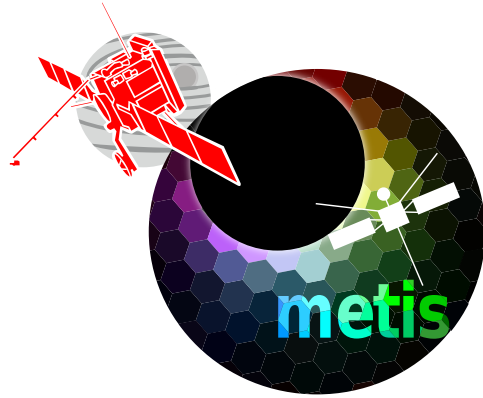


**INAF-Osservatorio astrofisico di Torino**  
*Technical Report nr.170*

Stima della dose rilasciata da protoni interplanetari nel  
polarimetro di METIS

*Michele Fabi*

*Pino Torinese, 24 settembre 2015*



Stima della dose rilasciata da protoni  
interplanetari nel polarimetro di METIS

OATo TECHNICAL REPORT NR. 170

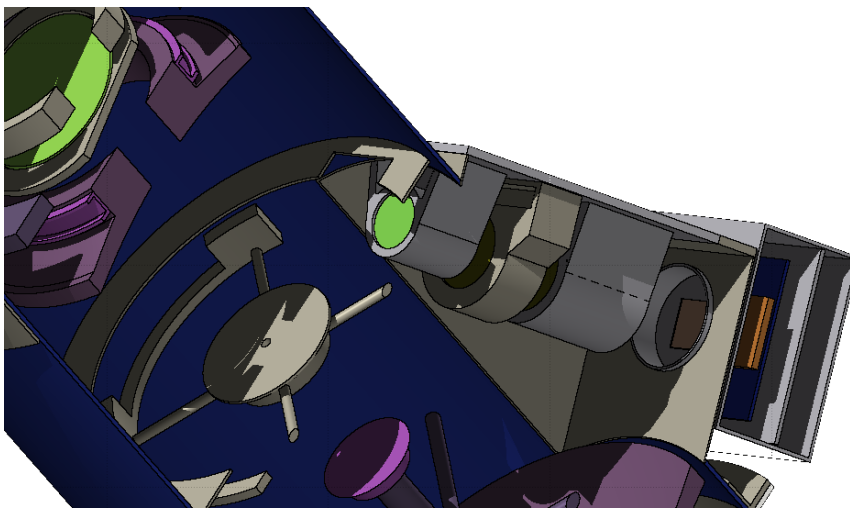
Michele Fabi

24 settembre 2015

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1 Geometria di Metis in Fluka</b>	<b>4</b>
1.1 Generalità di Fluka e geometria combinatoria . . . . .	4
1.1.1 Modellizzazione di METIS . . . . .	5
1.1.2 Modellizzazione del satellite Solar Orbiter . . . . .	6
<b>2 Spettro in energia di protoni durante la missione Solar Orbiter</b>	<b>7</b>
2.1 Modulazione dello spettro di RCG nell'eliosfera interna . . . . .	7
2.1.1 Effetto di <i>Drift</i> dei raggi cosmici all'interno della cavità solare . . . . .	9
2.2 Scelta dello spettro interstellare di protoni . . . . .	9
2.3 Previsioni di SEP e RCG in polarità positiva . . . . .	10
2.3.1 Il modello di Nymmik . . . . .	10
2.4 Protoni interplanetari . . . . .	11
<b>3 Simulazione di METIS in Fluka</b>	<b>12</b>
3.1 Caratteristiche della simulazione . . . . .	13
<b>4 Risultati della simulazione Monte Carlo</b>	<b>14</b>
4.1 Calcolo della dose rilasciata sul polarimetro di METIS . . . . .	14
4.2 Risultati e confronto con stime precedenti . . . . .	14
<b>Conclusioni</b>	<b>15</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>18</b>

