trattandosi precisamente di un processo poissoniano (w è infatti stocastico a sua volta) è stato introdotto nella statistica per il calcolo della risoluzione energetica il *fattore di Fano*, un numero compreso tra 0 e 1 che quantifica la discrepanza delle fluttuazioni da quelle predette dalla poissoniana:

$$F = \frac{\text{varianza osservata in } N}{\text{varianza poissoniana } (=N)}$$

Si può inoltre dimostrare che la risoluzione dipende dal fattore di Fano, in tal modo:

$$R = 2,35 \sqrt{\frac{F}{N}} \quad (2.7)$$

Uno dei modi in cui può essere parametrizzata la risoluzione energetica R di un calorimetro (sia esso elettromagnetico o adronico) consiste nella somma in quadratura di tre contributi [46] [47]:

$$R = \frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2} \quad (2.8)$$

Il primo contributo (a) rappresenta il termine stocastico, il quale tiene conto delle fluttuazioni statistiche nella quantità di energia rilasciata all'interno del calorimetro. Il secondo contributo (b), indipendente dall'energia, tiene conto di fenomeni sistematici quali, ad esempio, una non uniformità del calorimetro, una calibrazione non ottimale. Il terzo contributo (c) tiene conto del rumore associato all'elettronica di lettura e ai rivelatori.

2.3.5 Le accettanze

Un ulteriore parametro con cui valutare le prestazioni di un rivelatore è l'*accettanza angolare*, ovvero una grandezza che dipende dalla frazione di angolo solido di vista effettivamente coperta dallo strumento e frutto del prodotto tra l'area della superficie sensibile che si offre alla particella interagente per l'angolo solido coperto. Questa grandezza dipende dall'*efficienza geometrica* (o accettanza) ε_{geom} , data dalla formula:

$$\varepsilon_{geom} = \frac{N_{rivelati}}{N_{incidenti}} [\%]$$

con $N_{rivelati}$, il numero di particelle rivelate dal rivelatore, e $N_{incidenti}$, il numero di particelle incidenti nel rivelatore. Come è facilmente intuibile questa grandezza dipende dalla geometria del rivelatore (un'area di rivelazione maggiore comporta un numero maggiore di particelle rivelate). Per tale motivo, nel calcolo dell'accettanza angolare si considera un *fattore geometrico* G di normalizzazione che per un singolo piano di rivelatore, nel nostro caso il rivelatore semiconduttore al silicio, è pari a [48]:

$$G = \pi A [\text{sr cm}^2]$$

con A , superficie frontale del rivelatore, e che slega dalla dipendenza della geometria della superficie per restituire una grandezza in $[\text{sr cm}^2]$.

Esiste infine un terzo tipo di accettanza, chiama *accettanza totale*, che fornisce la dipendenza dell'accettanza angolare in funzione dell'energia della particella.

2.4 Altre missioni spaziali

Le principali missioni che si sono occupati, magari solo in parte, di questo fenomeno sono varie. Negli anni '80 sono state completate missioni soprattutto col fine di andare a valutare i *bursts* di particelle, ed in particolare di elettroni: tra queste si nominano le missioni MARIA, MARIA-2 per elettroni

con un range tra 20 MeV e 200 MeV, ELECTRON, per elettroni con un'energia maggiore a 30 MeV, GAMMA, che copriva range energetici sopra i 50 MeV, e SAMPEX, per basse energie.

Una missione analoga a CSES-Limadou è stata compiuta nell'ambito dell'attività svolta da DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Trasmitted from Earthquake Regions), una missione francese che ha volato dal 2004 al 2010. Le principali differenze con quest'ultima sono legate anzitutto all'orbita, che per DEMETER era polare ad un altitudine di 820 km, con lo scopo di monitorare tutto il globo, senza però considerare maggiormente le aree equatoriali, dove ci si aspettano più riscontri; oltre a ciò l'orbita di DEMETER non permetteva l'acquisizione periodica dei dati, essendo per alcune orbite totalmente invisibile dalle stazioni a terra. La strumentazione più povera in DEMETER non consentiva l'identificazione delle particelle inoltre, ed anche il numero di rivelatori era esiguo.

Menzione va fatta anche alle missioni, attualmente in corso, ARINA e VSPLESK, il primo capace di misurare leptoni (tutti) in un range energetico compreso tra 4 e 30 MeV e protoni tra 30 e 100 MeV, il secondo installato sulla ISS (Stazione Spaziale Internazionale) e quindi ad un'altezza di circa 400 km.

2.5 HEPD realizzato

Si allegano in questa sezione alcuni foto del rivelatore realizzato che andrà nello spazio.

2.5 HEPD realizzato



Figura 2.30: Scatola esterna in alluminio del rivelatore HEPD.

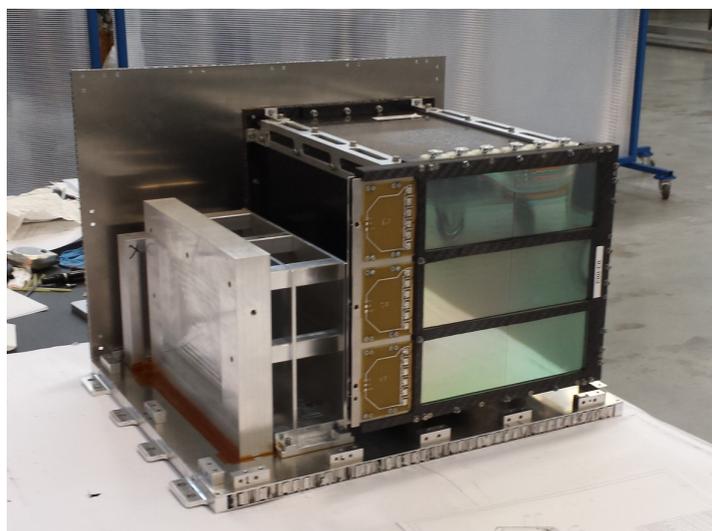


Figura 2.31: Apparato interno alla scatola con power supply ed electronic box e involucro del rivelatore.

2. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

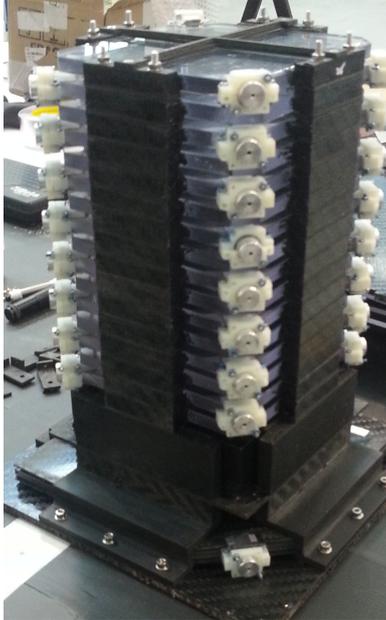


Figura 2.32: Il calorimetro senza fotomoltiplicatori.



Figura 2.33: Il rivelatore con un fotomoltiplicatore sul primo scintillatore di Trigger.

Capitolo 3

Realizzazione della geometria del rivelatore HEPD con GEANT4

Introduzione

Le simulazioni virtuali dei fenomeni fisici, ed in particolare quelli riguardanti la fisica delle particelle, hanno assunto un ruolo fondamentale nello sviluppo di nuove tecniche costruttive, anche di rivelatori. La loro essenzialità si deve soprattutto al fatto che è richiesta sempre una crescente precisione e una minor imperfezione nella realizzazione dello strumento reale, motivo per cui molto tempo e molte risorse vengono spese nell'implementazione di una geometria virtuale il più possibile accurata, sofisticata e simile a quella che un giorno avrà l'oggetto fisico.

Lo studio dei responsi gestiti dalla simulazione è importante sia in fase di progettazione, per capire le criticità dello strumento in oggetto, effettuare miglioramenti e aggiornamenti, sia in fase di analisi, quando ormai lo strumento è già stato concepito e costruito, per avere una miglior idea di quale sarà la prestazione e la risposta e quindi mettere a punto programmi ed algoritmi utili una volta ricevuti dati in volo.

Nel caso del rivelatore HEPD analizzato, la fase di progettazione meccanica finale dello strumento è volta al termine nelle settimane iniziali che hanno visto svolgersi questo lavoro di tesi: si è pertanto realizzato virtual-

mente l'insieme delle parti di cui il rivelatore è composto, procedendo poi con l'assemblaggio virtuale delle stesse per infine effettuare tutto il processo di simulazione e analizzare quindi la risposta che avrà lo strumento una volta costruito e lanciato nella ionosfera.

In questo capitolo si fa luce su ciò che costituisce la prima parte del lavoro di tesi effettuato: viene pertanto discusso il metodo col quale è stata realizzata virtualmente la geometria del rivelatore, descrivendo i passaggi costruttivi che hanno portato ad un risultato completo e valido per una simulazione successiva.

La piattaforma di simulazione tramite la quale si è svolta la creazione dei solidi virtuali, ovvero GEANT4, e sulla quale molto del lavoro di questa tesi poggia, viene spiegata nella Sezione 3.1, illustrando brevemente le parti fondamentali di questo potente mezzo per codificare un volume.

Successivamente è presente una sezione più specifica e rivolta alla costruzione del rivelatore HEPD (Sezione 3.2), ove si trattano i metodi di costruzione di una geometria in GEANT4, ed in particolare del rivelatore HEPD. Questa sezione introduce al lavoro vero e proprio di composizione delle parti della geometria totale poi discussa più in dettaglio nelle Sezioni 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, ognuna contenente una descrizione dettagliata dei volumi realizzati e dei procedimenti adottati per la loro costruzione virtuale.

È presente in seguito la Sezione 3.8 in cui compare finalmente sul palco il rivelatore HEPD virtuale, risultato della compilazione di tutti i codici di GEANT4 contenenti informazioni sulla geometria dello strumento.

Per concludere verrà brevemente descritto il metodo di programmazione col quale vengono prodotti i dati della simulazione a partire dalla geometria descritta, nella sezione finale, ovvero la Sezione 3.9.

3.1 GEANT4

GEANT4 (GEometry ANd Tracking) è una piattaforma sviluppata in linguaggio C++ ed utilizzata per la simulazione del passaggio di particelle attraverso la materia usando algoritmi di tipo Monte Carlo [49]. Sostituisce la precedente versione GEANT3, avendone migliorato sia l'affidabilità nel

3.1 GEANT4

tracciamento delle particelle che i modelli e i processi fisici simulati, oltre che per esser di maggior fruibilità per l'utente, che può realizzare un programma tramite codici in C++, largamente diffuso in ambito scientifico. Il suo impiego è molto vasto e vario, visto che ha riscontro in campi quali la fisica delle particelle, l'astrofisica e l'applicazione medica delle radiazioni.

È stato sviluppato da una collaborazione internazionale, di cui il CERN fa parte, ed utilizza un metodo di programmazione ad oggetti, ovvero organizzato in classi che contengono tutti i dati necessari alla simulazione oltre ai codici che operano su essi. Richiede pertanto che l'utente sviluppi delle classi che descrivano il comportamento del simulatore nel caso specifico preso in esame, anche perché non esiste alcun programma principale pronto all'uso.

Questa piattaforma di librerie virtuali inoltre offre la possibilità di simulare apparati complessi come quelli presenti nel LHC (Large Hydron Collider) oppure più semplici come il rivelatore HEPD, permettendo di definire geometrie, materiali e oggetti della simulazione, tra cui i parametri specifici dell'interazione radiazione - materia.

Le classi principali che l'utente deve compilare sono 2 in particolare: la prima, la *Detector Construction*, richiede una geometria descritta assieme ai materiali delle rispettive parti di cui è composta e la definizione delle parti di cui è previsto leggere il risultato dell'interazione con la radiazione; la seconda, la *Physics List*, prevede la necessità di stabilire quali particelle sono oggetto della simulazione, quali processi fisici sono da elaborare e in che modo le particelle in analisi vengono generate: tutte queste informazioni sono le minime necessarie per predisporre una simulazione.

Visti gli obiettivi della tesi (e della missione), quello che ci si prefigge di simulare in questo caso è la risposta dello strumento al passaggio di diversi tipi di particelle cariche ed in particolare la misura del flusso di elettroni e protoni, oltre che lo studio della differente risposta legata a questi due tipi di particelle.

Un passaggio concettualmente e praticamente importante nella realizzazione del sistema da simulare in GEANT4 è la definizione dei vari volumi geometrici. All'interno del *Mondo* (*World Volume*) vengono contenuti e costruiti tutti gli altri volumi che sono creati definendone i parametri geometrici

3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

e le caratteristiche fisiche e successivamente collocati nel volume più esterno. In tutta la geometria deve esistere una ed una sola istanza fisica di questo volume, che definisce il sistema globale di coordinate e che deve contenere interamente tutti gli altri volumi. Per il volume Mondo è stata presa una scatola di dimensioni 55 cm x 75 cm x 150 cm e di materiale *GalacticMaterial* che rappresenta le condizioni presenti nello spazio.

Per creare un nuovo volume all'interno di GEANT4 si seguono 3 diverse fasi. La prima consiste nella realizzazione di un *Volume Solido* in cui viene descritta la geometria di un solido che si vuole realizzare, fornendo ad esempio la larghezza, l'altezza e lo spessore. È sostanzialmente un oggetto geometrico di cui sono state descritte le dimensioni.

Nel *Volume Logico* vengono poi inserite le caratteristiche fisiche come ad esempio il materiale di cui è costituito un pezzo del volume, o il colore che gli si vuole attribuire. Menzione va fatta circa i materiali, alcuni dei quali sono già previsti e disposti in GEANT, mentre altri richiedono una descrizione da parte dell'utente che deve pertanto fornire dati che lo caratterizzino, quali la composizione molare, la densità, l'energia di ionizzazione ed eccitazione.

Infine viene descritto un *Volume Fisico*, utilizzato per inserire la posizione del volume considerato all'interno di un volume madre, che può essere il Mondo oppure un volume creato precedentemente e già piazzato. Questo volume è finalizzato anche all'impostazione di alcuni parametri di collocazione come la gestione di una rotazione da dare ad un volume, il numero di copie, il nome e le operazioni booleane.

Esistono inoltre dei metodi già parzialmente implementati in GEANT4 che servono a creare volumi come sfere, coni o solidi più complessi, fornendo alla classe l'indicazione dei relativi parametri geometrici (ad esempio, per la classe G4Box che crea un parallelepipedo, sarà necessario introdurre le dimensioni delle facce). Un'ulteriore possibilità fornita dalla piattaforma è quella di creare solidi *booleani* ovvero volumi più complessi ottenuti a partire da strutture semplici tramite operazioni di addizione o sottrazione: questa opzione è molto utile quando si tratta di realizzare anelli o fori, avendo a disposizione due solidi e applicando un'operazione tra i due.

Per quanto riguarda il posizionamento, oltre a poter definire il punto ove

3.1 GEANT4

piazzare un dato volume, si può stabilire se replicarlo e ovviamente l'eventuale numero di repliche e la loro collocazione: questa funzionalità permette di guadagnare molto tempo quando si deve inserire un pezzo che si ripete, linearmente o circolarmente per esempio, all'interno di un volume.

GEANT4 fornisce infine vari supporti grafici che permettono la visualizzazione della geometria realizzata e delle tracce delle particelle che interagiscono con essa, consentendo all'utente la visione da vari punti di vista e prospettive. Questo supporto permette inoltre di curare varie qualità tra cui il colore delle particelle, la luminosità e vari altri aspetti grafici (Figura 3.1).

Per concludere, un sistema di gestione dei dati in output della simulazione fornisce le *hits* delle particelle, ovvero la posizione e l'energia di una particella, l'energia depositata nella traccia e varie informazioni geometriche, come l'angolo di interazione ad esempio.

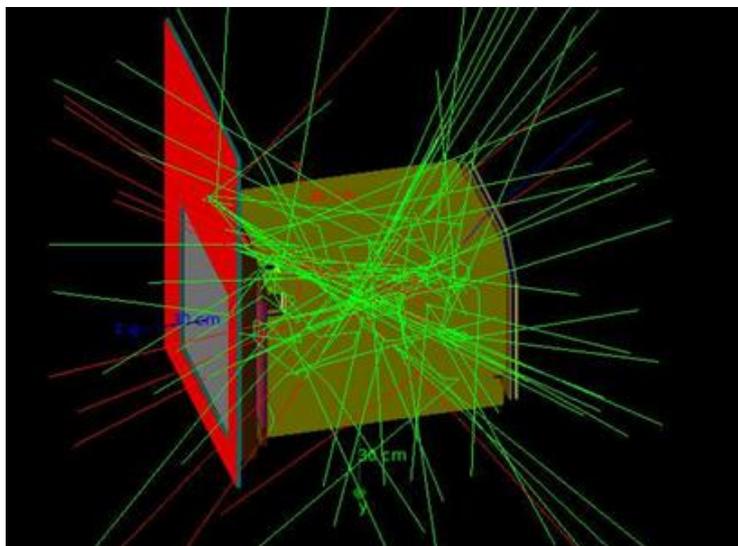


Figura 3.1: Esempio dell'interazione tra la geometria realizzata del rivelatore HEPD e alcune particelle sparate in direzione casuale dal centro di essa. In questo caso, in *verde* è rappresentata la radiazione γ , la cui energia fa sì che superi nella maggior parte dei casi lo spessore del rivelatore che le si propone, tranne in alcuni casi in cui, per effetto fotoelettrico, genera degli elettroni, in figura in colore *rosso*.

3.2 Definizione della Geometria del rivelatore HEPD

Il lavoro più oneroso nella programmazione di una simulazione è la descrizione della geometria oggetto dell'analisi, la quale viene codificata in una libreria successivamente richiamata al momento dell'avviamento della fase simulativa.

La prima metà di questo lavoro di tesi è stata di descrizione tramite GEANT4 del rivelatore HEPD. La realizzazione virtuale del rivelatore HEPD ha richiesto la scrittura di tutto ciò di cui è composto e pertanto sia una descrizione dei volumi diversi di cui è formato sia la definizione di più materiali presenti nello strumento, poi richiamati nei volumi interessati. Un'altra fase di elaborazione in GEANT ha richiesto le specifiche riguardanti i dati prodotti e desiderati al momento della simulazione: si tratta di questi nell'ultima sezione di questo capitolo.

È stato chiaramente necessario fornire una descrizione virtuale molto precisa non solo dei volumi che rivelano la radiazione (*sensitive volumes*), ma anche di tutte le parti strutturali di sostegno o contenimento, che sono in grado di interagire con la radiazione e quindi di mutare la risposta dello strumento con la loro presenza.

Il lavoro generale attinente alla geometria è stato suddiviso in 5 parti: una riguardante la fase di realizzazione della parte chiamata Satellite, cioè la copertura anteriore del rivelatore HEPD con la finestra di mylar e la struttura attorno in alluminio, una parte chiamata Tracker, con i due rivelatori semiconduttori e i relativi supporti meccanici, una denominata Trigger, contenente i due piani di scintillatori S1 e S2, una chiamata Calorimetro, coi piani di scintillatori della torre e il LYSO finale, e una chiamata VETO, che descrive i piani attorno al calorimetro e include anche la copertura in fibra di carbonio e nomex laterale e posteriore al rivelatore. Infine è presente una parte di lavoro che ha riguardato la definizione di tutti i materiali impiegati nel rivelatore e nei suoi volumi.

Una trattazione completa di questi volumi descritti che vanno a formare il rivelatore HEPD viene fornita nelle sezioni immediatamente seguenti, con

l'ordine sopra descritto e presentando le immagini di quanto realizzato tramite GEANT in relazione a quelle del disegno tecnico effettuate col programma SolidWorks, utilizzato per la realizzazione fisica del rivelatore.

Viene spiegato inoltre il processo che ha portato alla loro compiutezza e le particolarità riscontrate nella loro descrizione, pur senza fornire dettagli tecnici e specifici di codificazione: se si desidera, si può trovare un esempio significativo di un codice realizzato all'interno dell'Appendice A, in cui vengono mostrati i passaggi consecutivi che hanno portato alla realizzazione della matrice di blocchi di LYSO.

3.3 Realizzazione del Satellite

La parte contenuta nella struttura esterna, ovvero quella del satellite, e realizzata per la simulazione, consiste in una finestra di mylar, il cui ruolo è stato spiegato nel capitolo precedente, e nella struttura di alluminio in cui racchiusa.

La costruzione di questo volume ha pertanto richiesto la descrizione del materiale mylar, oltre che la descrizione dell'alluminio in struttura alveolare. Una volta programmati i due materiali, si è proceduto con la realizzazione del volume solido e logico delle strutture, impostando le dimensioni della parete in alluminio antistante al piano di mylar, della finestra innanzi al medesimo piano e chiaramente le dimensioni del piano di mylar, oltre a richiamare i materiali rispettivi fornendo alcuni aspetti grafici: l'alluminio nel visualizzatore di GEANT ha assunto colore rosso, il mylar colore grigio.

Sia la struttura che la finestra che il piano di mylar sono stati costruiti piuttosto semplicemente, essendo geometricamente dei parallelepipedi che dunque non hanno comportato l'utilizzo di classi per la formazione di volumi più complessi.

La realizzazione dell'intera struttura per la definizione del volume fisico ha previsto sostanzialmente tre passaggi consequenziali: la descrizione della totalità della parete in alluminio, la sottrazione di un volume a sezione rettangolare (Figura 3.2) e la collocazione sotto di esso di un foglio di mylar

(Figura 3.3).

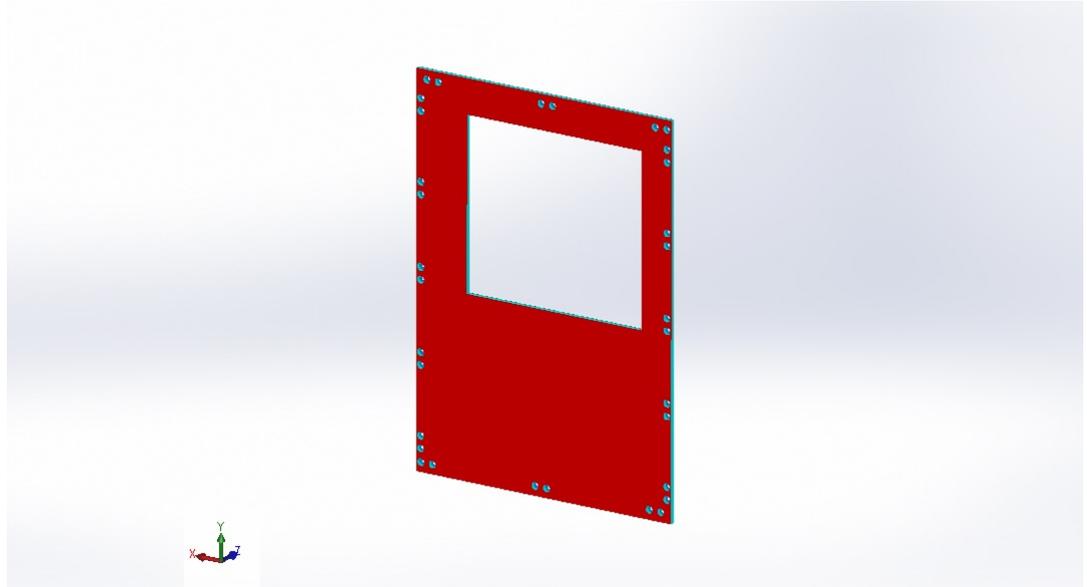


Figura 3.2: Versione in SolidEdge della struttura anteriore del satellite realizzata con la finestra lasciata per la collocazione del piano di mylar: si noti in *rosso*, la struttura in alluminio.

3.4 Realizzazione del Tracker

Per realizzare i due piani di Tracker è stato creato un macro volume esterno a forma di parallelepipedo in fibra di carbonio, ovvero il volume solido globale che racchiude tutti gli altri pezzi relativi ad un solo semiconduttore.

Si è poi proseguito descrivendo il numero di moduli e di pannelli che compongono un singolo piano semiconduttore, ed il numero di piani (tali informazioni sono molto utili in fase di costruzione, come verrà illustrato) Sono state inserite in seguito le dimensioni del volume solido di tutti i pezzi, ovvero: le misure della parte inferiore dedicata all'elettronica, le misure delle finestre antistanti ai pannelli dei semiconduttori, le dimensioni dei moduli dei semiconduttori, le misure delle superfici in poron e quelle in kapton.

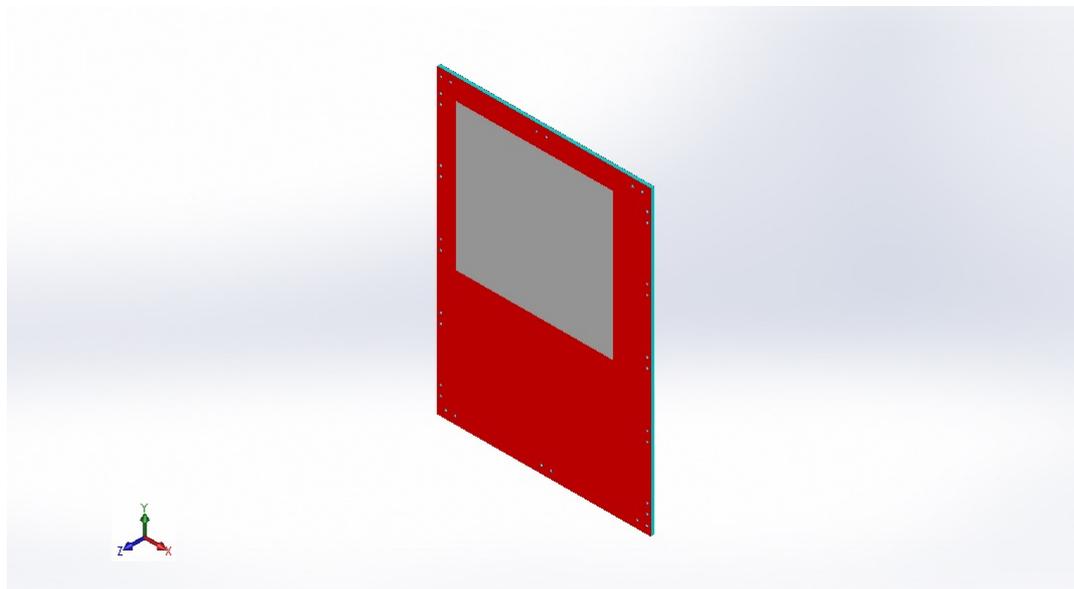


Figura 3.3: Versione in SolidEdge della struttura posteriore del satellite realizzata con il piano di mylar: si noti in *rosso*, la struttura in alluminio, ed in *grigio*, il piano di mylar.

