

Università degli Studi di Milano-Bicocca

Dipartimento di Fisica "Giuseppe Occhialini"

Corso di Laurea Triennale



Analisi spettrale di eventi SEP e stime della dose per missioni interplanetarie

Relatore:

Stefano Della Torre

Candidato:

Stefano Dolci

Correlatore:

Massimo Gervasi

ANNO ACCADEMICO 2024/2025

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Particelle Energetiche Solari (SEP)	1
1.2	Danno da radiazione sull'elettronica	2
1.3	Missione interplanetaria verso Marte	2
1.4	Obiettivi della tesi	2
2	Dati e analisi spettrale	3
2.1	Dati e strumentazione	3
2.2	Selezione 8 eventi SEP	3
2.3	Fit spettrale	3
3	Calcolo della dose SRNIEL	4
3.1	Modello simulazione SRNIEL	4
3.2	Geometrie e modello della sonda	4
3.3	Propagazione delle incertezze	4
3.4	Risultati dosi stimate	4
4	Funzione di trasferimento	5
4.1	Funzione dose-fluenza $D(F)$	5
4.2	Influenza della metrica	5
5	Stime della dose per la missione	6
5.1	Modelli probabilistici SEP	6
5.2	Parametri missionistici	6
5.3	Simulazioni SAPPHIRE	6
5.4	Validazione con missioni reali	6
6	Conclusioni e miglioramenti	7

Bibliografia	8
A Appendice	9

1. Introduzione

Nello spazio interplanetario sono principalmente due le sorgenti di radiazione ionizzante per le sonde spaziali: i raggi cosmici galattici (GCR) e le particelle energetiche solari (SEP). Quest'ultime sono particelle ad alta energia (da KeV fino a GeV), emesse durante eventi di attività solare, principalmente protoni (90% del flusso) ma anche ioni pesanti ed elettroni. Le SEP sono note per avere energie inferiori rispetto ai GCR, ma la natura imprevedibile delle attività solari a loro legate le rende un rischio significativo per le missioni spaziali, soprattutto quelle interplanetarie dove la magnetosfera terrestre non può offrire protezione. Lo scopo di questo elaborato è proprio quello di analizzare in dettaglio alcuni eventi SEP noti nella storia recente e di stimare la dose (TID) che una sonda interplanetaria riceverebbe durante una tipica missione verso Marte.

1.1 Particelle Energetiche Solari (SEP)

La fisica delle SEP è uno dei campi dell'eliofisica, un nuovo termine definito dalla Nasa all'inizio di questo millennio [1] per indicare la scienza del Sole congiunta con i suoi effetti sull'ambiente interplanetario. È una disciplina relativamente giovane, agli inizi degli anni 50' Scott Forbush riportò per la prima volta un evento SEP come un improvviso aumento del flusso di particelle energetiche che raggiungevano le camere a nebbia a terra. In quegli anni si conoscevano come candidati solamente i brillamenti solari, noti come "Flare", ovvero impulsive esplosioni visibili di energia in prossimità della corona solare. Con l'avvento dei satelliti per osservazioni solari, ad oggi sappiamo che esistono due categorie di SEP:

- SEP impulsivi: brevi e intensi aumenti del flusso di particelle, il plasma intrappolato nelle linee di campo chiuse ad arco del Sole viene accelerato verso la superficie e espulso, questi eventi sono legati proprio ai flare.
- SEP gradual: si tratta di eventi più lunghi che si possono estendere per più giorni, sono legati alle espulsioni di massa coronale (CME), quando le linee di campo ven-

gono stirate dal vento solare possono rompersi e il plasma intrappolato viene espulso, le particelle presenti nel tragitto vengono accelerate dall'onda d'urto e guidate verso lo spazio interplanetario.

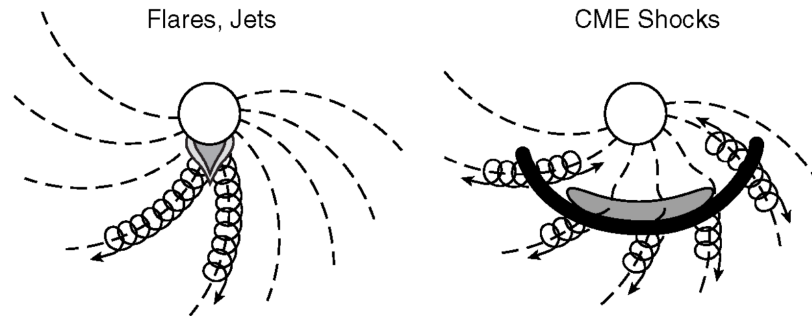


Figura 1.1: Tipologia di eventi SEP, a sinistra evento impulsivo (Flare) a destra evento graduale (CME). Immagine adattata da "Solar Energetic Particles - Reames" [2].

1.2 Danno da radiazione sull'elettronica

1.3 Missione interplanetaria verso Marte

1.4 Obiettivi della tesi

2. Dati e analisi spettrale

Descrizione dei 6 eventi SEP scelti per analisi dettagliata

2.1 Dati e strumentazione

2.2 Selezione 8 eventi SEP

- AUG 1972
- OCT 1989
- OCT 2003
- JAN 2005
- JUL 2012
- SEP 2017
- OCT 2021
- MAY 2024

2.3 Fit spettrale

Satelliti, strumentazione e detector utilizzati Range energetico dei dati Metodi di pulizia e filtraggio dati Durata evento Incertezze Calcolo fluenza e FIT con modelli Eventuali check e confronti letteratura

3. Calcolo della dose SRNIEL

3.1 Modello simulazione SRNIEL

3.2 Geometrie e modello della sonda

3.3 Propagazione delle incertezze

3.4 Risultati dosi stimate

Calcoli dose e propagazione incertezze Modello shielding planare e sferico utilizzati per sonda

4. Funzione di trasferimento

4.1 Funzione dose-fluenza $D(F)$

4.2 Influenza della metrica

5. Stime della dose per la missione

5.1 Modelli probabilistici SEP

5.2 Parametri missionistici

5.3 Simulazioni SAPPHIRE

5.4 Validazione con missioni reali

[3]

6. Conclusioni e miglioramenti

Sintesi dei risultati ottenuti confronto SEP vs GCR Punti critici di queste stime Possibili miglioramenti generali per il lavoro di Tesi

Bibliografia

- [1] NASA. *NASA Official Website*. 2024. URL: <https://science.nasa.gov/>.
- [2] Donald V. Reames. *Solar Energetic Particles: A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation*. Springer, 2020, p. 7.
- [3] C. Zeitlin, D. M. Hassler, F. A. Cucinotta et al. «Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory». In: *Science* 340.6136 (2013), pp. 1080–1084. DOI: 10.1126/science.1235989.

A. Appendice

Materiale aggiuntivo, formule, grafici supplementari.