

**POLITECNICO DI MILANO**

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

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 2014-2015



# Indice

<b>1</b>	<b>Fisica dell'accoppiamento sismo-ionosferico</b>	<b>1</b>
1.1	Sismologia . . . . .	2
1.1.1	La struttura interna della Terra . . . . .	2
1.1.2	L'attività sismica . . . . .	3
1.2	La Ionosfera . . . . .	8
1.2.1	L'Atmosfera e la Magnetosfera . . . . .	8
1.2.2	La struttura della Ionosfera . . . . .	12
1.2.3	Variazioni ionosferiche regolari . . . . .	15
1.3	Precursori di un terremoto . . . . .	16
1.3.1	I precursori geologici . . . . .	17
1.3.2	I precursori ionosferici . . . . .	20
1.4	Introduzione all'accoppiamento sismo-ionosferico . . . . .	25
1.5	L'accoppiamento sismo-ionosferico . . . . .	31
1.6	Principali aspetti fenomenologici dei precursori . . . . .	34
<b>2</b>	<b>La missione spaziale CSES-Limadou e la strumentazione nucleare</b>	<b>40</b>
2.1	La missione spaziale CSES-Limadou . . . . .	41
2.1.1	Il satellite CSES . . . . .	42
2.2	Il rivelatore HEPD . . . . .	48
2.2.1	Il Tracker . . . . .	51
2.2.2	Il Trigger . . . . .	55
2.2.3	Il Calorimetro . . . . .	56
2.2.4	VETO . . . . .	56

## INDICE

---

2.3	Cenni di fisica delle misure e della strumentazione nucleari . . .	57
2.3.1	Interazione radiazione-materia . . . . .	57
2.3.2	Rivelatori plastici e inorganici a scintillazione . . . . .	64
2.3.3	Rivelatori a semiconduttore . . . . .	69
2.3.4	La risoluzione energetica . . . . .	73
2.3.5	Le accettanze . . . . .	75
2.4	Altre missioni spaziali . . . . .	76
2.5	HEPD realizzato . . . . .	77
<b>3</b>	<b>Realizzazione della geometria del rivelatore HEPD con GEANT4</b>	<b>80</b>
3.1	GEANT4 . . . . .	81
3.2	Definizione della geometria del rivelatore HEPD . . . . .	84
3.3	Realizzazione del Satellite . . . . .	85
3.4	Realizzazione del Tracker . . . . .	86
3.5	Realizzazione del Trigger . . . . .	90
3.6	Realizzazione del Calorimetro . . . . .	93
3.7	Realizzazione del VETO e del contenimento laterale . . . . .	97
3.8	La geometria realizzata . . . . .	99
3.9	La produzione dei dati col simulatore . . . . .	99
<b>4</b>	<b>Simulazione ed analisi dei risultati</b>	<b>102</b>
4.1	Obiettivi della simulazione . . . . .	103
4.2	Parametri della simulazione . . . . .	105
4.2.1	Energie di simulazione . . . . .	105
4.2.2	Geometria di simulazione . . . . .	107
4.3	Analisi della simulazione . . . . .	110
4.3.1	ROOT . . . . .	111
4.3.2	Selezione degli eventi validi . . . . .	111
4.3.3	Accettanza angolare . . . . .	116
4.3.4	Accettanza totale . . . . .	124
4.3.5	Risoluzione energetica . . . . .	125
4.3.6	Discriminazione di elettroni e protoni . . . . .	130
4.3.7	Stopping plane . . . . .	135



---

4.3.8	La definizione del trigger . . . . .	139
4.4	Discussione dei risultati . . . . .	147
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>148</b>
5.1	Conclusioni . . . . .	148
5.2	Sviluppi futuri . . . . .	149
	<b>Bibliografia</b>	<b>159</b>

# Elenco delle figure

1.1	La struttura interna della Terra. . . . .	3
1.2	Mappa delle placche tettoniche della Terra. . . . .	4
1.3	Un esempio di placche convergenti ( <i>a</i> ), scorrimento tra placche ( <i>b</i> ) e placche divergenti ( <i>c</i> ). . . . .	4
1.4	Mappa delle attività sismiche e vulcaniche sviluppatasi nell'ultimo milione di anni (NASA). In <i>blu, giallo e rosso con linea continua</i> sono rappresentate attività dovute a terremoti. In <i>pallini rossi</i> sono rappresentate attività dovute a vulcanismo. . . . .	5
1.5	Esempi di faglia diretta ( <i>normal fault</i> ), una faglia trascorrente ( <i>strike-slip fault</i> ) ed inversa ( <i>reverse fault</i> ). . . . .	6
1.6	Confronto tra l'energia rilasciata da alcuni terremoti e da alcuni fenomeni fisici o eventi avvenuti, in kg di TNT equivalente. . . . .	8
1.7	La struttura dell'atmosfera. . . . .	10
1.8	A <i>sinistra</i> , il campo magnetico terrestre; a <i>destra</i> , gli effetti dell'interazione del campo magnetico con il vento solare. . . . .	10
1.9	Le fasce di Van Allen interna ed esterna. . . . .	11
1.10	I tre moti delle particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen. . . . .	12
1.11	<i>Sopra</i> , alcune L-shells in due dimensioni (in tre dimensioni hanno aspetto toroidale). <i>Sotto</i> , alcune L-shells proiettate sulla superficie terrestre. . . . .	13
1.12	In <i>rosso</i> , raffigurazione del <i>pitch angle</i> $\vartheta$ per una particella nel campo geomagnetico. . . . .	13
1.13	Le regioni che compongono la ionosfera caratterizzate dalla diversa concentrazione di elettroni e dalle diverse specie ioniche presenti. . . . .	14

1.14	Sviluppo verticale di un'onda elettromagnetica con conseguente $E \times B$ drift. . . . .	15
1.15	In <i>alto</i> , la media annua del valore della frequenza critica; in <i>basso</i> , l'andamento dell'attività solare in flussi radio provenienti dal Sole. . .	16
1.16	Concentrazione di radon nella falda acquifera prima e dopo il terremoto di Kobe, Giappone, del 16 gennaio 1995. . . . .	18
1.17	Variazioni in percentuale della frequenza critica a diverse ore di distanza dal terremoto, secondo i dati raccolti da Alouette-1: in <i>rosso</i> , variazioni positiva, in <i>blu</i> , variazioni negative. <i>In alto</i> , 30 ore prima dell'evento sismico. <i>Al centro</i> , 6 ore prima dell'evento sismico. <i>In basso</i> , 18 ore dopo l'evento sismico. . . . .	21
1.18	Esempio della variazione della concentrazione di elettroni a diverse altitudini prima di un terremoto. La linea individuata dai <i>triangoli</i> indica il profilo modificato, la linea individuata dai <i>quadrati</i> indica il profilo indisturbato. In questo caso la variazione è negativa, dunque. . . . .	23
1.19	Luce tellurica emanata prima del terremoto del 2008 nel Sichuan, Cina. . . . .	25
1.20	Andamento della concentrazione di radon in aria (linea individuata dai <i>triangoli</i> ), in relazione con la frequenza critica rilevata alle 6 di mattina (linea <i>continua</i> ) e alle 18 (linea individuata dai <i>cerchi</i> ), rilevate prima del terremoto di Nazarbek (Uzbekistan) del 11 dicembre 1980. . . . .	26
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> . . . . .	28
1.22	Nell'immagine in <i>alto</i> , le particelle intrappolate nelle VAB. <i>Al centro</i> , le ULF - VLF EME emesse che viaggiano come onde Alfvén catturate dal campo geomagnetico. In <i>basso</i> , le particelle intrappolate che precipitano dopo l'interazione con le onde Alfvén. . . . .	32
1.23	Il meccanismo di interazione tra ULF - VLF EME e particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen. . . . .	33
1.24	Schema del modello dell'accoppiamento sismo-ionosferico. . . . .	35

## 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 <i>nero</i> , gli istogrammi con media giornaliera, in <i>grigio</i> , gli istogrammi con media nel periodo di 5 giorni. . . . .	36
1.26	Dipendenza della variazione massima della frequenza critica in relazione all'ora locale di rilevamento per i 59 terremoti osservati. . .	37
2.1	La piattaforma satellitare CAST2000 nella versione utilizzata per CSES. . . . .	43
2.2	Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in un giorno. . .	43
2.3	Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in cinque giorni. . .	44
2.4	Ora locale in relazione alla latitudine a cui passa il satellite. . . . .	44
2.5	La struttura esterna del satellite. . . . .	45
2.6	In <i>verde</i> , i bordi che delimitano la regione tra $+65^\circ$ e $-65^\circ$ di latitudine. In <i>rosso</i> , i bordi che delimitano la latitudine coperta da CSES con <i>payload</i> attivo. . . . .	46
2.7	Flussi di particelle stimati per la missione CSES-Limadou in relazione alla posizione geografica e al range energetico. . . . .	46
2.8	Distribuzione di terremoti con magnitudine $M > 5$ tra il 1900 e il 2008 sul suolo cinese. . . . .	47
2.9	I quadrati in colore <i>verde</i> evidenziano l'area di riferimento monitorata in modalità "burst". . . . .	47
2.10	Stazioni di raccolta dati a terra sul suolo cinese. . . . .	48
2.11	Locazione del satellite e degli assi. In colore <i>grigio</i> è rappresentata l'orbita del satellite. . . . .	49
2.12	Il rivelatore HEPD e i vari piani che lo compongono. . . . .	51
2.13	Il rivelatore HEPD con tutti i sostegni e le sezioni che lo compongono. . . . .	52
2.14	La scatola contenente il rivelatore HEPD e le sue unità. . . . .	52
2.15	Profilo laterale del rivelatore HEPD. . . . .	53
2.16	L'interno della scatola del satellite contenente il rivelatore HEPD con le relative <i>power box</i> ed <i>electronic box</i> . . . . .	54
2.17	Il secondo piano di Trigger e la torre di 15 scintillatori: si noti la disposizione sfalsata dei fotomoltiplicatori nei successivi scintillatori. . . . .	54

2.18	L'interno della scatola del satellite privo dei piani di semiconduttori al silicio. . . . .	55
2.19	Differenze di perdita di energia in relazione all'energia della particella incidente, per varie specie di particelle. Si noti il punto di minima ionizzazione e come le particelle $\alpha$ abbiano un rilascio di energia maggiore con un punto di minima ionizzazione ad energie più elevate. . . . .	59
2.20	Curva di Bragg, cioè potere frenante di una particella carica pesante in relazione alla profondità del mezzo attraversato. . . . .	60
2.21	Curva integrale e curva differenziale del numero di particelle cariche pesanti attenuate con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbitore. . . . .	61
2.22	Numero di elettroni attenuati con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbitore. . . . .	62
2.23	Effetto dominante in relazione al numero atomico del materiale del mezzo attenuatore $Z$ , e all'energia del fotone $h\nu$ . . . . .	64
2.24	Livelli energetici in una molecola organica e fenomeni associati all'interazione con la radiazione. . . . .	65
2.25	Probabilità di bremsstrahlung in relazione all'energia cinetica dell'elettrone, per diversi materiali. . . . .	66
2.26	Struttura delle bande energetiche degli scintillatori cristallini con attivatore. . . . .	68
2.27	Schema del funzionamento di un fotomoltiplicatore. . . . .	69
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). . . . .	70
2.29	Giunzione p-n e relativi potenziale e campo elettrico. . . . .	72
2.30	Rappresentazione della porzione della superficie del rivelatore $d\vec{\sigma} \cdot \hat{r}$ sottesa all'angolo solido $d\omega$ . . . . .	76
2.31	Scatola esterna in alluminio del rivelatore HEPD. . . . .	77
2.32	Apparato interno alla scatola con <i>power supply</i> , a sinistra, <i>electronic box</i> , al centro, e involucro del rivelatore, a destra. . . . .	78
2.33	Il rivelatore con un fotomoltiplicatore sul primo scintillatore di Trigger. . . . .	78

## ELENCO DELLE FIGURE

---

2.34	Il calorimetro e il secondo piano di Trigger con i fotomoltiplicatori montati ai lati degli scintillatori. . . . .	79
3.1	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) 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. . . . .	86
3.2	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) 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 sottostante. . . . .	87
3.3	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) della struttura del Tracker: si notino le finestre lasciate in fronte ai semiconduttori e lo spazio lasciato all'elettronica nella parte inferiore. . . . .	88
3.4	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) della struttura del Tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio (in <i>blu</i> ) e della parte elettronica (in <i>rosso</i> ). . . . .	88
3.5	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) della struttura del Tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio e dei pezzi in poron (in <i>giallo</i> ). Si notino le parti di kapton (in <i>azzurro</i> ) nella versione in SolidEdge. . . . .	89
3.6	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. . . . .	89
3.7	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) della struttura del primo piano di Trigger con i sostegni in fibra di carbonio (in <i>arancio</i> ), <i>lateral</i> i, le barre in fibra di carbonio (in <i>arancio</i> , centrali) e la barra in poron (in <i>giallo</i> ). . . . .	91
3.8	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) della struttura del primo piano di Trigger con la collocazione dello scintillatore. . . . .	91

ELENCO DELLE FIGURE

---

3.9	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) 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. . . . .	92
3.10	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) della struttura del secondo piano di Trigger con collocato il piano di scintillatore. . . . .	93
3.11	Versione in GEANT dello scintillatore: è possibile osservare la divisione in prismi trapezoidali e nel parallelepipedo di cui è composto. . . . .	94
3.12	Versione in GEANT (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) 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. . . . .	94
3.13	Versione in GEANT4 della torre di 15 scintillatori con S2 e in fondo la matrice di LYSO. . . . .	95
3.14	Versione in GEANT4 (a <i>sinistra</i> ) e in SolidEdge (a <i>destra</i> ) del LYSO. Nel disegno in GEANT, in <i>grigio</i> si trova il cristallo, in <i>verde</i> il rivestimento in teflon e in <i>giallo</i> , la croce di poron. . . . .	96
3.15	Versione in GEANT4 della piastra finale forata sul fondo del LYSO. . . . .	96
3.16	Versione in GEANT4 ( <i>a,b,c</i> ) e in SolidEdge ( <i>d,e,f</i> ) delle coperture laterali e finale col VETO scintillatore. In colore <i>blu</i> si può notare il piano di scintillatore plastico che funge da VETO mentre in <i>arancione</i> e <i>giallo</i> le strutture di sostegno che circondano lo scintillatore rispettivamente in fibra di carbonio e poron. . . . .	98
3.17	La geometria realizzata. Viene qui presentata l'illustrazione dell'interazione tra la geometria 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 $\gamma$ , la cui energia fa sì che superi nella maggior parte dei casi lo spessore del rivelatore, tranne in alcuni casi in cui, per effetto fotoelettrico, genera degli elettroni, in figura in colore <i>rosso</i> . . . . .	100
4.1	Fascio di elettroni generato con andamento a legge di potenza. . . . .	108

## ELENCO DELLE FIGURE

---

4.2	Fascio di protoni generato con andamento a legge di potenza. . . .	108
4.3	Vista laterale della superficie di generazione, in <i>rosso</i> in alto, e del rivelatore HEPD realizzato in GEANT4. . . . .	109
4.4	Vista in prospettiva della superficie di generazione, in <i>rosso</i> , e del rivelatore HEPD. . . . .	109
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. . . . .	110
4.6	La rappresentazione della condizione di trigger. Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2. .	112
4.7	La rappresentazione della condizione di <i>good hit</i> . Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2. .	114
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 numero di particelle generate e valide 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. . . . .	115
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. . . . .	116
4.10	L'illustrazione del significato di <i>pitch angle</i> per il rivelatore HEPD.	117
4.11	Andamento dell'accettazione angolare per elettroni a varie energie, in funzione del <i>pitch angle</i> . . . . .	118
4.12	Andamento dell'accettazione angolare per protoni a varie energie, in funzione del <i>pitch angle</i> . . . . .	119



## ELENCO DELLE FIGURE

---

4.13	Andamento dell'accettanza angolare per elettroni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO. . . . .	122
4.14	Andamento dell'accettanza angolare per protoni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO. . . . .	123
4.15	Accettanza totale in funzione dell'energia per elettroni (a <i>sinistra</i> ) e protoni (a <i>destra</i> ). . . . .	125
4.16	Accettanze totali in funzione dell'energia per elettroni e protoni. . .	126
4.17	Distribuzione dell'energia totale rilasciata all'interno del rivelatore per elettroni. . . . .	128
4.18	Distribuzione dell'energia totale rilasciata all'interno del rivelatore per protoni. . . . .	129
4.19	Esempio in GEANT4 di <i>bremsstrahlung</i> dato da un elettrone (in <i>rosso</i> ) che entra nel rivelatore ed interagisce con esso, emettendo un fotone (in <i>verde</i> ). Si noti il successivo fenomeno di scattering per il quale l'elettrone cambia direzione. . . . .	130
4.20	Energia depositata da un protone di 150 MeV all'interno del rivelatore. Si può notare il picco di Bragg, caratteristico per particelle cariche pesanti. . . . .	131
4.21	Energia rilasciata dagli elettroni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore. . . . .	132
4.22	Energia rilasciata dai protoni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore. . . . .	132
4.23	Energia rilasciata dagli elettroni e dai protoni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore. Si tenga conto della differenza nell'ordine di grandezza del colore associato al numero di particelle, come riportato nella legenda a destra. . . .	133
4.24	I tagli di selezione operati sul segnale elettronico: in colore <i>nero</i> , quella al 90%, in colore <i>rosso</i> , quella al 95%, in colore <i>verde</i> , quella al 99%. . . . .	134
4.25	Quantità di elettroni (a <i>sinistra</i> ) e protoni (a <i>destra</i> ) che sopravvivono al taglio al 90%. . . . .	135
4.26	Quantità di elettroni (a <i>sinistra</i> ) e protoni (a <i>destra</i> ) che sopravvivono al taglio al 95%. . . . .	136

## ELENCO DELLE FIGURE

---

4.27	Quantità di elettroni (a <i>sinistra</i> ) e protoni (a <i>destra</i> ) che sopravvivono al taglio al 99%. . . . .	136
4.28	Il colore indica il numero di elettroni che si fermano nel piano rappresentato in ascissa con energia iniziale rappresentata in ordinata. . . . .	137
4.29	Il colore indica il numero di protoni che si fermano nel piano rappresentato in ascissa con energia iniziale rappresentata in ordinata. . . . .	138
4.30	Piano interessato dalla fine del tragitto per gli elettroni ad una certa energia. . . . .	140
4.31	Piano interessato dalla fine del tragitto per i protoni ad una certa energia. . . . .	141
4.32	Risultati delle varie configurazioni di trigger per elettroni. . . . .	143
4.33	Risultati delle varie configurazioni di trigger per protoni. . . . .	144
4.34	Rapporto tra il numero di elettroni che rilasciano energia nei rivelatori di VETO e il numero di particelle totali che soddisfa la condizione di trigger in funzione dell'energia. Tale frazione è mostrata per le varie configurazioni di trigger. . . . .	145
4.35	Rapporto tra il numero di protoni che rilasciano energia nei rivelatori di VETO e il numero di particelle totali che soddisfa la condizione di trigger in funzione dell'energia. Tale frazione è mostrata per le varie configurazioni di trigger. . . . .	146

# Elenco delle Tabelle

Tabella 1: Energie dei dodici fasci di elettroni e protoni generati per la simulazione ad energie fisse. . . . . 109

Tabelle 2 (a *sinistra*) e 3 (a *destra*): Risoluzioni energetiche di elettroni (2) e protoni (3) alle diverse energie prese in esame. . . . . 130

Tabella 4: Rapporto tra il numero di protoni e quello di elettroni riscontrato in un certa fascia energetica. . . . . 138

## Estratto

Lo sviluppo di nuove tecniche di rivelazione delle radiazioni è intrinsecamente legato ad una crescente necessità di ottimizzare e perfezionare le misurazioni e la strumentazione nucleari.

A tale scopo sono stati progettati pacchetti software in grado di simulare con sempre maggior rigore 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 campo 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 elevata magnitudo tra *litosfera*, *atmosfera*, *ionosfera* e *magnetosfera*.

Col fine di effettuare ricerche su tale fenomeno e in ottica 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 del rivelatore di alta energia HEPD (*High Energy Particle Detector*), nell'ambito della missione spaziale italo-cinese CSES-Limadou svolta dal satellite cinese CSES (*China Seismo-Electromagnetic Satellite*) 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.

Lo 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.

Questo lavoro di tesi è pertanto consistito in una costruzione virtuale della geometria del rivelatore HEPD tramite la piattaforma di simulazione GEANT4 e nella successiva esecuzione di simulazioni Monte Carlo con fasci di elettroni e di protoni, le particelle interessate dal *burst*.

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

La tesi si articola in cinque capitoli: i Capitoli 1 e 2, teorici, sono inerenti al fenomeno fisico di accoppiamento tra un evento sismico e alcuni parametri ionosferici, oltre che alla fisica dei rivelatori di radiazioni e a informazioni generali circa la missione spaziale dedicata; i Capitoli 3 e 4 si focalizzano sul lavoro di sei mesi svolto presso il gruppo WiZard dell'Università di Tor Vergata, e riguardano la codificazione della struttura del rivelatore HEPD e la successiva analisi dei dati ricavati dalla simulazione. Per concludere, il Capitolo 5 riassume i risultati conseguiti dall'attività descritta in questa tesi e presenta gli sviluppi futuri relativi all'ambito approfondito.

## Abstract

The continuous improvement in the development of particle detection techniques requires new and ultimate nuclear measurement methods and detectors.

In this frame, more powerful and precise software frameworks able to better simulate the interaction between particles and matter have been realized in order to optimize the setup of a particle detector in a given scope.

Several among the latest scientific discoveries in Geophysics and Astrophysics have led to the identification of a linking process of the conditions of *litosphere*, *atmosphere*, *ionosphere* and *magnetosphere* just before the occurrence of an earthquake.

The configuration of a high energy particle detector called HEPD (High Energy Particle Detector) has been examined in order to study the such coupling phenomenon and the proposed physical theory based on seismic *precursors*. This detector will be employed in the italian-chinese space mission CSES-Limadou enterprised by CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) satellite which will be working from September 2016 for the purpose of collecting data useful for a future earthquake prediction.

This instrument has the goal to detect which kind of particles are interacting, their incidence angle and direction, and to evaluate their energy in order to compare them with trapped particles in the *Van Allen Belts*: as predicted by theory, these particles precipitate as bursts before impending earthquakes.

This thesis work consists in the virtual construction of the HEPD detector, by the platform GEANT4, and in the Monte Carlo simulations with beams of electrons and protons.

The results of data processing have been analysed by ROOT, a software library developed by CERN, for the purpose of inspecting the main features of HEPD detector: acceptance, energy resolution, interacting particles identification and relevant events discrimination capability.

The thesis is organised in five Chapters. Chapters 1 and 2 provide some information about CSES-Limadou space mission and concern the physics of seismo-ionospheric coupling and the nuclear instrumentation. Chapters 3

and 4 are based on the work carried out during a six months visiting period at the University of Tor Vergata, in Rome, in the WiZard Group, and are focused on the construction of the virtual geometry of HEPD, the simulation and the following data analysis. The last chapter summarizes the results and sheds light on possible future developments.





# 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 ed 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 del fenomeno dell'accoppiamento sismo-ionosferico.

Si illustra innanzitutto una parte relativa alla sismologia, 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 atmosferica 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 sia 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 basata su proprietà meccaniche analoghe all'interno della stessa regione [2]. In base ad essa, si può avere una divisione in cinque 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 il nucleo e la 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

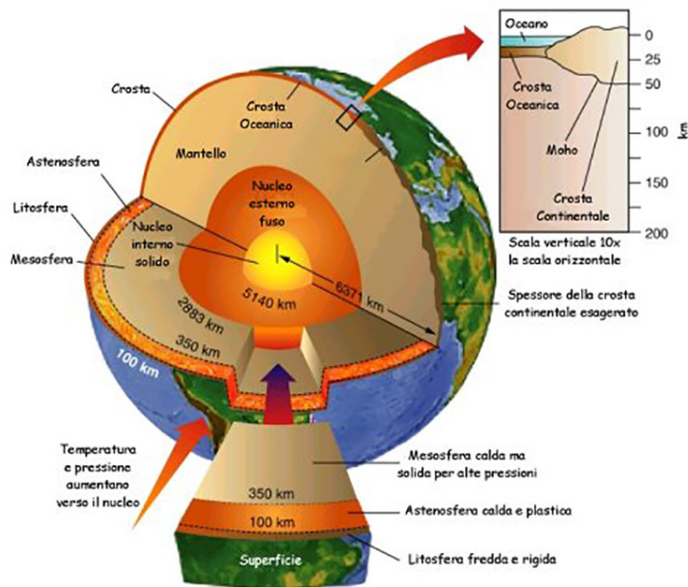


Figura 1.1: La struttura interna della Terra.

le une sulle altre 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 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 margini convergenti o *subduction boundaries* (Figura 1.3, a). 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 interessa la formazione della catena dell'Himalaya. Se infine due placche oceaniche convergono, per una delle due avviene subduzione, e di

## 1.1 Sismologia

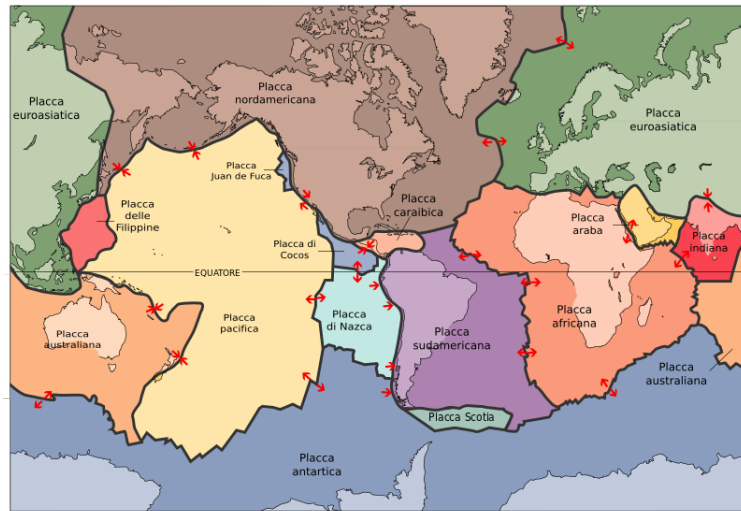


Figura 1.2: Mappa delle placche tettoniche della Terra.

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, b). 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, c). 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.

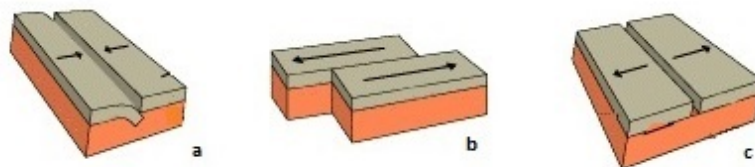


Figura 1.3: Un esempio di placche convergenti (a), scorrimento tra placche (b) e placche divergenti (c).

## 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 questo fenomeno 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 stesse (Figura 1.4).

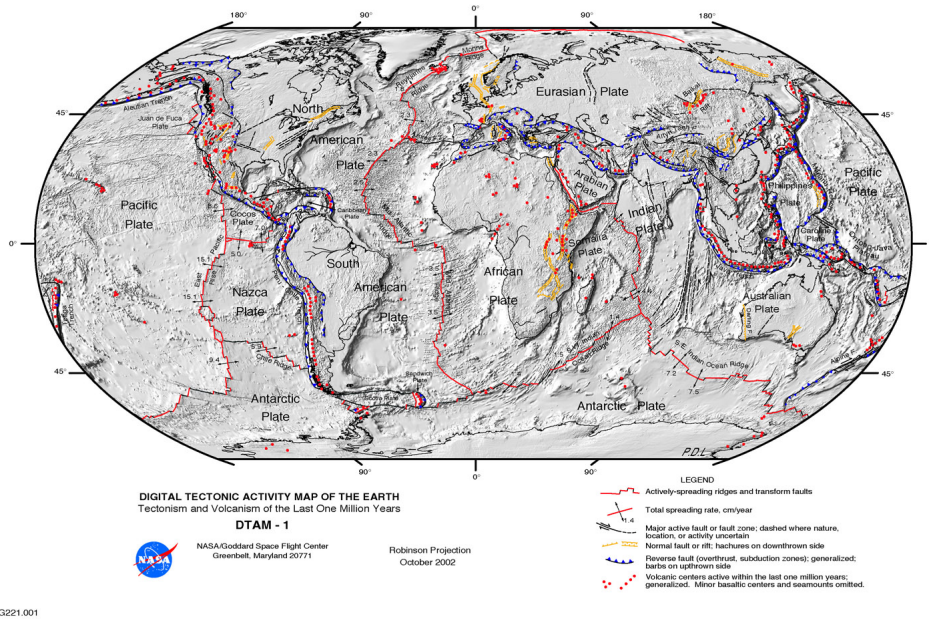


Figura 1.4: Mappa delle attività sismiche e vulcaniche sviluppatasi nell'ultimo milione di anni (NASA). In *blu, giallo e rosso con linea continua* sono rappresentate attività dovute a terremoti. In *pallini rossi* sono rappresentate attività dovute a vulcanismo.

La frattura che si origina come risultato del moto tra due placche è chia-

mata *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, diretta (*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 estendersi per centinaia di chilometri oppure essere locali ed avere un'estensione di qualche chilometro.

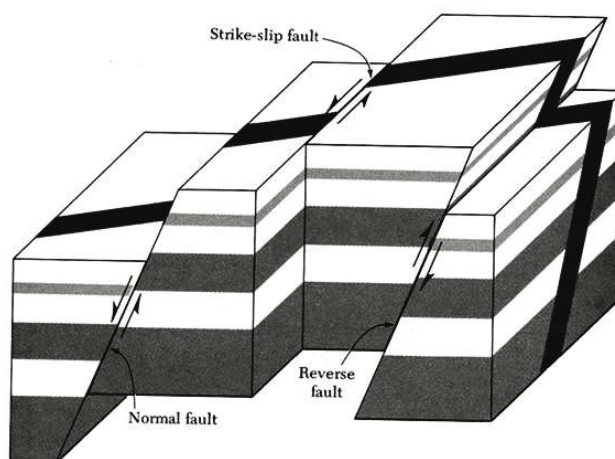


Figura 1.5: Esempi di faglia diretta (*normal fault*), una faglia trascorrente (*strike-slip fault*) ed inversa (*reverse fault*).

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 questo motivo, sulla base di essa, si è istituita la *scala Richter*. Tale magnitudo si misura come:

$$M_L = \log_{10} A + 2,56 \log_{10}(\Delta) - 1,67 \quad (1.1)$$

con  $A$  ampiezza di un evento di riferimento e  $\Delta$  distanza dall'ipocentro.

Un'altra grandezza analoga utilizzata è quella riferita alle onde in superficie propagate 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  $E$  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*  $M_0$ , un'evoluzione della magnitudo descritta dal sistema previsto dalla scala Richter, definita come:

$$M_0 = \mu S \langle u \rangle \tag{1.2}$$

con  $\mu$  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  $M_0$ :

$$M_w = \frac{2}{3}(\log_{10} M_0 - 9,1) \tag{1.3}$$

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

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

## 1.2 La Ionosfera

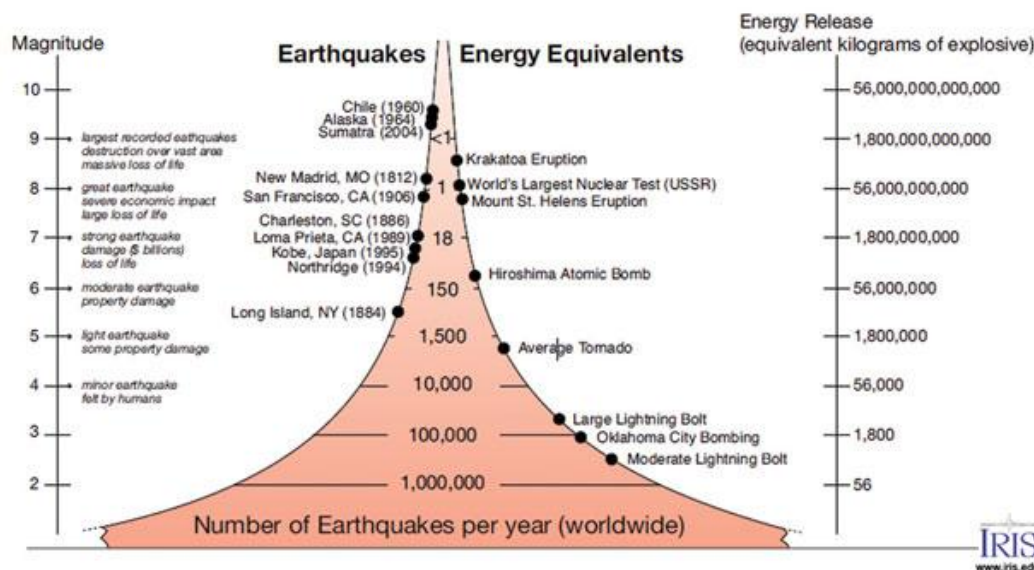


Figura 1.6: Confronto tra l'energia rilasciata da alcuni terremoti e da alcuni fenomeni fisici o eventi avvenuti, in kg di TNT equivalente.

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 si presenta a terra 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  $\beta^-$  come  $^{85}Kr$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{90}Y$ ) o nella terra (principalmente  $^{222}Rn$ ,



$^{220}\text{Rn}$  che hanno un decadimento  $\alpha$  e  $^{40}\text{K}$  che nella maggior parte dei casi presenta un decadimento  $\beta^-$ ), 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 dalla 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 l'*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 da particelle che precipitano da altitudini maggiori, come ad esempio dalle Fasce di Van Allen (VAB), in

## 1.2 La Ionosfera

---

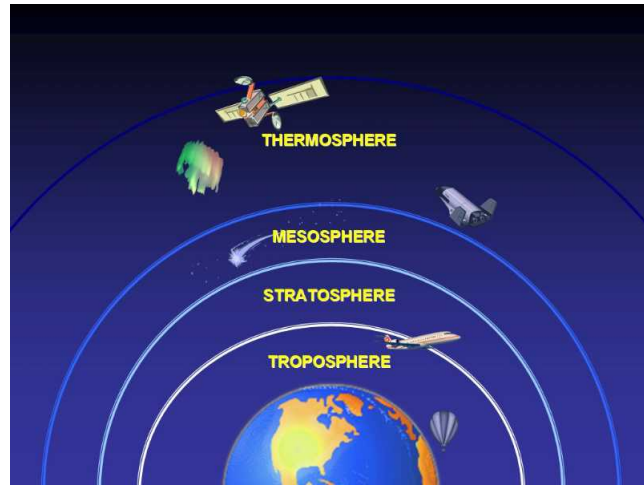


Figura 1.7: La struttura dell'atmosfera.

