

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "G. GALILEI"  
CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**HIGH ENERGY RADIATION  
IN AEROSPACE TECHNOLOGIES  
AND THEIR BIOLOGICAL IMPACT.**

Relatore: Prof. Alberto Franceschini

Laureando: Mattia Repele  
Matricola: 1099195

Anno Accademico 2016/2017



*“È ammirevole che una scienza, l'astronomia,  
che ha avuto inizio con la considerazione dei casi  
della fortuna debba essere diventata l'oggetto  
più importante della conoscenza umana”.*

*(Pierre Simon Laplace 1749-1827)*



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Radiazione cosmica ad alta energia .....</b>	<b>9</b>
1.1 Origine dei raggi cosmici.....	9
1.2 Processi di accelerazione.....	11
1.3 Cenni alla radiazione non termica .....	14
1.4 Cenni di fisica particellare .....	18
<b>2 Rilevazione dei raggi cosmici .....</b>	<b>23</b>
2.1 Analisi dello spettro di energia .....	23
2.2 Radiazione solare .....	25
2.3 Rilevazione in atmosfera .....	28
2.4 Rilevazione dallo spazio .....	31
<b>3 Effetti biologici della radioattività.....</b>	<b>35</b>
3.1 Misurazione della radioattività.....	35
3.2 Danni biologici .....	37
3.3 Esposizione in atmosfera.....	39
3.4 Esposizione nello spazio .....	42
<b>4 Rimedi tecnologici aerospaziali .....</b>	<b>47</b>
4.1 Danni ai satelliti.....	47
4.2 Single Event Phenomena.....	48
4.3 Effetti dell'alta atmosfera .....	50
4.4 Metodi di protezione .....	54
<b>5 Prospettive e conclusioni .....</b>	<b>57</b>
5.1 Tute spaziali .....	57
5.2 Magnetroni superconduttori.....	59
5.3 Missioni spaziali future .....	60
5.4 Conclusioni .....	63
<b>Bibliografia .....</b>	<b>65</b>



# Introduzione

Dal 1945, dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale, la rivoluzione principale in astronomia, astrofisica e cosmologia è consistita nella possibilità di accedere all'intero spettro elettromagnetico per le osservazioni astronomiche. Questa rivoluzione non sarebbe stata possibile senza lo sviluppo di nuove tecniche e tecnologie utilizzabili da terra e dallo spazio.

Astrofisici e cosmologi hanno tratto enormi vantaggi dall'innovazione di laboratori di fisica e di computer ad alta velocità. Tra i più importanti sviluppi c'è l'astrofisica della radiazione ad alta energia. Con essa è stato possibile scoprire fenomeni in condizioni estreme non riproducibili sulla Terra e sorgenti galattiche ed extragalattiche dalle proprietà totalmente inaspettate.

La presente tesi ha come oggetto i raggi cosmici, particelle altamente energetiche che arrivano in atmosfera fino ad attraversare il nostro corpo dopo aver subito una serie di interazioni con le molecole dell'aria. Questa radiazione ha un notevole impatto in termini di salute e funzionamento efficiente di qualsiasi strumento tecnologico, soprattutto i satelliti meno schermati nello spazio aperto. Per questo motivo i raggi cosmici rappresentano uno dei principali problemi legati alla sopravvivenza dei veicoli spaziali e alla sostenibilità della vita dell'uomo nello spazio nelle future missioni che si stanno progettando nell'immediato futuro. La tesi va quindi ad indagare tre particolari aspetti:

- astrofisico: per una descrizione fenomenologica della radiazione, utilizzando una trattazione fisica dei processi di origine, moti, energie e rilevazioni;
- medico: la caratteristica radioattiva dei raggi cosmici e il loro impatto a livello biologico, il cui danno varia in base alle diverse condizioni dell'ambiente spaziale in cui ci si trova, come analizzato dagli studi della NASA;
- aerospaziale: per ricavare informazioni relative alle problematiche dovute ai malfunzionamenti dei sistemi a causa della penetrazione di queste particelle energetiche per ottenere risultati in termini di protezione dei veicoli spaziali.

Gli argomenti trattati in questa tesi vengono qui presentati suddivisi in cinque capitoli, composti in modo tale da conferire coerenza e rigore logico alla ricerca effettuata.

Nello specifico:

- il primo capitolo, intitolato "*Radiazione cosmica ad alta energia*", cerca di fornire un panorama riguardante l'origine e la composizione dei raggi cosmici (sezione 1.1) con i metodi di accelerazione delle particelle in base alle diverse sorgenti (sezione 1.2). Poi, vengono proposti alcuni cenni alla trattazione della radiazione non termica (sezione 1.3) e delle reazioni che coinvolgono i raggi cosmici in atmosfera (sezione 1.4) per favorire così la comprensione dei capitoli successivi;
- il secondo capitolo, intitolato "*Rilevazione dei raggi cosmici*", riporta l'analisi dei dati riguardanti le energie possedute dalle particelle (sezione 2.1), confrontandole con quelle del vento solare in diverse condizioni legate alla sua attività (sezione 2.2). Segue la descrizione delle principali tecniche utilizzate per rilevare la radiazione ad alta energia con strumenti a terra (sezione 2.3) e nello spazio (sezione 2.4);

- il terzo capitolo, intitolato “*Effetti della radioattività*”, parla del già citato problema della radioattività (sezione 3.1), seguito dagli effetti biologici che i raggi cosmici provocano nell’uomo (sezione 3.2). Questi vengono descritti soprattutto nel caso di esposizioni nelle tratte aeree (sezione 3.3) e ampiamente nel caso degli astronauti nelle missioni spaziali (sezione 3.4);
- nel quarto capitolo, intitolato “*Rimedi tecnologici aerospaziali*”, vengono inizialmente presentate le principali valutazioni per lo studio dell’ambiente spaziale (sezione 4.1), mentre i paragrafi seguenti riportano i danni provocati alla tecnologia dei sistemi aerospaziali, come i satelliti (sezione 4.2), la cui vita è strettamente influenzata all’interazione con le particelle dell’atmosfera e dello spazio (sezione 4.3). Nella parte conclusiva vengono descritte le attuali modalità di protezione dei veicoli in orbita (sezione 4.4);
- il quinto capitolo, intitolato “*Prospettive e conclusioni*”, conclude illustrando le principali iniziative per la protezione dell’uomo nello spazio tramite tute (sezione 5.1) e un nuovo progetto innovativo utilizzando magneti superconduttori che darà un enorme contributo in termini di riduzione dei danni dovuti ai raggi cosmici (sezione 5.2). Successivamente viene riportato il programma NASA previsto per la futura missione su Marte (sezione 5.3), principale argomento discusso nelle conclusioni (sezione 5.4).



# Capitolo 1

## Radiazione cosmica ad alta energia

Dedico ampia parte di questo capitolo alla descrizione astrofisica dei raggi cosmici spiegandone l'origine e la loro propagazione, ossia come le particelle vengono accelerate raggiungendo energie elevate che giungono fino a noi.

Per comprendere le loro proprietà e le tecniche di rilevazione, quest'ultime illustrate nel capitolo seguente, riporto alcuni cenni ai fenomeni non termici ad alta energia la cui teoria di propagazione è strettamente legata ai raggi cosmici. Infine riporto una descrizione della fisica delle particelle in gioco nelle interazioni quanto-relativistiche.

### 1.1 Origine dei raggi cosmici

La **radiazione cosmica** proviene per lo più da sorgenti al di fuori del Sistema Solare e può essere sia di origine galattica che extragalattica. In generale i raggi cosmici sono composti da nuclei di atomi ionizzati, ossia privi di elettroni, strappati lungo il loro cammino nello spazio, che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce, possedendo dunque una enorme quantità di energia. Queste particelle sono principalmente accelerate da campi magnetici in resti di supernova le cui nubi in espansione permangono per migliaia di anni dopo l'esplosione. Influenzate dall'azione di queste forze esterne, le particelle vengono fatte rimbalzare avanti e indietro casualmente e vengono rifornite continuamente di energia.

Raggiunta sufficiente velocità, sono in grado di sfuggire ai campi magnetici ed essere libere di viaggiare nello spazio. Attraversando il mezzo interstellare, subiscono numerose interazioni con polveri e gas emettendo raggi gamma. La rilevazione di questa radiazione è il modo che abbiamo per riconoscere il passaggio di queste particelle attraverso la Via Lattea e altre galassie.

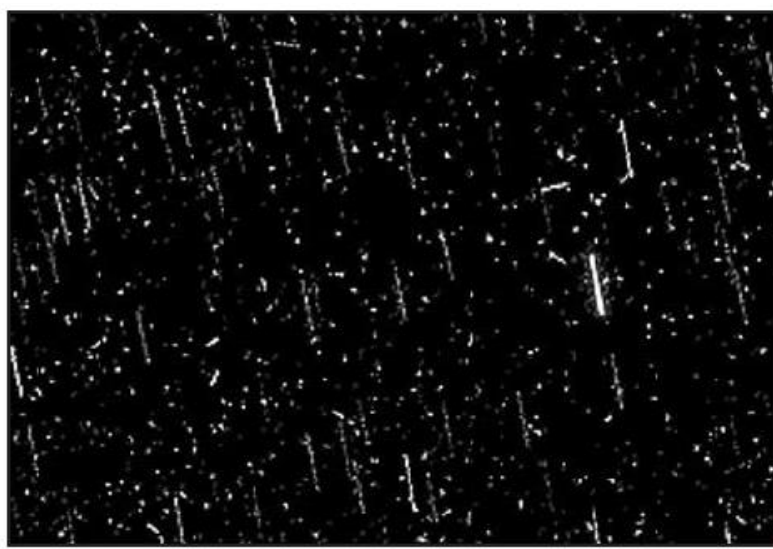
La radiazione cosmica permea lo spazio entro un intervallo di energie tra centinaia di eV fino anche a più di  $10^{20}$  eV, composta da 83% idrogeno (protoni), 13% elio, 3% elettroni, 0.01% antimateria e circa 1% da ioni ad alta energia cinetica e carica detti HZE (*high energy and atomic number*). Esempi di HZE sono carbonio, ferro e nickel, ossia particelle pesanti aventi numero atomico maggiore dell'elio e con un alto potere ionizzante, di penetrazione dei materiali e di radioattività. I raggi cosmici infatti possono provocare danni estremi sia ai materiali e sia biologicamente, come vedremo nei capitoli 3 e 4.

In generale siamo ampiamente schermati da questa radiazione grazie all'atmosfera e al campo magnetico terrestre. Altri pianeti o satelliti come la Luna non hanno invece la stessa protezione.

Vengono definiti **raggi primari** quelli che incidono sull'atmosfera, la quale, attraversata da quest'ultimi, determina collisioni nucleari che generano invece **raggi secondari** di origine nucleare e subnucleare che giungono al suolo in grandi sciame con una produzione massima a circa 15 km di altezza. L'energia dei miliardi di particelle secondarie e dei loro prodotti di decadimento attraverso l'atmosfera ( $1.033 \text{ g/cm}^2$ ) decresce con l'allontanarsi dall'asse dello sciame stesso e le più deboli esauriscono la loro energia prima di toccare il suolo, mentre quelle più energetiche o meno interagenti con la materia (come i neutrini) non hanno difficoltà a penetrare anche spessi strati di roccia. Il flusso di questa radiazione risulta isotropica negli strati al di fuori dell'eliosfera.

La radiazione risente anche dell'effetto del campo magnetico solare che in parte contribuisce a deviare le particelle energetiche, la cui azione però varia con la sua attività. Tra un minimo e un massimo, infatti, la densità di energia dei raggi primari vicino alla terra può decrescere di un 40%.

La figura 1.1 mostra raggi cosmici nella superficie di Marte rilevati dalla NASA che appaiono come puntini bianchi, mentre le stelle appaiono come strisce.



**Figura 1. 1:** Raggi cosmici rilevati nell'atmosfera di Marte.

Il fenomeno dei raggi cosmici coinvolge inoltre numerose discipline scientifiche, dalla meteorologia alla paleoclimatologia, dall'astronomia alla fisica delle particelle elementari, fino alla medicina. Lo studio di tali particelle è estremamente importante, in quanto esse costituiscono l'unico esemplare di materia proveniente dall'esterno del nostro Sistema Solare che giunge sulla Terra. Inoltre, attraverso la loro analisi, si cerca di trovare sorgenti galattiche ed extragalattiche di raggi gamma ed X, le quali potrebbero essere in parte il luogo di origine e di accelerazione dei raggi cosmici.

Oltre ai resti di supernova, infatti, tra le sorgenti si hanno anche pulsar-stelle a neutroni, buchi neri, quasar, blazars e nuclei di galassie attive (AGN). Quest'ultime in particolare, sono particolarmente importanti dal momento che si distinguono dalle galassie normali. Le galassie normali infatti, sebbene siano piuttosto massive ( $10^{12} \text{ Mo}$ ), non sono tipicamente molto luminose ( $10^{11} \text{ Lo}$ ) e per questa ragione sono rimaste difficilmente rilevabili a grandi distanze cosmiche. Gli unici oggetti osservabili a tali

distanze sono sorgenti completamente diverse che non derivano la loro energia dal bruciamento term nucleare delle stelle. Queste sorgenti sono i nuclei di galassie attive localizzati, appunto, nelle galassie attive. Per la loro luminosità facilmente rilevabile, hanno svolto un ruolo molto importante nello sviluppo cosmologico e giocano un ruolo fondamentale nell'astrofisica ad alte energie. Le AGN emettono in radio e confermano l'emissione non termica con temperature di brillantezza elevate.

## 1.2 Processi di accelerazione

Il meccanismo di accelerazione dei raggi cosmici può essere classificato come dinamico, idrodinamico ed elettromagnetico. In alcuni modelli l'accelerazione è puramente dinamica, per esempio nel caso in cui l'accelerazione prende luogo dalla collisione delle particelle con le nubi di polveri e gas; quelli idrodinamici possono determinare l'accelerazione dell'intero layer di plasma ad alte velocità; mentre nei processi elettromagnetici le particelle sono accelerate da campi elettromagnetici, per esempio da onde elettromagnetiche o di plasma o nella magnetosfera di una stella a neutroni.

L'espressione generale per l'accelerazione  $a$  di una particella di carica  $q$  in un campo elettromagnetico  $E, B$  è data dall'equazione:

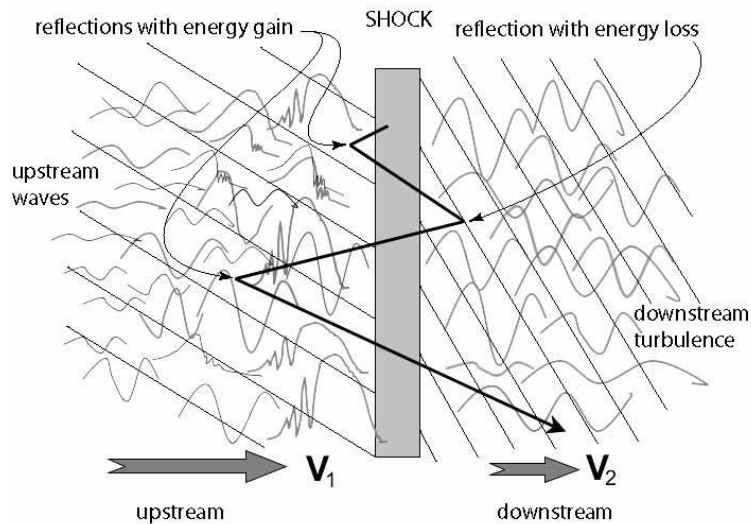
$$a = \frac{F}{m} = \frac{d}{dt}(\gamma m v) = \frac{q}{c} v \times B + qE$$

con fattore relativistico  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ . In molti ambienti astrofisici, i campi statici non possono essere mantenuti per via dell'alta conduttività elettrica degli ioni del gas ricco di cariche libere. I meccanismi elettromagnetici di accelerazione sono quindi associati a campi magnetici variabili in cui la carica subisce lavoro dovuto al campo elettrico dato dall'equazione di Maxwell  $E = -\frac{dB}{dt}$ .

Per capire come le particelle raggiungono queste elevate energie si considera una particella relativistica con energia  $\mathcal{E}$  e momento  $p$  in un sistema di laboratorio. Assunto che la particella si muova attraverso nubi caotiche con velocità  $v$  non relativistica incontrando campi magnetici congelati (a causa dell'elevata conduttività elettrica del mezzo) essa viene deflessa in modo casuale. Visto che la massa della nube è superiore rispetto a quella della particella, la collisione è completamente elastica e la particella riceve una piccola quantità di energia cinetica ogni volta che viene deflessa. Tale trattazione dal punto di vista matematico è un esercizio di relatività. Questo processo è definito **meccanismo Fermi**. Questa teoria però non tiene conto del fatto che gli urti possono essere sfavorevoli, ossia che possono provocare un'accelerazione negativa riducendo l'energia e che il processo avviene troppo lentamente. L'idea base della teoria di Fermi risulta quindi essenzialmente corretta, fornendo il fondamento per altri modelli migliori.

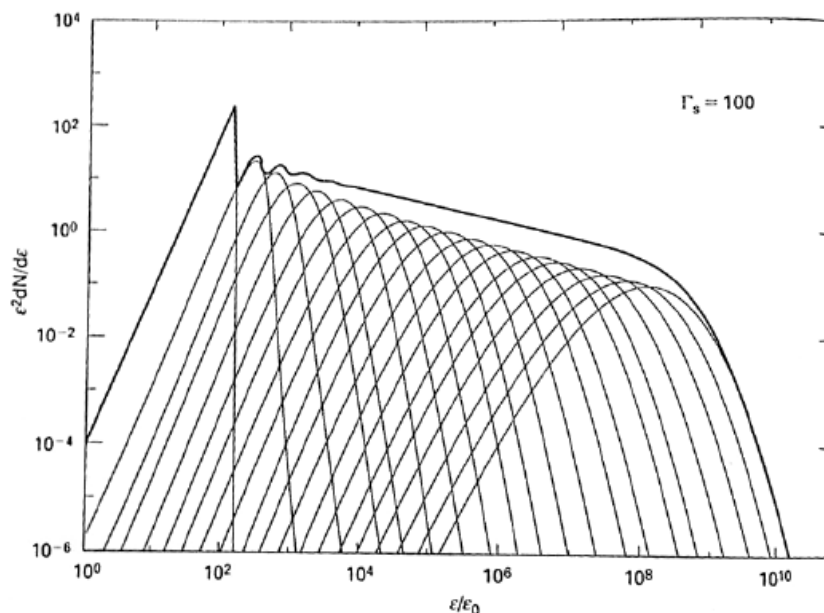
Una seconda teoria è quella dello **shock diffusivo**, valido per particelle ad alta velocità che si muovono in prossimità di una *shock wave*. Ciò consiste nell'accelerazione di una particella quando attraversa e riattraversa tale perturbazione, riflessa dai campi magnetici presenti. In un evento di supernova ad esempio, una shock wave è formata dall'elevata velocità del flusso dei layer di gas della stella. Lo shock crea una discontinuità nella

pressione, densità e temperatura dell'ambiente circostante. Il gas davanti allo shock viaggia quindi a velocità relativa maggiore e una particella che lo attraversa, a causa della trasformazione di Lorenz dovuta al cambio di velocità, acquisisce una piccola energia proporzionale a  $v/c$ . Dopo questo attraversamento, la velocità della particella è di nuovo urtata casualmente da collisioni con altre particelle nel campo magnetico. La particella può quindi anche tornare indietro riattraversando lo shock e analogamente ripetere il processo ricevendo ogni volta più energia. Questo, diversamente dal meccanismo di Fermi, dove le collisioni erano sia davanti che dietro, nel caso dello shock sono sempre in avanti come è visibile dalla figura 1.2.



**Figura 1. 2:** Schema dell'accelerazione di una particella tramite una shock wave.

Tramite calcoli si ottiene il risultato classico dello spettro di particelle accelerate tramite shock wave da energia  $\epsilon_0$  a energia  $\epsilon$ , riportato nel grafico della figura 1.3. Si tratta di un buon risultato osservabile per radio galassie e per i raggi cosmici galattici.



**Figura 1. 3:** Simulazione dello spettro di energia di particelle in una shock wave.

Si ha comunque un limite di energia massima raggiungibile. La particella in realtà dissipa parte dell'energia e, inoltre, il tempo di vita dello shock non è infinito. Uno shock di supernova, ad esempio, decelera ed entra in una fase di evoluzione finale in cui i processi Fermi rallentano. Supponendo valori tipici di  $B = 10^{-6} \text{G}$ ,  $v = 5000 \text{ km/s}$  e  $t = 1000 \text{ yr}$  (durata shock), così che la tratta percorsa durante l'accelerazione risulti essere  $l = vt = 5 \text{ pc}$ , si ottiene un'energia massima per nucleone  $\varepsilon = \frac{ZqvBl}{c} \sim 3 \cdot 10^8 \text{ MeV}$  tipica dei raggi cosmici.

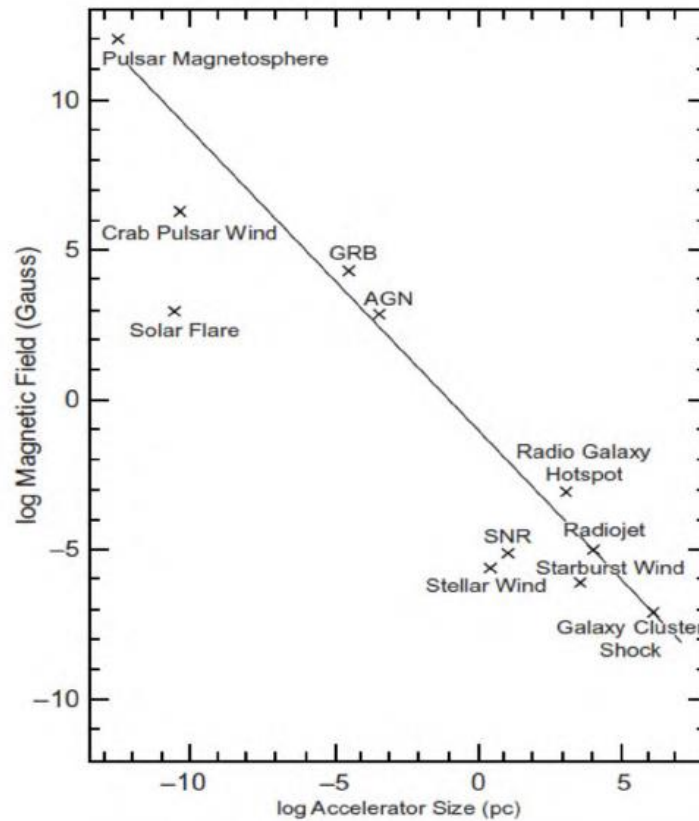
Un altro problema astrofisico è quello di spiegare come una piccola parte di particelle siano selezionate e separate dal gran numero di particelle termiche a basse energie per diventare raggi cosmici energetici. Questo è chiamato **particle injection problem**.

E' dimostrato che più le particelle diventano energetiche raggiungendo velocità relativistiche, meno interagiscono con l'ambiente circostante.

In origine le particelle hanno una distribuzione di energia Maxwelliana non relativistica. Questo andamento si estende anche alle alte energie e le particelle nella coda estrema della distribuzione cominciano progressivamente a differenziarsi dalle altre, accelerando successivamente grazie al meccanismo Fermi. Un ulteriore effetto è dato dal meccanismo *drift* in cui ci sono componenti nel campo magnetico non esattamente perpendicolari alla superficie di uno shock. In questo caso, assunta la condizione di magneto idrodinamica ideale, nello shock la componente del campo elettrico ha intensità  $\varepsilon = -\frac{v}{c} \times B$ , dove  $v$  è la propagazione dello shock e  $B$  il campo magnetico preshock. Ciò produce un'accelerazione della particella carica che cresce con l'energia  $\varepsilon \sim \frac{ZqvBl}{c}$ . Questa quantità non è grande, ma l'intero processo può contribuire in modo significativo agli stage iniziali dell'accelerazione delle particelle.

Il grafico della figura 1.4 mostra alcune informazioni fondamentali riguardo le sorgenti che determinano le accelerazioni delle particelle ad alta energia. La figura si basa sulle diverse equazioni di ognuna di esse impostando un'energia massima osservabile pari a  $\varepsilon_{\text{max}} = \frac{ZqvBl}{c} = 10^{14} \text{ MeV}$  che implica  $Bl \sim \frac{0.1 c}{Z v}$ . Per esempio, se si vuole accelerare un protone ( $Z = 1$ ) a tale energia, il prodotto tra campo e tratto percorso deve essere al limite  $0.1 \text{ Gauss} \cdot \text{pc}$ . Ciò significa che le sorgenti che stanno a sinistra del grafico non possono accelerare a tale energia queste particelle. Per raggiungere tale energia un protone, in ogni caso, ha bisogno di uno shock con velocità circa a  $c$ , una condizione che non si riscontra per esempio in uno shock di supernova, ma può essere ottenuta nel campo magnetico delle pulsar o in nuclei di galassie attive. Per i nuclei più pesanti, comunque, il raggiungimento dell'energia massima è favorito dall'aumento di  $Z$ , dove è possibile raggiungerla in ogni sorgente galattica.