Prima di procedere con la definizione dei volumi fisici, sono stati gestiti i materiali relativi a questa parte del rivelatore (in particolare il kapton, il silicio e il rame dell'elettronica) oltre agli aspetti grafici.

La fase di scrittura del volume fisico è stata piuttosto laboriosa e ingegnosa ed è stata concettualmente realizzata tramite una successiva rimozione di volumi in fibra di carbonio dal macro volume e nel conseguente riempimento degli spazi con la struttura corretta.

Pertanto da un blocco parallelepipedo in fibra di carbonio, dimensionato per contenere tutti i volumi relativi ad un solo semiconduttore, sono state prima rimosse le parti relative ai pannelli del semiconduttore con l'ottenimento di tre finestre, quindi è stata tolta la parte relativa all'elettronica (Figura 3.4) ed infine ne è stato scavato l'interno per far posto ai supporti di kapton e poron.

Una volta rimossi i volumi, sono stati riempiti con quelli opportuni e quindi sono stati piazzati i piani di silicio inserendo il primo modulo e replicandolo sei volte nei siti opportuni (prima replicati due volte lungo l'asse

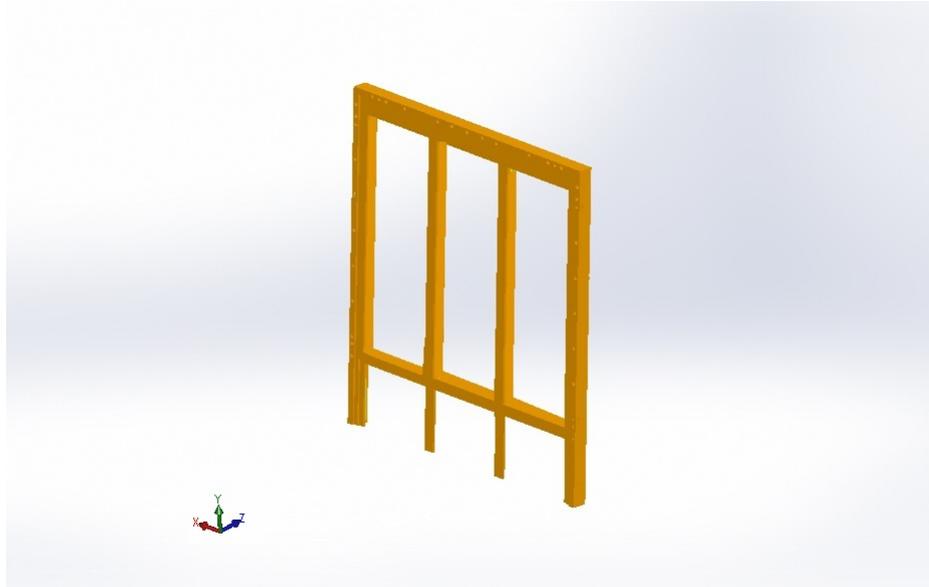


Figura 3.4: Versione in SolidEdge della struttura del tracker: si notino le finestre lasciate in fronte ai semiconduttori e lo spazio lasciato all'elettronica.

Y e poi tre volte il piano lungo l'asse X), cui è seguita un'operazione di collocazione della parte elettronica (Figura 3.5) e dei supporti in poron, i cui pezzi sono stati uniti tramite una classe di GEANT che permette la fusione dei singoli segmenti. La collocazione dei volumi è stata poi conclusa con l'ubicazione di quelli in kapton (in Figura 3.6, in colore azzurro).

Il solido fin qui creato è stato poi replicato una volta lungo l'asse Z per realizzare il secondo piano di semiconduttore (Figura 3.7).

3.5 Realizzazione del Trigger

La configurazione del Trigger, composto da due scintillatori diversi (S1 e S2), è molto diversa tra il primo ed il secondo piano che lo compongono. Il primo scintillatore infatti è segmentato in 6 moduli diversi, mentre il secondo è in tutto e per tutto uguale ad uno scintillatore che fa parte della torre del calorimetro.

Si analizza pertanto in un primo momento lo scintillatore del Trigger S1 e soltanto in un secondo quello denominato S2.

3.5 Realizzazione del Trigger

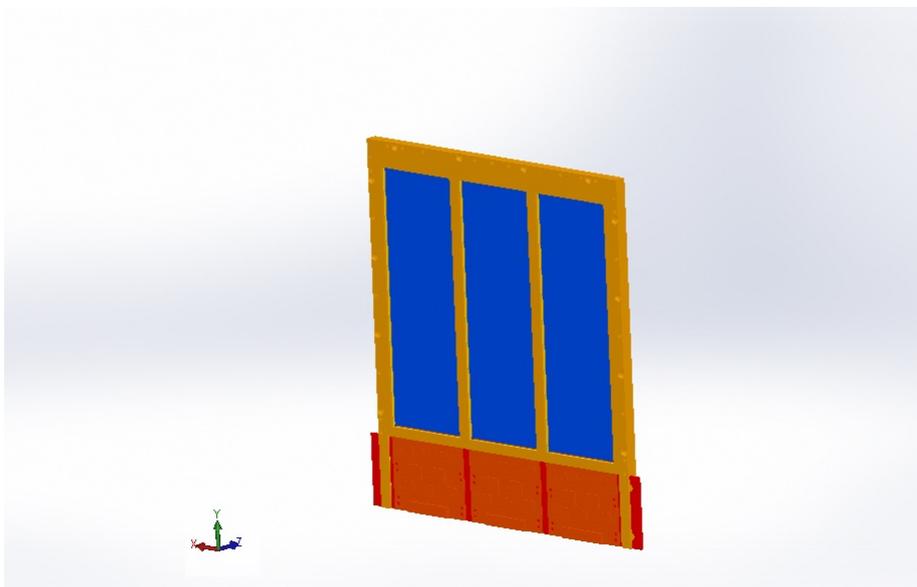


Figura 3.5: Versione in SolidEdge della struttura del tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio (in blu) e della parte elettronica (in rosso).

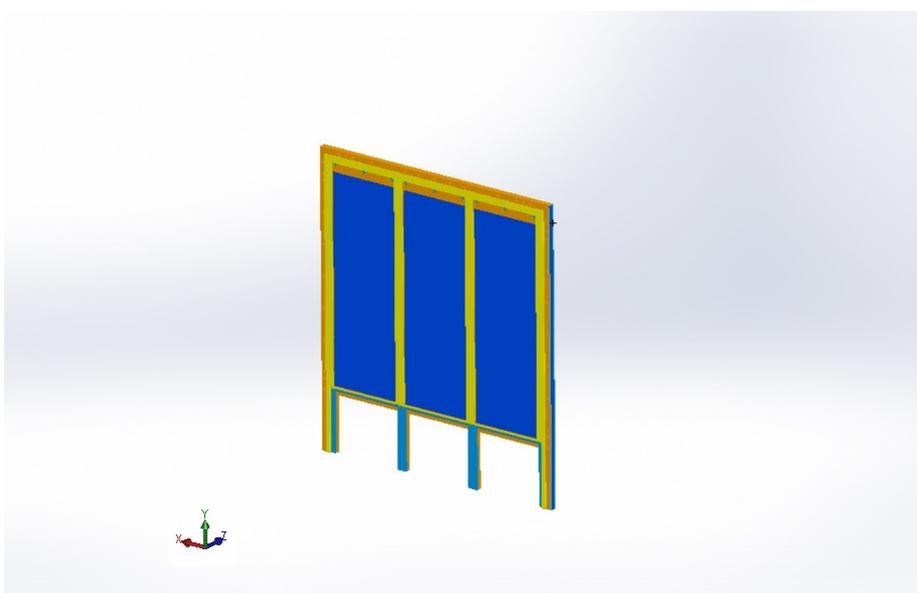


Figura 3.6: Versione in SolidEdge della struttura del tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio, dei pezzi in poron (giallo) e con in evidenza le parti di kapton (azzurro).

3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

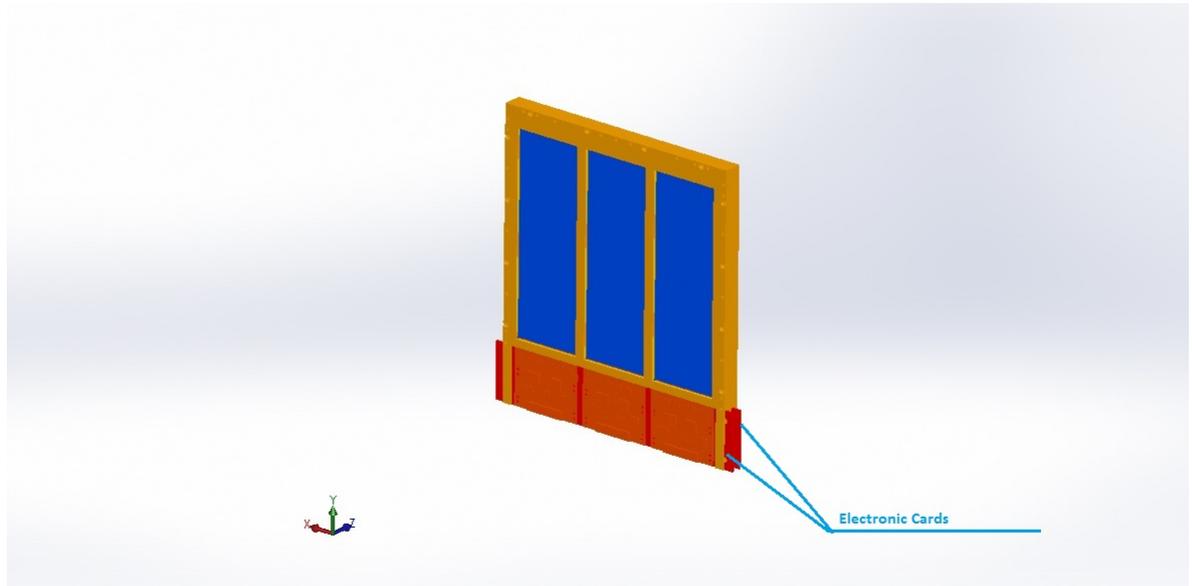


Figura 3.7: Versione in SolidEdge della struttura del tracker dopo la replica del secondo volume di semiconduttore. Si può notare qui il particolare dei 2 segmenti dedicati all'elettronica anziché uno unico relativo ad un solo semiconduttore.

Innanzitutto, è stato necessario inizializzare il materiale di cui questi scintillatori sono composti, il quale verrà richiamato nella definizione del volume logico assieme al poron e alla fibra di carbonio: gli unici altri due materiali presenti in questa parte.

La fase di realizzazione del volume solido si è svolta con la determinazione delle dimensioni del macro volume complessivo di tutti i pezzi legati ad S1, di due barre in fibra di carbonio, di vari pezzi laterali in fibra di carbonio, di un modulo di scintillatore e di una barra in poron.

La collocazione, cioè la determinazione del volume fisico, non ha richiesto particolari soluzioni metodologiche, se non una grossa cura e precisione nella disposizione dei pezzi all'interno del volume madre.

Per prima cosa è stata posta una barra di fibra di carbonio, che si estende da parte a parte e che ha scopo strutturale, sotto la quale è stata posta una barra in poron (Figura 3.8).

È stata poi descritta la collocazione dei pezzi che formano la struttura in fibra di carbonio, con in mezzo una barra in fibra di carbonio, perpendicolare

3.5 Realizzazione del Trigger

alle precedenti (Figura 3.8). In mezzo alla struttura in fibra di carbonio realizzata sono stati posti i moduli di scintillatori, replicati prima tre volte lungo l'asse Y e poi nuovamente replicando il volume contenente già i tre moduli, lungo l'asse X (Figura 3.9).

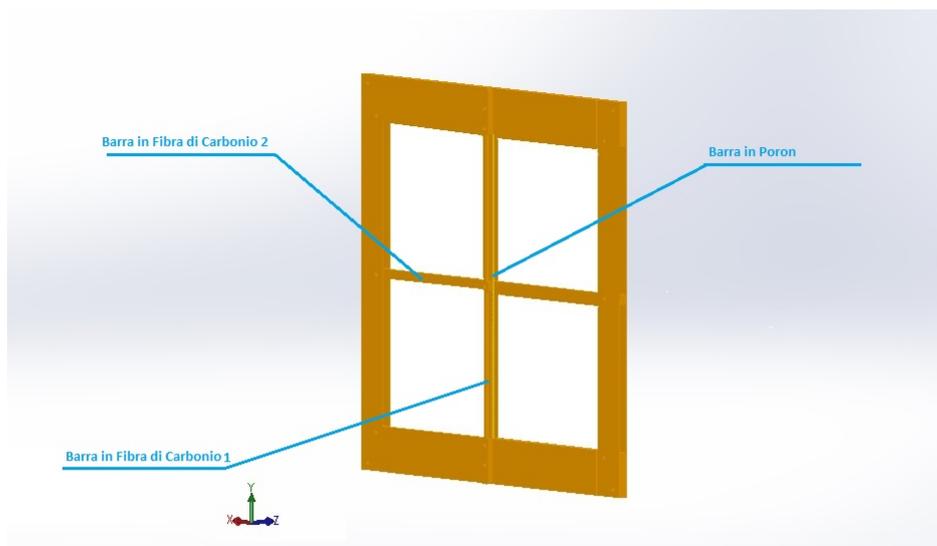


Figura 3.8: Versione in SolidEdge della struttura del primo piano di Trigger con i sostegni in fibra di carbonio, le barre in fibra di carbonio e la barra in poron.

La parte di costruzione virtuale della geometria riguardante la serie di scintillatori è stata senza dubbio la più onerosa dal punto di vista lavorativo. Il motivo di ciò è legato al fatto che le parti realizzate non solo sono molte ma allo stesso tempo sono molto variegate tra loro: lo sono state pertanto anche le tecniche di realizzazione e quindi le classi di GEANT4 utilizzate.

Per il piano di Trigger S2, è stato necessario sviluppare tre croci, due in poron ed una in fibra di carbonio. Questa parte si presenta infatti con una croce in fibra di carbonio antistante, che collega il piano S2 a quello S1, una croce di poron, dei cuscinetti laterali in poron con sopra dei supporti in fibra di carbonio cui è attaccata la croce in fibra di carbonio, e lo scintillatore con dietro un'altra croce in poron (Figura 3.11). Le croci in poron e quella in fibra di carbonio non sono medesime in quanto la seconda presenta agli

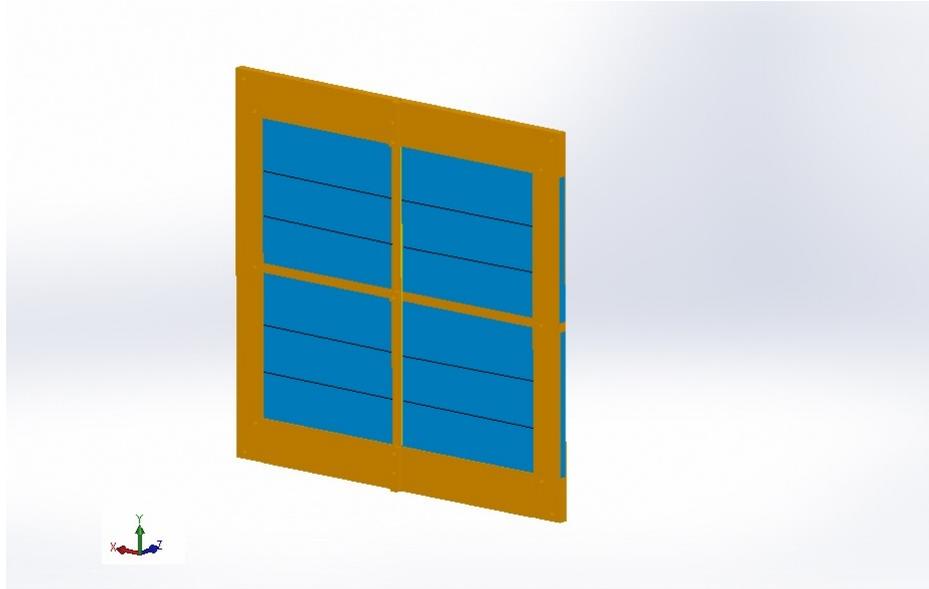


Figura 3.9: Versione in SolidEdge della struttura del primo piano di Trigger con la collocazione dello scintillatore.

estremi delle parti di larghezza maggiore di quella delle aste della croce, impiegate per il fissaggio tramite viti ai supporti. Le due croci in poron, una che precede lo scintillatore, l'altra successiva, sono invece uguali.

La definizione del volume solido ha richiesto pertanto la descrizione delle misure delle aste della croce in poron e di quella in fibra di carbonio, e anche un'inizializzazione delle dimensioni degli estremi di quest'ultima. Sono state poi presentate le dimensioni dello scintillatore ed infine quelle dei cuscinetti in poron e dei supporti in fibra.

La realizzazione delle croci e del volume fisico è stata effettuata utilizzando operazioni di fusione tra i vari pezzi e andando a collocarli precisamente nel volume, assieme ai cuscinetti ed ai supporti laterali cui devono corrispondere gli estremi della croce in fibra di carbonio e i limiti delle croci in poron (Figura 3.10).

La seconda croce di poron è stata replicata a partire dalla prima e posta subito dopo il piano di scintillatore, per il quale va fatto osservare il procedimento di realizzazione.

Come si nota infatti, non si tratta geometricamente di un semplice paral-

3.5 Realizzazione del Trigger

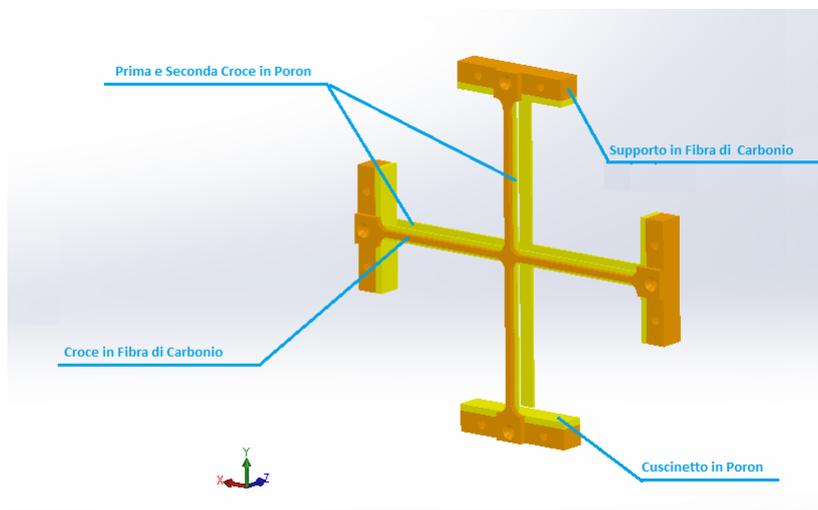


Figura 3.10: Versione in SolidEdge della struttura del secondo piano di Trigger con la croce in fibra di carbonio, le croci anteriore e posteriore in poron, i cuscinetti in poron e i supporti in fibra di carbonio.

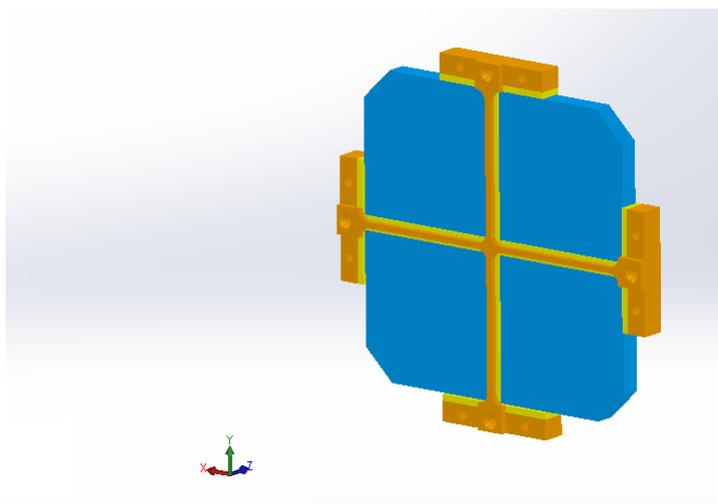


Figura 3.11: Versione in SolidEdge della struttura del secondo piano di Trigger con collocato il piano di scintillatore.

lelepipedo, poiché agli angoli sono stati effettuati dei tagli per permettere la collocazione dei fotomoltiplicatori (Figura 3.11). GEANT4 non prevede né la creazione di un tale tipo di volume né la rimozione di tale parte di volume in modo automatico, pertanto è stato necessario studiare una soluzione alternativa che ha portato alla creazione del piano di scintillatore creato con l'unione di due prismi trapezoidali, alla cui base è stato attaccato un parallelepipedo (Figura 3.12).

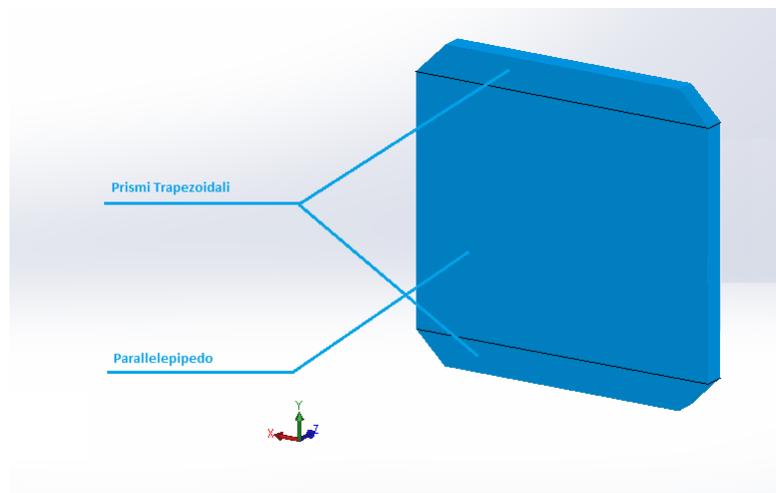


Figura 3.12: Versione in SolidEdge dello scintillatore: è possibile vedere la divisione in prismi e parallelepipedo di cui è composto.

3.6 Realizzazione del Calorimetro

Una volta formate le croci di poron, definito lo scintillatore e delineati supporti e cuscinetti, la realizzazione del calorimetro si è rivelata piuttosto immediata concettualmente, non richiedendo la definizione di nuovi materiali e necessitando solamente la creazione della croce in fibra di carbonio, leggermente diversa rispetto a quella vista nel piano S2 del Trigger, poiché dotata di un'estremità più larga.

È stato pertanto descritto il numero di scintillatori e sulla base di questo è stata realizzata una replica di 15 volumi medesimi contenenti la nuova croce in fibra di carbonio e gli altri pezzi già formati per il secondo piano del

3.6 Realizzazione del Calorimetro

Trigger: la prima croce di poron, lo scintillatore coi lati tagliati, le costole e i cuscinetti, ed infine la seconda croce di poron.

La parte di realizzazione degli scintillatori antecedenti al LYSO pertanto è consistita di fatto in una singola realizzazione di un volume che fosse replicabile nella sua interezza, e nella sua collocazione di un numero voluto di volumi pari ad esso.

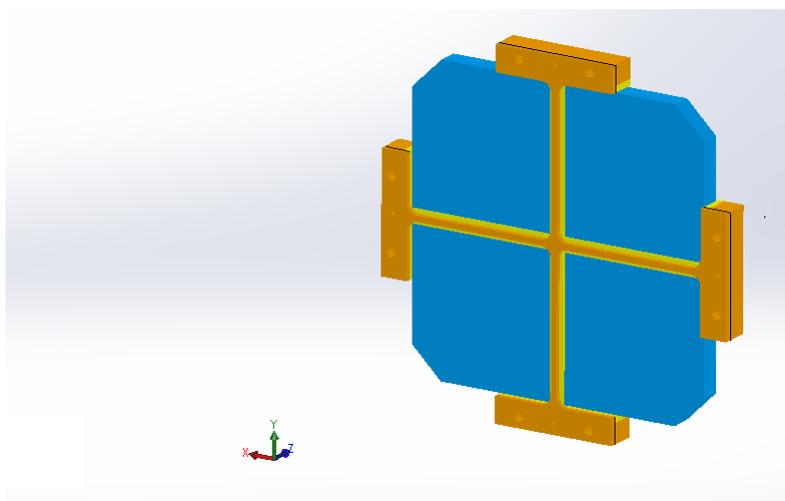


Figura 3.13: Versione in SolidEdge del piano replicato per la realizzazione della torre di 15 scintillatori. Si noti la croce in fibra di carbonio di diversa conformazione rispetto a quella del Trigger S2.

