



**AstroParticelle**

[www.astroparticelle.it](http://www.astroparticelle.it)

# **LA RADIAZIONE COSMICA NEI VOLI AEREI**



# UNA RADIOATTIVITÀ SPAZIALE

di Marco Arcani

Le *astroparticelle* sono particelle sub-nucleari emesse da diverse sorgenti nel cosmo tra cui supernove e buchi neri. L'impatto di queste particelle sull'atmosfera terrestre, così come su tutti i pianeti dotati di atmosfera, provoca una pioggia ininterrotta di moltissime altre particelle, una vera doccia radioattiva che si propaga dalla stratosfera fino al suolo. A livello divulgativo questa radiazione viene di solito e giustamente etichettata dagli esperti come innocua, perché tra i compiti principali di uno scienziato o di un divulgatore scientifico vi è quello di diffondere la conoscenza senza alimentare inutili preoccupazioni o peggio ancora trasmettere catastrofismo. Nel presente articolo viene esposto in modo approfondito il fenomeno dei raggi cosmici dal punto di vista radioattivo per capire quale sia la realtà dei fatti e quali sono i rischi reali per chi in particolare è esposto a questa radiazione; in relazione soprattutto alla permanenza per lunghi periodi in alta montagna o nei voli aerei. Negli ultimi anni ha preso coscienza una preoccupazione ben comprensibile tra piloti, equipaggi e anche passeggeri che si trovino a percorrere lunghe tratte specialmente se esse attraversano i poli magnetici terrestri. Questo scritto nasce proprio in seguito ad un'esperienza personale di misura fatta in aereo, in cui la radiazione riscontrata in quota di crociera (circa 10.000 m) era di un valore 5 volte superiore rispetto a terra, con un numero di particelle energetiche 25 volte i valori medi registrati al suolo.

## ■ Composizione della radiazione spaziale

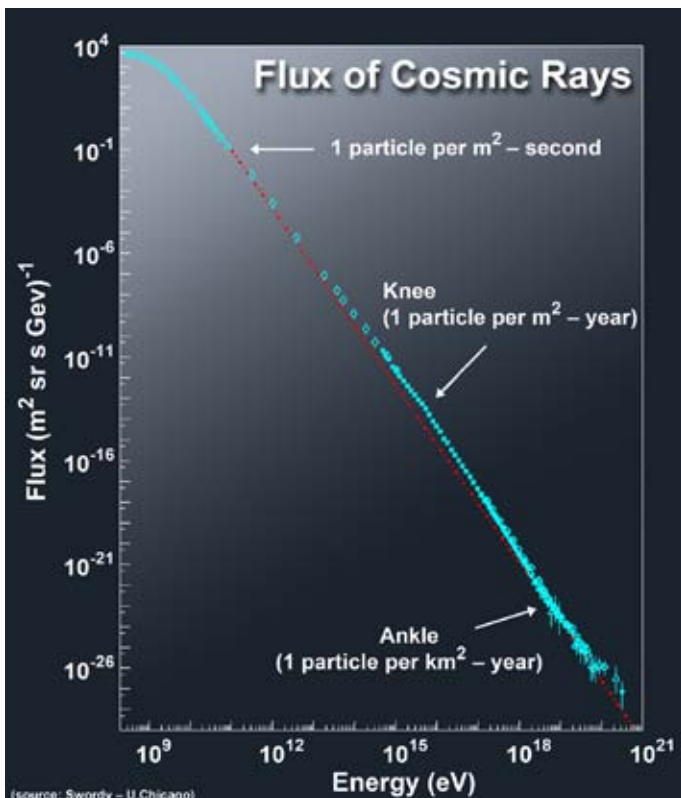
In linea generale quando si pensa alla radioattività si pensa ai raggi gamma, perché questo è il tipo di radiazione più comunemente nota: essa infatti è ben conosciuta da chiunque essendoci di norma presentata attraverso strumenti sociali e culturali come avvenimenti storici, libri scolastici, notizie di cronaca o film. In effetti la radiazione gamma è il tipo di radiazione ionizzante più penetrante ed è prodotta ad esempio durante esplosioni di ordigni nucleari o nelle centrali di produzione di energia elettrica termonucleari, ma

non è certo l'unico tipo di emissione radioattiva. Il termine *radio-attività* è stato coniato da Marie Curie che aveva scoperto alcuni nuovi elementi, tra cui appunto il *radio*, capaci di emettere particelle. Radioattività significa dunque che un nucleo atomico di un elemento instabile perde energia sotto forma di particelle ionizzanti. L'energia è prodotta ad esempio dai fotoni (raggi gamma), ovvero energia elettromagnetica emessa dal materiale radioattivo, oppure sotto altre forme di energia come quella cinetica trasportata da particelle cariche come elettroni (raggi beta) o da nuclei di elio (raggi alfa). Semplificando si può affer-

mare che qualsiasi particella libera di muoversi e accelerata può produrre direttamente o indirettamente azioni ionizzanti e quindi radioattività. Non fanno eccezione le astroparticelle o *raggi cosmici*, particelle che piovono continuamente in atmosfera a velocità prossime a quella della luce.

Quando furono scoperti i raggi cosmici era ancora incerta la loro natura, cioè non si sapeva se fossero particelle cariche, neutre o radiazione elettromagnetica (come i raggi X o gamma) e per questo furono battezzati dal fisico statunitense Robert Millikan: *Cosmic Rays* (Raggi Cosmici). Invece Victor Hess, il fisico Austriaco che nel 1912 scoprì i raggi cosmici (una ventina d'anni dopo la scoperta della radioattività) nelle sue pubblicazioni utilizzava il termine: *Kosmische Strahlung* (letteralmente radiazione cosmica), una nomenclatura decisamente più corretta. Ci vollero circa altri venti anni per capire che nel flusso dei raggi cosmici che ora chiamiamo *primari* (ovvero quelli che raggiungono il nostro pianeta dalle sorgenti cosmiche), i raggi gamma sono solo una minima parte, circa 0,1%. La particella più abbondante dei raggi cosmici è invece il protone, per la semplice ragione che tale corpuscolo è il nucleo dell'atomo dell'idrogeno che è il materiale più semplice e diffuso nell'universo. Il protone è una particella con carica elettrica +1, molto pesante (circa 1800 volte l'elettrone) ed è stabile, quindi ha possibilità di propagarsi nello spazio e raggiungere la Terra anche da sorgenti estremamente lontane. La radia-

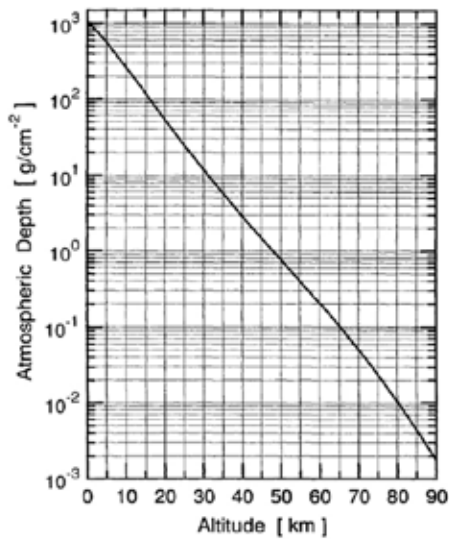
zione cosmica proviene principalmente dall'interno della nostra galassia, per cui i raggi cosmici sono generalmente chiamati galattici o GCR (Galactic Cosmic Rays). I GCR provengono da sorgenti celesti come le supernove, i buchi neri o altri eventi esplosivi come l'unione di stelle di neutroni. Bisogna anche considerare che le comuni stelle come il Sole durante la loro normale attività disperdono materia nello spazio sotto forma di un fiume di particelle chiamato vento solare. Le particelle del vento solare però non hanno grandi energie (dai KeV a pochi MeV) e sono al massimo responsabili della formazione delle aurore polari. Il ciclo di attività del Sole comunque modula attraverso il proprio campo magnetico il flusso dei GCR e siccome il Sole è una stella variabile con un ciclo di circa 11 anni, il flusso di particelle cosmiche risente di questa modulazione solare. Ne segue che in periodi in cui il Sole si trova ai massimi livelli di attività produce una schermatura verso i GCR proteggendo in parte la Terra da tale radiazione. Il rovescio della medaglia è che nei periodi in cui il ciclo solare raggiunge il suo culmine, sono più probabili da parte del Sole emissioni di particelle relativistiche tramite i brillamenti (flares) o i CME (coronal mass ejection). Questi raggi cosmici solari sono definiti SPE<sup>1</sup> (solar particle event) e avendo grandi energie possono penetrare l'atmosfera terrestre sommandosi ai raggi cosmici galattici. Inoltre poiché l'intensità di questo tipo di particelle è elevata, ne possono derivare grossi problemi elettromagnetici a terra: sono le cosiddette tempeste magnetiche solari. Il grafico 1 serve per comprendere che l'energia misurata nel flusso dei raggi cosmici (fuori dall'atmosfera) cambia in funzione dell'energia della singola particella primaria. Si noti che per energia intorno ai 100 GeV arriva una particella per m<sup>2</sup> al secondo mentre per energie intorno al Pev arriva una particella per m<sup>2</sup> all'anno fino ad arrivare agli EeV con una particella al km<sup>2</sup> all'anno.