## Introduzione



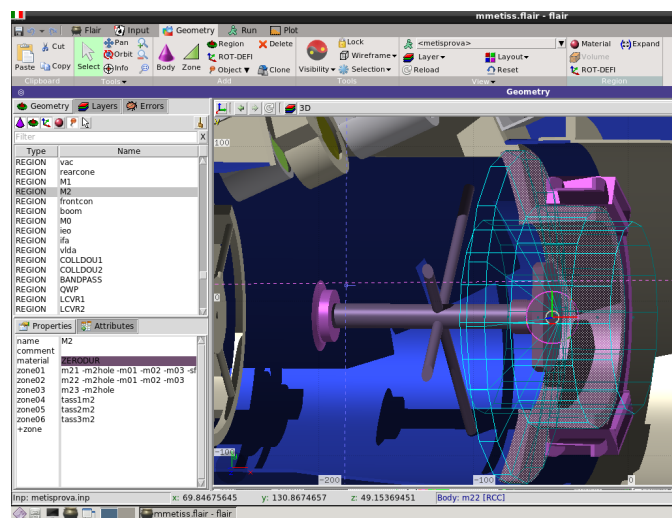
Oggetto di questo studio è stato il calcolo della dose assorbita dal polarimetro del coronografo METIS a bordo del satellite Solar Orbiter con il metodo Monte Carlo. I raggi cosmici di origine galattica e solare, attraversando i satelliti nello spazio, interagiscono e producono particelle secondarie. Le più abbondanti sono i fotoni, ma anche protoni ed elettroni (essenzialmente) rilasciano rilevanti quantità di energia. Abbiamo pertanto stimato la dose totale rilasciata nel polarimetro del coronografo METIS, le cui parti in quarzo e silice fusa risultano sensibili alle radiazioni ionizzanti e tendono ad opacizzarsi. La trasmittanza ne risulta così diminuita da rendere necessario il trattamento con  $\text{CeO}_2$ . Ad esempio il BK7G18 contiene una percentuale di Cerio pari all'1.8 % del suo peso. Alcuni test di irraggiamento su fascio e con sorgenti di  $^{60}\text{Co}$  dimostrano che i danni prodotti dalle radiazioni in termini di perdita di trasmittanza sulle lenti trattate sono notevolmente ridotti. Per la BK7G18 una dose pari a  $10^6$  gray di radiazione gamma riduce la trasmittanza di circa il 2-3 %, mentre per la SF6G05 si arriva quasi al 25 %. Il presente lavoro indica che la dose depositata sull'intero *set* di lenti e filtri del polarimetro durante i 10 anni di missione sarà di circa 2000 Gy.

## Capitolo 1

# Geometria di Metis in Fluka

**Fluka** (FLUktuierende KAskade) [2, 3] è un programma Monte Carlo per il trasporto di particelle elementari primarie e secondarie nella materia. È in grado di simulare circa 60 tipi di particelle con energie che vanno da 1 keV a centinaia di TeV per fotoni ed elettroni e fino a 20 TeV per gli adroni (fino a 10 PeV collegando Fluka al codice DPMJET). Il programma (~680000 righe) è scritto in Fortran e funziona in ambiente Linux. Il *porting* verso altre piattaforme è attualmente in fase di sviluppo.

### 1.1 Generalità di Fluka e geometria combinatoria



**Figura 1.1:** Elementi costruttivi dello specchio M2.

Il pacchetto della geometria in Fluka si basa su una versione modificata e migliorata della Geometria Combinatoria (GC) sviluppata presso ORNL

per il programma MORSE e basata a sua volta sulla geometria combinatoria del gruppo MAGI (Mathematical Applications Group, Inc.).

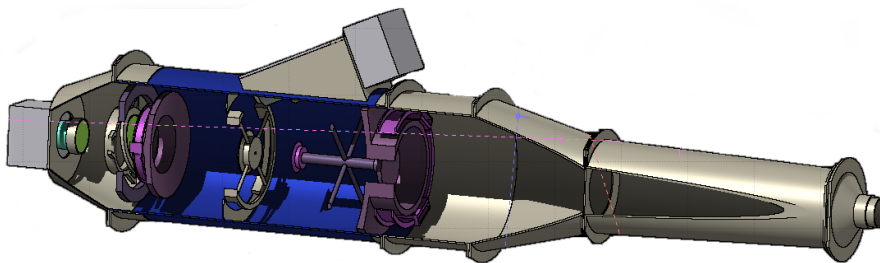
La costruzione di qualsiasi modello geometrico passa per due punti fondamentali:

- due o più oggetti di base (sfere, cilindri, coni, parallelepipedi, ecc.) vengono combinati mediante l'uso dei tre operatori unione, sottrazione e intersezione, per ottenere un *body* finale della forma desiderata.
- Una volta assegnato un materiale, con composizione atomica che rispecchi le caratteristiche reali, ad uno o più *bodies* (collegati attraverso lo operatore unione) l'oggetto finale prende il nome di regione, cioè una porzione di spazio non intersecata da altre regioni e costituita da un materiale omogeneo.

Una regione detta *BlackHole* delimita lo spazio 3D del modello geometrico. Quando una particella entra nel *BlackHole*, il programma smette di seguirla e di calcolarne le interazioni.

Nel corso degli anni sono state sviluppate numerose interfacce grafiche per Fluka, alcune delle quali dedicate alla sola costruzione delle geometrie. In questo lavoro ho utilizzato le due più diffuse, [SimpleGeo](#) sviluppata da Christian Theis (Cern) e [Flair](#) con il plugin *Geometry Editor*, sviluppata da Vasilis Vlachoudis (Cern)<sup>1</sup>. La figura 1.1 mostra un particolare della costruzione dello specchio M2 (parte puntinata) dove le linee azzurre evidenziano gli oggetti di base che lo compongono. Sul pannello di sinistra in basso sono riportati il nome della regione, il materiale assegnato e l'insieme delle operazioni di geometria combinatoria applicate ai *bodies*.