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) di pochi keV, che proviene dal Sole. Il campo magnetico terrestre agisce quindi da schermo per il vento solare, oltre che per altri raggi cosmici.

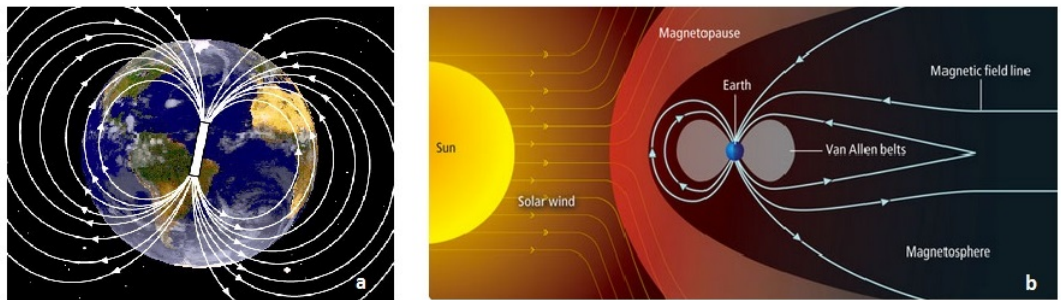


Figura 1.8: A *sinistra*, il campo magnetico terrestre; a *destra*, gli effetti dell'interazione del campo magnetico con il vento solare.

Questa fascia si estende 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(b). 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.

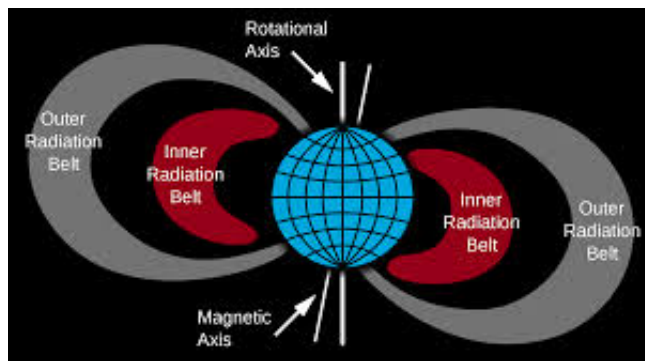


Figura 1.9: Le fasce di Van Allen interna ed esterna.

Le particelle intrappolate nelle 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 che 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 (Figura 1.11, a, b). Ovvero,  $L = 2$  descrive tutte quelle linee del campo magnetico che hanno una distanza pari a 2 volte il raggio terre-

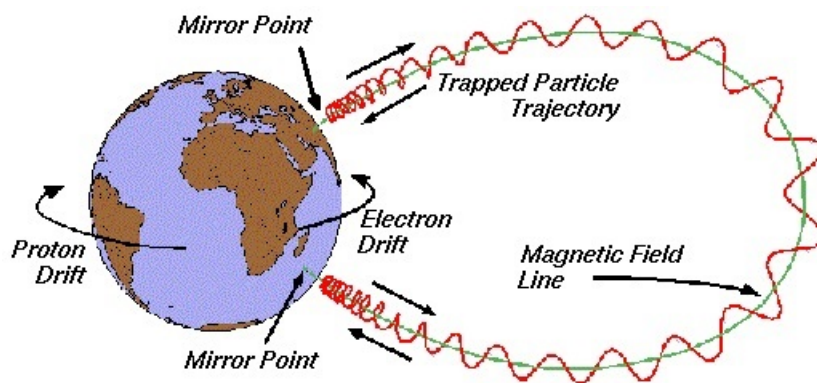


Figura 1.10: I tre moti delle particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen.

stre, partendo dal nucleo della Terra, valutate nella zona in cui incontrano l'equatore magnetico.

Un'ultima grandezza da definire è il *pitch angle*  $\vartheta$ , 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, come visibile in Figura 1.13 [6].

Una regione interessata molto dal fenomeno dell'accoppiamento sismo-ionosferico è quella caratterizzata dalla lettera F, che si divide in due sottoregioni: 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, ma anche l'ossigeno atomico  $O$  è soggetto a ionizzazione, pertanto l'azione ionizzante ha come risultato la presenza massiccia di ioni  $O_2^+$  ed  $NO^+$ , oltre che di  $O^+$ , in questa regione.

## 1. FISICA DELL'ACCOPIAMENTO SISMO-IONOSFERICO

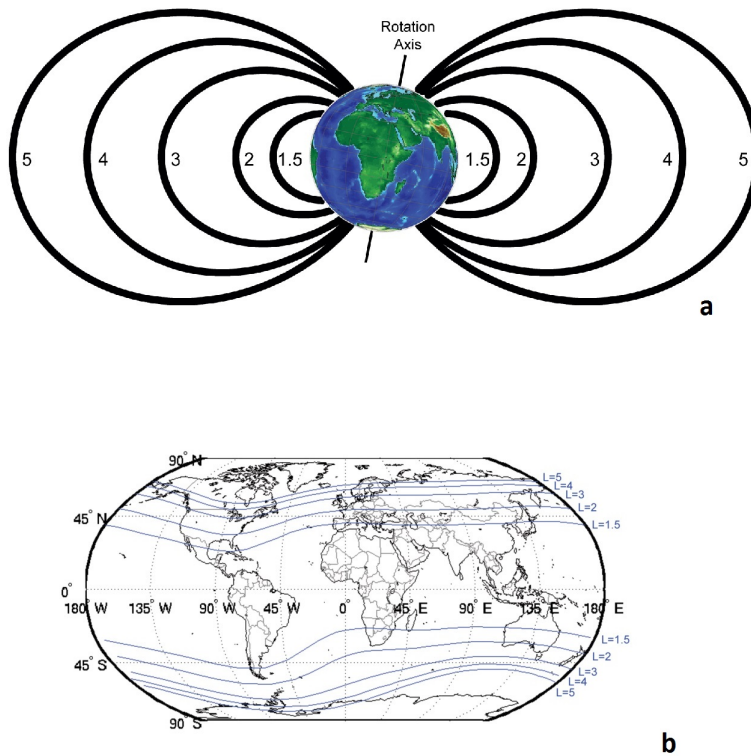


Figura 1.11: *Sopra*, alcune L-shells in due dimensioni (in tre dimensioni hanno aspetto toroidale). *Sotto*, alcune L-shells proiettate sulla superficie terrestre.

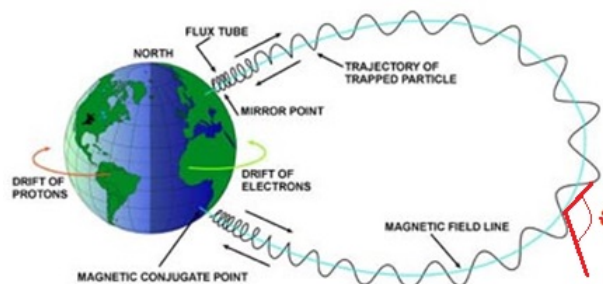


Figura 1.12: In *rosso*, raffigurazione del *pitch angle*  $\vartheta$  per una particella nel campo geomagnetico.

## 1.2 La Ionosfera

---

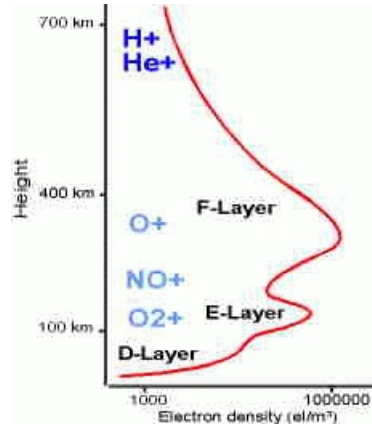


Figura 1.13: Le regioni che compongono la ionosfera caratterizzate dalla diversa concentrazione di elettroni e dalle diverse specie ioniche presenti.

Lo strato F2, il più dinamico, è caratterizzato da una grande densità di plasma ( $10^{12}$  particelle per metro cubo), maggiore in media di due ordini di grandezza rispetto alla regione E.

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:

$$\lambda_D = \left( \frac{\varepsilon_0 k T}{N q^2} \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

con  $\varepsilon_0$  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*  $f_0$  che è:

$$f_0 = 8,98 \sqrt{n} [Hz] \quad (1.5)$$

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 alla frequenza di plasma relativa ad una altitudine con una certa concentrazione di elettroni, essa viene riflessa, altrimenti si può propagare

verticalmente e al limite può essere riflessa in zone di altitudine superiore visto che, come si nota in Figura 1.13, la concentrazione di elettroni tende ad aumentare 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 (secondo un meccanismo chiamato  $E \times B$  drift, Figura 1.14).

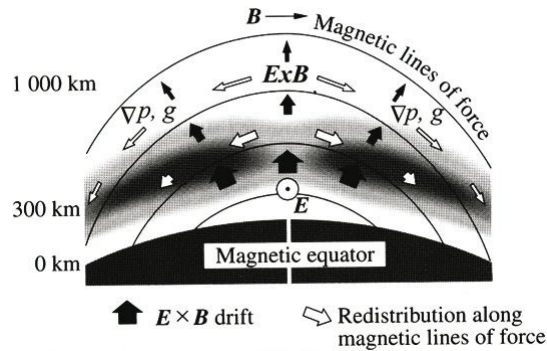


Figura 1.14: Sviluppo verticale di un'onda elettromagnetica con conseguente  $E \times B$  drift.

### 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 queste attività: ad esse, di solito segue un'emissione di onde elettromagnetiche, EME, e onde acustiche ionosferiche,  $AW_i$ , con una presenza di irregolarità nella concentrazione del plasma.

### 1.3 Precursori di un terremoto

---

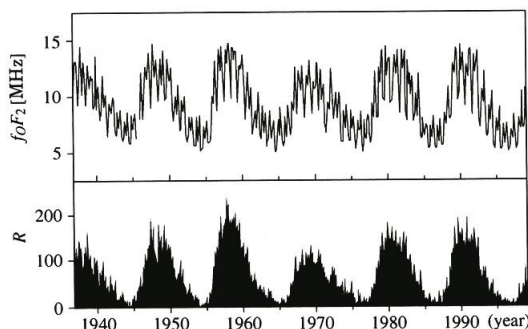


Figura 1.15: In *alto*, la media annua del valore della frequenza critica; in *basso*, l'andamento dell'attività solare in flussi radio provenienti dal Sole.

Il Sole ha inoltre influenza sulla ionosfera tramite il 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 grandezze relative alla crosta terrestre oppure all'atmosfera [9]. Proprio per la loro caratteristica di essere temporalmente antecedenti al terremoto sono da decenni 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 riguardato il terremoto di magnitudo 7,3 del 1975 di Haicheng, in Cina, in cui circa un milione di persone venne 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 provenienti dalla crosta terrestre ( $AW_c$ ).

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 vogliono intendere tutti quei fenomeni cronologicamente antecedenti ad un terremoto, che si instaurano in zone interne alla struttura della Terra o provengono dalle medesime.

Uno di essi, forse il più celebre, è l'emanazione del gas radon (Rn) [13], un gas radioattivo molto volatile, presente nel terreno e che si può liberare in presenza di fratture della crosta. Questo elemento ha 26 diversi isotopi, i cui più importanti sono il  $^{220}\text{Rn}$  (thoron) e il  $^{222}\text{Rn}$ , prodotto di decadimento nella catena del  $^{238}\text{U}$ , con un tempo di dimezzamento di 3,82 giorni, che decade in  $^{218}\text{Po}$  emettendo una particella  $\alpha$  con potere ionizzante. Si stima che fino al 14% dei casi di cancro al polmone sia attribuibile al radon [14]. Questo gas, 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) [15]. Questa variazione si registra in particolare anche una o due settimane prima dell'evento sismico, pur geograficamente non in perfetta concomitanza con la faglia re-

### 1.3 Precursori di un terremoto

---

sponsabile 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.

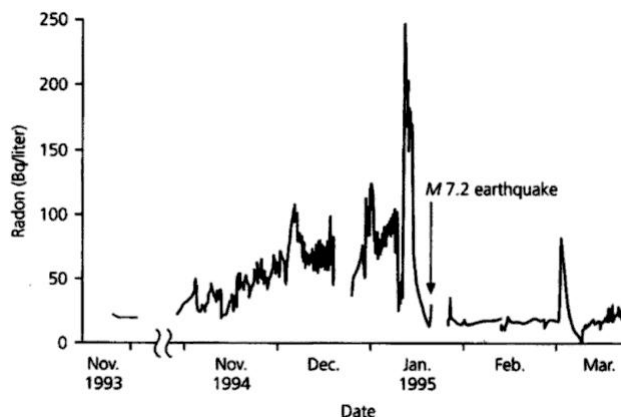


Figura 1.16: Concentrazione di radon nella falda acquifera prima e dopo il terremoto di Kobe, Giappone, del 16 gennaio 1995.

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 [16] (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 di 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 loro 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 kHz a 3 kHz)

e molto bassa (VLF - da 3 kHz a 30 kHz) che accompagna la variazione del campo elettrico verticale  $E_z$ , cioè la componente verticale del campo elettrico terrestre [17].

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 [18].

Per concludere, per quanto concerne i fenomeni precursori legati al terreno, si possono 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.

Va fatta menzione del fatto che il campo elettrico viene caricato sostanzialmente da tre sorgenti: principalmente da fulmini, ma anche dal meccanismo a dinamo che si instaura tra vento solare e magnetosfera e infine da 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 Hoppel nel 1967, per cui, se il flusso di elettroni dalla terra diventa scarso, avviene un accumulo di carica positiva sulla superficie con grosse conseguenze sul campo elettrico, come sarà illustrato in seguito (Sezione 1.4, Figura 1.21) [19] [20].

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/m<sup>2</sup>).

La zona in cui vengono registrati tutti questi effetti prende il nome di *zona di preparazione* di un terremoto, la cui dimensione dipende dall'entità del terremoto.

### 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 nello spazio due anni prima per studi riguardanti la ionosfera.

In particolare, il satellite è stato in grado di misurare 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 tenuto conto delle variazioni giornaliere (Figura 1.17).

Oltre alla differenza evidente nel valore della frequenza critica misurato, in concomitanza sono risultate manifeste delle variazioni nella concentrazione ionosferica degli elettroni e quindi mutamenti del plasma. I risultati dei dati raccolti da Alouette-1 (Figura 1.17) 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, sono però da aggiungere alcune considerazioni: la prima è legata al fatto che la variazione 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. Tutt'oggi, una spiegazione completa a tali com-

## 1. FISICA DELL'ACCOPIAMENTO SISMO-IONOSFERICO

---

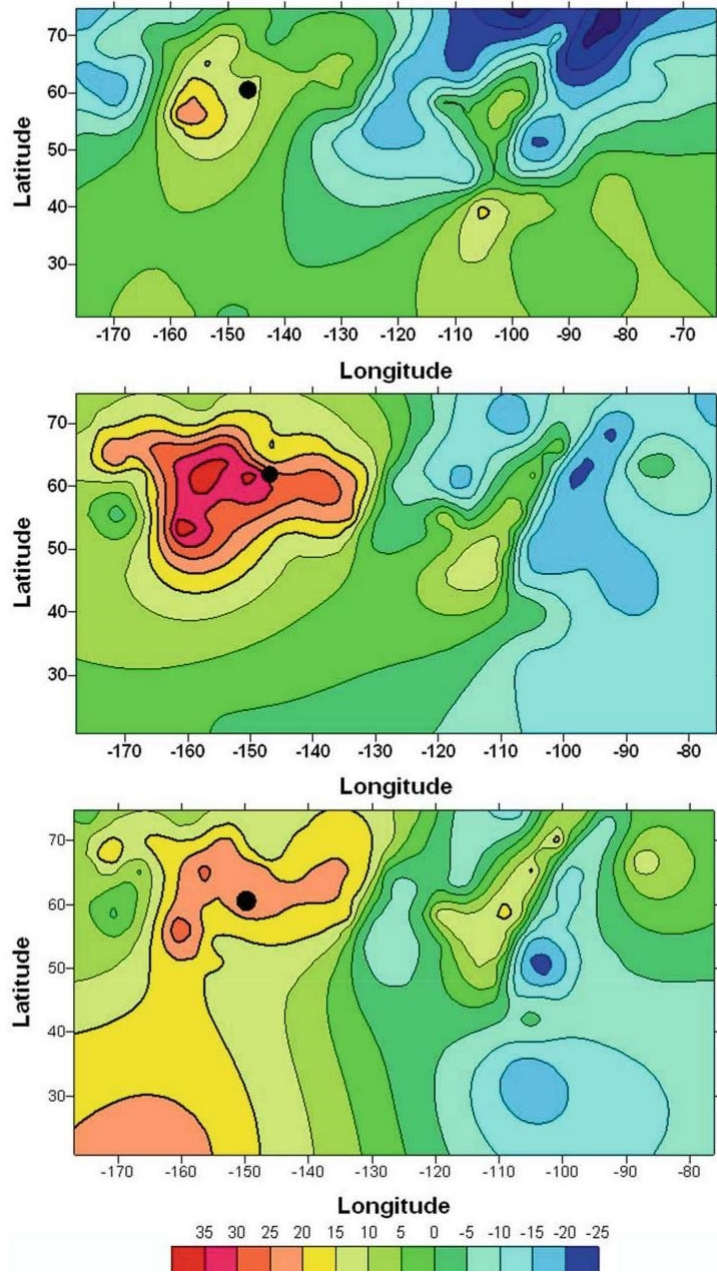


Figura 1.17: Variazioni in percentuale della frequenza critica a diverse ore di distanza dal terremoto, secondo i dati raccolti da Alouette-1: in *rosso*, variazioni positive, in *blu*, variazioni negative. *In alto*, 30 ore prima dell'evento sismico. *Al centro*, 6 ore prima dell'evento sismico. *In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

portamenti non esiste, anche se più avanti verranno illustrati possibili motivi. Nonostante ciò, si è potuto comunque concludere che la variazione del parametro  $f_0F2$  può essere legata all'insorgenza di un evento sismico, pur non essendo ancora stato spiegato totalmente il meccanismo fisico.

Numerosi altri satelliti lanciati in anni successivi in orbite LEO (*Low Earth Orbit*, 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 sua varietà di comportamento in concomitanza di un terremoto: alle volte la variazione è solo positiva, altre volte solo negativa, altre volte entrambe in zone e tempi diversi, con l'ipotesi che ciò sia dovuto alla differenza nei meccanismi di formazione di un terremoto, alle zone di formazione, alle variazioni meteorologiche e temporali, all'attività solare e geomagnetica oltre che alla latitudine e longitudine e all'ora del giorno.

Grazie ad altre missioni compiute, è stato inoltre possibile riscontrare la presenza di onde VLF, sempre in fasi precedenti ad un terremoto, nella regione D della ionosfera in concomitanza di onde AGW [21]: 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 [22].

Nella regione F, infine, si è dimostrata una ingente variazione nella concentrazione degli elettroni, sempre come fenomeno precursore (Figura 1.18) [23].

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 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

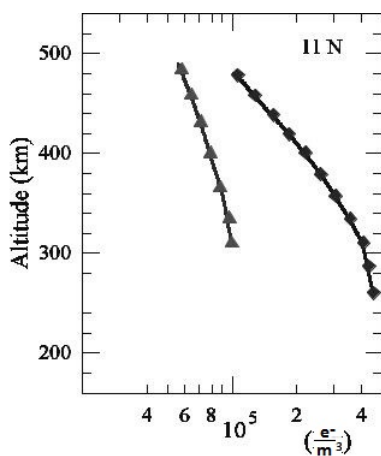


Figura 1.18: Esempio della variazione della concentrazione di elettroni a diverse altitudini prima di un terremoto. La linea individuata dai *triangoli* indica il profilo modificato, la linea individuata dai *quadrati* indica il profilo indisturbato. In questo caso la variazione è negativa, dunque.

i satelliti che vi orbitano, i cui dati raccolti sono spesso considerati irrilevanti da un punto di vista scientifico [24] .

Uno studio condotto da altri satelliti, tra cui principalmente quelli del programma spaziale Intercosmos, ha poi rivelato quantitativamente la variazione, 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 quattro gruppi: il primo riguardante campi elettromagnetici, il secondo parametri del plasma, il terzo concernente flussi

di particelle, il quarto emissioni 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 di intensità [25] 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 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 legati, 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 [26] 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 [27].

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 almeno 3 ore rispetto al verificarsi di un terremoto di magnitudo maggiore o uguale a 4 [28]. 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 emissioni ottiche, come ad esempio le *luci telluriche*, fenomeni di emissione di luce che avvengono in cielo alcuni secondi prima di un sisma [29], 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 [30] 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 connettono i due fenomeni sono state sviluppate all'inizio degli anni '80 quando venne 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).

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  $f_0F2$ . Questo caso suggerì l'esistenza di un legame tra i due fenomeni, pur non essendo chiaro il comportamento della

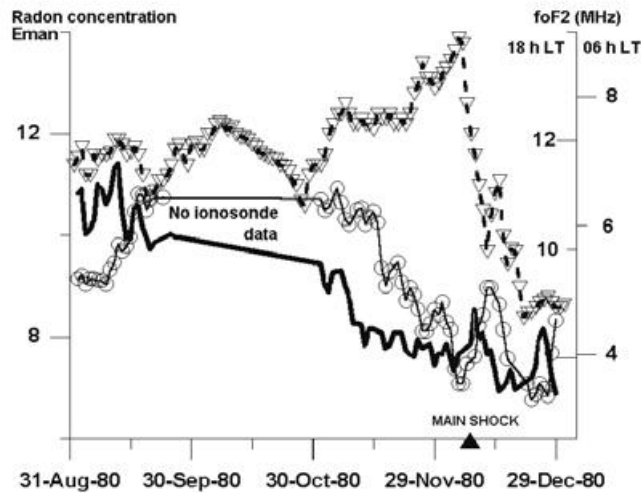


Figura 1.20: Andamento della concentrazione di radon in aria (linea individuata dai *triangoli*), in relazione con la frequenza critica rilevata alle 6 di mattina (linea *continua*) e alle 18 (linea individuata dai *cerchi*), rilevate prima del terremoto di Nazarbek (Uzbekistan) del 11 dicembre 1980.

frequenza critica (si rammenta che la sua variazione può avere sia comportamento positivo che negativo). Simili risultati vennero ottenuti analizzando l'area colpita dal disastro all'impianto nucleare di Chernobyl del 1986, e rafforzati da andamenti analoghi misurati 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, fenomeni 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 sotto forma di vapore ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 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 Hoppel nel 1967 (Figura 1.21). Esso 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 muovono verso l'alto creano analogamente una zona di carica negativa formando una sorta di elettrodo con campo elettrico locale  $E_l$  rivolto verso l'alto che diminuisce di intensità quello terrestre già presente e che come prima conseguenza forma una carica sulla superficie.

Nell'*electrode layer*, la regione di atmosfera interessata dal fenomeno, il campo elettrico è quindi minore rispetto a quello normale ( $E - E_l$ ) 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 con-

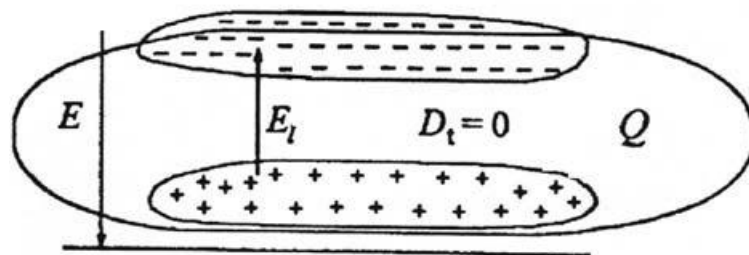


Figura 1.21: Cariche positive e negative vicino alla superficie terrestre, come risultato dell'effetto elettrodo. L'area individuata dalla linea ovale prende il nome di *electrode layer*.

centrata. 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 suppose 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 superiori ed

un'interazione con le particelle intrappolate.

In realtà, tutti i modelli e calcoli basati sulla teoria secondo cui le onde AGW si possano propagare 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 e F. Nella fattispecie, è risultato evidente come un campo elettrico sviluppatosi a partire da una zona del terreno piuttosto ampia, con raggio di almeno 100 km, 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 variazione di frequenza critica, che si ricorda essere dipendente dalla radice della concentrazione di elettroni, presenta valori positivi e negativi.

Nella regione E, inoltre, si è verificato che la formazione di *sporadic layers* è 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 [31].

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 [32]. 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 sarebbero inoltre le responsabili di eventuali emissioni ottiche [33].

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, con frequenza uguale a quella delle onde, che ne provoca lo *scattering* ed infine la precipitazione nell'atmosfera inferiore, sotto forma di *particle burst* rilevati dai satelliti ad un'altitudine di 500-800 km (Figura 1.22) [34].

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 1.23) e con quest'ul-

time 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.

## 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, 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. Avviene così il fenomeno dell'*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 instau-

## 1.5 L'accoppiamento sismo-ionosferico

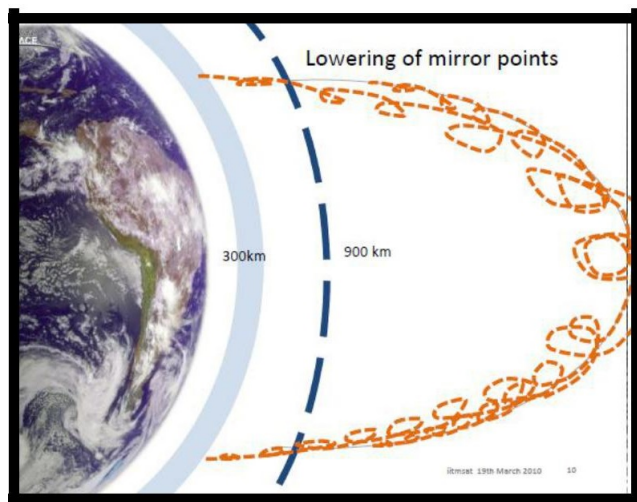
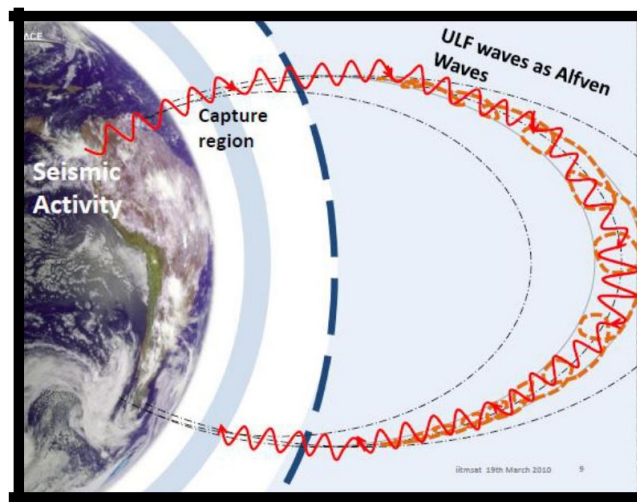
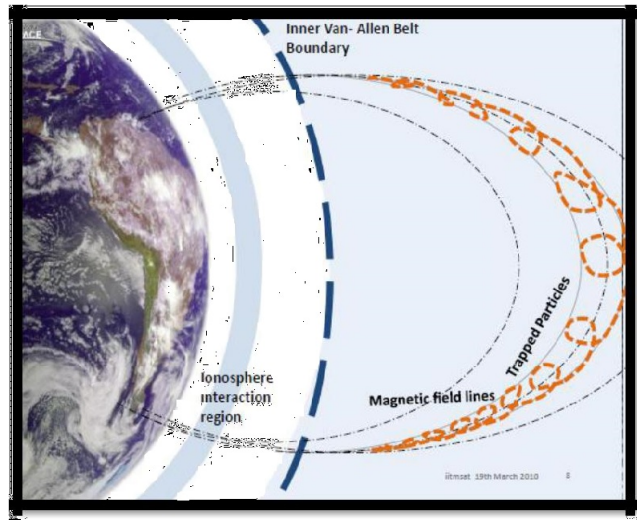


Figura 1.22: Nell'immagine in *alto*, le particelle intrappolate nelle VAB. Al *centro*, le ULF - VLF EME emesse che viaggiano come onde Alfvén catturate dal campo geomagnetico. In *basso*, le particelle intrappolate che precipitano dopo l'interazione con le onde Alfvén.



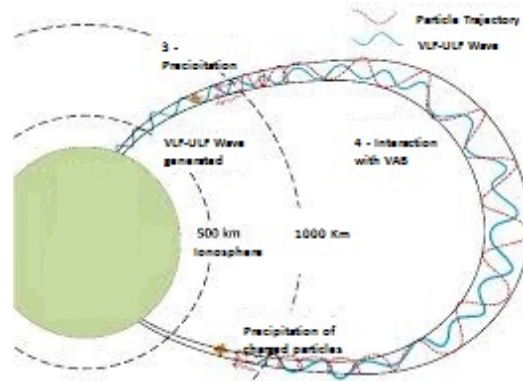


Figura 1.23: Il meccanismo di interazione tra ULF - VLF EME e particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen.

rano quando avvengono emissioni gassose dal terreno, le quali distruggono i cluster neutri, a causa della scarsa forza dell'interazione coulombiana che li lega, andando quindi a ionizzare ulteriormente lo strato d'atmosfera più prossimo alla superficie, a cui un ulteriore contributo è dato dagli aerosoli.

Si instaura così un campo elettrico anomalo 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 [35].

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 riscontrato anche sperimentalmente, e può provocare la formazione di *layer* sporadici, oltre a generare variazioni della concentrazione di elettroni, la cui variazione 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 [36], con in particolare riscontri di elettroni di energia  $\geq 4$  MeV, circa 4 ore prima dell'evento tellurico [37].

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

## 1.6 Principali aspetti fenomenologici dei precursori

La teoria illustrata sembra ad oggi quella più coerente e in grado di spiegare il meccanismo di accoppiamento sismo-ionosferico. Vanno però individuati i 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?

1. FISICA DELL'ACCOPIAMENTO SISMO-IONOSFERICO

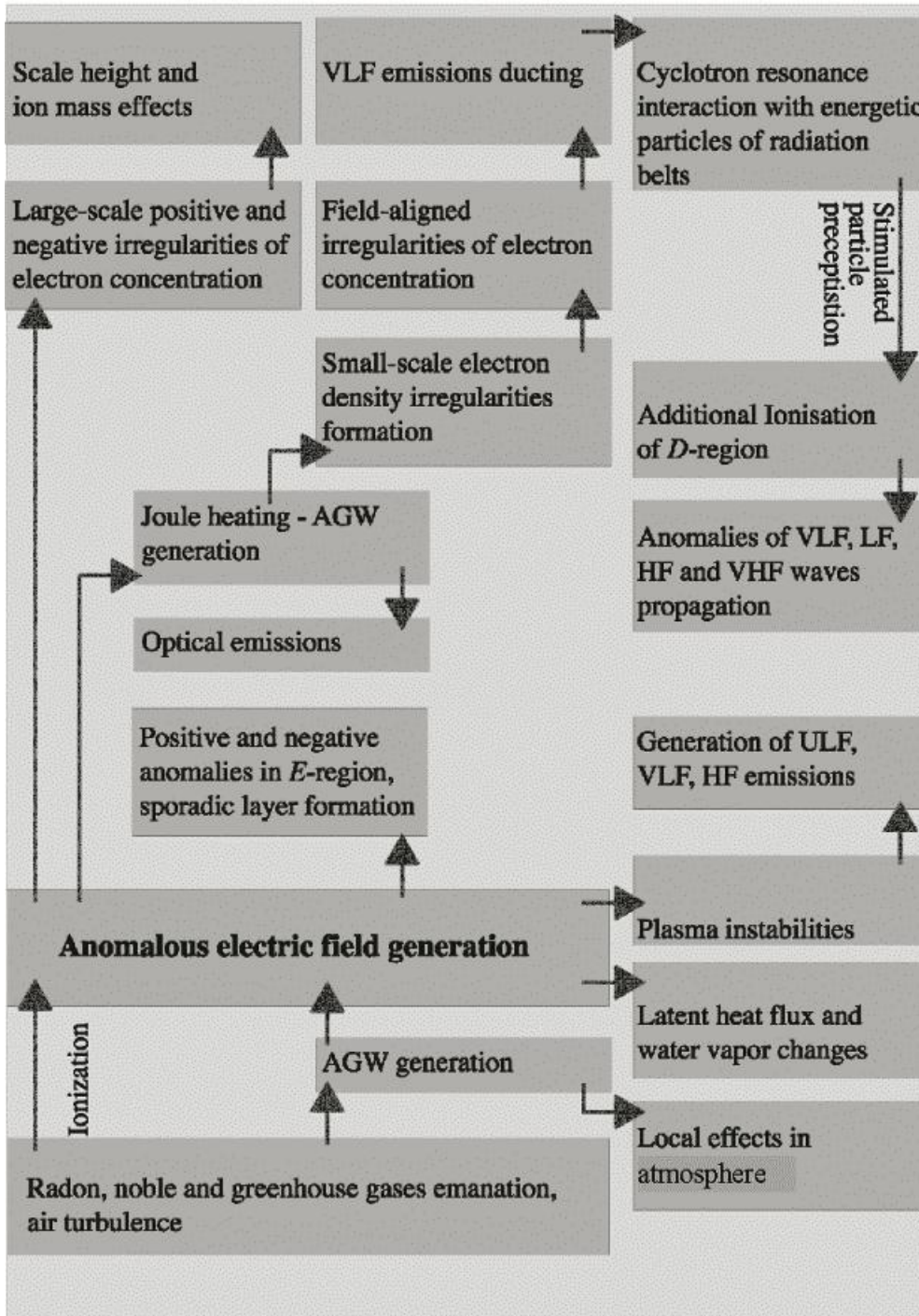


Figura 1.24: Schema del modello dell'accoppiamento sismo-ionosferico.