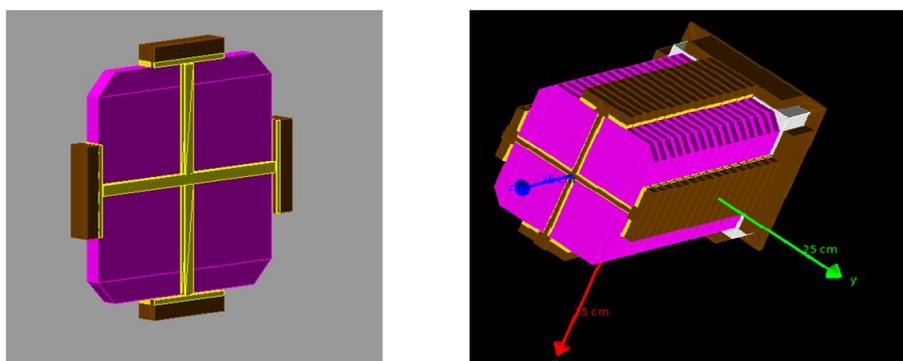


Figura 3.14: Versione in GEANT4 del piano replicato per la realizzazione della torre di 15 scintillatori.

Per quanto riguarda la parte finale del Calorimetro, sono state realizzate con lo stesso procedimento descritto precedentemente le croci di sostegno

3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

antistanti al LYSO e non comprese nelle repliche, rispettivamente una in fibra di carbonio attaccata ad un'altra croce di poron legata direttamente alla parte esterna del LYSO (Figura 3.14); inoltre, sono state descritte le dimensioni delle costole in fibra di carbonio attorno al LYSO.

I 9 cubi di LYSO, formati da un cubo di materiale scintillatore ricoperto da uno strato di teflon, sono stati realizzati a partire dall'indicazione delle dimensioni del volume solido di un solo cubo completo di strato di teflon, e dalla descrizione dei materiali teflon e LYSO richiamati poi nel volume logico.

La collocazione all'interno del volume e quindi la descrizione del volume fisico sono consistite in una replica di 3 cubi di LYSO ricoperto di teflon, prima lungo l'asse X e successivamente della replica per tre volte lungo l'asse Y del piano comprendente i tre cubi. In tal modo sono stati realizzati i 9 cubi con le corrette collocazioni, cui è seguita la collocazione delle costole esterne in fibra di carbonio (Figura 3.15, a).

La piastra finale invece è stata disegnata a partire dalla descrizione di un semplice parallelepipedo in fibra di carbonio cui, tramite alcune classi sono stati applicati i fori che ospitano i fotomoltiplicatori legati ai cubi di LYSO: naturalmente anche qui si è eseguito un processo di replica che è consistito nella creazione prima di un solo foro, ovvero la rimozione di un disco di materiale, e nella successiva replica in altri 8 punti (Figura 3.15, b).

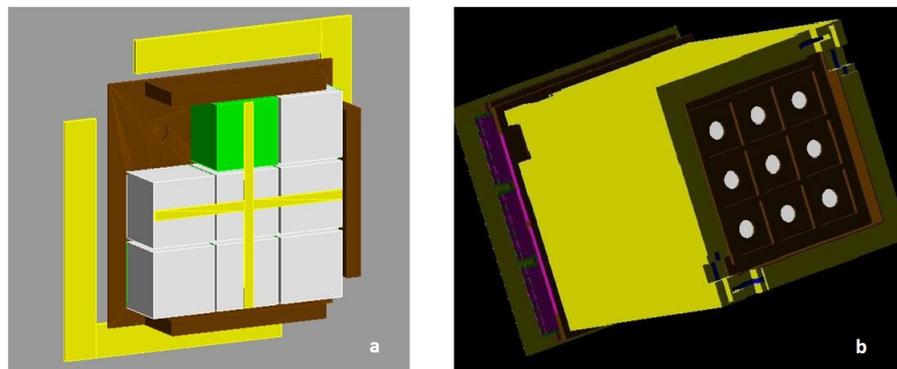


Figura 3.15: Versione in GEANT4 del LYSO e della piastra finale forata.

3.7 Realizzazione del VETO e del contenimento laterale

Come spiegato nel capitolo precedente, vi sono 4 strati di materiale che rivestono il calorimetro lateralmente e posteriormente. Partendo dal volume più interno fino al più esterno sono presenti: un primo piano in fibra di carbonio, uno in poron, un VETO scintillatore, e un altro piano più esterno nuovamente in poron.

La definizione del volume logico non ha richiesto la descrizione di nuovi materiali, essendo gli scintillatori del VETO medesimi a quelli del calorimetro. La realizzazione di tutti i pezzi di rivestimento, sebbene non presenti novità da un punto di vista tecnico o di utilizzo di nuove classi specifiche, è stata condizionata dalla difficoltà nel porre al posto giusto i fori per i fotomoltiplicatori del VETO e gli spazi destinati all'incastro dei piani successivi.

Ogni rivestimento, infatti, non può essere descritto come semplice parallelepipedo, bensì come insieme di parallelepipedi opportunamente disposti in modo da lasciare dello spazio nel posto destinato al fotomoltiplicatore, come si può notare in Figura 3.16, a,c. In alcuni casi, pertanto, la versione finale di un layer è composta da 3 o anche 4 pezzi differenti uniti tramite la classe di fusione di GEANT in modo tale da rispettare le presenze dei fori.

Particolare menzione va fatta al rivestimento finale in fondo al calorimetro che si presenta con 2 angoli opposti tagliati (Figura Figura 3.16, b). Di nuovo, non essendo disponibile una classe in GEANT4 che realizza tale figura, la soluzione geometrica per tale pezzo è stata quella di realizzarlo come due prismi trapezoidali ruotati di 45 gradi lungo l'asse Z e uniti tramite le basi.

Sono infine state aggiunte le coperture in nomex, precedentemente descritto come materiale e richiamato nella gestione del volume logico, e fibra di carbonio.

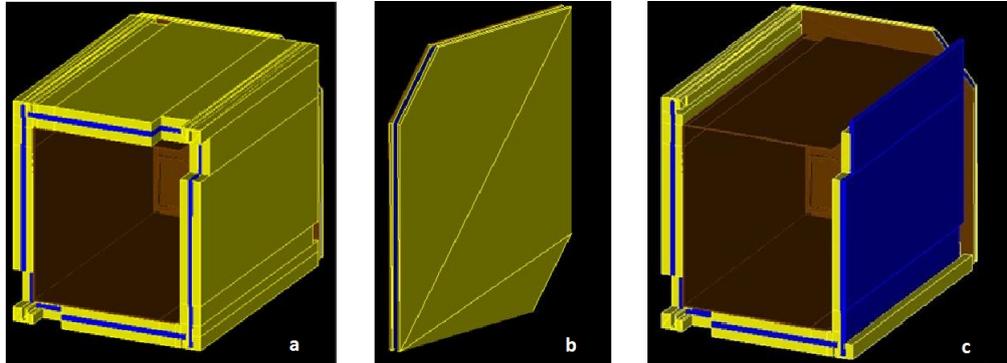


Figura 3.16: Versione in GEANT4 delle coperture laterali (a, c) e finale (b) col VETO scintillatore.

3.8 La geometria realizzata

Il risultato finale della geometria codificata è, come ci si era prefissati, una versione geometrica molto simile a quella in seguito realizzata fisicamente, sulla base della quale poter fare affidamento per una simulazione che restituisca dei dati coerenti con quelli poi riscontrati una volta in volo.

Analizzando il rivelatore pertanto sono stati creati i volumi del satellite in alluminio con la finestra oltre la quale è stato posto un foglio in mylar. Successivamente sono state collocati i due piani di semiconduttori segmentati di silicio a formare il Tracker, con i relativi supporti in fibra di carbonio, kapton e poron. È stata poi la volta del Trigger, con un primo piano S1 sezionato e i relativi sostegni e le rispettive barre, e un secondo piano S2, da cui si è partiti per realizzare, replicandolo in buona parte, la serie di scintillatori che formano il calorimetro. La base del rivelatore si è formata con l'inserimento dei cubi di LYSO rivestiti in teflon e una piastra finale forata in fibra di carbonio. Infine si è realizzato il primo involucro contenente il VETO scintillatore e i volumi entro i quali è posto, e la seconda copertura in nomex e fibra di carbonio che avvolge lateralmente e posteriormente il rivelatore.

IMMAGINI

3.9 La produzione dei dati col simulatore

Non tutti i volumi creati con GEANT sono sensibili, cioè in grado di misurare l'energia depositata dalle particelle, per il fatto che gli unici per cui ciò è di interesse sono quelli che verranno letti in volo, ovvero i rivelatori. Nel caso del rivelatore HEPD, i volumi che producono dei risultati dovuti all'interazione con le particelle sono: i due semiconduttori al silicio, gli scintillatori del Trigger, gli scintillatori del calorimetro (LYSO compreso) e quelli del VETO.

Una volta gestito l'intero set di dati implementati per i volumi, un programma eseguibile di GEANT4 legge come argomento la libreria contenente la descrizione della geometria del rivelatore realizzata, e procede pertanto con l'impostazione dei parametri di simulazione, dichiarati nel dettaglio nel capitolo successivo.

Viene dunque specificata la *physics list* menzionata precedentemente, una collezione di dati volti a descrivere i processi fisici in gioco e i modelli da voler adottare. All'interno della *physics list*, esiste una libreria della simulazione che fornisce l'input chiamata *datacard* contenente comandi di impostazione della simulazione stessa quali il tipo di particella, il numero di particelle del flusso interagente, lo spettro energetico di cui queste particelle dispongono, la parametrizzazione della geometria di sparo e l'angolo con cui le particelle vengono sparate.

Un'altra libreria compilata e chiamata *dataformats* contiene invece tutte le informazioni che si vogliono estrarre da ogni volume sensibile, quali l'energia rilasciata dalla particella, il punto di interazione della particella e l'angolo con cui interagisce.

Un programma eseguibile finale, contenente tutti i parametri di simulazione, la geometria realizzata e la descrizione dei dati ricercati in output, viene lanciato per dare il via alla simulazione.

L'output dei dati gestito dal software di GEANT4 produce file binari in formato ROOT, un ambiente di lavoro che sarà descritto nel capitolo seguente, organizzati in un pacchetto dati suddiviso in *trees* che a loro volta contengono *branches*, organizzate in *leaves* relative: ad esempio un albero può contenere tutte le informazioni relative alle interazioni della particelle in

3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

un volume sensibile e un ramo presente in tale albero può contenere il valore dell'energia rilasciata nel volume relativo. Tali dati sono relativi ai singoli rilasci di energia negli elementi sensibili del rivelatore e a partire da questi dati vengono estratte le informazioni necessarie a produrre un'informazione elaborata. L'insieme delle informazioni prodotte dalla simulazione fornisce le informazioni note come *Monte Carlo Truth*.

Nel capitolo successivo verranno mostrati i risultati dell'analisi eseguita elaborando queste informazioni: tramite esse, si noterà che è stato possibile estrarre dati utili ai fini della simulazione della accettazione angolare e totale, della risoluzione energetica e della discriminazione tra il segnale dovuto a elettroni e quello dovuto a protoni.

Capitolo 4

Simulazione ed analisi dei risultati

Introduzione

Una volta spiegato il fenomeno fisico oggetto di studio della missione spaziale CSES-Limadou (raccontato nel Capitolo 1), compresa la struttura del rivelatore (illustrata nel Capitolo 2), e chiarito il processo di costruzione virtuale della stessa (all'interno del Capitolo 3), resta da fare luce sulle qualità dello strumento realizzato, codificato ed analizzato.

In questo ultimo capitolo si illustra il fine per cui il lavoro di tesi è stato effettuato, ovvero la comprensione degli aspetti qualitativi di misurazione della radiazione da parte del principale attore in scena, il rivelatore HEPD; questa fase è il risultato conclusivo della simulazione dell'interazione tra le particelle della radiazione e il rivelatore.

Vengono pertanto descritti gli scopi che la simulazione intende raggiungere, le caratteristiche con cui è stata effettuata tale simulazione, e presentate le dovute analisi dei risultati ottenuti.

In prima battuta, vengono chiariti gli obiettivi che hanno spinto a svolgere la simulazione e questa tesi, e che si sono preposti di ottenere col fine di avere una miglior comprensione dei dati che il rivelatore HEPD otterrà una volta orbitante: ciò viene illustrato nella Sezione 4.1.

Tutti gli aspetti geometrici ed energetici che sono stati curati e con cui la simulazione è stata effettuata sono trattati nella Sezione 4.2. Come si vedrà

in questa sezione, i parametri con cui produrre una simulazione e la loro precisa individuazione sono frutto di uno studio accurato alla base.

Nella sezione 4.3 si troverà la parte fondante di questa tesi ovvero il significato dell'indagine condotta: dopo una breve introduzione in cui viene anche illustrato anche ROOT, il pacchetto software per l'analisi di dati di processi fisici, sono presenti più sottosezioni, ognuna delle quali descrive una caratteristica del rivelatore, riportando i risultati dell'analisi della simulazione.

La sezione 4.4 conclusiva si propone infine di raccogliere le informazioni dichiarate in un sunto globale di quanto emerso.

4.1 Obiettivi della simulazione

L'obiettivo generale per cui viene svolta una simulazione attinente all'interazione tra la radiazione e un rivelatore è quello di effettuare due tipi di verifiche: osservare che effettivamente lo strumento sia in grado di misurare quanto viene richiesto dalla missione in cui presterà servizio e valutare la qualità dei dati misurati per conoscerne le proprietà.

È pertanto necessario in primo luogo verificare la possibilità che ha il rivelatore di analizzare un flusso di particelle, ovvero si ricerca la parte di angolo solido posta in fronte allo strumento in grado di raccogliere le particelle che provengono dall'ambiente esterno, le quali possono entrare nel rivelatore: questa proprietà si chiama accettazione angolare. Andando a valutarla, si capisce sostanzialmente quanta parte del flusso di particelle in cui è immerso il rivelatore può esser letta ed analizzata.

L'andamento dell'accettazione angolare è stato ricercato sia in funzione del *pitch angle* (l'angolo che si forma tra la traiettoria della particella e il campo magnetico locale, in questo caso cioè il vettore perpendicolare alla superficie dei semiconduttori, ovvero l'asse Z) con energia fissata, sia in funzione dell'energia (in tal caso si parla di accettazione totale), per comprendere a quale energia la misurazione del flusso (di elettroni e protoni) da parte del rivelatore è ottimizzata. Come precisato nel Capitolo 2, era richiesta dalla CNSA una accettazione angolare che coprisse almeno 70° del *pitch angle*.

4.1 Obiettivi della simulazione

È stata ricercata poi l'entità della risoluzione energetica (descritta nel Capitolo 2), qualità determinante per uno strumento volto alla rivelazione in ambito nucleare e di fondamentale importanza in questa missione, poiché conoscendo l'energia delle particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen si ha l'informazione anche circa l'energia di quelle che possono essere coinvolte nel fenomeno del *burst*, indagato dalla missione. Saper riconoscere l'energia di una particella interagente col rivelatore è di grande interesse per comprendere l'origine della stessa, quindi.

Una parte di grande importanza dell'analisi riguarda la discriminazione del tipo di particella che viene processata dal rivelatore HEPD. Questo strumento infatti non prevede a bordo un magnete, grazie al quale capire che particella ha interagito sarebbe di grande facilità, e pertanto è stato necessario utilizzare un metodo alternativo per indagare se l'energia misurata in un evento sia da attribuirsi ad un elettrone o ad un protone.

Si è infine andato a valutare il piano in cui una data particella di una certa energia termina il proprio percorso all'interno del rivelatore, ovvero lo *stopping plane*: il motivo per cui è stato condotto un tale tipo di ricerca è legato allo studio della configurazione della soglia per cui un evento di interazione con una particella è considerato valido; ovvero, poiché non tutte le particelle che interagiscono nel rivelatore sono buone per un'analisi dei dati (per esempio, quelle che non rilasciano la totalità della loro energia entro il rivelatore sono da scartare, come vedremo in dettaglio) è necessario sapere quali e quanti piani devono o non devono subire un rilascio energetico da parte della particella, affinché un evento sia etichettato come valido ai fini dello studio del fenomeno.

Lo studio dei piani del rivelatore in cui le particelle si fermano ha portato ad un'analisi di varie configurazioni del *trigger*, cioè della soglia che delinea la validità dell'evento misurato: le diversità tra queste configurazioni sono state poi indagate in modo tale da capire quale potesse essere la risposta nei vari casi.

Per non creare confusione, si intenderà d'ora in poi col nome proprio *Trigger*, l'insieme dei piani di scintillatori S1 e S2, mentre col nome *trigger*, la condizione di accettazione di evento di rilascio energetico ad opera di una

particella.

Gli obiettivi che questa analisi si pone di raggiungere possono essere riassunti come la raccolta di informazioni circa:

- l'accettanza angolare
- l'accettanza totale
- la risoluzione energetica
- le modalità di identificazione tra elettroni e protoni
- lo stopping plane
- le configurazioni di trigger

4.2 Parametri della simulazione

La determinazione dei parametri con cui svolgere la simulazione gioca un ruolo importante nei risultati della simulazione stessa: scegliendo in modo non accurato il metodo con cui elaborare l'interazione tra radiazione e rivelatore si corre il rischio di ottenere dei dati privi di qualsiasi utilità o legame con quelli reali.

Questi parametri sono stati pertanto studiati ed in seguito codificati nella piattaforma GEANT al momento del processo di simulazione. In particolare, è stato necessario istruire il programma circa la generazione delle particelle, ovvero la loro energia, l'angolo con cui vengono sparate, la loro direzione, la superficie di provenienza da cui sono originate e la distanza della superficie dal rivelatore.

4.2.1 Energie di simulazione

Il lavoro di simulazione dell'interazione di elettroni e protoni con il rivelatore è stato sviluppato in due campagne diverse e con diversi parametri operativi. Il motivo per cui è stato necessario effettuare una simulazione ad energie fisse

4.2 Parametri della simulazione

è da ricondursi meramente alla necessità di conoscere la risoluzione energetica dello strumento: conoscendo l'energia infatti della particella e la varianza dell'energia totale rilasciata nell'intero strumento si ricava l'entità della risoluzione energetica, come spiegato nel Capitolo 2. La causa per cui si è resa necessaria una simulazione con energie che seguono una legge di potenza dei raggi cosmici (in seguito riportata) è dovuta ad un motivo fondamentale: discriminare gli elettroni dai protoni. Solo in tal modo, non essendo il rivelatore dotato di un magnete, è possibile avere certezza di quanto un segnale ad una data energia sia riconducibile ad una o all'altra particella, come in seguito verrà illustrato.

La prima simulazione è stata svolta pertanto ad energie fisse, cioè facendo interagire più flussi di protoni ed elettroni, ognuno dei quali ad una certa energia. Questa fase ha interessato un range di energie che per gli elettroni è compreso tra 3 MeV e 200 MeV, mentre per i protoni tra 30 MeV e 300 MeV (come visibile nella Tabella seguente).

Particella	elettroni	protoni
Energia Flusso 1	3 MeV	30 MeV
Energia Flusso 2	5 MeV	35 MeV
Energia Flusso 3	10 MeV	55 MeV
Energia Flusso 4	15 MeV	75 MeV
Energia Flusso 5	25 MeV	100 MeV
Energia Flusso 6	35 MeV	125 MeV
Energia Flusso 7	55 MeV	150 MeV
Energia Flusso 8	75 MeV	200 MeV
Energia Flusso 9	100 MeV	225 MeV
Energia Flusso 10	125 MeV	250 MeV
Energia Flusso 11	150 MeV	275 MeV
Energia Flusso 12	200 MeV	300 MeV

Per ognuna delle energie indicate in Tabella sono state generate 5 milioni di particelle.

Come si vede, per i protoni il range energetico parte da un intero ordine di grandezza superiore rispetto a quello degli elettroni: ciò è da ricondursi al fatto che, come detto nel Capitolo 2, le particelle cariche pesanti vengono fortemente assorbite dal mezzo attenuatore con cui interagiscono, al contrario gli elettroni hanno traiettorie più erratiche ma sono allo stesso tempo più penetranti; a energie inferiori a 30 MeV non si sarebbe ottenuto alcun protone in grado di dare un'interazione valida col rivelatore.

Da uno studio condotto, sono stati concepiti i valori massimi dei range delle energie di sparo per cui la particella possa ancora rilasciare la totalità della sua energia all'interno del rivelatore: per le due particelle i valori sono rispettivamente 200 MeV e 300 MeV.

L'allargamento del range energetico dei protoni fino a 300 MeV è sempre dovuto al forte assorbimento del mezzo che dunque ne consente un rilascio energetico maggiore.

Anche l'analisi della risoluzione energetica è dovuta al fatto che non è presente un magnete a bordo: tramite esso, osservando la curvatura della particella analizzata, sarebbe infatti possibile risalire all'energia di cui è dotata.

La seconda campagna di simulazione è stata svolta con l'ipotesi che sia elettroni che protoni seguissero una legge di potenza: tale accortezza è dovuta alla fisica dei raggi cosmici, il cui spettro energetico del flusso è in funzione dell'energia tramite la dipendenza [50]:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (4.1)$$

con α , indice spettrale.

L'indice spettrale α_{e^-} utilizzato per gli elettroni è pari a -2,2, quello utilizzato i protoni α_p è pari a -2,7.

Sia per gli elettroni che per i protoni, sono state sparate 100 milioni di particelle in questo caso, che seguono l'andamento illustrato nelle Figure 4.1 e 4.2, con un range energetico che per elettroni si estende da 1 MeV a 200 MeV, mentre per protoni è compreso tra 10 MeV e 500 MeV (questo range

4.2 Parametri della simulazione

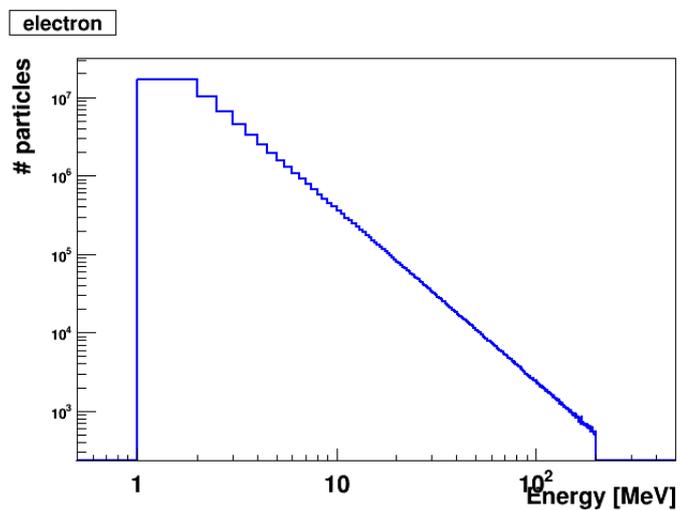


Figura 4.1: Flusso di elettroni generato per l'analisi con le leggi di potenza.

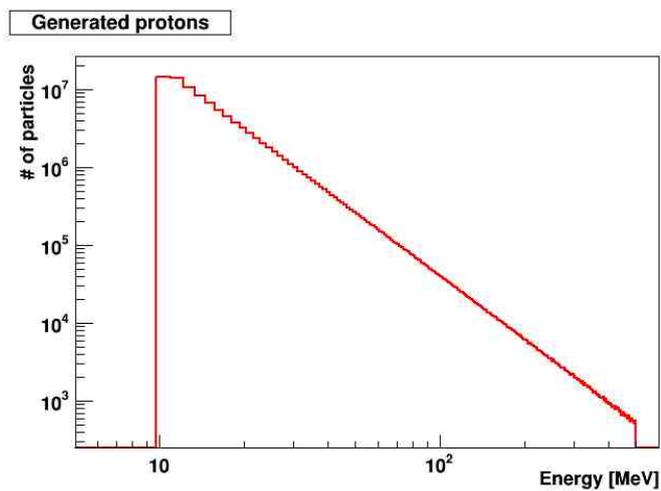


Figura 4.2: Flusso di protoni generato per l'analisi con le leggi di potenza.

molto ampio è dovuto alla volontà di assicurarsi una lettura completa dei protoni altamente energetici).

Una presentazione di un codice realizzato contenente le informazioni di generazione delle particelle è contenuto nell'Appendice B di questa tesi.

4.2.2 Geometria di simulazione

Una volta realizzata virtualmente sulla piattaforma GEANT4 la struttura finale del rivelatore, sono state effettuate tutte le simulazioni con essa come oggetto, ipotizzando un flusso di particelle proveniente da una superficie perpendicolare all'asse Z, cioè perpendicolare a tutti i piani di cui si compone il rivelatore. Come superficie di generazione delle particelle si è scelto di creare un rettangolo, alto 55 cm e largo 75 cm (cioè pari ad un lato del Volume Mondo), posto ad una distanza di 3 cm dalla finestra che ospita il mylar (Figura 4.3), su cui è centrata (Figura 4.4).

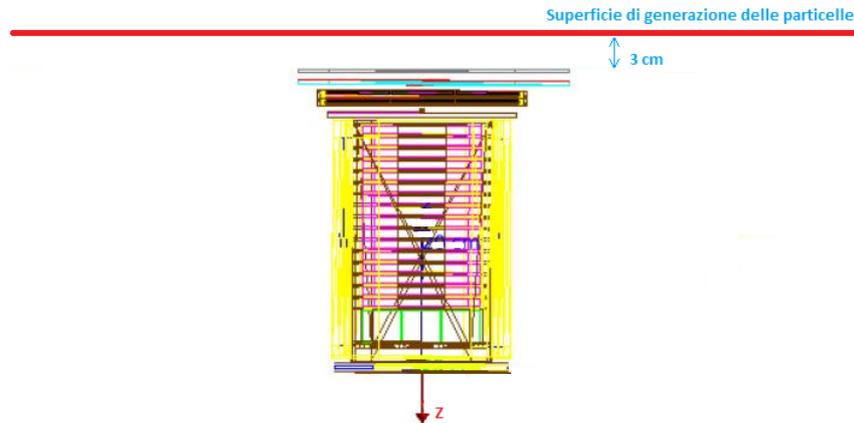


Figura 4.3: Vista laterale della superficie di generazione, in rosso in alto, e del rivelatore HEPD realizzato in GEANT4.