### 1.1.1 Modellizzazione di METIS

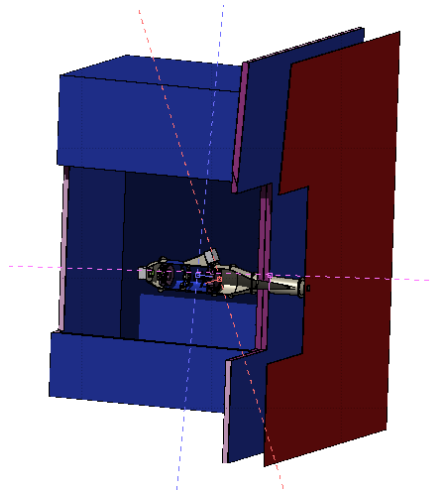


**Figura 1.2:** Il modello geometrico del coronografo Metis.

<sup>1</sup>I miei ringraziamenti vanno ad entrambi gli autori per il supporto tecnico ricevuto attraverso la *Fluka Discuss list*.

La versione attuale del modello di METIS riprodotto nel programma Monte Carlo contiene: *chassis* esterno, IEO, UVDA, IFA, gli specchi M0, M1 ed M2, *field stop*, *Lyot stop*, *internal occulter* e polarimetro con il rivelatore VLDA. I materiali sono fedeli allo strumento reale.

### 1.1.2 Modellizzazione del satellite Solar Orbiter



**Figura 1.3:** Il modello geometrico dell'intero satellite.

Le pareti del satellite sono state realizzate con 4.4 cm di struttura a nido d'ape in alluminio (*Aluminum Honeycomb*) rivestito da un doppio strato di 3 mm di fibra di carbonio (*CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer*) per un totale di 1.2 g/cm<sup>2</sup> di materia, per incidenza normale.

Lo scudo termico di Solar Orbiter è stato simulato da un pannello dello stesso materiale e da un foglio di titanio sul quale è stato depositato del fosfato di calcio. Per il foglio ed il rivestimento sono state assunte come ragionevoli degli spessori di 4 mm e 1 mm, rispettivamente. Parti consistenti del satellite e gli strumenti interni oltre al coronografo sono al momento mancanti.

In generale ho scelto di non includere parti di cui non sono riuscito a trovare descrizioni riguardo alle dimensioni e/o i materiali.

La distribuzione della massa intorno al coronografo è di fondamentale importanza perché influisce sulla produzione di particelle secondarie che colpiscono lo strumento e funge allo stesso tempo da schermo, operando un taglio in energia ( $E$ ) sui protoni entranti con  $E < 10$  MeV e sugli elettroni con  $E < 1$  MeV.

A questo scopo è stato realizzato un modello estremamente semplificato del satellite Solar Orbiter avendo soltanto informazioni frammentarie su dimensioni e materiali per lo più ricavate da ricerche in rete.

Le pareti del satellite sono state realizzate con 4.4 cm di struttura a nido d'ape in alluminio (*Aluminum Honeycomb*) rivestito da un doppio strato di 3 mm di fibra di carbonio (*CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer*) per un totale di 1.2 g/cm<sup>2</sup> di materia, per incidenza normale.

## Capitolo 2

# Spettro in energia di protoni durante la missione Solar Orbiter

La stima dello spettro dei raggi cosmici galattici (RCG) per il periodo in cui Solar Orbiter sarà in orbita è stata ottenuta utilizzando il modello di Gleeson & Axford [5], mentre per la previsione degli eventi di particelle energetiche solari nello stesso periodo abbiamo utilizzato il modello di Nymmik [11, 12]. Per la simulazione dei protoni interplanetari di bassa energia è stato utilizzato lo spettro stimato da Jiggins & Cipriani [9].

### 2.1 Modulazione dello spettro di RCG nell'eliosfera interna

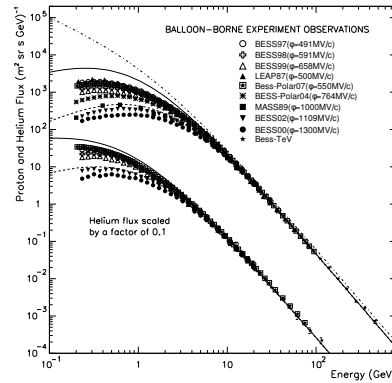
Il modello di Gleeson & Axford, in the *Force field Approximation* è riportato nella equazione (2.1). Questo permette di correlare uno spettro interstellare ad uno calcolato all'interno della eliosfera ad una distanza arbitraria  $r$  dal Sole ed un tempo dato  $t$ .

$$\frac{J(r, E, t)}{E^2 - E_0^2} = \frac{J(\infty, E, \Phi)}{(E + \Phi)^2 - E_0^2} \quad (2.1)$$

Lo spettro differenziale è calcolato in  $(r, E, t)$  e al mezzo interstellare in  $(\infty, E, \Phi)$ , dove  $E$  è l'energia totale della particella,  $E_0$  la sua massa a riposo e  $\Phi$  rappresenta la perdita di energia della particella dal mezzo interstellare al punto di osservazione.