## 1.6 Principali aspetti fenomenologici dei precursori

---

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 [38], secondo cui

$$\rho = 10^{0,43M} \quad (1.6)$$

con  $\rho$  raggio della zona di preparazione del terremoto e  $M$  magnitudo, e 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.

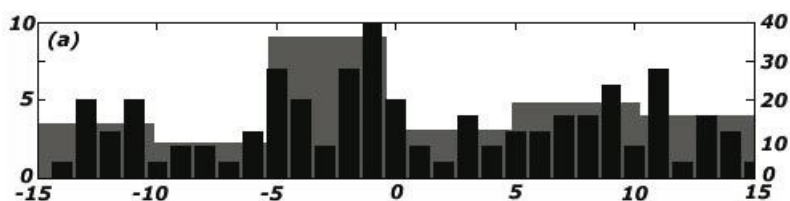


Figura 1.25: Numero di anomalie medie riscontrate nei 169 terremoti analizzati, a partire da 15 giorni prima del terremoto fino a 15 giorni dopo. In *nero*, gli istogrammi con media giornaliera, in *grigio*, gli istogrammi con media nel periodo di 5 giorni.

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 un terremoto di magnitudo maggiore o uguale a 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 [27].

Oltre a ciò, è stata sperimentalmente notata una certa dipendenza tra alcuni comportamenti dei precursori e l'ora locale [39]. 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 variazione  $\Delta f_0F2$  oscilla tra un andamento positivo e uno negativo (Figura 1.26).

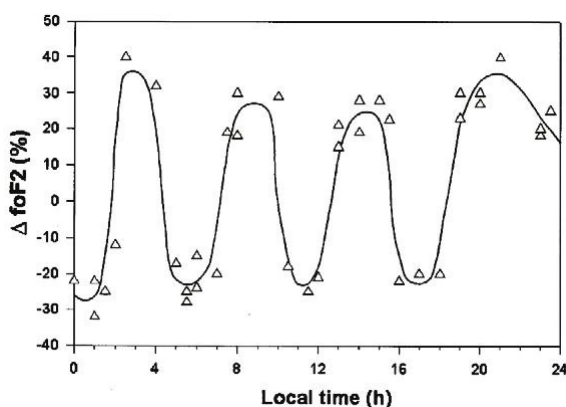


Figura 1.26: Dipendenza della variazione massima della frequenza critica in relazione all'ora locale di rilevamento per i 59 terremoti osservati.

È stato poi dimostrato il *conjugated effect* [40], 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  $10^\circ$  di latitudine e longitudine [35]. 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 geogra-

ficamente 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 [35], mentre la correlazione con la longitudine è ancora oggetto di indagine.

Sono stati studiati inoltre gli effetti delle tempeste geomagnetiche nella ionosfera [40], 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 ciò non avviene prima di un terremoto, se non con effetto minimo.

Inoltre, si è notato come la variazione 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, mentre 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 [41].

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 [27] [31].

In conclusione, è possibile stabilire che effetti che variano la densità del plasma per alcuni terremoti 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  $40^\circ$  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 oscilla tra latitudini  $L \leq \pm 40^\circ$  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, per lo più attorno a 100-150 MeV. Ovviamente, il tempo morto dei rivelatori va minimizzato il più possibile e va ricercata la maggiore accettazione angolare possibile [34], 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 pone l'attenzione pertanto sulla missione stessa, con una presentazione nella prima Sezione di questo capitolo, e sul satellite CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite) 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 (High Energetic Particle Detector), il vero protagonista di questa tesi, che verrà descritto nella Sezione 2.2, con una focalizzazione sulle varie parti di cui è composta.

Nella Sezione 2.3 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 a partire da settembre 2016, data prevista per il lancio nello spazio, avrà come compito per cinque 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 d'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 del terremoto a seguito di *burst* 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 HEPD. Un rivelatore più piccolo, a responsabilità cinese, (LEPD, Low Energy Particle Detector) completerà la copertura energetica ed angolare 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 (Figura 2.1), dotata di sistemi di stabilizzazione per tutti e tre 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 quattro 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. LA MISSIONE SPAZIALE CSES-LIMADOU E LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE

---

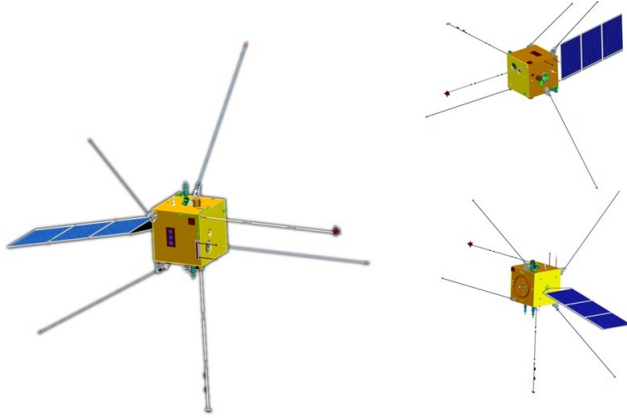


Figura 2.1: La piattaforma satellitare CAST2000 nella versione utilizzata per CSES.

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

Dalle Figure 2.2 e 2.3, che mostrano le orbite percorse dal satellite in un giorno ed in cinque 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 passaggi contigui è di circa 2650 km, mentre quella rilevata tenendo conto di tutti i passaggi in cinque giorni è di circa 530 km.

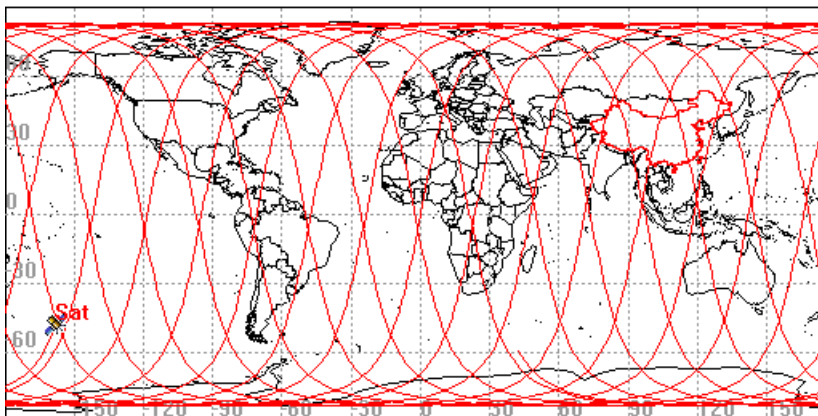


Figura 2.2: Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in un giorno.

## 2.1 La missione spaziale CSES-Limadou

---

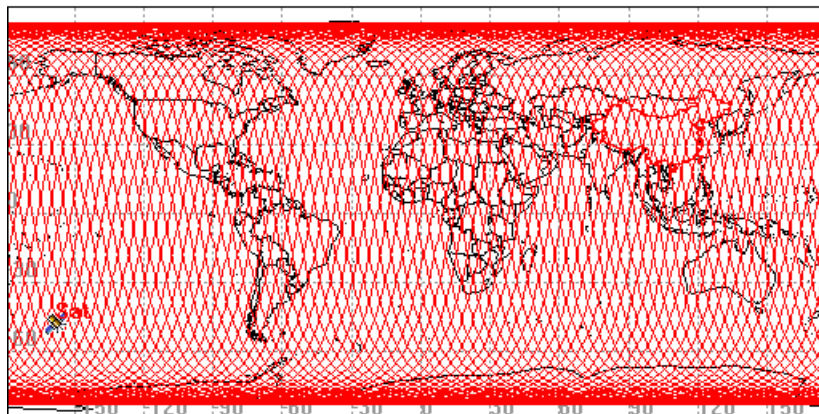


Figura 2.3: Proiezione delle orbite percorse dal satellite CSES in cinque giorni.

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

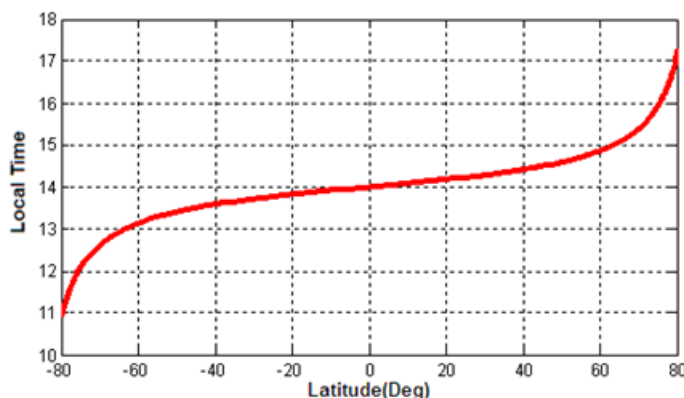


Figura 2.4: Ora locale in relazione alla latitudine a cui passa il satellite.

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*) [42].

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

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

---

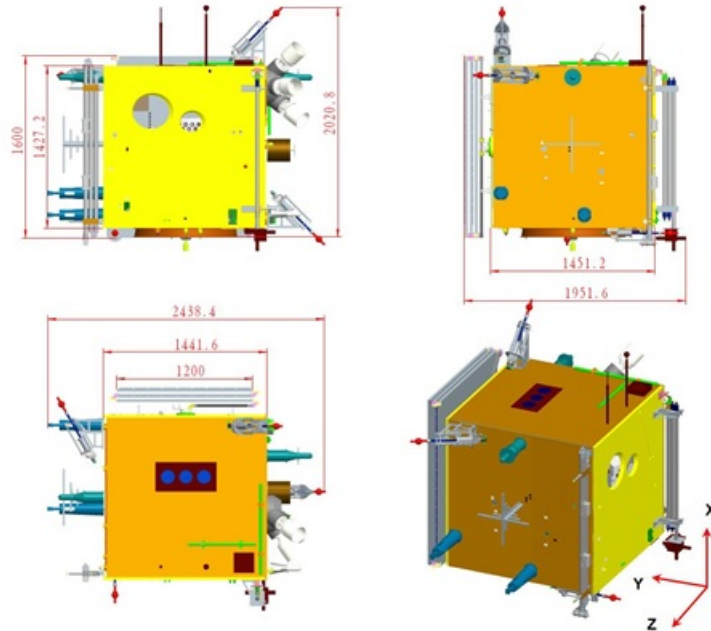


Figura 2.5: La struttura esterna del satellite.

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 *rosso*), 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 attesi 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 nel *data rate* che si prospetta sopra la SAA (Figura 2.7).

A seconda che la frequenza di rilevamento dei dati sia desiderata molto

## 2.1 La missione spaziale CSES-Limadou

---

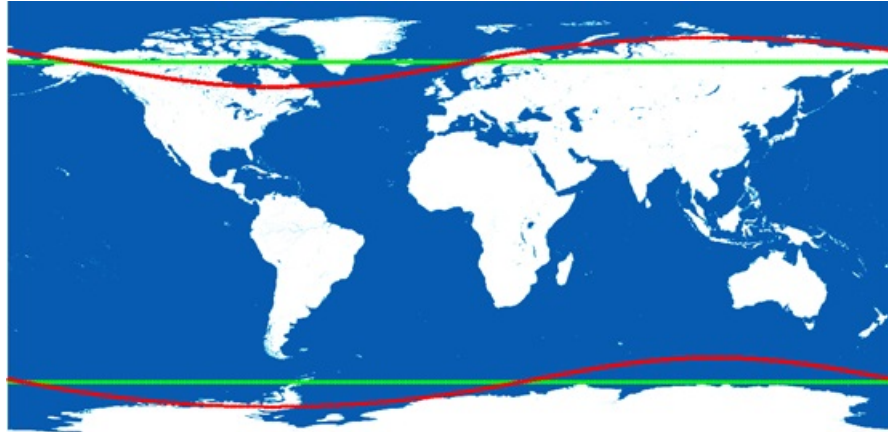


Figura 2.6: In *verde*, i bordi che delimitano la regione tra  $+65^\circ$  e  $-65^\circ$  di latitudine. In *rosso*, i bordi che delimitano la latitudine coperta da CSES con *payload* attivo.

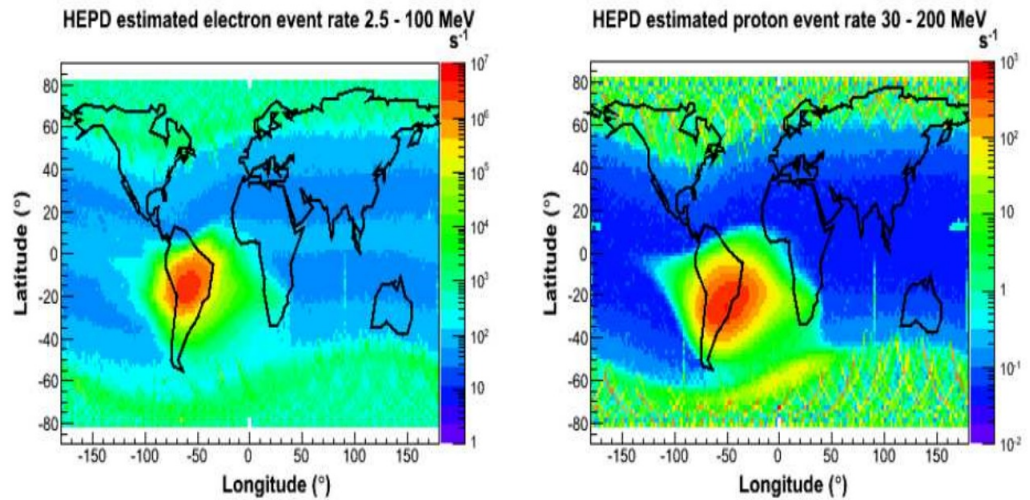


Figura 2.7: Flussi di particelle stimati per la missione CSES-Limadou in relazione alla posizione geografica e al range energetico.

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

---

elevata, il payload potrà operare in modalità *burst* oppure *survey*: quando il satellite sorvolerà la Cina (Figura 2.8) e le regioni caratterizzate da un'elevata attività sismica (Figura 2.9), 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.

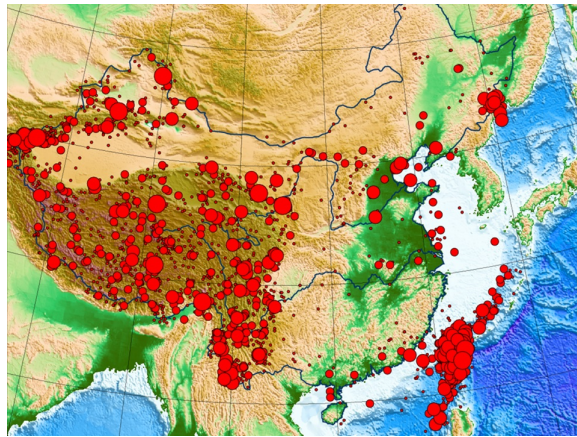


Figura 2.8: Distribuzione di terremoti con magnitudine  $M > 5$  tra il 1900 e il 2008 sul suolo cinese.

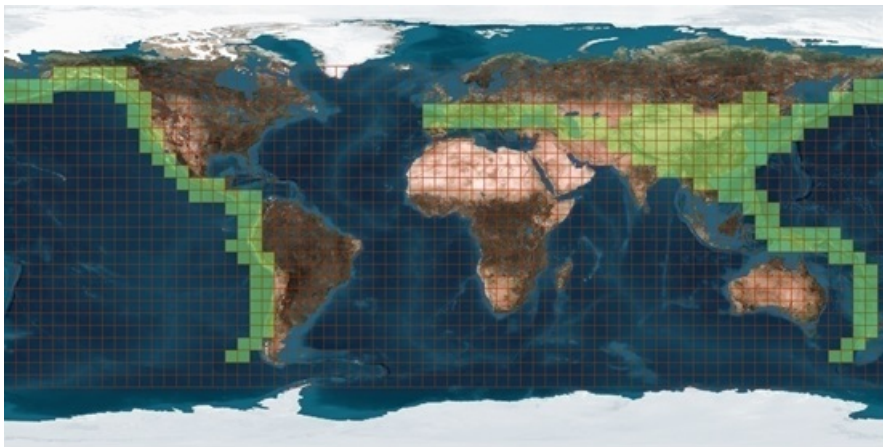


Figura 2.9: I quadrati in colore *verde* evidenziano l'area di riferimento monitorata in modalità "burst".

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 cinque



## 2.2 Il rivelatore HEPD

---

stazioni che raccolgono dati a terra in tempo reale (Figura 2.10).

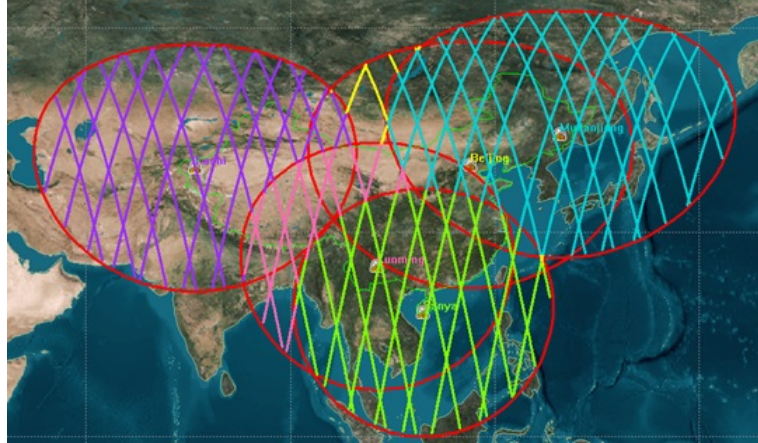


Figura 2.10: Stazioni di raccolta dati a terra sul suolo cinese.

La strumentazione a bordo di CSES è sensibile ad un elevato spettro energetico e a particelle provenienti dall'esterno delle fasce di Van Allen come i raggi cosmici e altre particelle energetiche associate a fenomeni quali i *solar flares* e CME, e non solo a quella proveniente dalle particelle che precipitano dalla magnetosfera. È quindi necessario sviluppare un'accurata analisi in modo da discriminare con precisione la provenienza delle particelle per poter distinguere il segnale di interesse dal fondo.

## 2.2 Il rivelatore HEPD

Il rivelatore di particelle HEPD installato a bordo, per il quale è necessaria un'*accettanza angolare* opportuna (che verrà descritta più avanti in questo capitolo), ha lo scopo di identificare il tipo di particella (protone, elettrone), fornire una misura della direzione e del verso di provenienza della particella in modo da potere stabilire l'angolo tra la sua traiettoria ed il campo magnetico terrestre (il *pitch angle*) e di rivelarne l'energia.

L'obiettivo è quello di correlare le particelle misurate con quelle presenti nelle fasce di Van Allen e quindi di determinare con la massima accuratezza la regione magnetosferica di provenienza, col fine di ottenere lo spettro



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

energetico e la composizione delle particelle delle fasce da cui precipitano improvvisamente nell'atmosfera (il fenomeno detto *burst*).

Il rivelatore di particelle in questa missione spaziale ha pertanto il compito di studiare elettroni in un range energetico compreso tra 3 MeV e 200 MeV, e protoni in un range energetico compreso tra 30 MeV e 300 MeV. Ha inoltre un peso di circa 38 kg (inclusa l'elettronica), necessita di una potenza di 43 W e garantisce la sua operatività tra  $-10^{\circ}\text{C}$  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).

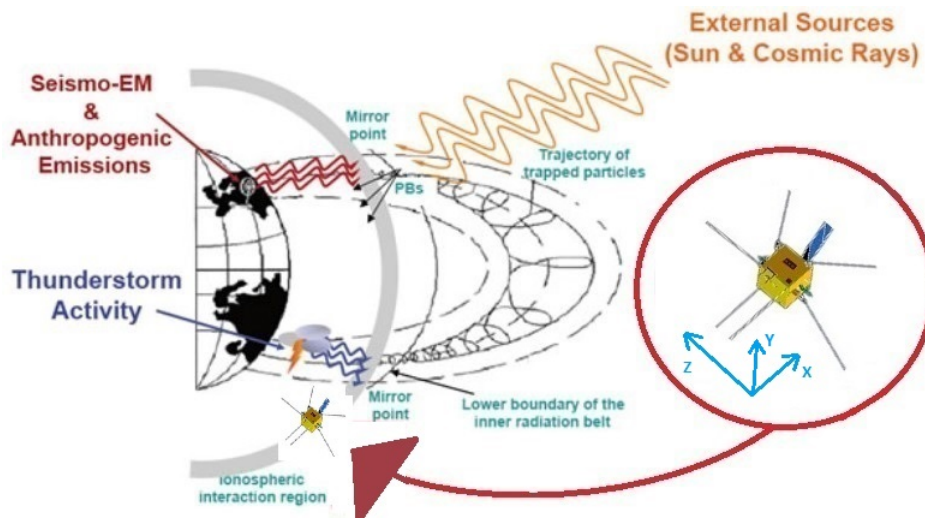


Figura 2.11: Localizzazione del satellite e degli assi. In colore *grigio* è rappresentata l'orbita del satellite.

Il rivelatore HEPD è organizzato in vari *layer* sensibili alla radiazione e in ordine si presenta (Figura 2.12), 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 uniti ad un insieme di blocchi di LYSO (uno scintillatore inorganico) posto al fondo, formano il calorimetro. 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 2.13) 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 2.14, 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 2.14, 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 2.14), 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 2.15) su cui poggiano le strutture di supporto del rivelatore, del sistema elettronico e della *power supply* (Figure 2.15 e 2.16), è montata sulla base interna del satellite tramite 8 viti.

Gli scintillatori sono organizzati in modo da 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 presenti attaccate ad esse delle croci in poron (in figura, in giallo), un materiale con un'eccellente resistenza a sforzi meccanici, soprattutto di compressione, il quale ha lo scopo di proteggere dagli urti i piani di scintillatore. Queste strutture di sostegno a croce sono avvitate a quattro costole (*Mechanical Supporting Frame*, Figura 2.17), sempre in fibra di carbonio poste lungo il perimetro di ogni piano di scintillatore.

Gli scintillatori che compongono il VETO (Figura 2.13) che circonda com-

pletamente 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 per evitare che gli scintillatori plastici siano a contatto direttamente con i piani in fibra di carbonio.

La dimensione finale del rivelatore HEPD è 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.

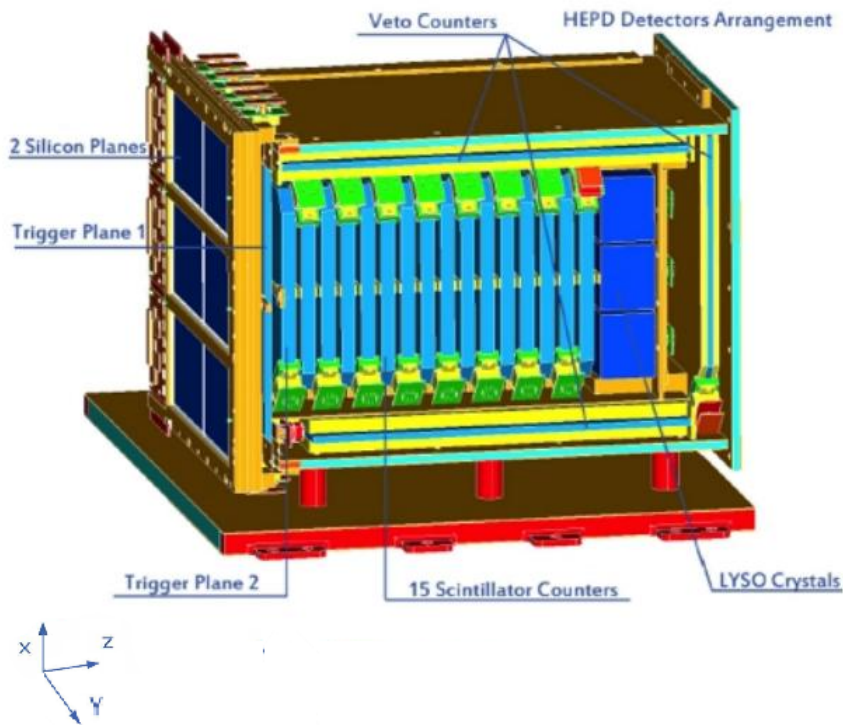


Figura 2.12: Il rivelatore HEPD e i vari piani che lo compongono.

### 2.2.1 Il Tracker

Il Tracker consta di due rivelatori a semiconduttore al silicio, entrambi larghi 213,2 mm e alti 214,8 mm, spessi circa 300  $\mu\text{m}$ , posti ad una distanza di 10 mm l'uno dall'altro. Ognuno dei due piani di Tracker è segmentato in tre diverse parti (i *ladder*) (Figura 2.16) larghe 213,2 mm e alte 71,6 mm, ognuna

## 2.2 Il rivelatore HEPD

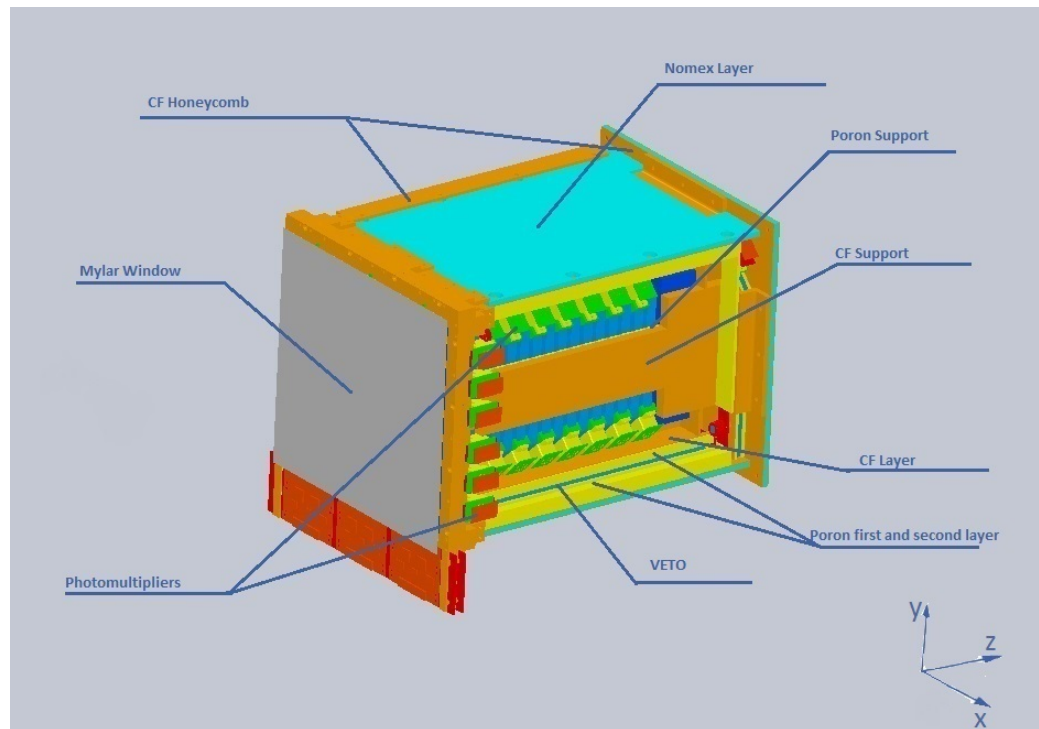


Figura 2.13: Il rivelatore HEPD con tutti i sostegni e le sezioni che lo compongono.

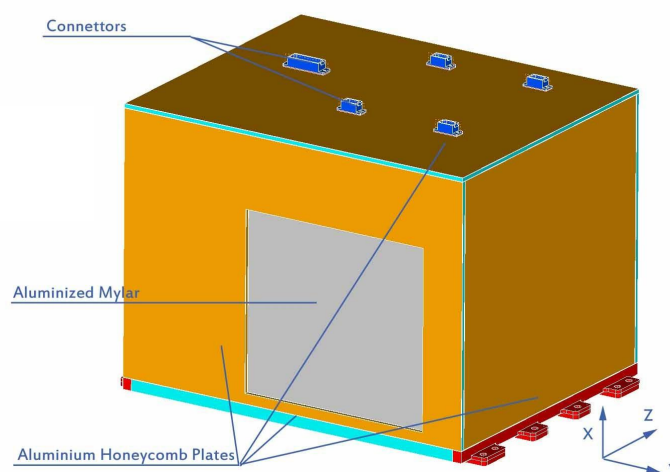


Figura 2.14: La scatola contenente il rivelatore HEPD e le sue unità.

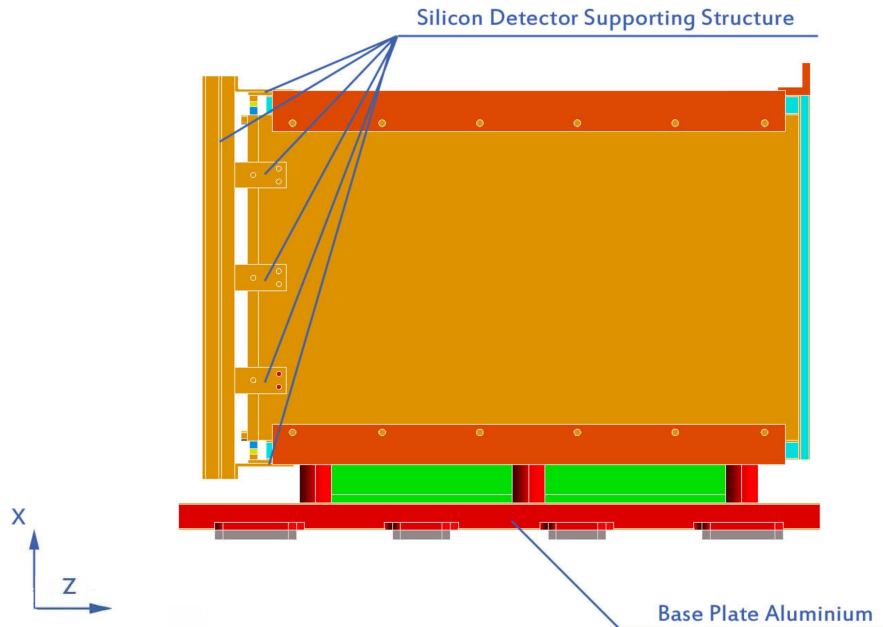


Figura 2.15: Profilo laterale del rivelatore HEPD.

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 a VLSI (*Very Large Scale Integration*), per un totale di 72. I due rivelatori al silicio sono posti in un supporto rigido in fibra di carbonio, poron e kapton che sostiene l'elettronica associata (in colore *verde* in Figura 2.16). Il motivo per cui sono stati utilizzati rivelatori a semiconduttore è da ricondursi alla loro alta risoluzione spaziale (di circa  $50 \mu\text{m}$ ) e alla loro velocità di lettura.

Queste caratteristiche fanno sì che i rivelatori del Tracker siano incaricati di fornire la direzione di provenienza e l'angolo di incidenza delle particelle rivelate, e che abbiano un ruolo importante nella discriminazione del tipo di particella, a causa del loro spessore particolarmente sottile (come si vede nel Capitolo 4).

## 2.2 Il rivelatore HEPD

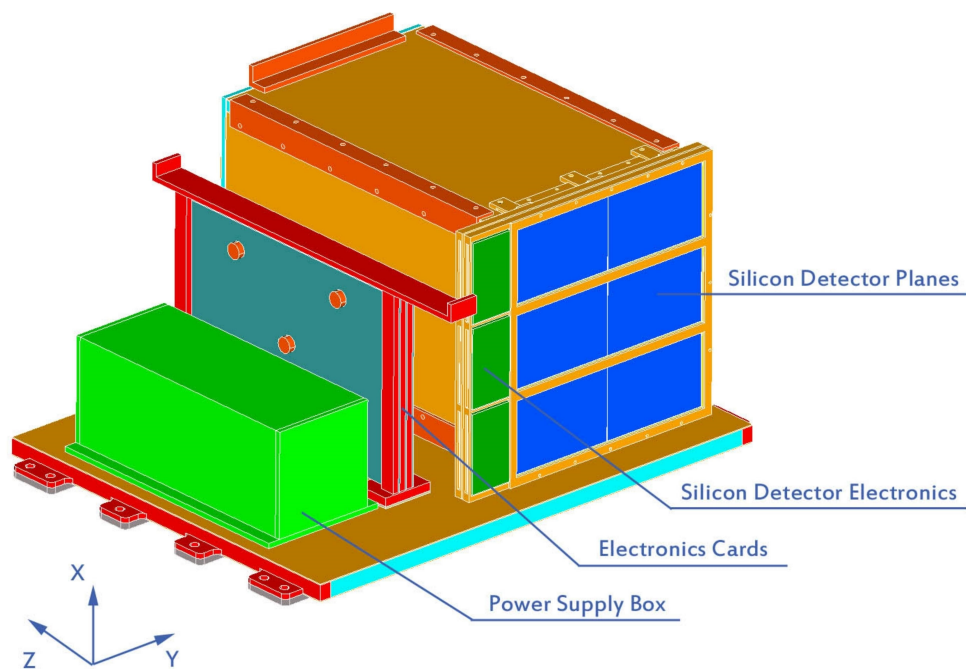


Figura 2.16: L'interno della scatola del satellite contenente il rivelatore HEPD con le relative *power box* ed *electronic box*.