Porre la superficie di generazione delle particelle ad una distanza così ravvicinata è stato necessario per aver una corretta considerazione dell'accettanza angolare: a distanze maggiori infatti la superficie di sparo sarebbe stata troppo lontana per dare un risultato giusto e accettabile, visto che non si sarebbe tenuto in considerazione tutto l'angolo solido.

4.2 Parametri della simulazione

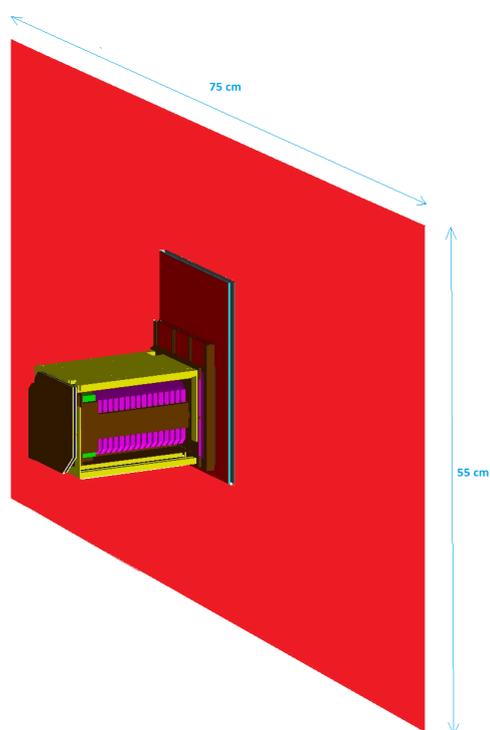


Figura 4.4: Vista in prospettiva della superficie di generazione, in *rosso*, e del rivelatore HEPD.

Le particelle sono state inoltre sparate con direzione isotropa dalla faccia in fronte alla finestra di mylar e da posizioni di generazione casuali (Figura 4.5) in tutte le simulazioni ed in tutte le campagne: in questo modo si è ricreato virtualmente un ambiente in prima approssimazione molto simile a quello cui sarà sottoposto fisicamente il rivelatore, con particelle che interagiscono con esso da direzioni diverse e con angoli diversi.

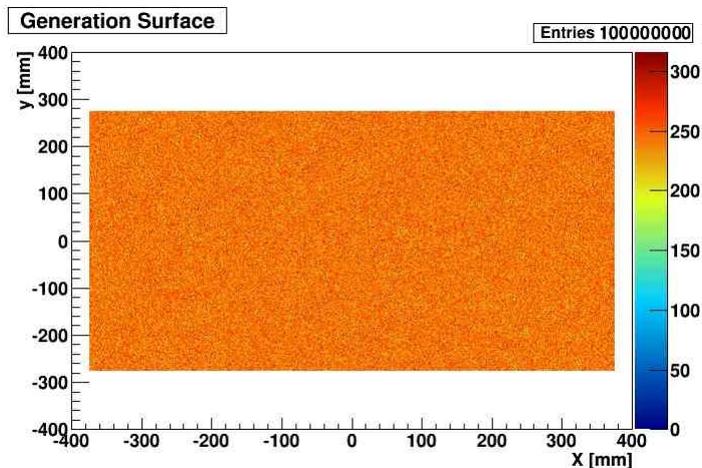


Figura 4.5: Il colore mostra il numero di particelle generate per ogni punto della superficie di generazione, sia nel caso di elettroni che in quello di protoni, qui raffigurato per una simulazione con la legge di potenza. Come si può notare, il numero di particelle generate è pressoché uniforme su tutta la superficie.

4.3 Analisi della simulazione

I risultati della simulazione elaborata ad energie fisse sono stati effettuati tramite ROOT, dato che GEANT4 fornisce direttamente dati estraibili e manipolabili con questo pacchetto di analisi.

Si faccia presente che nel corso dell'analisi della simulazione verrà utilizzato col simbolo $Tk1$, il primo piano del Tracker, col simbolo $Tk2$, il secondo piano del Tracker, col simbolo $S1$, il primo piano del Trigger, col simbolo $S2$, il secondo piano del Trigger, coi simboli P_i , i piani della torre del calorimetro e con $P17$ o $LYSO$, la matrice formata dai blocchi di LYSO.

4.3 Analisi della simulazione

Sviluppando un codice in grado di effettuare un ciclo su tutte le particelle sparate alle varie energie, sono state valutate le interazioni avvenute tra i flussi e i volumi sensibili creati nella geometria oggetto della simulazione.

Tramite questo codice è stato possibile ottenere informazioni circa l'interazione avvenuta tra la particella e le parti sensibili del rivelatore (Tracker, Trigger, Calorimetro e VETO).

Sono state inoltre valutate delle condizioni per cui un evento sia ritenuto valido ai fini dell'analisi. Una prima condizione che un evento deve soddisfare per essere stabilito come buono è la *condizione di trigger*. Con tale condizione si è inteso comprendere tutte quelle particelle che hanno un rilascio energetico almeno nei due piani di Tracker, nel piano S1 e nel piano S2 del Trigger (Figura 4.6). Pertanto, perché un evento energetico rivelato sia effettivamente poi elaborato e non scartato deve prevedere che la particella responsabile dei rilasci energetici passi nei 4 piani di rivelatore menzionati sopra.

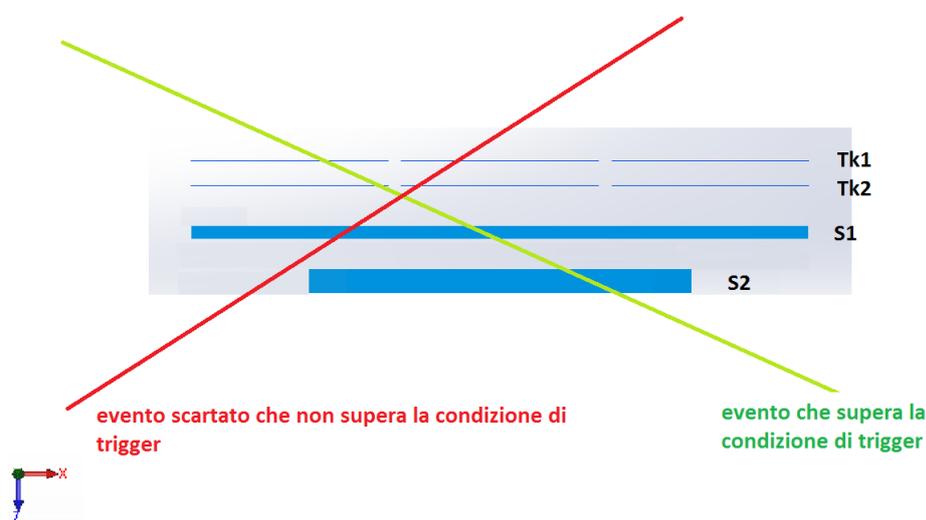


Figura 4.6: La condizione di trigger. Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2.

Da un punto di vista operativo, tale condizione è stata codificata richie-

dendo la considerazione delle sole particelle la cui energia rilasciata nei due piani di tracker, nel piano S1 e nel piano S2 sia maggiore di 0. Tale richiesta è possibile in virtù del fatto che il programma di analisi è in grado di leggere il singolo rilascio energetico all'interno di un dato volume sensibile.

Oltre a ciò, si ricorda che è necessario che l'energia di cui una particella è dotata sia interamente persa nel rivelatore, altrimenti viene vanificato ogni proposito di misurare la risoluzione energetica: bisogna dunque porre un'ulteriore condizione, la così detta *condizione di confinamento*.

Questa seconda condizione si ottiene impostando nel codice la volontà di tenere in considerazione solo gli eventi che non prevedono rilascio energetico nel VETO scintillatore.

L'intersezione delle due condizioni per dichiarare una particella interagente valida crea la *condizione di good hit* (Figura 4.7), ovvero di validità della particella, che comporta dunque che siano soddisfatte queste richieste:

- $E_{Tracker_1} > 0$
- $E_{Tracker_2} > 0$
- $E_{S1} > 0$
- $E_{S2} > 0$
- $E_{VETO} = 0$

ove con $Tracker_1$, si intende il primo semiconduttore, mentre con $Tracker_2$, ovviamente il secondo.

Con la richiesta di non interazione in alcun piano del VETO si rimuovono e tralasciano anche tutti i segnali che possono esser forniti da eventi di interazione di particelle che entrano lateralmente nel rivelatore e che per processi di scattering potrebbero essere resi validi interagendo coi piani che compongono la configurazione di trigger.

Come si può intuire, di tutte le particelle generate dalla superficie di sparo (Figura 4.5), la maggior parte di quelle che vengono ritenute valide dall'analisi della simulazione (cioè che superano la condizione di *good hit*),

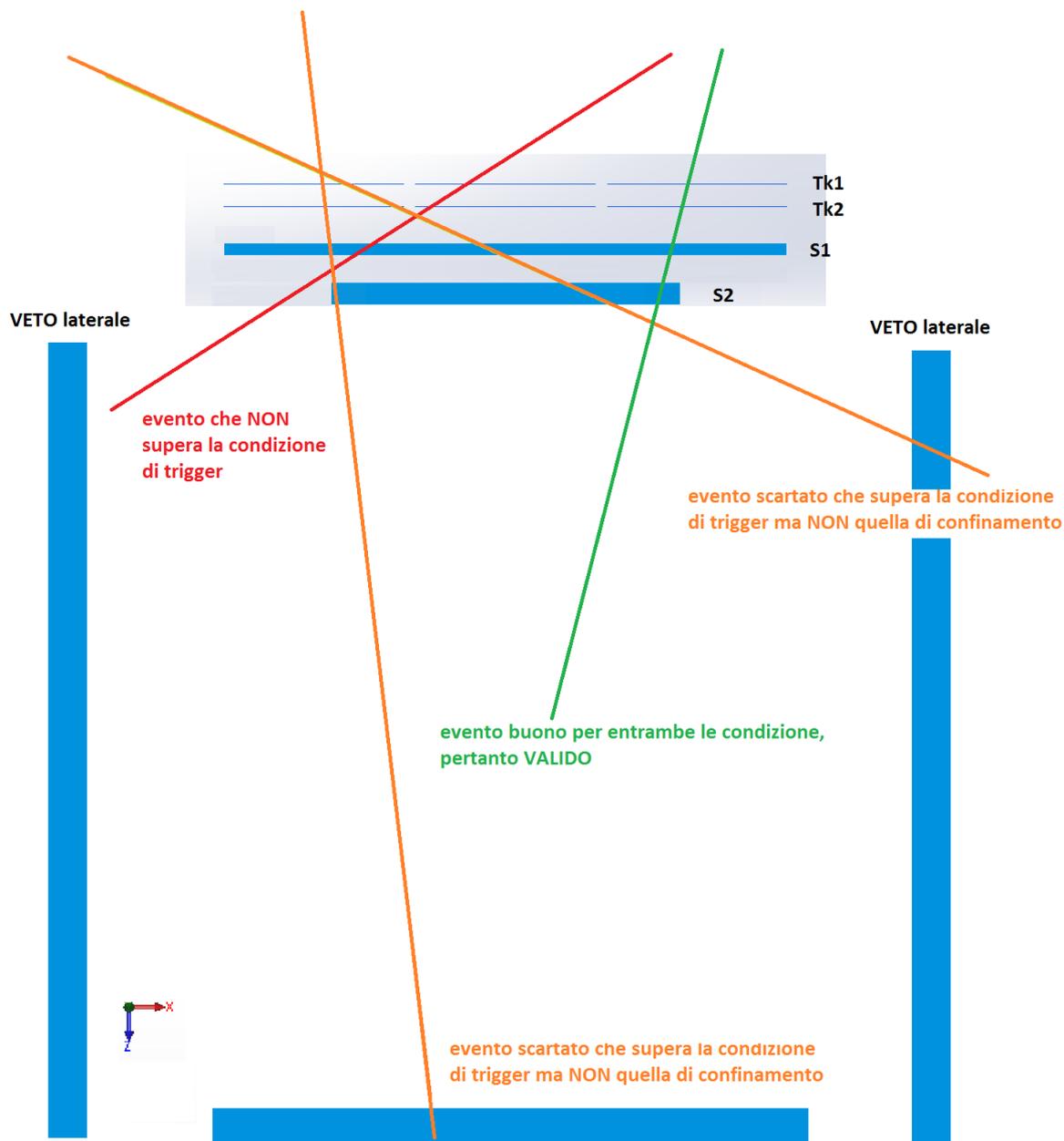


Figura 4.7: La condizione di *good hit*. Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2.

e che pertanto sono in accettazione (Capitolo 2, Sezione 3.6), sorgono per la maggior parte di fronte alla finestra di mylar (Figura 4.8). Il motivo è dovuto al fatto che andando a rimuovere tutte le interazioni di particelle col VETO, le particelle che vengono generate da zone ai lati della superficie devono avere angoli e direzioni tali da soddisfare la condizione di trigger e dunque di rara probabilità. Al contrario, le particelle generate di fronte alla finestra che ospita il piano di mylar possono sorgere con un range di angoli e direzioni più ampio per soddisfare la condizione di trigger.

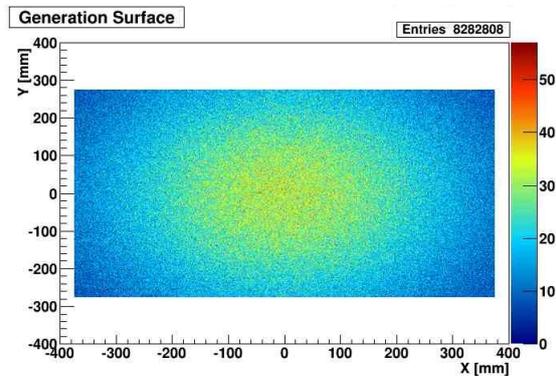


Figura 4.8: Il colore mostra il numero di particelle generate per ogni punto della superficie di generazione che vengono considerate valide, e dunque in accettazione (in questo caso è rappresentata la superficie della simulazione in legge di potenza). Come si può notare, il colore varia molto a seconda che ci si trovi in una zona di fronte alla finestra di mylar, piuttosto che in una zona remota della superficie.

Dalla condizione di *good hit* si ottiene un evento pulito utile alla ricerca della accettazione angolare, la cui relazione con l'accettazione geometrica è data dal fattore geometrico, come illustrato nel Capitolo 2. L'accettazione angolare è figurativamente il cono di provenienza delle particelle, che ha come base la superficie di generazione, in grado di esser preso in esame (Figura 4.9).

L'accettazione totale indica l'accettazione geometrica in funzione dell'energia. Una volta misurata l'accettazione angolare per ogni energia, associando al singolo bin di energia la relativa accettazione angolare, si può ricavare quella totale e quindi vedere a quale energia, la vista del rivelatore è ottimizzata, ovvero quando l'accettazione totale è maggiore. Nel nostro caso sono state usate le energie della simulazione ad energie fisse. Sempre grazie alla simula-

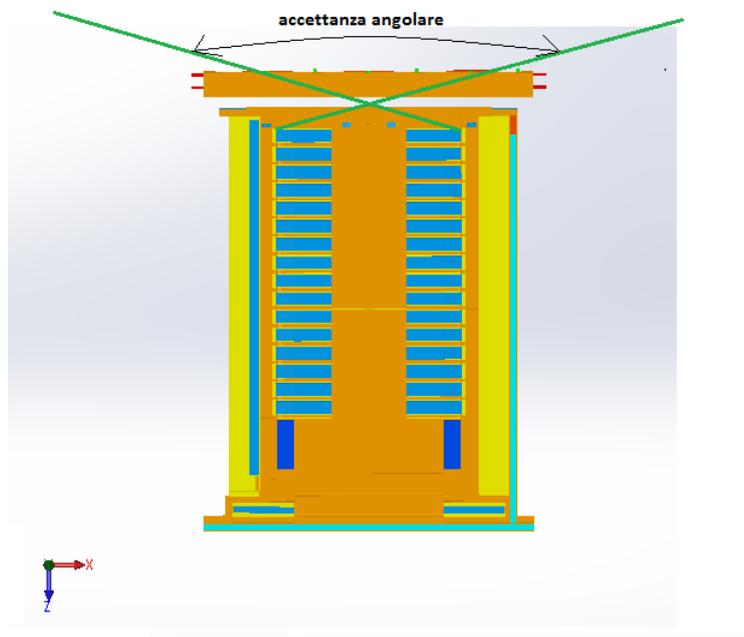


Figura 4.9: L'illustrazione del significato della accettanza angolare in 2 dimensioni. In 3 dimensioni, figurerebbe come un cono. Si noti che i lati che vanno a formare l'angolo, e quindi il cono, partono dagli estremi di S2 per giungere agli estremi opposti del primo semiconduttore del tracker comprendendo così la massima accettanza angolare possibile.

zione condotta ad energie fisse, si è reso possibile il calcolo della risoluzione energetica, a partire dalla conoscenza dell'energia con cui la particella è stata originata e osservando la totalità dell'energia persa all'interno del rivelatore. Come descritto nel Capitolo 2, la risoluzione energetica è data dal rapporto tra la deviazione standard dell'energia e l'energia di generazione della particella.

Analogamente i risultati della simulazione elaborata con particelle emesse ad energie in legge di potenza ed analizzati con ROOT hanno previsto la scrittura di un codice che permetta di conoscere la traiettoria effettuata dalla particella, l'energia con la quale sono state generate ed il rilascio di energia nell'interazione con i volumi sensibili. L'analisi condotta con le energie fornite dalla legge di potenza è stata necessaria per la parte riguardante la discriminazione tra un evento dovuto ad elettroni ed uno dovuto a protoni: per questo compito è necessario conoscere l'energia rilasciata in un piano del Tracker e quella rilasciata nell'intero rivelatore per ogni energia all'interno del range energetico di riferimento. Tramite il metodo $\Delta E/E$, che verrà presentato nella Sottosezione 4.3.5, è possibile valutare i diversi rilasci energetici in un piano del Tracker per protoni ed elettroni e quindi comprendere se un evento sia dipendente dall'una o dall'altra particella.

Infine, è presente uno studio condotto sulla condizione di trigger che può prevedere altre configurazioni. In questo studio si delineeranno le qualità e le differenze di diversi tipi di trigger ed i motivi che possono portare all'utilizzo di uno piuttosto che un altro. Per effettuare questo studio è stata prima condotta un'analisi circa il piano su cui avviene la fine del cammino per una data particella ad una certa energia, cioè dove si ferma, in modo tale da capire quanto l'inserimento di un piano all'interno della condizione di trigger modifichi il numero di eventi validi. Oltre a ciò sono stati ricavati i flussi in accettazione geometrica per le diverse condizioni di trigger.

4.3.1 ROOT

Il sistema *open source* di pacchetti software e librerie ROOT è stato sviluppato dal CERN tra il 1994 e il 2002 per l'analisi di set di dati di grandi

dimensioni. ROOT utilizza il linguaggio di programmazione C++ ed utilizza, come GEANT4, un metodo di programmazione ad oggetti; è attualmente lo strumento d'analisi maggiormente usato in fisica nucleare e contiene molte funzionalità finalizzate al suo studio.

Questa piattaforma permette di elaborare utili processamenti di dati ed ottenere da essi istogrammi in più dimensioni e relativi grafici, oltre a dare la possibilità di eseguire *fit* di curve, numerose operazioni matematiche, fornire parametri statistici e gestire simulazioni col metodo Monte Carlo. Poiché è provvisto un pacchetto di interfaccia grafica, ROOT fornisce anche immagini. Il sistema con cui ROOT immagazzina i dati è piramidale e si divide in *trees*, *branches* e *leaves*, ognuna contenente la successiva, come spiegato nel Capitolo 3.

La grande utilità di ROOT, la qualità della sua gestione dati e il fatto che si basi sul linguaggio C++ hanno fatto sì che il suo utilizzo si sia esteso anche all'ambito biologico e finanziario.

4.3.2 Accettanza angolare

In questa sezione si tratta in modo approfondito l'accettanza angolare, descritta nella relativa sezione del Capitolo 2.

Tale analisi è avvenuta con alla base sempre l'ipotesi di *good hit*, cioè con le condizioni sopra elencate soddisfatte.

Sia per elettroni che per protoni è prima stata ricercata l'accettanza geometrica tramite un codice di analisi della simulazione, e successivamente è stata effettuata una moltiplicazione per πA , con A l'area della superficie del primo semiconduttore. In tal modo, per ogni valore di energia con cui una particella è stata originata, si è potuto trovare l'accettanza angolare in relazione al *pitch angle* ϑ .

Nelle Figure 4.11 e 4.13 pertanto viene mostrata l'accettanza angolare, cioè il numero di particelle valutate dal rivelatore per cm^2 e *steradiante*, in funzione dell'angolo ϑ (*pitch angle*), per diverse energie.

Un valore maggiore dell'accettanza angolare comporta una lettura maggiore da parte dello strumento per quel valore di ϑ e per una certa energia.

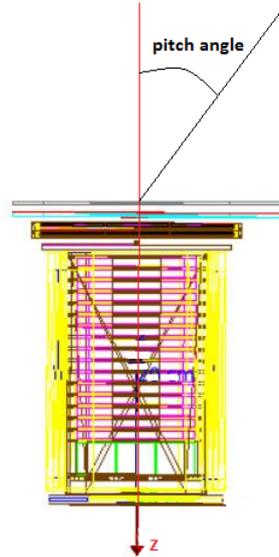


Figura 4.10: L'illustrazione del significato di *pitch angle* per il rivelatore HEPD.

Come si può osservare, sia per elettroni che per protoni a bassi valori del *pitch angle* corrisponde un numero di particelle molto basso: ciò è dovuto al fatto che, affinché a bassi angoli ci sia un evento valido, è necessario che la particella sia generata praticamente di fronte alla superficie del semiconduttore. Sparando isotropicamente però, la probabilità che una particella venga generata con un *pitch angle* nullo o prossimo a zero è minore rispetto a quella con un angolo maggiore, perché la creazione casuale delle particelle prevede che siano molte più le direzioni possibili per un angolo ad esempio di 90° gradi, anziché la sola ed unica direzione possibile per un angolo di 0°.

Nel primo caso infatti solo una infinitesima parte dell'angolo solido può essere coperta, ovvero quando lo sparo è perfettamente perpendicolare alla superficie, nel secondo invece aumenta decisamente incrementando la possibilità che lo sparo avvenga in ogni direzione possibile dello spazio. Con questa premessa, è possibile spiegare in parte l'aumento iniziale prima del picco, presente in ogni istogramma (Figure 4.11 - 4.14).

La salita che segue è spiegabile tenendo in considerazione la superficie da cui vengono create le particelle. Chiarito che a bassi angoli il numero

di particelle in accettazione angolare è dovuto a quelle che vengono sostanzialmente generate di fronte al primo piano del Tracker, si può comprendere che le particelle sparate in zone più decentrate della superficie di generazione necessitano di angoli maggiori perché possano interagire con i piani richiesti dalla condizione di *good hit*. Cioè, perché una particella generata in zone più laterali della superficie di generazione interagisca con i due piani di Tracker e i due piani di Trigger, occorre che abbia una maggior inclinazione rispetto ad una particella generata di fronte a questa serie di piani.

È lecito dunque aspettarsi un conteggio alto per angoli di circa 40-45 gradi, in grado di entrare nel rivelatore anche da parti della superficie più decentrate. Nel caso di elettroni (Figura 4.11), questo vale per energie inferiori a 55 MeV, energia oltre la quale il picco si porta ad un angolo minore, attorno a 20°: questo si spiega in virtù del fatto che per tali angoli il tragitto della particella all'interno del rivelatore è maggiore rispetto a quello ad angoli più grande; sarà dunque più facile che la particella a bassi angoli non vada ad interagire col VETO, non eliminando così il conteggio ad essa legata. È inoltre chiaro che ad elevati angoli è facile che la particella nemmeno tocchi una sola parte sensibile dello strumento, essendo sparata probabilmente altrove. A 90° il valore è nullo visto che le particelle sono generate parallelamente alla superficie di generazione.

Interessante è inoltre constatare la presenza di un secondo picco ad angoli più elevati all'aumentare dell'energia: esso è molto probabilmente dovuto alla presenza di fenomeni di scattering con alcune parti del rivelatore oltre ai casi rari, ma presenti, di particelle che compiono lunghi tratti nei singoli piani iniziali con angoli molto elevati.

Come illustrato, l'andamento dell'accettazione angolare è molto dipendente dal fatto che sia stata imposta la condizione di non avere rilasci energetici sul VETO. Per avvalorare maggiormente ciò, si propongono anche i medesimi istogrammi presentati per gli elettroni in condizione di *good hit*, questa volta privi della condizione di assenza di interazioni col VETO, cioè di confinamento (Figura 4.12).