A scopo di esempio, la figura 2.1 tratta da [8] mostra la previsione degli effetti della modulazione solare per gli anni 2015-2016, a cui viene fatto corrispondere un intervallo di valori per il parametro  $\Phi$  di estremi 350 - 800 MV/c. Le linee continua e tratteggiata rappresentano i livelli di minima e

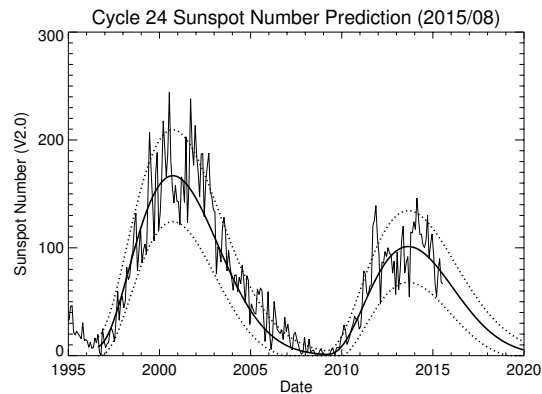




**Figura 2.1:** Il livello di RCG atteso per il periodo 2015 - 2016 sulla base dello spettro interstellare di Shikaze et al.

massima attività solare, rispettivamente, mentre la linea a punti e trattini rappresenta lo spettro interstellare stimato da Shikaze et al. sulla base dei dati raccolti dallo spettrometro magnetico BESS, durante una serie di voli su pallone effettuati sotto differenti condizioni di modulazione e polarità solari. Questi dati hanno consentito di verificare che il modello di Gleeson & Axford permette di riprodurre l'andamento di dati osservati vicino alla Terra in condizioni di polarità positiva del campo magnetico solare, ossia quando le linee di campo magnetico escono dal polo Nord.

Le previsioni dei flussi di RCG e di SEPs, sono basate sul numero di macchie solari (SSN) utilizzato come *proxy*. Sfortunatamente le previsioni di SSN



**Figura 2.2:** Andamento delle macchie solari in funzione del tempo durante gli ultimi due cicli solari [1].

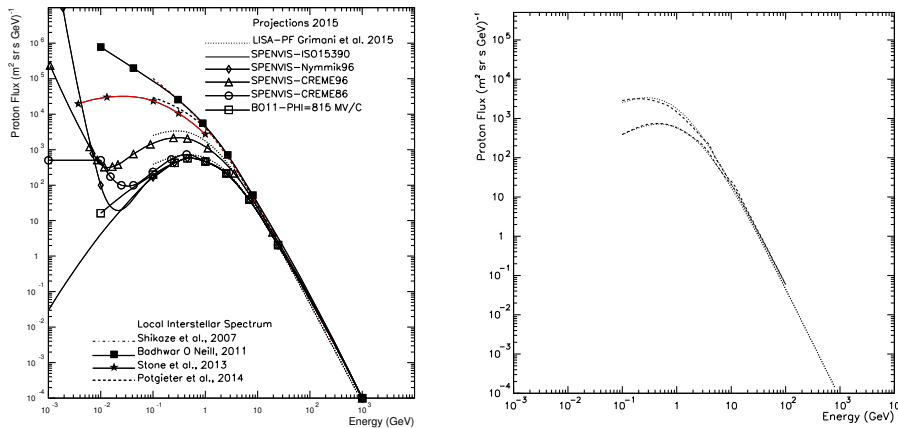
risultano affidabili solo entro la fine di questo ciclo solare (figura 2.2), quindi nell'intervallo 2015-2020. Ciò limita la possibilità di produrre previsioni di spettri in energia di RCG e SEPs per l'intero periodo della missione So-

lar Orbiter ad oggi. Nuove proiezioni verranno effettuate man mano che il numero di SSN verrà stimato con maggiore affidabilità.

### 2.1.1 Effetto di *Drift* dei raggi cosmici all'interno della cavità solare

L'applicazione del modello di Gleeson & Axford in periodi di polarità negativa implica correzioni al modello stesso. Le particelle positive che diffondono dal mezzo interstellare all'interno della cavità solare contro il campo magnetico solare sono sottoposte ad un processo di *drift* per il quale vengono deviate dall'equatore verso i poli. Una trattazione esaustiva del fenomeno è riportata in [7].

## 2.2 Scelta dello spettro interstellare di protoni



**Figura 2.3:** Pannello di sinistra: confronto tra diversi spettri differenziali in energia di protoni al livello del mezzo interstellare locale. Pannello di destra: risultato dell'applicazione del modello di Gleeson & Axford a due modelli a livello interstellare (modello di Shikaze et al. linea a puntini e modello stimato da Voyager 1, linea tratteggiata).