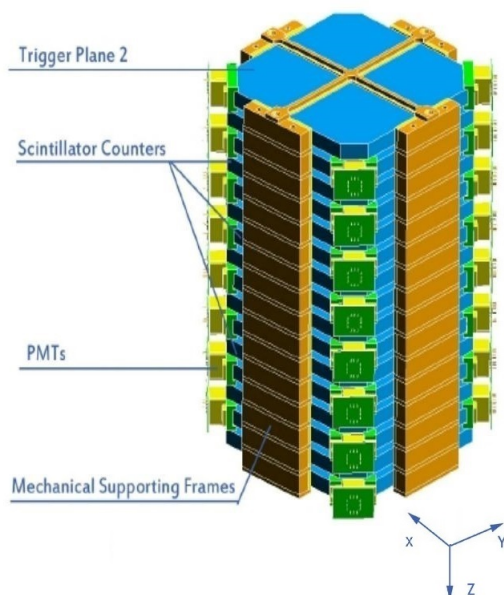


Figura 2.17: Il secondo piano di Trigger e la torre di 15 scintillatori: si noti la disposizione sfalsata dei fotomoltiplicatori nei successivi scintillatori.

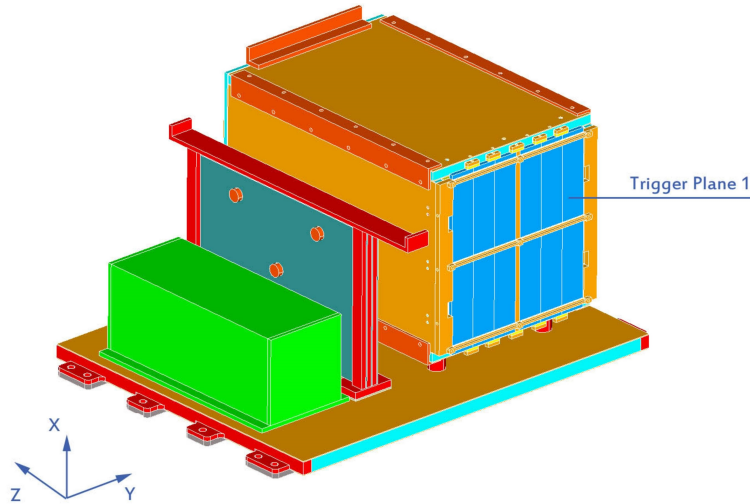


Figura 2.18: L'interno della scatola del satellite privo dei piani di semiconduttori al silicio.

### 2.2.2 Il Trigger

Il Trigger è formato da due diversi scintillatori plastici e la loro 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 ( $200\text{mm} \times 30\text{mm} \times 5\text{mm}$ ) (Figura 2.18) 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 il primo piano della torre di scintillatori ed è del tutto uguale a quelli del calorimetro. Anche quest'ultimo viene letto da due fotomoltiplicatori, connessi a due angoli opposti. Il numero totale di fotomoltiplicatori per il Trigger è di 14.

Il sistema di Trigger, che può esser modificato come si vedrà nel dettaglio nel Capitolo 4, ha il compito di dare il segnale di inizio acquisizione agli altri rivelatori e necessita quindi di tempi di risposta molto bassi. Proprio per questo motivo vengono utilizzati degli scintillatori plastici che sono molto più rapidi rispetto agli scintillatori inorganici.

### 2.2.3 Il Calorimetro

I 15 scintillatori plastici del calorimetro sono larghi e alti 150 mm e hanno uno spessore di 10 mm. I quattro angoli sono stati tagliati per l'inserimento dei fotomoltiplicatori, due per ogni piano, posti agli angoli opposti e alternati tra un piano e l'altro come mostrato in Figura 2.17. Saranno presenti quindi 30 fotomoltiplicatori in totale.

Il LYSO (lutetium-yttrium oxyorthosilicate) al fondo della torre e del rivelatore (Figura 2.12) è composto da una matrice  $3 \times 3$  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 [43]. I blocchi inoltre sono fissati ad una piastra in fibra di carbonio e forata in prossimità dei relativi fotomoltiplicatori.

### 2.2.4 VETO

Il VETO è formato da dei piani di scintillatori plastici (Figura 2.12). 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). Per garantire infatti una misura precisa dell'energia della particella incidente è necessario che questa depositi tutta la sua energia e quindi che rimanga confinata all'interno del calorimetro.



## 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 del Capitolo 4.

### 2.3.1 Interazione radiazione-materia

La radiazione, sia di natura elettricamente carica (particelle  $\alpha$ , particelle  $\beta^+$ , elettroni, ed altre particelle cariche), sia di natura neutra (fotoni e neutroni), interagisce con la materia. Si distinguono i tipi di interazione a seconda che si tratti di una particella carica pesante, una particella  $\beta$ , un fotone oppure un neutrone.

Le particelle cariche pesanti, come le particelle  $\alpha$  (nuclei di  ${}^4\text{He}$ ), ma anche protoni e ioni, hanno principalmente interazioni elettromagnetiche con la carica negativa degli elettroni orbitali.

È inoltre possibile l'interazione coi nuclei, come nel caso dello scattering Rutherford, ma la sezione d'urto è bassa essendo le dimensioni del nucleo molto ridotte rispetto alle dimensioni dell'atomo. 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:

$$E_{max} = \frac{4Em_0}{m} \quad (2.1)$$

con  $E$  e  $m$  energia cinetica e massa della particella interagente,  $m_0$  massa dell'elettrone. Il risultato di queste interazioni sarà una coppia di ioni nel caso avvenga ionizzazione, il cui elettrone se sufficientemente energetico può ancora creare ionizzazione (in tal caso prende il nome di *raggio  $\delta$* ), oppure

### 2.3 Cenni di fisica delle misure e della strumentazione nucleari

---

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  $\alpha$ ), è chiaro che il numero di interazioni per queste particelle è molto grande.

La perdita di energia lungo un percorso, ovvero lo *stopping power*  $-\frac{dE}{dx}$  per una particella massiva, come le particelle  $\alpha$ , è data dalla formula ottenuta tramite il *calcolo di Bohr*:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_e}{m_e v^2} \ln \frac{m_e \gamma^2 v^3}{\nu z e^2} \quad (2.2)$$

con  $ze$  carica della particella interagente,  $N_e$  densità elettronica del mezzo attenuatore,  $m_e$  massa dell'elettrone del mezzo attenuatore,  $v$  velocità della particella interagente,  $\gamma$  fattore di Lorentz,  $\nu$  frequenza media degli elettroni del mezzo attenuatore.

Questa formula non descrive bene le interazioni dei protoni a causa degli effetti quantistici. Per una stima più precisa della perdita di energia per ionizzazione di un mezzo da parte di una particella carica bisogna ricorrere alla formula di Bethe-Bloch, che tiene conto anche di correzioni quantistiche e relativistiche:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right) \right] \quad (2.3)$$

con  $r_e$  raggio dell'elettrone,  $m_e$  massa dell'elettrone del mezzo attenuatore,  $N_a$  numero di Avogadro,  $I$  potenziale medio di eccitazione,  $Z$  numero atomico del mezzo attenuatore,  $A$  peso atomico del mezzo attenuatore,  $\rho$  densità del mezzo attenuatore,  $z$  carica della particella incidente,  $\beta$  pari a  $v/c$ ,  $\gamma$  fattore di Lorentz,  $W_{max}$  massima energia trasferita in una singola collisione,  $\delta$  correzioni dovute all'effetto densità e  $C$  correzioni di *shell*.

A parità di energia cinetica, quindi, le particelle tendono a perdere energia lungo il percorso proporzionalmente al quadrato della loro carica, inoltre ad un maggiore numero atomico e ad una maggiore densità del materiale del

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

mezzo assorbitore corrisponde un maggior stopping power.

La formula di Bethe-Bloch fallisce alle basse energie dove iniziano ad essere consistenti altri processi, quali continue catture e perdite di elettroni.

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

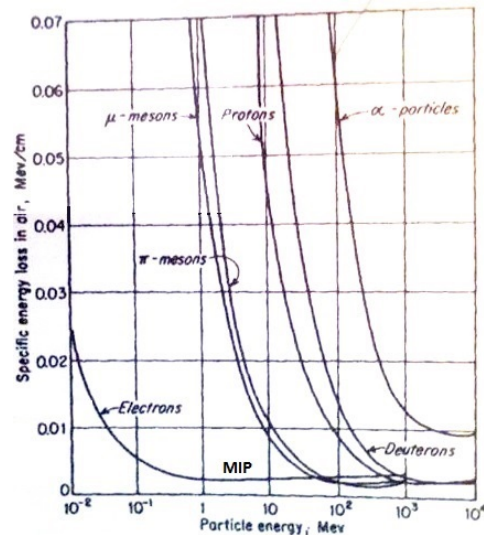


Figura 2.19: Differenze di perdita di energia in relazione all'energia della particella incidente, per varie specie di particelle. Si noti il punto di minima ionizzazione e come le particelle  $\alpha$  abbiano un rilascio di energia maggiore con un punto di minima ionizzazione ad energie più elevate.

Un andamento dell'energia persa in funzione dello spessore di materiale attraversato è data dalla *curva di Bragg* (Figura 2.20), in cui si mostra che la maggior parte dell'energia persa per 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.

Per quanto riguarda il *range* di queste particelle (Figura 2.21), cioè la distanza da esse percorsa in un materiale prima di perdere tutta la propria energia, si può affermare che per bassi spessori l'unico effetto è una perdita di

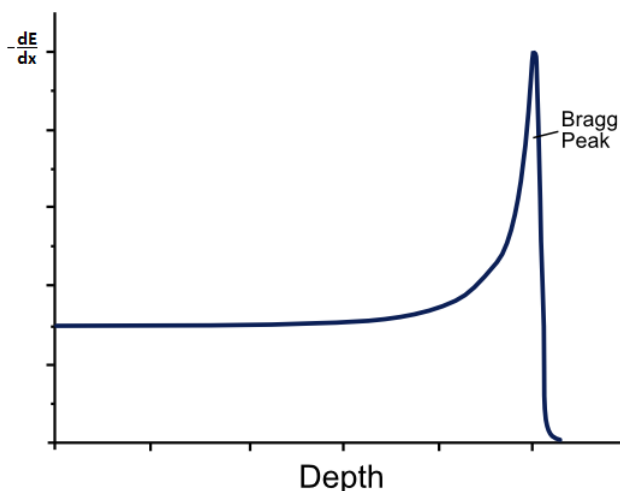


Figura 2.20: Curva di Bragg, cioè potere frenante di una particella carica pesante in relazione alla profondità del mezzo attraversato.

energia e che la totalità delle particelle attraversa completamente lo spessore del mezzo. Con l'aumentare dello spessore oltre una certa soglia si assiste invece ad una attenuazione nel numero di particelle uscenti dal mezzo poiché queste iniziano a venire assorbite. Va ricordato inoltre che queste particelle non subiscono grosse deviazioni nella traiettoria pur essendo fortemente assorbite dal mezzo, data la massa molto maggiore rispetto agli elettroni del mezzo che attraversano.

Poiché questi processi sono stocastici, sia l'energia persa in una singola interazione, sia il numero di interazioni in un certo spessore possono subire variazioni. Questo dà origine al fenomeno dello *straggling* per cui due particelle di carica ed energia uguale possono non avere lo stesso range: si effettua quindi 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 (2.21).

Per bassi valori dell'energia di questo tipo di particelle inoltre, la probabilità che avvengano reazioni nucleari è estremamente esigua. All'aumentare dell'energia è però possibile che avvengano reazioni a soglia ( $\alpha,n$ ) o ( $p,n$ ): per quest'ultima l'energia minima richiesta è di 782 KeV. Per energie maggiori a

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

---

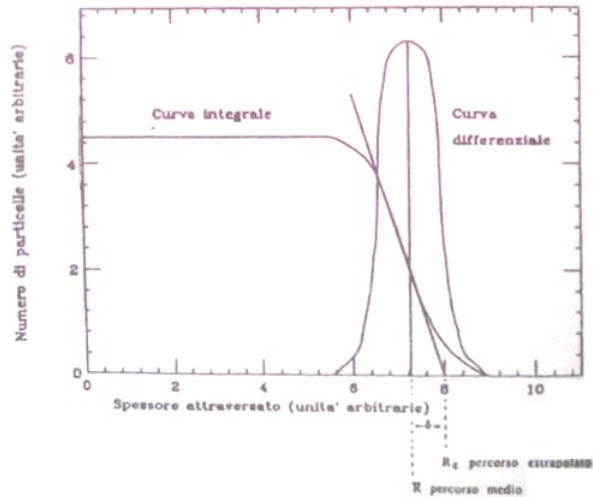


Figura 2.21: Curva integrale e curva differenziale del numero di particelle cariche pesanti attenuate con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbente.

10 MeV, le reazioni nucleari più comuni sono:  $(\alpha, 2n)$ ,  $(p, 2n)$ ,  $(\alpha, 3n)$  e  $(p, 3n)$ .

Le particelle  $\beta$  (elettroni e positroni) hanno invece un comportamento diverso rispetto ai protoni nell'attraversamento di un materiale, a causa del fatto che la loro massa e la massa dell'elettrone colpito sono uguali. Questo può comportare una variazione significativa nella direzione di propagazione dell'elettrone incidente a seguito di un'interazione anelastica con l'elettrone atomico e quindi un percorso molto più erratico rispetto a quello delle particelle cariche pesanti. È inoltre possibile che la direzione dell'elettrone sia variata da un'interazione elastica elettrone-nucleo. Si può dimostrare che nell'urto elastico di due particelle, l'energia cinetica trasferita che deflette la particella di un angolo  $\theta$  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 a queste interazioni, 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 formula di Bethe-Bloch, 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 quattro 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.

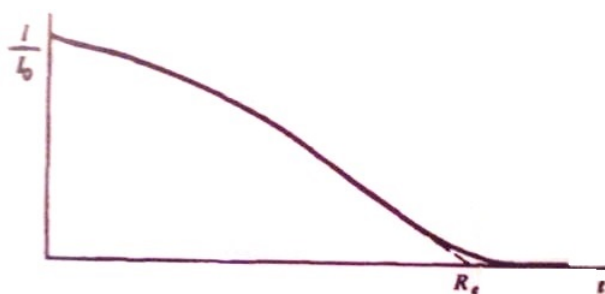


Figura 2.22: Numero di elettroni attenuati con l'aumentare dello spessore del mezzo assorbitore.

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

---

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 degli elettroni è molto inferiore a quelle delle particelle cariche pesanti, il loro percorso è generalmente centinaia di volte maggiore (una particella  $\alpha$  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 emesso dall'atomo con energia cinetica pari alla differenza tra l'energia del fotone incidente e l'energia di legame. La probabilità di questo fenomeno dipende da  $Z^5$ , cioè dalla quinta potenza del numero atomico del materiale del mezzo attenuatore (Figura 2.23).

L'effetto Compton prevede l'interazione di un fotone con un elettrone considerato libero poiché l'energia del fotone incidente è molto maggiore rispetto all'energia di legame dell'elettrone. Nello scattering tra le due particelle, parte dell'energia del fotone è trasferita all'elettrone con conseguente cambio di traiettoria del fotone incidente. La probabilità con cui questo fenomeno può verificarsi dipende da  $Z$ , cioè dal numero atomico del materiale del mezzo attenuatore (Figura 2.23).

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 due volte la massa a riposo dell'elettrone, cioè 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 (Figura 2.23). Altri effetti come l'effetto Rayleigh e la fotodisintegrazione sono di minore importanza.

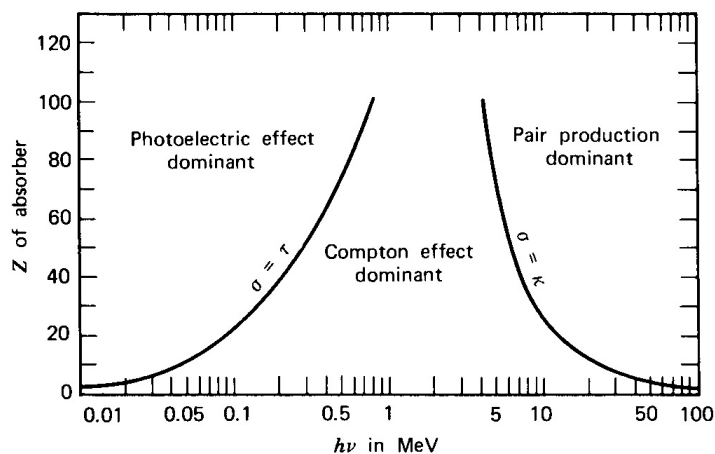


Figura 2.23: Effetto dominante in relazione al numero atomico del materiale del mezzo attenuatore  $Z$ , e all'energia del fotone  $h\nu$ .

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  $\gamma$ , 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  $(n,\alpha)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,2n)$ ) 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 da 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



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

della radiazione; i rivelatori organici hanno soprattutto un'ottima velocità nel tempo di risposta.

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.

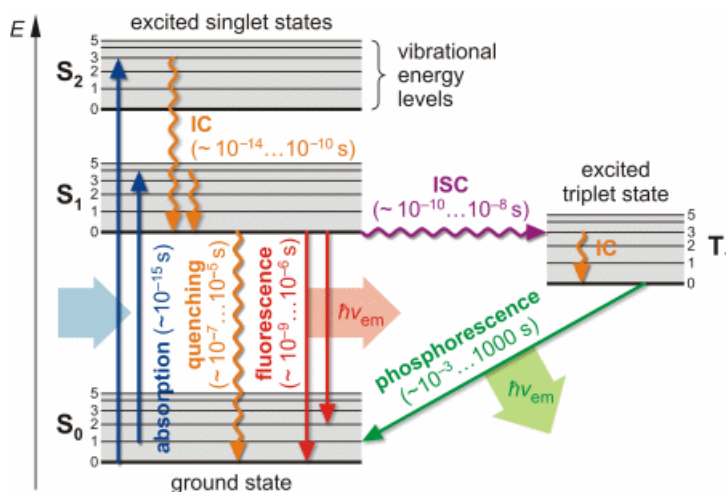


Figura 2.24: Livelli energetici in una molecola organica e fenomeni associati all'interazione con la radiazione.

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  $T_1$  si verifica 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* e, 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.

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.

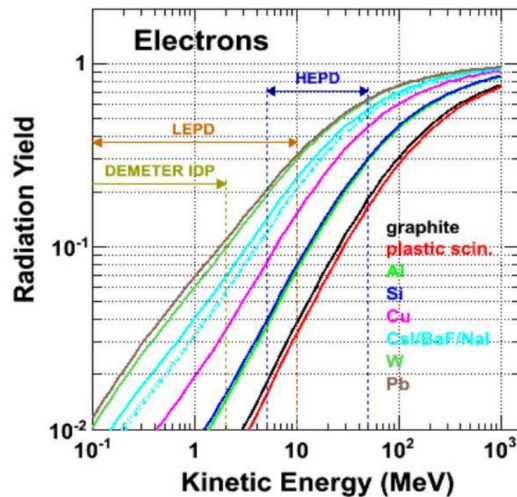


Figura 2.25: Probabilità di bremsstrahlung in relazione all'energia cinetica dell'elettrone, per diversi materiali.

Gli scintillatori plastici utilizzati nel HEPD sono realizzati dalla ELJEN Technology con il nome di EJ-200, con una base polimerica di Polivinilto-

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

---

luene. Ha un'efficienza di scintillazione nominale di 10.000 fotoni emessi per ogni MeV di energia ceduto agli elettroni, un tempo di decadimento di 2,1 nanosecondi [44].

Il meccanismo di scintillazione dei 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 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 può comportare un'emissione di un fotone di energia tale a far sì che venga riassorbito promuovendo un elettrone nuovamente in banda di conduzione: per ovviare a ciò, vengono 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 un fotone venga riassorbito è nulla.

La radiazione che interagisce con questi rivelatori crea un gran numero di coppie elettrone-lacuna. La lacuna, intesa come carica positiva, si porta 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 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 oxyrhthosilicate) utilizzato nel rivelatore 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 migliorata [45]. 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 rivelatore HEPD è, si ricorda, per estenderne il range energetico), il basso tempo di decadimento e una buona efficienza energetica per un costo basso [46].

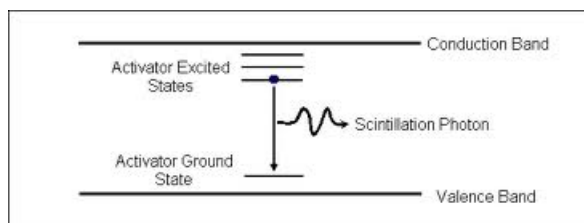


Figura 2.26: Struttura delle bande energetiche degli scintillatori cristallini con attivatore.

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 (Figura 2.27).

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. 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 circa  $10^{-9}$  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.

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

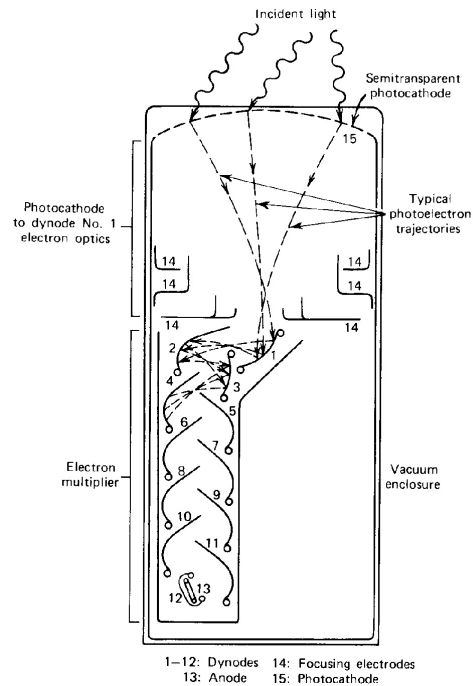


Figura 2.27: Schema del funzionamento di un fotomoltiplicatore.

### 2.3.3 Rivelatori a semiconduttore

Uno degli svantaggi principali dei rivelatori a scintillazione sta nella risoluzione spaziale piuttosto bassa. Un modo che consente di aumentarla, consiste nell'utilizzo dei rivelatori a semiconduttore, la cui caratteristica principale è la possibilità di ottenere un'elevata risoluzione spaziale dividendoli in segmenti di dimensioni piccolissime. Il motivo per cui si utilizza tale rivelatore nel Tracker è legato al fatto che il compito principale di quest'ultimo è quello di misurare la direzione della particella incidente.

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 prima, separate da un gap. La promozione di un elettrone dalla prima banda alla seconda lascia come risultato

## 2.3 Cenni di fisica delle misure e della strumentazione nucleari

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 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).

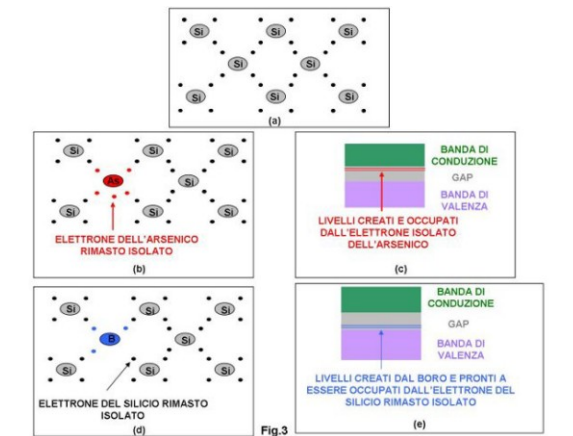


Figura 2.28: Struttura a bande di un semiconduttore intrinseco (a) e di un semiconduttore con drogaggio di tipo *n* (b,c) e di tipo *p* (d,e).

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

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

---

quattro 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 ad 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  $\delta$  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 verso il 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).

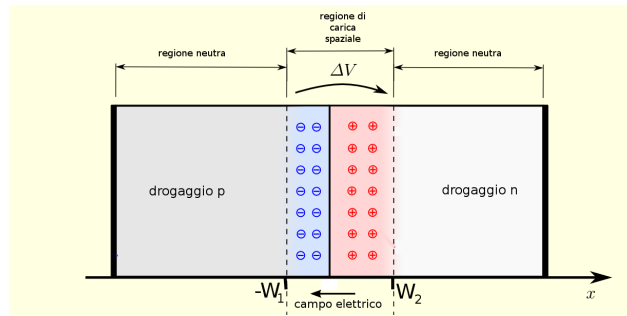


Figura 2.29: Giunzione p-n e relativi potenziale e campo elettrico.

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 spaziale, stabilità, dimensioni piuttosto compatte, tempi caratteristici bassi e possono essere molto sottili: proprio su quest'ultima particolarità si basa il metodo di discriminazione del rivelatore HEPD, illustrato nel Capitolo 4.

I rivelatori a semiconduttore al silicio presenti nel rivelatore 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  $\sigma$  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 [47] [48]:

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

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 o 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*, cioè la frazione di particelle rivelate ad un dato angolo. Questa è una grandezza che dipende dalla superficie sensibile e dalla forma del rivelatore. Un valore maggiore dell'accettanza angolare comporta una lettura maggiore da parte dello strumento per un dato valore dell'angolo e per una certa energia. Questa grandezza è legata all'*efficienza geometrica*  $\varepsilon_{geom}$ , descritta dalla formula:

$$\varepsilon_{geom} = \frac{N_{rivelati}}{N_{incidenti}} \quad (2.9)$$

con  $N_{rivelati}$  il numero di particelle rivelate dal rivelatore, e  $N_{incidenti}$  il numero di particelle incidenti.

Si definisce un altro tipo di accettazione, chiamata *accettanza totale*, che fornisce la dipendenza dell'accettanza angolare integrata su tutto l'angolo in funzione dell'energia della particella.

Si può esprimere l'accettanza totale in base al *fattore geometrico*  $G$  del rivelatore, definito come:

$$G = \int_{\Omega} d\omega \int_S d\vec{\sigma} \cdot \hat{r} \quad (2.10)$$

dove  $S$  è la superficie del rivelatore,  $\Omega$  è l'angolo solido,  $d\omega = d\phi d(\cos\vartheta)$  è l'elemento di angolo solido,  $\hat{r}$  è il versore della direzione della particella e  $d\vec{\sigma} \cdot \hat{r}$  è l'elemento di area sulla superficie del rivelatore sottesa dall'elemento di angolo solido  $d\omega$ . La Figura 2.30 mostra una rappresentazione schematica della porzione di area sottesa all'angolo solido  $d\omega$ .

A causa della forma a parallelepipedo dei piani sensibili del rivelatore HEPD, questo fattore risulta essere pari a [49]:

$$G = \pi A [sr \cdot cm^2] \quad (2.11)$$

con  $A$  superficie frontale del rivelatore.

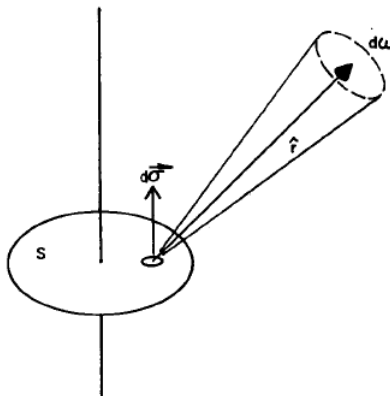


Figura 2.30: Rappresentazione della porzione della superficie del rivelatore  $d\vec{\sigma} \cdot \hat{r}$  sottesa all'angolo solido  $d\omega$ .

## 2.4 Altre missioni spaziali

Le principali missioni che si sono occupate, anche solo in parte, di questo fenomeno sono varie. Negli anni '80 sono state completate missioni soprattutto col fine di andare a valutare i *burst* 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.

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

---

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.

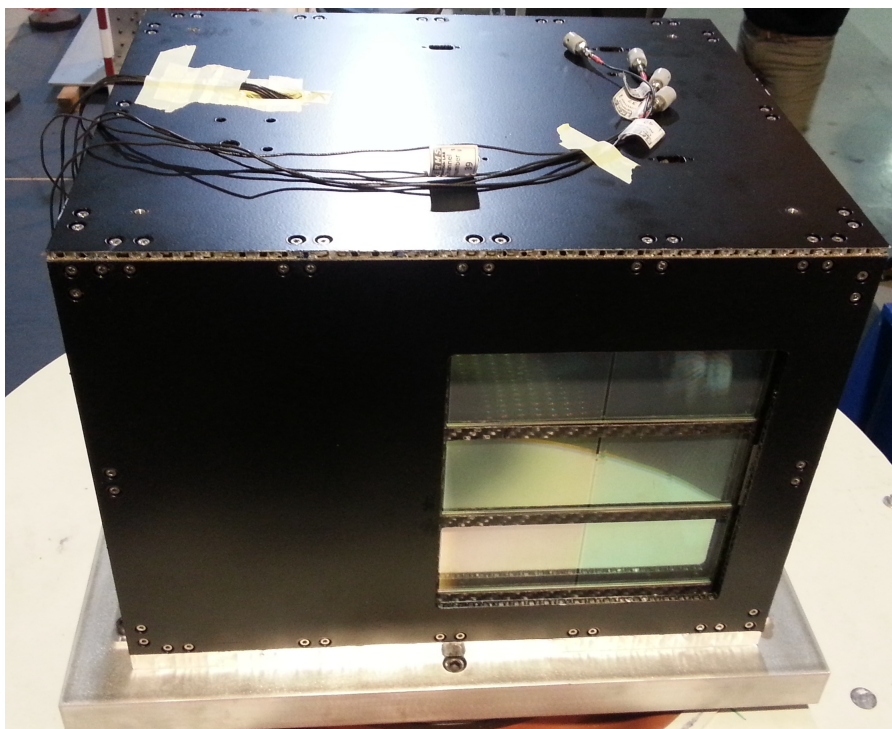


Figura 2.31: Scatola esterna in alluminio del rivelatore HEPD.

## 2.5 HEPD realizzato

---

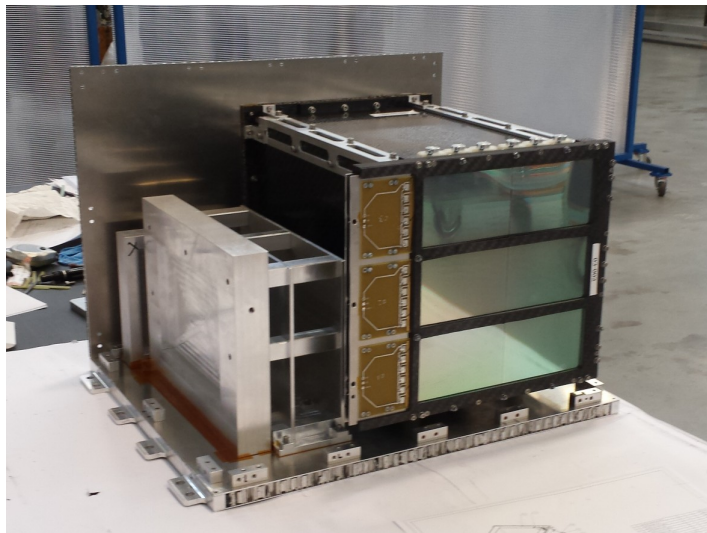


Figura 2.32: Apparato interno alla scatola con *power supply*, a sinistra, *electronic box*, al centro, e involucro del rivelatore, a destra.



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

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

---

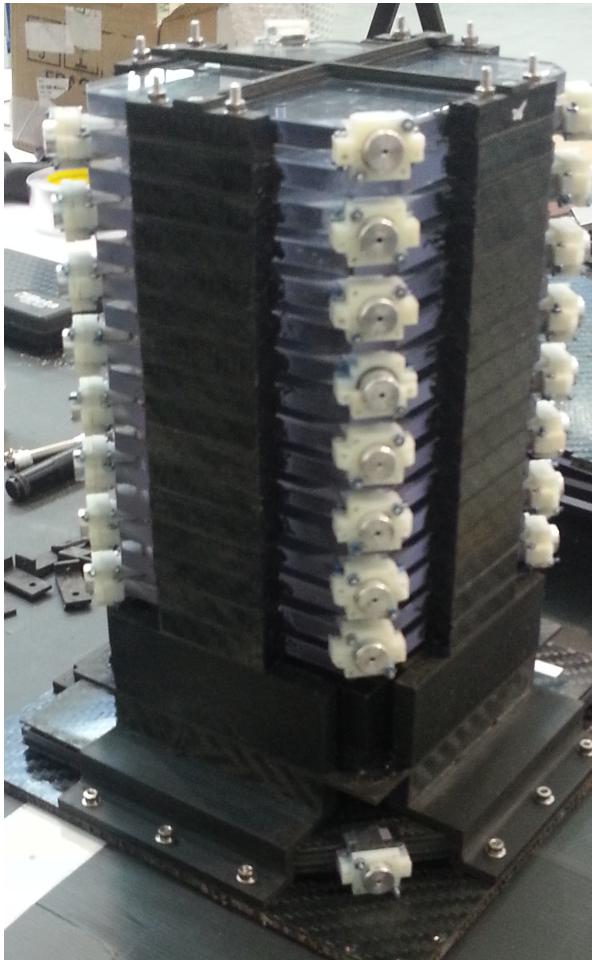


Figura 2.34: Il calorimetro e il secondo piano di Trigger con i fotomoltiplicatori montati ai lati degli scintillatori.

## Capitolo 3

# Realizzazione della geometria del rivelatore HEPD con GEANT4

### Introduzione

Le simulazioni dei fenomeni fisici, ed in particolare quelli riguardanti la fisica delle particelle, hanno assunto un ruolo fondamentale nello sviluppo di nuove soluzioni costruttive per i rivelatori. Le tecniche di simulazione Monte Carlo sono uno strumento indispensabile nell'ottica della progettazione e dell'ottimizzazione di un rivelatore, motivo per cui molto tempo e molte risorse vengono spese nell'implementazione di una geometria virtuale il più possibile accurata e simile a quella prevista.

Lo studio dell'*output* 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 realizzazione degli algoritmi di analisi *offline* e *online* dei dati sperimentali.

Nel caso del rivelatore HEPD analizzato, la fase di progettazione meccanica finale dello strumento è terminata nelle settimane iniziali dello svolgimento di questo lavoro di tesi: si è pertanto realizzato virtualmente 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 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 presentata nella Sezione 3.1, illustrando brevemente le parti fondamentali di questo potente pacchetto software.