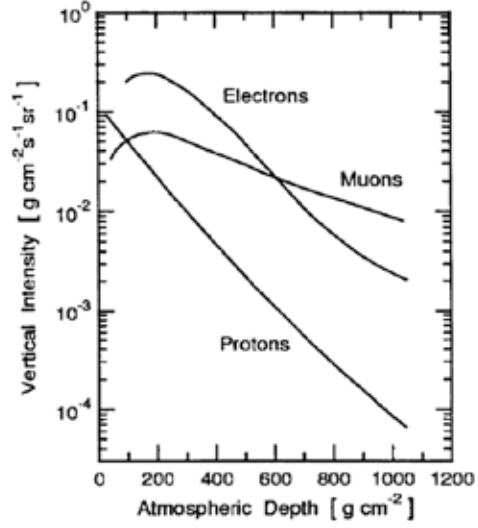
**Grafico 1** - Flusso dei raggi cosmici in funzione dell'energia. L'energia delle particelle si misura in eV (elettronvolt), 1 eV corrisponde a circa  $1.602 \times 10^{-19}$  Joule (grafico fornito dall'Università di Chicago).

La collisione tra le particelle primarie (principalmente protoni) e gli atomi dell'atmosfera terrestre agisce esattamente come la collisione tra particelle nei collider artificiali per esperimenti nucleari, ovvero causa una grande esplosione energetica con produzione di numerose altre particelle, chiamate *secondarie* e di diversa natura, tra cui compaiono mesoni, barioni, muoni, elettroni e fotoni gamma. Dato che la collisione avviene prevalentemente ad un'altitudine tra i 20.000 e i 30.000 m è facile immaginare che le particelle sono presenti maggiormente alle alte quote, per poi diminuire progressivamente al diminuire della quota. Il flusso di particelle in atmosfera si propa-

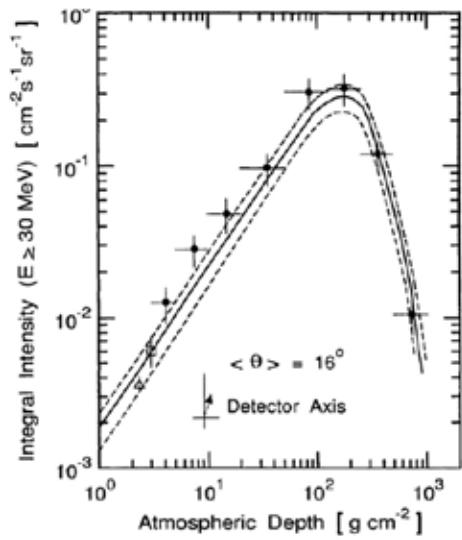
1 La definizione cambia a discrezione degli autori, da SEP (solar energetic particle) a SPE (solar particle event o solar proton event) a SCR (solar cosmic rays).



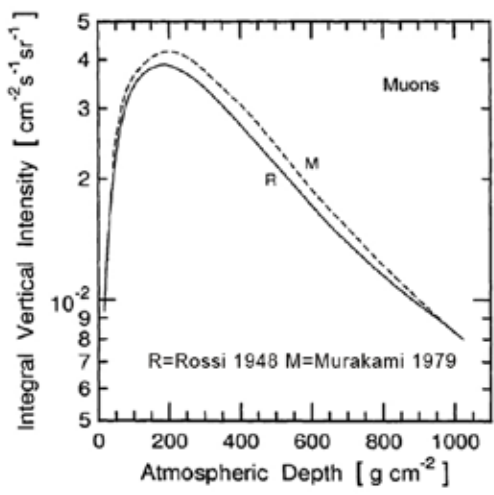
A



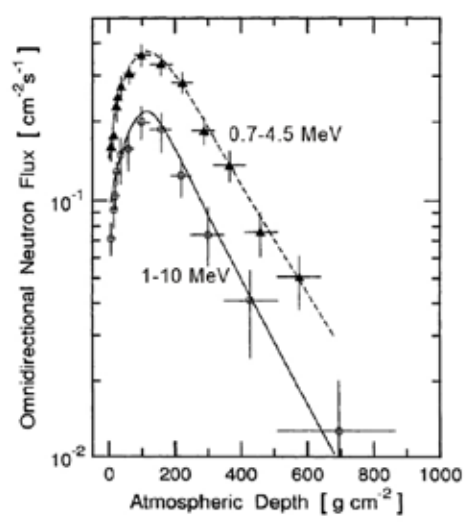
B



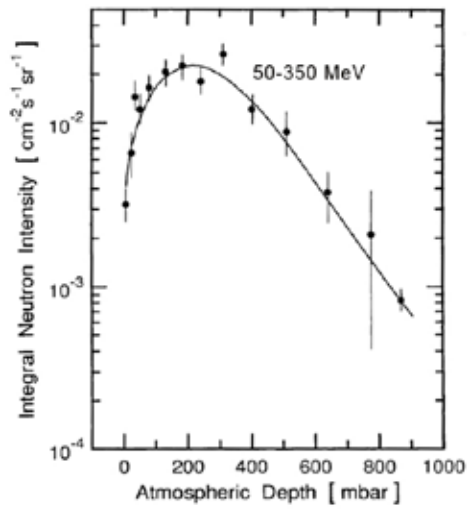
C



D



E



F

**Grafico 2** - A) Altitudine in funzione della pressione espressa in  $\text{g}/\text{cm}^2$ ,  $200\text{-}300 \text{ g}/\text{cm}^2$  corrispondono a circa  $11.000\text{-}10.000$  metri. B) Intensità delle particelle in funzione della pressione/altitudine. C) Intensità dei raggi gamma cosmici in funzione della pressione/altitudine. D) Intensità dei muoni in funzione della pressione/altitudine. E) Flusso dei neutroni di bassa energia in funzione della pressione/altitudine. F) Flusso dei neutroni di alta energie in funzione della pressione/altitudine; si può notare che l'intensità massima è sempre in corrispondenza di valori intorno ai  $200\text{-}300 \text{ g}/\text{cm}^2$  (fonte immagini: Peter K.F. Grieder [7]).