È lecito domandarsi se la scelta di un differente spettro in energia di protoni a livello interstellare possa condurre a delle proiezioni delle intensità differenziali di raggi cosmici diverse. In Figura 2.3 il pannello di sinistra riporta la comparazione di quattro spettri in energia di protoni a livello interstellare, tra i quali lo spettro di Shikaze et al. (linea a punti e trattini) determinato sulla base dei dati dello spettrometro magnetico BESS e quello misurato dalla sonda Voyager 1 (linea continua con stelle). Il pannello di destra mostra come l'applicazione del modello di Gleeson and Axford ai due spettri porti a dei risultati molto simili facendo variare l'intervallo del parametro  $\Phi$  da 350-800 MV/c a 220-640 MV/c. Questo risultato è accettabile

in quanto il parametro  $\phi$  è legato al coefficiente di diffusione  $k$  dalla relazione:

$$k(r, t) = \frac{k_0}{V_S} \beta P \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] / \phi(t) \quad (2.2)$$

dove  $V_S$  è la velocità del vento solare in km/s,  $r$  la distanza dal Sole in AU,  $t$  il tempo in anni e  $k_0$  la costante di diffusione che vale  $1.6 \times 10^{21} \text{ cm}^2\text{s}$ ,  $P$ , infine, la rigidità della particella.  $r_0$  è impostato arbitrariamente a 4 unità astronomiche. Dato che  $k_0$  è altrettanto arbitrario,  $\phi$  (il parametro di modulazione solare, che sopra 100 MV/c di rigidità viene fatto corrispondere a  $\Phi$ ) può essere opportunamente scalato.

## 2.3 Previsioni di SEP e RCG in polarità positiva

La Tabella 2.1 e la Figura 2.4 riportano le nostre previsioni per gli spettri in energia dei raggi cosmici galattici e degli eventi legati alle particelle solari di alta energia con i corrispondenti intervalli del parametro  $\phi$  entro i primi 3 anni di missione di Solar Orbiter.

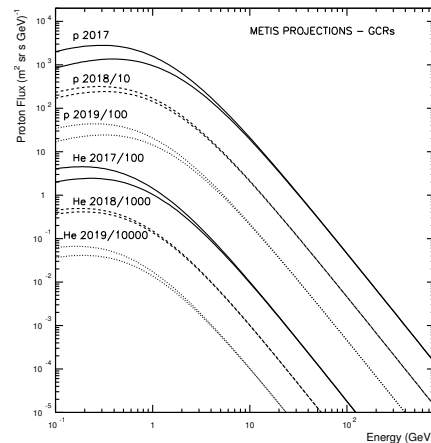
I valori del parametro di modulazione solare  $\phi$  riportati in Tabella 2.1 sono stati stimati sulla base del lavoro di Usoskin et al. [15] dove questo parametro è riportato dal 1936 al 2009. Abbiamo scelto valori di  $\phi$  minimo e massimo in condizioni simili di modulazione solare osservate nel passato.

### 2.3.1 Il modello di Nymmik

Le previsioni di SEPs riportate in Tabella 2.1 sono ricavate dal modello di Nymmik, [eq. (2.3)] che correla il numero di *sunspots* al numero di eventi di SEPs e consente di calcolare anche i flussi di picco di ciascun evento assumendo che la distribuzione della fluensa delle SEPs segua un andamento a legge di potenza con un decremento esponenziale per grandi fluense. Si veda in proposito [6].

$$N_{SEPs} = 0.0694 N_{SS} \quad (2.3)$$

$N_{SEPs}$  è il numero di eventi attesi con fluensa  $>10^6$  protoni/cm<sup>2</sup> con  $E > 30$  MeV. Il modello di Nymmik risulta affidabile entro un fattore due (si veda la figura 5 in [6]).



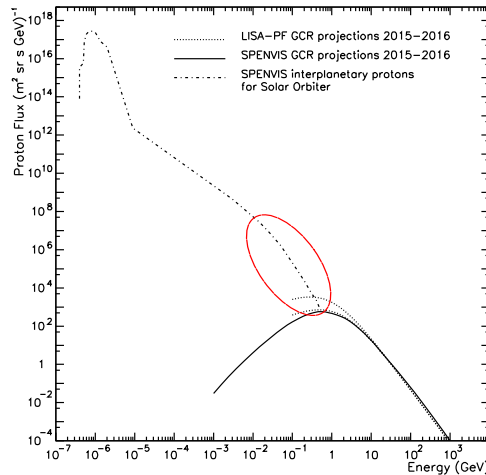
**Figura 2.4:** Proiezioni di protoni ed elio di raggi cosmici per il periodo di volo di Solar Orbiter in polarità positiva.

Year	Sunspots			SEPs			$\phi$ (MV/c)	
	min	avg	max	min	avg	max	min	max
2017	8.3	24.6	40.9	0.6	1.7	2.8	400	600
2018	1.4	13.3	25.3	0.1	0.9	1.8	380	440
2019	0.0	6.3	14.5	0.0	0.4	1.0	310	440
2020	0.0	6.3	14.5	0.0	0.4	1.0	310	440

**Tabella 2.1:** Stima del numero di macchie solari, di eventi di SEPs e corrispondenti intervalli del parametro di modulazione solare stimati durante i primi anni della missione Solar Orbiter.