È interessante considerare anche il *raggio di girazione* dei raggi cosmici che dall'equazione per particelle relativistiche  $r_G = \frac{c}{\omega_G} = \frac{\gamma mc^2}{qB}$ , si ricava ad esempio che per un protone di energia pari a  $10^6 \text{ MeV}$  ha  $r_G = 10^{-3} \text{ pc}$  e a  $10^{12} \text{ MeV}$  si raggiunge  $1 \text{ kpc}$ , mentre per particelle ancora più energetiche si arriva al  $\text{Mpc}$ . Considerando lo spessore verticale della Galassia di circa  $300 \text{ pc}$ , è chiaro che c'è una buona probabilità che un raggio cosmico con  $\varepsilon > 10^{17} \text{ eV}$  sia rilasciato al di fuori e molto probabilmente dal nucleo di una galassia attiva.



**Figura 1.4:** Sorgenti in grado di raggiungere  $E_{max}$  in funzione di  $B$  ed  $l$ .

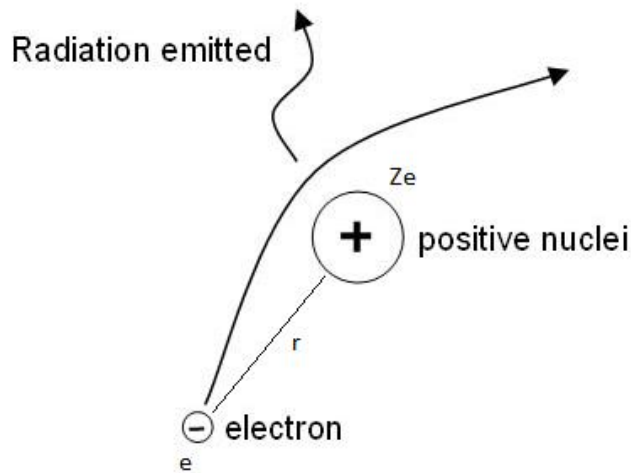
### 1.3 Cenni alla radiazione non termica

In natura esistono diverse tipologie di emissione dovute alle interazioni tra particelle in diverse condizioni chimiche-fisiche. Si hanno radiazioni termiche e non termiche ognuna con il proprio spettro di energia, potenza di emissione delle particelle, proprietà di assorbimento e polarizzazione.

L'interazione di free free, ad esempio, è la radiazione dovuta all'accelerazione di una particella che subisce scattering ad opera dell'interazione Coulombiana con un'altra particella. Tipico esempio è il free free termico tra gli ioni di HII e gli elettroni liberi nel mezzo interstellare che emettono in radio. Tale reazione avviene all'equilibrio termodinamico con distribuzione Maxwelliana delle velocità ad una certa temperatura.

L'accelerazione dell'elettrone nel vuoto è  $a = \frac{eE}{m} = \frac{eZ}{mr^2}$  con  $Z$  carica del nucleo,  $E$  il suo campo elettrico e  $r$  la distanza tra elettrone e nucleo, visibile dalla figura 1.5.

L'energia irradiata da tale decadimento è proporzionale al quadrato del momento di dipolo  $d$  ed è data dall'equazione di Larmor  $P = \frac{2}{3} \frac{d^2}{c^3} = \frac{2}{3} \frac{(ae)^2}{c^3}$ . Tale radiazione non è polarizzata dal momento che le particelle sono in continuo moto Browniano ed emettono completamente in modo casuale.



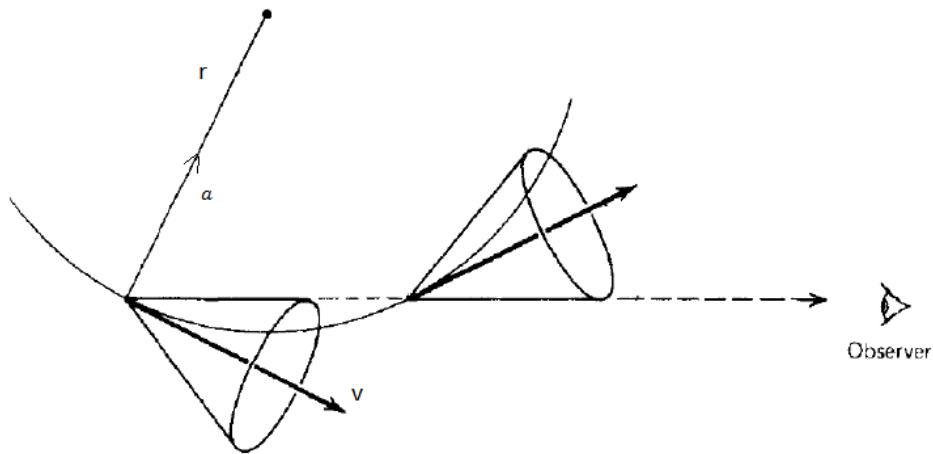
**Figura 1.5:** Schema dell'emissione di free free.

Più in generale, se si ha una distribuzione non isotropica, ossia non Maxwelliana, si parla di **radiazione free free relativistica** che risulta essere non termica. In questo caso l'energia cinetica delle particelle è così grande che esse diventano relativistiche, come conseguenza per esempio dall'alta temperatura del plasma tipo  $T > 10^9$ . Su ciò si basa il metodo del *Virtual Quanta* valido in regime non quantistico, sebbene il trattamento completo richiederebbe la teoria dell'elettrodinamica quantistica. Con semplici calcoli relativistici si può trovare la relazione che lega la potenza emessa in funzione della velocità, frequenza, carica e altri parametri che per semplicità può essere ricavata riscrivendo la formula di Larmor come  $P = \frac{2}{3} \gamma^4 \frac{(ae)^2}{c^3}$ .

L'osservazione dell'ampia emissione gamma nella nostra galassia è in parte interpretata dal free free relativistico con energie di elettroni di raggi cosmici elevate com'è visibile dalla figura 2.10 effettuata dal telescopio spaziale Fermi citato nel capitolo seguente.

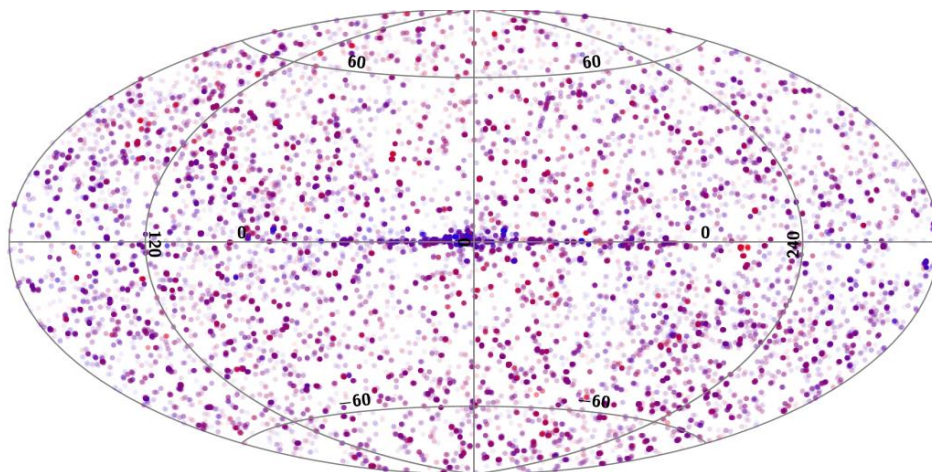
Oltre all'accelerazione dovuta all'interazione tra particelle, come abbiamo visto, queste sono continuamente influenzate dalla presenza dei campi magnetici, ossia continuamente accelerate dalla forza di Lorentz. Nel caso non relativistico, la radiazione è di *ciclotrone* dovuta al moto a spirale delle particelle la cui frequenza è quella di girazione  $\omega_G = \frac{qB}{mc}$  la cui emissione prodotta è perpendicolare al vettore accelerazione  $a$ .

Ciò cambia se le velocità in gioco aumentano avvicinandosi sempre più alla velocità della luce, dando origine alla **radiazione sincrotrone**. In questo caso, al crescere del parametro  $\gamma$ , l'orbita della particella aumenta diventando  $r = \frac{\gamma mc}{qB}$  e la frequenza tende a zero  $\omega = \frac{\omega_G}{\gamma}$ . In realtà la frequenza osservata è molto più grande dal momento che l'emissione non avviene in tutte le direzioni ma, come detto, solo perpendicolarmente al vettore accelerazione in un cono che ha come asse il vettore istantaneo di velocità e ampiezza proporzionale all'energia della particella come si può vedere dalla figura 1.6. La radiazione di sincrotrone inoltre risulta polarizzata in tale direzione (perpendicolare a  $B$ ) e l'osservatore rileva impulsi in X dal momento che il cono esce e rientra lungo la linea di vista. Anche qui è possibile ricavare la potenza irraggiata  $P = \frac{4}{3} c \omega \gamma^2 \beta^2 u_m$  in funzione della velocità, sezione d'urto della particella  $\sigma$  e campo magnetico  $B$  descritto dalla sua densità di energia  $u_m = \frac{B^2}{8\pi}$ .



**Figura 1. 6:** Schema dell'emissione di sincrotrone lungo la linea di vista.

Tale radiazione dunque produce un diffuso background galattico ed extragalattico generato da sorgenti che emettono in X com'è visibile dalla figura 1.7.

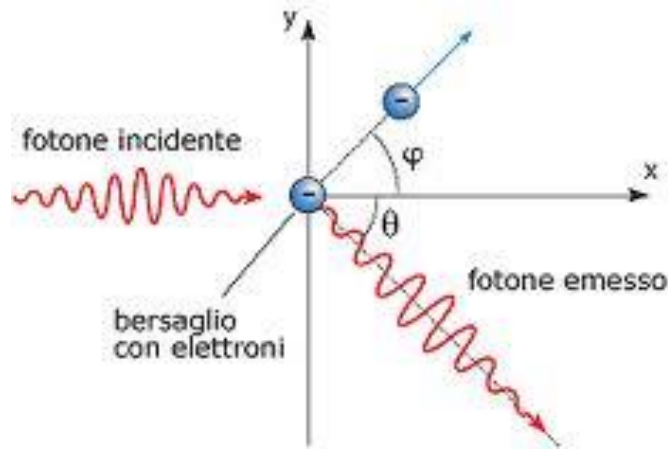


**Figura 1. 7:** Mappa del cielo osservato in X.

Tra le più importanti, in particolare, ci sono i nuclei di galassie attive. Le emissioni X sono una componente fondamentale per il loro studio perché rappresentano la miglior traccia del processo di accelerazione gravitazionale della sorgente energetica. Un altro esempio principale dell'emissione X, oltre a quello del nucleo delle galassie, proviene anche dal loro disco, visibile negli spettri. La mancanza di polarizzazione di questa radiazione però esclude che sia sincrotrone.

Recenti interpretazioni mostrano che nel disco è richiesto plasma caldo in cui avvengono fenomeni di **effetto Compton inverso**, tipico delle corone delle stelle con fotoni meno energetici. Lo *scattering di Compton* è un fenomeno di diffusione interpretato come un urto elastico tra un fotone energetico e un elettrone in cui si conservano quantità di moto ed energia cinetica. La radiazione risultante prevede uno scostamento della lunghezza d'onda pari a  $\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\sigma)$ , con  $\sigma$  angolo di deflessione del fotone e  $\lambda_c = \frac{h}{mc}$  lunghezza d'onda di Compton, il cui risultato determina una frequenza e un'energia minore rispetto quella di partenza visibile nella figura 1.8.

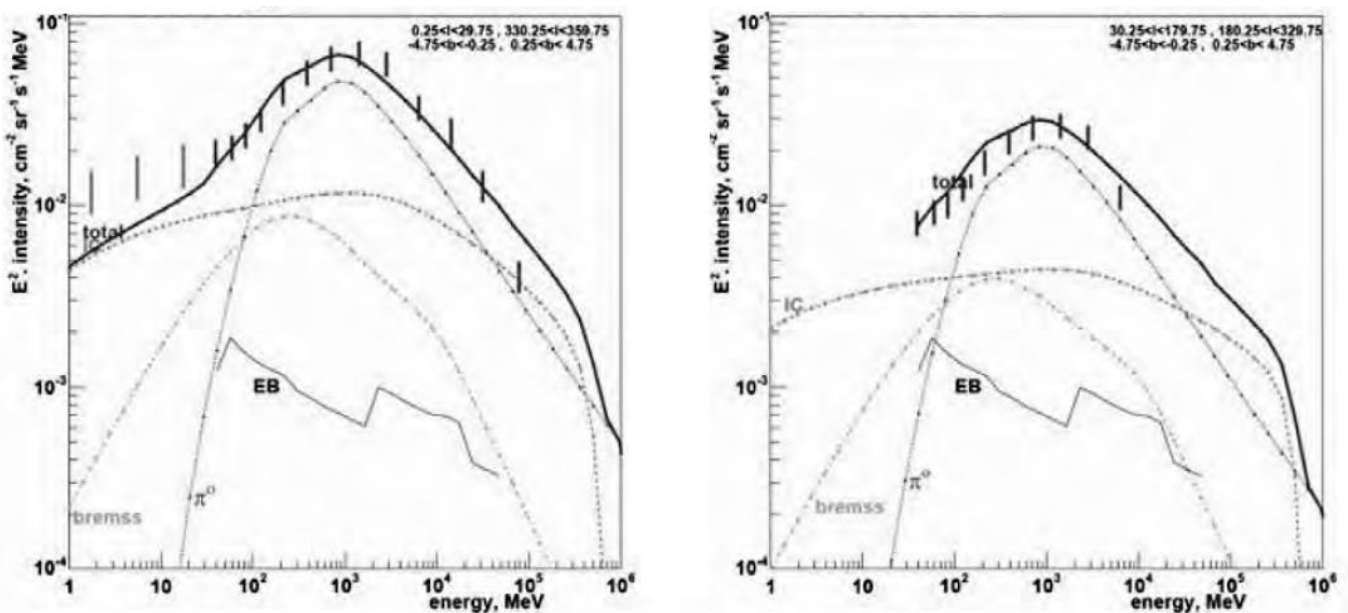




**Figura 1.8:** Schema dell'effetto Compton.

Per quanto riguarda l'effetto Compton inverso, si realizza invece quando l'energia del fotone è molto più piccola di quella della particella, come ad esempio un raggio cosmico. Il processo dunque genera fotoni ad alta energia che possono emettere in X e in gamma. Si può quindi ottenere l'andamento della potenza irradiata da questa tipologia di emissione considerando una distribuzione isotropa di fotoni diffusi da una distribuzione di elettroni a sua volta isotropa. Con considerazioni relativistiche risulta essere  $P = \frac{4}{3} c \sigma \gamma^2 \beta^2 u_{ph}$ , espressione simile a quella di sincrotrone che fa capire come in una sorgente l'emissione è data da più contributi. In particolare, emissione gamma si ha anche dal decadimento di  $\pi^0$ .

I grafici nella figura 1.9 mostrano gli spettri dell'emissione gamma in regioni differenti della Via Lattea. I dati osservati sono indicati con tratti verticali (total), mentre i contributi di decadimenti  $\pi^0$ , Compton inverso (IC), free free relativistico (bremss) con aggiunta di background extragalattico infrarosso (EB) sono mostrati dalle rispettive curve.

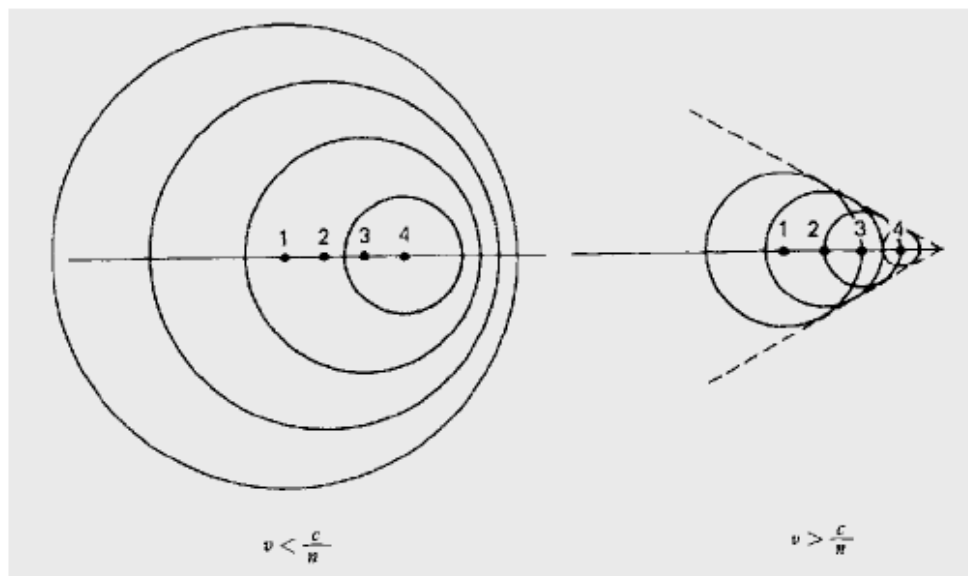


**Figura 1.9:** Spettri gamma di energia di diversi contributi di emissione in diverse direzioni.

Particolare interesse riveste l'**emissione Cherenkov**, radiazione dovuta al superamento della velocità della luce in un mezzo da parte di una particella carica nel

mezzo in considerazione. Dall'analisi dell'indice di rifrazione  $n$  è possibile che si possa avere la situazione  $v > \frac{c}{n}$ , in cui le particelle che si muovono nel mezzo con velocità  $v$  costante cominciano ad irradiare in luce UV. Ciò è dovuto al fatto che la particella carica, lungo la sua traiettoria, induce dei momenti di dipolo temporanei negli atomi o nelle molecole del mezzo. Ritornando alla configurazione iniziale, le molecole producono radiazione elettromagnetica. Se la particella viaggia lentamente, tale perturbazione si rilassa elasticamente e si ha un ritorno all'equilibrio meccanico non appena la particella è passata, se invece la velocità della particella è sufficientemente elevata rispetto al tempo di risposta del mezzo allora l'energia prodotta da questa perturbazione si irradia come un'onda d'urto.

Come quando nell'aria un oggetto supera il muro del suono e si forma il *cono d'onda di Mach*, allo stesso modo ciò avviene con le onde elettromagnetiche. Dalla figura 1.10 è possibile vedere come i punti 1,2,3... sono le successive posizioni occupate dalla particella e i corrispondenti cerchi centrati in essi sono i campi della radiazione.



**Figura 1. 10:** Schema del cono d'onda della radiazione Cherenkov.

Le proprietà della radiazione Cherenkov possono essere usate come misura di energia per particelle ad alte velocità come i raggi cosmici quando attraversano l'atmosfera. Tale tecnica è anche utilizzata per la rilevazione di raggi gamma in quanto anch'essi interagendo con le molecole dell'aria generano una pioggia di particelle secondarie.

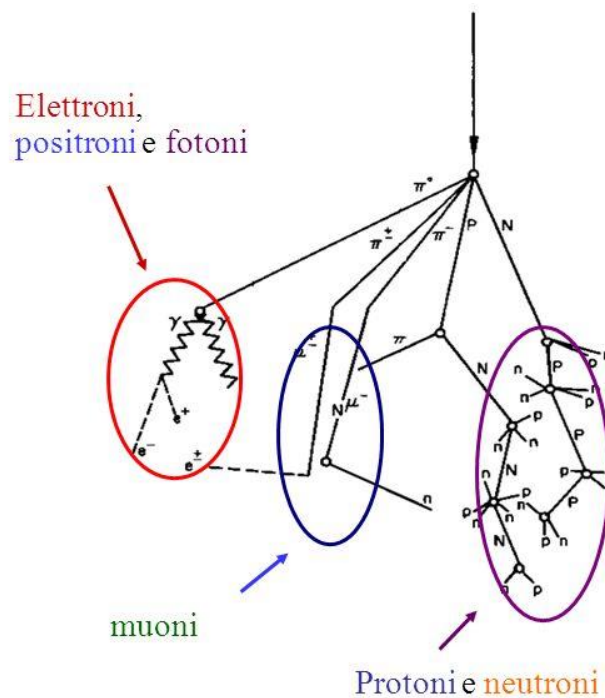
## 1.4 Cenni di fisica particellare

Grazie al fenomeno dei grandi sciami atmosferici, detti **Extensive Air Shower (EAS)**, è possibile studiare l'effetto di un singolo raggio primario e stimarne l'energia. Questa sostanziale bidimensionalità della struttura dello sciame permette anche di determinare la direzione di provenienza con opportune tecniche di coincidenze ritardate. Si noti che lo

sviluppo massimo di un grande sciame avviene a diverse altezze nell'atmosfera e si esaurisce in tempi diversi che dipendono dall'energia del raggio primario.

Poiché la parte predominante della radiazione secondaria è data dalla componente elettromagnetica e poiché gli elettroni perdono energia per ionizzazione a un tasso di circa 2 MeV per ogni g/cm<sup>2</sup> di atmosfera attraversata, che equivale a  $2 \cdot 10^3$  MeV su tutta l'atmosfera, ne consegue che l'energia del primario che ha iniziato lo sciame risulta dell'ordine  $\varepsilon \sim 2 \cdot 10^9 N_{\max}$ , dove  $N_{\max}$  è il numero totale di particelle al momento di massimo sviluppo dello sciame. Chiaramente, già per energie dei primari di  $10^8$  MeV si ha una produzione enorme di secondari.

Tra le particelle primarie che arrivano sulla Terra ci sono: protoni, neutroni, elettroni, positroni, ioni pesanti, fotoni ad alta energia (X e gamma); mentre le secondarie sono: pioni, elettroni, neutroni, mesoni, iperoni, muoni e neutrini. In particolare, al livello del mare i raggi cosmici sono costituiti sostanzialmente da muoni, elettroni e fotoni com'è visibile dalla figura 1.11.

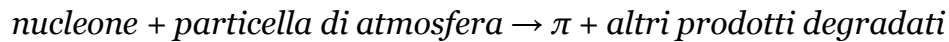


**Figura 1. 11:** *Extensive air shower.*

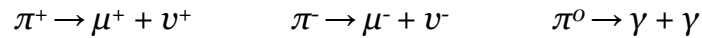
Un discorso a parte andrebbe fatto per i **neutrini  $\nu$** , in quanto sono di gran lunga i più numerosi, ma avendo massa quasi nulla non vengono facilmente individuati. Inoltre vengono prodotti in grande quantità dal Sole mescolandosi con quelli prodotti da sorgenti cosmiche.

I **muoni  $\mu$**  sono molto importanti dal momento che sono le particelle cariche più penetranti fra quelle prodotte nell'interazione nucleare e perdono per ionizzazione un'energia di circa 2 MeV ogni g/cm<sup>2</sup> di atmosfera attraversata e quindi arrivano a terra solo quelli con energia superiore a  $2 \cdot 10^3$  MeV. Ne consegue che il protone primario che li produce deve avere un'energia maggiore di  $10^4$  MeV. È chiaro anche che lo studio dei raggi cosmici con energie minori di  $10^4$  MeV è possibile solo ad altitudini molto elevate e, per le basse energie, solo al di fuori dell'atmosfera.

È noto d'altra parte che una conversione dei nucleoni in muoni, elettroni e fotoni non è possibile, devono quindi esistere almeno degli intermediari. Questi sono i **mesoni  $\pi$** , secondo lo schema seguente:

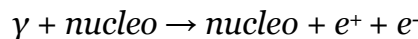


I mesoni sono particelle instabili e si disintegrano secondo:



Il muone a sua volta è instabile e produce un elettrone, neutrini e antineutrino. La sua vita media è di circa 2 milionesimi di secondo, ma viaggiando a velocità relativistiche, il tempo della loro esistenza si dilata così che riescono a raggiungere il suolo prima di decadere.

Un'altra reazione invece può essere quella tra fotoni e nuclei che forniscono la componente elettronica secondo la reazione:



Gli elettroni, a loro volta, nell'urto contro un nuovo nucleo possono perdere parte della loro energia generando un nuovo fotone per free free:



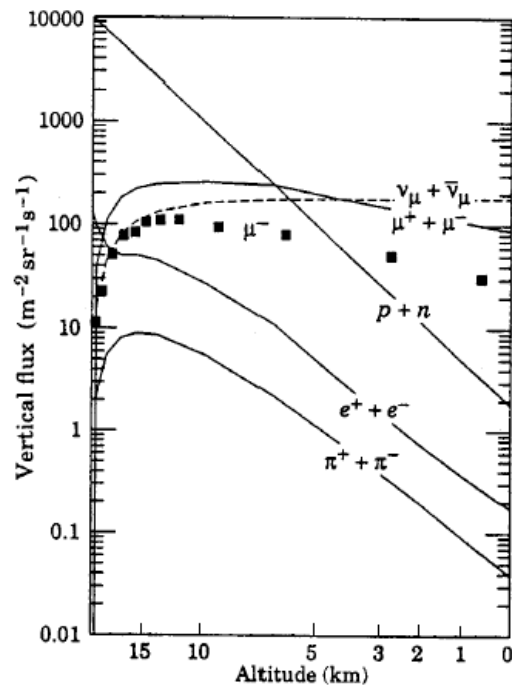
Al di sotto di una determinata energia per particella, che nell'atmosfera è di circa 100 MeV, la moltiplicazione dello sciame si arresta e gli elettroni residui vengono frenati a causa delle perdite per ionizzazione. I processi elementari responsabili dei fenomeni descritti sono trattabili quantitativamente mediante l'elettrodinamica quantistica.