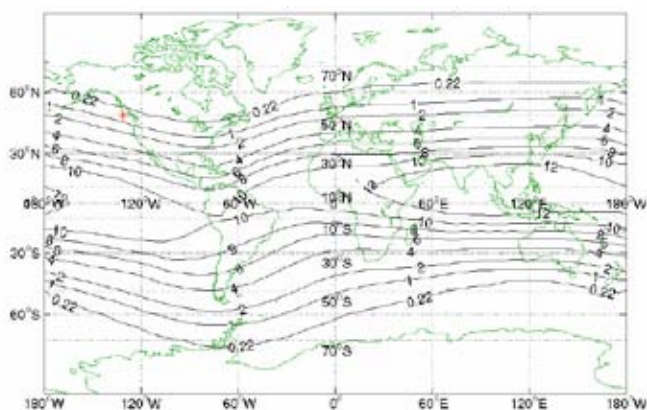
ga dall'alto verso il basso a cono: si può immaginare il fenomeno come al cono di una doccia. La maggiore quantità di particelle e quindi di radiazione si trova intorno ai 10.000-11.000 metri (grafico 2), che è proprio la quota seguita dai normali voli commerciali. L'atmosfera per nostra fortuna assorbe la maggior parte di questa radiazione cosmica e a livello del mare la composizione principale di particelle è data dai muoni, elettroni e da pochissime particelle pesanti tra cui i neutroni.

La radiazione totale in atmosfera è quindi data dalla somma di quella prodotta dai raggi cosmici galattici, più quella prodotta dai raggi cosmici solari, più quella prodotta da isotopi naturali (come il gas radon) e artificiali (isotopi da centrali termonucleari ed esperimenti militari). A tutto questo va aggiunta anche la presenza di raggi gamma prodotti da fulmini o altri fenomeni elettrici non ancora ben compresi.

### ■ Effetto Geomagnetico

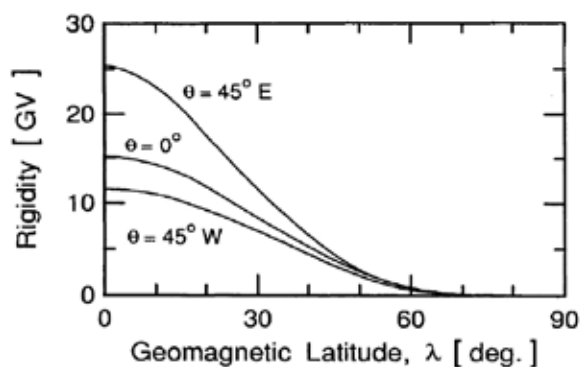
Prima di considerare i valori di radiazione alle varie altitudini bisogna tenere in considerazione un altro fattore, cioè quello del campo magnetico terrestre. La Terra è come un grosso magnete con il polo nord magnetico vicino al polo sud geografico e il polo sud magnetico quasi in corrispondenza del polo nord geografico; le particelle cariche che si muovono in un campo magnetico vengono deviate in funzione di una ben nota legge dell'elettromagnetismo di Maxwell (vedi box nella pagina seguente).

Questo produce un effetto di sbarramento nella zona equatoriale, dove le linee di campo magnetico essendo praticamente parallele alla superficie terrestre, limitano di molto il flusso di particelle. Mentre ai poli, dove le linee di campo sono praticamente perpendi-



**Figura 2** - Distribuzione verticale delle particelle in funzione della latitudine per diversa rigidità magnetica. La rigidità magnetica è la forza che la particelle oppone al campo magnetico che tende a deviarla ed è direttamente proporzionale all'energia della particella (fonte immagine: J. Mertens [3]).

colari alla superficie (parallele alla direzione di moto delle particelle), lo sbarramento è nullo. Questo è anche il motivo per cui le aurore sono visibili solamente nelle zone circumpolari. Il fatto che l'asse del campo magnetico sia di 11 gradi disallineato dall'asse di rotazione terrestre produce delle zone variabili nel flusso dei raggi cosmici delimitate da linee chiamate isocosme (figura 2), in cui a latitudini differenti la radiazione cosmica è equivalente. Va tenuto presente che il campo magnetico non blocca affatto le particelle di alta energia (o rigidità magnetica) che sono le più pericolose, ma fortunatamente anche le più rare (vedi grafico 1).



**Grafico 3** - Variazione dell'energia in funzione della latitudine. Le linee del grafico considerano anche particelle incidenti con angolo di zenith ( $\theta$ ) differente. (Rossi e Olbert 1970 in accordo con i dati di Störmer [7])

Il campo magnetico terrestre riduce invece l'intensità delle particelle cosmiche di bassa energia: solo particelle sopra ad una certa soglia di energia possono penetrare all'equatore (la soglia all'equatore per i protoni primari è di circa 15 GeV), mentre quelle di energia inferiore vengono respinte o deviate. In conclusione l'intensità dei raggi cosmici aumenta dall'equatore verso i poli con una variazione del 15-30% a seconda della latitudine (grafico 3). Questo è il motivo per cui è molto più pericoloso volare ad alta quota nelle regioni polari rispetto alle regioni equatoriali.

Il campo magnetico terrestre a differenza di quello di un magnete è dinamico, in quanto è prodotto in modo disuniforme dalla rotazione del nucleo al centro della Terra. Esso è inoltre influenzato dal campo magnetico del Sole e del vento solare, specialmente in caso di intensa attività solare. Il campo magnetico della Terra intrappola le particelle del vento solare in due regioni<sup>2</sup> toroidali concentriche (figura 3) chiamate fasce di Van Allen, in onore del fisico James Van Allen che nel 1958 confermò la loro esistenza. La fascia interna (quella più vicina alla Terra) si estende tra

<sup>2</sup> Alla luce dei rilevamenti delle sonde RBSP (Radiation Belt Storm Probes) della NASA, esiste in realtà una terza fascia intermedia.

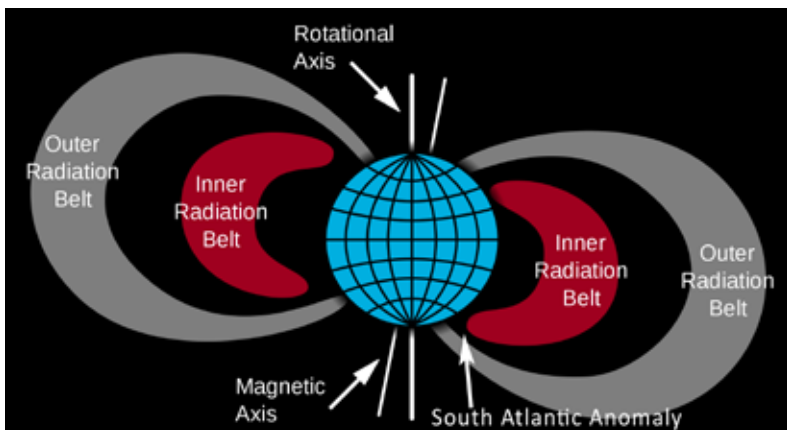
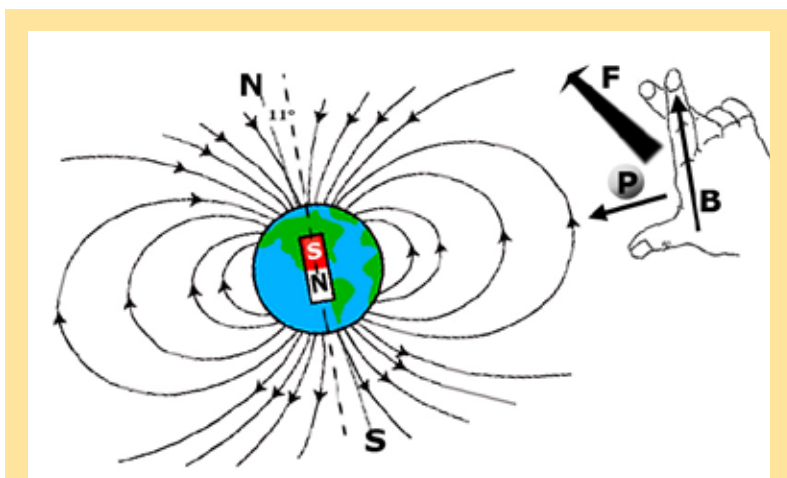