Successivamente è presente una sezione più specifica e rivolta alla costruzione del rivelatore HEPD (Sezione 3.2), ove si trattano i metodi di costruzione della geometria in GEANT4. 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, 3.6 e 3.7, 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 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

GEANT (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, grazie ad una serie di librerie già esistenti che forniscono ad esempio i meccanismi di interazione, le sezioni d'urto dei vari processi, la definizione dei materiali o delle strutture geometriche più utilizzate [50]. GEANT4 sostituisce la precedente versione GEANT3, avendone migliorato sia l'affidabilità nel tracciamento delle par-

### 3.1 GEANT4

---

ticelle sia i modelli e i processi fisici simulati; è inoltre di grande 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, dato 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 due in particolare: la prima 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 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 si vuole simulare in questo caso è la risposta dello strumento al passaggio di diversi tipi di particelle cariche ed in particolare elettroni e protoni.

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, le caratteristiche fisiche e successivamente la posizione e l'orientazione che gli oggetti devono avere all'interno del volume generale. In tutta la geometria

### 3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

---

deve esistere una ed una sola istanza fisica del volume Mondo, 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  $55\text{ cm} \times 75\text{ cm} \times 150\text{ cm}$  e di materiale *GalacticMaterial* che rappresenta le condizioni presenti nello spazio.

Per creare un nuovo volume all'interno di GEANT4 si seguono tre 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, nel caso di un parallelepipedo. Questo volume è sostanzialmente un oggetto geometrico di cui sono state descritte le dimensioni.

Va inoltre specificato il *Volume Logico* in cui vengono poi inserite le caratteristiche fisiche come ad esempio il materiale di cui è costituito il volume solido precedentemente descritto, o il colore che gli si vuole attribuire in fase di visualizzazione. 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 e l'orientazione del volume considerato all'interno di un volume madre, che può essere il Mondo oppure un volume creato precedentemente e già piazzato. In fase di definizione del volume fisico si possono definire ulteriori parametri come ad esempio il numero di copie che si vuole ottenere da un dato volume (operazione molto utile quando un volume è composto da parti uguali che si ripetono), la collocazione delle repliche (lineare o circolare, per esempio) o il nome da attribuire al volume stesso.

Esistono 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.

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.

Per concludere, un sistema di gestione dei dati in output della simulazione fornisce le *hit* 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.

## 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, una volta implementata e compilata, viene caricata all'avvio della fase simulativa.

La prima metà di questo lavoro di tesi è stata di realizzazione tramite GEANT4 del rivelatore HEPD. La descrizione 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 ulteriore sviluppo è stato necessario per produrre i dati di *output* generati automaticamente da GEANT in un formato adeguato per la successiva analisi: si tratta di questi nell'ultima sezione di questo capitolo.

È stato 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 presenti, che sono in grado di interagire con la radiazione e quindi di influenzare negativamente la risposta dello strumento.

Il lavoro generale attinente alla geometria è stato suddiviso in cinque fasi di lavoro, ognuna riguardante la realizzazione di una parte dello strumento, in particolare:

- una parte del **Satellite**, con la finestra di mylar e la struttura attorno in alluminio;
- il **Tracker**, con i due rivelatori semiconduttori e i relativi supporti meccanici;
- il **Trigger**, contenente i due piani di scintillatori S1 e S2;
- il **Calorimetro**, coi piani di scintillatori della torre e il LYSO finale;
- il **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 fondo alla tesi, pagina 151), 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 è racchiusa.

La costruzione di questo volume ha pertanto richiesto la descrizione del materiale mylar, oltre che la descrizione dell'alluminio in struttura alveolare.

### 3.4 Realizzazione del Tracker

---

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 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 sia la finestra sia 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 3.1) e la collocazione sotto di esso di un foglio di mylar (Figura 3.2).

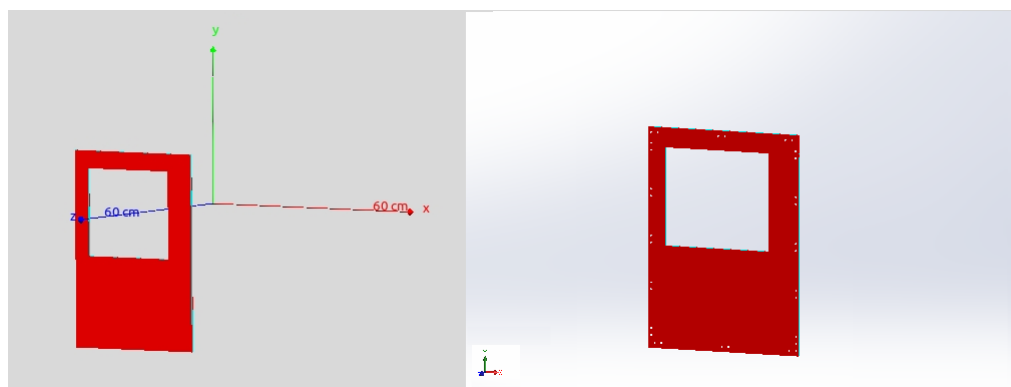


Figura 3.1: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura anteriore del satellite realizzata con la finestra lasciata per la collocazione del piano di mylar: si noti in *rosso*, la struttura in alluminio.

## 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

### 3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

---

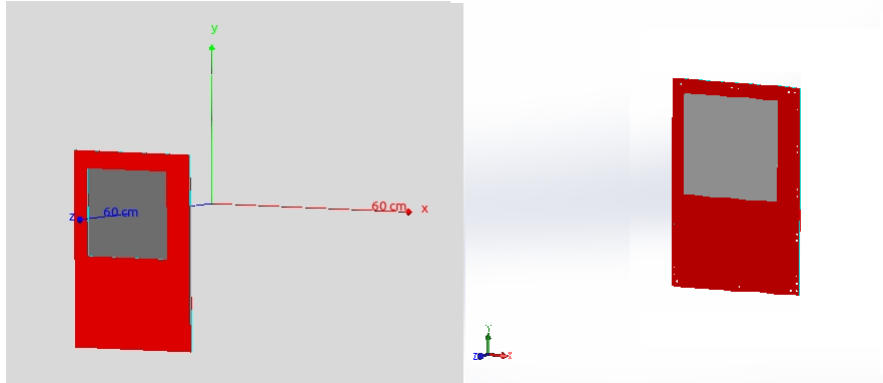


Figura 3.2: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura posteriore del satellite realizzata con il piano di mylar: si noti in *rosso*, la struttura in alluminio, ed in *grigio*, il piano di mylar sottostante.

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.

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 3.3) ed infine ne è stato scavato l'interno per far posto ai supporti di kapton e poron.

### 3.4 Realizzazione del Tracker

---

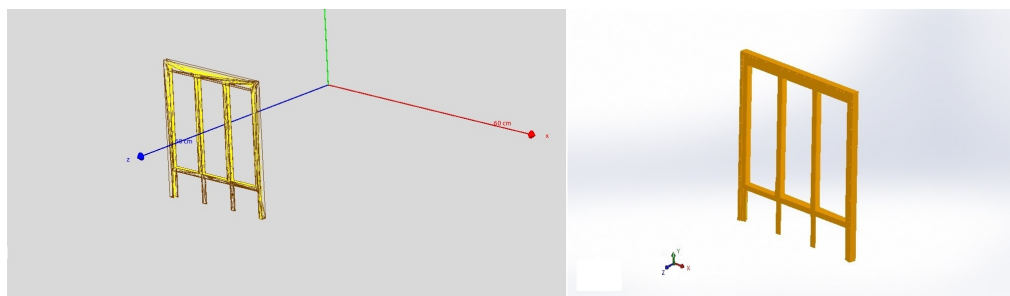


Figura 3.3: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura del Tracker: si notino le finestre lasciate in fronte ai semiconduttori e lo spazio lasciato all'elettronica nella parte inferiore.

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 Y e poi tre volte il piano lungo l'asse X), cui è seguita un'operazione di collocazione della parte elettronica (Figura 3.4) 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 3.5 destra, in colore azzurro).

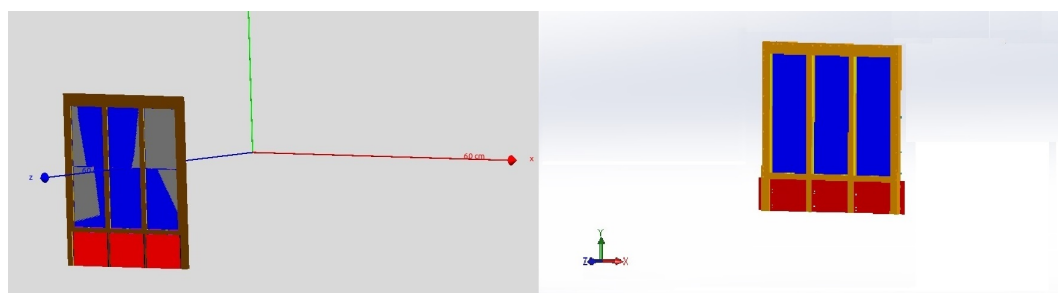


Figura 3.4: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura del Tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio (in *blu*) e della parte elettronica (in *rosso*).

Il solido fin qui creato è stato poi replicato una volta lungo l'asse Z per realizzare il secondo piano di semiconduttore (Figura 3.6).



### 3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

---

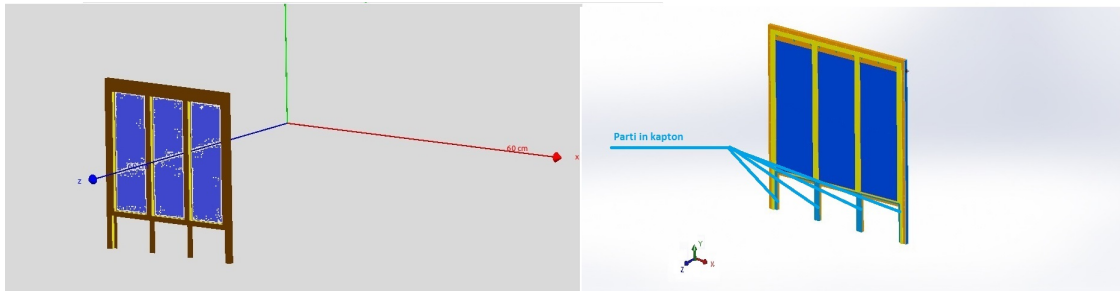


Figura 3.5: Versione in GEANT4 (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura del Tracker dopo gli inserimenti dei moduli di silicio e dei pezzi in poron (in *giallo*). Si notino le parti di kapton (in *azzurro*) nella versione in SolidEdge.

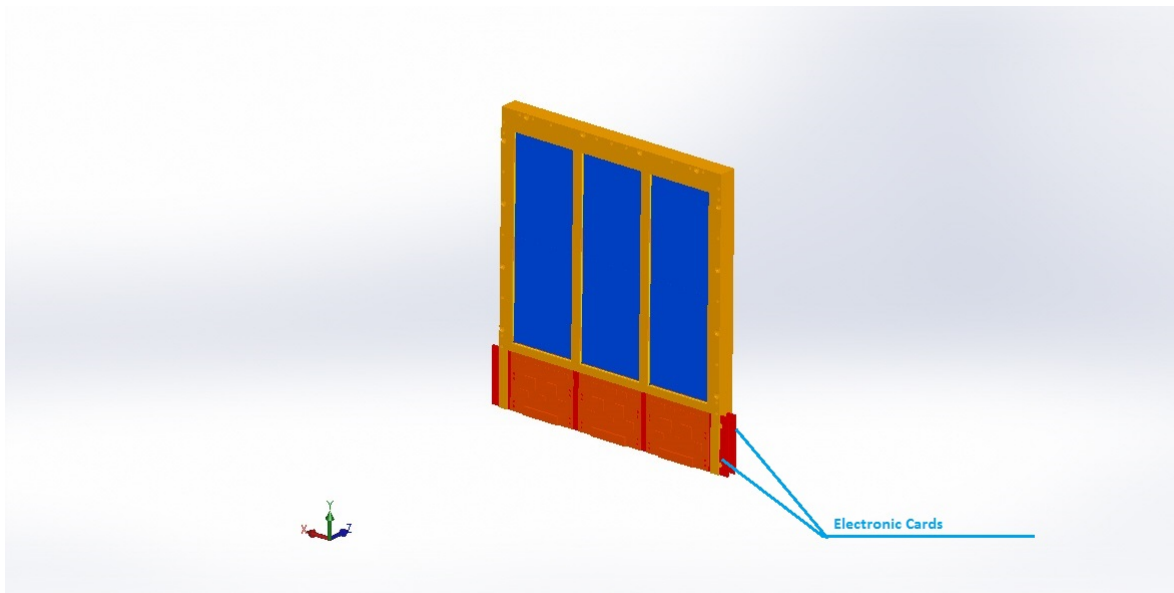


Figura 3.6: Versione in SolidEdge della struttura del Tracker dopo la replica del secondo volume di semiconduttore. Si può notare qui il particolare dei 2 segmenti dedicati all'elettronica anziché uno unico relativo ad un solo semiconduttore.

## 3.5 Realizzazione del Trigger

La configurazione del Trigger, composto da due scintillatori diversi (S1 e S2), è molto diversa per il primo ed il secondo piano. Il primo scintillatore infatti è segmentato in sei 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.

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 scrittura delle dimensioni del macro volume complessivo di tutti i pezzi legati a 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.

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 alle precedenti (Figura 3.7). 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, sempre lungo l'asse Y (Figura 3.8).

La parte di costruzione virtuale della geometria riguardante la serie di scintillatori, e quindi S2, 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

### 3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

---

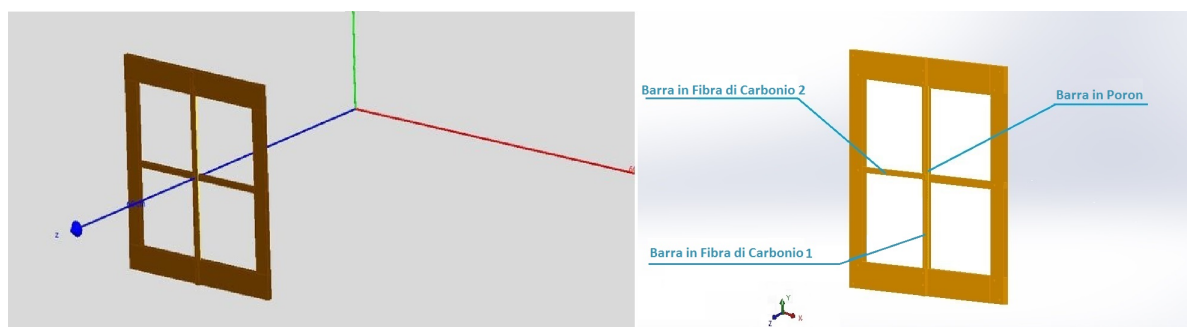


Figura 3.7: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura del primo piano di Trigger con i sostegni in fibra di carbonio (in *arancio*), *lateral*i, le barre in fibra di carbonio (in *arancio*, centrali) e la barra in poron (in *giallo*).

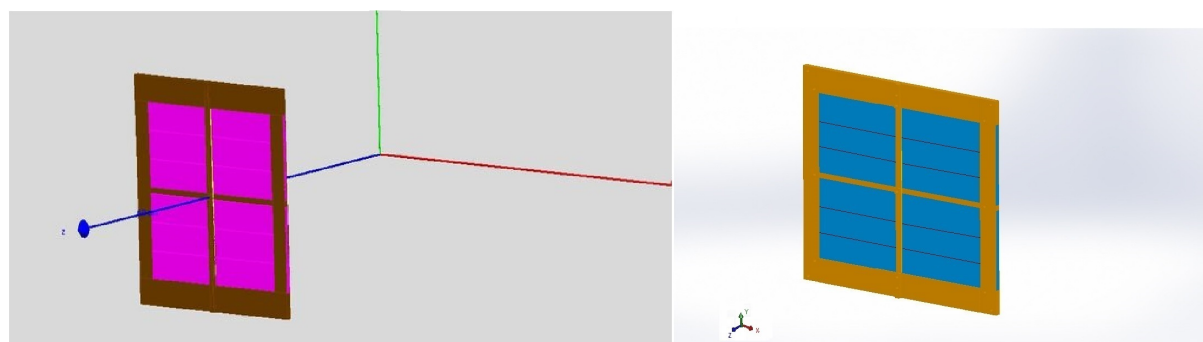


Figura 3.8: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura del primo piano di Trigger con la collocazione dello scintillatore.

### 3.5 Realizzazione del Trigger

---

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. Le croci in poron e quella in fibra di carbonio non sono medesime in quanto la seconda presenta agli 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 di carbonio.

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 e ai supporti laterali cui devono corrispondere gli estremi della croce in fibra di carbonio e i limiti delle croci in poron (Figura 3.9).

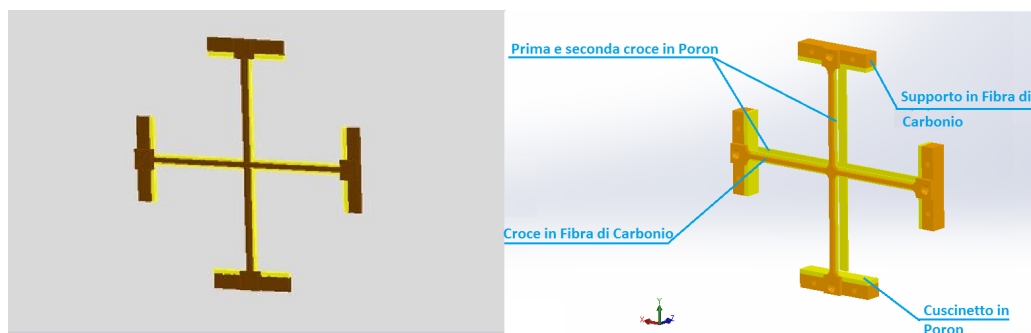


Figura 3.9: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura del secondo piano di Trigger con la croce in fibra di carbonio, le croci anteriore e posteriore in poron, i cuscinetti in poron e i supporti in fibra di carbonio.

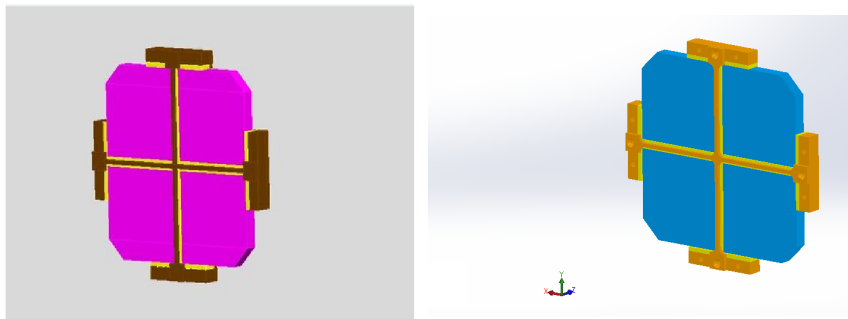


Figura 3.10: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) della struttura del secondo piano di Trigger con collocato il piano di scintillatore.

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 parallelepipedo, poiché agli angoli sono stati effettuati dei tagli per permettere la collocazione dei fotomoltiplicatori (Figura 3.10). 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 maggiore è stato attaccato un parallelepipedo (Figura 3.11).

## 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, 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

### 3.6 Realizzazione del Calorimetro

---

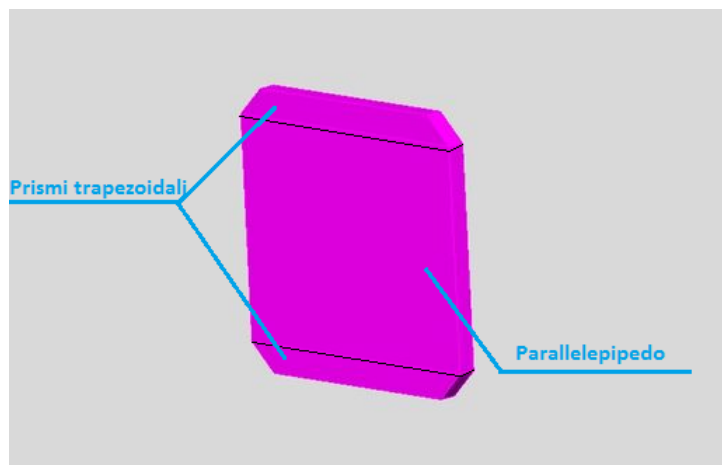


Figura 3.11: Versione in GEANT dello scintillatore: è possibile osservare la divisione in prismi trapezoidali e nel parallelepipedo di cui è composto.

del Trigger: la prima croce di poron, lo scintillatore con gli angoli tagliati, le costole (cioè, i supporti) 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 3.12).



Figura 3.12: Versione in GEANT (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) 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.

Alla serie di piani di scintillatori è stata attaccata una parte finale contenente i blocchi di LYSO (Figura 3.13).

### 3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

---

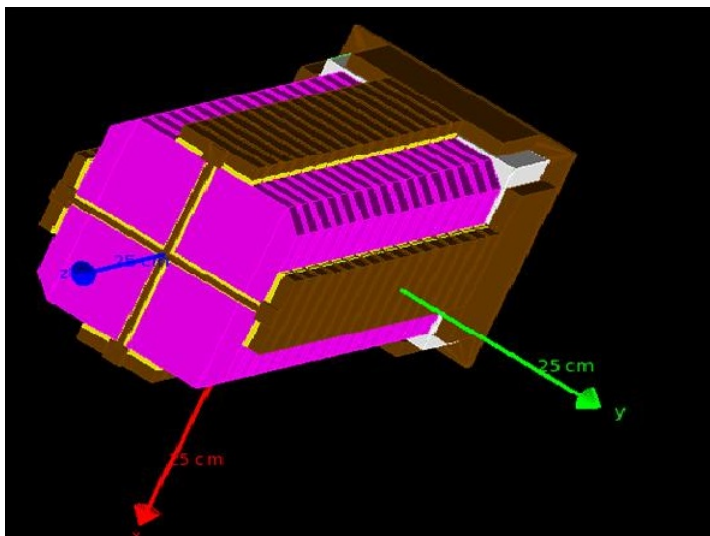


Figura 3.13: Versione in GEANT4 della torre di 15 scintillatori con S2 e in fondo la matrice di LYSO.

Per quanto riguarda questa parte, sono state realizzate con lo stesso procedimento descritto precedentemente le croci di sostegno 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 nove 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 tre 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 nove cubi con le corrette collocazioni, cui è seguita la collocazione delle costole esterne in fibra di carbonio (Figura 3.14).

La piastra finale invece è stata disegnata a partire dalla descrizione di un

### 3.6 Realizzazione del Calorimetro

---

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 otto punti (Figura 3.15).



Figura 3.14: Versione in GEANT4 (a *sinistra*) e in SolidEdge (a *destra*) del LYSO. Nel disegno in GEANT, in *grigio* si trova il cristallo, in *verde* il rivestimento in teflon e in *giallo*, la croce di poron.

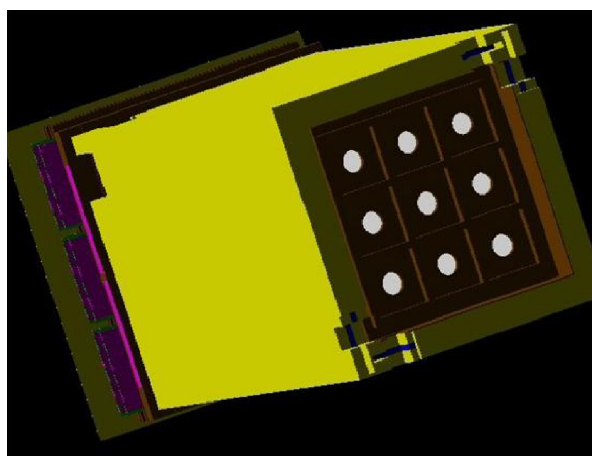


Figura 3.15: Versione in GEANT4 della piastra finale forata sul fondo del LYSO.



### 3.7 Realizzazione del VETO e del contenimento laterale

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

La definizione del volume logico non ha richiesto la descrizione di nuovi materiali eccetto il nomex, 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, d, f). In alcuni casi, pertanto, la versione finale di un layer è composta da tre o anche quattro 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 due angoli opposti tagliati (Figura 3.16, b, e). 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.

### 3.7 Realizzazione del VETO e del contenimento laterale

---

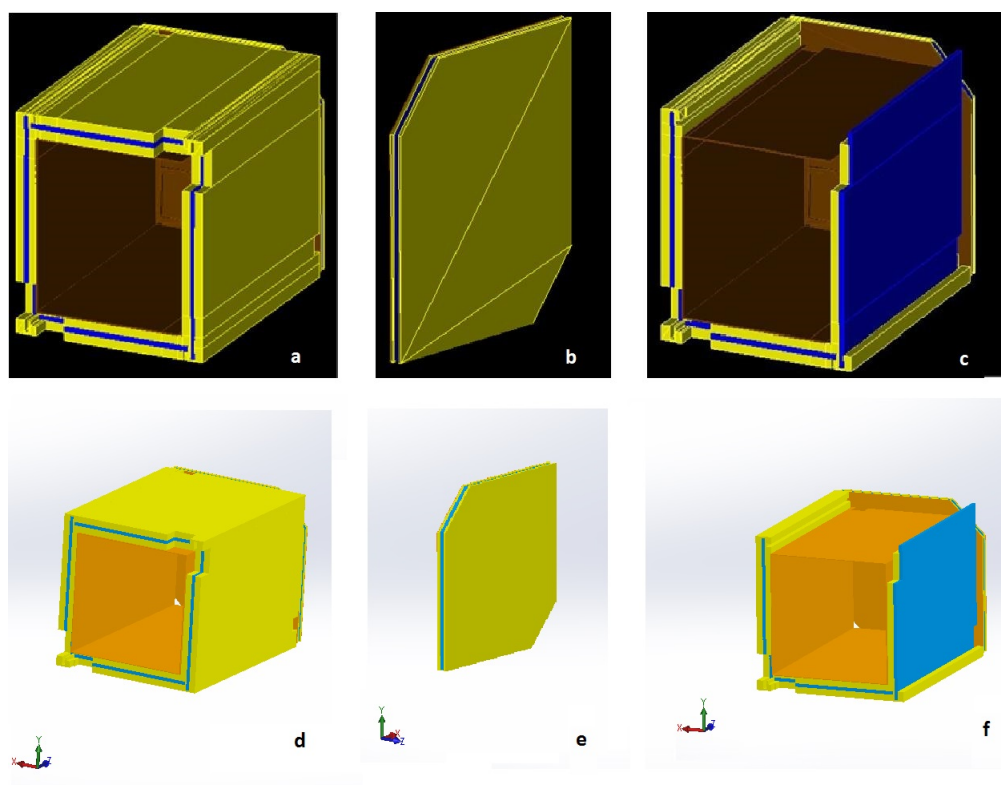


Figura 3.16: Versione in GEANT4 (*a,b,c*) e in SolidEdge (*d,e,f*) delle coperture laterali e finale col VETO scintillatore. In colore *blu* si può notare il piano di scintillatore plastico che funge da VETO mentre in *arancio* e *giallo* le strutture di sostegno che circondano lo scintillatore rispettivamente in fibra di carbonio e poron.

### 3.8 La geometria realizzata

Il risultato finale della geometria è, come ci si era prefissati, una versione geometrica molto simile a quella in seguito realizzata fisicamente, per fornire dati utili allo studio della risposta del rivelatore.

Riassumendo, come visibile in Figura 3.17, sono stati creati i volumi del satellite in alluminio con la finestra oltre la quale è stato posto un foglio in mylar. Successivamente sono stati 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 stato poi posizionato il 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.

### 3.9 La produzione dei dati col simulatore

Solo alcuni volumi creati con GEANT sono definiti sensibili, cioè in grado di produrre un *output* dall'interazione con le particelle: ciò è dovuto al fatto che nel modello di volo gli unici componenti che danno un segnale leggibile sono i rivelatori, ossia i due semiconduttori al silicio, gli scintillatori del Trigger, gli scintillatori del calorimetro (LYSO compreso) e quelli del VETO.

Una volta creata la libreria contenente tutte le informazioni sulla geometria, si procede a definire i parametri della simulazione dichiarati nel dettaglio nel Capitolo 4. In particolare, è stato necessario specificare la *physics list* utilizzata, un insieme di librerie che descrive nel dettaglio i vari processi dell'interazione tra radiazione e materia per le varie particelle. All'interno della *physics list*, è possibile fornire come *input* alla simulazione dei file chiamati *datacard* contenenti comandi di impostazione della simulazione stessa quali il tipo di particella, il numero di particelle interagenti, lo spettro energetico che

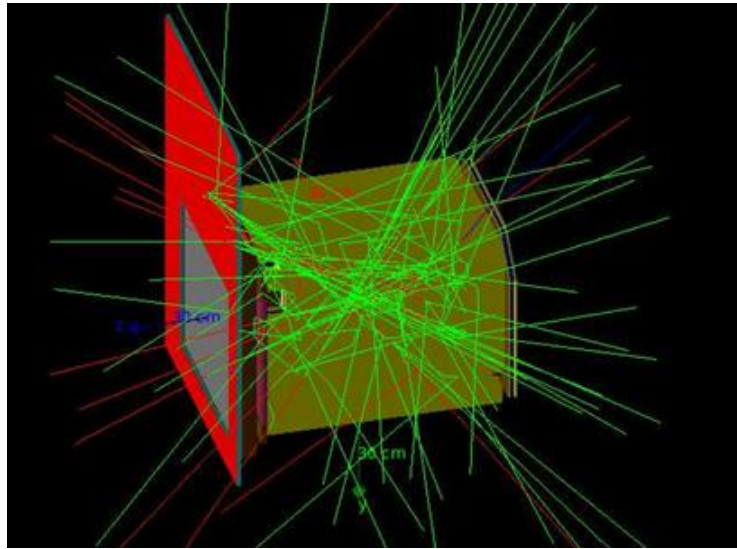


Figura 3.17: La geometria realizzata. Viene qui presentata l'illustrazione dell'interazione tra la geometria del rivelatore HEPD e alcune particelle sparate in direzione casuale dal centro di essa. In questo caso, in *verde* è rappresentata la radiazione  $\gamma$ , la cui energia fa sì che superi nella maggior parte dei casi lo spessore del rivelatore, tranne in alcuni casi in cui, per effetto fotoelettrico, genera degli elettroni, in figura in colore *rosso*.

### 3. REALIZZAZIONE DELLA GEOMETRIA DEL RIVELATORE HEPD CON GEANT4

---

hanno queste particelle e la parametrizzazione della geometria di generazione delle stesse.

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, sono state definite in una libreria chiamata *dataformat* che ha lo scopo di formattare i file di output. Un programma eseguibile finale dà 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 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 (Capitolo 1), compresa la struttura del rivelatore (Capitolo 2), e chiarito il processo di costruzione virtuale della stessa (Capitolo 3), resta da mostrare l'analisi delle caratteristiche del rivelatore ottenuta tramite la simulazione del passaggio di elettroni e protoni all'interno dello stesso.

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 rivelatore HEPD.

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 ci si è 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 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, sulla base di una selezione di eventi validi.

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 conoscere le proprietà del rivelatore.

È pertanto necessario in primo luogo verificare l'accettanza, definita nel Capitolo 2, per capire quanta parte del flusso di particelle in cui è immerso il rivelatore può esser letta ed analizzata. Il suo andamento 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, integrata su tutti gli angoli, in funzione dell'energia (in tal caso si parla di accettanza totale), per comprendere a quale energia la misurazione del flusso (di elettroni e protoni) da parte del rivelatore è massima. Era richiesta dalla CNSA una accettanza angolare opportuna, in particolare che coprisse almeno  $70^\circ$  del *pitch angle*.

È stata ricercata poi l'entità della risoluzione energetica, 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*: saper riconoscere l'energia di una particella interagente col rivelatore è necessario per comprendere l'origine della stessa, quindi.

## 4.1 Obiettivi della simulazione

---

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 sarebbe di grande facilità individuare il segno della carica dalla diversa deflessione al suo interno, e pertanto è stato necessario utilizzare un metodo alternativo per indagare se l'energia misurata in un evento sia da attribuire ad un elettrone o ad un protone.

Si è infine andato a valutare il piano del calorimetro 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 è considerato valido. Questo studio ha pertanto portato ad un'analisi di varie configurazioni di *trigger*, una condizione necessaria perché un evento sia valido: le diversità tra queste configurazioni sono state poi indagate in modo tale da capire quale potesse essere la migliore a seconda della posizione del rivelatore lungo l'orbita o del tipo di misura da effettuare.

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 necessaria 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: questi infatti devono essere scelti in modo da rappresentare in maniera più veritiera possibile l'ambiente in cui si troverà il rivelatore.

Questi parametri sono stati pertanto studiati ed in seguito inseriti 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 generate, la loro direzione, la superficie di provenienza da cui sono originate e la distanza della superficie dal rivelatore. Nell'Appendice B (in fondo a questa tesi, pagina 155) è possibile trovare il codice realizzato contenente le informazioni di generazione delle particelle.

### 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: una prima generazione si è svolta con particelle a energie fisse, una seconda invece con particelle che seguono un andamento dello spettro in legge di potenza.

Il motivo per cui è stato necessario effettuare una simulazione ad energie fisse è da ricondursi alla necessità di conoscere la risoluzione energetica dello strumento: conoscendo infatti l'energia iniziale della particella e l'energia totale rilasciata nell'intero strumento si ricava l'entità della risoluzione energetica, come spiegato nel Capitolo 2.

La simulazione con energie che seguono una legge di potenza dei raggi cosmici (in seguito riportata) è dovuta al fatto che il rivelatore interagirà nello spazio con particelle il cui spettro segue tale andamento di potenza. Poiché si ricerca una simulazione quanto più possibile vicina alla realtà, non si può trascurare questo aspetto nella simulazione.

La prima simulazione è stata svolta pertanto ad energie fisse, cioè facendo interagire più fasci di protoni ed elettroni, ognuno dei quali ad una certa

## 4.2 Parametri della simulazione

---

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 1).

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

Tabella 1: Energie dei dodici fasci di elettroni e protoni generati per la simulazione ad energie fisse.

Per ognuna delle energie indicate in Tabella 1 sono state generate cinque 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 in quanto assorbito prima di raggiungere il secondo piano del Trigger, necessario per validare un evento, come si vedrà.

Da uno studio condotto, sono stati concepiti i valori massimi dei range delle energie di generazione 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.