A causa della non conservazione del numero di particelle nello sciame, non è possibile stimare quanti mesoni  $\pi^0$  vengano prodotti negli urti della primaria nell'atmosfera. È invece possibile risalire alla frazione di energia totale del raggio cosmico primario che viene convogliata in mesoni  $\pi^0$  e che risulta circa la metà di quella convogliata in mesoni carichi  $\pi^\pm$ . Ciò indica che i mesoni  $\pi$  vengono prodotti all'incirca nelle stesse proporzioni nei tre stati di carica  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ .

In particolare ci si può ridurre praticamente a tre soli termini relativi alle componenti rilevabili maggiormente e si trova che l'energia si distribuisce approssimativamente tra i prodotti secondari in queste proporzioni: muoni e neutrini 45%, elettroni e fotoni 25%, nuclei degradati 30% (per componente nucleonica degradata si intende quel residuo della primaria e quei protoni e neutroni provenienti dalla frantumazione di nuclei d'atmosfera colpiti dalla primaria che per la loro energia troppo bassa non sono più in grado di generare mesoni in modo apprezzabile).

Passando dai valori relativi a quelli assoluti si trova che il fascio secondario dissipa circa  $10^3$  Mev/s in una colonna di atmosfera di  $1 \text{ cm}^2$  di sezione e per direzioni d'incidenza comprese in un angolo solido unitario.

Il grafico della figura 1.12 mostra i flussi delle particelle in funzione dell'altitudine in cui è possibile notare il massimo di produzione a circa 15 km di altezza per poi decrescere a flussi inferiori con diverse pendenze in base al tipo di prodotti.



**Figura 1. 12:** Flusso dei raggi cosmici in funzione della quota.



# Capitolo 2

## Rilevazione dei raggi cosmici

In questo capitolo riporto le proprietà energetiche della radiazione cosmica per poi dedicare una sezione alla descrizione delle caratteristiche del contributo solare in termini di radiazione in diverse condizioni legate alla sua attività confrontata con quella dei raggi cosmici.

In particolare elenco le modalità di rilevazione di tali particelle al suolo e al di fuori dell'atmosfera, dando dunque alcuni cenni alla diversa tipologia di tecnologia utilizzata nella raccolta di dati astronomici.

### 2.1 Analisi dello spettro di energia

L'elemento che caratterizza la radiazione cosmica è lo **spettro di energia** che si estende su almeno 13 ordini di grandezza, da alcune decine di MeV fino a  $10^{14}$  MeV, ossia fino a circa  $10^{20}$  eV. Lo spettro riferito al flusso di particelle è riportato nella figura 2.1.

Esso segue la ben nota legge di potenza della forma  $F(>\mathcal{E}) \propto \mathcal{E}^{-\gamma}$ , dove  $F(>\mathcal{E})$  è il flusso di particelle con energia maggiore di  $\mathcal{E}$  e  $\gamma$  è l'indice spettrale, indicato in figura a varie energie.

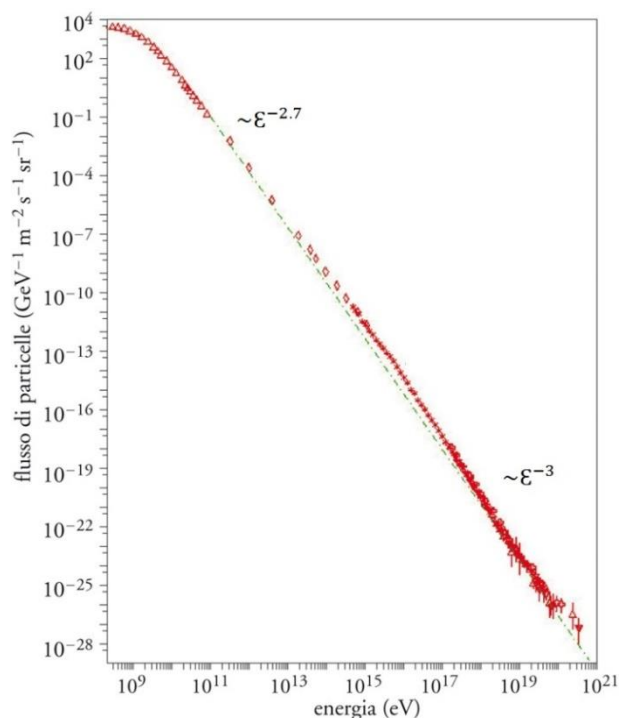
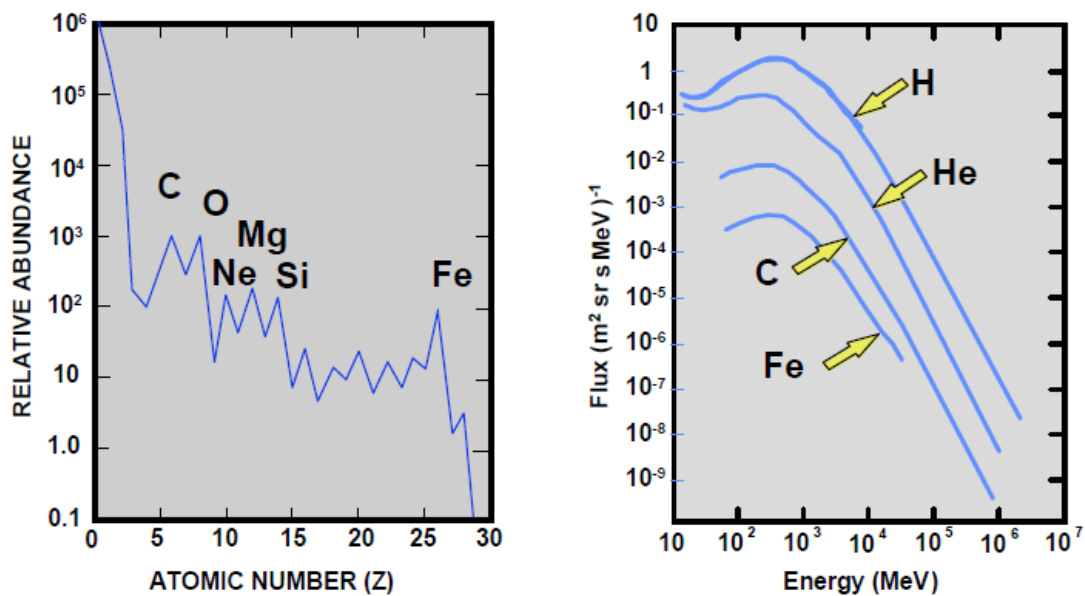


Figura 2. 1: Spettro di energia dei raggi cosmici.

Il punto in cui avviene il cambio di pendenza, da  $\gamma=2.7$  a  $\gamma=3$ , a circa  $10^9$  MeV ( $10^{15}$  eV), viene denominato ginocchio. Per energie più alte oltre  $10^{12}$  MeV ( $10^{18}$  eV), lo spettro torna ad essere meno ripido, dando luogo ad un ulteriore cambio di pendenza.

Si deve notare che fino a poco tempo fa la conoscenza degli spettri per energie maggiori di  $10^4$  MeV era limitata a poche misure di tipo integrale sia per i protoni e i nuclei di elio, sia per i nuclei più pesanti. Per questi ultimi si possedevano solo informazioni globali su ampi intervalli di Z. I dati ottenuti erano comunque tutti consistenti con un'unica legge di potenza e questa caratteristica dell'indice spettrale dai protoni ai nuclei pesanti veniva considerata come la prova dell'esistenza di un unico meccanismo di accelerazione dei raggi cosmici e quindi, per inferenza, anche di un'origine comune di tutte le componenti. Tuttavia, tutta una serie di esperimenti condotti in questi ultimi anni ha permesso di costruire un quadro più dettagliato e si sono misurati separatamente gli spettri di varie componenti nucleari fino a energie elevate: per i protoni e le particelle di elio fino a  $10^6$  MeV, mentre per le componenti più pesanti si arriva a  $5 - 8 \cdot 10^4$  MeV com'è visibile dai grafici della figura 2.2. Per questi intervalli di energie è dunque possibile ottenere degli spettri ben definiti, corretti e con origine delle particelle nota, mentre per energie maggiori ciò è più complicato.



**Figura 2.2:** *Abbondanze atomiche e rispettivi spettri di energia.*

Al di sopra di  $5 - 10 \cdot 10^3$  MeV tutti gli spettri sono ben rappresentati da leggi di potenza, mentre per energie inferiori gli spettri energetici sono un po' più complicati e, al diminuire dell'energia, variano in modo più lento di quanto previsto dalla semplice legge di potenza. L'uso dei satelliti ha però permesso di estendere lo studio degli spettri fino a energie dell'ordine di alcune decine di MeV. È questa infatti la regione spettrale in cui si risente fortemente degli effetti locali dell'attività solare e non è facile, inoltre, stabilire con precisione quale sia l'andamento dello spettro al di fuori del sistema solare. Si può pensare, ad esempio, che nello spazio interstellare la legge di potenza continui a essere valida anche per le basse energie. Questo significherebbe naturalmente aggiungere molte particelle nella



parte bassa dello spettro e quindi innalzare la stima della densità di energia dei raggi cosmici al loro ingresso nel sistema solare.

Completato lo spettro con i risultati più recenti sui grandi sciami atmosferici, per energie maggiori di  $10^{14}$  MeV non vi è ancora alcuna indicazione di un taglio netto delle energie. Questo fatto implica l'esistenza in natura di meccanismi capaci di convogliare in un singolo nucleo energie cinetiche ancora maggiori. È stato dedotto quindi che almeno la parte di altissima energia dello spettro sia certamente di origine extragalattica, in quanto le particelle mostrano una distribuzione isotropa, mentre l'intensità del campo magnetico galattico non sembra sufficiente al loro confinamento né all'interno, né all'esterno della Galassia.

## 2.2 Radiazione solare

La più grande sorgente di radiazione per la Terra è rappresentata dal Sole che emette a tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. La maggior quantità arriva nel visibile, infrarosso e ultravioletto.

Occasionalmente grandi esplosioni, chiamate *solar flare*, avvengono nella superficie del Sole rilasciando un'ingente quantità di energia nello spazio in forma di raggi X, gamma, protoni ed elettroni. Tali eventi, in relazione alla produzione di particelle, sono chiamati **Solar Particle Event (SPE)**. Queste possono avere serie conseguenze per gli astronauti e sui sistemi spaziali, anche localizzati a grandi distanze dal Sole, come vedremo nel capitolo 3.

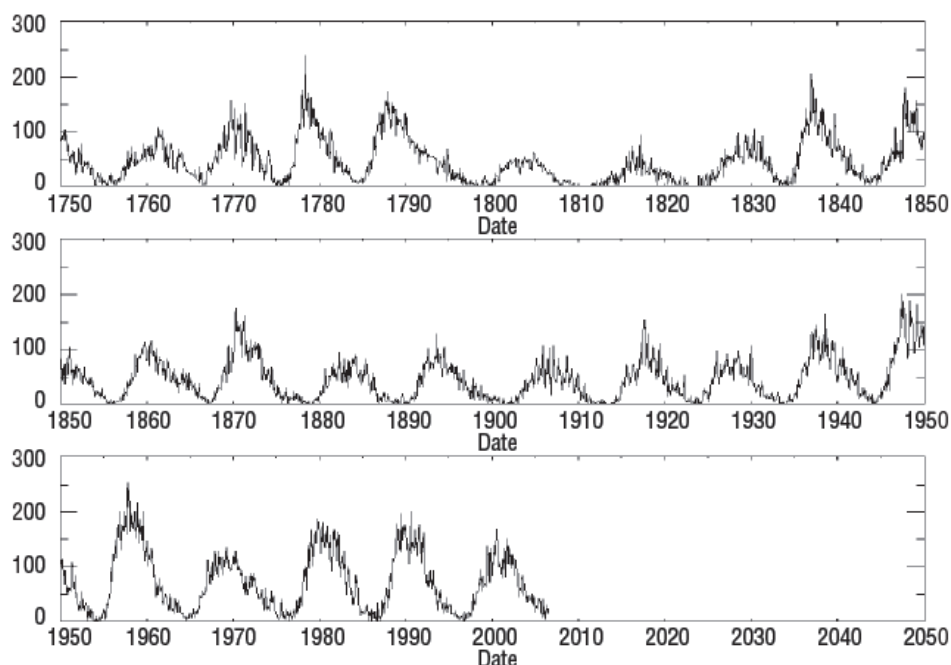
Un massimo solare può essere da due o cinque ordini di grandezza più grande della radiazione ordinaria con energie da 1 MeV fino a  $10^3$  MeV. Queste quantità sono dunque confrontabili con quelle misurate per i raggi cosmici.

Il periodo del flusso di particelle può durare da alcune ore ad alcuni giorni, con successivi picchi dovuti a differenti processi fisici coinvolti. In media ci sono solo poche SPE all'anno, ma comunque dannose.

Il Sole in generale ha un'attività ciclica della durata di 11 anni, nella quale è maggiormente predisposto a produrre effetti di questo tipo, legati tra l'altro al numero di macchie solari presenti nella superficie com'è visibile dalla figura 2.3.

Sebbene gli scienziati possano prevedere l'eccesso di produzione di radiazione da parte del Sole durante questo ciclo, non sono però capaci di determinare specificamente quando si verificano queste emissioni e con che intensità. Per questo motivo la nostra stella è costantemente monitorata.

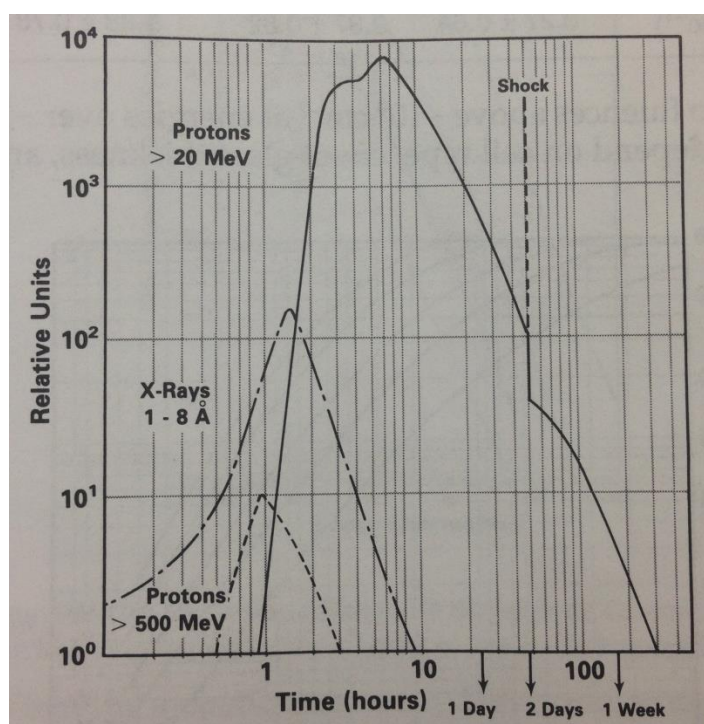
E' stato stimato inoltre che la misura a terra della quantità di raggi cosmici che vi giungono è inversamente proporzionale all'attività solare in un determinato periodo e ciò vuol dire che la loro intensità segue lo stesso andamento dei cicli solari. Questo fenomeno è detto **solar modulation** dei raggi cosmici galattici, con depressioni massime fino al 20% dette *diminuzioni di Forbush*. Il vento solare infatti determina l'estensione e l'efficienza dell'eliosfera del Sistema Solare situata a circa 100 UA dove i raggi cosmici cominciano a sentire l'urto con le linee di campo magnetico solari descritte dalla *spirale di Parker*.



**Figura 2.3:** *Variazione numero macchie solari con periodicità di 11 anni.*

Il grafico in figura 2.4 invece mostra l'andamento temporale di una SPE osservata vicino alla terra il cui profilo dipende dalla sua evoluzione, da quando si origina, da quando si diffonde nella corona solare e da come si propaga nello spazio.

È possibile notare come protoni relativistici arrivano a terra entro pochi minuti dopo il flare. Protoni a bassa energia sono invece più lenti, diffusi maggiormente nella corona e nel plasma, raggiungendo la Terra in circa un'ora. Dopo una SPE i protoni decadono in un rumore di fondo in alcuni giorni.



**Figura 2.4:** *Evoluzione temporale di una SPE osservata da terra.*

Caratteristica particolare delle particelle del vento solare a bassa energia è quella di essere intrappolate nelle **fasce di Van Allen** all'interno della magnetosfera terrestre.

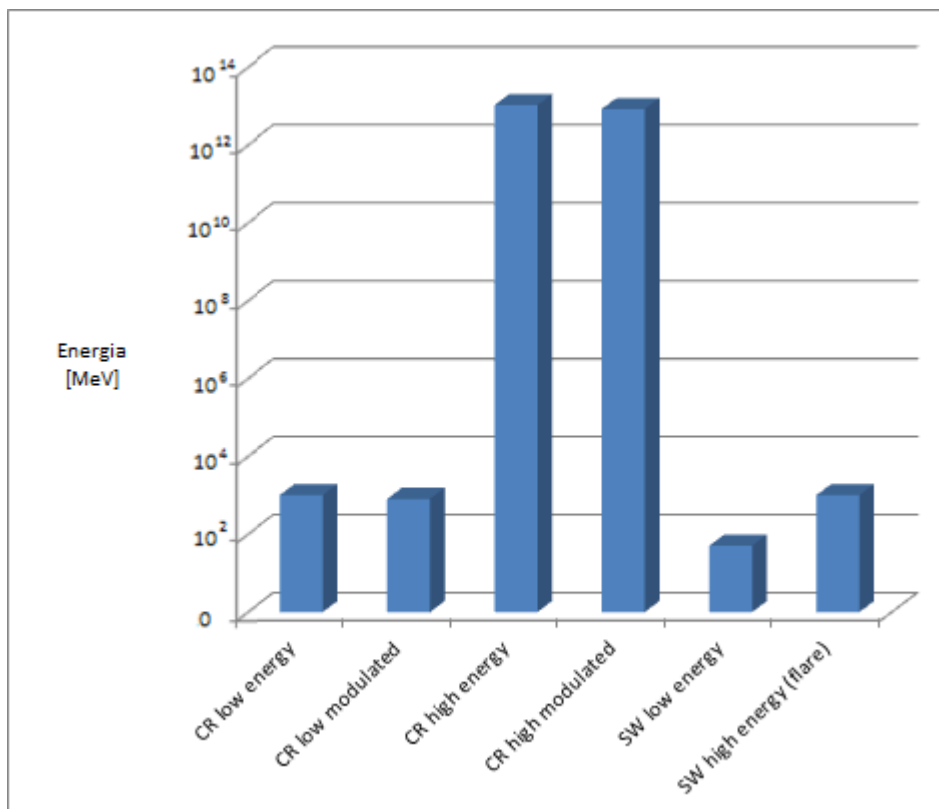
L'atmosfera terrestre limita inferiormente l'estensione delle fasce ad un'altitudine di 200–1000 km, mentre il loro confine superiore non arriva oltre i 40000 km, che corrispondono a circa 7 raggi terrestri di distanza dalla superficie della Terra.

Le particelle intrappolate sono per la maggior parte protoni con energie comprese tra 100 keV e alcune centinaia di MeV ed elettroni con energie tra decine di keV e 10 MeV.

Queste fasce rappresentano dunque un vantaggio in termini di protezione a terra, ma anche uno svantaggio in quanto in termini di radiazione, penetrando negli strati più alti dell'atmosfera e producendo ionizzazione, contribuiscono ad aumentare la dose totale subita dai satelliti. Ad esempio i satelliti LEO, con elevata inclinazione, subiscono i flussi più elevati quando si trovano nella zona dell'aurora. Tale aspetto verrà descritto in dettaglio nel capitolo 3 e 4.

Il grafico nella figura 2.5 schematizza indicativamente i valori della radiazione cosmica (CR) e del vento solare (SW) ricevuta sulla Terra in alcune delle condizioni affrontate in questo capitolo. Da ciò è possibile notare come i solar flares possono produrre particelle con energie paragonabili a quelle dei raggi cosmici a basse energie e di come le diminuzioni di Forbush possono modulare la loro energia con una riduzione di qualche centinaio di MeV.

Di gran lunga quindi la radiazione cosmica ad alta energia può avere effetti dannosi rispetto la radiazione solare, nonostante abbia bassi flussi rispetto quella ricevuta quotidianamente dalle particelle solari meno energetiche (costante solare 1367 W/m<sup>2</sup>).



**Figura 2. 5:** *Paragone tra le energie della radiazione cosmica e solare.*

## 2.3 Rilevazione in atmosfera

Il progredire delle nostre conoscenze sulla natura dei raggi cosmici è legato allo sviluppo di tecniche estremamente raffinate per la rilevazione di particelle cariche. Naturalmente lo scopo è quello di identificare le particelle, misurarne l'energia e determinarne la direzione di provenienza. Tenuto conto del fatto che le particelle si muovono praticamente alla velocità della luce (una particella impiega circa  $10^{-4}$  secondi per attraversare l'atmosfera terrestre) e tenuto conto anche del loro flusso globale, è chiaro che uno studio sufficientemente dettagliato della complessa fenomenologia dei raggi cosmici ha richiesto l'impiego di tecniche di rivelazione estremamente rapide e di adeguata risoluzione spaziale. Così, per esempio, sono stati costruiti dei rivelatori dotati di una risoluzione temporale di  $10^{-9}$  secondi.

Una descrizione adeguata, e in sé completa, delle varie tecniche richiederebbe molto spazio non solo per la complessità della strumentazione impiegata, ma anche per i problemi derivanti dalla necessità di eliminare eventi spuri e per il fatto che la grande estensione dello spettro dei raggi cosmici impone una differenziazione dei metodi osservativi secondo l'intervallo di energia entro il quale si vogliono compiere le osservazioni. I rivelatori di raggi cosmici maggiormente utilizzati a terra possono essere suddivisi in due categorie: contatori, nei quali viene generato un impulso elettrico al passaggio di ogni particella in un mezzo, e rivelatori visualizzanti, nei quali rimane una traccia del passaggio della una particella.

Per quanto riguarda la prima tipologia, si hanno i classici **contatori di Geiger-Müller** basati sulla ionizzazione di un gas all'interno di una camera, in modo tale che gli ioni prodotti da una particella carica entrante vengano rapidamente moltiplicati da successive ionizzazioni per urto e la corrente istantanea che si produce possa così essere facilmente rivelata.

Per quanto riguarda la seconda categoria di rivelatori, si hanno le **camere a nebbia** a espansione (*camera di Wilson*). Un ambiente gassoso saturo di vapore d'acqua viene portato in uno stato di sovrasaturazione mediante una rapida espansione adiabatica delle pareti. In tali condizioni una goccia d'acqua si condensa intorno a ioni eventualmente presenti nel gas e se l'espansione della camera avviene al momento in cui una particella carica entra nella camera, gli ioni prodotti negli urti della particella con le molecole del gas divengono centri di condensazione che appaiono sotto forma di una traccia di goccioline.

Nel corso degli ultimi anni sono stati fatti grandi progressi nello sviluppo di modelli matematici per analizzare le caratteristiche dei segnali registrati dai rivelatori e per rappresentare la radiazione in funzione della quota. Il tutto tenendo in considerazione sia le particelle cosmiche-solari, sia i raggi gamma presenti in atmosfera. I modelli tengono dunque conto dei dati forniti da satelliti, da palloni stratosferici, da rivelatori di neutroni e muoni a terra e da voli aerei. Quest'ultimi in particolare, come vedremo nel capitolo seguente nella sezione dedicata ai voli in alta quota, sono appositamente progettati per la misura e l'elaborazione tramite software dei livelli di radiazione in atmosfera, soprattutto nelle rotte a Nord, utilizzando ad esempio i rilevatori Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) visibile in figura 2.6.



**Figura 2. 6:** Rivelatore di raggi cosmici nei voli aerei TEPC.

Il più grande osservatorio di raggi cosmici è il **Pierre Auger Observatory** che si estende su un'area di 3000 km quadrati ed è situato in Argentina. Questo è uno degli osservatori capaci di identificare l'estensione degli sciami provocati dai raggi primari.

Auger come altri simili osservatori, sono capaci di rilevare con buona approssimazione la direzione di un raggio cosmico in arrivo (precisione di 1 grado) facendo un accurato uso del tempo di arrivo del segnale nell'array.