Figura 3 - Le fasce o cinture di Van Allen (NASA).

i 200 e gli 11.000 km; dato che il polo magnetico terrestre è inclinato rispetto a quello di rotazione, il confine della fascia interna "sfiora" la Terra in una zona della costa del Brasile definita anomalia Sud-Atlantica (un'anomalia del campo magnetico terrestre) compresa in queste coordinate geografiche: tra 0° e 60° Long. Ovest e tra 2° a 50° Lat. Sud [5]. Quando la Stazione Spaziale Internazionale (ISS) attraversa l'anomalia, gli occupanti assorbono il 25% di radiazione al giorno in più, prevalentemente dovuta ai protoni intrappolati nella fascia. La fascia esterna è composta principalmente di elettroni e si estende tra gli 11.000 e i 70.000 km. Il flusso di elettroni



**La regola della mano destra** nell'elettromagnetismo stabilisce il comportamento delle forze generate tra corrente elettrica e flusso magnetico, che vale anche per i raggi cosmici carichi. Pollice indice e medio devono formare un angolo di 90° tra di loro, l'indice è il verso di propagazione del flusso magnetico 'B', il pollice la direzione della carica elettrica positiva 'P' (i protoni), il medio è la forza risultante 'F'. Considerando un protone in direzione radiale verso la Terra, si vede che esso incontra all'equatore le linee di flusso magnetico perpendicolarmente e quindi subisce la massima deviazione possibile verso est. Lo stesso protone non subisce deviazioni ai poli, dove le linee di flusso sono parallele. Per cariche elettriche negative è il contrario (si può usare la mano sinistra)[8].

all'interno varia considerevolmente in funzione del vento solare. Il maggior pericolo per i viaggiatori spaziali sono i raggi X prodotti dagli elettroni "frenati" dallo scafo delle navicelle.

Le particelle delle fasce di Van Allen vengono attratte dai poli lungo le linee geomagnetiche, in un percorso a spirale. Le particelle confinate all'interno del campo magnetico terrestre seguono un percorso particolare dovuto alla geometria della magnetosfera; avvicinandosi in prossimità di un polo vengono poi riflesse verso il polo opposto, questo rimbalzo da un polo all'altro porta elettroni, ioni e protoni ad uno spostamento di deriva in direzioni opposte (le cariche negative derivano verso est e quelle positive verso ovest). Questo movimento di cariche elettriche causa la produzione di una corrente elettrica chiamata *corrente ad anello* in direzione ovest che si sovrappone alla fascia esterna ad un'altitudine tra i 13.000 e i 25.000 km. Ogni corrente elettrica produce un campo magnetico e il campo magnetico prodotto dalla corrente ad anello si oppone a quello geomagnetico.

Durante le tempeste solari, le particelle cariche vengono iniettate dalla magnetosfera esterna verso le fasce di Van Allen causando un forte aumento nella corrente ad anello con una corrispondente diminuzione del campo magnetico terrestre. Questo fa precipitare altre particelle dalla magnetosfera verso gli strati alti dell'atmosfera causando aurore intense e interferenze nelle comunicazioni radio.

### ■ Misurare la radioattività

I rivelatori per determinare la quantità di radiazione sono di diversa natura e nel corso degli anni divenuti particolarmente sofisticati. Per semplificare al massimo, si può dire che un rivelatore è un apparecchio che trasforma gli effetti prodotti da particelle attraversanti un mezzo (solido o gassoso), in impulsi elettrici che è possibile misurare elettronicamente. Tra i tipi principali di rivelatori utilizzati ci sono quelli a gas, come i classici contatori di Geiger-Müller basati appunto sulla ionizzazione di un gas e poi gli scintillatori, che come mezzo possono utilizzare sia elementi solidi che liquidi o gassosi e sono basati sull'eccitazione (diseccitazione)

molecolare di specifici materiali. Le unità di misura correntemente utilizzate nel sistema internazionale per quanto riguarda la radioattività sono il Becquerel (Bq), il Gray (Gy) e il Sievert (Sv). Il Bq corrisponde ad una disintegrazione al secondo di un radionuclide, il Gy invece è espresso come quantità di energia in Joule su 1 Kg di materia (qualsiasi) e si definisce *dose assorbita*. Quando si tratta invece di radiazione su esseri umani si usa il Sv o meglio i suoi sottomultipli (mSv: milli-sievert e  $\mu$ Sv: micro-sievert). Il Sv infatti tiene conto dei danni provocati dalla radiazione in base al tipo di irraggiamento (particella) e agli organi colpiti. Si parla di *dose equivalente* quando si considerano i vari tipi di radiazione; si parla di *dose efficace* quando si considerano specifici organi o tessuti, o la somma di tutti i tessuti e organi colpiti (come nei voli aerei). 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 diversa. Questo può essere comunque 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.

Quello che voglio sottolineare è che non si può utilizzare un dosimetro nato per misurare isotopi radioattivi da fall-out come il cesio, il potassio o altro e misurare il valore di radiazione equivalente portando lo stesso strumento in alta montagna o sugli aerei perché otterrebbe valori inesatti, anche se comunque vicini e indicativi del flusso di radiazione. Ad esempio in una spedizione in mongolfiera [10] il dosimetro in



Figura 4 - Dosimetro TEPC (Cortesia Peter Beck [6]).

dotazione (nato per la misura di isotopi radioattivi), ad un'altitudine di 6000 m ci aveva fornito valori di 0,602  $\mu$ Sv/h, un valore sottostimato se confrontato con i 0,840  $\mu$ Sv/h ricavati da altre fonti affidabili (tabella 1). In pratica ogni contatore Geiger o dosimetro è uno strumento a sé, per questo motivo vengono spesso utilizzati come valore di misura semplicemente gli impulsi al secondo cps (count per second) o al minuto cpm (count per minute) perché in questo caso si contano le singole particelle che attraversano gli strumenti ed è eventualmente possibile in seguito elaborare i risultati trasformandoli in Sv.

La tabella 1 mostra un confronto tra vari tipi di esposizione radioattiva, compresi quelli a cui ogni indivi-

SORGENTE	DOSE MEDIA ANNUA (o come indicato)
VIAGGIO IN AEREO DI 5 ORE	0.03 mSv (i.e. Londra - New York)
VIAGGIO DI 9 GIORNI SULLO SPACE SHUTTLE	4.1 mSv (STS-91 [5])
IN MONGOLFIERA A 6000 m (latitudine 45°)	0.00084 mSv/h [CARI6] e 0.000602 mSv/h [8,10]
RADIAZIONE COSMICA IN ALTA MONTAGNA (e.g. P.ta Nordend 4.609 m)	3.67 mSv [CARI6]
RADIAZIONE COSMICA A LIVELLO DEL MARE (media)	0.3 mSv
RADIAZIONE DAL SUOLO	0.29 mSv
INTERNA AL NOSTRO CORPO	0.4 mSv
MANGIARE UNA BANANA	0.0001 mSv
GAS RADON NATURALE	2 mSv
RADIOGRAFIA AL TORACE	0.08 mSv
PER T.A.C.	10 mSv
VIAGGIO SU MARTE ANDATA E RITORNO E SOGGIORNO DI 500 GIORNI	circa 1 Sv
DOSI FATALI	da 2 Sv in su

Tabella 1 - Dosi di radiazione assorbita da un individuo durante un anno, o come riportato ([8] e varie fonti).



**Figura 5** - Monitor di neutroni di tipo NM64 all'Osservatorio Sphinx dello Jungfrauoch (in Svizzera) a 3500 m di quota (cortesia Rolf Bütikofer e Erwin O. Flückiger).

duo è sottoposto ogni anno.

### ■ I modelli di simulazione e previsione

Nel corso degli ultimi anni sono stati fatti grandi progressi nello sviluppare modelli per rappresentare la radiazione in funzione della quota tenendo in considerazione le particelle SPE e quelle dei GCR oltre ai raggi gamma naturali presenti in atmosfera. I modelli tengono conto dei valori dati da satelliti, palloni stratosferici, rivelatori di neutroni e muoni a terra e dai voli in aereo appositamente progettati per la misura di radiazione in atmosfera.