Come si nota dalla figura, è netta l'influenza che questa condizione presenta nel risultato legato all'accettazione angolare soprattutto per quanto

4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

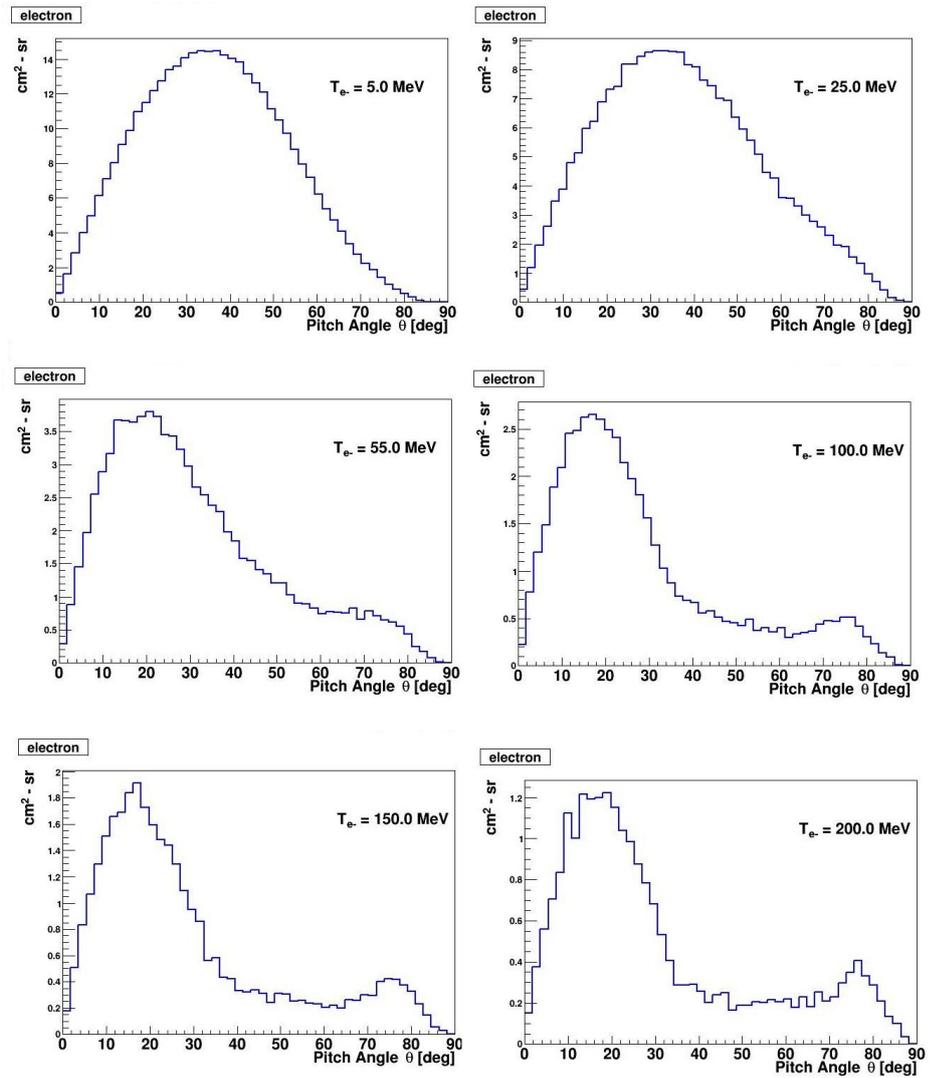


Figura 4.11: Andamento dell'accettanza angolare per elettroni a varie energie.

riguarda alte energie, quando la particella può più facilmente arrivare al VETO laterale e finale, o elevati angoli, quando la particella può provenire da zone decentrate della superficie di generazione e quindi incontrare il VETO laterale e non presentare più il secondo picco a grandi angoli, mantenendolo a circa 40° .

Andando ora a evidenziare il comportamento dei protoni (Figura 4.13), è possibile notare due anomalie rispetto a quanto detto finora.

A basse energie infatti, il picco sarà molto spostato a bassi angoli e addirittura non ci sono risultati sopra a 40° per energie di 30 MeV: ciò è riconducibile al fatto che molta energia viene persa in un volume, attraversandolo con tale inclinazione, anziché con bassi angoli, visto che lo spessore di un piano incontrato è maggiore. Ad una energia bassa, un protone pertanto non riesce a soddisfare per tali angoli la condizione di *good hit* e pertanto si nota un rapido decremento dell'accettanza angolare per angoli superiori ad una certa soglia.

Per energie tra 50 MeV e 100 MeV, si riscontra quanto notato precedentemente con il caso degli elettroni, ovvero un picco attorno 40° .

Ad energie maggiori, da circa 200 MeV in poi, e angoli elevati, il conteggio totale va diminuendo perché i protoni hanno più facilità di arrivare al VETO e perdere quindi la condizione di *good hit*.

Le considerazioni legate al VETO per il caso degli elettroni, sono analoghe a quelle per il caso dei protoni, come visibile in Figura 4.14.

4.3.3 Accettanza totale

In questa sezione viene presentata l'accettanza totale, ovvero il valore dell'accettanza angolare in funzione dell'energia anziché del *pitch angle* ϑ . Tali valori sono stati ottenuti integrando per ogni angolo ϑ i dati dell'accettanza angolare di ogni energia con cui è stata sparata la particella. Il risultato non è pertanto più legato all'angolo di sparo bensì all'energia di generazione della particella.

4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

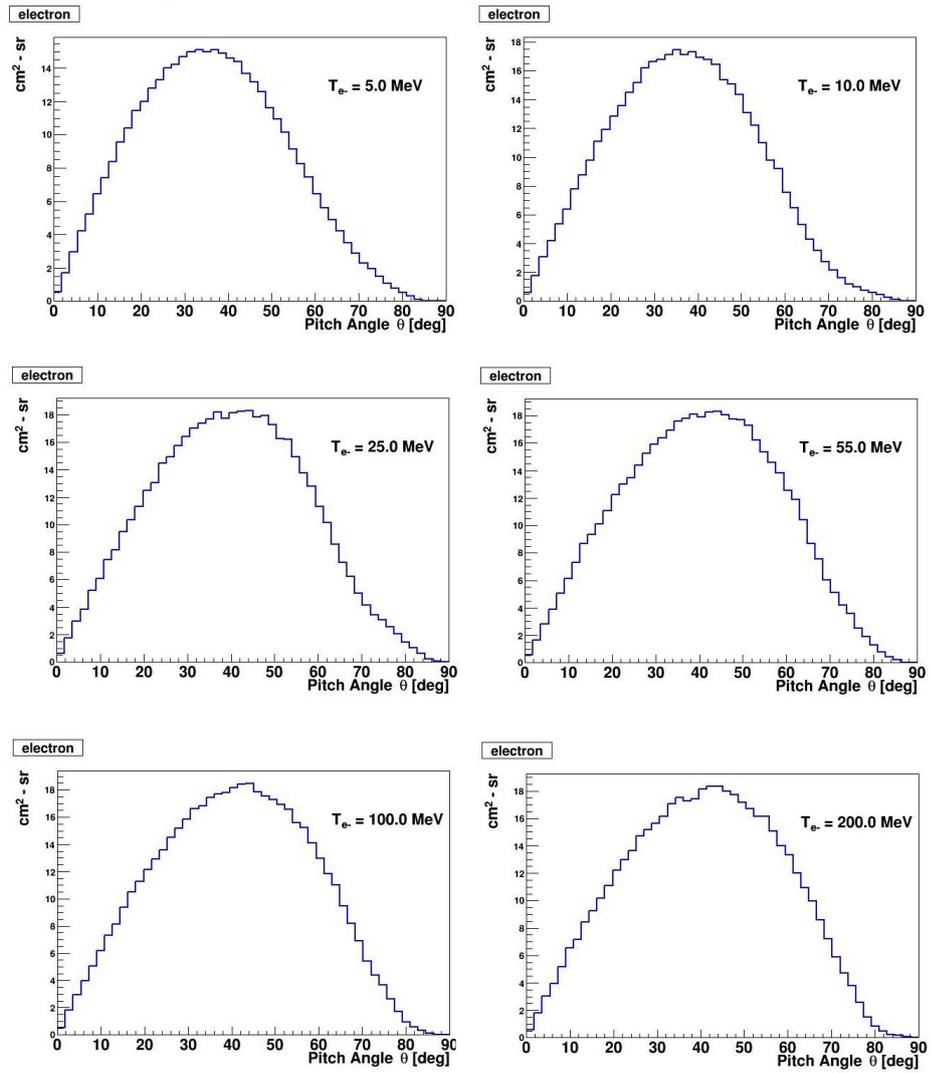


Figura 4.12: Andamento dell'accettanza angolare per elettroni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO.

4.3 Analisi della simulazione

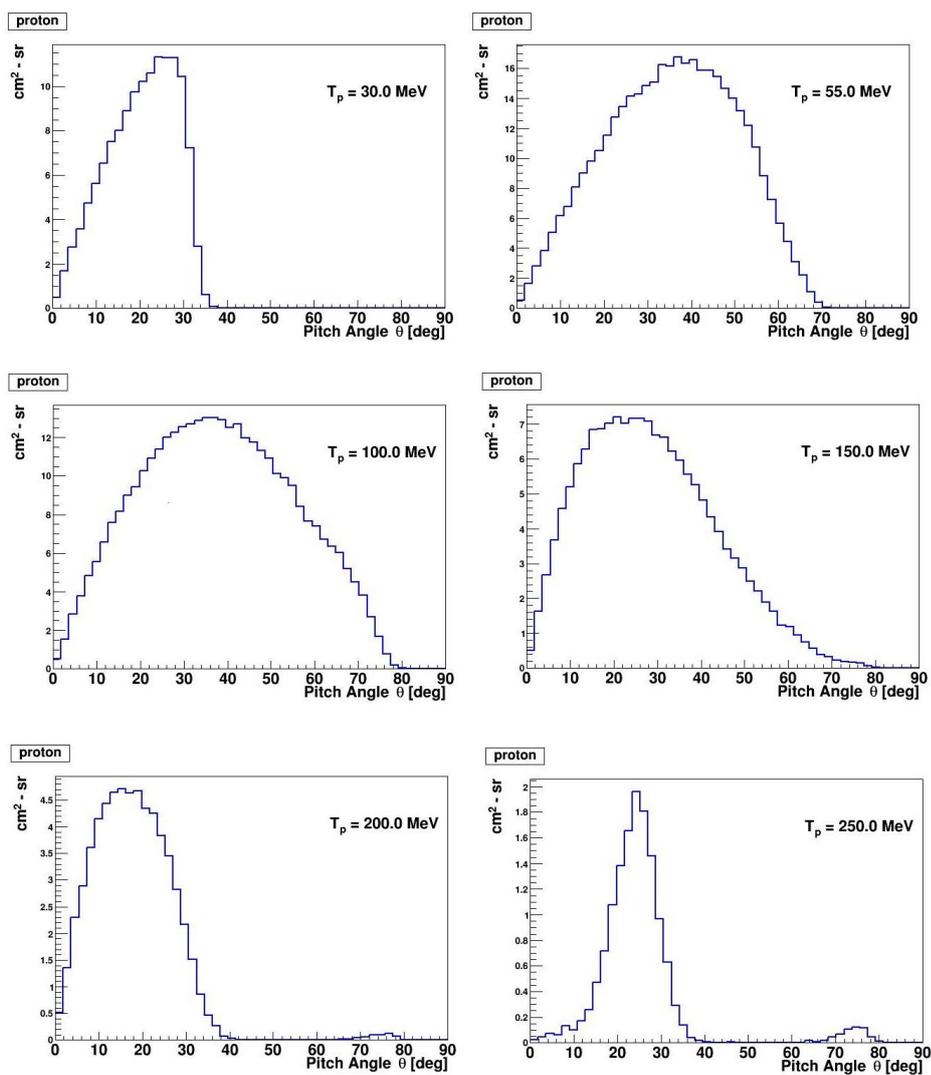


Figura 4.13: Andamento dell'accettanza angolare per protoni a varie energie.

4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

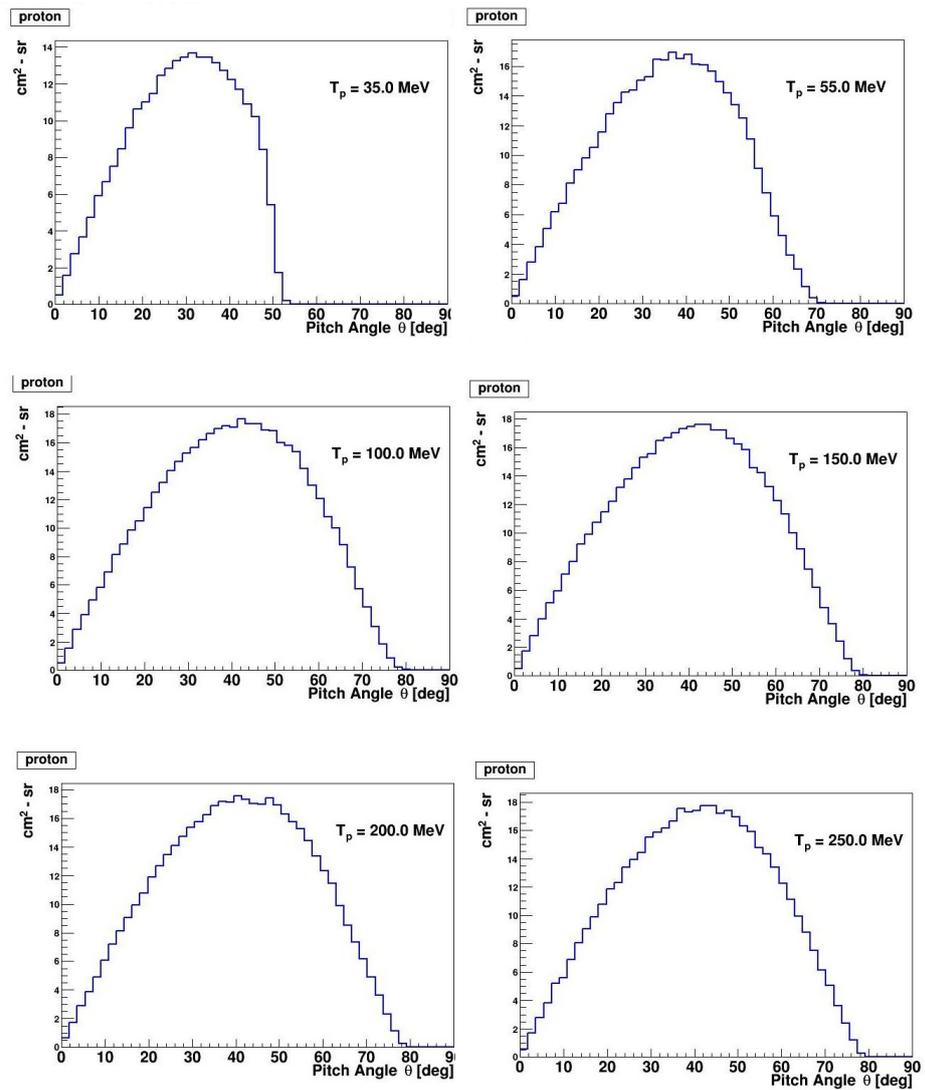


Figura 4.14: Andamento dell'accettanza angolare per protoni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO.

4.3 Analisi della simulazione

In Figura 4.15 è possibile osservare l'accettazione totale per elettroni e per protoni.

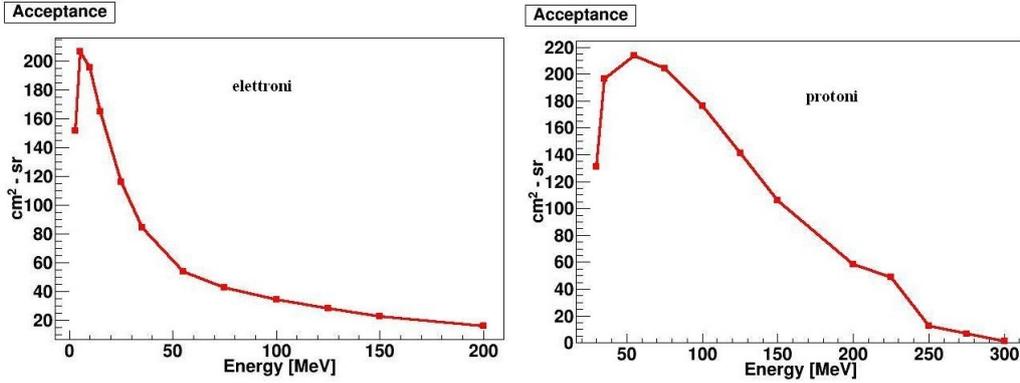


Figura 4.15: Accettazione totale in funzione dell'energia per elettroni (a sinistra) e protoni (a destra).

I due grafici possono essere spiegati tenendo sempre in considerazione che alla base sono presenti le condizioni di *good hit*.

L'andamento per gli elettroni presenta un rapido aumento a basse energie nel numero di particelle rilevabili dallo strumento, con un picco attorno a 5-10 MeV. A tale energia infatti, gli elettroni sono già in grado di superare la condizione di *good hit* posta per la loro validità. Ad energie maggiori, comincia ad essere significativo il contributo di perdita di eventi a causa di interazioni col VETO.

L'energia per cui la soglia imposta dalla condizione di *good hit* è superata, nel caso dei protoni è di circa un ordine di grandezza maggiore a causa del rilascio energetico superiore a quello elettronico, come già ampiamente spiegato e descritto.

È possibile quindi fin d'ora abbozzare una stima qualitativa circa la possibilità di discriminazione tra elettroni e protoni: a energie basse della particella prevarrà un segnale dovuto all'interazione elettronica con il rivelatore, visto che la probabilità che un evento dovuto ad un protone sia reputato valido è scarsa; viceversa a partire da energie di circa 50 MeV aumenterà la probabilità che un segnale sia dovuto all'interazione di un protone (Figura 4.16).

Per una trattazione più completa, precisa ed esaustiva dell'operazione di discriminazione si rimanda alla Sottosezione 4.3.5.

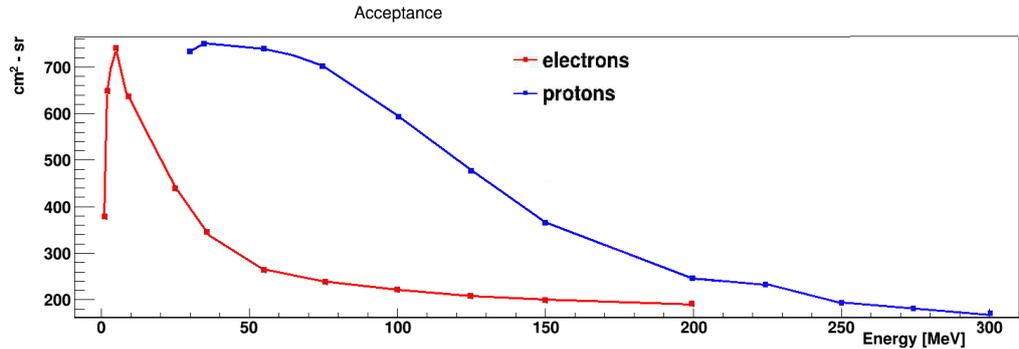


Figura 4.16: Accettanze in funzione dell'energia per elettroni e protoni.

4.3.4 Risoluzione energetica

Uno degli obiettivi principali di una simulazione per un rivelatore nucleare è l'ottenimento di una misura per la risoluzione energetica. Come spiegato nel Capitolo 2, la risoluzione energetica è la minima differenza di energia necessaria affinché il rivelatore possa apprezzare due eventi energeticamente diversi. Il motivo per cui è stato necessario eseguire una simulazione ad energie fisse, è proprio da ricondursi all'indagine sulla risoluzione energetica. Essa viene infatti misurata sparando un fascio di particelle monoenergetiche e osservando l'energia delle particelle misurata dal rivelatore. Idealmente si vorrebbe ottenere un solo picco ubicato sull'energia della particella, in realtà, essendo il rilascio di energia un processo stocastico, ciò non avviene e si ottiene di solito un andamento affetto da errori statistici, strumentali e connessi all'elettronica.

Nelle Figure 4.17 e 4.18 vengono presentati i grafici inerenti ai rilasci di energia di elettroni e protoni dotati di varie energie in cui si vaglia, per ogni energia compresa tra 0 MeV e l'energia propria della particella, il numero di eventi di rilascio totale ad ogni energia persa. Nei grafici è riportata a lato la media e la deviazione standard σ sotto la dicitura RMS: ROOT infatti con

4.3 Analisi della simulazione

tale scrittura intende la deviazione standard dei dati dell'istogramma. Andando a effettuare il rapporto tra σ e l'energia di generazione delle particelle T , cioè il rapporto $\Delta E/T$, si ricava la risoluzione energetica. Nelle Tabelle è possibile trovare i riscontri computativi di quanto detto finora.

T_{e^-}	ΔE	$\Delta E/T$ [%]
3	0,4	13
5	0,8	16
10	1,9	19
15	2,8	18,6
25	4,9	19,6
35	7,4	21,1
55	13	23,6
100	24,3	24,3

T_p	ΔE	$\Delta E/E$ [%]
30	1,2	4
55	8,0	14,5
75	13,6	18
100	20,2	20,2
150	29,4	19,6
200	31,5	15,8
225	27,8	12,4
250	55,7	22,3

Nella Tabella sinistra è possibile apprezzare la risoluzione energetica dello strumento per l'analisi degli elettroni. Come si nota, fino ad energie di 25-30 MeV, la risoluzione si mantiene al di sotto del 20%, mentre viene in parte persa alle alte energie, a causa di una significativa perdita statistica.

Nella Tabella di destra viene mostrata la risoluzione energetica per l'analisi dei protoni, che come si vede arriva fino a circa il 20% a 100 MeV per poi migliorare, grazie all'influenza che ha nella statistica il LYSO. A 250 MeV la risoluzione riprende a peggiorare a causa della perdita statistica di tutti i protoni non più contenuti all'interno del rivelatore. La risoluzione energetica per i protoni è leggermente migliore poiché la statistica è migliore, visto che i protoni rilasciano molta energia nel mezzo e quindi interagiscono più difficilmente col VETO.

Si conclude questa parte legata al fenomeno di perdita di energia all'interno dei piani del rivelatore con un riscontro pratico di quanto visto teoricamente nel Capitolo 2 in Sezione 3: il picco di Bragg. Tramite una parte del codice che permette di rilevare la perdita di energia in ogni piano con cui una particella carica pesante interagisce (nel nostro caso, i protoni), è possibile raffigurare tale andamento con in ordinata il rapporto $-\frac{dE}{dx}$ ed in ascissa il

4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

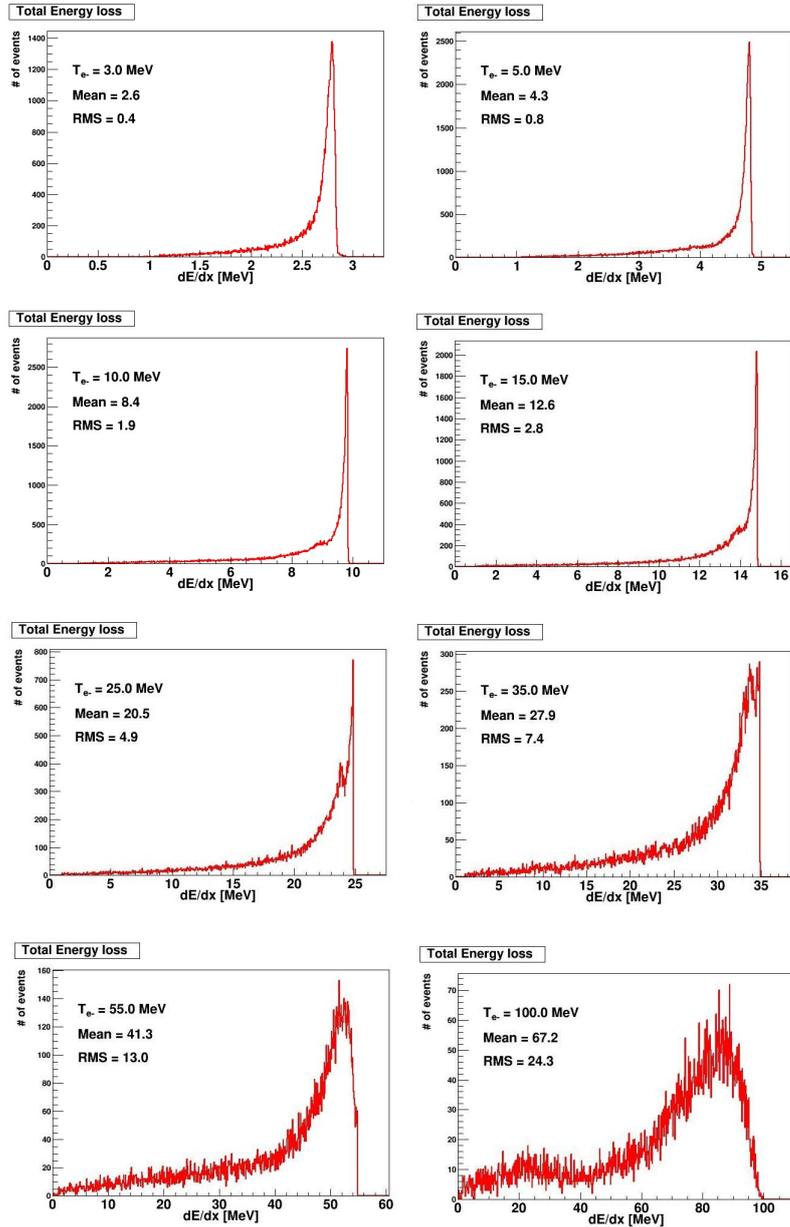


Figura 4.17: Risoluzione energetica degli elettroni in funzione dell'energia di sparo.