Numerosi poi, ad esempio, sono i monitor di neutroni generalmente composti da grossi tubi riempiti di un gas sotto pressione a base di boro ( $\text{BF}_3$ ) annegati in un basamento di piombo e cemento che li isola dalla radiazione ambientale. I monitor di neutroni, così come quelli di muoni, sono distribuiti in varie località su tutto il pianeta come si vede dalla figura 2.7 e danno un grande contributo a ricerche di varia natura come ad esempio quelle meteorologiche e geofisiche.



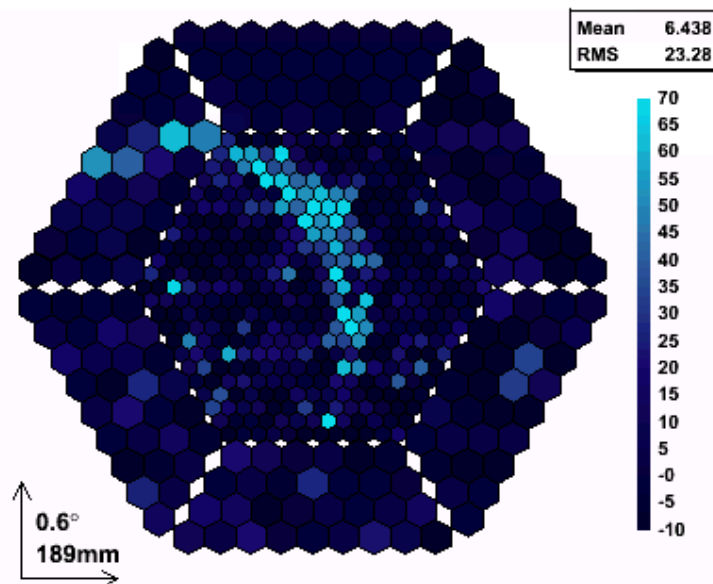
**Figura 2. 7:** Distribuzione dei monitor di neutroni nel mondo.

Importante è anche la tecnologia Cherenkov utilizzata per catturare i raggi gamma. Vengono quindi impiegati particolari telescopi chiamati **Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT)**.

Gli eventi gamma più energetici avvengono in brevi periodi di tempo, nell'ordine di qualche nano-secondo per poi esaurirsi nel giro di decine di secondi a qualche minuto o qualche ora nei prodotti secondari. In questo breve tempo, tutti gli strumenti devono essere coordinati al fine di puntare l'oggetto appena scoperto e a tale scopo viene utilizzato un sistema chiamato telegramma astronomico che in tempo reale trasmette i dati agli osservatori interessati.

Un telescopio situato all'interno dello sciame di particelle riesce ad ottenere una traccia del cono di luce prodotto dal raggio gamma incidente, a condizione che l'area dello specchio sia abbastanza grande da raccogliere fotoni a sufficienza. La ricostruzione dell'esatta geometria dello sciame nello spazio è data invece dal contributo di più telescopi che osservano da diversi punti. Vengono inoltre realizzati dei software con algoritmi calcolati al fine di eliminare i segnali spuri.

I principali osservatori con telescopi Cherenkov sono Magic (Canarie), Hess (Namibia) e Veritas (Arizona). La figura 2.8 mostra un'immagine dei conteggi registrati con un telescopio Cherenkov.



**Figura 2. 8:** Conteggi dei fotoni gamma con la tecnica Cherenkov.

A differenza dei telescopi ottici, i telescopi Cherenkov non necessitano di un CCD di grande risoluzione e non è nemmeno necessaria un'estrema precisione ottica della superficie degli specchi. E' invece richiesta un'estrema sensibilità e il più breve tempo possibile di risposta e, al fine di catturare i deboli fotoni, vengono utilizzati i migliori fotomoltiplicatori oggi reperibili.

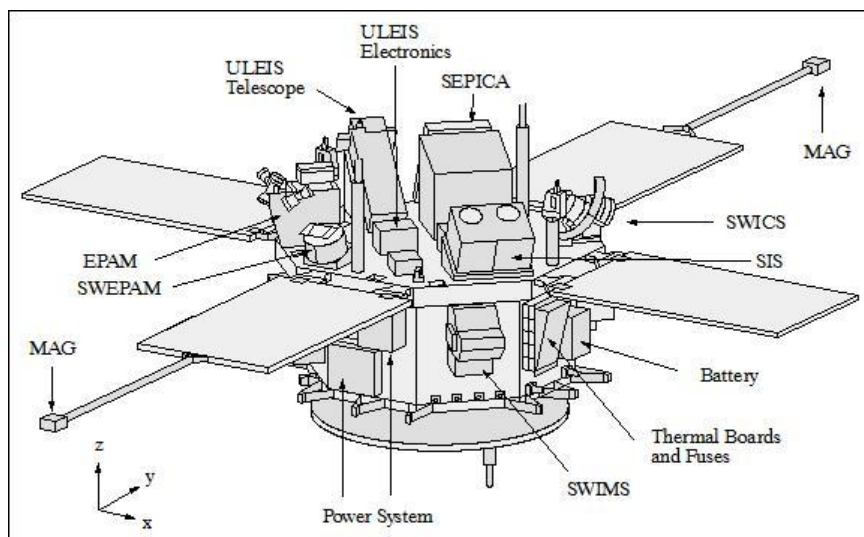
Il telescopio in generale è composto dallo specchio che riflette i raggi nella camera, la quale trasferisce il segnale al sistema di acquisizione. Dati raccolti con questa tecnica, utilizzando telescopi a terra e spaziali, come vedremo nella sezione seguente, indicano che le particelle arrivano da supernove e da nuclei di galassie attive o buchi neri.

A energie  $\varepsilon > 10^5$  Mev è stato dunque possibile mappare l'universo locale con 44 nuclei di galassie attive e 2 galassie ad attiva formazione stellare. A energie minori tra  $10^2$  e  $10^5$  Mev si hanno 1451 sorgenti: 120 galassie, 710 extragalattiche e 630 sconosciute. Per il futuro si stanno sviluppando osservazioni a *multi-wavelength* (MWL) e telescopi ancora più potenti dato che le sorgenti trovate sono poche, vista la grande attenuazione del segnale con la distanza.

## 2.4 Rilevazione dallo spazio

Per determinare il flusso di particelle cosmiche e solari al di fuori dall'atmosfera invece, le misure sono affidate a numerosi satelliti in orbita a diverse altitudini, come ad esempio l'**Advanced Composition Explorer (ACE)** della NASA. ACE misura un ampio intervallo di energie e masse nucleari sotto ogni condizione di vento solare ossia durante massimi e minimi provocati da flares. Fornisce in tempo reale informazioni sull'ambiente spaziale comunicando, nel giro di un'ora, eventuali allerte di stormi geomagnetici salvaguardando le trasmissioni sulla Terra e gli astronauti.

Tra la sua strumentazione è presente uno spettrometro per raggi cosmici in grado di individuare isotopi con numero atomico superiore a quello dello Zinco (es. CRIS); vari spettrometri per ioni del vento solare ad alte e basse energie dall'elio fino al Nickel (es. SEPICA, SIS, ULEIS); monitor per particelle come elettroni e protoni (es. EPAM, SWEAPAM) e magnetometri (MAG). Uno schema di ACE è rappresentato il figura 2.9.

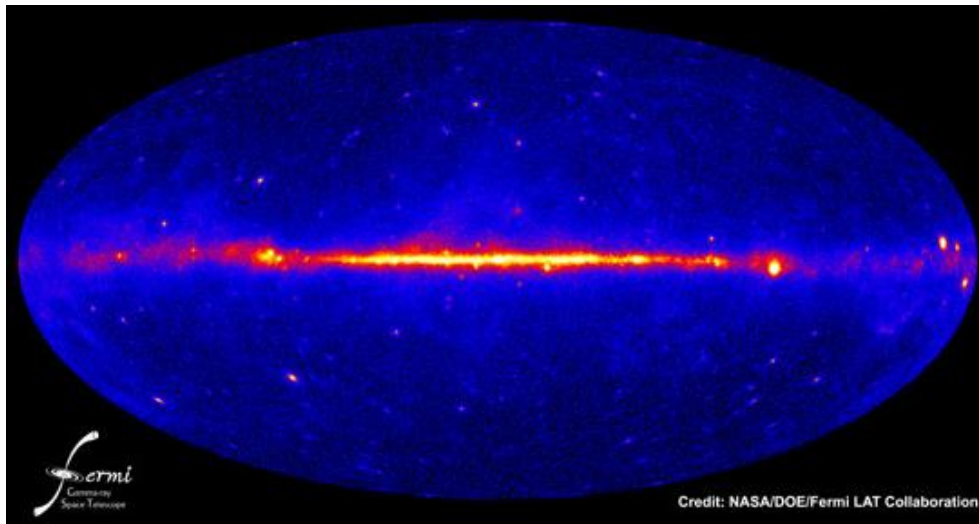


**Figura 2. 9:** Schema delle componenti del satellite ACE.

Un altro esempio è dato dal **Fermi Gamma-ray Space Telescope (GLAST)**, telescopio spaziale per la rilevazione dei raggi gamma della NASA a cui collaborano agenzie di Italia, Francia, Giappone e Svezia. I principali obiettivi del GLAST sono lo studio di lampi gamma, materia oscura, meccanismi di accelerazione di particelle ed emissione di sorgenti come nuclei di galassie attive, pulsar e resti di supernova, oltre che lo studio della radiazione diffusa galattica ed extragalattica di sorgenti gamma non identificate.

I dati da esso raccolti sono pubblicati in tempo reale e messi a disposizione dell'intera comunità scientifica.

Il satellite comprende il Large Area Telescope (LAT) sensibile alla radiazione tra 20 MeV e  $3 \cdot 10^5$  MeV; il Monitor Gamma-ray (GBM) per le energie più basse tra 8 keV e 40 MeV; due rilevatori di lampi gamma. La figura 2.10 mostra la mappa del cielo analizzata durante il lavoro di sei anni da parte del telescopio Fermi, in cui sono visibili le sorgenti isolate al di fuori del disco galattico.



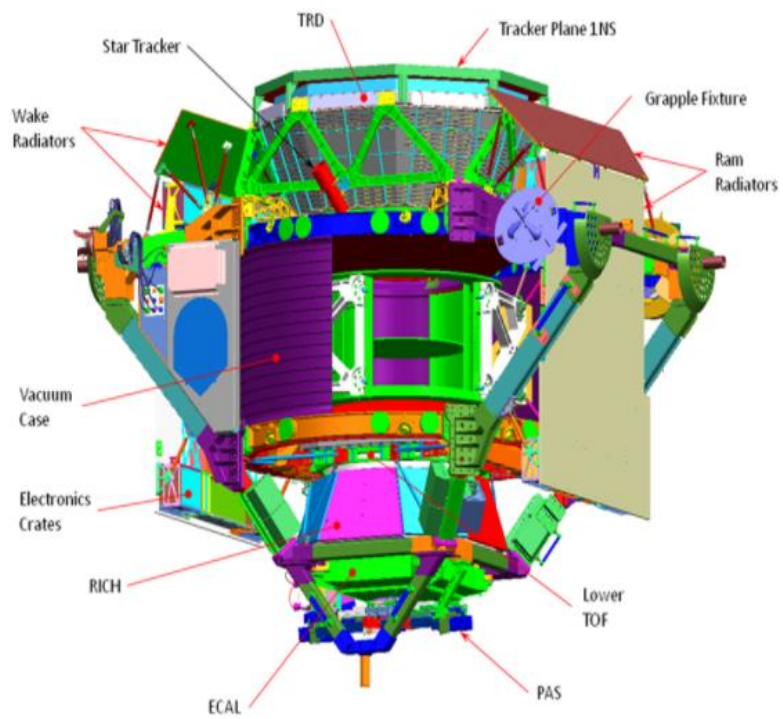
**Figura 2. 10:** *Mappa del cielo osservato in gamma.*

Importante è anche il progetto **Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)** grazie alla collaborazione internazionale di 56 istituti di 16 paesi rappresentati dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE). L'Italia in particolare è il primo contributore e responsabile della realizzazione dei principali strumenti di bordo.

AMS è attualmente agganciato alla Stazione Spaziale Internazionale e ha lo scopo di studiare le particelle cosmiche in cerca di antimateria e materia oscura proponendosi di diventare lo Hubble Space Telescope dei raggi cosmici. AMS misura la composizione della radiazione con un'energia compresa tra i 100 MeV e i  $10^6$  MeV ed è progettato sul modello degli acceleratori del CERN e dei laboratori dell'INFN formato da magneti permanenti e superconduttori i cui rivelatori sono in grado di identificare la tipologia di particelle tramite misure ridondanti di carica, velocità, energia e direzione di moto (es. TRD, TOF, RICH, ACC) com'è visibile dalla figura 2.11.

La realizzazione di AMS ha richiesto lo sviluppo e la qualificazione spaziale di numerose tecnologie tra cui il sofisticato magnete cilindrico superconduttore. La superconduttività è una tecnica che può risultare molto utile nello spazio, garantendo campi magnetici intensi, strutture leggere e zero consumi. Per questo motivo la tecnologia del magnete di AMS risulta interessante per altre applicazioni come la schermatura degli astronauti dalla radiazione cosmica durante lunghi periodi di permanenza nello spazio profondo, sulla superficie lunare o marziana, come vedremo nel capitolo 5.





**Figura 2. 11:** Schema delle componenti del satellite AMS.



# Capitolo 3

## Effetti biologici della radioattività

In questo capitolo analizzo l'aspetto dannoso della radiazione, ossia la sua radioattività sugli uomini.

L'impatto che essa ha è diverso se si effettuano rilevazioni a livello del mare nella vita di tutti i giorni, ad alta quota nella vita degli equipaggi aerei e a livello spaziale nella vita degli astronauti. Dopo un'iniziale spiegazione tecnica, ho riportato analisi e statistiche riguardanti le quantità di dosi assorbite e le conseguenze fisiche subite dall'organismo.

### 3.1 Misurazione della radioattività

Tutti gli organismi viventi, da sempre, sono esposti alla radiazione. Viene definito **fondo di radioattività naturale** la quantità di radiazioni dovuta a cause naturali, che possono essere quindi i raggi cosmici o solari di origine extraterrestre, ma anche di origine terrestre dovuta a isotopi radioattivi di elementi naturali contenuti nella crosta terrestre o a materiali di costruzione oltre che a cibo e acqua.

Alcune esposizioni sono piuttosto costanti e uniformi per tutti gli individui ovunque si trovino, per esempio la dose assorbita in seguito all'ingestione di potassio nel cibo. Altre esposizioni invece dipendono ampiamente dalla località, per esempio dall'altitudine per i raggi cosmici o dalla concentrazione di uranio nel suolo in una determinata zona.

L'esposizione può poi cambiare in base all'attività lavorativa svolta. Le unità di misura correntemente utilizzate nel sistema internazionale per quanto riguarda la radioattività sono il *Gray* (Gy) e il *Sievert* (Sv) o sottomultipli come il *rad* = 0.01 Gy.

Il Gy è espresso come quantità di energia in Joule su 1 Kg di materia (qualsiasi) e si definisce dose assorbita. Quando si parla invece di radiazione su esseri umani si usa il Sv o meglio i suoi sottomultipli (mSv e  $\mu$ Sv). Il Sv tiene conto dei danni provocati dalla radiazione in base al tipo di particella e agli organi colpiti. Si parla di dose equivalente quando si considera uno specifico organo o tessuto, e di dose efficace quando si considera la somma di tutti i tessuti e organi colpiti.

Uno strumento in grado di fornire i valori di dose assorbita equivalente o efficace è chiamato *dosimetro*. La misura della dose di radiazione efficace dà quindi un'idea degli effetti in modo assoluto, per questo è ammesso ad esempio confrontare una schermografia a raggi X con una esposizione ai raggi cosmici, anche se causate da particelle di natura completamente diverse. Questo però può essere fatto solo attraverso strumentazione di misura estremamente complessa che deve poter registrare i valori di radioattività per

specifiche particelle tenendo conto della composizione “chimica” del flusso dei raggi cosmici che varia con la quota. La tabella 3.1 mostra un confronto tra vari tipi di esposizione radioattiva, compresi quelli a cui ogni individuo è sottoposto ogni anno.

SORGENTE	DOSE MEDIA EQUIVALENTE
Fondo naturale	2.4 mSv/yr
Al livello del mare	0.3 mSv/yr
In alta montagna 4000 m	3.67 mSv/yr
Dal suolo	0.29 mSv/yr
Interna al corpo	0.4 mSv/yr
Mangiare del cibo	0.0001 mSv
Gas naturale	2 mSv/yr
Viaggio in aereo (5 ore, es Londra-NY)	0.03 mSv
Viaggio Space Shuttle (9 giorni)	4.1 mSv
Viaggio su Marte andata e ritorno (500 giorni)	circa 1 Sv
Radiografia	0.08 mSv
T.A.C.	10 mSv
Radioterapia	1.5 Sv
30 sedute cancro (zona colpita)	60 Sv

**Tabella 3.1:** Dosi di radiazione assorbita da un individuo.

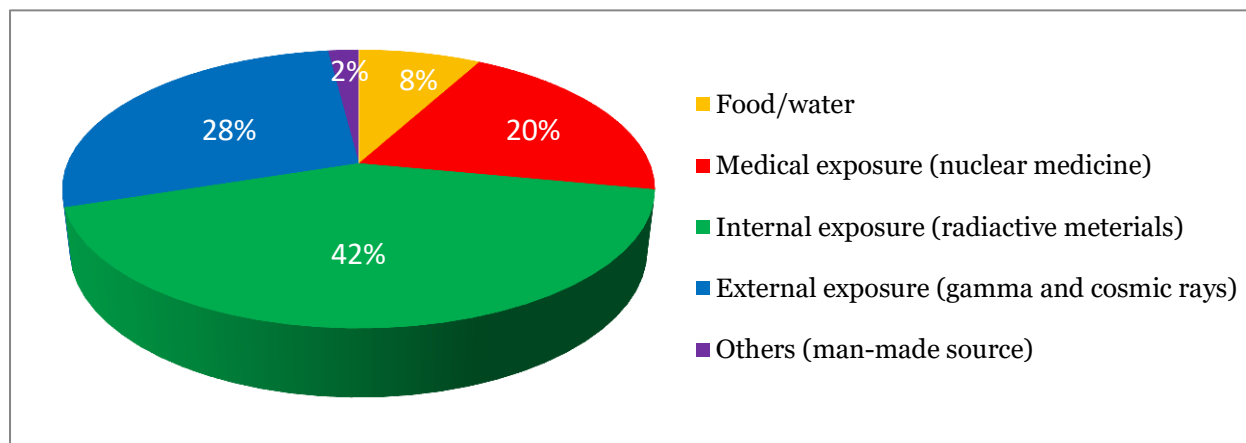
Per quanto riguarda gli **effetti sui materiali**, la radiazione rende necessaria un’attenta scelta degli acciai e delle altre leghe metalliche destinate a operare in ambienti radioattivi, poiché l’accumulo radioattivo ne cambia la composizione chimica e fisica e può far loro perdere le necessarie caratteristiche di resistenza meccanica, stabilità e durata nel tempo, chimica e fisica. Il materiale dunque, se esposto in via permanente alle radiazioni, con il passare del tempo accumula al suo interno e sulla sua superficie isotopi instabili e diventa sempre più radioattivo. Inoltre la radioattività è in grado di rendere inutilizzabile un circuito elettronico basato su semiconduttori alterandone le cariche e producendo correnti indotte. Tali effetti sono trattati nel capitolo 4.

Per gli **effetti biologici** invece, la radiazione distrugge i legami fra molecole (danneggiano le cellule generando radicali liberi) ed altera le grandi macromolecole del DNA e dell’RNA (causando danni somatici e genetici). Tale effetto è prodotto principalmente dalle radiazioni gamma, più energetiche e penetranti delle particelle alfa e beta.

Il momento in cui le cellule sono più vulnerabili, in rapporto alle radiazioni, è quello della riproduzione (mitosi o meiosi), in cui il DNA è in fase di duplicazione, dove le strutture del nucleo sono dissolte e gli enzimi che assicurano l’integrità del materiale genetico non possono operare. L’effetto macroscopico più vistoso della radioattività sulle cellule, è il rallentamento della velocità di riproduzione: le popolazioni di cellule che si riproducono molto rapidamente sono più vulnerabili di quelle che lo fanno lentamente. In virtù di questo fatto, gli organi più sensibili alle radiazioni sono il midollo osseo e il sistema linfatico. A livello dell’intero organismo invece, sia nell’uomo che negli animali superiori si nota un precoce invecchiamento dell’organismo correlato alla dose totale di radiazione

assorbita, sia con forti dosi istantanee che con l'esposizione prolungata a bassi livelli di radioattività.

Secondo la World Health Organization, promoter della “Global Initiative on Radiation Safety in Health Care Settings” nella ricerca nel settore sanitario nell'uso della radiation technology a scopo medico, le sorgenti e la distribuzione media a cui è esposta la popolazione mondiale sono riportate nel grafico della figura 3.2.



**Figura 3.2:** *Esposizione media mondiale a diverse sorgenti.*

Come si può notare al livello del mare la radiazione interna è addirittura superiore a quella esterna, motivo per cui le particelle cosmiche secondarie fortunatamente sono difficili da rilevare al suolo in quanto per la maggior parte vengono bloccate prima di arrivarci. Tali valori cambiano invece notevolmente al crescere della quota, fino a raggiungere un minimo di radiazione interna e un massimo di radiazione cosmica al di fuori dell'atmosfera come vedremo nella prossime due sezioni.

## 3.2 Danni biologici

La direttiva europea Euratom 96/29 sulla radiazione stabilisce come limite di sicurezza per i lavoratori esposti il valore di 100 mSv in un periodo di 5 anni consecutivi, dunque che non eccede i 50 mSv/yr. Il limite per la popolazione in generale è invece stabilito essere di 1 mSv, valore a cui lavoratori minorenni e donne in gravidanza non dovrebbero essere sottoposti. I lavoratori esposti comunque devono beneficiare della sorveglianza medica come definito dall'Art. 30 – 37 dalla direttiva Euratom. Dovrebbero inoltre essere forniti controlli medici straordinari, nel caso di superamento della dose limite stabilita.

L'Italia segue la direttiva Euratom con il decreto legislativo 241 del 2 maggio 2000 che considera come lavoratori a rischio anche chi opera tra 8000 e 15000 metri di quota (equipaggi aerei) e che non devono superare il limite di 20 mSv di dose annua.

Per rendersi conto degli effetti sulla salute, la tabella 3.3 mostra le alterazioni biologiche subite a diverse dosi equivalenti di radiazione da parte di una persona.

EFFETTI BIOLOGICI	DOSE EQUIVALENTE
Alterazione temporanea emoglobina	1 Sv
Nausea, perdita capelli, emorragie	2-3 Sv
Morte nel 50% dei casi	4 Sv
Sopravvivenza improbabile	6 Sv

**Tabella 3.3:** Effetti biologici con rispettiva dose di radiazione assorbita.

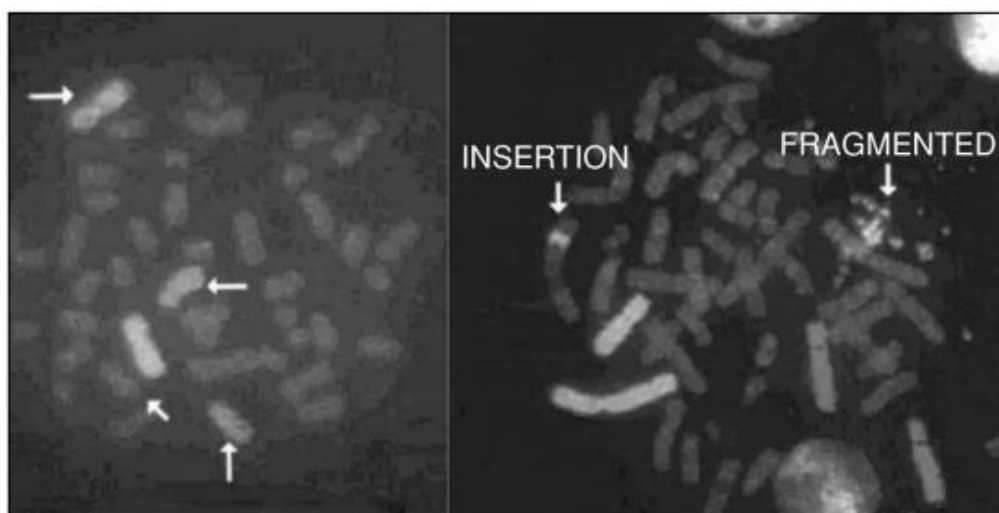
Mentre i neutrini hanno un'interazione molto debole con la materia, ci attraversano senza lasciare traccia, elettroni e muoni interagiscono con le molecole del nostro corpo.

Come anticipato in parte nella sezione precedente, gli effetti biologici causati dalla radiazione possono essere divisi in due categorie: deterministici e stocastici.