Per determinare il flusso di particelle del vento solare fuori dall'atmosfera, le misure sono affidate ai satelliti ACE (Advanced Composition Explorer) e NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration); satelliti come AGILE e FERMI (e altri) determinano invece il flusso dei raggi cosmici primari. Per le misure in atmosfera si utilizzano i dati dei palloni stratosferici e i dati dei voli aerei con a bordo fantocci appositamente studiati. Questi fantocci o dosimetri sono costruiti per simulare esattamente la composizione chimica dei vari organi umani e studiarne gli effetti una volta esposti alla radiazione in alta quota. Un esempio di questo tipo di rivelatori sono i TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter, figura 4) che, montati su un migliaio di voli di alcune compagnie aeree hanno riportato importanti misure, sia nelle rotte Nord che in quelle dell'emisfero australe. I dati ricavati oltre a determinare i dosaggi di radiazione realmente assorbiti, servono per il confronto con i modelli di simulazione esistenti (che hanno mostrato uno scarto di pochi punti percentuali, quindi sono estremamente affidabili) e per lo sviluppo di nuovi modelli di calcolo.



**Figura 6** - Distribuzione dei monitor di neutroni fornita dal Neutron Monitor DataBase (NMDB: <http://www.nmdb.eu/>), tra i quali quello dell'Osservatorio SVIRCO (Studio Variazioni Intensità Raggi Cosmici) di Roma.

I monitor di neutroni (figura 5) impiegati per i rilevamenti a terra, sono stati ideati da John Simpson negli anni 1948÷1950, sono generalmente composti da grossi tubi riempiti di un gas sotto pressione a base di trifluoruro di boro ( $\text{BF}_3$ ) e i tubi sono annegati in un basamento di piombo e cemento che li isola dalla radiazione ambientale, dato che lo scopo è di misurare solo i neutroni "cosmici". Nonostante negli sciami atmosferici sia prevalente la radiazione di particelle elettricamente cariche, i monitor di neutroni sono fondamentali per determinare i valori di rigidità magnetica delle particelle in funzione di altitudine e latitudine: essi infatti hanno il vantaggio di misurare il flusso di particelle a bassa energia ed ottenere uno spettro di rilevamento più allargato. Le particelle cariche invece perdono gran parte della propria energia in atmosfera per via delle interazioni elettromagnetiche e quelle a bassa energia vengono completamente assorbite. I monitor di neutroni così come quelli di muoni sono distribuiti a varie quote su tutto il pianeta (figura 6) e danno un grande contributo a ricerche di varia natura come ad esempio quelle meteorologiche e geofisiche.

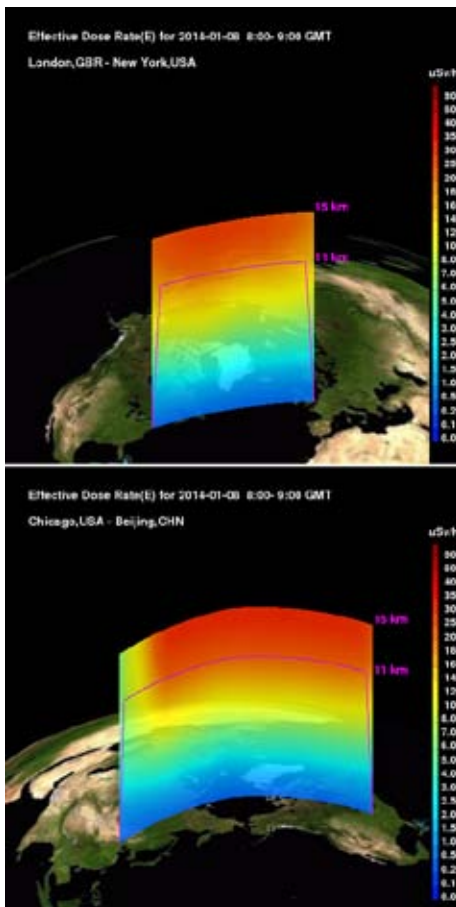
L'organizzazione di tutti i dati ricavati dai vari strumenti in orbita e a terra ha permesso la creazione di diversi modelli di simulazione e previsione tra cui:

- CARI, sviluppato dall'Amministrazione Federale per l'Aviazione (FAA) in USA, tramite il quale è possibile fare simulazioni di volo inserendo i dati degli aeroporti di partenza, di destinazione e calcolare la dose di radiazione assorbita (CARI tuttavia non tiene conto di eventuali eventi SPE). Esistono diverse versioni di CARI tra cui CARI-6 e CARI-6M che sono scaricabili liberamente ([http://www.faa.gov/data\\_research/research/med\\_humanfacs/aeromedical/radiobiology/](http://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/)) e anche utilizzabile online (<http://jag.cami.jccbi.gov/cariprofile.asp>).

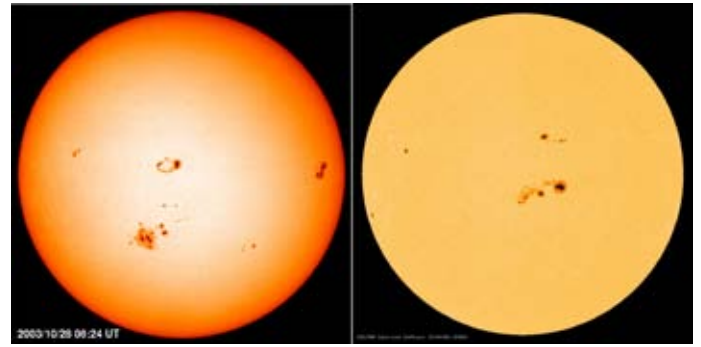


- EPCARD, che utilizza un codice di Monte Carlo (FLUKA), uno tra i più attendibili sistemi di simulazione di raggi cosmici in atmosfera.
- PC-AIRE un modello semi-empirico basato su dati misurati, utilizzabile on-line registrandosi (<http://flyer.pcaire.com/>).
- AIR sviluppato dalla NASA utilizza dati misurati da centinaia di voli in aereo e palloni stratosferici integrati in un codice teorico.
- NAIRAS (Nowcast of Atmospheric Ionizing Radiation for Aviation Safety).

Quest'ultimo è uno dei modelli più completi e di ultima generazione per la determinazione della dose di radiazione assorbita in alta quota o nei voli aerei. NAIRAS è stato creato con l'obiettivo di monitorare in tempo reale (<http://sol.spacenvironment.net/~nairas/index.html>) i livelli di radiazione dal suolo fino a 100 km di quota con particolare attenzione ai voli di linea commerciali e fornire così un utile servizio a chi opera in campo aeronautico (figura 7). Esso elabora i dati in funzione del codice di calcolo HZETRN (High charge (Z) and Energy Transport) della NASA; un sistema che calcola la distribuzione della radiazione ionizzante in atmosfera e tiene conto dei rilevamenti in real-time



**Figura 7** - NAIRAS elabora i dati in tempo reale, nella figura in alto è rappresentata la rotta New York - Londra, in quella in basso la rotta Chicago -Pechino (polare), i grafici sono relativi al 8 gennaio 2014 in cui il Sole era in un periodo particolarmente attivo.



**Figura 8** - Il Sole, a sinistra immagine del 28.10.2003 durante l'evento Halloween e a destra immagine del 8.01.2014. Il numero di macchie solari indica l'alto livello di attività solare (NASA).

del flusso di protoni a bassa energia ottenuti dal rivelatore EPAM (Electron, Proton and Alpha Monitor) del satellite ACE. Per integrare tutto lo spettro energetico dei protoni vengono utilizzati strumenti a bordo dei satelliti geostazionari NOAA/GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). HZETREN è utilizzato in un'ampia gamma di applicazioni riguardo alla radiazione nel trasporto aereo, come ad esempio il calcolo dosimetrico associato ai rischi per gli astronauti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale o dello Space Shuttle (quando c'era).