4.3 Analisi della simulazione

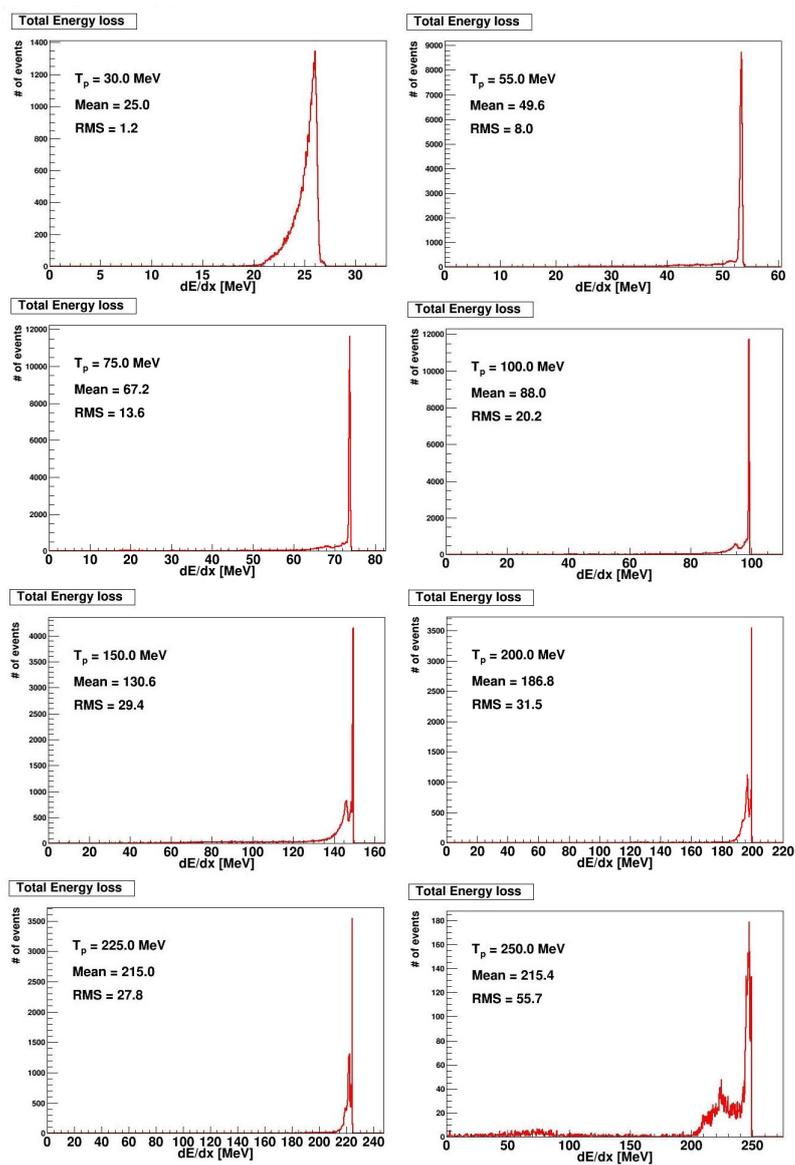


Figura 4.18: Risoluzione energetica dei protoni in funzione dell'energia di sparo.

piano in cui avviene un certo rilascio energetico (Figura 4.19).

A bassi spessori, è presente la condizione di minimo di ionizzazione MIP, per cui la particella tende a rilasciare poca energia; con spessori maggiori l'energia rilasciata è maggiore, aumentando la ionizzazione fino al massimo determinato dal picco.

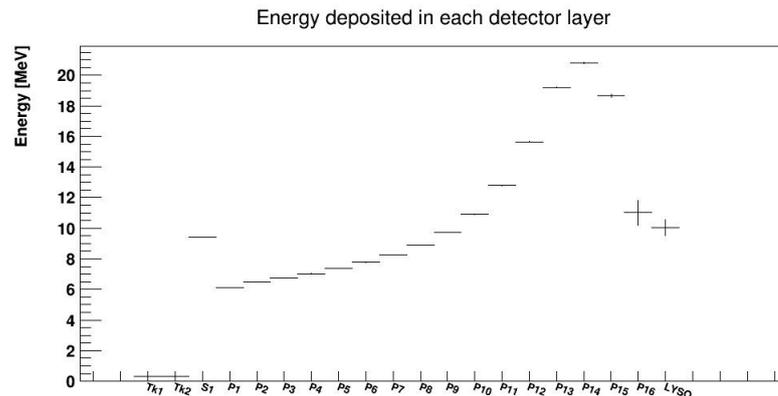


Figura 4.19: Energia depositata da un protone di 150 MeV all'interno del rivelatore. Si può notare il picco di Bragg, caratteristico per particelle cariche pesanti.

4.3.5 Discriminazione di elettroni e protoni

L'utilizzo dei semiconduttori al silicio è di enorme importanza non solo per ottenere informazioni circa la direzione di una particella, ma anche per l'identificazione se un fenomeno è legato agli elettroni o ai protoni.

Grazie allo spessore molto basso dei due semiconduttori, infatti, è possibile operare il metodo di discriminazione conosciuto come $\Delta E-E$ [51], che si basa sulla formula di Bethe (Equazione 2.3) e che mostra come, a energie inferiori al minimo di ionizzazione, ogni particella abbia un comportamento diverso, pur mantenendo il minimo a valori uguali.

Il metodo $\Delta E-E$ consiste sostanzialmente nella ricerca di un rilascio di energia infinitesimo all'interno di un piano di spessore piccolo del detector e nel relazionarlo con l'energia totale persa nello strumento.

Grazie a tale metodo, infatti, è possibile ottenere graficamente l'andamento illustrato in Figura 2.19 (Capitolo 2): il numero di cariche create (proporzionale all'energia rilasciata, come visto) all'interno dei due semiconduttori di piccolo spessore Δt è pari a $(dE/dx)\Delta t/\varepsilon$, con ε , costante dielettrica del mezzo. La particella poi passa attraverso tutto il rivelatore, conservando molta delle sua energia iniziale, e producendo un segnale proporzionale a dE/dx .

Nella Figure 4.20 e 4.21 sono presentati i grafici che hanno in ordinata l'energia rilasciata nel tratto di piccolo spessore dei semiconduttori al silicio, mentre in ascissa l'energia totale rilasciata, cioè in prima approssimazione, l'energia della particella.

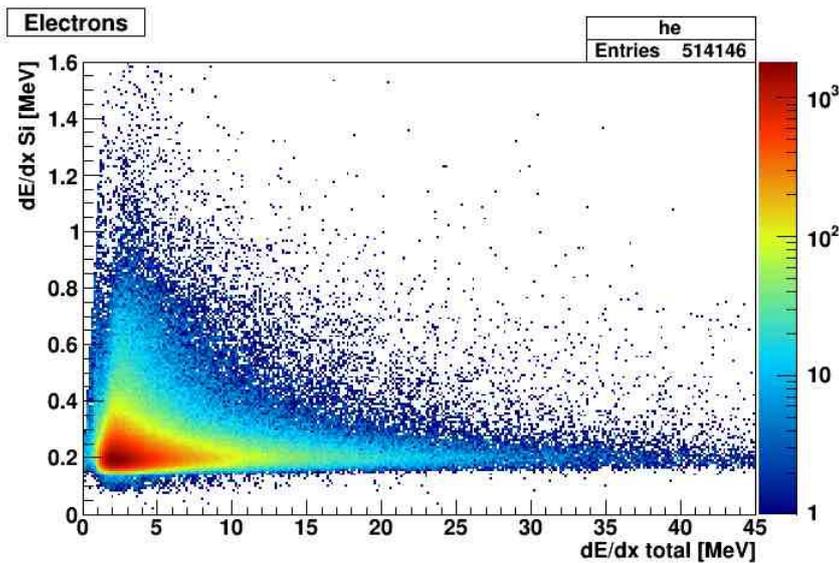


Figura 4.20: Energia rilasciata dagli elettroni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore.

Come si può notare confrontando i due grafici, l'andamento del rilascio energetico per elettroni e per protoni è sostanzialmente differente, ma c'è una zona in cui i due segnali si sovrappongono, in particolare tra 0,5 MeV e 1,2 MeV di energia rilasciata nel Tracker. La sovrapposizione dei segnali fa sì che in quella zona ci sia un disturbo e pertanto non sia possibile con certezza stabilire se un evento è dovuto ad elettroni o a protoni.

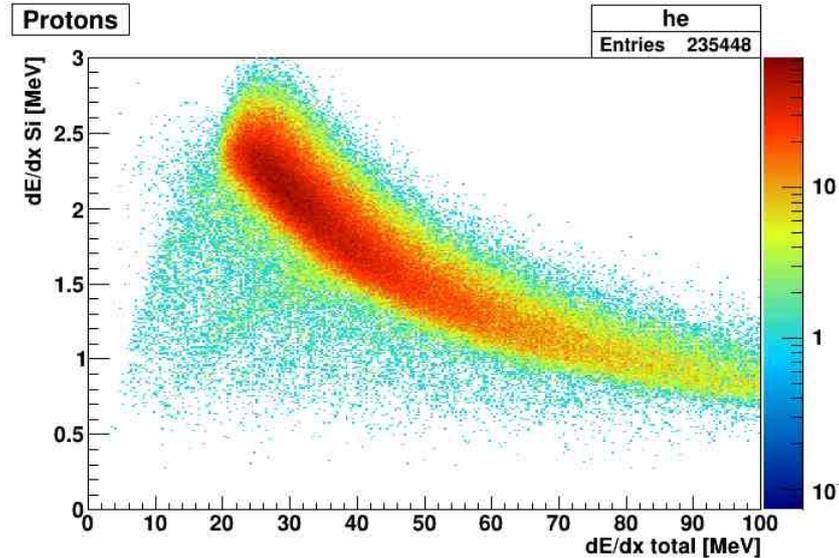


Figura 4.21: Energia rilasciata dai protoni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore.

Si pone a questo punto la questione di andare a valutare quantitativamente l'interferenza protonica su quella elettronica. Sono state pertanto analizzate 3 soluzioni diverse di un medesimo approccio, che consiste nel porre una cesura quantitativa all'interno dei due grafici posta tramite una funzione, e nel considerare quanti eventi dati da protoni sono al di sotto di tale funzione, che pertanto rovinano il segnale elettronico.

La funzione è stata creata sulla base di questo segnale, ponendola al di sopra di tre diverse percentuali del segnale elettronico. Le percentuali sono state 99%, 95% e 90% (Figura 4.22, sinistra). Dai risultati ottenuti sono poi ricavate le funzioni tramite un *fit* in modo da ottenere una funzione-taglio utilizzabile per il segnale degli elettroni e quello dei protoni (Figura 4.22, destra).

Si sono andati a valutare i segnali permanenti sotto le linee create dal *fit* (Figure 4.23, 4.24 e 4.25): anche visibilmente è netta la supremazia di quello dovuto ad elettroni, a tutti i gradi del *fit* eseguiti, anche se come ci si aspetta il caso del fit eseguito al 99% presenterà ad energie che partono da 50 MeV un segnale più affetto dal rumore dovuto ai protoni.

Per concludere, si è scelto di prendere il caso più svantaggioso, ossia quello

4.3 Analisi della simulazione

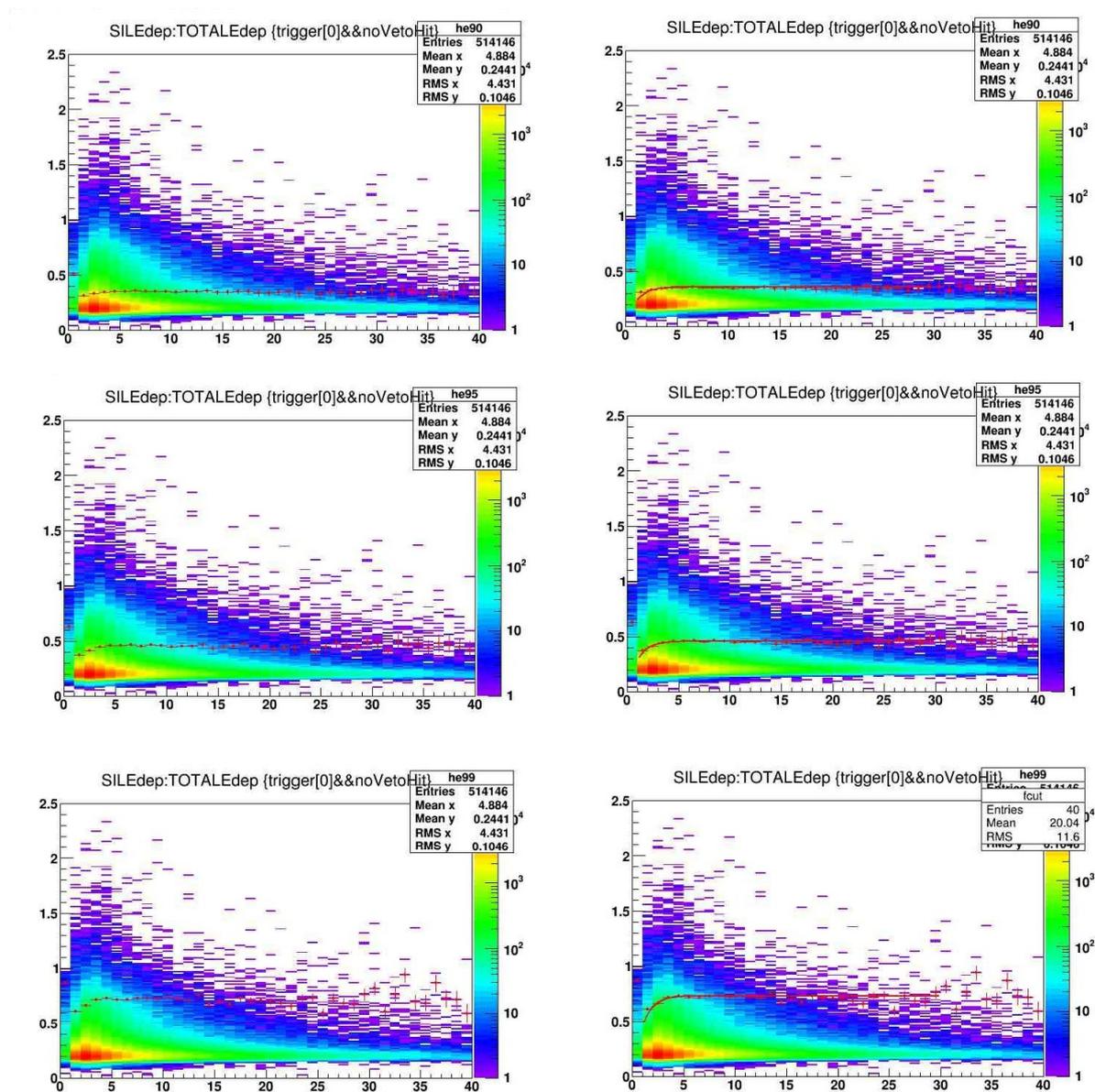


Figura 4.22: A sinistra, il numero dato dalla percentuale del segnale elettronico, a destra la rispettiva funzione.

4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

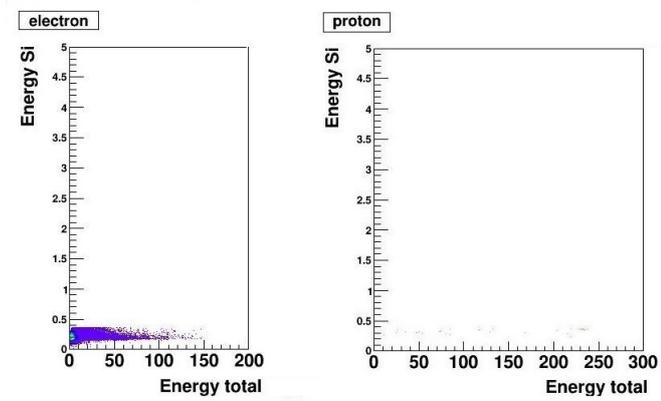


Figura 4.23: Discriminazione al 90 per cento.

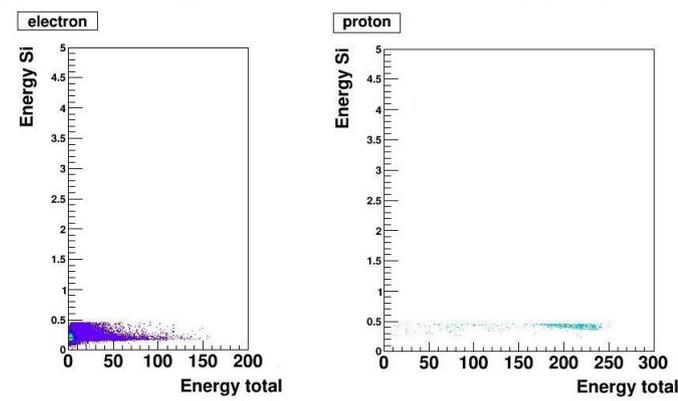


Figura 4.24: Discriminazione al 95 per cento.

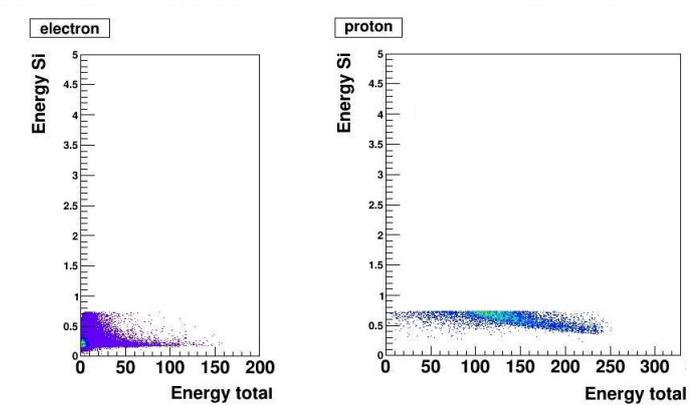


Figura 4.25: Discriminazione al 99 per cento.

4.3 Analisi della simulazione

del fit-99%, per andare a vedere quantitativamente la presenza del disturbo protonico sul segnale elettronico. Secondo quanto emerge, per energie fino a 15 MeV, il rumore protonico è estremamente ridotto (almeno 3 ordini di grandezza in meno), per poi diventare invece influente sopra i 50 MeV e importante sopra i 100 MeV. Viene confermata la bontà dello strumento nell'eseguire una misura per elettroni ad energie di pochi MeV e protoni ad alte energie.

Energia [MeV]	Numero di elettroni N_{e^-}	Numero di protoni N_p	N_{e^-}/N_p
2,5	132397	0	$> 10^{-6}$
5	37389	1	$10^{-5} - 10^{-4}$
5-15	131066	37	$10^{-4} - 10^{-3}$
15-50	20356	229	10^{-2}
50-100	1128	835	$10^{-1} - 1$

4.3.6 Stopping plane

Sulla base della configurazione standard di *good hit* (ovvero quella che prevede i punti elencati nella Sezione 4.3), si sono studiati i piani in cui gli elettroni e i protoni terminano il loro cammino. Come accennato precedentemente, questa analisi ha utilità ai fini della descrizione della configurazione di trigger, per la quale ha senso conoscere quante particelle vengono scartate, includendo o meno il superamento di un certo piano.

Questa analisi è stata condotta con i dati ricavati dalla simulazione con energie in legge di potenza per avere una completezza di energie campionate maggiore e quindi capire meglio quando un piano inizia ad essere interessato dall'interazione con le particelle o meno.

Dagli istogrammi in seguito presentati (Figure 4.26 - 4.29) pertanto si può conoscere con precisione la frazione delle particelle che con una data energia, dopo aver superato la condizione di *good hit*, si ferma su un dato piano. Sono stati considerati i piani di Trigger e quelli precedenti al settimo scintillatore del calorimetro: in questo modo sono state omesse le particelle

che non superano le condizioni imposte dal trigger e quelle inutili ai fini di una discussione sensata sulla configurazione di trigger: impostare un trigger che schermi tutte le particelle che non superano il terzo o quarto scintillatore della torre del calorimetro, farebbe perdere una grossa quantità di dati; a maggior ragione oltre il settimo.

Con l'accezione *in acceptance* si intende quella frazione della totalità delle particelle sparate che soddisfa geometricamente la condizione di trigger (ma nulla è imposto per quanto riguarda il VETO). Cioè questa frazione è quella che direzionalmente colpisce le parti sensibili del trigger sopra menzionate con la sua traiettoria: ovvero, è quella frazione di particelle la cui retta della direzione attraversa i piani indicati. Tale informazione è stata ricavata con un codice che, una volta presa la retta della direzione della particella generata, valuti se è in grado di passare per i due piani di Tracker e i due piani di Trigger.

Come si può osservare nelle Figure 4.26 e 4.28, la frazione di particelle che rientra in questa categoria è quasi sempre attorno al 2%: ciò è facilmente spiegabile tenendo in considerazione sia la differenza in dimensione della superficie di generazione delle particelle rispetto a quella dei volumi sensibili del rivelatore (Figura 4.4), sia considerando che le particelle sono sparate isotropicamente.

A *triggered* si dà il significato della frazione di particelle totali che, oltre a colpire i volumi sensibili imposti dal trigger e a non colpire il VETO, cioè oltre a soddisfare la condizione di *good hit*, rilasciano in essi anche energia: come si può notare in Figura 4.26 e 4.28, questa frazione è minore rispetto a quella precedente.

Ci sono due motivi per cui c'è tale differenza: il primo è che non è detto che una particella passando per un dato piano, interagisca con esso rilasciando energia, il secondo è che col termine *triggered* si escludono anche tutte le particelle che interagiscono col VETO, diminuendo ulteriormente il numero di particelle valide.

Il risultato *Triggered in acceptance* (Figure 4.26 e 4.28) rende conto infine della frazione di particelle che soddisfano rientrano sia nella categoria *in acceptance* che in quella *triggered*: è sostanzialmente il rapporto della prima

4.3 Analisi della simulazione

condizione sulla seconda.

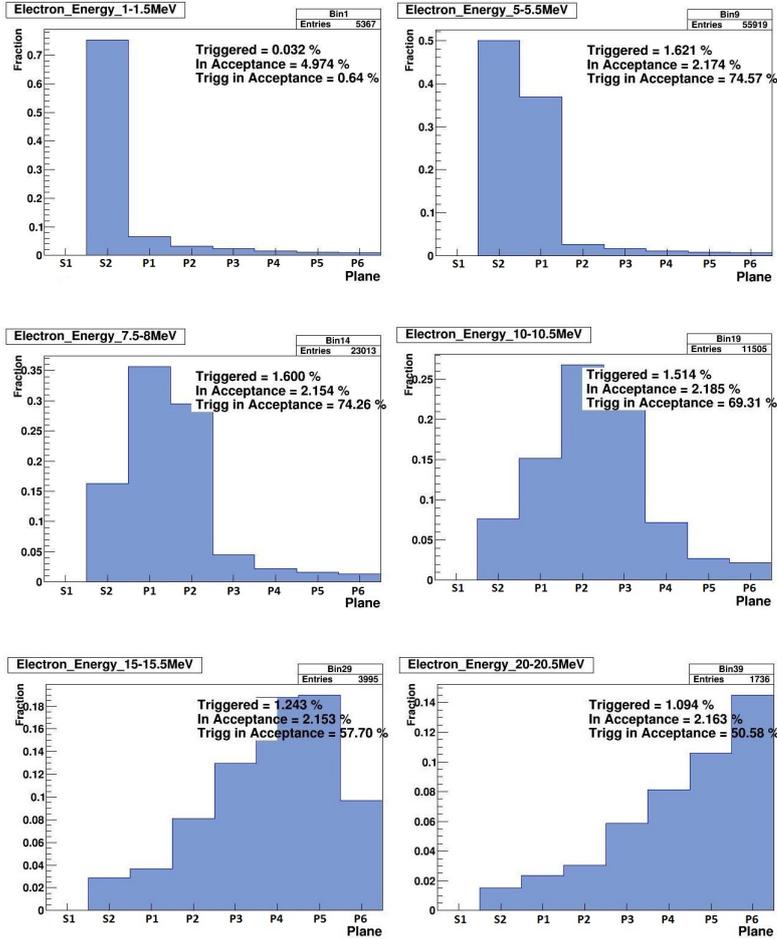


Figura 4.26: Stopping plane per il flusso di elettroni.

Come si evince dalla Figura 4.26, a basse energie ($E < 3$ MeV) una grandissima parte di elettroni generati non superano la condizione *in acceptance*, e solo una modesta parte di coloro che la soddisfano possiedono anche lo status *triggered*: a tali energie quindi, le particelle difficilmente possiedono energia sufficiente per oltrepassare i piani del Tracker e del Trigger, ed è molto probabile che una grossa frazione di esse non rilasci energia in uno dei piani menzionati, magari a causa di processi di *backscattering*. Da 5 MeV ad energie maggiori, anche il secondo piano e via via gli altri seguenti cominciano ad

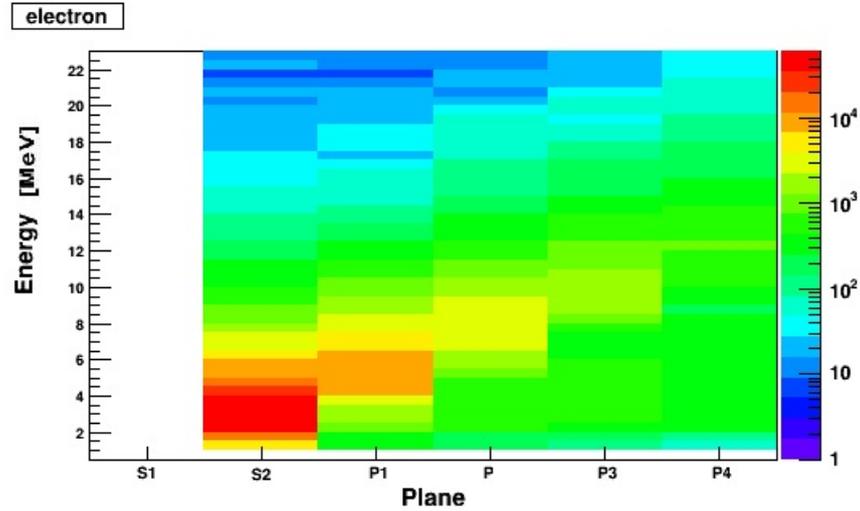


Figura 4.27: Stopping plane per il flusso di elettroni.

essere interessati dal fenomeno: si osserva che, una volta raggiunte energie per cui gli elettroni riescono a superare i piani posti a trigger, la percentuale di quelli che si trovano *in acceptance* resta sostanzialmente immutata al variare dell'energia; diminuisce invece la percentuale degli elettroni *triggered*, e quindi di *triggered in acceptance*, molto probabilmente a causa di interazioni con il VETO laterale, soprattutto nel caso di particelle con angoli tali da avere traiettorie dirette verso il VETO.