## 2.4 Protoni interplanetari

Per la simulazione dei protoni interplanetari di bassa energia ho utilizzato lo spettro stimato da Jiggins & Cipriani ricavato dal modello SPENVIS (*SPace ENVironment Information System*) [9]. La figura 2.5 mostra evidenziata in

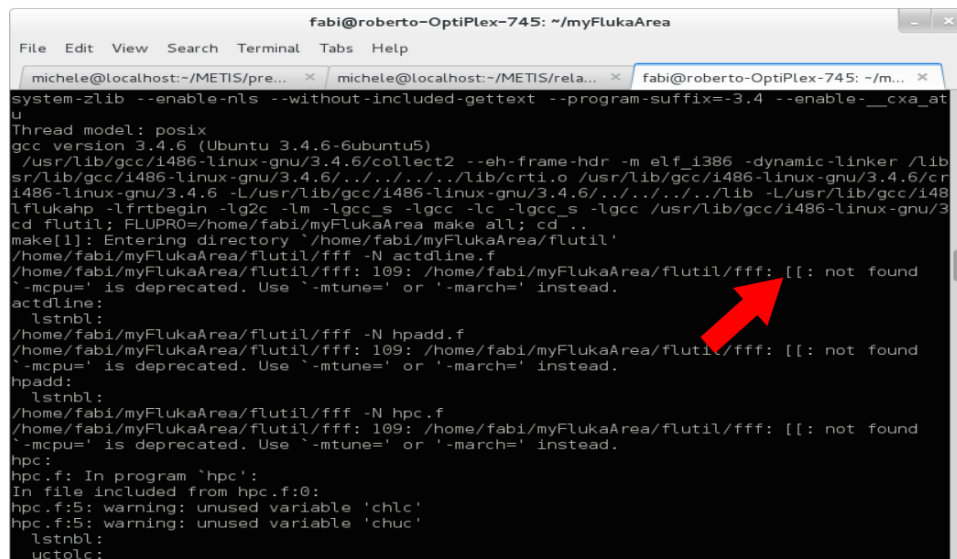


**Figura 2.5:** Flusso di protoni interplanetari stimato da Jiggins & Cipriani mediante SPENVIS [9].

rosso la parte di spettro simulata. Essa è rappresentativa dell'intera durata della missione considerando una distanza media del satellite dal Sole di 0.6 AU. I valori dei flussi di SEPs, determinati a 1 AU, sono stati moltiplicati per un fattore 2.8, in considerazione di una dipendenza dell'intensità da  $1/r^2$ .

## Capitolo 3

# Simulazione di METIS in Fluka



```

fab@roberto-OptiPlex-745: ~/myFlukaArea
File Edit View Search Terminal Tabs Help
michele@localhost:~/METIS/pre... x michele@localhost:~/METIS/rela... x fab@roberto-OptiPlex-745: ~/m... x
system-zlib --enable-nls --without-included-gettext --program-suffix=-3.4 --enable-__cxa_at
u
Thread model: posix
gcc version 3.4.6 (Ubuntu 3.4.6-6ubuntu5)
/usr/lib/gcc/i486-linux-gnu/3.4.6/collect2 --eh-frame-hdr -m elf_i386 -dynamic-linker /lib
sr/lib/gcc/i486-linux-gnu/3.4.6/../../../../lib/crti.o /usr/lib/gcc/i486-linux-gnu/3.4.6/cr
i486-linux-gnu/3.4.6 -L/usr/lib/gcc/i486-linux-gnu/3.4.6/../../../../lib -L/usr/lib/gcc/i48
lflukahp -lfrtbegin -lg2c -lm -lgcc_s -lgcc -lc -lgcc_s -lgcc /usr/lib/gcc/i486-linux-gnu/3
cd flutil; FLUPRO=/home/fabi/myFlukaArea make all; cd ..
make[1]: Entering directory `/home/fabi/myFlukaArea/flutil'
/home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff -N actdline.f
/home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff: 109: /home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff: [: not found
`mcpu=' is deprecated. Use `mtune=' or '-march=' instead.
actdline:
  lstnbl:
/home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff -N hpadd.f
/home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff: 109: /home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff: [: not found
`mcpu=' is deprecated. Use `mtune=' or '-march=' instead.
hpadd:
  lstnbl:
/home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff -N hpc.f
/home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff: 109: /home/fabi/myFlukaArea/flutil/fff: [: not found
`mcpu=' is deprecated. Use `mtune=' or '-march=' instead.
hpc:
hpc.f: In program `hpc':
In file included from hpc.f:0:
hpc.f:5: warning: unused variable 'chlc'
hpc.f:5: warning: unused variable 'chuc'
  lstnbl:
uctolc:
    
```

**Figura 3.1:** Il messaggio di errore che compare in fase di compilazione di Fluka su sistema operativo Ubuntu.

Per il lavoro di simulazione è stato aperto un *account* su [piccino.oato.inaf.it](http://piccino.oato.inaf.it), una macchina con sistema operativo Linux Ubuntu 14.04.2 LTS (Trusty Tahr) su cpu x86\_64 da 3.40GHz, residente presso l'Osservatorio Astrofisico di Torino (OATO).