La differenza principale tra i modelli precedentemente esposti (CARI e altri) e NAIRAS è che impiegando il codice HZETREN, esso beneficia dei continui aggiornamenti sul grado di radiazione al culmine dell'atmosfera e sulla pressione atmosferica in relazione all'altitudine. La pressione dell'atmosfera (ovvero il peso della colonna d'aria ad una data altitudine, che si può misurare in  $gr/cm^2$ ) infatti varia ad esempio con la temperatura o con la presenza di acqua (vapore) e la radiazione è in funzione della pressione/altitudine (grafico 2A).

Poiché non è possibile schermare la radioattività cosmica, l'atmosfera è l'unico schermo che abbiamo per proteggerci dalla radiazione e il grado di schermatura ad una certa quota dipende dalla massa d'aria sovrastante; questi valori vengono integrati in HZETREN utilizzando i dati del National Center for Environmental Prediction (NCEP).

Esiste poi un altro algoritmo integrato in NAIRAS, l'IGRF (International Geomagnetic Reference Field) tramite il quale è possibile determinare l'influenza del campo geomagnetico sulla radiazione, impiegando i valori di cut-off della rigidità magnetica.

Al momento nessun modello, compreso NAIRAS, tiene conto della forma e spessore degli scafi degli aerei che potrebbero, secondo alcuni studi, ridurre la radiazione dovuta ai GCR di circa un 10% e quelli da SPE dell' 1%. Un altro parametro non ancora integrato in

NAIRAS è quello relativo alla corrente ad anello, ma i responsabili di questo progetto pensano in futuro di integrare anche questi dati.

NAIRAS ha dato prova di un ottimo funzionamento anche in particolari condizioni di simulazione come durante l'evento SPE chiamato Halloween 2003 (cosiddetto in quanto avvenuto dal 29 al 31 ottobre 2003), che fu una tra le cinque maggiori tempeste solari del ciclo 23 del Sole. Da notare che essendo passati esattamente undici anni (un ciclo solare), nel corso del 2014 il Sole si ritrova in un nuovo massimo di attività (il 24°) quindi potrebbe ancora regalarci qualche sorpresa simile (figura 8).

La simulazione ha mostrato che durante gli SPE, i valori della radiazione risultanti da simulazioni che non tengano conto della dinamica del campo magnetico terrestre potrebbero dare risultati in difetto. È emersa inoltre la forte dipendenza della radiazione con l'altitudine. Infatti i valori aumentano in modo esponenziale da 5000 m fino a 11.000 m dove si nota un sensibile incremento che diventa poi evidente a 15000 m: un chiaro segnale dell'importanza dello schermo atmosferico.

#### ■ Dosi misurate e consentite

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 (figura 9), ora sono normalmente praticate da diverse compagnie aeree. Il riferimento in particolare va a quelle che attraversano i poli dove la radiazione assorbita è la maggiore in assoluto. Attraversare i poli del resto fa risparmiare parecchio carburante e questo è il motivo che giustifica la scelta delle compagnie di navigazione aerea.

La dipendenza della radiazione con la quota è un parametro importante per l'aviazione civile che può così mitigare gli effetti volando ad una quota più bas-

sa. Invece i Jet privati generalmente assorbono più radiazioni se non tengono conto di queste considerazioni, in quanto seguono rotte a quote più elevate, tra i 12 e i 13 km.

I dati della simulazione di Halloween 2003 confrontati con i dati dei valori realmente misurati durante altri eventi SPE hanno mostrato un'alta corrispondenza.

Durante un volo tra Londra e New York (corridoio Nord-Atlantico) la radiazione efficace assorbita è di 0,054 mSv durante SPE, da confrontare con 0,030 mSv in periodi normali [2].

Tra Chicago e Pechino (rotta polare) la dose è di 0,122 mSv durante SPE e 0,116 mSv in periodi normali [2].

Tra Chicago e Monaco non si sono invece notate differenze di rilievo nella radiazione durante SPE, rispetto ai periodi normali in cui essa risulta essere di 0,032 mSv.

Da questi risultati è emerso anche che il campo magnetico solare ha una grande influenza sulla radiazione assorbita: infatti più il Sole è attivo, più è intenso il suo campo magnetico che limita i raggi cosmici galattici (un meccanismo definito effetto Forbush). Quindi paradossalmente la radiazione a basse latitudini potrebbe essere minore durante gli SPE che durante periodi normali; questo potrebbe spiegare i dati risultanti dal volo Chicago-Monaco.

L'attenzione per la radiazione in aereo è attestata dalla Commissione Internazionale sulla Protezione Radiologica (ICRP), dall'Agenzia per la Protezione Ambientale americana (EPA), dall'Amministrazione Federale per l'Aviazione (FAA) statunitense e dall'Euratom (European Atomic Energy Community o Comunità europea dell'energia atomica). Tutti questi enti considerano gli equipaggi dei voli aerei commerciali come lavoratori radiologici al pari di operatori di centrali nucleari. Tuttavia a differenza di questi ultimi, non tutti gli Stati sottopongono gli equipaggi di volo a controlli medici periodici, ne tantomeno i passeggeri sono informati



Figura 9 - Le rotte aeree commerciali negli ultimi 20 anni (wikipedia)

dei potenziali rischi, con particolare preoccupazione per quanto riguarda le donne in gravidanza.

Secondo l'ICRP (pubblicazione 103 del 2007) il limite di sicurezza stabilito per i lavoratori a rischio di radiazione è di 20mSv annui e di 1mSv per passeggeri e gestanti. La direttiva europea Euratom 96/29 sulla radiazione ionizzante considera il personale di volo come professionalmente esposto e il limite di sicurezza stabilito per tali lavoratori è di 100 mSv in un periodo di 5 anni consecutivi che non ecceda i 50 mSv all'anno; Il limite per la popolazione rimane quello di 1 mSv. I lavoratori minorenni non dovrebbero essere esposti a radiazione; le donne in gravidanza e in allattamento non dovrebbero essere sottoposte a rischio di radiazione, mentre gli studenti tra i 16 e i 18 anni di età che per studio siano a rischio radioattivo non dovrebbero superare i 6 mSv per anno.

I lavoratori esposti 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 [11].

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 15.000 metri di quota, i quali non devono superare il limite di 20 mSv di dose annua, mentre per il resto della popolazione e le gestanti il limite stabilito è sempre di 1mSv [9].

In Italia esistono due categorie di lavoratori esposti a radiazione: la categoria A che comprende chi in un anno è esposto a radiazione maggiore di 6 mSv di dose efficace (con altri parametri per specifici organi eventualmente esposti), e la categoria B per chi è esposto a dosi sopra 1 mSv ma che non appartenga alla categoria A (poiché la mia competenza esula dagli aspetti legali, per chi fosse interessato il consiglio è di consultare gli organi più autorevoli in campo legislativo).