Per quanto riguarda la Figura 4.28, si nota invece una certa costanza nei valori delle percentuali *in acceptance* e *triggered*. Ciò è dovuto al fatto che, i protoni interagiscono con fenomeni di scattering molto più raramente rispetto agli elettroni, motivo per cui è più raro che una volta che la traiettoria prevede il passaggio per i piani imposti dalla condizione trigger non ci sia cessione di energia in tali piani: può avvenire semmai l'interazione col VETO per particelle abbastanza energetiche e con angoli tali da far avvenire tale processo, motivo per cui una parte delle particelle *in acceptance* non rientra nella percentuale *triggered in acceptance*.

Nella Figura 4.27 viene presentato il numero di elettroni che si ferma su un certo piano, una volta soddisfatta la condizione di *good hit*: come si vede, molte delle particelle a bassa energia terminano il loro percorso sul primo

4.3 Analisi della simulazione

piano di scintillatori che compongono la torre, mentre più sale l'energia, maggiormente anche altri piani sono coinvolti. Ragionamento analogo è riferibile ai protoni (Figura 4.29), con la differenza che perché si fermino sul piano P1 della torre di scintillatori sono necessarie energie circa un ordine di grandezza maggiori, essendo fortemente attenuate dal mezzo.

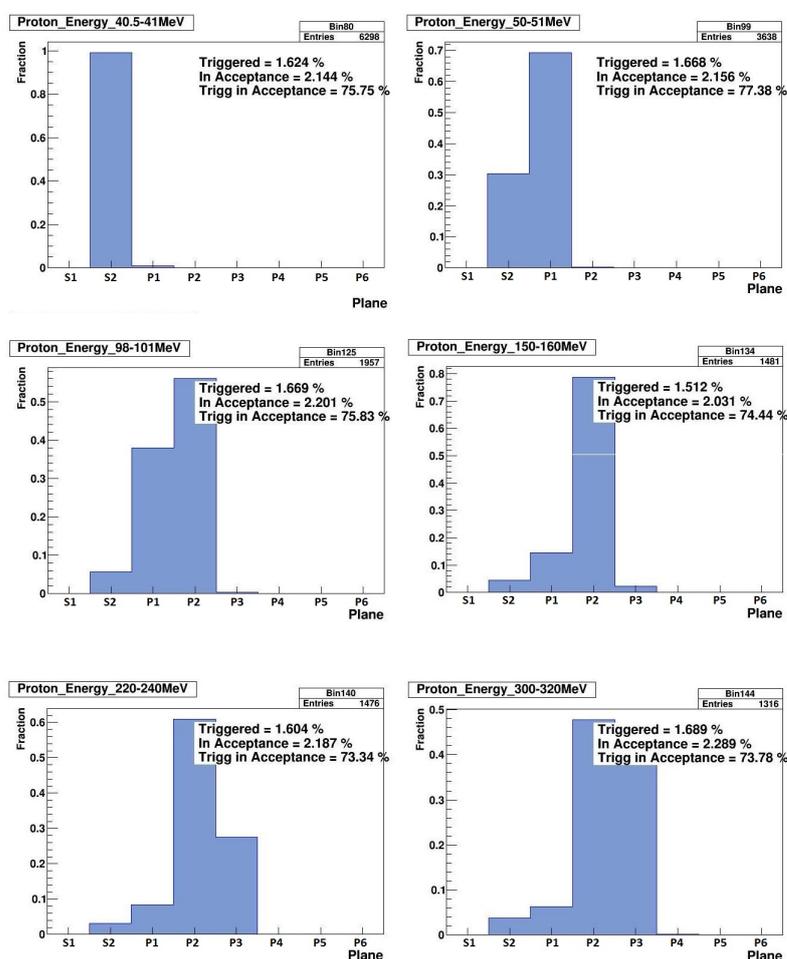


Figura 4.28: Stopping plane per il flusso di protoni.

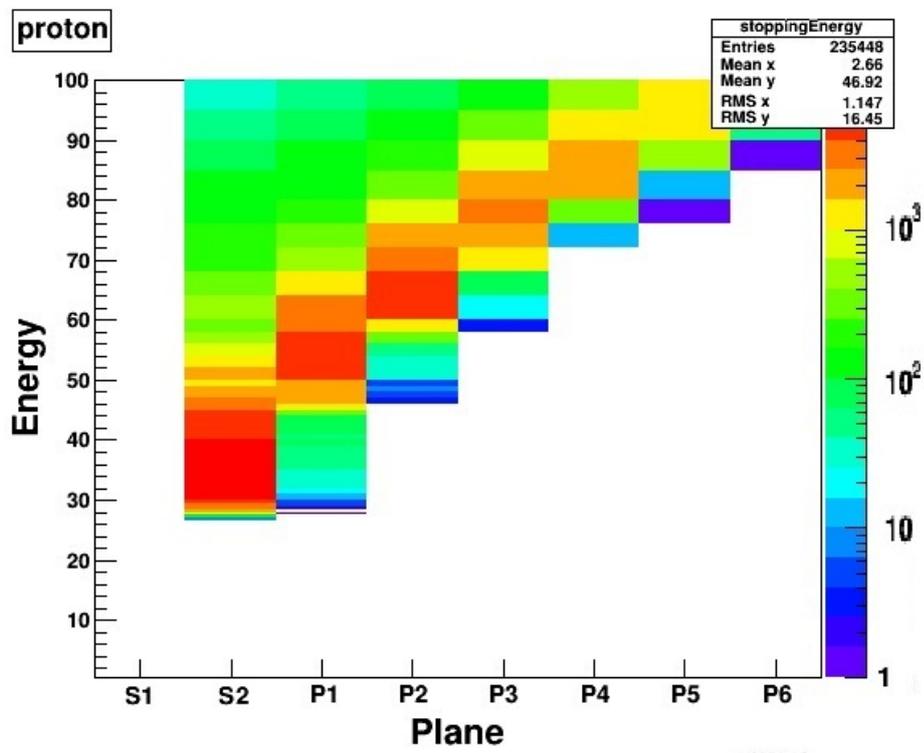


Figura 4.29: Stopping plane per il flusso di protoni.

4.3.7 La definizione del trigger

Come si è visto, la condizione di trigger è fondamentale per uno strumento, visto che pone la distinzione tra un evento che può essere valido e da analizzare rispetto ad uno non buono e pertanto da scartare. L'analisi dei dati è quindi fortemente influenzata e dipendente dalla scelta della condizione di trigger.

Lo scopo di questa parte è andare a vagliare l'importanza della condizione di trigger, e di conseguenza la condizione per cui un evento possa essere accettato: lo studio cui essa è legato riguarda il *data rate*, ovvero il numero di segnali al secondo che il rivelatore può ricevere ed analizzare. Poiché la fase di processamento dell'elettronica di un evento richiede del tempo, dell'ordine dei nanosecondi, prima che lo strumento sia di nuovo abile a rivelarne uno successivo, è necessario condurre uno studio approfondito sulla scelta della configurazione di trigger: se infatti la soglia di trigger è troppo bassa e lo strumento può leggere come eventi buoni un gran numero di particelle, è facile che molti di essi li perda comunque a causa dell'attività di processamento di un evento precedente, con un possibile aumento del tempo morto. Inoltre, una condizione di trigger troppo ristretta, potrebbe far sì che il numero di eventi considerati validi sia molto basso, con una notevole perdita di eventi che possono fornire un'informazione utile e quindi una grande perdita statistica.

Inoltre, lo studio sulla configurazione del trigger è di estrema utilità per non precludersi la possibilità di variare tale condizione durante la fase in volo: è possibile che, una volta orbitante il satellite e avuti i primi riscontri di eventi, si decida di imporre una certa configurazione di trigger in zone in cui il flusso di particelle rivelate è ingente (SAA e poli), ed un'altra configurazione ove il flusso è di minore entità.

In questo studio non si è tenuto conto della restrizione data dal VETO, ovvero della non interazione prevista dalla condizione di *confinamento*: ciò è stato necessario per ottenere dati anche sul VETO stesso e sulle particelle che vi interagiscono, come si vedrà.

Sono state analizzate in particolare 5 diverse configurazioni di trigger, che prevedono il superamento del Tracker e dei piani in seguito riportati:

- Configurazione 1: S1 + S2
- Configurazione 2: S1 + S2 + P1
- Configurazione 3: S1 + S2 o P1
- Configurazione 4: S1 + S2 o P1 + LYSO
- Configurazione 5: i due moduli centrali di S1 + S2 o P1

La configurazione 1 è quella standard presentata nella Sezione 4.3 e quella con cui è stata condotta tutta l'analisi svolta finora. La configurazione 2 è stata creata appositamente per eliminare tutti i rilasci di più bassa energia (energia elettroni < 2 MeV, energia protoni < 40 MeV) e quindi diminuire il *data rate*. La configurazione 3 acquista senso e valore nel caso in cui il fotomoltiplicatore, che è un oggetto molto delicato, dello scintillatore S2 venga danneggiato e cessa di funzionare: se ciò avvenisse e non prevedessi una soluzione alternativa di emergenza, perderei totalmente i dati dell'esperimento. La configurazione 4 invece è stata vagliata con lo scopo di indagare meglio la fisica di alta energie, per cui è stato posto il LYSO, come spiegato nel Capitolo 2. L'ultima configurazione invece è stata creata per valutare la possibilità di tenere solo due pannelli dello scintillatore S1 in un'ottica di un'ulteriore riduzione del *data rate*: questa configurazione è quella candidata per l'utilizzo ai poli e all'Anomalia Sud Atlantica.

Come scritto e come facilmente deducibile, la configurazione 2 e la configurazione 5 sono le principali responsabili di una possibile diminuzione nel *data rate*, e pertanto sono state analizzate per capire le differenze tra le due in caso di un eccessivo segnale dato da eventi buoni in volo.

Le due configurazioni, seppur analoghe, presentano differenze concettuali: la configurazione 2 presenta un taglio energetico, e quindi scarta le particelle che non hanno sufficiente energia per interagire anche con lo scintillatore P1, la configurazione 5 esegue invece un taglio geometrico, scartando tutte le particelle che non passano nei due moduli centrali del piano S1, perché con traiettorie fuori ad esso. Questa seconda condizione pone un numero di eventi scartati maggiore rispetto alla prima, poiché riguarda un piano a monte del trigger che va ad escludere una superficie ingente per le particelle.

4.3 Analisi della simulazione

Nelle Figure 4.30 e 4.31, si può notare come le due configurazioni riducano l'accettanza. Nel primo caso (configurazione 2, S1 & S2 & P1) si osserva uno *shift energetico* con la curva che si presenta pertanto spostata, a causa di un taglio energetico maggiore rispetto al caso standard, come spiegato sopra; nel secondo caso (configurazione 5, $S1_3 || S1_4$ & S2) ha lo stesso andamento energetico, con la curva che pertanto si presenta qualitativamente analoga a quella relativa alla configurazione standard, ma essendo stato ridotto il fattore geometrico è più bassa.

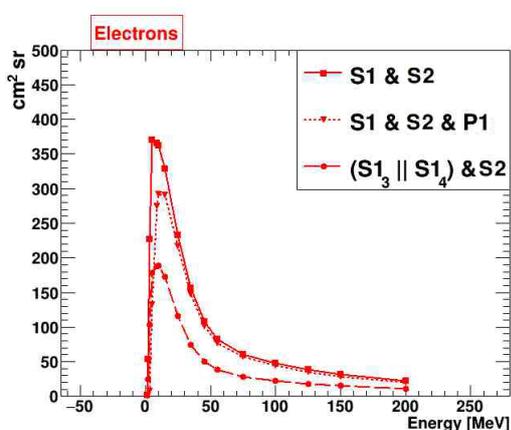


Figura 4.30: Risultati delle varie configurazioni di Trigger per elettroni.

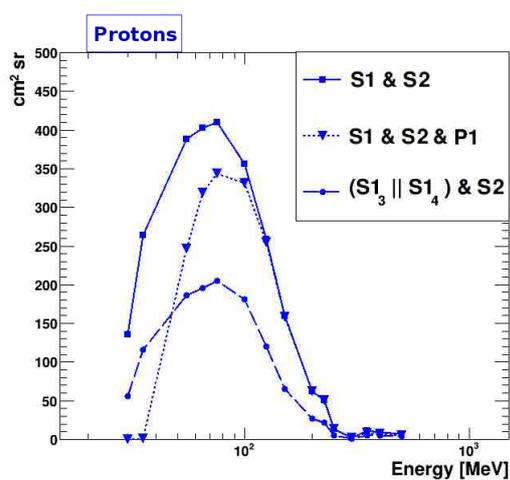


Figura 4.31: Risultati delle varie configurazioni di Trigger per protoni.

Un altro studio è stato poi condotto per osservare l'incidenza nel numero di particelle giudicate valide della condizione di confinamento, ovvero della condizione di non rilascio energetico nel VETO.

Nelle Figure 4.32 e 4.33 sono rappresentate le percentuali delle particelle che, soddisfatte la condizione di trigger, vanno poi ad interagire con uno scintillatore del VETO: in colore rosso, se è un VETO laterale, in colore blu, se è quello posto al fondo del rivelatore. Nel caso degli sia degli elettroni che dei protoni sono state considerate energie superiori a 30 MeV perché, nel primo caso, le particelle che interagiscono col VETO finale sarebbero state poche, nel secondo caso, non ci sarebbe stato nemmeno un evento in grado di esser giudicato valido secondo la condizione di trigger.

Come si può osservare, il numero di elettroni che hanno probabilità di interagire col VETO laterale, ad energie superiore a 50 MeV è molto alto (circa 80%): ovviamente ciò è dovuto al fatto che molti elettroni hanno direzioni non perfettamente perpendicolari al rivelatore ed a tali energie sono abbastanza penetranti da attraversare i piani che incontrano per poi interagire con il VETO. Più aumenta l'energia degli elettroni, più diventa influente anche il numero di elettroni che interagisce col VETO finale: ovviamente questo è il caso delle particelle che presentano una traiettoria sufficientemente perpendicolare al rivelatore. Si nota inoltre che quest'ultimo valore aumenta notevolmente, a discapito di quello riguardante l'interazione col VETO laterale, nel caso di trigger con una condizione di interazione sul LYSO imposta: se tale condizione è valida, è molto probabile che le particelle siano dirette perpendicolarmente allo strumento e quindi verso il VETO finale.

Considerazioni analoghe valgono per i protoni, per cui le energie tali per cui iniziano ad essere significative le interazioni col VETO sono maggiori (circa 100 MeV), poiché meno penetranti degli elettroni. Si noti come oltre circa 300 MeV di energia, la totalità dei protoni incida contro un VETO: ciò vuol dire che in nessun caso, un protone di tali energie verrà confinato e perderà la totalità della sua energia all'interno del rivelatore. Si consideri inoltre come siano necessarie energie di almeno 200 MeV perché un protone interagisca col VETO finale.

Queste analisi, oltre a dimostrare l'importanza del VETO nella condizione

4.3 Analisi della simulazione

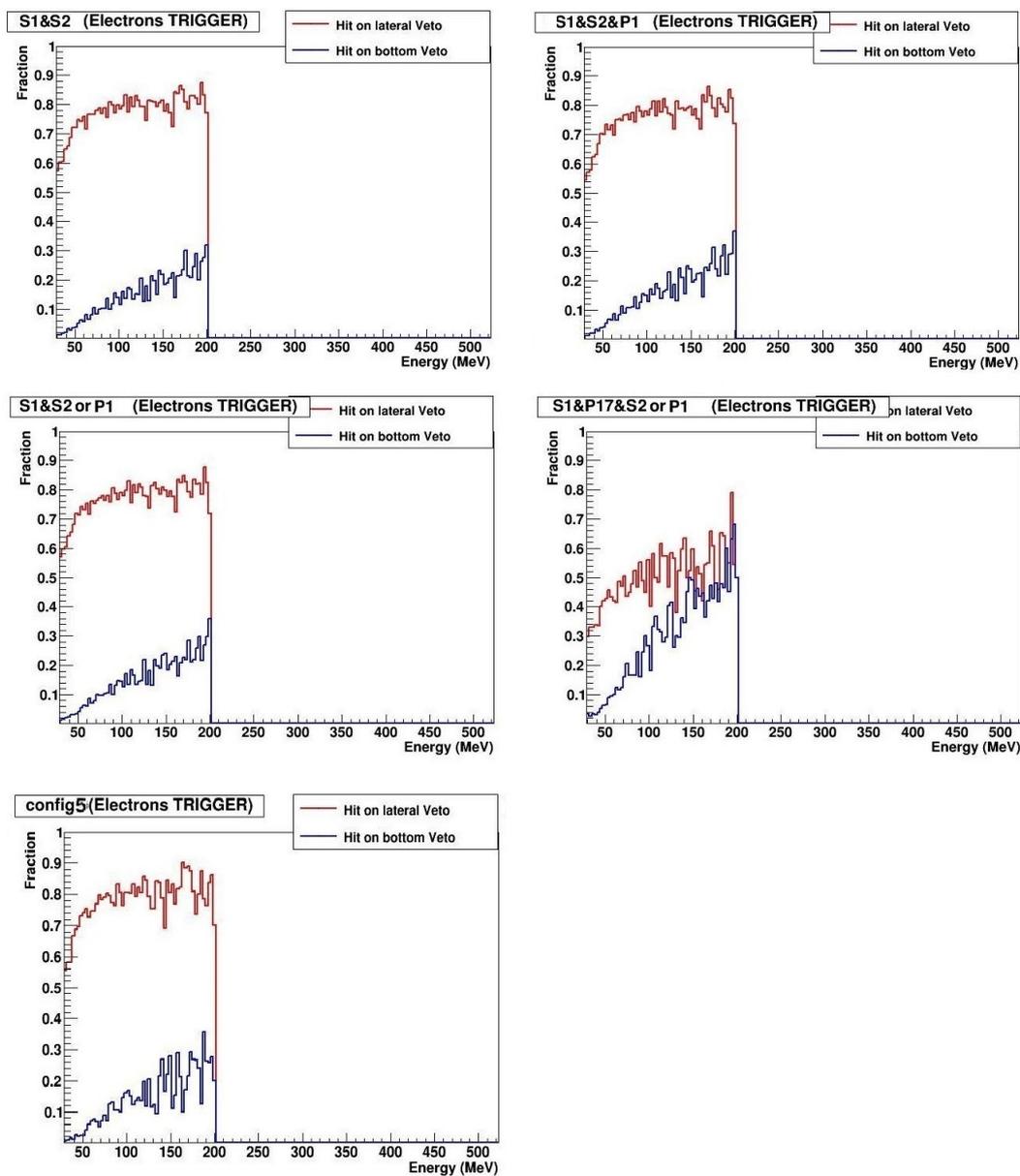


Figura 4.32: Risultati delle varie configurazioni di Trigger per elettroni.

4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

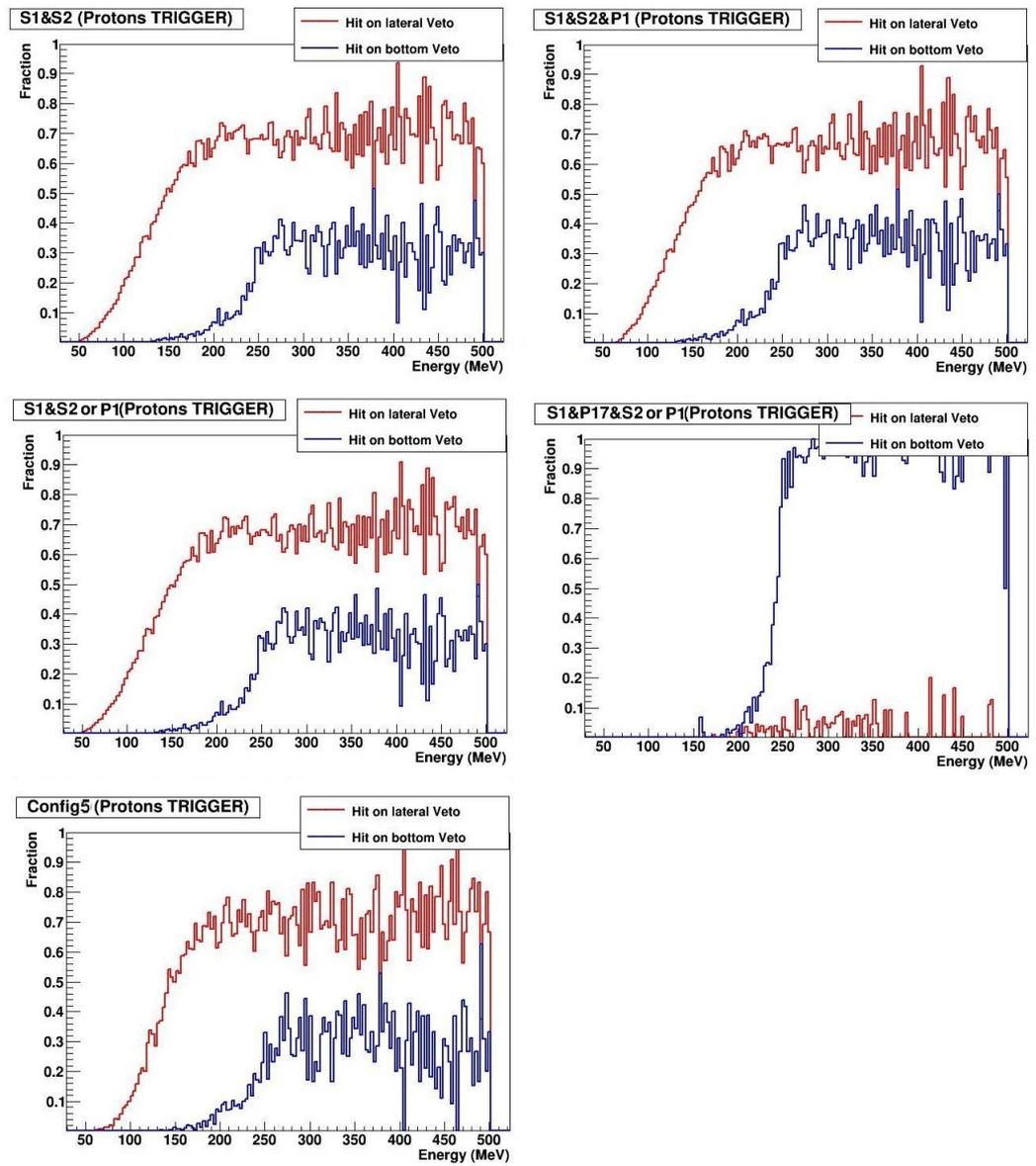


Figura 4.33: Risultati delle varie configurazioni di Trigger per protoni.

di *good hit*, è stata affrontata anche per uno studio, che verrà compiuto in fase di volo, circa la possibilità di porre la condizione di non interazione col VETO *online* oppure *offline*, ovvero di scartare gli eventi che interagiscono col VETO già in orbita, non mandandone i dati a terra, anziché farlo in sede di analisi a terra. Nel primo caso, non si riscontrerebbero problemi di tempi processamento allungati ma sarebbe necessario adottare un sistema che scarti tali eventi; nel secondo caso, ci potrebbe esser un problema di banda di processamento occupata, ma si potrebbe condurre un'analisi più approfondita su particelle molto energetiche a terra.

4.4 Discussione dei risultati

Le considerazioni effettuate riguardo l'analisi dei risultati ottenuti tramite le simulazioni svolte con la geometria del rivelatore HEPD realizzata in GEANT4 hanno portato al conseguimento di numero informazioni riguardo allo strumento. Innanzitutto, si ricorda che era richiesta un'efficienza di rivelazione del tipo di particella di almeno il 90% ed un'accettanza angolare estesa almeno per 70° del *pitch angle*, oltre che naturalmente un'ottimizzazione del rivelatore per la lettura di elettroni di pochi MeV (~ 5) e protoni ad energie più alte (tra 50 MeV e 300 MeV).

Per quanto riguarda l'accettanza angolare, in tutti i casi analizzati per gli elettroni, lo strumento ha dimostrato di esser in grado di interagire in modo valido con flussi elettronici a varie energie per un *pitch angle* esteso almeno 70° . Tale discorso vale anche per protoni ma solo in un range energetico compreso tra circa 50 MeV e 150 MeV, prima del quale la configurazione di trigger schermo molti eventi e oltre il quale, le interazione col VETO sono consistenti.

Ne risulta, tramite i calcoli opportuni, un'accettanza totale che presenta una buona lettura per flussi elettronici di pochi MeV e flussi protonici di energie maggiori.