Per quanto riguarda gli **effetti deterministici** si manifestano dopo poco tempo dall'esposizione, come può avvenire per astronauti in orbita durante i solar flares. Le conseguenze sono di tipo fisico come nausea, vomito, eritemi cutanei e dermatiti. Nei casi più gravi si hanno emorragie delle mucose e del tratto intestinale, perdita di capelli e peli. Se la dose assorbita non è letale, gli effetti deterministici regrediscono nel giro di alcune settimane, con sopravvivenza e guarigione più o meno completa.

Per quanto riguarda invece gli **effetti stocastici**, essi sono di natura statistica, ossia dipendono dalla probabilità di subire danni al DNA nel corso degli anni. Questo può essere danneggiato in maniera reversibile o irreversibile. Nel caso in cui la struttura del DNA non venisse riparata (o riparata in modo errato) la cellula darebbe vita a una progenie di cellule geneticamente modificate che dopo un certo periodo di latenza potranno dar luogo a patologie come tumori o leucemie. Aumenta pertanto la probabilità che il paziente, prima o poi, venga colpito da certi tipi di tumore. Se le cellule modificate contengono informazioni trasmissibili ereditariamente, gli eredi presenteranno quindi dei disordini genetici.

I membri della Stazione Spaziale Internazionale, ad esempio, indossano ognuno dei dosimetri per misurare il livello istantaneo di radiazione e biodosimetri per valutare il livello di danno ai cromosomi nelle cellule sanguigne. La figura 3.4 mostra un campione di cromosomi colpiti da radiazione cosmica dopo una metafase.



**Figura 3.4:** Cromosomi colpiti da radiazione dopo il processo di metafase.

Poiché non è possibile schermare la radiazione cosmica (servirebbe qualche metro di piombo al di fuori dell'atmosfera), non c'è modo di proteggersi. Le uniche possibilità da prendere in considerazione sono quelle di utilizzare integratori che aiutino a combattere le molecole ossidanti, ovvero combattere i radicali liberi oppure quella di aiutare il sistema immunitario a ricostruire le cellule (e il DNA) danneggiate. Fanno parte degli antiossidanti i classici integratori di vitamine come l'acido ascorbico (vitamina C), il tocoferolo (vitamina E) e il beta-carotene (vitamina A) in combinazione con il selenio ed altri micronutrienti naturali quali vari polifenoli e flavonoidi come il the verde. Anche la melatonina è una delle sostanze che ha mostrato capacità di protezione verso la radiazione e con potere antiossidante superiore a quello delle vitamine C ed E.

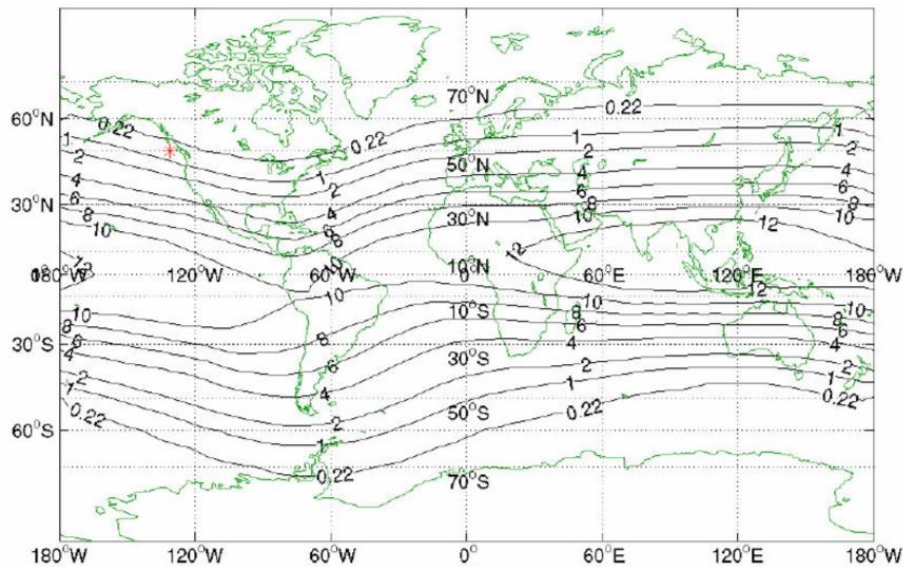
### 3.3 Esposizione in atmosfera

Misurando con dosimetri la dose di radiazione assorbita in montagna, si può notare che fino a 3000 m non si riscontrano grandi differenze rispetto alle quote più basse. A livello del mare, come abbiamo visto, la radiazione cosmica-esterna incide con un valore intorno al 30% sul totale, ma salendo di quota sopra i 3000 m, la percentuale aumenta rapidamente. Quella terrestre-interna invece varia a seconda del tipo di suolo e della qualità dell'aria.

Oltre alla dipendenza dall'altitudine comunque è presente anche una dipendenza dalla latitudine, detta **effetto geomagnetico** dovuto al campo magnetico terrestre. Questo infatti rappresenta una barriera per le particelle cariche che risulta massimo nella zona equatoriale dove le linee di campo magnetico sono praticamente parallele alla superficie terrestre, mentre è nullo ai poli dove le linee sono perpendicolari alla direzione di propagazione delle particelle. Il fatto che l'asse magnetico sia di 11 gradi disallineato rispetto all'asse di rotazione terrestre, inoltre, produce delle zone variabili nel flusso dei raggi cosmici a terra delimitate da linee chiamate *isocosme* in cui a latitudini differenti si possono avere gli stessi valori di radiazione cosmica. La tabella 3.5 riporta le dosi equivalenti in diverse località della terra e la figura 3.6 mostra gli andamenti della *rigidità magnetica* =  $B \times r_G$  con  $r_G$  raggio di girazione delle particelle espressa in GeV.

LOCALITA'	ALTITUDINE	DOSE EQ.	LAT/LONGITUDINE
Osservatorio Sphinx (Jungfrauoch)	3571 m	0.24 $\mu$ Sv/h	46°32' N - 7°59' E
Capanna Punta Penia (Marmolada)	3343 m	0.21 $\mu$ Sv/h	46°27' N - 11° 52' E
Osservatorio-Laboratorio Testa Grigia P. Rosa	3440 m	0.22 $\mu$ Sv/h	45°56' N - 7° 42' E
Capanna Regina Margherita (Monte Rosa)	4556 m	0.41 $\mu$ Sv/h	45°55' N - 7° 52' E
Rifugio Quintino Sella (Monte Rosa)	3585 m	0.24 $\mu$ Sv/h	45°54' N - 7° 47' E
Rifugio Gonella (Monte Bianco)	3071 m	0.18 $\mu$ Sv/h	45°49' N - 6° 49' E
South Base Camp Nepal (Monte Everest)	5364 m	0.40 $\mu$ Sv/h	28°0' N - 86°51' E
Kibo Hut Kilimangiaro (Tanzania)	4700 m	0.28 $\mu$ Sv/h	3° 4' S - 37° 23' E
Rifugio Elena Aconcagua (Ande)	6400 m	0.74 $\mu$ Sv/h	32°38' S - 70°01' O
Base Concordia (Antartide)	3220 m	0.23 $\mu$ Sv/h	75° 5' S - 123° 20' E

**Tabella 3.5:** Dosi radiazione ad alta quota al variare della longitudine/latitudine.



**Figura 3.6:** Rigidità magnetica in funzione di latitudine e longitudine.

Il campo magnetico (o la rigidità magnetica) non blocca le particelle di alta energia, ma riduce l'intensità di quelle a bassa energia. Infatti solo particelle sopra ad una certa soglia possono penetrare all'equatore, mentre quelle con energia inferiore vengono respinte o deviate. La soglia all'equatore per i protoni primari, ad esempio, è di circa  $2 \cdot 10^4$  MeV.

Come si può notare l'intensità dei raggi cosmici aumenta dall'equatore verso i poli con una variazione del 15 – 30% a seconda della latitudine. Questo significa che a parità di quota, la radiazione è maggiore ad esempio sulle Alpi (45°N) rispetto alla vetta del Kilimangiaro (3° S).

Particolare interesse rivolgo alla radiazione in alta quota nei voli aerei. Le rotte aeree internazionali negli ultimi decenni sono cambiate radicalmente per via del periodo di distensione politica internazionale e le rotte che prima erano proibite, come si vede dalla figura 3.7, ora sono normalmente praticate da diverse compagnie aeree.

Il riferimento va a quelle che attraversano i poli, dove la radiazione è maggiore in assoluto. Attraversare i poli del resto fa risparmiare parecchio carburante e questo è il motivo che giustifica la scelta delle compagnie aeree.

La dipendenza tra la radiazione e la quota è un parametro importante per l'aviazione civile che può così mitigare gli effetti volando ad una quota più bassa. I Jet privati invece, generalmente assorbono più radiazioni in quanto seguono rotte più elevate tra 12 e 13 km.



**Figura 3.7:** Rotte aeree commerciali negli ultimi 20 anni.



L'attenzione per la radiazione in aereo è attestata dalla Commissione Internazionale sulla Protezione Radiologica, dall'Agenzia per la protezione Ambientale americana, dall'Amministrazione Federale per l'Aviazione statunitense e dall'Euratom, quest'ultimo precedentemente citato. Tutti questi enti considerano gli equipaggi dei voli aerei commerciali come lavoratori radiologici al pari di operatori di centrali nucleari. Tuttavia a differenza di quest'ultimi, non tutti gli stati sottopongono gli equipaggi di volo a controlli medici periodici, ne tantomeno i passeggeri sono informati dei potenziali rischi.

La quantità di dose efficace assorbita in un volo è inoltre strettamente legata anche all'**attività solare**. In questa condizione, la radiazione ricevuta dai passeggeri a bordo di un aereo o gli astronauti che si trovano nello spazio, può essere fino a cento volte più alta delle condizioni normali. Durante una tratta Londra-NY ad esempio, mentre di norma si rilevano 0.03 mSv, in piena attività solare si arriva a 0.054 mSv. Ciò significa che circa 15 voli a tale esposizione sono sufficienti a raggiungere il limite annuo consentito per una persona normale di 1 mSv (pari a circa 15 radiografie).

Come già anticipato nel capitolo precedente, l'organizzazione di tutti i dati ricavati dai vari strumenti in orbita e a terra hanno permesso la creazione di diversi modelli di simulazione e previsione della radiazione cosmica utilizzati soprattutto nelle rotte aeree per garantire la sicurezza di un'esposizione minima.

Tra i principali elaboratori si hanno: CARI, sviluppato dall'Amministrazione Federale per l'Aviazione (FAA) in USA, tramite il quale è possibile fare simulazioni di volo inserendo online i dati degli aeroporti di partenza, di destinazione e calcolare la dose di radiazione assorbita; EPCARD, che utilizza un codice di Monte Carlo, uno tra i più attendibili sistemi di simulazione di raggi cosmici in atmosfera; PC-AIRE un modello semi-empirico basato su dati misurati, utilizzabile online per determinare la radiazione assorbita in volo; NAIRAS (Nowcast of Atmospheric Ionizing Radiation for Aviation Safety) è uno dei modelli più completi e di ultima generazione per la determinazione della dose di radiazione assorbita nei voli aerei creato con l'obiettivo di monitorare in tempo reale i livelli di radiazione dal suolo fino a 100 km di quota. Quest'ultimo, in particolare, elabora i dati in funzione del codice di calcolo **High Charge and Energy Transport (HZETRN)** della NASA, un sistema che misura la distribuzione della radiazione ionizzante in atmosfera e tiene conto dei rilevamenti in real-time del flusso di protoni a bassa energia ottenuti dal rilevatore EPAM del satellite ACE.

HZETRN è utilizzato in un'ampia gamma di applicazioni riguardo alla radiazione del trasporto aereo, come ad esempio il calcolo dosimetrico associato ai rischi per gli astronauti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale o dello Space Shuttle.

Esiste un altro algoritmo integrato in NAIRAS, ossia l'**International Geomagnetic Reference Field (IGRF)**, tramite il quale è possibile determinare l'influenza del campo magnetico sulla radiazione. Al momento nessun modello, compreso NAIRAS, tiene conto della forma e dello spessore degli scafi degli aerei che potrebbero, secondo alcuni studi, ridurre la radiazione dovuta ai raggi cosmici di circa il 10% e quelli solari dell'1%.

## 3.4 Esposizione nello spazio

Alzandosi sempre di più di quota, l'incidenza della radiazione cosmica e solare rappresenta quindi uno dei principali problemi per i voli spaziali. In questi viaggi la radiazione dipende dal livello di **esposizione spaziale**, ossia in base al luogo in cui ci si trova, che sia in prossimità dell'atmosfera terrestre, nello spazio aperto, sulla luna o nella superficie marziana. Diversamente dagli astronauti della Stazione Spaziale Internazionale ad esempio, che si trovano in prossimità dell'atmosfera, sulla Luna (384 mila km dalla Terra) o su Marte (56 milioni di km dalla Terra), gli astronauti e i loro veicoli non sono protetti dal campo magnetico terrestre. Per queste missioni è quindi necessaria una maggiore protezione a causa della ricezione di dosi mortali di radiazioni, soprattutto durante i periodi di massima emissione solare, come vedremo nel capitolo 5.

Per effettuare viaggi interplanetari servono satelliti rilevatori per monitorare costantemente il meteo spaziale per conoscere la variazione della quantità di radiazione in circolazione. Il rover Curiosity ad esempio, mandato su Marte nel 2011 alla ricerca di vita extraterrestre, ha portato tra i suoi strumenti anche il rilevatore RAD (Radiation Assessment Detector). Lo strumento è stato costruito appunto per capire il grado di radiazione assorbita nell'ottica di inviare in futuro un equipaggio umano sul pianeta rosso.

I risultati emersi finora riportano che un viaggio di andata e ritorno con qualche giorno di permanenza su Marte, per gli astronauti farebbe assorbire in totale circa 0.7 Sv (circa 2 mSv al giorno). Secondo alcuni esperimenti della NASA questa dose sarebbe inaccettabile e per gli astronauti farebbe aumentare fino ad un massimo del 20% il rischio di sviluppare un tumore. I valori si possono confrontare con i 12 mSv delle missioni Apollo, la radiazione stimata durante i 12 giorni di missione lunare, in cui gli equipaggi erano sottoposti direttamente a raggi cosmici galattici e al vento solare. Nonostante ciò, si può notare che quasi tutti gli astronauti coinvolti nelle missioni Apollo hanno raggiunto un'età avanzata. Fanno eccezione però Alan Shepard (Apollo 14), Jack Swigert (Apollo 13), Dake Slayton (Apollo Soyuz) deceduti per tumori. Nessuno può comunque affermare con assoluta certezza che le loro malattie siano state causate dalla loro attività nello spazio.

Per oltre 35 anni, la NASA ha monitorato le dosi di radiazione ricevute da tutti gli astronauti che hanno viaggiato nello spazio con Gemini, Apollo, Skylab, Space Shuttle, Mir e Stazione Spaziale Internazionale. Nonostante l'attuale incertezza sulla natura e sull'intensità dei rischi associati alle radiazioni spaziali, i dati sulle quantità e composizioni stanno diventando sempre più efficaci, aiutando i ricercatori ad identificare gli effetti biologici della radiazione per salvaguardare la salute degli astronauti.

Esistono infatti limiti di esposizione per un astronauta che dipendono in primo luogo dall'età e dal sesso, come si può notare dalla tabella 3.8. Secondo il "NASA limit for radiation exposure" a basse orbite si possono assorbire al massimo 0.5 Sv/yr, ma questo valore è minore per gli astronauti più giovani. Sebbene si presuppone che quest'ultimi vivano di più rispetto un astronauta più vecchio, l'esposizione nelle fasi iniziali della loro carriera potrebbe presentare rischi maggiori di salute durante l'età avanzata. Per orbite più alte, includendo i viaggi spaziali, la dose massima invece è inevitabilmente più alta.

AGE	25	35	45	55
MALE	1.5 Sv	2.5 Sv	3.25 Sv	4 Sv
FEMALE	1 Sv	1.75 Sv	2.50 Sv	3 Sv

**Tabella 3.8:** Limiti di esposizione in carriera di un astronauta.

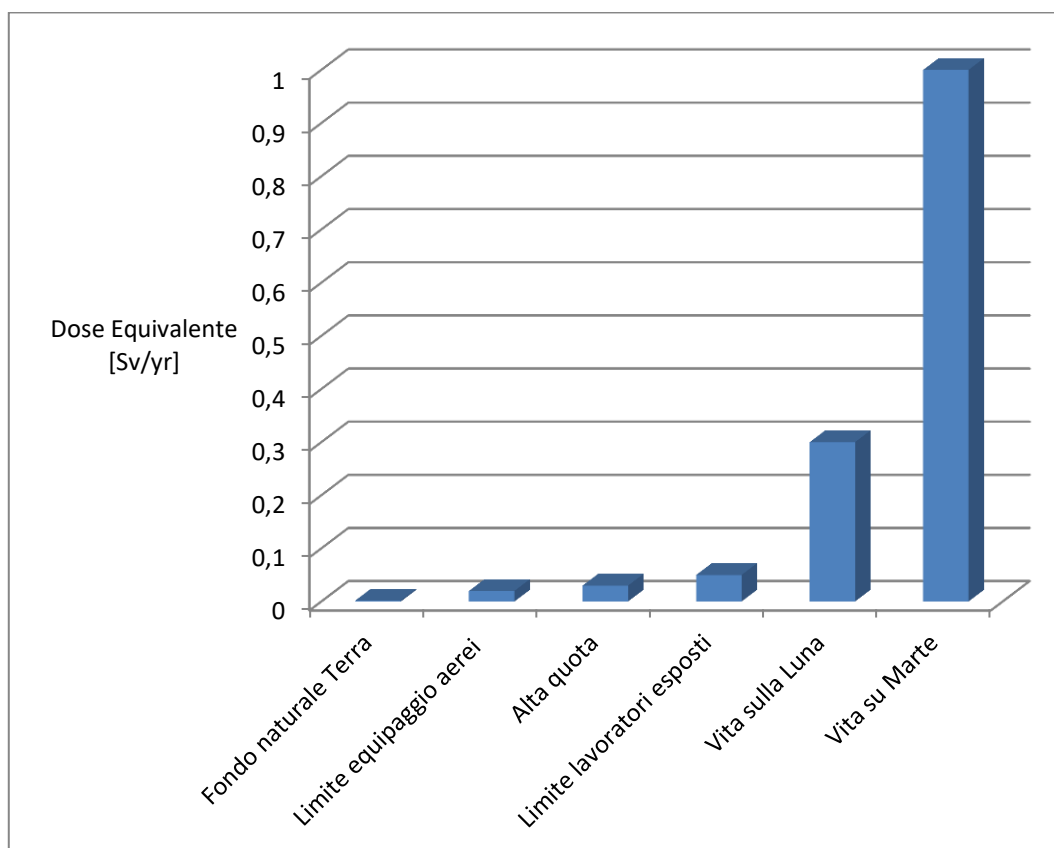
La seguente tabella 3.9 invece, mette a confronto i limiti dell'esposizione specifica tra un astronauta e una persona comune per determinati organi corporei.

	Exposure Interval	Blood Forming Organs	Eyes	Skin
Astronauts	30 Days	0.25 Sv	1 Sv	1.5 Sv
	Annual	0.5 Sv	2 Sv	3 Sv
	Career	1-4 Sv	4 Sv	6 Sv
General Public	Annual	0.001 Sv	0.015 Sv	0.05 Sv

**Tabella 3.9:** Limiti di esposizione per profondità di penetrazione in diversi organi.

Gli equipaggi nei veicoli spaziali dunque ricevono una media totale di circa 2 Sv in una permanenza di un anno nello spazio (superando di gran lunga il limite dei 0.5 Sv/yr delle basse quote spaziali), mentre nella terra noi ne riceviamo in media 2 mSv.

Il grafico della figura 3.10 schematizza indicativamente l'andamento della dose equivalente annua assorbita dall'uomo in alcune delle condizioni affrontate in questo capitolo.



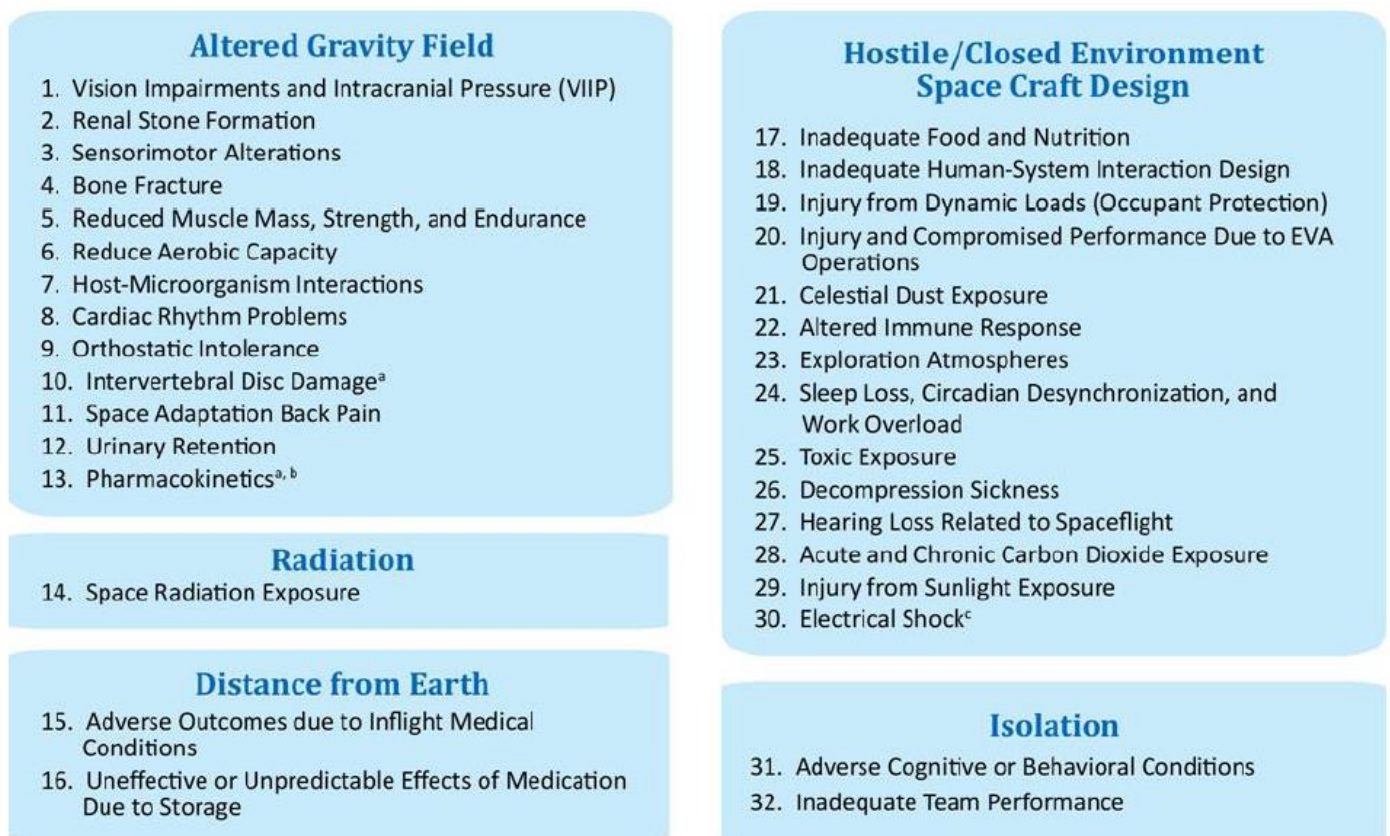
**Figura 3.10:** Paragone tra le dosi equivalenti in diversi ambienti.

Il Mars Radiation Environment Experiment (MARIE), lanciato nel 2011 per raccogliere dati sulle radiazioni, ha stimato che l'esposizione di un astronauta nello spazio interplanetario è pari a 400 – 900 mSv/yr, mentre su Marte un umano sarebbe esposto a circa 500 mSv– 1.2 Sv/yr. Sulla Luna invece si possono raggiungere i 300 mSv/yr. Queste dosi dunque eccedono rispettivamente gli 1 – 4 Sv imposti dal limite di carriera per basse orbite.

Per affrontare ciò, la NASA e i suoi partner stanno effettuando una serie di studi a terra e nella Stazione Spaziale Internazionale. Per esempio, nel 2015, la NASA ha lanciato l'astronauta Scott Kelly nella prima missione annuale nella stazione. Hanno successivamente comparato i dati della sua salute in confronto a quelli del fratello gemello Mark Kelly, con la speranza di ricavarne ulteriori conoscenze riguardo agli effetti sul corpo umano provocati della vita nello spazio.

Molti uffici NASA giocano quindi un ruolo importante nello sviluppo per affrontare queste problematiche, come la Human Exploration and Operations Mission Directorate (HEOMD), la Human Health and Performance (HHP) Directorate e la Human Research Program (HRP).