Ancora, per i protoni si riescono a misurare particelle di energia più elevata perché il rilascio energetico è maggiore rispetto agli elettroni.

La seconda campagna di simulazione è stata svolta tenendo presente la legge in potenza dello spettro di elettroni e protoni [51]:

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

con  $N$  flusso delle particelle,  $E$  energia delle particelle e  $\alpha$  indice spettrale.

Il valore dell'indice spettrale  $\alpha$  è stato ricavato da precedenti esperimenti spaziali; in particolare  $\alpha_{e^-}$  utilizzato per gli elettroni è pari a -2,2, mentre  $\alpha_p$  per i protoni è pari a -2,7.

Sia per gli elettroni che per i protoni, sono state generate cento 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 molto ampio è dovuto alla volontà di assicurarsi una lettura completa dei protoni altamente energetici).

### 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 stabilendo la posizione iniziale delle particelle e la loro direzione del moto. Come superficie di generazione delle particelle si è scelto di creare un rettangolo di 75x55 cm<sup>2</sup> (cioè pari ad una faccia 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).

Porre la superficie di generazione delle particelle ad una distanza così ravvicinata è stato necessario per aver una corretta considerazione dell'ac-

## 4.2 Parametri della simulazione

---

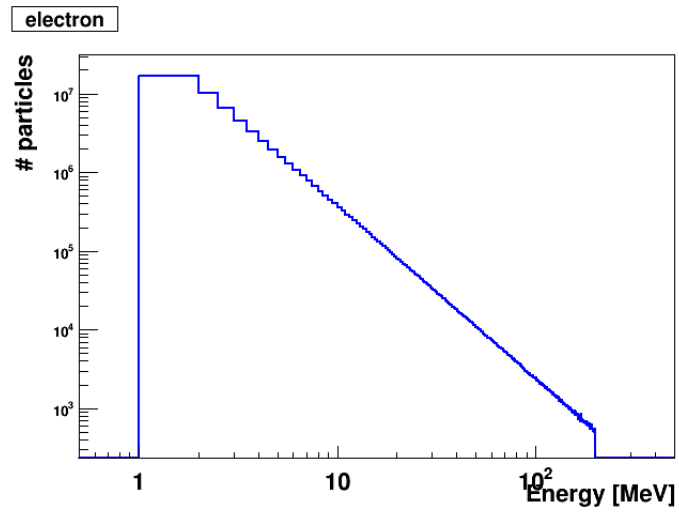


Figura 4.1: Fascio di elettroni generato con andamento a legge di potenza.

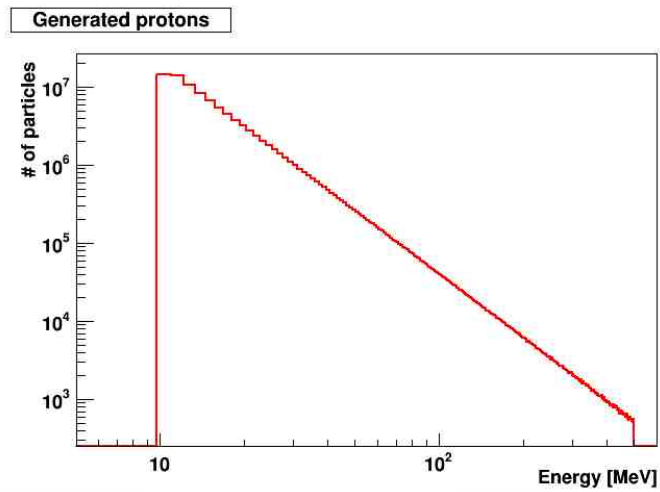


Figura 4.2: Fascio di protoni generato con andamento a legge di potenza.

#### 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

---

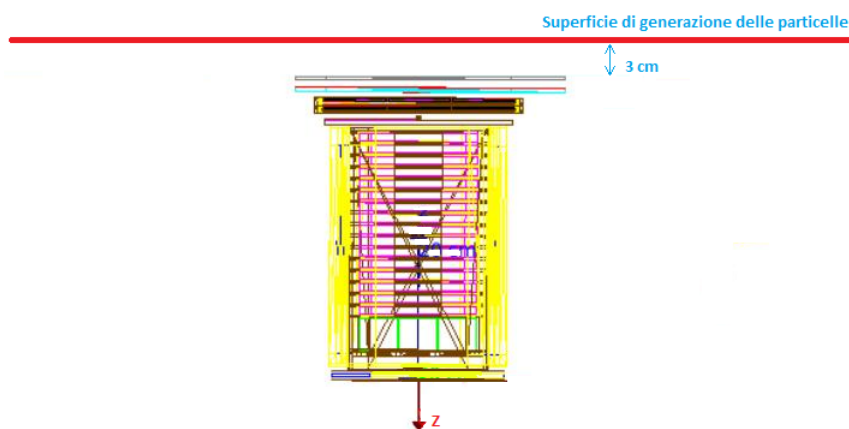


Figura 4.3: Vista laterale della superficie di generazione, in *rosso* in alto, e del rivelatore HEPD realizzato in GEANT4.

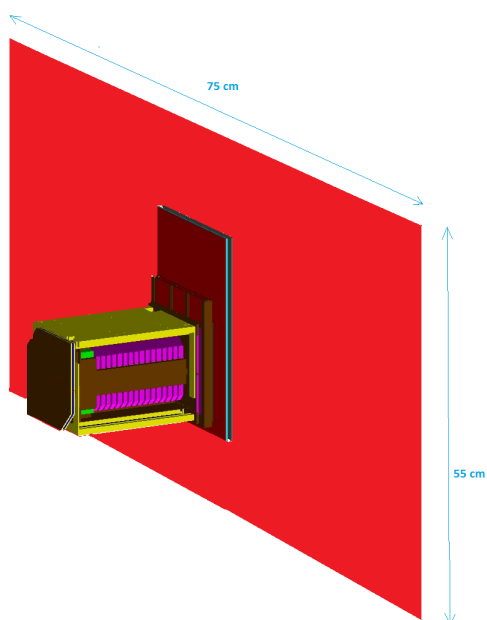


Figura 4.4: Vista in prospettiva della superficie di generazione, in *rosso*, e del rivelatore HEPD.

### 4.3 Analisi della simulazione

---

cettanza angolare: a distanze maggiori infatti la superficie di generazione sarebbe stata troppo lontana per rendere conto di tutto l'angolo solido.

Le particelle sono state inoltre generate dalla superficie con direzione casuale e con generazione uniforme (Figura 4.5) per ogni simulazione: 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.

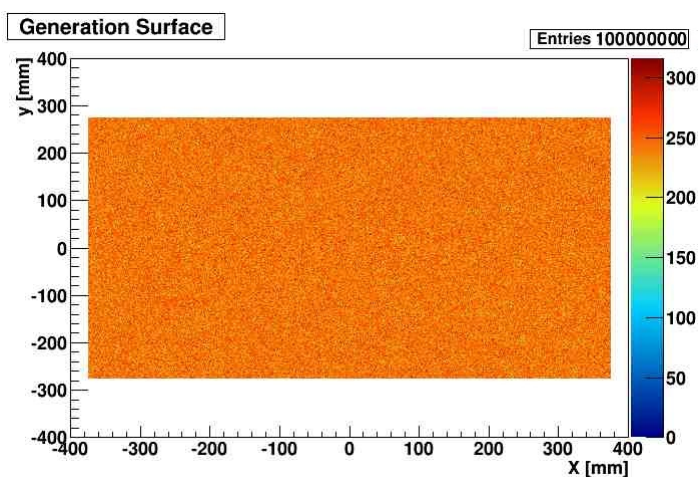


Figura 4.5: Il colore mostra il numero di particelle generate per ogni punto della superficie di generazione, sia nel caso di elettroni che in quello di protoni, qui raffigurato per una simulazione con la legge di potenza. Come si può notare, il numero di particelle generate è pressoché uniforme su tutta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

### 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 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.

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 Selezione degli eventi validi

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

Al fine di selezionare solo eventi ritenuti interessanti (escludendo ad esempio particelle che non attraversano il rivelatore) sono stati imposti alcuni tagli di selezione in modo da effettuare l'analisi su un sotto-campione di dati ritenuti buoni. Per considerare valido un evento, si impone quindi che la particella in esame soddisfi alcune condizioni, ora illustrate.

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  $LYSO$ , la matrice formata dai blocchi di LYSO.

### 4.3 Analisi della simulazione

---

Una prima condizione che un evento deve soddisfare per essere stabilito valido 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).

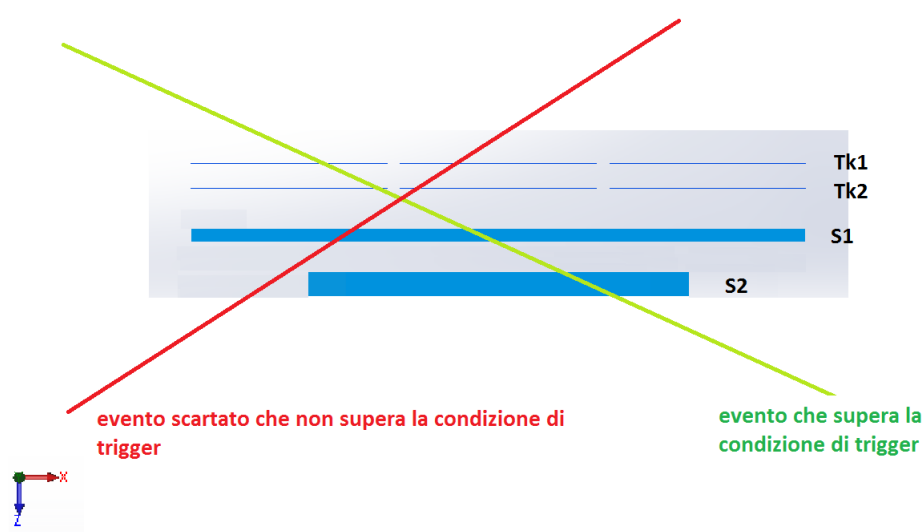


Figura 4.6: La rappresentazione della condizione di trigger. Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2.

La condizione di trigger è stata implementata nel codice richiedendo per ogni particella che l'energia rilasciata nei due piani di Tracker, nel piano S1 e nel piano S2 sia maggiore di zero. Ai fini della determinazione della validità di un evento, la condizione imposta dal trigger è necessaria ma non sufficiente.

Oltre ad essa infatti, dal momento che a partire dall'energia depositata nel rivelatore bisogna ricostruire l'energia reale della particella, si introduce un'ulteriore condizione detta *condizione di confinamento*. Essa si ottiene scartando tutti gli eventi che generano un segnale nei rivelatori del VETTO, eliminando così le particelle che escono dal calorimetro e che entrano lateralmente.



Questa seconda condizione si ottiene nel codice selezionando soltanto le particelle che non prevedono rilascio energetico all'interno dei rivelatori di VETO. Questi ultimi infatti, circondando interamente il calorimetro, possono misurare un rilascio energetico soltanto se la particella non è rimasta confinata nel calorimetro.

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.

L'intersezione delle due condizioni per dichiarare una particella interagente valida crea la *condizione di good hit* (Figura 4.7), ovvero di validità dell'evento, 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 al silicio, mentre con  $Tracker_2$  il secondo.

Come si può intuire, di tutte le particelle generate dalla superficie di generazione (Figura 4.5), la maggior parte di quelle che vengono ritenute valide per l'analisi della simulazione (cioè che superano la condizione di *good hit*), e che pertanto sono in accettazione, provengono da un'area centrata attorno alla finestra di mylar (Figura 4.8). Il motivo è dovuto al fatto che la probabilità di soddisfare le condizioni di *good hit* è molto maggiore per una particella proveniente dal centro della superficie di generazione rispetto ad una particella proveniente da uno degli angoli. Infatti, le particelle generate di fronte alla finestra che ospita il piano di mylar possono esser generate con un range di angoli e direzioni più ampio per soddisfare la condizione di trigger.

### 4.3 Analisi della simulazione

---

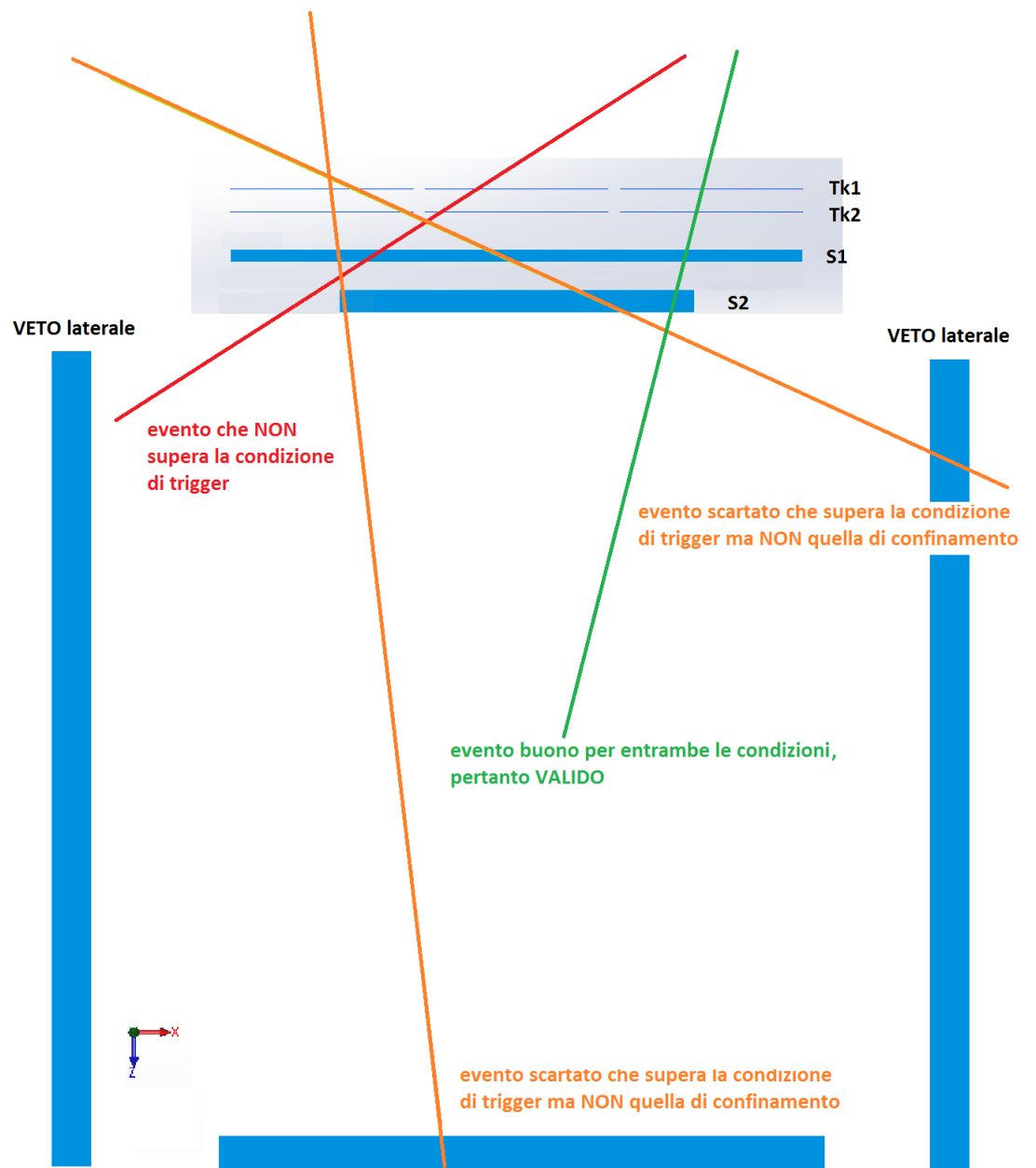


Figura 4.7: La rappresentazione della condizione di *good hit*. Per una maggior chiarezza sono stati omessi i piani di scintillatore successivi a S2.

## 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

---

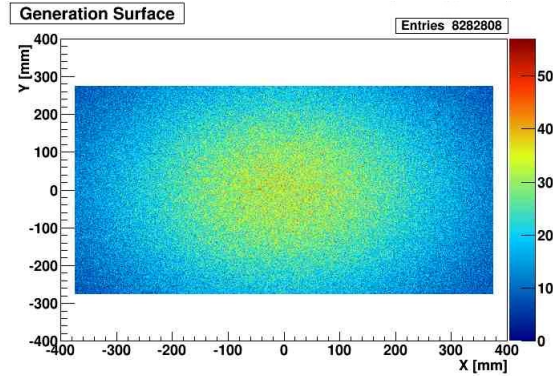


Figura 4.8: Il colore mostra il numero di particelle generate per ogni punto della superficie di generazione che vengono considerate valide, e dunque in accettazione (in questo caso è rappresentata la superficie della simulazione in legge di potenza). Come si può notare, il numero di particelle generate e valide 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 misura dell'accettanza angolare, misurata per ogni energia, da cui si può ricavare quella totale e quindi vedere a quale energia la vista del rivelatore è ottimizzata, ovvero quando l'accettanza totale è maggiore.

Grazie alla simulazione condotta ad energie fisse, si è reso possibile il calcolo della risoluzione energetica, a partire dalla conoscenza dell'energia con cui la particella che genera un evento valido è stata originata e osservando la totalità dell'energia persa all'interno del rivelatore.

Tramite il metodo  $\Delta E/E$  è stato possibile poi valutare i diversi rilasci energetici in un piano del Tracker per protoni ed elettroni e quindi comprendere se un evento valido sia dipendente dall'una o dall'altra particella.

Infine, con lo scopo di cambiare la condizione di *good hit*, è stato condotto uno studio sulla condizione di trigger che può essere modificata in modo da ottenere diverse configurazioni. In questo studio si delineeranno le diverse modalità di trigger ed i motivi che possono portare all'utilizzo di uno piuttosto che un altro.

### 4.3.3 Accettanza angolare

L'accettanza angolare  $A$  (Figura 4.9) è data dal rapporto tra le  $N_\theta$  particelle rivelate a un dato angolo, con quelle totali provenienti da ogni direzione,  $N_{tot}$ , moltiplicato per l'area della superficie di generazione delle particelle,  $S$ , e per  $\pi$ .

$$A = \frac{N_\theta}{N_{tot}} \cdot \pi S \quad (4.2)$$

Il fattore  $\pi S$  serve per ottenere un valore indipendente dalla superficie di generazione, altrimenti il rapporto  $N_\theta/N_{tot}$  diminuirebbe all'aumentare di essa.

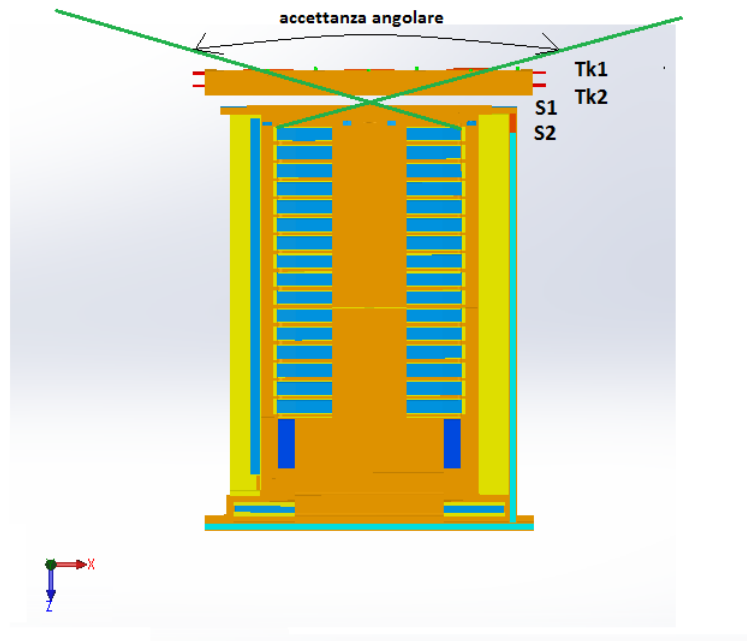


Figura 4.9: L'illustrazione del significato della accettanza angolare in 2 dimensioni. In 3 dimensioni, figurerebbe come un cono. Si noti che i lati che vanno a formare l'angolo, e quindi il cono, partono dagli estremi di S2 per giungere agli estremi opposti del primo semiconduttore del Tracker comprendendo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

L'analisi dell'accettanza angolare è avvenuta con alla base sempre l'ipotesi di *good hit* e ha richiesto, per elettroni e per protoni, la ricerca dell'efficienza

#### 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

---

geometrica tramite un codice di analisi della simulazione. Successivamente si è eseguita una normalizzazione moltiplicando per  $\pi S$ , come spiegato. 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*  $\vartheta$ . (Figura 4.10).

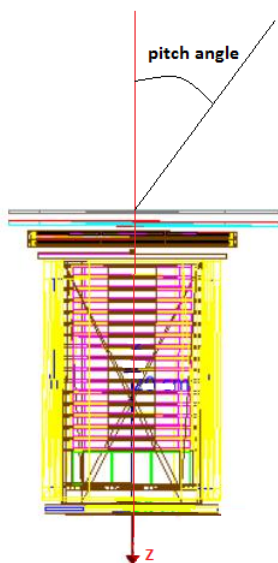


Figura 4.10: L'illustrazione del significato di *pitch angle* per il rivelatore HEPD.

Nelle Figure 4.11 e 4.12 pertanto viene mostrata l'accettanza angolare per elettroni e protoni, cioè il numero di particelle valutate dal rivelatore per  $cm^2$  e *steradiante*, in funzione dell'angolo  $\vartheta$  (*pitch angle*), per diverse energie e con la condizione di non interazione sul VETO imposta.

Un valore maggiore dell'accettanza angolare comporta una la misura di un numero maggiore di particelle provenienti da quel valore del *pitch angle*  $\vartheta$ .

Come si può osservare, sia per elettroni che per protoni a bassi valori del *pitch angle* corrisponde un numero di particelle molto esiguo: 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. Generando le particelle con direzione casuale però (che non vuol dire

### 4.3 Analisi della simulazione

---

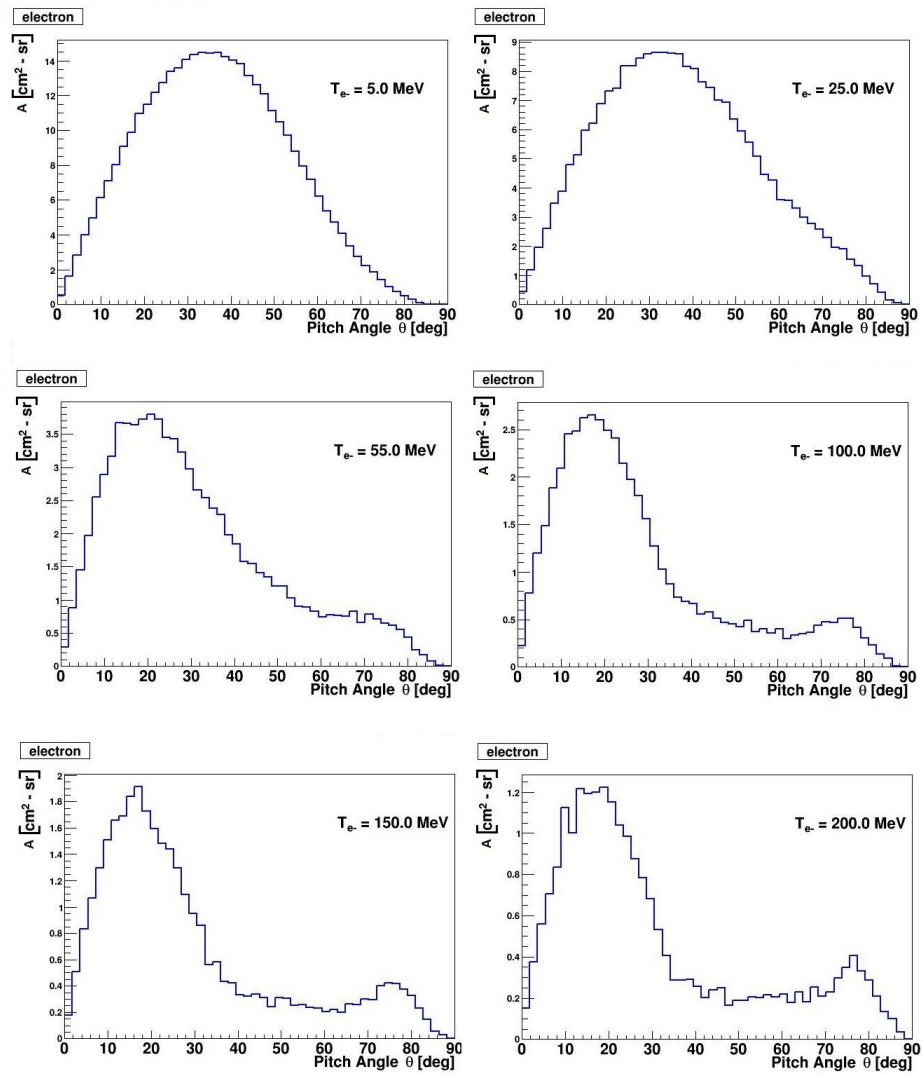


Figura 4.11: Andamento dell'accettanza angolare per elettroni a varie energie, in funzione del *pitch angle*.

## 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

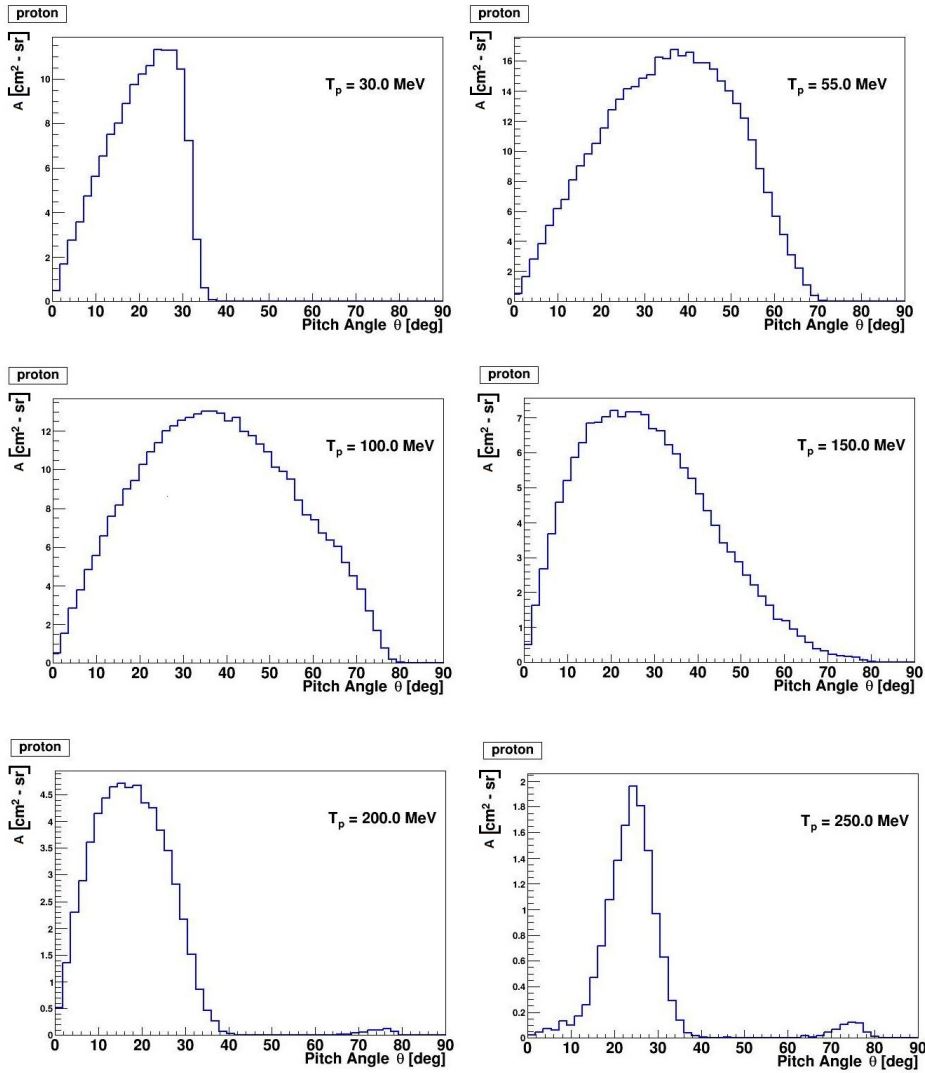


Figura 4.12: Andamento dell'accettanza angolare per protoni a varie energie, in funzione del *pitch angle*.

con angolo casuale!), 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  $90^\circ$ , anziché la sola ed unica direzione possibile per un angolo di  $0^\circ$ .

Nel caso di generazione con un angolo a  $0^\circ$ , infatti, solo un'infinitesima parte dell'angolo solido può essere coperta, ovvero quando la generazione è perfettamente perpendicolare alla superficie; nel caso di angoli maggiori invece tale parte aumenta decisamente poiché aumenta il numero di traiettorie possibili. 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 nel grafico che segue all'aumentare dell'angolo è anche 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 generate 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 particelle con angoli di circa  $40^\circ$ , in grado di entrare nel rivelatore anche da parti della superficie più decentrate.

Per quanto riguarda gli 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  $20^\circ$ : ad energie elevate infatti, gli elettroni che arrivano con un angolo grande (maggiore di  $30^\circ$ ) finiscono per colpire il VETO laterale e quindi vengono rimossi dal taglio di confinamento.

Inoltre, sempre per elettroni, ad angoli ancora maggiori le posizioni di partenza della particella tali per cui possa interagire col rivelatore sono agli



estremi della superficie, motivo per cui si nota una discesa nel grafico e un valore nullo a  $90^\circ$ , angolo per cui 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 (circa  $75^\circ$ , per gli elettroni con almeno 100 MeV di energia). La sua presenza si può spiegare considerando che le particelle generate con piccoli angoli sono approssimativamente perpendicolari ai piani dei vari rivelatori e pertanto li percorrono nel loro spessore nominale (ad esempio, di 1 cm per ogni scintillatore): all'aumentare dell'energia aumenta la probabilità che questi arrivino ad interagire col VETO e ad essere eliminati come eventi. Se si valutano le particelle ad angoli maggiori, risulta chiaro che esse, attraversando non perpendicolarmente un piano, percorrono uno spessore maggiore di quello nominale (in particolare, pari allo spessore del singolo rivelatore diviso per il  $\cos(\vartheta)$ ): in tale ottica si può considerare quindi il secondo picco, dato da tutte quelle particelle con angoli di circa  $70^\circ$ - $80^\circ$  che non arrivano ad avere interazioni col VETO perché percorrono tale spessore più grosso. A basse energie, il secondo picco non si presenta perché queste particelle con angoli così elevati non superano la condizione di trigger, non raggiungendo il secondo piano di Trigger, S2.

Come illustrato, l'andamento dell'accettanza 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 4.13): come atteso, il secondo picco scompare.

Come si nota dalla figura, è netta l'influenza che questa condizione comporta nel risultato legato all'accettanza angolare soprattutto per quanto riguarda le alte energie, quando la particella può più facilmente arrivare al VETO laterale e finale, o ad elevati angoli, quando la particella può provenire da zone decentrate della superficie di generazione e quindi incontrare il VETO laterale: il picco si mantiene a circa  $40^\circ$ .

### 4.3 Analisi della simulazione

---

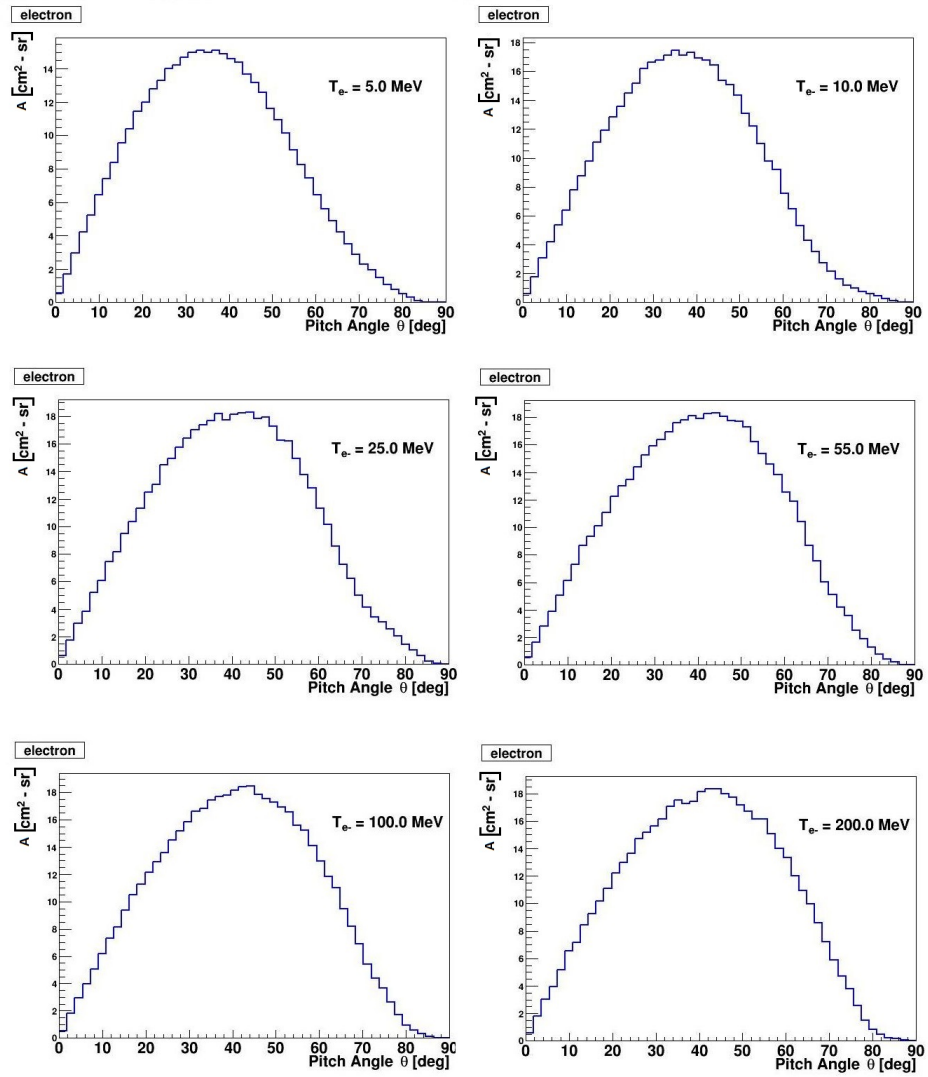


Figura 4.13: Andamento dell'accettanza angolare per elettroni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO.