La risoluzione energetica dello strumento si mantiene a valori di circa il 20% per energie fino a circa 30 MeV, e presenta percentuali leggermente

migliori per protoni su tutto lo spettro energetico analizzato inferiore a 250 MeV.

La capacità di identificazione del tipo di particella che ha causato un segnale valido nel rivelatore HEPD è piuttosto buona, visto che per energie fino a 50 MeV, si ha sostanzialmente la certezza che tale evento sia legato ad elettrone, con la probabilità di meno dell'1% (nel caso limite) che sia invece opera di un protone.

Sono state infine tenute in conto diverse configurazioni di trigger per permettere, una volta in volo, l'ottimizzazione dell'analisi dei dati rilevati dallo strumento.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

5.1 Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha avuto il compito di studiare i risultati prodotti dalla simulazione dell'interazione tra fasci di elettroni e di protoni e il rivelatore HEPD, impiegato nella missione spaziale CSES-Limadou, ed in particolare di indagarne le peculiarità nella misurazione della radiazione.

Dopo aver discusso ed approfondito la teoria che lega fenomeni fisici geologici e ionosferici, fornendone le caratteristiche qualitative e quantitative per la sua descrizione nel Capitolo 1, si è pertanto presentata la missione e trattato il rivelatore HEPD, identificandone le sezioni di cui è composto ed evidenziandone le parti in grado di misurare la radiazione (Capitolo 2).

Sono stati forniti successivamente, nel Capitolo 3, i dettagli che hanno portato alla codificazione della struttura dell'intero strumento tramite GEANT4, illustrando per ogni pezzo la sintesi dei procedimenti concettuali e realizzativi che sono stati richiesti per la costruzione virtuale.

L'obiettivo della tesi si concretizza nel Capitolo 4, in cui si propongono i dati elaborati dalla simulazione ed analizzati tramite programmi software realizzati che fanno emergere le seguenti conclusioni:

- **L'accettanza angolare** del rivelatore HEPD in relazione al *pitch angle* ϑ copre un'ampiezza, per gli elettroni, di almeno 80° ad ogni energia, presentando un picco di accettanza attorno a 40° per basse energie, ed

a 20° per energie sopra 50 MeV. Per i protoni, il picco a 40° permane solo in un range energetico che parte da 55 MeV e termina prima di 150 MeV, energia oltre la quale si osserva un picco ad angoli di 20°. Per entrambe le particelle l'influenza della condizione di confinamento nel rivelatore è determinante, come lo la condizione di trigger.

- **L'accettanza totale** del rivelatore HEPD in relazione all'energia della particella è strettamente connessa con le energie dei flussi che ci si aspettano riscontrati in casi di *particle burst*, con una possibilità di misurazione per elettroni molto maggiore ad energie fino a 20 MeV e per protoni di almeno 30 MeV.
- **La risoluzione** del rivelatore HEPD si è rivelata esser migliore per entrambe le particelle in corrispondenza delle energie attese e pertanto con elettroni di energie fino a circa 15-20 MeV e protoni fino ad energie di 250 MeV.
- **L'abilità discriminatoria** del rivelatore HEPD nell'identificare un evento comportato da un'interazione di un elettrone alle basse energie anziché un protone alle alte energie si è mostrata essere estremamente alta, con un'incertezza infinitesima se non trascurabile.
- **Le varie configurazioni di trigger** analizzate per il rivelatore HEPD sono un buon punto di partenza per un futuro studio della condizione di validità di un evento, anche in casi estremi per il *data rate* quali i poli o l'Anomalia Sud Atlantica.

Questa missione spaziale pertanto si candida ad essere di estrema rilevanza nell'ottica dell'analisi dei meccanismi di accoppiamento sismo-ionosferico, in virtù anche delle considerazioni che sono state effettuate circa il rivelatore HEPD a bordo che soddisfa i parametri richiesti dalla CNSA.

Il successo che lo strumento e la missione potrebbero ottenere andrà ad apportare nuovi e numerosi rilevamenti in grado, un giorno, magari di poter permettere disposizioni preventive a un terremoto, fenomeno che ancora oggi risulta imprevedibile e di grande distruzione, come i terremoti di L'Aquila nel 2009 e recentemente in Nepal il 25 Aprile 2015 hanno nuovamente dimostrato.

5.2 Sviluppi futuri

I possibili sviluppi futuri possono essere distinti in due settori, uno riguardante la missione, l'altro inerente al rivelatore ed in particolare alla simulazione di esso.

L'eventuale successo della missione, oltre a comportare il rilevamento di dati di estrema utilità, potrebbe condurre ad un'installazione di una serie di satelliti orbitanti con l'ottica di campionare la superficie terrestre con maggior precisione e risoluzione: prima si avranno risposte scientifiche circa questo fenomeno, prima si potrà esser in grado di predire un evento sismico e quindi di ridurre l'effetto catastrofico, strutturale e umano.

Un possibile sviluppo simulativo potrebbe avvenire in una maggior implementazione del volume del rivelatore con l'introduzione di nuovi ed ulteriori dettagli geometrici, omessi in questa analisi, quali la realizzazione e l'assemblaggio virtuale dei fotomoltiplicatori, il cui ingente numero può far sì che si producano interazioni con la radiazione, e di viti, il cui materiale ad alta densità può provocare fenomeni non trascurabili con le particelle.

Si può in ogni caso concludere che si tratta di dettagli interessanti ed applicabili, ma non fondamentali per una trattazione valida di una simulazione quale quella trattata in questa tesi.

Appendice A

In questa appendice ci si propone di illustrare i codici e i passaggi concettualmente più importanti che hanno portato alla realizzazione del componente LYSO, cioè la matrice 3 x 3 di blocchi di scintillatore avvolta in uno strato di 200 μm di teflon.

La realizzazione è partita dalla dichiarazione dei materiali dei blocchi di LYSO e del loro rivestimento in teflon, in cui si è descritta la densità e la concentrazione degli elementi che lo compongono:

```
//LYSO

matLYSO = newG4Material("LYSO", 7.1 * g/cm3, 5, kStateSolid);
matLYSO->AddElement(elLu, 71.43 * perCent);
matLYSO->AddElement(elY, 4.03 * perCent);
matLYSO->AddElement(elSi, 6.37 * perCent);
matLYSO->AddElement(elO, 18.14 * perCent);
matLYSO->AddElement(elCe, 0.02 * perCent);

//Teflon

d = 2.2 * g/cm3;
teflon = newG4Material("Teflon", d, 2);
teflon->AddElement(elF, 0.759817);
teflon->AddElement(elC, 0.240183);
```

Si è pertanto descritto in seguito il volume del cristallo tramite i passaggi successivi di dichiarazione del volume solido, volume logico e volume fisico.

Nel Volume Solido è stata impostata la dimensione del singolo blocco di LYSO, del blocco formato da LYSO con uno strato in teflon e di un terzo blocco, dimensionalmente uguale al secondo, la cui utilità è quella di essere inteso come totalità della struttura, al contrario del secondo blocco la cui utilità riguarda solo l'operazione di sottrazione che si

vede in seguito. Viene inoltre inserita la dimensione del volume formato da tre blocchi posti accanto, lungo l'asse X:

```
// descrizione delle dimensioni dei volumi

fCrystalBlock - X = 48 * mm;
fCrystalBlock - Y = 48 * mm;
fCrystalBlock - Z = 40 * mm;

TeflonContainerExt - X = 48.2 * mm;
TeflonContainerExt - Y = 48.2 * mm;
TeflonContainerExt - Z = 40.2 * mm;

fTeflonLYSO - X = 48.2 * mm;
fTeflonLYSO - Y = 48.2 * mm;
fTeflonLYSO - Z = 40.2 * mm;

fCrystalBlockRawContainer - X = 144.6 * mm;
fCrystalBlockRawContainer - Y = 48.2 * mm;
fCrystalBlockRawContainer - Z = 40.2 * mm;

//Fase di creazione dei volumi (a GEANT vanno fornite le metà delle misure totali
per questioni di riferimento dell'origine del singolo pezzo, che è il centro dello stesso):

fSolidTeflonLYSO = newG4Box("TeflonLYSO", fTeflonLYSO - X/2.,
fTeflonLYSO - Y/2., fTeflonLYSO - Z/2.);

fSolidCrystalActiveBlock = newG4Box("CrystalActiveBlock",
fCrystalBlock - X/2., fCrystalBlock - Y/2., fCrystalBlock - Z/2.);

fSolidTeflonContainerExt = newG4Box("TeflonContainerExt",
TeflonContainerExt - X/2., TeflonContainerExt - Y/2., TeflonContainerExt -
Z/2.);

fSolidTeflonContainer = newG4SubtractionSolid("TeflonContainer",
fSolidTeflonContainerExt, fSolidCrystalActiveBlock);

//Quest'ultima operazione esegue una sottrazione tra il volume fSolidTeflonContainerExt,
il volume composto da LYSO e teflon, ed il volume fSolidCrystalActiveBlock, cioè il
```

solo blocco di LYSO: quanto ottenuto è pertanto uno strato che avvolge un singolo blocco di solo LYSO.

```
fSolidCrystalBlockRawContainer = newG4Box("CrystalBlockRawContainer",
fCrystalBlockRawContainer - X/2., fCrystalBlockRawContainer - Y/2.,
fCrystalBlockRawContainer - Z/2.);
```

Nella descrizione del Volume Logico vengono denominati i volumi e inseriti i materiali che li compongono:

```
fLogicTeflonLYSO = newG4LogicalVolume(fSolidTeflonLYSO,
vacuum,"TeflonLYSO");
```

```
fLogicCrystalActiveBlock = new
G4LogicalVolume(fSolidCrystalActiveBlock, crystalLayerMat,
"CrystalActiveBlock");
```

```
fLogicTeflonContainer = newG4LogicalVolume(fSolidTeflonContainer,
teflon,"TeflonLayer");
```

```
fLogicCrystalBlockRawContainer = new
G4LogicalVolume(fSolidCrystalBlockRawContainer, vacuum,
"CrystalBlockRaw");
```

Nella descrizione del Volume Fisico vengono inserite le coordinate per la collocazione all'interno del volume Mondo; si notino le due repliche: la prima lungo l'asse X di 3 blocchi completi, la seconda lungo Y di 3 piani formati dai 3 blocchi completi.

```
fPhysiCrystalBlockRaw = newG4PVReplica("CrystalBlockRaw",
fLogicCrystalBlockRawContainer,
fPhysiCrystalBlockPlaneContainer,
kY Axis,
3,
fCrystalBlockRawContainer - Y);
```

```
fPhysiCrystalBlockRaw = newG4PVReplica("CrystalBlockRaw",
fLogicCrystalBlockRawContainer,
fPhysiCrystalBlockPlaneContainer,
```

```

kY Axis,
3,
fCrystalBlockRawContainer - Y);

fPhysiTeflonLYSO = newG4PVReplica("CrystalBlock",
fLogicTeflonLYSO,
fPhysiCrystalBlockRaw,
kX Axis,
3,
fCFBlockContainerExt - X);

fPhysiCrystalActiveBlock = newG4PVPlacement(0,
G4ThreeVector(0,0,0),
"ActiveBlockCrystal",
fLogicCrystalActiveBlock,
fPhysiTeflonLYSO,
false,
0, true);

fPhysiTeflonContainer = newG4PVPlacement(0,
G4ThreeVector(0,0,0),
"Teflon",
fLogicTeflonContainer,
fPhysiTeflonLYSO,
false,
0, true);

```

Avviene infine la parte di descrizione grafica in cui vengono attribuiti i colori ai rispettivi volumi:

```

G4VisAttributes * attGreen = newG4VisAttributes(G4Colour :: Green());
fLogicTeflonContainer - > SetVisAttributes(attGreen);

G4VisAttributes * attBlue = newG4VisAttributes(G4Colour :: Blue());
fLogicCrystalActiveBlock - > SetVisAttributes(attBlue);

```

Appendice B

In questa appendice viene illustrato un caso di istruzione dei parametri di generazione della simulazione del flusso di elettroni con legge di potenza tra 1 MeV e 200 MeV di energia. Si può notare la descrizione del Volume Mondo, i richiami alle diverse parti di geometria (Satellite, HEPDBox, Tracker e Calorimetro), il richiamo di alcune librerie di fisica utilizzate nel processo di simulazione e l'impostazione del tipo di particella, del numero, dell'energia, dell'indice spettrale e della direzione casuale.

```
/control/verbose 2
/run/verbose 1

/hepd/setWorldSize 55 75 150 cm

/hepd/ActivateSatellite true
/hepd/SatelliteConfiguration Config1
/hepd/Satellite/BlanketMaterialConfiguration mylar
/hepd/Satellite/WallMaterialConfiguration Aluminium

/hepd/ActivateHEPDBox true
/hepd/HEPDBoxConfiguration Config4
/hepd/HEPDBox/BlanketMaterialConfiguration mylar
/hepd/HEPDBox/WallTwoMaterialConfiguration Aluminium HCaluminium

/hepd/ActivateTracker true
/hepd/TrackerConfiguration Config4
/hepd/Tracker/SiliconMaterialConfiguration Silicon
/hepd/Tracker/KaptonMaterialConfiguration Kapton
/hepd/Tracker/CarbonFiberMaterialConfiguration CarbonFiber

/hepd/ActivateCalo true
/hepd/CaloConfiguration Config6
```

```
/hepd/Calorimeter/CalorimeterTwoMaterialConfiguration Scintillator LYSO
/hepd/Calorimeter/VetoMaterialConfiguration Scintillator
/hepd/Calorimeter/PoronMaterialConfiguration Poron
/hepd/Calorimeter/CarbonFiberMaterialConfiguration CarbonFiber

/hepd/phys/addPhysics emstandard-opt4
/hepd/phys/addPhysics HPElastic
/hepd/phys/addPhysics FTFP-BERT-HP
/hepd/phys/addPhysics radioactive-decay

/run/initialize
/hepd/gun/setDefault
/hepd/gun/random
/hepd/gun/particle e-
/hepd/gun/powerlaw 1 200 MeV -2.2
/hepd/producer/SetRootFile Test.root HEPD
/run/beamOn 10000000
/hepd/producer/StoreRootFile
```

Lista degli acronimi e dei simboli

M_L	magnitudo locale
M_s	magnitudo superficiale
M_0	momento sismico
M_w	magnitudo del momento
M	magnitudo
λ_D [m]	lunghezza di Debye
f_0F2 [Hz]	frequenza critica
h_mF2 [km]	altezza critica
<i>CME</i>	Coronal Mass Ejections
<i>EME</i>	Electro-Magnetic Emissions
<i>AW</i>	Acoustic Waves
<i>DD</i>	Dilatancy-Diffusion
<i>AGW</i>	Acoustic Gravity Waves
<i>SLF</i> [Hz]	Super Low Frequency
<i>ELF</i> [Hz]	Extra Low Frequency
<i>ULF</i> [Hz]	Ultra Low Frequency
<i>VLF</i> [Hz]	Very Low Frequency
E_z [V/m]	campo elettrico verticale
<i>LEO</i>	Low Earth Orbit
<i>SAA</i>	South Atlantic Anomaly
<i>ISS</i>	International Space Station
<i>MIR</i>	stazione spaziale russa
<i>INGV</i>	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration

<i>VAB</i>	Van Allen Belts
<i>DEMETER</i>	satellite francese
<i>CSES</i>	China Seismo-Electromagnetic Satellite
<i>CNSA</i>	China National Space Agency
<i>ASI</i>	Agenzia Spaziale Italiana
<i>INFN</i>	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
<i>INAF – IAPS</i>	Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali
<i>CEA</i>	China Earthquake Administration
<i>CSA</i>	Chinese Space Academy
<i>CDI</i>	Crustal Dynamic Institute
<i>LAZIO</i>	Low Altitude Zone Ionization Observatory
<i>HEPD</i>	High Energy Particle Detector
<i>LEPD</i>	Low Energy Particle Detector
<i>EFD</i>	Electric Field Detector
<i>MLI</i>	Multi Layer Insulation
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>LYSO</i>	Lutetium Yttrium OxyorthoSilicate
<i>CF</i>	Carbon Fiber
<i>VLSI</i>	Very Large Scale Integration
<i>TOF</i> [ns]	Time Of Flight
F_C [N]	Forza di Coulomb
S [MeV/cm]	Stopping power
<i>MIP</i>	Minimum Ionizing Point
<i>FWHM</i>	Full Width at Half Maximum
<i>GEANT</i>	GEometry ANd Tracking
<i>CERN</i>	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
<i>LHC</i>	Large Hydron Collider
<i>PMT</i>	PhotoMultiPlier
<i>RMS</i>	Root Mean Square

Bibliografia

- [1] H. Kanamori e E. Brodsky. “The physics of earthquakes”. In: *Progress in Physics* 67.8 (2004), pp. 1429–1492 (cit. a p. 4).
- [2] I. Lehmann. *Inner Earth*. 1936, pp. 160–165 (cit. a p. 4).
- [3] N. Oreskes. *Plate Tectonics: An Insider’s History Of The Modern Theory Of The Earth*. 2003, p. 424 (cit. a p. 4).
- [4] E.M. Anderson. “The dynamics of faulting”. In: *Geological Society* 367 (2012), pp. 231–246 (cit. a p. 7).
- [5] T. W. Schlatter. “Atmospheric Composition and Vertical Structure”. In: *AMB Publications* 6 (2009), pp. 21–30 (cit. a p. 11).
- [6] W. et al. Dieminger. *The Upper Atmosphere*. 1936 (cit. a p. 14).
- [7] L. et al. Liu. “Seasonal variations of the ionospheric electron densities retrieved from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate mission radio occultation measurements”. In: *Journal of Geophysical Research* 114 (2009), pp. 1–11 (cit. a p. 18).
- [8] E. et al. Kazimirovski. “Effects on the ionosphere due to phenomena below it”. In: *Surveys in Geophysics* 24 (2003), pp. 139–184 (cit. a p. 18).
- [9] T. Rikitake. “Classification of earthquake precursors”. In: *Tectonophysics* 54 (1979), pp. 293–309 (cit. a p. 19).
- [10] A.L. Hammond. “Earthquake predictions: Breakthrough in theoretical insight?” In: *Science* 180.4088 (1973), pp. 851–853 (cit. a p. 19).

BIBLIOGRAFIA

- [11] K. et al. Wang. “Predicting the 1975 Haicheng Earthquake”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 96.3 (2006), pp. 757–795 (cit. a p. 19).
- [12] H.F. et al. Reid. “The mechanism of the earthquake”. In: *Carnegie Institution* (1910), pp. 1–192 (cit. a p. 19).
- [13] R.L. Fleischer. “Radon flux from the Earth: Methods of measurement by the nuclear track technique”. In: *Journal of Geophysical Research* 85 (1980), pp. 7553–7556 (cit. a p. 19).
- [14] D. Ghosh. “Anomalous radon emission as precursor of earthquake”. In: *Journal of Applied Geophysics* 69 (2009), pp. 67–81 (cit. a p. 20).
- [15] N.V. Korovkin. “Model of earthquake triggering due to gas-fluid bubble upward migration”. In: *TERRAPUB* (2002), pp. 187–194 (cit. a p. 20).
- [16] B. et al. Bandyopadhyay. “Studies on the Precursors of an Earthquake as the VLF Electromagnetic Sferics”. In: *Earth Physics* 56.9-10 (2010), pp. 1208–1227 (cit. a p. 21).
- [17] E.A. Chernyavsky. “The atmosphere-electric precursors of earthquakes in Meteorology and hydrology in Uzbekistan”. In: *Science, Technology and Society* 12 (1955), pp. 26–35 (cit. a p. 21).
- [18] W.A. Hoppel. “Theory of the electrode effect”. In: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 29 (1967), pp. 709–721 (cit. a p. 21).
- [19] J.A. Chalmers. “The theory of the electrode effect - Variation of ionization with height”. In: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 29 (1967), pp. 217–219 (cit. a p. 21).
- [20] M.B. et al. Gokhberg. “Studies of Perturbations of Natural and Artificial Electromagnetic Fields by Sources of Seismic Origin”. In: *Earth Physics* 23 (1987), pp. 102–108 (cit. a p. 24).
- [21] M.B. et al. Gokhberg. “Possible Effects of the Action of Electric Fields of Seismic Origin on the Ionosphere”. In: *Geomagnetism and Aeronomy* 24 (1984), pp. 183–186 (cit. a p. 24).

-
- [22] M.B. et al. Gokhberg. “Perturbations of the Ionospheric F-Layer Prior to Strong Earthquakes”. In: *Earth Physics* 24 (1989), pp. 254–260 (cit. a p. 24).
- [23] R. et al. Battiston. “First evidence for correlations between electron fluxes measured by NOAA-POED satellites and large seismic events”. In: *Nuclear Physics B* 243-244 (2013), pp. 249–257 (cit. a p. 25).
- [24] V.I. et al. Larkina. “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 (cit. a p. 26).
- [25] S.A. et al. Pulinets. “The earthquakes prediction possibility on the base of topside sounding data”. In: *IZMIRAN preprint* 32 (1991), p. 25 (cit. a p. 26).
- [26] M. et al. Akhoondzadeh. “Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6$) using DEMETER and GPS data”. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (2010), pp. 7–18 (cit. alle pp. 26, 39, 41).
- [27] M.J. Rycroft. “Interactions between wistler mode waves and energetic electrons in the coupled system formed by the magnetosphere, ionosphere and atmosphere”. In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 53 (1991), pp. 849–857 (cit. a p. 27).
- [28] T. Terada. “On luminous phenomena accompanying earthquakes”. In: *Journal of Earthquakes Research Institute* (1931), pp. 225–255 (cit. a p. 27).
- [29] C.H. Scholtz. “Earthquake prediction: A physical basis”. In: *Science* 181 (1973), pp. 803–809 (cit. a p. 27).
- [30] L. et al. Perrone. “Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy”. In: *Annals of Geophysics* 28 (2010), pp. 941–950 (cit. alle pp. 32, 41).

BIBLIOGRAFIA

- [31] S.V. et al. Garmash. “Generation of atmospheric oscillations by seismic gravitational vibrations of the Earth”. In: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 25 (1989), pp. 1290–1299 (cit. a p. 32).
- [32] L.M. et al. Fishkova. “Relationship between night airglow and seismic activity”. In: *Annales Geophysicae* 3 (1985), pp. 679–694 (cit. a p. 32).
- [33] N. Sivadas. “High Energy Particle Bursts as Seismic Precursors”. In: *itmsat* (2010), pp. 1–19 (cit. alle pp. 33, 42).
- [34] S.A. Pulinets. “Ionospheric precursors of earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications”. In: *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 15 (2004), pp. 413–424 (cit. alle pp. 35, 40).
- [35] P. et al. Picozza. “High Energy Charged Particle Bursts in the near Earth Space as Earthquake Precursors”. In: *Annales Geophysicae* 21 (2002), pp. 597–602 (cit. a p. 36).
- [36] C. et al. Fidani. “Burst increases of Precipitating Electrons recorded by the DEMETER Satellite before strong Earthquakes”. In: *Natural Hazards and Earth System Science* 13 (2013), pp. 197–209 (cit. a p. 36).
- [37] I.R. et al. Dobrovolsky. “Estimation of the size of earthquake preparation zones”. In: *Pure and applied Geophysics* 117 (1979), pp. 1025–1044 (cit. a p. 38).
- [38] S.A. Pulinets. “Seismic activity as a source of the ionospheric variability”. In: *Advances in Space Research* 22 (1998), pp. 903–906 (cit. a p. 39).
- [39] S.A. et al. Pulinets. *Ionospheric Precursors of Earthquake*. 2004 (cit. alle pp. 39, 40).
- [40] D. et al. Davidenko. “Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit”. In: *Advances in Space Research* (2013), pp. 1–15 (cit. a p. 41).
- [41] A. Massoudi. “Multi-Layer Insulation Fabrication and Resistance on Blanket Surface”. In: *SAE International* (2013) (cit. a p. 47).

-
- [42] *Wrapping Scintillator Crystals to Optimize Light Collection - Technical Note*. URL: http://www.sensl.com/downloads/ds/TN-Crystal_wrapping.pdf (cit. a p. 60).
- [43] *EJ-200. Data sheet*. URL: <http://www.eljentechnology.com/index.php/products/plastic-scintillators/48-ej-200> (cit. a p. 69).
- [44] C.M. et al. Pepin. “Properties of LYSO and Recent LSO Scintillators for Phoswich PET Detectors”. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 51.3 (2004), pp. 789–795 (cit. a p. 71).
- [45] *LYSO Cristal*. URL: http://www.omegapiezo.com/crystal_scintillators.html (cit. a p. 71).
- [46] J. et al. Beringer. “Review of Particle Physics”. In: *Physical Review D* 86 (2012), pp. 360–365 (cit. a p. 77).
- [47] *Energy Resolution in Calorimeters*. URL: http://pcaen1.ing2.uniroma1.it/patera/didattica/fis_mod/trasp_riv/Glossario/node63.html (cit. a p. 77).
- [48] J.D. Sullivan. “Geometrical Factor and Directional Response os Single and Multi-Element Particle Telescope”. In: *Nuclear Instruments and Methods* 95 (1971), pp. 5–11 (cit. a p. 78).
- [49] S. et al. Agostinelli. “Geant4—a simulation toolkit”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 506.3 (2003), pp. 250–303 (cit. a p. 83).
- [50] D. Casadei. “Direct measurement of galactic cosmic ray fluxes with the orbital detector AMS-02”. 2003 (cit. a p. 109).
- [51] S. et al. Carboni. “Particle identification using the DE-E technique and pulse shape discrimination with the silicon detectors of the FAZIA project”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 664 (2012), pp. 251–263 (cit. a p. 133).