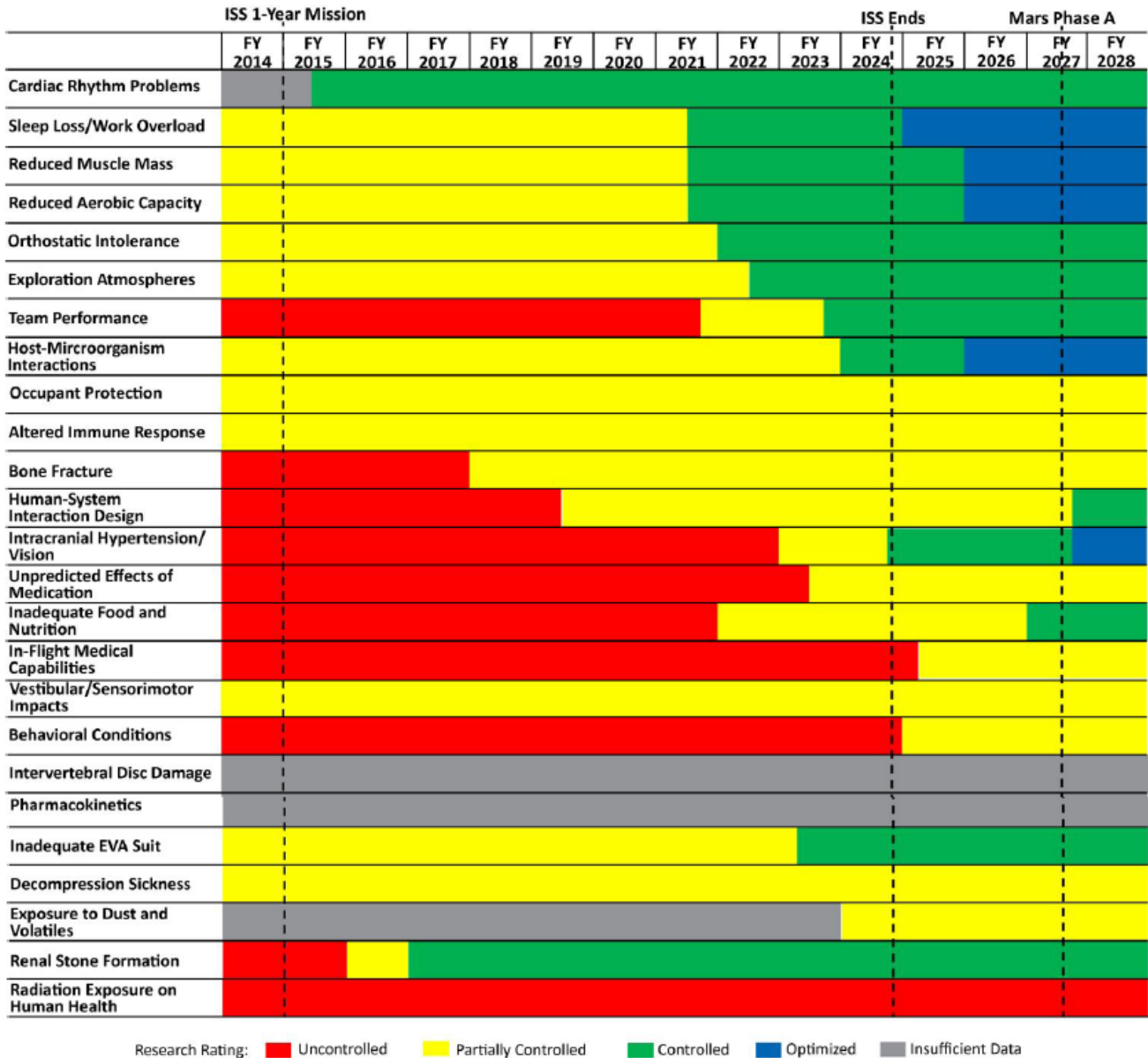
La NASA ha così identificato circa 30 principali rischi riguardanti la salute e la performance umana nei viaggi spaziali, in cui è inclusa ovviamente anche la radiazione cosmica. La figura 3.11 mostra l'elenco di queste possibili problematiche valutate da HHP.



**Figura 3. 11:** *Principali rischi valutati da HHP nell'ambiente spaziale.*

Un ulteriore esempio di queste analisi è possibile osservarlo dai dati raccolti da HRP nella figura 3.12. Dalle valutazioni dei rischi biologici è stato stimato una possibile vita di 15 anni su Marte, in cui anno per anno è riportato l'andamento delle condizioni umane.

Alcuni problemi con gli anni possono essere controllati, altri restano per la maggior parte del tempo un ostacolo alla vita, come ad esempio l'esposizione alla radiazione. Il rischio legato a questo fattore rappresenta quindi la principale complicazione nei viaggi spaziali e per questo motivo sono attualmente in atto numerosi test per migliorare l'efficienza delle sonde spaziali e delle tute spaziali, temi trattati nei capitoli seguenti.



**Figura 3. 12:** Andamento condizioni umane in 15 anni valutate da HRP.



# Capitolo 4

## Rimedi tecnologici aerospaziali

In questo capitolo descrivo le analisi ingegneristiche aerospaziali per il problema della radiazione cosmica e solare. Riporto a riguardo le procedure necessarie utilizzate nei veicoli spaziali, specialmente nei satelliti, per prevenire i danni a circuiti e materiali al di fuori dell'atmosfera, elemento particolarmente importante per lo studio dell'ambiente orbitale.

In particolare, mi soffermo anche sull'avanzamento tecnologico e sui metodi di protezione nei viaggi spaziali per le future missioni riportate nel capitolo seguente.

### 4.1 Danni ai satelliti

L'**ambiente spaziale** ha una forte influenza sulle prestazioni dei satelliti. Le loro interazioni nello spazio e nell'atmosfera condizionano fortemente la performance e il tempo di vita dei sistemi operativi spaziali che interessano direttamente la loro dimensione, peso, complessità e costi.

Le possibili degradazioni sono dovute alle radiazioni che raggiungono la superficie del satellite e i componenti elettronici che possono portare a malfunzionamenti costanti, erosioni superficiali colpendone proprietà termiche e elettriche o anche la perdita di componenti o sottosistemi compromettendone la struttura.

Si hanno danni superficiali, dovuti a particelle a bassa energia come fotoni solari dalle frequenze UV alle radio, atomi e le molecole dell'atmosfera, plasma ionosferico, polveri e microdetriti; e in più, al crescere dell'energia, si hanno danni dovuti alla penetrazione della radiazione all'interno del satellite da parte di raggi cosmici, fotoni dai raggi gamma alla banda dell' X, polveri più pesanti. Il plasma dell'ambiente spaziale, specialmente nelle orbite geosincrone, può dunque causare cambiamenti di carica nelle componenti di un satellite nella superficie del veicolo. Radiazioni più energetiche possono inoltre produrre scariche elettrostatiche nei circuiti di bordo disturbando i segnali o le operazioni dei dispositivi.

Una buona valutazione dei potenziali effetti è una parte essenziale della progettazione per la realizzazione di ogni elemento del satellite. Lo studio approfondito dell'ambiente mostra che un buon progetto bilanciato con una attenta scelta delle varie tecnologie può assicurare la sopravvivenza del satellite.

Per ogni missione si ha una **valutazione della dose cumulata** di radiazione poiché essa varia a causa della durata, vicinanza al Sole e dell'orbita (altitudine ed inclinazione) nel caso di un satellite.

I raggi cosmici e le particelle solari perdono rapidamente energia nei materiali attraverso ionizzazione. Questo trasferimento di energia può infatti corrompere o

danneggiare elementi di memoria cambiando gli stati di singoli bit determinando i cosiddetti *single event phenomena* del componente riportati in dettaglio nella sezione seguente.

Inoltre gli elettroni energetici possono penetrare schermi e depositare cariche in materiali interni dielettrici come cavi o altri isolanti, e su parti metalliche non messe a massa. Queste possono successivamente creare una scarica generando interferenze elettromagnetiche e non degradazioni del componente. Oltre alla **valutazione dei Single Event Phenomena** quindi si effettua anche la **valutazione del caricamento superficiale**.

Le particelle poi, possono perdere energia attraverso interazione non-ionizzante, “displacement damage” o danneggiamento del volume, dove gli atomi vengono spostati dalla loro posizione originale. Questo può alterare le proprietà elettriche, meccaniche o ottiche dei materiali ed è un importante meccanismo di danneggiamento per i componenti optoelettronici (CCD, celle solari, optocoupler, etc.) e bruciamento di filtri ottici riducendo le trasmissioni per cui si effettua la **valutazione del displacement damage**.

Per quantificare questi effetti esistono diversi modelli che sono utilizzati per supportare la scelta dell’orbita, la selezione dei componenti e l’ottimizzazione della densità degli schermi protettivi. Tutto ciò è basato naturalmente sulla valutazione degli impatti sui tempi, costi e prestazioni.

Le tipologie di componenti più sensibili alle radiazioni sono: Transistor (Bipolari e FET), Power MOSFET, Diodi, Micrologici Digitali, Micrologici Lineari.

Il rischio derivante dalla vulnerabilità dei circuiti elettronici a queste particelle è quantificabile usando come unità di misura il *fit*, ossia il *failure in time*. Un singolo fit corrisponde a un errore per transistor su un miliardo di ore di calcolo. Può sembrare poco, ma se si pensa che ognuno dei nostri dispositivi elettronici, di transistor, ne può contenere miliardi, il problema diventa statisticamente significativo, considerando che la maggior parte dei componenti elettronici ha un failure rate nell’ordine delle centinaia, se non migliaia, di fit. Esistono una serie di procedure tecnologiche che permettono di ridurre gli effetti dovuti alla radiazione sui circuiti com’è spiegato nelle sezioni seguenti.

## 4.2 Single Event Phenomena

La radiazione rappresenta un grosso rischio in quanto singole particelle possono causare malfunzionamenti nelle componenti elettroniche. Quando una particella passa in un dispositivo causando alterazioni, si hanno effetti di radiazione per **single event phenomena (SEP)**. Questi eventi includono tre diversi effetti nelle componenti elettroniche. La prima è chiamata *bitflip* o **single event upset (SEU)**, in cui non viene recato un danno significativo, ossia non interferisce con le operazioni del dispositivo. La seconda è il **single event latchup (SEL)**, in cui la parte colpita registra un’eccessiva corrente o la totale assenza e non può operare finché il dispositivo non viene spento per poi essere ristabilita.



L'eccessiva corrente però può distruggere il dispositivo se la potenza raggiunta non è supportata. Il terzo effetto sono quindi i **single event burnout (SEB)** che causano il fallimento permanente del dispositivo.

Sono riportati nella tabella 4.1 una serie di SEP più comuni con la loro sigla e spiegazione.

SF	Soft error. Storage element (memory cell, latch, or register) state change. No hardware damage and is correctable.
SET	Single event transient. A glitch caused by single event effect, which travels through combinational logic and is captured into storage element.
SEU	Single event upset. Storage element state change, may affect a single bit or multiple bits.
SBU	Single bit upset. A single storage location upset from a single strike.
MCU	Multiple cell upset. Multiple storage locations upset from single strike.
MBU	Multiple bit upset. Multiple upsets in a logic word from single strike.
SEL	Single event latchup. The event creates an abnormal high current state by triggering a parasitic dual bipolar circuit, which requires a power reset. It can possibly cause permanent damage to the device, in which case the result is a hard error.
SER	Soft error rate. The statistical probability of a soft error over time typically specified in FITs.
FIT	Failure in time. One failure per $10^9$ device operating hours.
SEFI	Single event functional interrupt. A functional failure caused by an SEP.
SEFI ratio	The ratio of number of SEP events divided by the number of functional interrupts or failure.
SEGR	Single event gate rupture, damage of the gate oxide and the resulting current path.
SEB	Single event burnout, creation of high current state resulting in device damage.

**Tabella 4.1:** Definizioni relative a single event phenomena.

Mentre la radiazione non ionizzata è dannosa, ma facilmente schermata in quanto i raggi UV, IR, microonde e radio hanno basse energie, la radiazione ionizzata invece è più difficile da evitare. Questa, avendo energie elevate, può penetrare attraverso qualsiasi sostanza e alterarla. Quando accade, ionizza gli atomi del materiale con cui interagisce.

Perdono energia principalmente per ionizzazione i raggi cosmici (ioni, gamma, X). Questa perdita dipende soprattutto dal quadrato della carica del materiale e può essere incrementata se la particella subisce interazioni nucleari con una parte elettronica. Tale fenomeno è descritto dalla formula di Bethe considerando particelle di carica  $Z$  che attraversano una densità elettronica per unità di volume  $N_e$ , per una distanza  $dx$ . La variazione di energia  $\mathcal{E}$  è:

$$-\frac{d\mathcal{E}}{dx} = 4\pi N_e r_e^2 \frac{Z^2}{\beta^2} \left( \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right)$$

con  $r_e$  e  $m_e$  raggio e massa classici dell'elettrone,  $\delta(\gamma)$  correzione di densità e  $I$  potenziale di ionizzazione del materiale.

Quando il raggio cosmico entra nel materiale attraversando i diversi layers di protezione, esso separa le cariche del dispositivo creando una scia di ionizzazione con elettroni liberi e il campo elettrico generato gli spazza via creando un buco. Se l'energia rilasciata è poca, il buco nei layers si chiude in seguito ad una ricombinazione di carica tornando allo stato normale. Se l'energia rilasciata è elevata, quando la scia attraversa una regione di esaurimento, gli elettroni sono velocemente attratti da un alto voltaggio che causa un cambio di carica nei circuiti nelle celle delle memorie, interferenze elettromagnetiche, rotture di gate, frozen bits e rumore nel CCD. Il dispositivo registra quindi un errore.

Le particelle che causano SEP sono principalmente ioni pesanti, protoni e neutroni, contenuti sia nei raggi cosmici galattici che nelle particelle solari e hanno un diverso effetto nell'attraversamento di un materiale. Mentre gli ioni pesanti creano scie di ionizzazione, i protoni che si trovano principalmente intrappolati nelle fasce di Van Allen, a contatto con un materiale causano reazioni nucleari e creano un effetto di ionizzazione indiretta producendo l'errore. I due effetti sono visibili nella figura 4.2.

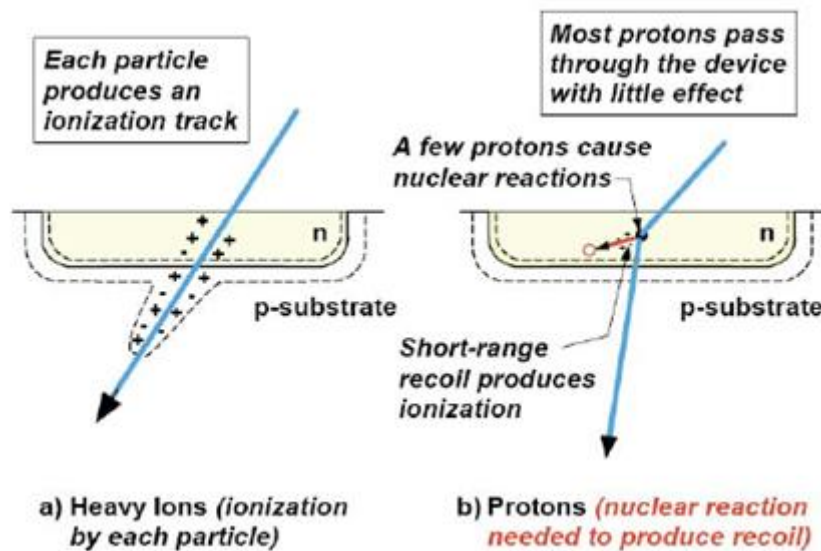


Figura 4.2: Principali interazioni tra particelle e materiale.

Uffici NASA dedicati alla Single Event Effect Criticality Analysis (SEECA) selezionano i dispositivi e il loro utilizzo, mentre la Draft Single Event Effects Specification (DSEES) definisce e classifica le tipologie di SEP.

### 4.3 Effetti dell'alta atmosfera

L'alta atmosfera terrestre influenza molto la performance e la vita dei sistemi spaziali in orbita attorno alla Terra per numerosi effetti come quelli dovuti alla presenza del campo magnetico, ai drag aerodinamici, al riscaldamento, alla corrosione dovuta ad elementi

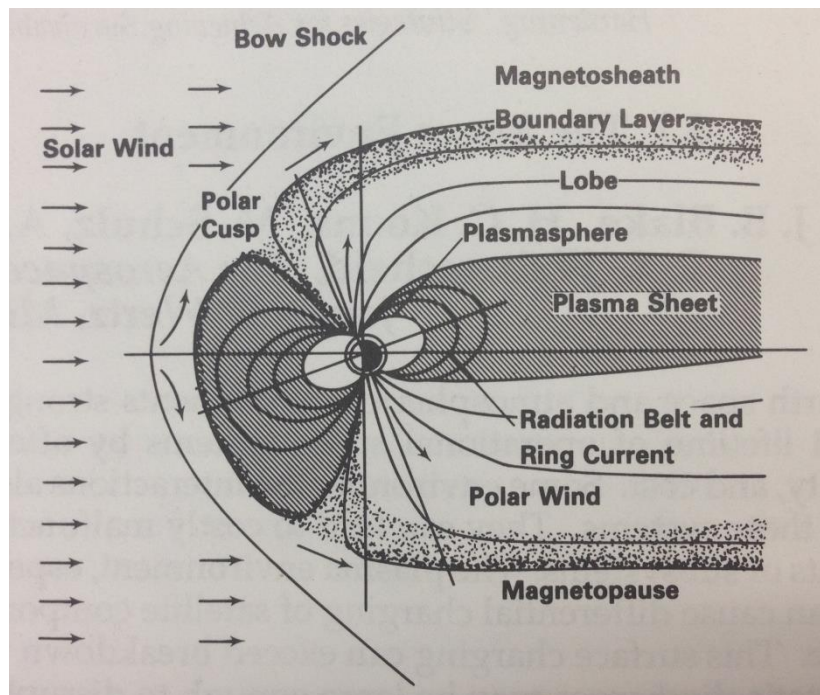
reattivi come l'ossigeno atomico e in generale alle particelle energetiche. Il campo magnetico terrestre è circa dipolare con

$$B(R, \lambda) = (1 + \sin^2 \lambda)^{\frac{1}{2}} \frac{B_0}{R^3}$$

dove  $B$  è l'intensità del campo magnetico locale,  $\lambda$  è la latitudine magnetica,  $R$  la distanza radiale e  $B_0$  il campo magnetico all'equatore nella superficie terrestre (pari a 0.3 Gauss con  $R = R_{\text{terra}}$  e  $\lambda = 0$ ). Come mostrato in figura 4.3, l'interazione tra il vento solare e il campo magnetico terrestre causa la **magnetotail**. Una stretta *plasma sheet* biforca la magnetotail che si estende per oltre 1000 raggi terrestri parallelamente alla velocità del vento solare.

Attraverso l'interazione tra il vento solare e il campo magnetico terrestre, l'energia cinetica delle particelle viene convertita in energia magnetica nella magnetotail. Visto che questa non può raccogliere energia all'infinito, viene dissipata di volta in volta da tempeste magnetiche. Queste producono un plasma energetico (5 – 20 keV) che è iniettato verso la terra.

Questo plasma caldo può estendersi in un'orbita geosincrona, caricando la superficie di ogni satellite ad alti voltaggi negativi. Si misura quindi il potenziale elettrico raggiunto rispetto al plasma in cui è immerso, ossia le correnti indotte da elettroni e da ioni al veicolo, le correnti secondarie, le correnti di backscattering e le correnti fotoelettroniche.



**Figura 4.3:** Distribuzione della magnetotail terrestre.

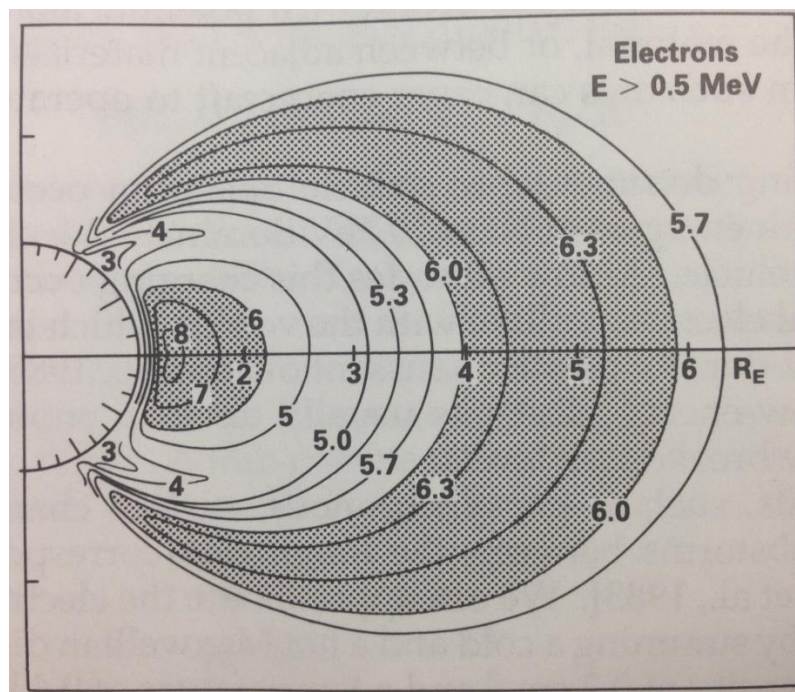
Il voltaggio delle superfici delle componenti inoltre dipende dalle capacità del materiale. Dal momento che i materiali hanno coefficienti di emissione e correnti fotoelettriche diverse, anche il loro potenziale di equilibrio è diverso. Interferenze elettromagnetiche causate da queste radiazioni possono, come abbiamo visto, causare operazioni errate ossia malfunzionamenti del satellite.

Tenendo conto di questi effetti è possibile selezionare materiali e rivestimenti conduttivi, applicando modelli analitici, usando le loro caratteristiche quantificabili e determinando il loro potenziale in diversi ambienti spaziali.

Si può infatti ricavare la quantità di protezione per i futuri satelliti calcolando il tasso di radiazione nell'orbita desiderata in funzione dello spessore dello schermo. Per fare ciò è necessario conoscere l'andamento della radiazione dell'ambiente spaziale al variare del campo magnetico. Mentre la radiazione nelle fasce di Van Allen è permanente, costituita da elettroni e ioni aventi energie più di 30 keV distribuite non uniformemente nella magnetosfera, si hanno *L shell magnetiche* generate dalla rotazione delle linee del campo magnetico attorno all'asse del dipolo date approssimativamente dall'equazione

$$R = L \cos^2 \lambda$$

con R distanza in raggi solari dal punto ideale di dipolo al centro della Terra,  $\lambda$  la latitudine magnetica, L il valore del dipolo magnetico della shell. Questo andamento armonico perturba le particelle cariche dalle loro traiettorie. Per questo motivo si possono suddividere L zone com'è visibile dalla figura 4.4, ognuna con il suo livello di radiazione. I valori indicati rappresentano il log del flusso di particelle in  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , mentre l'asse orizzontale è l'equatore magnetico in unità di raggi terrestri.



**Figura 4. 4:** Flusso di elettroni nelle shell magnetiche.

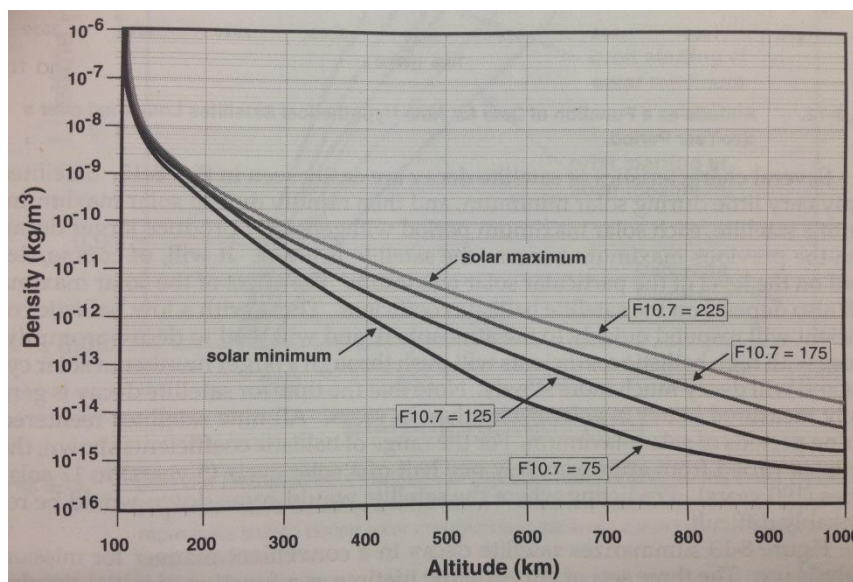
Le particelle quindi possono essere intrappolate in un'orbita geosincrona e se hanno sufficiente energia possono penetrare i materiali di cui è costituito il satellite.

Ciononostante molti protoni e ioni intrappolati in questa regione di spazio hanno energie da 10 a 200 keV. Avendo poca energia possono danneggiare il satellite in un altro modo, ossia depositando la loro energia sulla superficie, aumentandone la temperatura che emette in infrarosso. Ciò può degradare l'efficienza degli schermi rompendone i legami chimici nella loro superficie. Sfortunatamente non ci si può proteggere da questi effetti.