## 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

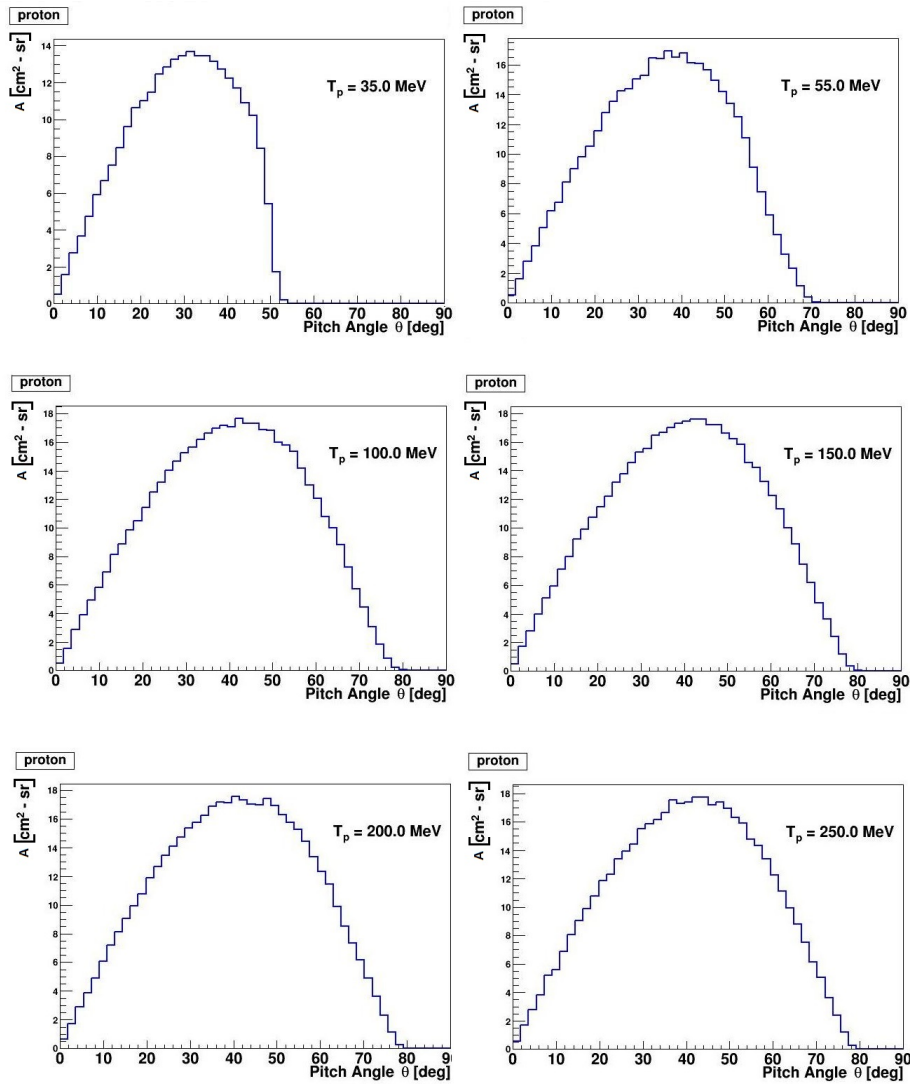


Figura 4.14: Andamento dell'accettanza angolare per protoni a varie energie senza condizioni di restrizione sul VETO.

In (Figura 4.12), è possibile valutare l'andamento dell'accettanza angolare dei protoni per i diversi valori di energia iniziale considerati.

A basse energie, il picco è molto spostato a bassi angoli e addirittura non ci sono risultati sopra a  $40^\circ$  per energie di 30 MeV: ciò è dovuto al fatto che 30 MeV è circa il valore di soglia per un protone che attraversa perpendicolarmente i piani del rivelatore e che riesce a raggiungere il secondo piano del Trigger S2. Se S1 viene attraversato con un'inclinazione elevata, lo spessore attraversato è maggiore, e quindi un protone di 30 MeV di energia viene fermato prima, senza raggiungere il secondo piano del Trigger. Ad una energia bassa, un protone pertanto non riesce a soddisfare per tali angoli la condizione di *good hit* e 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  $40^\circ$ .

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

Le considerazioni legate al secondo picco (a circa  $75^\circ$ , da 200 MeV in poi) e legate alla presenza di condizioni sul VETO (Figura 4.14), anche qui di enorme influenza, sono analoghe a quelle presentate per gli elettroni.

#### 4.3.4 Accettanza totale

Viene presentata ora l'accettanza totale  $A_t$ , ovvero il valore dell'accettanza angolare integrato su tutti gli angoli e in funzione dell'energia della particella.

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

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,

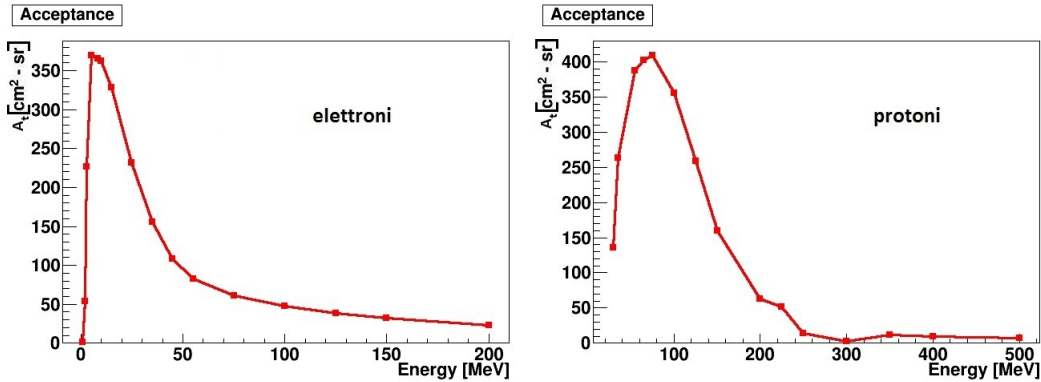


Figura 4.15: Accettazione totale in funzione dell'energia per elettroni (a *sinistra*) e protoni (a *destra*).

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, con un picco attorno a 50-100 MeV, a causa del rilascio energetico superiore a quello elettronico, come già ampiamente spiegato e descritto.

È possibile concludere quindi che a energie basse il rivelatore ha più facilità nel leggere un elettrone; viceversa a partire da energie di circa 50 MeV viene ottimizzata la capacità del rivelatore nella lettura di un evento proveniente da un protone (Figura 4.16).

### 4.3.5 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 generando un fascio di particelle monoenergetiche e osservando l'energia delle particelle misurata dal rivelatore. Il rilascio di energia ha un andamento affetto da errori statistici, strumentali e connessi all'elettronica.

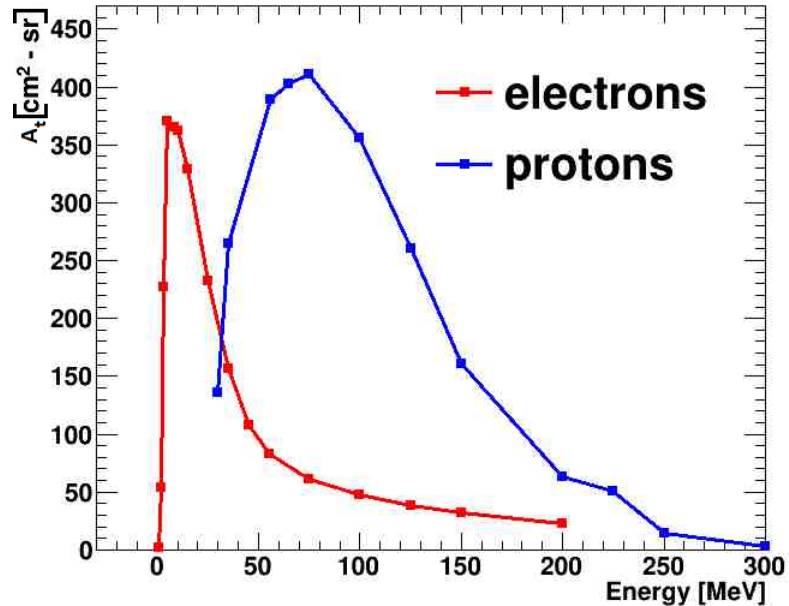


Figura 4.16: Accettanze totali in funzione dell'energia per elettroni e protoni.

Nelle Figure 4.17 e 4.18 vengono presentati i grafici inerenti al totale rilascio di energia nel rivelatore da parte degli elettroni e dei protoni dotati di una certa energia di generazione.

Come si nota, è presente sia per elettroni che per protoni una coda iniziale dovuta a perdite di energia in interazioni con i materiali di sostegno.

Nei grafici è riportata a lato la media e la deviazione standard  $\sigma$  sotto la dicitura RMS: ROOT infatti con tale scrittura intende la deviazione standard dei dati dell'istogramma. La deviazione standard in questo caso è dovuta chiaramente solo a fluttuazioni statistiche e non a rumori associati all'elettronica o imperfezioni nella calibrazione dello strumento. Per convenzione, si ricava la risoluzione energetica andando a effettuare il rapporto tra  $\sigma$  e l'energia di generazione delle particelle  $T$ , cioè il rapporto  $\sigma/T$ . Nelle Tabelle 2 e 3 è possibile trovare i riscontri computativi di quanto detto finora.

#### 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

$T_{e^-}$ [MeV]	$\sigma$ [MeV]	$\sigma/T$ [%]
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

$T_p$ [MeV]	$\sigma$ [MeV]	$\sigma/E$ [%]
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

Tabelle 2 (a *sinistra*) e 3 (a *destra*): Risoluzioni energetiche di elettroni (2) e protoni (3) alle diverse energie prese in esame.

Nella Tabella 2 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, dovuta alle sempre più numerose perdite di eventi causate da particelle interagenti col VETO, e a causa del fenomeno di *bremstrahlung*, responsabile del picco che inizia a manifestarsi attorno a 15 MeV (Figura 4.19).

Nella Tabella 3 viene mostrata la risoluzione energetica per l'analisi dei protoni, che come si vede arriva fino a circa il 20% a 100 MeV. Oltre i 100 MeV si assiste ad un miglioramento grazie all'influenza che ha 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 e causa della reazione (p,n) responsabile del picco che inizia a manifestarsi attorno a 100 MeV, energia molto maggiore rispetto alla soglia per cui può cominciare ad avvenire.

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

### 4.3 Analisi della simulazione

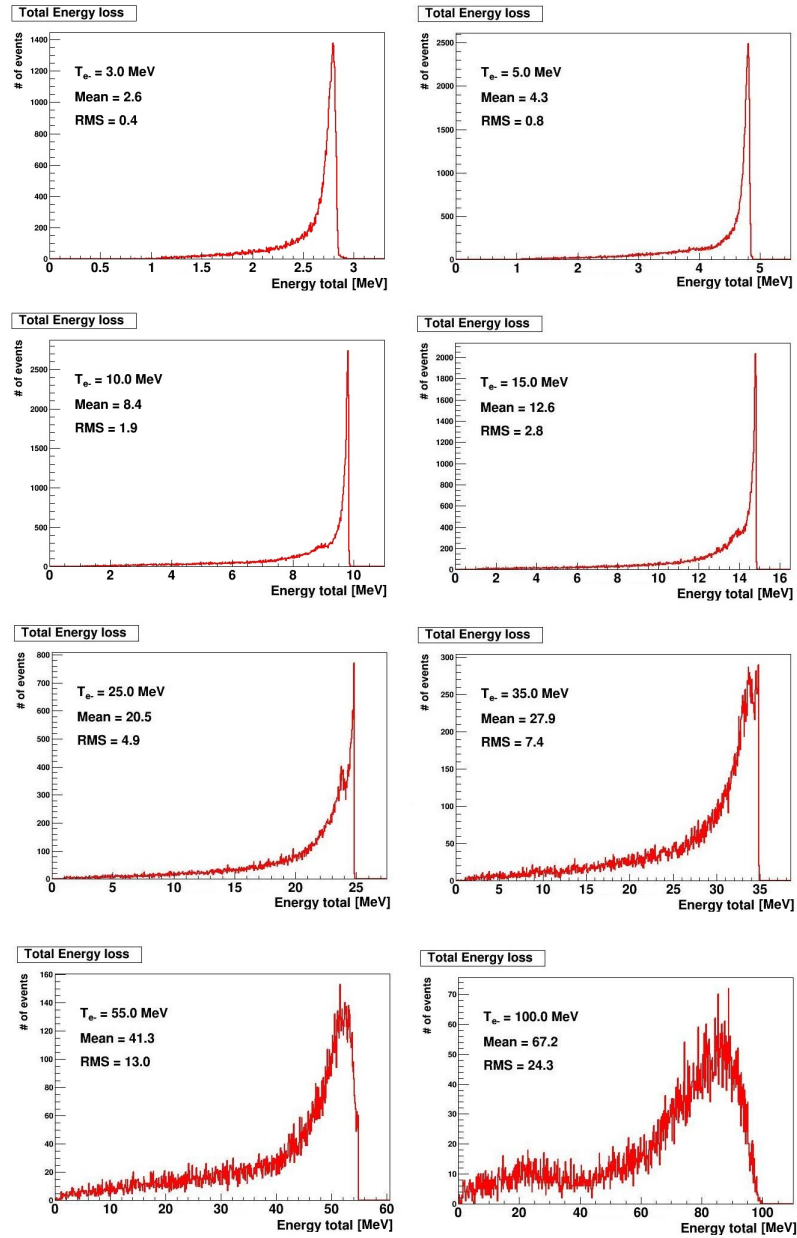


Figura 4.17: Distribuzione dell'energia totale rilasciata all'interno del rivelatore per elettroni.



## 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

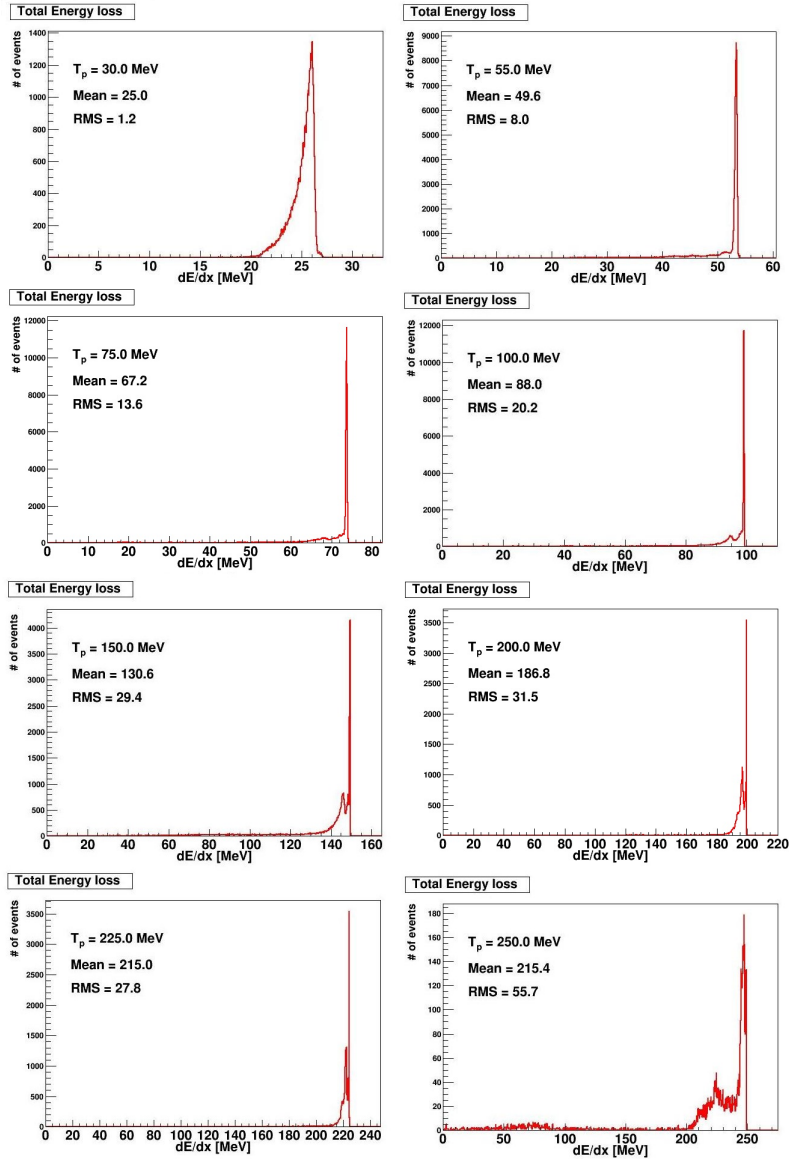


Figura 4.18: Distribuzione dell'energia totale rilasciata all'interno del rivelatore per protoni.

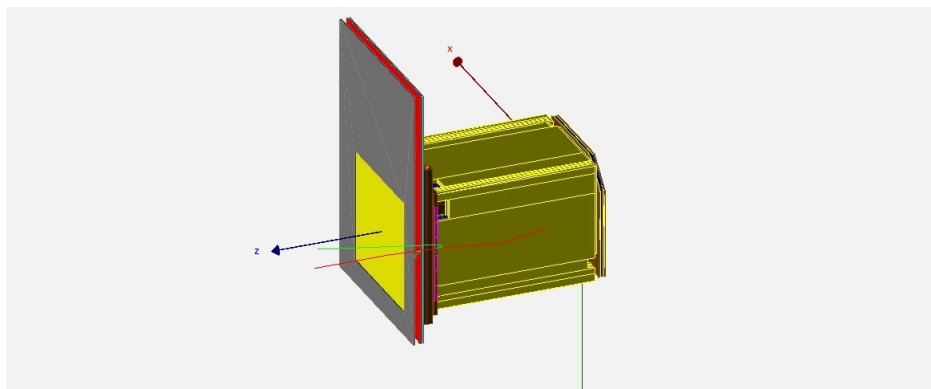


Figura 4.19: Esempio in GEANT4 di *bremsstrahlung* dato da un elettrone (in rosso) che entra nel rivelatore ed interagisce con esso, emettendo un fotone (in verde). Si noti il successivo fenomeno di scattering per il quale l'elettrone cambia direzione.

cui una particella carica pesante interagisce (nel nostro caso, i protoni), è possibile raffigurare tale andamento con in ordinata l'energia rilasciata in un piano del rivelatore ed in ascissa i piani di rivelatore nella sequenza con cui vengono attraversati.

In Figura 4.20 si può vedere un picco di Bragg di un protone di 150 MeV: per bassi spessori, a questa energia, è presente la condizione di minimo di ionizzazione MIP, per cui la particella tende a rilasciare poca energia; incrementando lo spessore attraversato, l'energia rilasciata è maggiore, e aumenta l'energia persa per ionizzazione fino al massimo determinato dal picco.

#### 4.3.6 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 della sua natura.

Grazie allo spessore molto basso dei due semiconduttori, infatti, è possibile operare il metodo di discriminazione conosciuto come  $\Delta E-E$  [52], che si basa sulla formula di Bethe-Bloch e che mostra come, a energie inferiori al minimo di ionizzazione, ogni particella abbia un comportamento diverso.

Il metodo  $\Delta E-E$  consiste sostanzialmente nella ricerca dell'energia persa

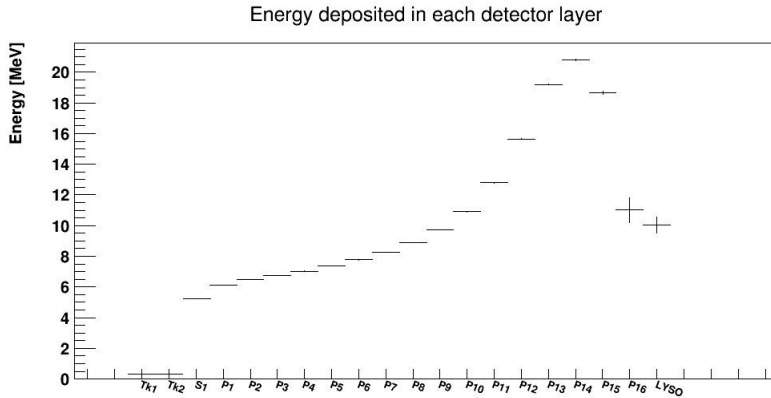


Figura 4.20: Energia depositata da un protone di 150 MeV all'interno del rivelatore. Si può notare il picco di Bragg, caratteristico per particelle cariche pesanti.

in un piccolo spessore in funzione dell'energia totale persa all'interno dello strumento.

Grazie a tale metodo, infatti, è possibile ottenere graficamente l'andamento illustrato in Figura 2.19 (Capitolo 2).

Nella Figure 4.21 e 4.22 sono presentati gli istogrammi che hanno in ordinata l'energia rilasciata nel tratto di piccolo spessore di un semiconduttore al silicio, mentre in ascissa l'energia totale rilasciata, cioè in prima approssimazione, l'energia della particella. L'asse Z (raffigurato da una variazione di colore dal blu al rosso) contiene il numero di particelle misurato.

Come si può notare confrontando i due istogrammi bidimensionali (Figura 4.23), l'andamento del rilascio energetico per elettroni e per protoni è differente, e le due particelle presentano distribuzioni abbastanza separate eccezion fatta per la regione compresa tra 5 e 20 MeV di energia totale persa. 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.

Si vuole studiare a questo punto quale sia la contaminazione protonica nel campione elettronico in modo da definire un taglio nel campione di elettroni in grado di ridurre tale contaminazione. Il motivo per cui ci si occupa del rumore dovuto al segnale dei protoni in quello elettronico, e non viceversa, è legato

### 4.3 Analisi della simulazione

---

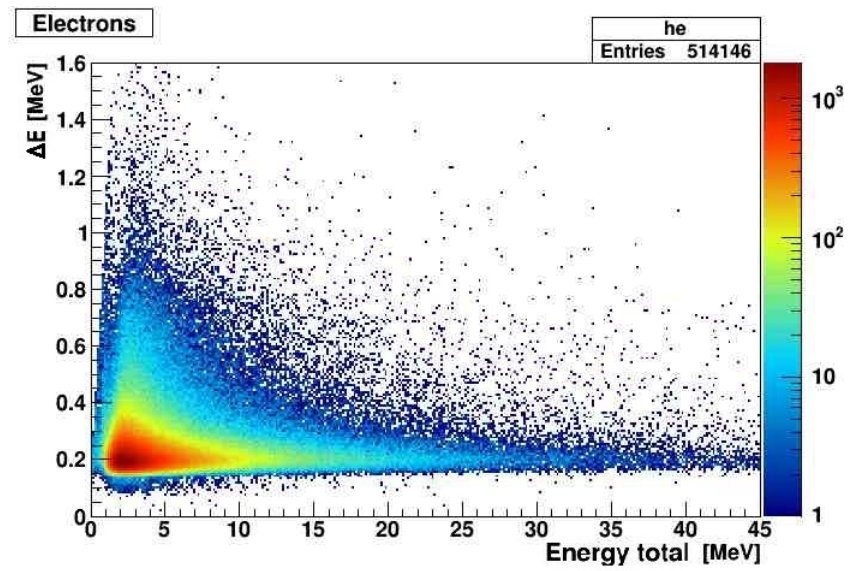


Figura 4.21: Energia rilasciata dagli elettroni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore.

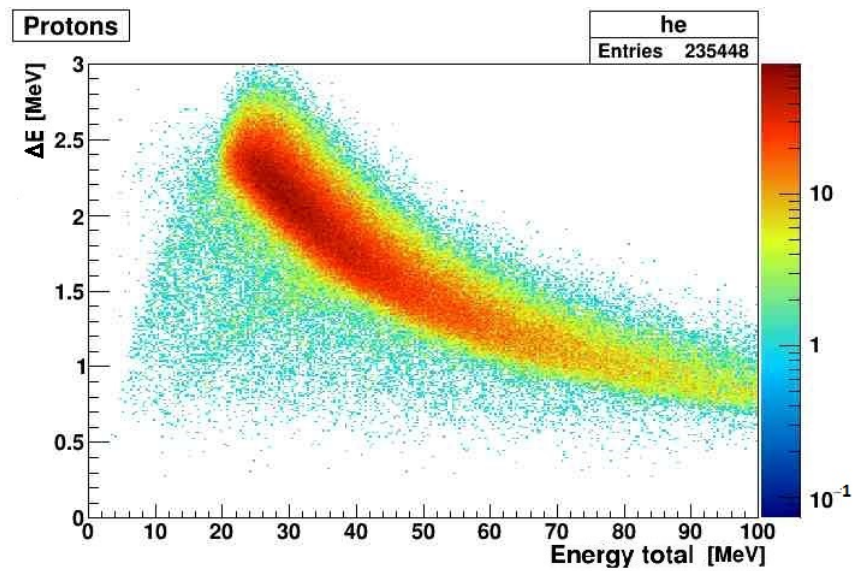


Figura 4.22: Energia rilasciata dai protoni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore.

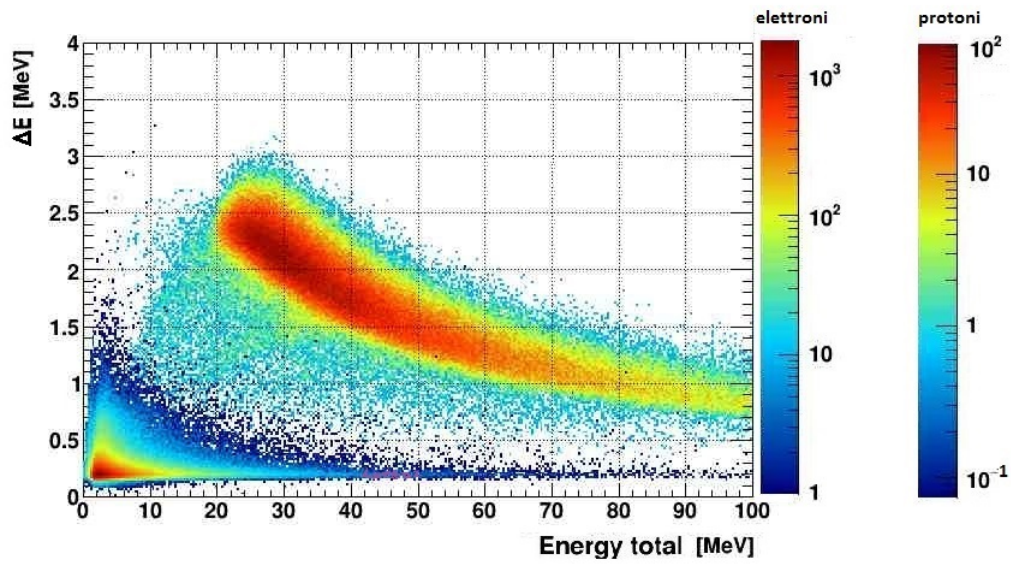


Figura 4.23: Energia rilasciata dagli elettroni e dai protoni nel piano di silicio in relazione a quella rilasciata nella totalità del rivelatore. Si tenga conto della differenza nell'ordine di grandezza del colore associato al numero di particelle, come riportato nella legenda a destra.

### 4.3 Analisi della simulazione

al fatto che sono questi ultimi ad essere maggiormente disturbati, visto che il rivelatore è continuamente investito da raggi cosmici, la cui composizione è data prevalentemente da protoni.

Col fine di effettuare tale studio, sono stati implementati tre tagli selezionando, per ogni bin di energia, il valore di energia rilasciata nel semiconduttore rispetto a quella totale per il quale si ha il 90%, 95% e 99% di elettroni (Figura 4.24).

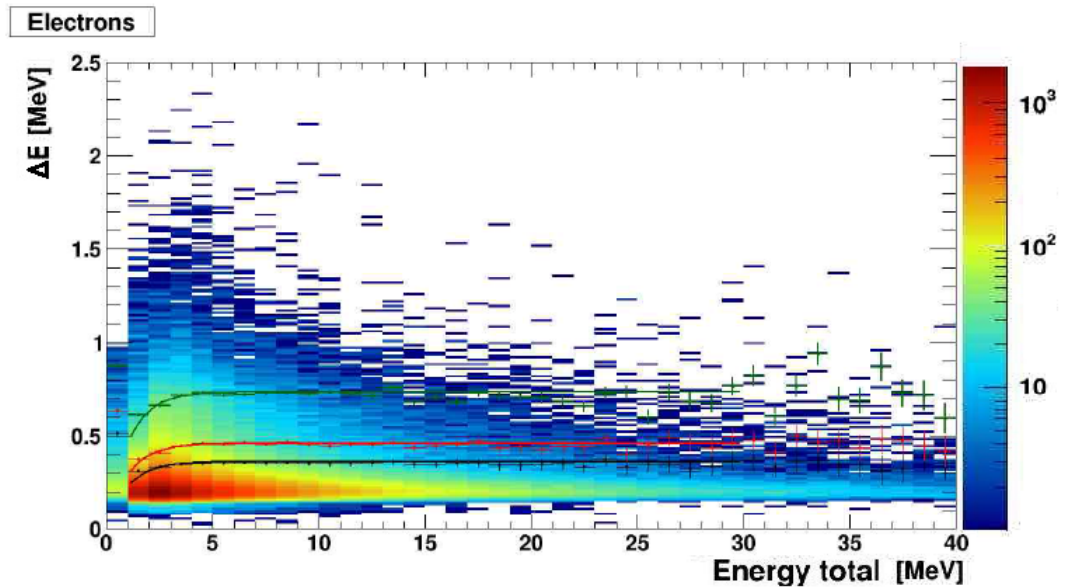


Figura 4.24: I tagli di selezione operati sul segnale elettronico: in colore *nero*, quella al 90%, in colore *rosso*, quella al 95%, in colore *verde*, quella al 99%.

Si sono andati poi a valutare le quantità di protoni che sopravvivono al taglio (Figure 4.25, 4.26 e 4.27): essendo questo numero molto piccolo, è stato scelto il taglio di selezione degli elettroni al 99% per ridurre la quantità di elettroni rimossa. In Tabella 4 si può osservare il numero di elettroni e di protoni che sopravvivono al taglio al 99% per differenti valori di energia, ed il rapporto tra i due. Come si può vedere per energie fino a 15 MeV di energia totale persa nel rivelatore, 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. Fino a 50 MeV la

## 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

contaminazione di protoni nel campione di elettroni è comunque inferiore all'1%.

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	$10^{-1} - 1$

Tabella 4: Rapporto tra il numero di protoni e quello di elettroni riscontrato in una certa fascia energetica.

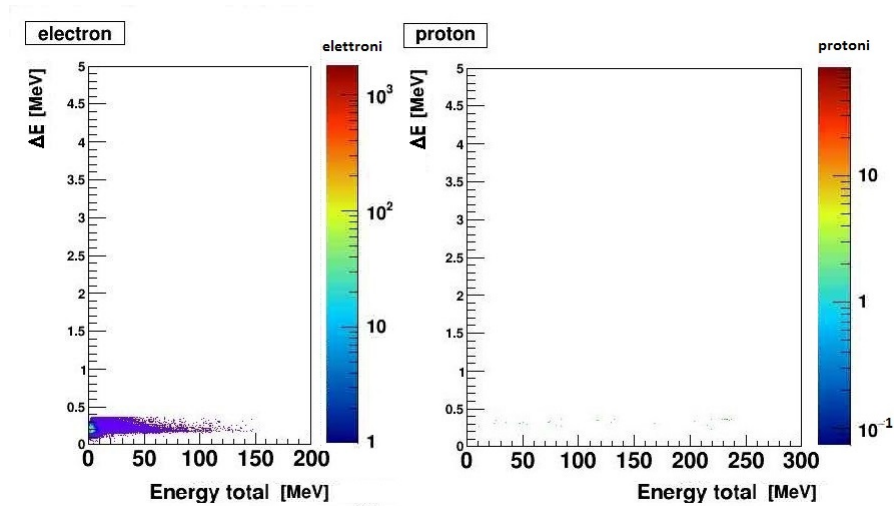


Figura 4.25: Quantità di elettroni (a sinistra) e protoni (a destra) che sopravvivono al taglio al 90%.

### 4.3.7 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

### 4.3 Analisi della simulazione

---

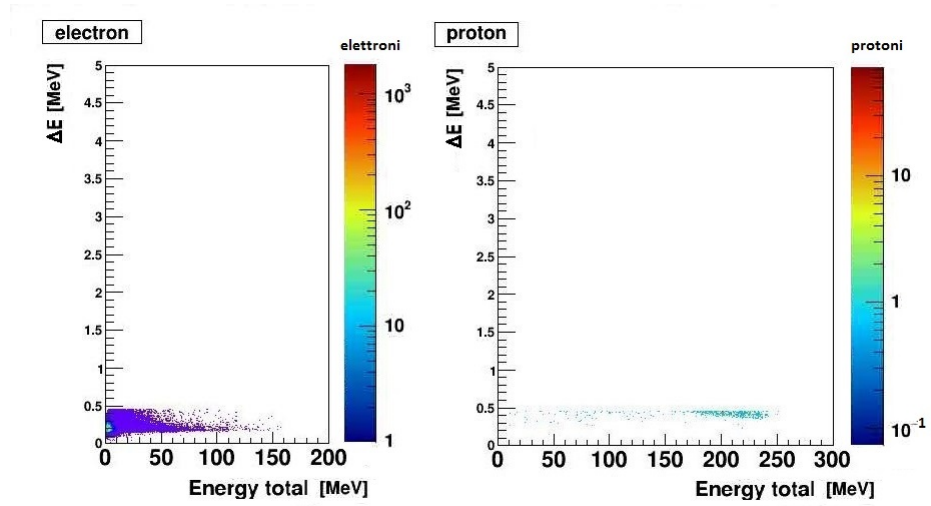


Figura 4.26: Quantità di elettroni (a *sinistra*) e protoni (a *destra*) che sopravvivono al taglio al 95%.