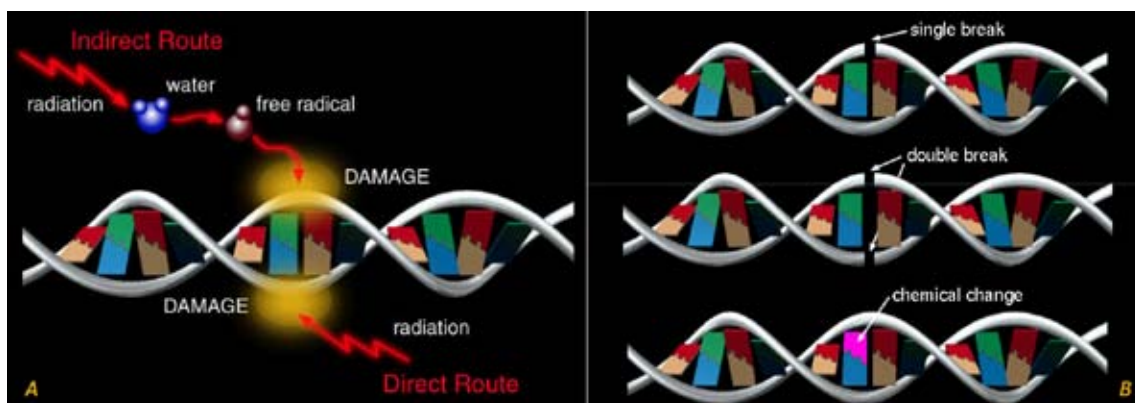
## ■ Rischio Radioattività

I rischi principali per la salute dovuti alla radiazione interessano gli effetti sul DNA che possono manifestarsi in due modi:

1. Per azione di radicali liberi prodotti dalla radiazione, cioè ioni molto reattivi (come diversi tipi di molecole di ossigeno) che possono minacciare il normale funzionamento delle cellule e "ossidare" il DNA.
2. Per azione diretta di particelle che interagiscono direttamente col DNA ad esempio per collisione.

I danni della radiazione ionizzante possono riguardare la rottura dei filamenti o a modifiche chimiche nel DNA (figura 10). Una tipica conseguenza di queste interazioni possono essere le traslocazioni cromosomiche su cui sono stati compiuti studi a riguardo [12]. Le aberrazioni cromosomiche indotte da bassi livelli di radiazione vengono però di solito eliminate dal sistema circolatorio e per valutare i danni da radiazione gli esami di valutazione devono avvenire poco tempo dopo l'esposizione. La traslocazione cromosomica è una delle più stabili aberrazioni e per questo viene considerata come sistema di analisi e valutazione per diversi tipi di radiazione, utilizzando il metodo FISH (Fluorescence in situ Hybridation). I dati di questo studio sui piloti rispetto a popolazione diversa non hanno però mostrato significative differenze: è stato solo notato un lieve aumento per piloti con diversi anni di volo alle spalle, anche tenendo presente che i livelli di frequenza di traslocazione aumentano con l'età.

Finora le ricerche epidemiologiche sul rischio di tumori (indotti da radiazione) tra i piloti sono inconsistenti: ad eccezione di un significativo aumento nel rischio di cancro alla pelle non sono stati osservati altri tipi di neoplasie. Tra le patologie riportate da piloti solo alcuni tipi possono essere associate alle radiazioni, come la cataratta e alcuni tipi di tumori



**Figura 10** - A) Le possibili minacce per il DNA e B) i danni provocati dalla radiazione ai filamenti del DNA (cortesia Christopher J. Mertens).

(leucemia mieloide e tumori al colon e vescica [12]). Le osservazioni rimangono inconsistenti per via del basso numero di individui coinvolti nelle ricerche, ovvero dalla bassa statistica.

Per quanto riguarda gli eventuali nascituri, sono stati calcolati i possibili rischi nel caso di esposizione alla radiazione da parte di un genitore o di entrambi i genitori.

Il rischio per gravi difetti genetici è stimato essere di 4 su un milione per mSv (0.0004% mSv) di dose assorbita. Ad esempio una dose di 10 mSv annua assorbita da parte di un genitore, significa per il nascituro una probabilità su 25000 di venire alla luce con uno o più difetti genetici[4]. Per quanto riguarda le gestanti è meglio attenersi quindi a non superare il dosaggio limite di 1 mSv stabilito dai vari enti. Per qualche volo nel corso di una gravidanza, anche in presenza di eventi SPE (come durante Halloween 2003) i valori di dose efficace assorbita, né si avvicinano né superano i valori limite precedentemente esposti, anche se un singolo viaggio come Chicago-Pechino (rotta polare) fa assorbire circa il 12% della radiazione ammessa in un anno (sempre considerando i valori per gestanti e non lavoratori, ovvero 1 mSv) [4].

Sebbene non sia possibile escludere danni dovuti alla radioattività d'alta quota nel corso di tutta una carriera di volo, è impossibile stabilire se il presentarsi di una malattia sia dovuto al motivo della radiazione assorbita. Questo perché nella storia dello studio della radioattività sono più conosciuti gli effetti di particelle a bassa energia con alte intensità (dosi) piuttosto che di particelle altamente energetiche a bassa intensità quali sono i raggi cosmici in atmosfera. Per questo motivo sarebbe importante una maggiore indagine e un più alto coinvolgimento di equipaggi di volo nello studio epidemiologico. Alcuni studi su soggetti esposti a radioattività mostrano addirittura una capacità del sistema immunitario umano nello sviluppare sistemi di compensazione.

## ■ Radioprotezione

Gli effetti principalmente causati dalla radiazione cosmica sono divisi in due categorie, quello deterministico e quello stocastico. Il primo tipo si manifesta dopo poco tempo dall'esposizione, come può avvenire per astronauti in orbita durante tempeste solari. Le conseguenze sono di tipo fisico, come nausea e vomito. Il secondo tipo invece è di natura statistica ovvero come visto in precedenza, la probabilità nel corso degli anni di subire danni al DNA. Poiché non è possibile schermare la radiazione cosmica, (servirebbe qualche metro di piombo), non c'è modo di proteggersi, l'unica possibilità da prendere in consi-

derazione da chi per dovere o per scelta è sottoposto a radiazione cronica è quello di utilizzare una sorta di profilassi su due fronti: il primo è quello di utilizzare integratori che aiutino a combattere le molecole ossidanti, ovvero combattere i radicali liberi, e il secondo è quello di aiutare il sistema immunitario a ricostruire le cellule (e il DNA) danneggiate.

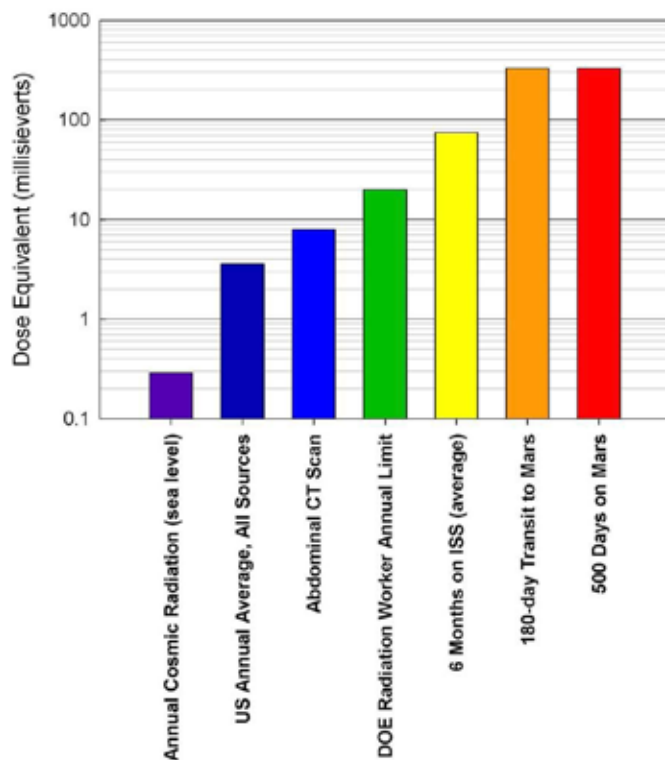
Fanno parte degli antiossidanti i classici integratori di vitamine come l'acido ascorbico (vitamina C) il tocoferolo (vitamina E) e il beta-carotene (vitamina A) in combinazione con il selenio ed altri micronutrienti naturali quali vari polifenoli e flavonoidi come il the verde. Anche la melatonina è una delle sostanze che ha mostrato capacità di protezione verso la radiazione con potere antiossidante superiore a quello delle vitamine C ed E [13].