Gli effetti di **drag aerodinamico** e **riscaldamento** sono importanti durante il lancio e il rientro. Dipendono dal coefficiente balistico, velocità relativa del vento e densità atmosferica. Forti drag si hanno a densità atmosferiche elevate, infatti satelliti con perigeo sotto i 120 km hanno poca vita e orbite non praticabili. Oltre i 600 km i drag invece sono deboli così che l'orbita può durare anche 10 anni ossia per tutto il tempo di vita dell'operazione del satellite. A questa altitudine inoltre, le perturbazioni al periodo orbitale sono deboli e la densità atmosferica può essere trascurata. Ad altitudini intermedie, le variabili energetiche sono maggiori e causano maggiori perturbazioni orbitali che possono essere predette con due modelli empirici: the Mass Spectrometer Incoherent Scatter (MSIS) e Jacchia.

In particolare altitudini tra 120 e 600 km sono entro la termosfera. Questa regione inizia circa a 90 km, dove l'assorbimento della radiazione solare aumenta la temperatura con l'altitudine. A 200 – 250 km, questa temperatura raggiunge un limite detta *exospheric temperature* data da un range tra 600 – 1200 K, influenzata fortemente dall'attività solare e dall'attività geomagnetica che trasferiscono energia colpendo la durata di vita di un satellite.

L'attività solare come abbiamo visto varia con ciclo di 11 anni e osservazioni a 10.7 cm del flusso radio del sole detto *indice F10.7* è possibile misurarlo in unità di W/m<sup>2</sup>Hz e stimare il picco massimo e minimo di attività solare al variare dell'altitudine e della densità atmosferica. Dal grafico della figura 4.5 si vede che per orbite elevate la densità può variare di molto e ciò implica che il satellite può subire maggiori danni nel caso di un massimo.



**Figura 4.5:** Andamento del flusso di radiazione solare in funzione di densità e altitudine.

Un altro importante effetto da citare è la **corrosione dell'ossigeno atomico** che può reagire con i componenti metallici della superficie degradando la performance dei sensori. Per esempio, kapton, un materiale comunemente usato per isolare, erode ad un tasso approssimativamente di 2.8 μm per ogni 10<sup>24</sup> atomi/m<sup>2</sup> di ossigeno. Questo flusso F in un tempo t è dato da  $F = \delta V t$ , dove  $\delta$  è la densità atomica dell'ossigeno e V la velocità del satellite. Inoltre reazioni chimiche che coinvolgono l'ossigeno possono eccitare materiali che

costituiscono sensori ottici creando rumore di fondo. Dal momento che l'ossigeno atomico è formato dalla radiazione ultravioletta del sole che ne dissocia le molecole di  $O_2$ , anch'esso è strettamente legato alla sua attività. I materiali di un satellite dunque sono scelti per essere in grado di sopravvivere in condizioni di un massimo solare.

Soluzioni analoghe sono infatti prese per sonde spaziali che necessitano una protezione sia per radiazione solare, sia per radiazione cosmica.

## 4.4 Metodi di protezione

Per valutare la frequenza dei Single Event Phenomena in una certa regione di spazio è necessario conoscere l'ambiente esterno, come l'indice spettrale della radiazione, l'intensità di carica delle particelle e come il dispositivo stesso risponde alla radiazione di ionizzazione.

Per prevenire i SEP una serie di programmi in appositi computer accettano i seguenti input: parametri orbitali, quantità di protezione attorno ai dispositivi detto *aluminium box*, minima carica richiesta per upset, radiazione tollerabile e dimensione-volume del transistor. Dopo il calcolo dei software del tasso di upset per ogni transistor, la somma fornisce il tasso totale per il dispositivo in questione. Il tasso per i SEP o SEU e SEL, in dispositivi complicati come i microprocessori non sono prevedibili. Per questi è possibile solo avanzare ipotesi basate sulle osservazioni nelle performance dei voli spaziali con dispositivi simili.

Analogamente all'elaborazione dati dei programmi utilizzati in atmosfera nei voli aerei, i principali software utilizzati per i satelliti sono: CREME, basato sull'analisi della deposizione di energia del fascio ionizzante delle particelle in appositi sensori utilizzando linguaggi informatici con codici di Monte Carlo; SPENVIS, tramite cui è possibile monitorare indici geomagnetici e solari, calcolando le dosi assorbite dovute ai raggi cosmici di diversa composizione e frequenza producendo diagrammi delle grandezze misurate.

Viene definita **abilità di sopravvivenza** l'abilità del sistema spaziale di essere operativo nelle sue funzioni dopo essere stato esposto ad un ambiente stressante creato da agenti ostili. La durezza o **hardness** è invece l'attributo che definisce il livello di stress ambientale in cui un satellite può sopravvivere.

Le industrie aerospaziali dunque considerano l'hardness e l'abilità di sopravvivenza per ogni eventuale tipologia di ambiente naturale per riuscire a rendere funzionante un sistema spaziale dopo una certa esposizione. Ad esempio lo sviluppo tecnologico ha reso possibile la sopravvivenza nelle fasce di Van Allen.

La durezza degli elementi di una sonda spaziale è l'unica azione effettiva che si può prendere in considerazione per renderla capace di sopravvivere il più a lungo possibile. La dose di radiazione che penetra il satellite che genera latchup e upset può infatti essere ridotta schermandola.

Ma quali sono i migliori materiali per costruire uno schermo da radiazioni? Nella formula di Bethe la perdita di energia è proporzionale alla densità del materiale

attraversato  $\rho$  e al rapporto  $Z/A$ , cioè il rapporto tra il numero dei protoni e il numero di nucleoni (protoni più neutroni):

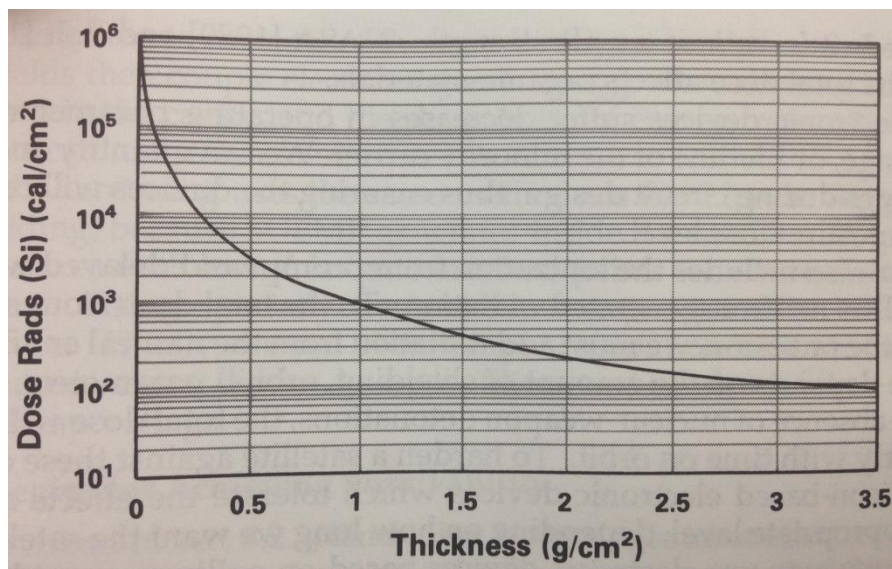
$$-\frac{d\mathcal{E}}{dx} \sim \rho \frac{Z}{A} \frac{Z^2}{\beta^2} f(\beta^2)$$

Nella materia ordinaria il rapporto  $Z/A$  è quasi sempre pari a  $1/2$  tranne che nei materiali ricchi di idrogeno il cui nucleo, essendo formato da un solo protone, è l'unico che non contiene neutroni e in cui questo rapporto è più grande. Uno schermo per particelle deve quindi frenarle e, per fare questo nel miglior modo, deve avere alta densità e essere ricco di idrogeno. Ma uno schermo di un materiale denso risulterebbe troppo pesante per un uso spaziale. Questi temi vengono trattati nel capitolo 5.

Dalla formula di Bethe inoltre è possibile ricavare la perdita per unità di **mass thickness**  $\tau$ , ovvero la quantità di massa in una data area di materiale, detto anche spessore:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{d\mathcal{E}}{dx} = -\frac{d\mathcal{E}}{d\tau} \sim \frac{Z}{A} f(\beta^2)$$

La figura 4.6 mostra lo spessore di un tipico schermo formato principalmente da silicio, alluminio e altri layers in  $\text{g}/\text{cm}^2$ . Grazie a ciò è possibile stimare il peso necessario per schermare la radiazione, ossia la densità richiesta dal materiale. La tipica curva asintotica ad alte densità è dovuta al fatto che a spessori elevati la quantità di dose assorbita è minore rispetto quella a spessori inferiori.



**Figura 4.6:** Spessore di silicio in funzione della dose di radiazione assorbita.

La NASA ha dunque studiato e riportato i dati relativi alle dosi effettive supportate da ogni elemento per essere in grado di continuare a lavorare immerso in un ambiente spaziale ostile.

Certe radiazioni comunque non possono essere fermate nemmeno dai materiali più protettivi, ma alcune tecniche innovative stanno prendendo piede come ad esempio l'idea di far emergere alcune di queste particelle energetiche in cavità producendo correnti e campi entro queste regioni, limitandone il danno.

Un altro esempio per contrastare i SEP sono i dispositivi **Field Programmable Gate Array (FPGA)** che, in elettronica digitale, sono circuiti integrati le cui funzionalità sono programmabili via software. Tali dispositivi consentono l'implementazione di funzioni logiche anche molto complesse come quella per la rilevazione di errori. Sono quindi incorporati nei design aerospaziali e sono prodotti principalmente dalla compagnia Altera. Questi dispositivi sono costruiti in modo da avere grande tolleranza di SEP e software in grado di migliorarla implementando e testando nuovi design.

Soluzioni nel campo tecnologico sono quindi molteplici e in continuo sviluppo. Cito infine anche il *triple modular redundancy approach*, il sistema adottato dalla NASA per migliorare l'affidabilità dei computer a bordo delle sonde spaziali. Si tratta di circuiti ridondanti in cui se per ipotesi per ogni bit i transistor sono tre, quand'anche uno venisse alterato è possibile non solo accorgersene, ma anche sapere quale dei tre è stato colpito visto che è assai improbabile che due particelle colpiscano due transistor della tripletta contemporaneamente.



# Capitolo 5

## Prospettive e conclusioni

Per concludere espongo in questo capitolo il problema legato alla protezione dell'uomo nell'ambiente spaziale, ossia le tecnologie utilizzate nelle tute degli astronauti in vista delle future missioni programmate, e in fase di sviluppo, verso nuovi pianeti.

Riservo inoltre uno spazio particolare per parlare del progetto che più mi ha colpito svolgendo questa tesi, ossia lo Space Radiation Superconductive Shield e che sarà oggetto di discussione, insieme al Journey to Mars, nelle conclusioni finali.

### 5.1 Tute spaziali

Oltre ai metodi di protezione riguardanti i sistemi spaziali è necessario trovarne anche per l'uomo. I problemi ambientali per una vita al di fuori dell'atmosfera non offrono infatti molte soluzioni. I materiali che schermano l'uomo devono essere scelti con cura affinché lo possano proteggere da ogni tipologia di particelle. Ad esempio per una stazione in orbita GEO è stata stimata che una protezione di  $21 \text{ g/cm}^2$  di alluminio sarebbe sufficiente. Questo richiederebbe però una massa totale di circa 3.6 tonnellate per 6 persone abitanti. Per comparare questo dato, nelle missioni Apollo la spedizione lunare è stata fatta con alluminio, acciaio inossidabile ed epossidi di fenolo, per dare uno schermo con spessore equivalente di  $7.5 \text{ g/cm}^2$  di alluminio. La dose massima di radiazione prevista era di 1 rad ossia di 10 mSv.

Le attuali **tute spaziali** sono realizzate con un tessuto formato da circa undici strati, ognuno con particolari caratteristiche, in base alla funzione cui è destinato. I primi strati sono utilizzati per la termoregolazione del corpo, per la traspirazione e per la stabilità della pressione, mentre quelli più esterni sono utilizzati per la protezione contro calore, abrasioni, perforazioni e soprattutto radiazioni cosmiche e solari, quest'ultima costituita da un rivestimento in alluminio.

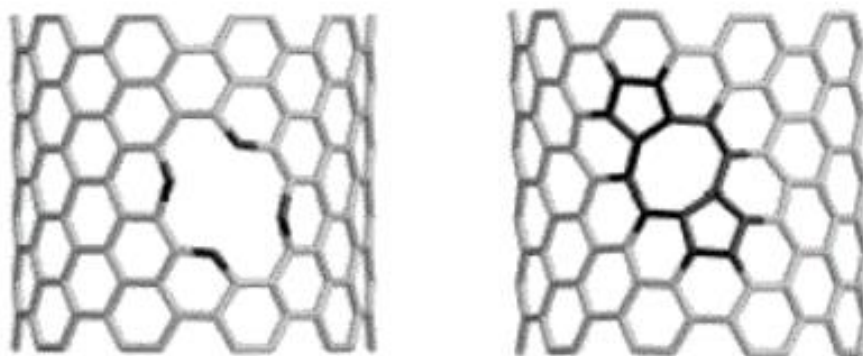
Numerose ricerche sono attualmente in corso per realizzare prototipi di tute efficienti con il più alto grado di protezione. A bordo della stazione spaziale internazionale vengono infatti testate diverse tipologie di schermi per ridurre l'esposizione dell'equipaggio. E' stato scoperto che i materiali che contengono idrogeno, come il polietilene, possono diminuire, maggiormente rispetto l'alluminio, sia la radiazione primaria che la secondaria.

Nonostante sia facile ed economico da produrre, il polietilene non è abbastanza forte per costruire grandi strutture come lo stesso veicolo spaziale. Nemmeno aggiungerlo ai metalli attuali è vantaggioso.

Un altro materiale in fase di sviluppo presso la NASA è il **boro idrogenato nitrato di nanotubi (BNNT)**, sufficientemente flessibile, in grado di schermare gran parte della radiazione durante le passeggiate spaziali, comprese quelle sul suolo marziano.

Tute costituite da questi nanotubi di carbonio, boro, nitrogeno e idrogeno, interposti a diversi livelli, rappresentano dunque un potenziale materiale schermante da utilizzare anche per veicoli e abitazioni.

BNNT presenta un'evoluzione dei semplici nanotubi in carbonio i quali, sottoposti a radiazioni ad alte energie, portano ad un maggior degrado delle caratteristiche delle pareti creando buchi nella rete atomica del nanotubo. La capacità dei nanotubi di saturare alcuni legami spezzati porta comunque a difetti nella struttura com'è visibile dalla figura 5.1.



**Figura 5.1:** *Nanotubo colpito da radiazione.*

Un altro esempio è la **SkinSuit** realizzata dalla Dainese. Nel 2013 una collaborazione tra ESA's Space Medicine Office, King's College London's Centre of Human & Aerospace Physiological Sciences, the Massachusetts Institute of Technology's (MIT) Aeronautics and Astronautics, Engineering Systems Department and University College London's School of Pharmacy ha portato a testare questa nuova tipologia di tuta "da interno", indossata recentemente da Thomas Pesquet nella missione Proxima e che sarà sviluppata ulteriormente in vista della missione Marte 2030.

Skinsuit, in particolare, oltre ad essere scudo contro le radiazioni è una tuta che protegge dagli effetti dell'assenza di gravità contrastando l'allungamento della colonna vertebrale degli astronauti.

La NASA dunque è in piena fase di sviluppo per la realizzazione di tute di nuova generazione, incorporando avanzamenti come ad esempio i sistemi di rimozione di anidride carbonica rigenerabile e i sistemi di evaporazione dell'acqua, che garantiscono in modo più efficiente ai membri dell'equipaggio le necessità fondamentali come l'aria di respirazione e la regolazione della temperatura. La mobilità e l'adattamento di una tuta pressurizzata sono estremamente importanti per mantenere gli astronauti produttivi e soprattutto protetti. La NASA sta valutando i vestiti spaziali pressurizzabili per missioni in una varietà di destinazioni di esplorazione, come l'attuale EMU e i prototipi avanzati PXS e Z2.

## 5.2 Magneti superconduttori

Gli scudi fisici non sono l'unica opzione per fermare le radiazioni delle particelle che raggiungono gli astronauti. Gli scienziati stanno anche esplorando la possibilità di costruire campi di forza in grado di creare una bolla protettiva attorno a un veicolo spaziale o habitat.

Come già anticipato nel capitolo 2, nella sezione della descrizione della strumentazione del modulo esterno AMS della Stazione Spaziale Internazionale, si stanno sviluppando nuove tecnologie per scudi magnetici basati sulla super conduttività magnetica. I magneti sono composti da numerose bobine di materiale superconduttore in cui la corrente che circola genera al centro un intenso campo magnetico. Il sistema per operare ha bisogno di un continuo raffreddamento mantenuto vicino allo zero assoluto grazie a un sistema di criorefrigerazione. Il magnete superconduttore di AMS in particolare è stato testato nel Large Space Simulator al centro ESA nel 2010 dando buoni risultati.

L'attuale progetto europeo **Space Radiation Superconductive Shield (SR2S)** vede infatti uno sviluppo di questa tecnologia in grado di fornire un intenso campo 3000 volte più forte di quello terrestre, confinato attorno ai veicoli spaziali per proteggere gli astronauti nelle missioni spaziali.

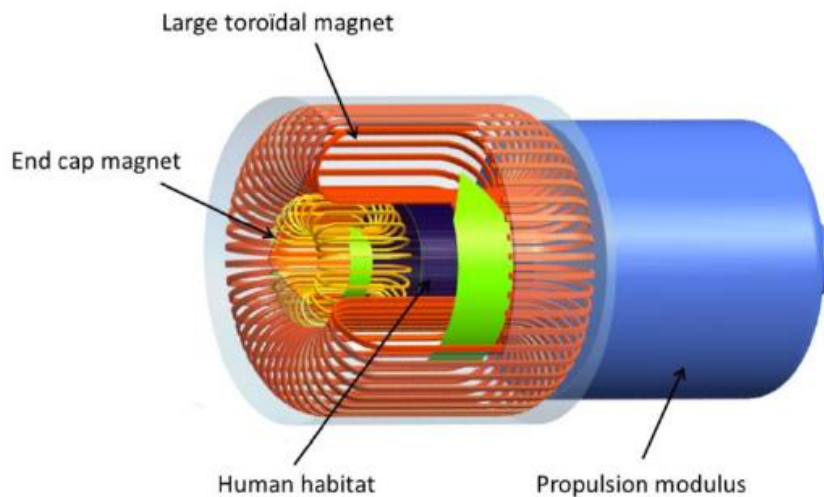
Il team di progettazione è nato nel 2013 ed è formato da: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Compagnia Generale per lo Spazio (CGS), Columbus Superconductors (CS), Thales Alenia Space (TAS-I), the Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), CERN e Carr Communications.

SR2S adotta un approccio innovativo che prevede quindi la creazione di superconduttori di  $MgB_2$  utilizzando magneti toroidali (lunghezza 10 m e diametro 12.8 m), supportati da sistemi di criorefrigerazione a temperature di circa 25 K, in grado di mantenere la loro funzionalità per anni. È prevista un'estensione di 10 metri di diametro del campo magnetico così che le particelle ionizzanti possono essere deviate e spazzate via.

Visto che, più intenso è il campo magnetico maggiore è la curvatura della traiettoria delle particelle cariche, per diminuire la radioattività dei raggi cosmici risulta necessario ricorrere a questi fili superconduttori che sono, tra l'altro, in grado di trasportare correnti elevate senza dissipare energia e, se raffreddati, in grado di resistere a vari *quenches* magnetici.

Quest'ultimi infatti sono molto frequenti per poi esaurirsi durante le vere e proprie fasi di lavoro. Si creano quando una parte del superconduttore raggiunge una temperatura superiore alla soglia critica di superconduzione (per i fili superconduttori di AMS,  $T > 4K$ ), in cui le bobine diventano composte da normale filo che, come accade per il tungsteno del bulbo di una lampadina, comincia a dissipare calore, riscaldando il materiale circostante. Avviene dunque una transizione locale da uno stato di superconduttore a uno stato normale che può essere molto veloce e causare una trasformazione completa dell'energia magnetica immagazzinata nelle bobine in calore. Se non si provvede immediatamente, i fili possono anche essere distrutti dal calore (l'elettronica del magnete di AMS è in grado di rilevare effetti minimi di *quench*).

La figura 5.2 mostra il prototipo del design di un veicolo spaziale utilizzando la protezione SR2S.



**Figura 5.2:** Design del progetto SR2S.

Sonda e magneti sono modellati insieme per ottenere una struttura semplificata supportata da propulsori aerospaziali. Le quantità di radiazione cosmica sia primaria che secondaria, prodotta al passaggio attraverso lo scudo attivo, sono state simulate per uno scenario tipico di spazio profondo. Grazie a ciò è già stato possibile apportare delle modifiche aumentando la struttura di protezione inizialmente dedicata alla zona abitabile, non sufficientemente protetta dalle particelle secondarie.

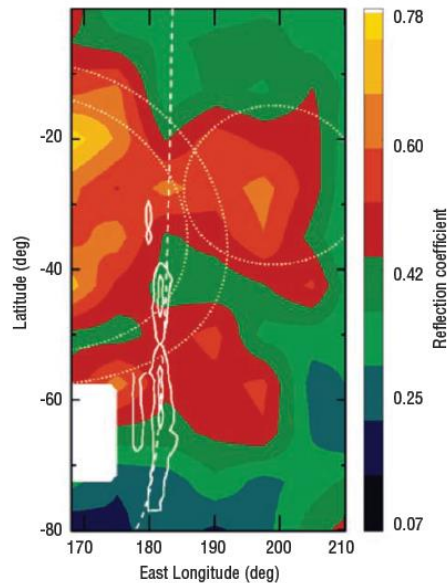
Tale progetto è in fase di realizzazione e comporterebbe una notevole diminuzione dei costi per la riduzione del peso dei materiali schermanti, ricavandone un notevole contributo economico oltre che pratico in vista delle future missioni spaziali come quella su Marte del 2030, come spiegato nella sezione seguente.

## 5.3 Missioni spaziali future

Imparare a proteggere il corpo umano dalla radiazione cosmica ad alta energia è un passo fondamentale per l'esplorazione spaziale. Ogni pianeta infatti è interessato sia dalle particelle del vento solare che dai raggi cosmici galattici.

Particolare interesse pongo ai numerosi studi riguardanti lo sviluppo di una nuova tecnologia per la protezione degli astronauti e della strumentazione in vista del **Journey to Mars** programmato per il 2030. Gli esperimenti NASA sull'ambiente spaziale sono svolti al Johnson Space Centre a Houston.

La NASA, come già anticipato nel capitolo 3, negli anni ha raccolto una varietà di dati riguardanti l'ambiente della superficie marziana e anche lunare. Durante il Lunar Prospector mission, ad esempio, gli scienziati hanno scoperto che ci sono alcune aree della luna che hanno un forte campo magnetico, luoghi dunque maggiormente protetti che possono essere siti candidati per possibili basi lunari. Anche Marte ha un campo magnetico simile, maggiore ovviamente di quello della luna. Come si può vedere dalla figura 5.3, il campo magnetico più forte su Marte è a  $\sim 20^\circ\text{S}$ ,  $170^\circ\text{E}$  e  $\sim 43^\circ\text{S}$ ,  $170^\circ\text{E}$ .



**Figura 5.3:** *Zone di massima riflessione Marziana.*

Ciò può dunque rappresentare dei vantaggi per la conquista del pianeta, ma Marte resta comunque estremamente vulnerabile agli effetti della radiazione cosmica e la sua superficie non è protetta a sufficienza. Al suolo infatti possiede lo stesso livello di raggi cosmici presente negli alti strati dell'atmosfera terrestre.

Per minimizzare l'esposizione gli ipotetici abitanti di Marte avrebbero comunque bisogno di limitare costantemente il tempo trascorso fuori della loro tuta spaziale nelle abitazioni e la distanza delle loro camminate dalle stesse.

Il totale della radiazione ricevuta da un astronauta dipende quindi fortemente dall'intensità del campo magnetico della zona in cui si trova, dall'attività solare, dalla quantità e dal tipo di materiali utilizzati per la tuta e per il rifugio.

Sebbene l'agenzia NASA abbia già sviluppato strategie per ridurre l'impatto di molti dei rischi associati ai viaggi a basse orbite, per quanto riguarda i viaggi a lunga tratta, come il Journey to Mars, molti di essi non sono ancora del tutto noti, anche se in fase di definizione.

La conquista del pianeta rosso rappresenta la più grande sfida per l'uomo moderno. Obiettivo di ingegneri e scienziati, Marte è l'orizzonte più tangibile per espandere la nostra presenza nello spazio. Dalle analisi del pianeta sono state trovate numerose risorse per il sostenimento della vita, come il già citato campo magnetico localizzato, acqua ghiacciata, cicli climatici compatibili con quelli terrestri e molto altro. Fenomeni che tendono comunque a trascurare il problema delle radiazioni.