Sulla macchina ho installato la versione attuale di Fluka, la 2011.2c, a 32

bit basata sul compilatore fortran g77. La scelta era motivata dal fatto che nonostante esista una versione di Fluka basata su un compilatore più moderno, il gfortran, e per architetture a 64 bit, si verificano ancora sporadici malfunzionamenti per questa versione del programma dovuti alle diverse versioni del compilatore. Purtroppo anche la versione basata su g77 presenta dei problemi sulla distribuzione Ubuntu.

L'installazione del compilatore (pacchetto g77-3.4) può essere fatta sia abilitando i *repository* "multiverse" che *offline* da pacchetto .deb. Con entrambi i metodi la procedura di installazione termina correttamente, come pure la compilazione del codice Fluka e di un eseguibile. Alcuni *run* di prova sembrano funzionare perché terminano regolarmente, ma nella finestra di *output* si possono leggere gli errori riportati in Figura 3.1. Il problema potrebbe essere influente, essendo menzionato anche sulla *mailing list* ufficiale di Fluka da almeno un altro utente ([http://www.fluka.org/web\\_archive/earchive/new-fluka-discuss/5904.html](http://www.fluka.org/web_archive/earchive/new-fluka-discuss/5904.html)) senza che appaia risolto (viene risolto un problema diverso), ma per sicurezza ho deciso di continuare le simulazioni sulla macchina di Urbino, phoenix.fis.uniurb.it, che è equipaggiata con sistema operativo Scientific Linux 6.3 (x86\_64) derivato da Red Hat Enterprise Linux (RHEL) ed è esente da problemi di questo tipo poiché lo sviluppo di Fluka è sempre avvenuto su piattaforme Red Hat, che sono quindi maggiormente testate.

### 3.1 Caratteristiche della simulazione

- Ogni simulazione effettuata constava di circa  $6 \cdot 10^6$  protoni. Sono stati simulati i protoni dei RCG al minimo di attività solare e interplanetari per l'anno 2018.
- Di ogni singolo evento è stata registrata su file l'energia totale rilasciata per ogni regione corrispondente ad un elemento sensibile del polarimetro.
- È stato inoltre registrato il processo di attraversamento delle suddette regioni sia in ingresso che in uscita trascrivendo il tipo di particella (anche per i secondari) e la corrispondente energia cinetica.

## Capitolo 4

# Risultati della simulazione Monte Carlo

Particella	Dose
Protoni (RCG $>100$ MeV)	$4.3 \cdot 10^{-6}$ Gy/s (134.7 Gy/anno)
SEPs + Interplanetari ( $<100$ MeV)	$2.2 \cdot 10^{-6}$ Gy/s (67.8 Gy/anno)
<b>Totale</b>	<b><math>6.4 \cdot 10^{-6}</math> Gy/s (202.5 Gy/anno)</b>

**Tabella 4.1:** Stima della dose rilasciata su tutti gli elementi del polarimetro di METIS per la durata totale della missione di 10 anni. Per singoli elementi del polarimetro va considerato approssimativamente un decimo del valore.

### 4.1 Calcolo della dose rilasciata sul polarimetro di METIS

Abbiamo stimato la dose rilasciata dai raggi cosmici galattici ed eventi di SEPs in ognuno degli elementi del polarimetro di METIS. Ricordiamo che la dose in gray equivale all'energia in joule rilasciata da particelle cariche e fotoni per chilogrammo di materia.

### 4.2 Risultati e confronto con stime precedenti

I dati relativi alla dose rilasciata nel polarimetro di METIS sulla base della presente simulazione Monte Carlo sono riportati in Tabella 4.1.

Stime precedenti della dose a bordo del Solar Orbiter appaiono nella presentazione di M. Focardi in [4] e nelle referenze in esso contenute. Il valore della dose per l'intera durata della missione ivi riportato è di 1500 Gy circa considerando 1 mm di alluminio ( $0.27 \text{ g/cm}^2$ ) di materiale schermante. Un

altro lavoro basato su dati riportati in letteratura e ragionevolmente estrapolati in base alle condizioni previste durante la missione Solar Orbiter si trova in D. Telloni et al. [13]. Tale lavoro era basato sui risultati apparsi in [10] e [14]. Per i RCG la dose stimata da Mewaldt [10] et al. varia tra 0.06 e 0.16 Gy/anno, senza materiale schermante. Con 3 g/cm<sup>2</sup> di alluminio e considerando anche l'effetto del corpo umano, la dose equivalente calcolata dagli stessi autori relativamente agli organi interni degli astronauti era di circa 50 cSv/anno. Questo dato risulta anche più basso di quello stimato da Wilson e Cucinotta [16] per una tipica missione su Marte considerando un anno di viaggio e 18 mesi di permanenza sul pianeta. Tale stima in totale era di 114 cSv. La dose stimata per gli eventi di SEPs varia tra 0.6 e 100 Gy/anno secondo lo scenario più favorevole, e tra 81 e 730 Gy/anno nello scenario peggiore. Per questa stima in acqua è stato considerato 1 g/cm<sup>2</sup> di alluminio come materiale schermante.