Per quanto riguarda la ricostruzione del DNA e le cellule danneggiate, il selenio sembra avere anche poteri stimolanti in questo senso così come altre sostanze vegetali come aglio mirtillo e ginseng. Il ginseng noto per le sue proprietà toniche e ricostituenti è preso seriamente in considerazione in medicina e alcuni studi dimostrano i suoi benefici effetti nei confronti del DNA danneggiato. Esistono anche alcuni farmaci mirati per combattere i danni da specifici tipi di radiazione tra cui la ben nota amifostina. Tali farmaci però sono indicati solo per esposizioni di un certo rilievo ed inoltre hanno diversi effetti collaterali. Il ginseng, sia la specie americana (*panax ginseng*) che quella asiatica (*panax quinquefolius*) oltre a non avere effetti collaterali ha mostrato un grande potere di protezione e rigenerazione. Una ricerca ha fatto esperimenti con diversi campioni di cellule animali *ex vivo* (prelievi in vitro) e *in vivo* (su cavie) somministrando l'estratto di ginseng sia prima che dopo l'esposizione dei soggetti ai raggi gamma (da cesio radioattivo); gli esperimenti hanno dimostrato una chiara diminuzione nella doppia rottura dei filamenti del DNA (figura 10) a conferma di un chiaro effetto radioprotettivo da parte del ginseng [14]. Lo studio su campioni umani (*ex vivo*) ha ulteriormente confermato gli stessi benefici. In particolare ha evidenziato che nei linfociti che generalmente dovrebbero riparare il DNA danneggiato, la loro capacità rigenerativa viene soppressa dalla radiazione ionizzante, mentre questa funzionalità viene riacquisita con la somministrazione dell'estratto di ginseng. Gli effetti positivi del ginseng negli esperimenti si manifestano sia nel caso esso venga somministrato 24 ore prima, sia 90 minuti dopo l'esposizione alla radiazione e sono direttamente proporzionali al grado di concentrazione dell'estratto. La cosa più interessante è che il ginseng ha mostrato la stessa efficacia del WR1065 (il metabolita dell'amifostina) [15]. Il meccanismo di azione

del ginseng non è del tutto chiaro, dal momento che sembra che abbia più efficacia l'estratto crudo acquoso dell'intera pianta, piuttosto che l'uso di ginsenosidi (il principio attivo principale del ginseng) isolati e purificati [14]. Malgrado la provata efficacia *in vitro*, non ci sono ancora stati studi *in vivo* su esseri umani, nei quali, dopo la somministrazione, il processo digestivo e di assimilazione nell'intestino potrebbe fare diminuire in parte i benefici [15].

## ■ Voli spaziali e Marte

Nei voli spaziali la minaccia radioattiva è data dalle particelle primarie dei GCR, dal vento solare e dagli SPE. Il rover Curiosity, la navicella mandata su Marte (partita nel 2011 e arrivata nel 2012) alla ricerca di vita extraterrestre ha portato tra i suoi strumenti anche un rivelatore di radiazione, il RAD (Radiation Assessment Detector). Lo strumento è stato costruito per capire il grado di radiazione assorbita nell'ottica di inviare in futuro un equipaggio umano sul pianeta rosso. I risultati emersi finora sono 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, vedi tabella 1 e grafico 4). Secondo alcuni esperti della NASA questa dose sarebbe inaccettabile e per gli astronauti farebbe aumentare del 20% il rischio di sviluppare un tumore. I valori si possono confrontare con i 12 mSv delle missioni Apollo[17], 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. Un valore che di per sé non è alto, ma che va sommato ai valori di radiazione assorbiti durante le normali attività di un astronauta (voli aerei al limite della stratosfera, altri voli in orbita e simili). A questo proposito comunque si può notare che quasi tutti gli astronauti coinvolti nelle missioni Apollo (una trentina) hanno raggiunto venerande età. Fanno eccezione Alan Shepard comandante dell'Apollo 14 morto di leucemia, Jack Swigert (Apollo13) deceduto per un tumore al midollo osseo e Deke Slayton (Apollo Soyuz) per un tumore cervello. Nessuno può però affermare con assoluta certezza che le loro malattie siano state causate dalla loro attività nello spazio. Al momento la tecnologia non permette di dotare le navicelle di difese efficienti. I difensori del progetto di inviare equipaggi su Marte sostengono comunque che ci sono altri rischi e ben più minacciosi, tra i quali meteoriti e malfunzionamenti di varia natura. Nonostante questo, rimane il fatto che i livelli di radiazione assorbiti per la conquista di Marte sarebbero veramente alti. ■



**Grafico 4** - Confronto tra varie dosi di radiazione assorbite (NASA).

© Marco Arcani 2014

email: marco.arcani@astroparticelle.it  
www.astroparticelle.it

## Bibliografia:

- [1] Christopher J. Mertens - *NASA Atmospheric Ionizing Radiation for Aviation Safety* - NAIRAS/NASA annual report 2009.
- [2] Christopher J. Mertens et al. - *Geomagnetic influence on aircraft radiation exposure during a solar energetic particle event in October 2003* - SPACE WEATHER, VOL. 8, S03006, doi:10.1029/2009SW000487, 2010.
- [3] Christopher J. Mertens et al. - *Influence of Space Weather on Aircraft Ionizing Radiation Exposure* - 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 7 - 10 January 2008, Reno, Nevada.
- [4] Wallace Friedberg, Kyle Copeland - *What Aircrews Should Know About Their Occupational Exposure to ionizing Radiation* - Civil Aerospace Medical Institute Federal Aviation Administration Oklahoma City, Office of Aerospace Medicine Washington, DC 20591.
- [5] Wallace Friedberg, Kyle Copeland - *Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth* - Civil Aerospace Medical Institute Federal Aviation Administration Oklahoma City, OK 73125, May 2011.
- [6] P. Beck et al. - *TEPC Reference Measurements at Aircraft Altitudes during a Solar Storm* - ARC Seibersdorf research, 2444 Seibersdorf, Austria Health Physisc Division.
- [7] Peter K.F. Grieder - *COSMIC RAYS AT EARTH Researcher's Reference Manual and Data Book* - Elsevier 2001.
- [8] Marco Arcani - *Astroparticelle, in viaggio tra i Raggi Cosmici* - Simple 2013.
- [9] Autori vari - *Le Radiazioni Cosmiche* -GRUPPO ALITALIA.
- [10] Marco Arcani, Cesare Guaita, Antonio Paganoni, VHANESSA expedition, Astroparticle Physics, Volume 53, January 2014, Pages 100-106, ISSN 0927-6505, <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.03.005> - Elsevier.
- [11] COUNCIL DIRECTIVE 96/29/EURATOM of 13 May 1996 - *laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation.*
- [12] L C Yong et al. - *Increased frequency of chromosome translocations in airline pilots with long-term flying experience* - Occup. Environ. Med. 2009;66;56-62; originally published online 11 Dec 2008; doi:10.1136/oem.2008.038901.
- [13] J.E. Williams - *The Best Natural Ways to Defend Against Radiation Damage : An Exclusive Renegade Health Article* Feb 2012 - <http://renegadehealth.com/blog/2012/02/21/the-best-natural-ways-to-defend-against-radiation-damage>.
- [14] Tung-Kwang Lee et al. - *Radioprotective potential of ginseng* - Mutagenesis vol. 20 no. 4 pp. 237–243, 2005 Advance Access publication 14 June 2005.
- [15] Tung-Kwang Lee et al. - *Radioprotective Effect of American Ginseng on Human Lymphocytes at 90 Minutes Postirradiation: A Study of 40 Cases* - the Journal of Alternative and Complementary Medicine volume 16, number 5, 2010, pp. 561–567.
- [16] Preeti Verma ET AL. - *Management of Radiation Injuries by Panax ginseng Extract* - Research Article Journal of Ginseng Research Vol. 35, No. 3, 261-271 (2011).
- [17] Francis A. Cucinotta - *Space Radiation Organ Doses for Astronauts on Past and Future Missions* - NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Houston.