Il programma Journey to Mars sta passando attraverso tre livelli, ciascuno con sfide crescenti. L'esplorazione **Earth Reliant** è incentrata sulla ricerca a bordo della Stazione Spaziale Internazionale. Sulla stazione stanno infatti testando tecnologie e promuovendo la ricerca su: salute umana e ricerca comportamentale; sistemi di comunicazione avanzati; prove di infiammabilità del materiale; operazioni extraveicolari; controllo dell'ambiente spaziale; stampa 3D; manipolazioni materiali.

Nel **Proving Ground**, la NASA sta invece imparando a condurre operazioni complesse in un ambiente che consente il trasporto di equipaggi e il loro ritorno sulla Terra in pochi giorni, operando principalmente nello spazio cislunare, anticipando e convalidando le capacità richieste per l'esplorazione umana di Marte. Il programma prevede: missioni di

esplorazione (EM) come EM-1, il primo test integrato di SLS e Orion anticipato nel 2018; la missione The Asteroid Redirect Robotic (ARM) nel 2020, che raccoglierà un grande masso da un asteroide vicino a Terra; un impianto iniziale di habitat a lungo termine per testare i sistemi di lunga durata; operazioni autonome, tra cui l'appuntamento, l'ancoraggio e le moderne tecnologie dell'informazione; riduzione al minimo delle esigenze necessarie per la riduzione, il riutilizzo e il riciclaggio di materiali di consumo.

Le attività **Earth Independent** infine, si basano su ciò che si imparerà nella Stazione Spaziale Internazionale e nello spazio cislunare per consentire alle missioni umane di raggiungere le zone di Marte, tra cui le lune e la superficie. Con gli esseri umani su Marte, sarà possibile poi avanzare la scienza e la tecnologia in modi solo sognati con gli esploratori robotici attuali. La parte finale del progetto prevede: vita e lavoro negli habitat di transito e di superficie; raccogliere risorse marziane per creare carburante, acqua, ossigeno e materiali da costruzione; sfruttare sistemi di comunicazione avanzati per trasmettere i dati e i risultati delle escursioni di scienza e di esplorazione con un ritardo di 20 minuti.

Il raggiungimento di luoghi nello spazio profondo svolgeranno un ruolo fondamentale nel futuro dell'esplorazione dello spazio umano, partendo dalle missioni ARM e cislunari e proseguendo verso il pianeta Marte. Un approccio progettuale incrementale di questo tipo, facendo ampio uso del patrimonio e delle capacità della stazione spaziale internazionale, passando da un primo habitat più semplice per ospitare l'equipaggio per un tempo limitato ad un successivo habitat in grado di sostenere addirittura la vita dell'uomo, sembra essere l'approccio più conveniente e affidabile. L'utilizzo di un sistema di trasporto avanzato basato su energia solare elettrica (SEP) inoltre determinerà numerosi vantaggi nel corso della missione. La figura 5.4 mostra le varie fasi con le diverse missioni in programma per il Journey to Mars.

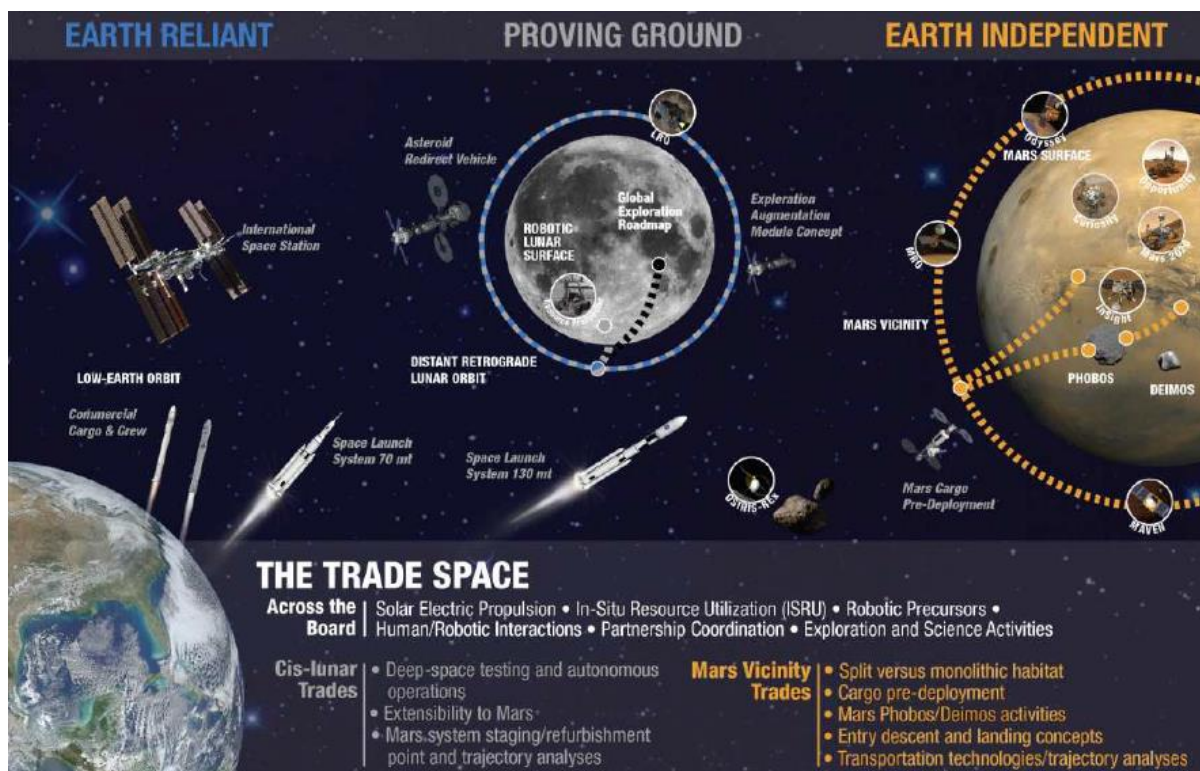


Figura 5.4: Riassunto del programma Journey to Mars.

## 5.4 Conclusioni

Giunti al termine di questo lavoro di tesi si presenta la necessità di far sintesi di tutti gli argomenti trattati.

I raggi cosmici hanno rappresentato il tema fondante attorno al quale si è cercato di fare chiarezza a livello astrofisico, medico e ingegneristico-aerospaziale descrivendo in ogni campo i loro effetti riportando l'analisi delle tecniche di rilevazione e di protezione. Lo scopo è stato quello di mettere in risalto le caratteristiche specifiche e particolari proprie della radiazione ad alta energia, proponendo un quadro generale di quest'ultima, la cui natura problematica è stata successivamente verificata in alcune missioni spaziali, soprattutto nel Journey to Mars attraverso la programmazione a diversi step di conquista dello spazio, per comprendere sempre di più l'ambiente e trovare soluzioni per limitare i danni causati da queste particelle.

I risultati astronomici e fisici nell'analisi della radiazione permettono di capire come essa si propaghi e raggiunga la Terra dopo aver percorso enormi distanze cosmiche. Lo studio delle sorgenti di raggi cosmici galattiche ed extragalattiche sono intrinsecamente caratterizzate da bassi flussi ricevuti, ma a energie molto elevate, pertanto gli strumenti utilizzati richiedono alte sensibilità e calcolatori sempre più avanzati in grado di simulare e prevedere la quantità a cui si è esposti al variare dell'ambiente spaziale in cui ci si trova.

L'esposizione rappresenta quindi uno dei problemi principali nell'esplorazione spaziale umana. Già a quote aeree il livello di radioattività supera i limiti consentiti dalle norme sulla salute. Gli stessi astronauti, come abbiamo visto, per questo motivo sono continuamente sottoposti a controlli medici perché posti ad altissimi rischi.

La stessa abilità di sopravvivenza di un veicolo spaziale, inoltre, è caratterizzata dalle dosi assorbite durante la missione. Ogni materiale infatti subisce alterazioni chimico-fisiche che vanno a danneggiare superfici e componenti elettronici a causa dai Single Event Phenomena.

L'ambizione dell'uomo comunque ci porta in viaggio verso nuovi pianeti. Nei prossimi decenni la NASA intraprenderà numerosi lavori verso la creazione di una presenza umana sostenibile oltre la Terra. Partendo dalle analisi nella Stazione Spaziale Internazionale per garantire sistemi affidabili e di lunga durata, per poi passare a prove di funzionalità attraverso EM-1 e EM-2 insieme a ARM, SEP e le missioni cislunari, saremo immersi in una continua serie di sfide di conoscenza strategica, mentre aiuteranno a sviluppare le capacità fondamentali necessarie per espandere l'attività umana più in là nello spazio profondo. Ciò, ovviamente, richiederà uno sforzo flessibile, integrato e sostenuto per sviluppare le capacità e gli strumenti necessari per supportare l'uomo in tutto il nostro Sistema Solare.

La NASA, come abbiamo visto, sta compiendo passi positivi per affrontare ciò. Tuttavia l'Agenzia si trova ancora di fronte a importanti sfide per garantire la totale sicurezza della presenza umana nello spazio, principalmente a causa dalla radiazione cosmica. A tal fine, la NASA deve continuare a sviluppare contromisure per ridurre al minimo i rischi per la salute e le prestazioni della strumentazione, studiando le proprietà di queste particelle energetiche presenti nell'universo.

La suddivisione del progetto Journey to Mars, conquistando lo spazio volta per volta, sembra quindi rappresentare un passo essenziale per testare sempre di più i danni provocati dai raggi cosmici. Tale iniziativa però sarà ad alto rischio, cancerogena per gli equipaggi, con strumenti e materiali pesanti da inviare al di fuori dell'atmosfera terrestre, con tecnologie e procedimenti molto costosi e, per il momento, ancora non sufficientemente sviluppati.

Se il 2030 dovrà rappresentare l'anno della conquista della prima porzione di universo, credo che scienza e finanziamenti nel prossimo decennio debbano essere investiti in metodi di previsione e protezione dalla radiazione più avanzati e innovativi come il progetto Superconductive Shield. Sarà necessario sviluppare conoscenze fisiche, mediche e aerospaziali per missioni a lungo raggio, testando una tecnologia più sicura per gli equipaggi e più economica, mirata non solo al raggiungimento di Marte, tra l'altro ambiente inospitale con conseguenze pratiche molto difficili da risolvere (come il fatto di dover restare la maggior parte rinchiusi nei rifugi perché impossibile camminare per un tempo prolungato nella superficie sopravvivendo alle radiazioni), ma al raggiungimento di luoghi addirittura al di fuori dal Sistema Solare.

Questo lavoro di tesi vuole offrire numerosi spunti per sviluppi futuri, essendo la radiazione ad alta energia tuttora in fase di studi in numerose discipline. Sarebbe inoltre opportuno aggiornare costantemente le descrizioni tecniche proposte degli strumenti e delle scoperte, nonché aggiungere i dati progettuali e scientifici ora mancanti che man mano saranno disponibili nel corso dei prossimi anni.

Tutti noi vorremmo avere la possibilità di viaggiare indisturbati nello spazio come nei film di fantascienza, ma la realtà è molto più complicata e l'intelligenza umana non sarà in grado di superare questo ostacolo per ancora molto tempo. Siamo infatti lontani dalla tecnologia che ci permetterà, forse, di raggiungere pianeti ospitali come la Terra facendo di Marte una piccola tappa del viaggio.



# Bibliografia

## Capitolo 1

Alberto Franceschini (2016/17). *High Energy Astrophysics*. Dispense docente

Alberto Franceschini (2016/17). *Corso cosmologia*. Dispense docente

Malcom S. Longair (2011). *High Energy Astrophysics*. Cambridge: University Press.

Sergio Ortolani (2016/17). *Complementi di Astronomia*. Dispense docente

Marco Arcani (2013). *Astroparticelle, in viaggio tra i Raggi Cosmici*. Macerata: Edizioni Simple.

Daniele Dallacasa (2016). *Emissione di Compton inverso e applicazioni Astrofisiche*.  
Online da  
[http://amslaurea.unibo.it/11432/1/Emissione%20di%20Compton%20inverso%20e%20applicazioni%20astrofisiche\\_Iemmi.pdf](http://amslaurea.unibo.it/11432/1/Emissione%20di%20Compton%20inverso%20e%20applicazioni%20astrofisiche_Iemmi.pdf)

Massimo Capaccioli (2016). *Processi di emissione*. Online da  
<http://www.federica.unina.it/smf/elementi-di-astrofisica/processi-emissione-2/>

Pietro Corvi (2012). *La radioattività naturale e le radiazioni naturali*. Online da  
<https://www.ge.infn.it/~corvi/doc/didattica/radioattivita/lezioni/lez04.radnat.pdf>

Giampietro Puppi e Giancarlo Setti (2008). *Raggi Cosmici*. Online da  
[http://www.treccani.it/enciclopedia/raggi-cosmici\\_\(Enciclopedia-del-Novecento\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/raggi-cosmici_(Enciclopedia-del-Novecento)/)

Jon Rask, Wenonah Vercootere, Barbara J. Navarro and Al Krause (2008). *The Radiation Challenge*. Online da  
[https://www.nasa.gov/pdf/284273main\\_Radiation\\_HS\\_Mod1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/284273main_Radiation_HS_Mod1.pdf)

## Capitolo 2

Alberto Franceschini (2016/17). *High Energy Astrophysics*. Dispense docente

P. Paolo (2010). *Raggi cosmici e attività solare*. Online da  
<http://www.palazzosomeda.it/Osservatorio/Raggicosmicieattivitsolare.htm>

Olga Kryakuniva (2009). *Vento solare, Eliosfera e Propagazione*. Online da  
<http://www.nmdb.eu/?q=node/425>

Marco Arcani (2010). *Astronomia Gamma*. Online da  
<http://www.astroparticelle.it/estrae-articolo.asp?articoloID=32>

Eric R. Christian (2017). *Advanced Composition Explorer (ACE) Mission Overview*. Online da  
[http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace\\_mission.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html)

NASA (2016). *ACE*. Online da  
<https://science.nasa.gov/missions/ace>

Agenzia Spaziale Italiana (2017). *AMS*. Online da  
<http://www.asi.it/it/attivita/esplorare-lo-spazio/astrofisica-delle-alte-energie/ams-alpha-magnetic-spectrometer>

AMS-02 (2017). *Lo strumento*. Online da  
<http://www.ams02.org/it/che-cosa-ams/strumenti/>

Giampietro Puppi e Giancarlo Setti (2008). *Raggi Cosmici*. Online da  
[http://www.treccani.it/enciclopedia/raggi-cosmici\\_\(Enciclopedia-del-Novecento\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/raggi-cosmici_(Enciclopedia-del-Novecento)/)

Jon Rask, Wenonah Vercootere, Barbara J. Navarro and Al Krause (2008). *The Radiation Challenge*. Online da  
[https://www.nasa.gov/pdf/284273main\\_Radiation\\_HS\\_Mod1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/284273main_Radiation_HS_Mod1.pdf)

### **Capitolo 3**

Marco Arcani (2013). *Astroparticelle, in viaggio tra i Raggi Cosmici*. Macerata: Edizioni Simple.

GoldBook (2014). *Math/Physics units*. Online da  
<http://goldbook.iupac.org/html/G/G02696.html>  
<http://goldbook.iupac.org/html/S/S05658.html>

World Health Organization (2017). *WHO Global Initiative on Radiation Safety in Health Care Setting*. Online da  
[http://www.who.int/ionizing\\_radiation/medical\\_radiation\\_exposure/global-initiative/en/](http://www.who.int/ionizing_radiation/medical_radiation_exposure/global-initiative/en/)

World Health Organization (2017). *Environmental Radiation*. Online da  
[http://www.who.int/ionizing\\_radiation/env/en/](http://www.who.int/ionizing_radiation/env/en/)

RSNA (2008). *Effective Doses in Radiology and Diagnostic Nuclear Medicine*. Online da  
<http://pubs.rsna.org/doi/abs/10.1148/radiol.2481071451?journalCode=radiology>

ICRP (1991). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Online da  
<http://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%2060>

J. E. Williams (2012). *The best natural way to defend against radiation damage*. Online da  
<http://renegadehealth.com/blog/2012/02/21/the-best-natural-ways-to-defend-against-radiation-damage>

Federal Aviation Administration (2017). *Radiobiology Research Team*. Online da  
[https://www.faa.gov/data\\_research/research/med\\_humanfacs/aeromedical/radiobiology](https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology)

Marco Arcani (2010). *Radiazione cosmica ad alta quota*. Online da  
<http://www.astroparticelle.it/radiazione-alpina.asp>

Euratom 96/26 (1996). *Direttiva del Consiglio che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti*. Online da  
[http://www.regione.piemonte.it/ambiente/simin/dwd/normativa/direttiva%2096\\_29%20Euratom%20norme%20fondamentali%20sicurezza%20e%20protezione.pdf](http://www.regione.piemonte.it/ambiente/simin/dwd/normativa/direttiva%2096_29%20Euratom%20norme%20fondamentali%20sicurezza%20e%20protezione.pdf)

Euratom 13/59 (2013). *COUNCIL DIRECTIVE laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618, 90/641, 96/29, 97/43 and 2003/122*. Online da  
<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CELEX-32013L0059-EN-TXT.pdf>

Marco Arcani (2014). *Radiazione cosmica in aereo*. Online da  
<http://www.astroparticelle.it/public/radiazione-cosmica-in-aereo.pdf>

Chiara Palmerini (2017). *Radiazione a bordo*. Online da  
<http://archivio.panorama.it/archivio/Radiazioni-a-bordo>

Stefano Parisini (2017). *Un po' di radiazioni in più per gli aviatori*. Online da  
<http://www.media.inaf.it/2017/01/30/rad-x-raggi-cosmici/>

NASA (2017). *Nowcast of Atmospheric Ionizing Radiation System*. Online da  
<http://sol.spacenvironment.net/~nairas/index.html>

Francis A. Cucinotta (2007). *Space Radiation Organ Doses for Astronauts on Past and Future Missions*. Online da  
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070010704.pdf>

Francis A. Cucinotta (2009). *Risk of Radiation Carcinogenesis*. Online da  
<https://spaceradiation.jsc.nasa.gov/references/Ch4RadCarcinogen.pdf>

Christopher J. Mertens , John W. Wilson , Steve R. Blattnig , Brian T. Kress , John W. Norbury , Michael J. Wiltberger , Stanley C. Solomon , W. Kent Tobiska and John J. Murray (2008). *Influence of Space Weather on Aircraft Ionizing Radiation Exposure*. Nevada: AIAA.

NASA (2002). *Understanding Space Radiation*. Online da <https://spaceflight.nasa.gov/spacenews/factsheets/pdfs/radiation.pdf>

## Capitolo 4

Wiley J. Larson and James R. Wertz (1992). *Space Mission Analysis and Design*. California: Microcosm.

Peter Fortescue and John Stark (1995). *Spacecraft System Engineering*. UK: Wiley.

Walter Schimmerling (2011). *The Space Radiation Environment: An Introduction*. Online da <file:///D:/Mattia/Universit%C3%A0/TESI/capitolo%201/SpaceRadiationEnviron.pdf>

Royal Academy of Engineering (2013). *Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure*. Online da <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/space-weather-summary-report>

Maria Sarno (2005). *Componenti elettronici per apparecchiature spaziali*. Online da [http://sirad.pd.infn.it/scuola\\_legnaro\\_2005/Presentazioni/C05\\_Sarno\\_Maria.pdf](http://sirad.pd.infn.it/scuola_legnaro_2005/Presentazioni/C05_Sarno_Maria.pdf)

G. Orlando (2005). *Atomcube*. Online da [https://www2.units.it/atmocube/theses/globale\\_Orlando.pdf](https://www2.units.it/atmocube/theses/globale_Orlando.pdf)

ALTERA (2013). *Introduction to Single Event Upset*. Online da [https://www.altera.com/en\\_US/pdfs/literature/wp/wp-01206-introduction-single-event-upsets.pdf](https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/wp/wp-01206-introduction-single-event-upsets.pdf)

F. Stuesson (2009). *Single Event Effects*. Online da [http://space.epfl.ch/webdav/site/space/shared/industry\\_media/07%20SEE%20Effect%20ofF.Stuesson.pdf](http://space.epfl.ch/webdav/site/space/shared/industry_media/07%20SEE%20Effect%20ofF.Stuesson.pdf)

Martha O'Bryan (2015). *Single Event Effects*. Online da <https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/see.htm>

Christopher J. Mertens, Brian T. Kress, Michael Wiltberger, Steve R. Blattnig, Tony S. Slaba, Stanley C. Solomon and M. Engel (2003). *Geomagnetic influence on aircraft radiation exposure during solar energetic particle*. UK: Wiley.

Brian Sierawski and Marcus Mendenhall (2017). *Welcome to the CREME site*. Online da <https://creme.isde.vanderbilt.edu/>

BIRA-IASB (2017). *Spennis*. Online da <https://www.spennis.oma.be/models.php>

Roberto Vittori (2011). *Come proteggersi dai raggi cosmici*. Online da <https://lucadifino.wordpress.com/2011/05/28/come-proteggersi-dai-raggi-cosmici/>

Richard D. Johnson (1976). *Space Settlements*. Online da [http://www.saintannsny.org/depart/computer/classes/spacol/articles/sp-413\(1975\\_nasa+oneill.pdf](http://www.saintannsny.org/depart/computer/classes/spacol/articles/sp-413(1975_nasa+oneill.pdf)

Marco Malpensa (2017). *In tilt per colpa dei raggi cosmici*. Online da <http://www.media.inaf.it/2017/02/17/space-single-event-upset/>

## Capitolo 5

Carolina Saporiti (2017). *In orbita con la nuova tuta spaziale*. Online da <http://corriereinnovazione.corriere.it/2017/01/16/orbita-la-nuova-tuta-spaziale-gravita-ridotta-9ae5aof8-dbfe-11e6-8b50-3b8ec4bed085.shtml>

S. Mariani (2015). *Nanotubi di Carbonio*. Online da <http://www.chimdocet.it/solido/file3g.htm>

Dainese (2017). *SkinSuit*. Online da <https://www.dainese.com/protection/space-suits/?lang=it>

Sarah Frazier (2015). *Come proteggere gli astronauti dalle radiazioni dello spazio*. Online da <http://www.progetto-marmediterraneo-sahara.naunet.eu/index.php/104-come-proteggere-gli-astronauti-dalle-radiazioni-dello-spazio>

Jon Rask, Wenonah Vercootere, Barbara J. Navarro and Al Krause (2008). *The Radiation Challenge*. Online da [https://www.nasa.gov/pdf/284273main\\_Radiation\\_HS\\_Mod1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/284273main_Radiation_HS_Mod1.pdf)

Karl Tale (2013). *Space Radiation Threat to Astronauts Explained*. Online da <https://www.space.com/21353-space-radiation-mars-mission-threat.html>

Roberto Battison (2017). *EU Space Project will allow astronauts to undergo deep space travel*. Online da <http://www.sr2s.eu/project-news/19-eu-space-project-will-allow-astronauts-to-undergo-deep-space-travel>

Roberto Battiston (2017). *EU Space Project Team Announced*. Online da <http://www.sr2s.eu/project-news/8-eu-space-project-team-announced>

Romain Bruce and Bernard Baudouy (2014). *Cryogenic design of a large superconducting magnet for astroparticle shielding on deep space travel missions*. Online da <http://www.sr2s.eu/images/documents/Bruce2015.pdf>

Antonella Del Rosso (2015). *A superconducting shield for astronauts*. Online da <https://home.cern/about/updates/2015/08/superconducting-shield-astronauts>

Vuolo M, Giraud M, Musenich R, Calvelli V, Ambroglini F, Burger WJ, Battiston R (2016). *Monte Carlo simulations for the space radiation superconducting shield project (SR2S)*. Online da <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26948010>

AMS-02 (2017). *Il magnete superconduttore*. Online da <http://www.ams02.org/it/che-cosa-ams/strumenti/il-magnete/il-magnete-superconduttore/>

Office of Inspector General (2015). *NASA's Efford to Manage Health and Human Performance Risk for Space Exploration*. Online da <https://oig.nasa.gov/audits/reports/FY16/IG-16-003.pdf>

Joe Cassady, Eugenio Gargioli, Andy Hoskins, M. Johnson, Cesare Lobascio, Stewart Pelle, Maria Antonietta Perino e Marco Tantardini (2015). *Deep Space Missions: Habitat and Transportation*. Online da [http://www.sr2s.eu/images/documents/deep\\_space\\_missions\\_habitat\\_transportation\\_july\\_2015.pdf](http://www.sr2s.eu/images/documents/deep_space_missions_habitat_transportation_july_2015.pdf)

Rob Garner (2015). *How to Protect Astronauts from Space Radiation on Mars*. Online da <https://www.nasa.gov/feature/goddard/real-martians-how-to-protect-astronauts-from-space-radiation-on-mars>

NASA (2002). *Estimated Radiation Dosage on Mars*. Online da <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA03480>

NASA (2015). *Journey to Mars*. Online da [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/journey-to-mars-next-steps-20151008\\_508.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/journey-to-mars-next-steps-20151008_508.pdf)