## Conclusioni

In questo studio sono riportati i risultati preliminari di un lavoro di simulazione con il metodo Monte Carlo sulla stima della dose rilasciata dai raggi cosmici galattici e da eventi di SEPs nel polarimetro del coronografo METIS durante la missione del Solar Orbiter. La dose derivante dai raggi cosmici galattici è risultata più elevata delle stime precedenti mentre quella relativa agli eventi di SEPs è apparsa inferiore. Il valore totale rimane compatibile con le stime precedenti. La spiegazione di tale evidenza potrebbe verosimilmente essere legata alla produzione di particelle secondarie nell'apparato. Poiché l'effettiva distribuzione della materia intorno allo strumento è di fondamentale importanza nella produzione dei secondari che penetrano nel coronografo e negli elementi sensibili del polarimetro, si rende necessaria una verifica del modello geometrico considerato attualmente. Debbono essere rivisti in particolare alcuni dettagli interni della struttura del coronografo METIS e del satellite. Sarebbe inoltre di fondamentale importanza includere nel lavoro di simulazione gli altri strumenti posti a bordo della missione. Il lavoro andrebbe infine completato considerando almeno il ruolo dei nuclei di elio nella dose rilasciata. Per quanto concerne la simulazione delle SEPs dovrebbero essere considerati eventi individuali di opportuna intensità tenendo anche conto della distribuzione spaziale delle particelle solari sia sul piano dell'eclittica che fuori di esso.

## Ringraziamenti

Vorrei ringraziare la Dott.ssa Catia Grimani per i preziosi consigli che mi hanno guidato nella realizzazione di questo lavoro e per averci concesso l'uso della workstation phoenix.fis.uniurb.it per le simulazioni. Ringrazio inoltre Daniele Telloni, Gianalfredo Nicolini e Vincenzo Andretta per l'aiuto e la cordialità dimostrata.



# Bibliografia

- [1] <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>.
- [2] T. T. Böhlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin, A. Fassò, A. Ferrari, P. G. Ortega, A. Mairani, P. R. Sala, G. Smirnov, and V. Vlachoudis. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. *Nuclear Data Sheets*, 120:211–214, June 2014.
- [3] A Ferrari, Paola R Sala, A Fassò, and Johannes Ranft. *FLUKA: A multi-particle transport code (program version 2005)*. CERN, Geneva, 2005.
- [4] M. Focardi. Solar Orbiter/METIS coronagraph Radiation Environment and Analysis. METIS Collaboration Meeting oral presentation, November 2013.
- [5] L. J. Gleeson and W. I. Axford. Solar modulation of galactic cosmic rays. *Ap. J.*, 154:1011–1026, 1968.
- [6] C. Grimani, C. Boatella, M. Chmeissani, M. Fabi, N. Finetti, M. Laurenza, A. Lobo, I. Mateos, and M. Storini. On the role of radiation monitors on board LISA Pathfinder and future space interferometers. *Classical and Quantum Gravity*, 29(10):105001, May 2012.
- [7] C. Grimani et al. Parameterization of galactic cosmic-ray fluxes during opposite polarity epochs for future space missions. In *30th International Cosmic Ray Conference (Merida)*, 2007.
- [8] C. Grimani, M. Fabi, and D. Telloni. Test-mass charging on the future space interferometers: reliability of GCR projections and detector simulation requirements. to be submitted to CQG.
- [9] P. Jiggins and F. Cipriani. SolO-TEC-EES TN1/PJ, 2014.
- [10] R. A. Mewaldt, Davis A. J., W. R. Binns, G. A. de Nolfo, J. S. George, M. H. Israel, R. A. Leske, E. C. Stone, M. E. Wiedenbeck, and T. T. von Rosenvinge. The Cosmic Ray Radiation Dose in Interplanetary Space Present Day and Worst-Case Evaluations. *International Cosmic Ray Conference*, 2:433, 2005.
- [11] R.A. Nymmik. SEP Event Distribution Function as Inferred from Spaceborne Measurements and Lunar Rock Isotopic Data. In *26th Int. Cosmic Ray Conf. (Salt Lake City)*, volume 6, pages 268–271, 1999a.
- [12] R.A. Nymmik. Relationships among Solar Activity, SEP Occurrence Frequency, and Solar Energetic Particle Event Distribution Function. In *26th Int. Cosmic Ray Conf. (Salt Lake City)*, volume 6, pages 280–283, 1999b.



- [13] D. Telsoni, C. Grimani, and M. Fabi. Solar Orbiter: dose from Galactic Cosmic Rays and Solar Energetic Particles. to be submitted to AIP Conf. Proc.
- [14] Lawrence W. Townsend and John S. Neal. A simple method for solar energetic particle event dose forecasting. *Radiation Measurements*, 41(9-10):1136 – 1141, 2006. Space Radiation Transport, Shielding, and Risk Assessment Models.
- [15] I. G. Usoskin, G. A. Bazilevskaya, and G. A. Kovaltsov. Solar modulation parameter for cosmic rays since 1936 reconstructed from ground-based neutron monitors and ionization chambers. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 116:2104, February 2011.
- [16] J. L. Wilson and F.A. Cucinotta. presentation at LWS Radiation Workshop, Washington DC, 2004.