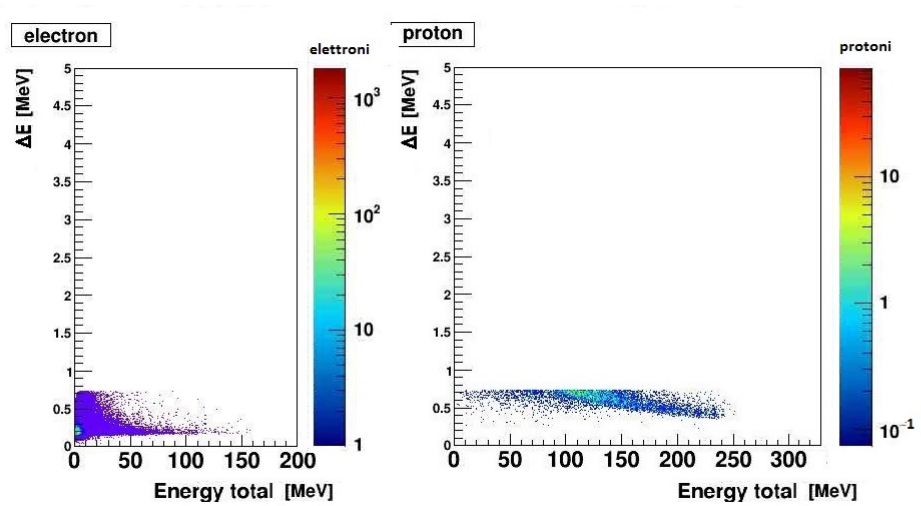


Figura 4.27: Quantità di elettroni (a *sinistra*) e protoni (a *destra*) che sopravvivono al taglio al 99%.



di trigger, nell'ipotesi di poterla variare: per utilizzare come trigger anche alcuni piani del calorimetro infatti, bisogna conoscere l'energia necessaria che una particella deve avere per raggiungere tali piani.

Questa analisi è stata condotta con i dati ricavati dalla simulazione con energie con spettro in legge di potenza perché è necessario coprire tutto lo spettro energetico.

Negli istogrammi (Figure 4.28 e 4.29) si può vedere il numero 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 alcuni piani degli scintillatori del calorimetro.

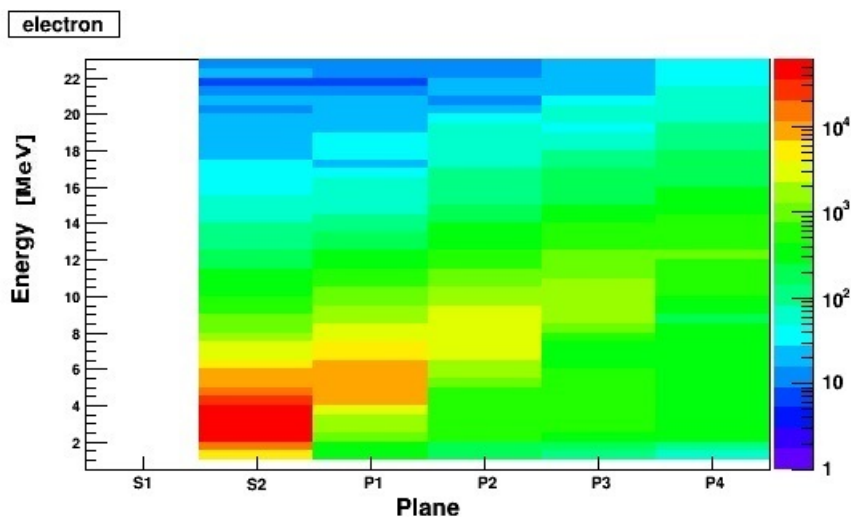


Figura 4.28: Il colore indica il numero di elettroni che si fermano nel piano rappresentato in ascissa con energia iniziale rappresentata in ordinata.

Come si può osservare nelle Figure 4.30 e 4.31, la frazione di elettroni e di protoni, rispetto a quelli generati, che rientra in questa categoria, etichettata come *triggered*, varia con l'energia. Per elettroni, a basse energie ( $E < 3$  MeV) la frazione di elettroni generati che supera condizione di *good hit* è molto piccola. Di questa frazione, la quasi totalità di elettroni si ferma sul secondo piano del Trigger, come facilmente intuibile. All'aumentare dell'energia degli elettroni, la percentuale di quelli che danno eventi validi aumenta, poiché è

### 4.3 Analisi della simulazione

---

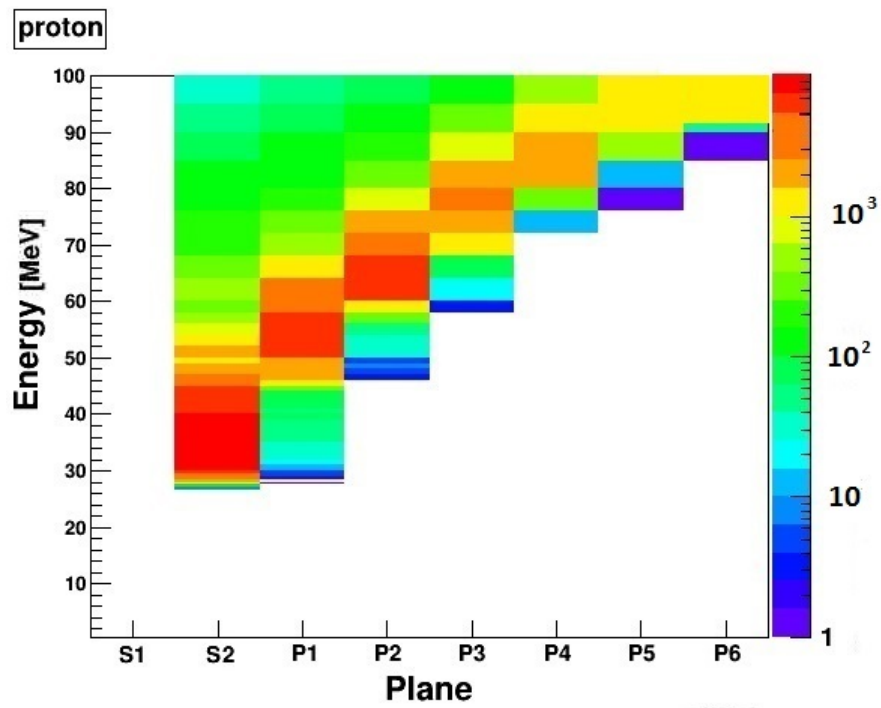


Figura 4.29: Il colore indica il numero di protoni che si fermano nel piano rappresentato in ascissa con energia iniziale rappresentata in ordinata.

più probabile il superamento dei piani di Trigger, fino a circa 10-15 MeV: oltre queste energie, comincia ad essere però influente il segnale perso per via di interazioni col VETO, per cui la frazione degrada.

Per quanto riguarda i protoni, la percentuale di particelle che superano la condizione di *good hit* è costante per energie fino a 70 MeV circa, degrada in seguito a causa delle interazioni col VETO. Si può notare che per energie di 40 MeV, la quasi totalità dei protoni si ferma sul secondo piano del Trigger e che solo da 50 MeV in poi, la frazione di protoni che si ferma su un piano del calorimetro inizia ad essere rilevante.

Ad energie maggiori, per entrambe le particelle, successivi piani sono via via interessati dalla fine del tragitto per la particella.

### 4.3.8 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 esser valido e da analizzare rispetto ad uno 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 eventi al secondo che il rivelatore deve processare. Poiché in volo la fase di processamento di un evento richiede del tempo, dell'ordine dei millisecondi, 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 condizione è poco stringente, lo strumento dovrà processare un gran numero di eventi e potrebbe non essere in grado di gestirli tutti. Al contrario, una condizione di trigger troppo stringente, potrebbe far sì che il numero di eventi considerati validi sia molto basso, con una notevole perdita di eventi utili e quindi una grande perdita statistica.

Inoltre, questo studio sulla configurazione del trigger è di estrema utilità poiché sarà prevista la possibilità di variare tale condizione durante la fase in volo: è possibile che, una volta che il satellite sarà in orbita e avuti i primi

### 4.3 Analisi della simulazione

---

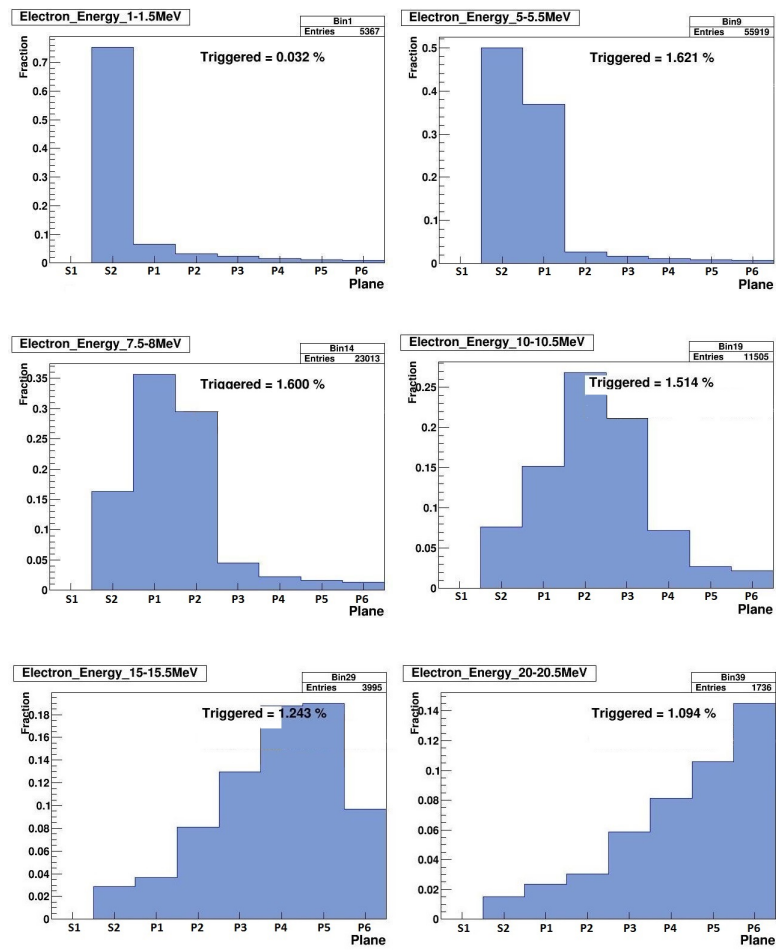


Figura 4.30: Piano interessato dalla fine del tragitto per gli elettroni ad una certa energia.

#### 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

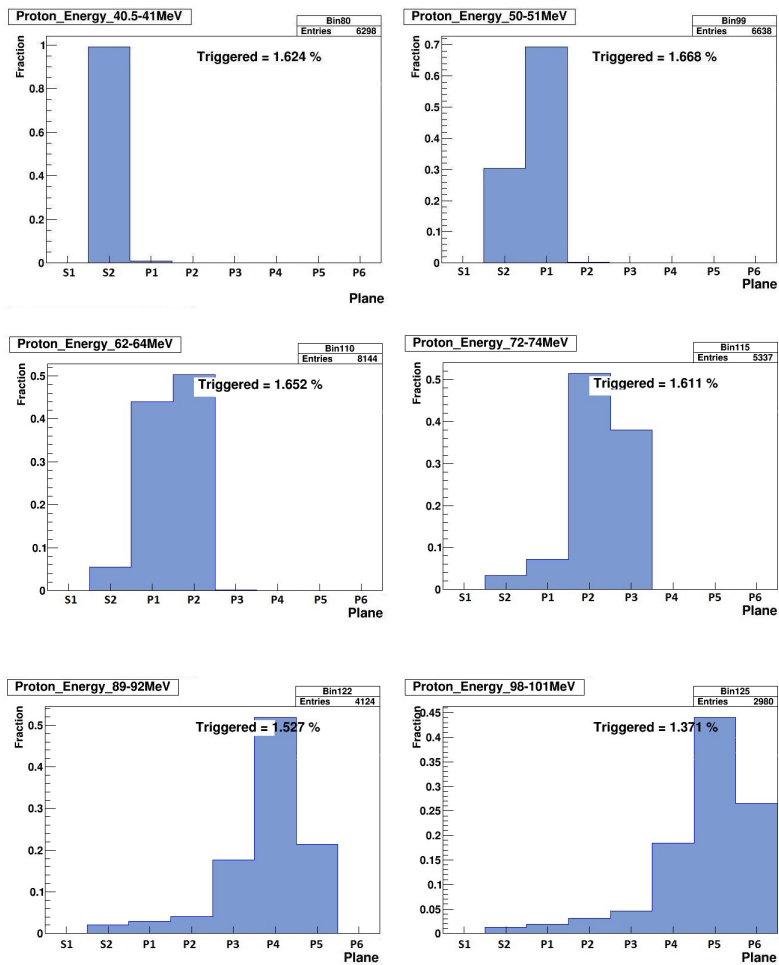


Figura 4.31: Piano interessato dalla fine del tragitto per i protoni ad una certa energia.

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 (Equatore).

Sono state analizzate in particolare quattro diverse configurazioni di trigger, che prevedono il rilascio di energia nei due piani del Tracker e nei piani in seguito riportati:

- Configurazione 1: S1 & S2;
- Configurazione 2: S1 & S2 & P1;
- Configurazione 3: S1 & (S2 | P1);
- Configurazione 4: i due moduli centrali di S1 & (S2 | 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  $< 5$  MeV, energia protoni  $< 45$  MeV) e quindi diminuire il *data rate*. La configurazione 3 è stata prevista nel caso in cui i fotomoltiplicatori, che sono oggetti molto delicati, dello scintillatore S2 vengano danneggiati e cessino di funzionare: se ciò avvenisse, sarebbe infatti necessaria una configurazione alternativa del trigger per poter decretare la validità di un evento. 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 4 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, a causa della richiesta di un rilascio energetico in un ulteriore piano, e quindi scarta le particelle che

non hanno sufficiente energia per poter arrivare allo scintillatore P1; la configurazione 4 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 configurazione pone un numero di eventi scartati maggiore rispetto alla prima, poiché a differenza della prima riduce l'accettazione a tutte le energie.

Nelle Figure 4.32 e 4.33, si può notare come le due configurazioni riducano l'accettazione, nel caso degli elettroni e in quello dei protoni. Nel primo caso (configurazione 2, S1 & S2 & P1) si osserva uno *shift energetico* con la curva che si presenta pertanto spostata e leggermente ridotta, a causa di un taglio energetico maggiore rispetto al caso standard, come spiegato sopra; nel secondo caso (configurazione 4, S1<sub>3-4</sub>|S1<sub>4</sub>& (S2 | P1)) si ha lo stesso andamento energetico, con la curva che pertanto si presenta analoga a quella relativa alla configurazione standard, ma essendo diminuito il fattore geometrico è notevolmente ridotto.

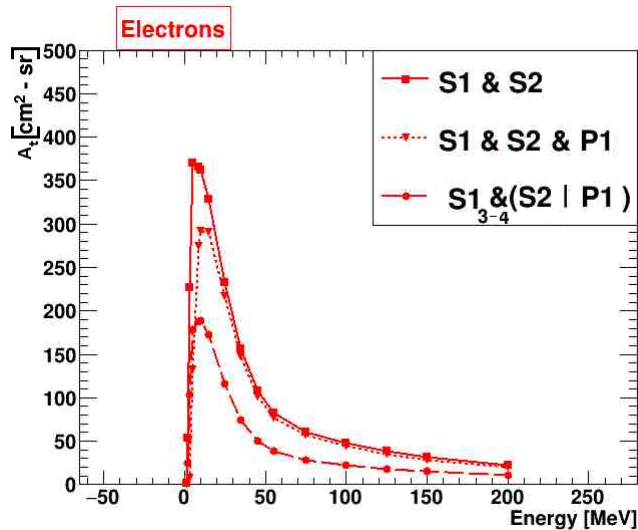


Figura 4.32: Risultati delle varie configurazioni di trigger per elettroni.

Un altro studio è stato poi condotto per osservare quante particelle vengono rimosse dalla richiesta di non interazione nel VETO per le varie configurazioni di trigger.

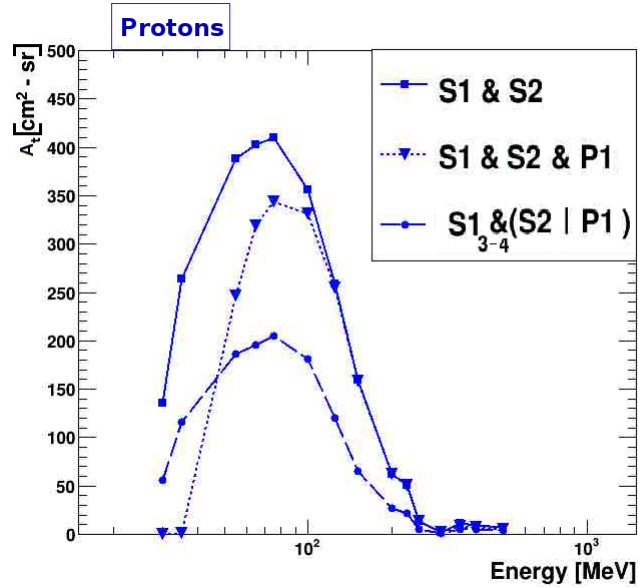


Figura 4.33: Risultati delle varie configurazioni di trigger per protoni.

Nelle Figure 4.34 e 4.35 sono rappresentate le percentuali delle particelle che, soddisfatta 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.

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 70%): ovviamente ciò è dovuto al fatto che molti elettroni hanno direzioni non perfettamente perpendicolari al rivelatore e 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 deduce quindi che, oltre 50 MeV, almeno il 70% della totalità degli eventi che superano la condizione di trigger viene scartato.

Considerazioni analoghe valgono per i protoni, per i quali 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



#### 4. SIMULAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

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 viene confinato e perde la totalità della sua energia all'interno del rivelatore. Si consideri inoltre come siano necessarie energie di almeno 150-200 MeV perché un protone interagisca col VETO finale. Si può concludere che, per i protoni, la richiesta di confinamento fa sì che oltre tale soglia energetica almeno il 70% della totalità degli eventi che superano la condizione di trigger sia scartato.

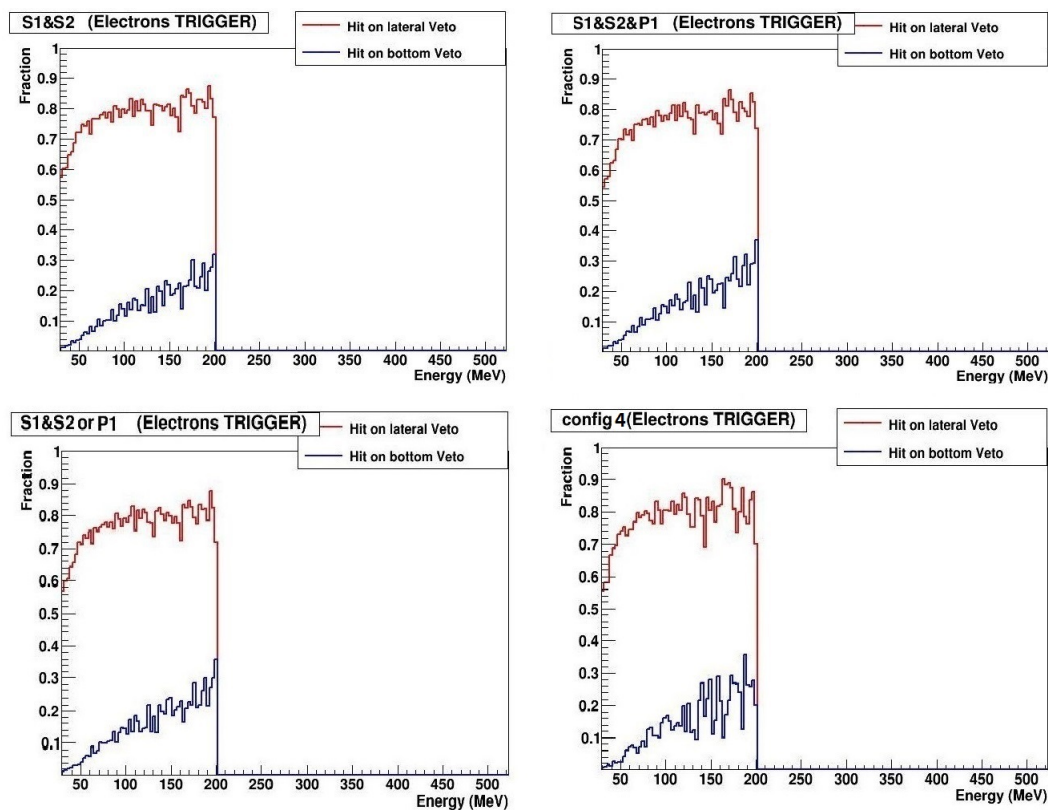


Figura 4.34: Rapporto tra il numero di elettroni che rilasciano energia nei rivelatori di VETO e il numero di particelle totali che soddisfa la condizione di trigger in funzione dell'energia. Tale frazione è mostrata per le varie configurazioni di trigger.

### 4.3 Analisi della simulazione

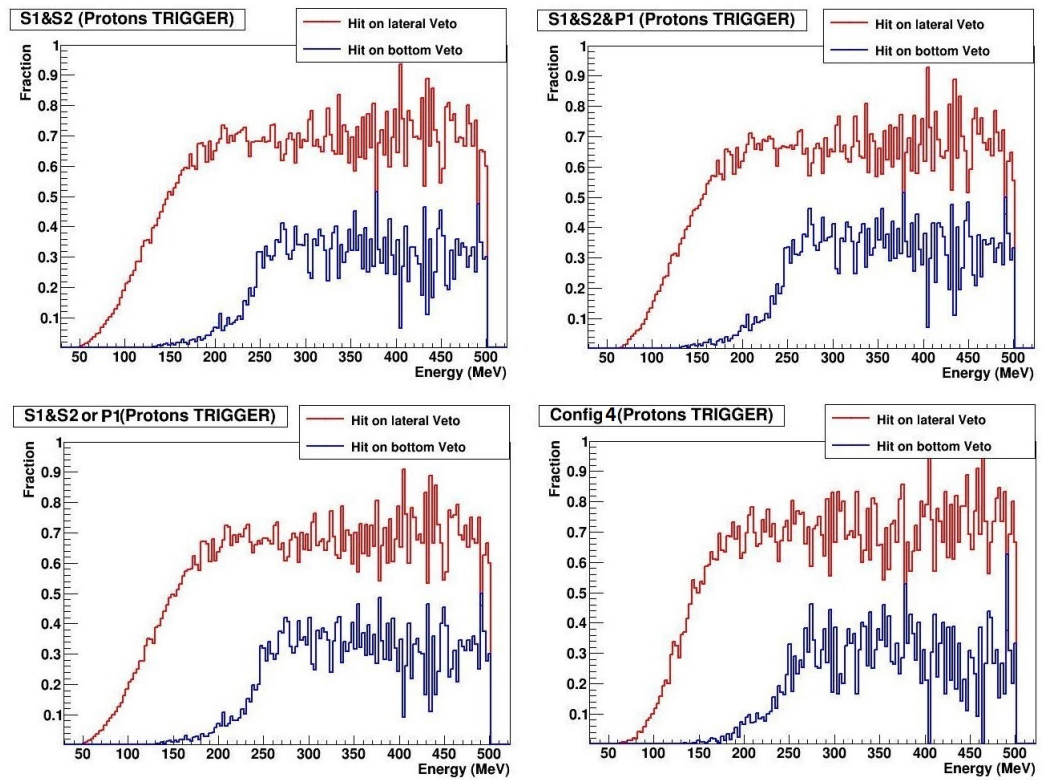


Figura 4.35: Rapporto tra il numero di protoni che rilasciano energia nei rivelatori di VETO e il numero di particelle totali che soddisfa la condizione di trigger in funzione dell'energia. Tale frazione è mostrata per le varie configurazioni di trigger.

## 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 numerose informazioni riguardo allo strumento. Innanzitutto, si ricorda che era richiesta un'alta efficienza di identificazione del tipo di particella ed un'accettanza angolare estesa almeno per  $70^\circ$  del *pitch angle*, oltre che naturalmente un'ottimizzazione del rivelatore per la lettura di elettroni di pochi MeV ( $\sim 5$  MeV) e protoni ad energie più alte (da 50 MeV in poi, con particolare attenzione alle energie comprese tra 100 MeV e 150 MeV), come riportato alla fine del Capitolo 1.

Per quanto riguarda l'accettanza angolare, in tutti i casi analizzati e a tutte le energie considerate per gli elettroni, lo strumento ha dimostrato di esser in grado di misurare particelle ad un *pitch angle* esteso almeno  $70^\circ$ . Tale discorso vale anche per protoni ma solo in un range energetico ridotto tra circa 50 MeV e 150 MeV.

Ne risulta un'accettanza totale massima in corrispondenza dei range energetici di maggior interesse, sia per elettroni che per protoni.

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 ottima, visto che per energie fino a 15 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 studiate diverse configurazioni di trigger per permettere, una volta in volo, l'ottimizzazione della quantità 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 per la sua descrizione nel Capitolo 1, si è presentata nel Capitolo 2 la missione e trattato il rivelatore HEPD, identificando le sezioni di cui è composto ed evidenziando le parti in grado di misurare la radiazione.

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

L'obiettivo della tesi si concretizza nel Capitolo 4, in cui si propongono i dati della simulazione elaborati ed analizzati tramite programmi implementati, da cui emergono le seguenti conclusioni:

- **L'accettanza** del rivelatore HEPD in relazione al *pitch angle*  $\vartheta$  copre un'ampiezza, per gli elettroni, di almeno  $70^\circ$  ad ogni energia, presen-

tando un picco sia per elettroni che per protoni nel range di energia delle particelle che provengono dalle fasce di Van Allen.

- **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, cioè le energie attese per le particelle che precipitano durante il fenomeno di *burst*.
- **L'abilità discriminatoria** del rivelatore HEPD nell'identificare un evento comportato da un'interazione di un elettrone anziché un protone si è mostrata essere ottima.
- **Le varie configurazioni di trigger** analizzate per il rivelatore HEPD sono un buon punto di partenza per definire le modalità operative che il rivelatore potrà avere in volo.

Questa missione spaziale pertanto si candida ad essere di grande 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 ambiti, uno riguardante il rivelatore e la simulazione, l'altro inerente alla missione.

Le geometrie implementate infatti può esser sviluppata ulteriormente realizzandone una ancor più simile a quella di volo ed inserendo quindi oggetti, quali viti e fotomoltiplicatori, che in questo studio non sono stati considerati.

Inoltre, 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.

# 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  $3 \times 3$  di blocchi di scintillatore avvolta in uno strato di  $200 \mu\text{m}$  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. Da quest'ultimo avviene la sottrazione, come si vede più avanti nel codice, della parte del cri-

stallo da quella esterna in teflon. 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,
kXAxis,
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
$\lambda_D$ [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>TNT</i>	Trinitrotoluene (tritololo)
<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>S [MeV/cm]</i>	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>	Fotomoltiplicatore
<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. 2).
- [2] I. Lehmann. *Inner Earth*. 1936, pp. 160–165 (cit. a p. 2).
- [3] N. Oreskes. *Plate Tectonics: An Insider’s History Of The Modern Theory Of The Earth*. 2003, p. 424 (cit. a p. 2).
- [4] E.M. Anderson. “The dynamics of faulting”. In: *Geological Society* 367 (2012), pp. 231–246 (cit. a p. 6).
- [5] T. W. Schlatter. “Atmospheric Composition and Vertical Structure”. In: *AMB Publications* 6 (2009), pp. 21–30 (cit. a p. 9).
- [6] W. Dieminger et al. *The Upper Atmosphere*. 1936 (cit. a p. 12).
- [7] L. Liu et al. “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. 15).
- [8] E. Kazimirovski et al. “Effects on the ionosphere due to phenomena below it”. In: *Surveys in Geophysics* 24 (2003), pp. 139–184 (cit. a p. 16).
- [9] T. Rikitake. “Classification of earthquake precursors”. In: *Tectonophysics* 54 (1979), pp. 293–309 (cit. a p. 16).
- [10] A.L. Hammond. “Earthquake predictions: Breakthrough in theoretical insight?” In: *Science* 180.4088 (1973), pp. 851–853 (cit. a p. 16).

- [11] K. Wang et al. “Predicting the 1975 Haicheng Earthquake”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 96.3 (2006), pp. 757–795 (cit. a p. 16).
- [12] H.F. Reid et al. “The mechanism of the earthquake”. In: *Carnegie Institution* (1910), pp. 1–192 (cit. a p. 17).
- [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. 17).
- [14] S. Akiba et al. *Who Handbook on Indoor Radon*. 2009 (cit. a p. 17).
- [15] D. Ghosh. “Anomalous radon emission as precursor of earthquake”. In: *Journal of Applied Geophysics* 69 (2009), pp. 67–81 (cit. a p. 17).
- [16] N.V. Korovkin. “Model of earthquake triggering due to gas-fluid bubble upward migration”. In: *TERRAPUB* (2002), pp. 187–194 (cit. a p. 18).
- [17] B. Bandyopadhyay et al. “Studies on the Precursors of an Earthquake as the VLF Electromagnetic Sferics”. In: *Earth Physics* 56.9-10 (2010), pp. 1208–1227 (cit. a p. 19).
- [18] 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. 19).
- [19] W.A. Hoppel. “Theory of the electrode effect”. In: *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 29 (1967), pp. 709–721 (cit. a p. 19).
- [20] 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. 19).
- [21] M.B. Gokhberg et al. “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. 22).
- [22] M.B. Gokhberg et al. “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. 22).



- [23] M.B. Gokhberg et al. “Perturbations of the Ionospheric F-Layer Prior to Strong Earthquakes”. In: *Earth Physics* 24 (1989), pp. 254–260 (cit. a p. 22).
- [24] R. Battiston et al. “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. 23).
- [25] V.I. Larkina et al. “Seismicity and seismic hazard forecast by the results of observation of the low frequency noise-like emissions at the altitudes of upper atmosphere”. In: *Vulkanologiya i seismologiya* 6 (1988), pp. 94–102 (cit. a p. 24).
- [26] S.A. Pulinets et al. “The earthquakes prediction possibility on the base of topside sounding data”. In: *IZMIRAN preprint* 32 (1991), p. 25 (cit. a p. 24).
- [27] M. Akhondzadeh et al. “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. 24, 37, 39).
- [28] M.J. Rycroft. “Interactions between whistler 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. 24).
- [29] T. Terada. “On luminous phenomena accompanying earthquakes”. In: *Journal of Earthquakes Research Institute* (1931), pp. 225–255 (cit. a p. 25).
- [30] C.H. Scholtz. “Earthquake prediction: A physical basis”. In: *Science* 181 (1973), pp. 803–809 (cit. a p. 25).
- [31] L. Perrone et al. “Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy”. In: *Annals of Geophysics* 28 (2010), pp. 941–950 (cit. alle pp. 30, 39).

- [32] S.V. Garmash et al. “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. 30).
- [33] L.M. Fishkova et al. “Relationship between night airglow and seismic activity”. In: *Annales Geophysicae* 3 (1985), pp. 679–694 (cit. a p. 30).
- [34] N. Sivadas. “High Energy Particle Bursts as Seismic Precursors”. In: *itmsat* (2010), pp. 1–19 (cit. alle pp. 30, 39).
- [35] 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. 33, 37, 38).
- [36] P. Picozza et al. “High Energy Charged Particle Bursts in the near Earth Space as Earthquake Precursors”. In: *Annales Geophysicae* 21 (2002), pp. 597–602 (cit. a p. 34).
- [37] C. Fidani et al. “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. 34).
- [38] I.R. Dobrovolsky et al. “Estimation of the size of earthquake preparation zones”. In: *Pure and applied Geophysics* 117 (1979), pp. 1025–1044 (cit. a p. 36).
- [39] 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. 37).
- [40] S.A. Pulinets et al. *Ionospheric Precursors of Earthquake*. 2004 (cit. alle pp. 37, 38).
- [41] D. Davidenko et al. “Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit”. In: *Advances in Space Research* (2013), pp. 1–15 (cit. a p. 39).
- [42] A. Massoudi. “Multi-Layer Insulation Fabrication and Resistance on Blanket Surface”. In: *SAE International* (2013) (cit. a p. 44).

- [43] *Wrapping Scintillator Crystals to Optimize Light Collection - Technical Note*. URL: [http://www.sensl.com/downloads/ds/TN-Crystal\\_wrapping.pdf](http://www.sensl.com/downloads/ds/TN-Crystal_wrapping.pdf) (cit. a p. 56).
- [44] *EJ-200. Data sheet*. URL: <http://www.eljentechnology.com/index.php/products/plastic-scintillators/48-ej-200> (cit. a p. 67).
- [45] C.M. Pepin et al. “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. 68).
- [46] *LYSO Cristal*. URL: [http://www.omegapiezo.com/crystal\\_scintillators.html](http://www.omegapiezo.com/crystal_scintillators.html) (cit. a p. 68).
- [47] J. Beringer et al. “Review of Particle Physics”. In: *Physical Review D* 86 (2012), pp. 360–365 (cit. a p. 74).
- [48] *Energy Resolution in Calorimeters*. URL: [http://pcaen1.ing2.uniroma1.it/patera/didattica/fis\\_mod/trasp\\_riv/Glossario/node63.html](http://pcaen1.ing2.uniroma1.it/patera/didattica/fis_mod/trasp_riv/Glossario/node63.html) (cit. a p. 74).
- [49] 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. 75).
- [50] S. Agostinelli et al. “Geant4—a simulation toolkit”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 506.3 (2003), pp. 250–303 (cit. a p. 81).
- [51] D. Casadei. “Direct measurement of galactic cosmic ray fluxes with the orbital detector AMS-02”. 2003 (cit. a p. 107).
- [52] S. Carboni et al. “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. 130).