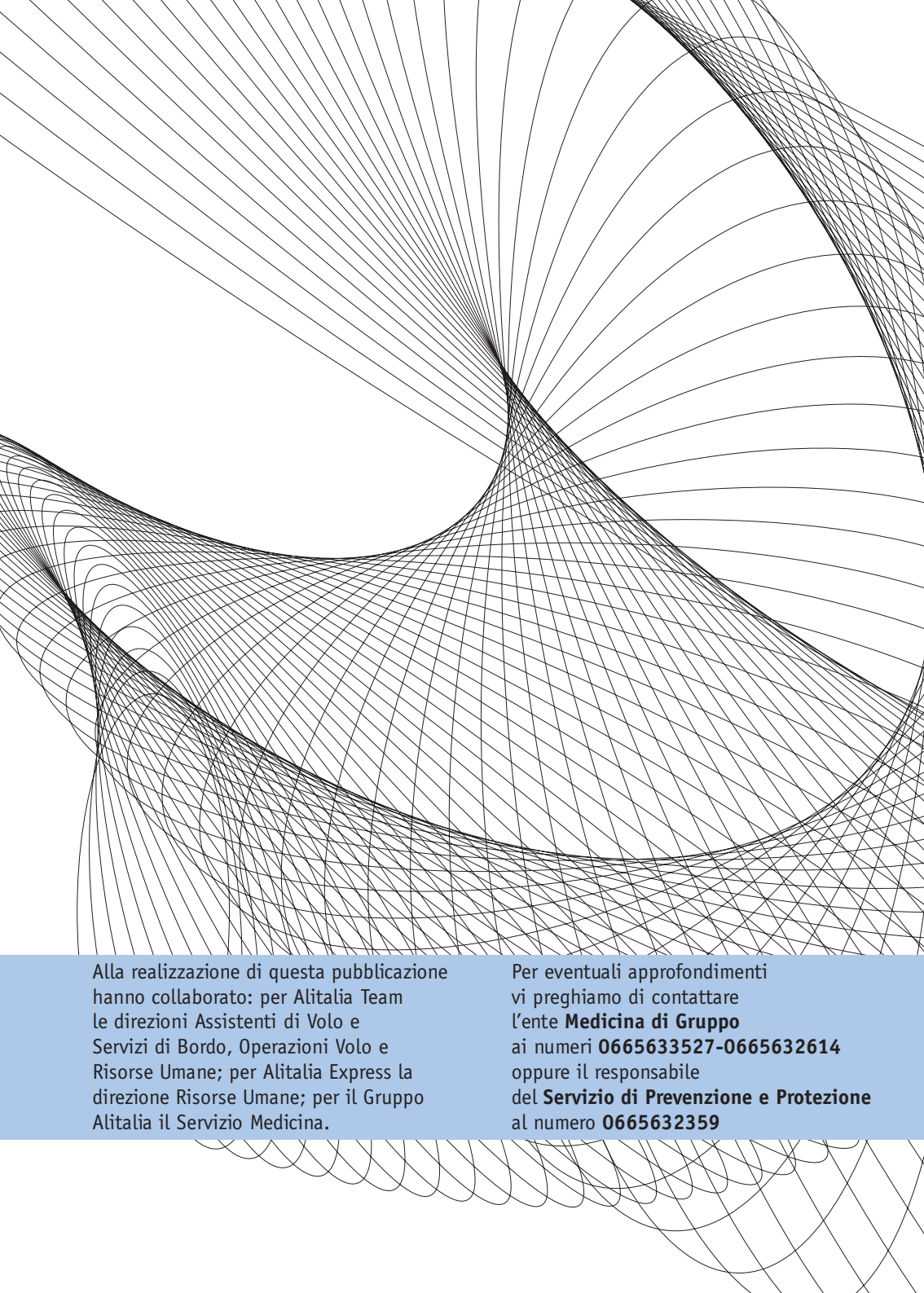


Le radiazioni cosmiche





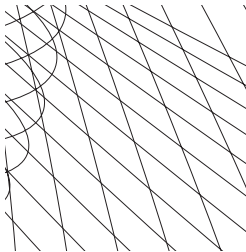


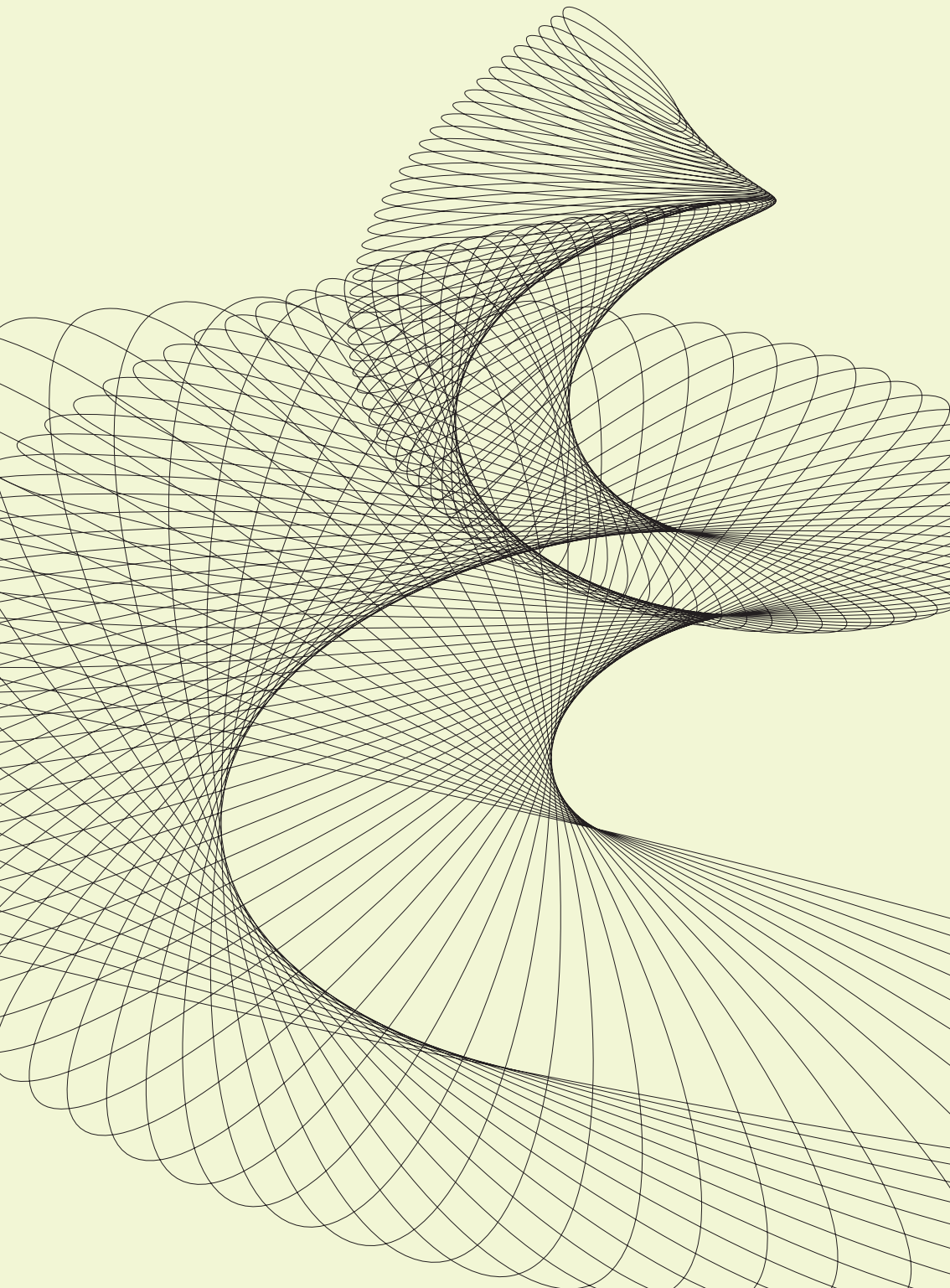
Alla realizzazione di questa pubblicazione hanno collaborato: per Alitalia Team le direzioni Assistenti di Volo e Servizi di Bordo, Operazioni Volo e Risorse Umane; per Alitalia Express la direzione Risorse Umane; per il Gruppo Alitalia il Servizio Medicina.

Per eventuali approfondimenti vi preghiamo di contattare l'ente **Medicina di Gruppo** ai numeri **0665633527-0665632614** oppure il responsabile del **Servizio di Prevenzione e Protezione** al numero **0665632359**

Indice

Introduzione	3
Che cosa sono le radiazioni	5
Che cosa sono le radiazioni cosmiche	7
Origine	7
Trasformazione	8
Metodi di misura delle radiazioni cosmiche	9
Strumenti di misurazione	9
Modelli di calcolo della dose	9
Unità di misura	10
Entità della dose rilevata dalla ricerca ANPA	11
Limite di dose e riferimenti legislativi	13
Ricerche e studi sugli effetti delle radiazioni cosmiche	17
Effetti sulla salute correlati all'esposizione a radiazioni cosmiche	19
Appendice	23
A.1 Cenni sulla costituzione dell'atomo	23
A.2 Le radiazioni	24
2.1 Le radiazioni non ionizzanti	24
2.2 Le radiazioni ionizzanti	25
2.3 Le radiazioni elettromagnetiche	25
A.3 Altre sorgenti di radiazioni presenti nell'attività di volo	26
A.4 Valore di fondo delle radiazioni	26
A.5 Strumenti per la misura diretta delle radiazioni ionizzanti	28
5.1 Misure indirette con dosimetri passivi	29
A.6 Campagna nazionale di misure della esposizione del personale di volo	30
A.7 Irradiazione in utero: embrione e feto	31
Glossario	33





Introduzione

Negli anni '90, sulla base dei molti studi precedenti, sono state avviate alcune iniziative finalizzate alla protezione di quelle diverse categorie di lavoratori che, a causa dell'attività svolta, risultano esposti a sorgenti naturali di radiazioni.

A seguito delle ricerche effettuate a livello internazionale è stata emanata una raccomandazione, raccolta a livello Europeo, che ha innescato nuovi approfondimenti sul tema. Per la parte relativa al trasporto aereo (di cui si interessano anche JAR-OPS e ENAC), l'Alitalia ha fin da principio contribuito alle ricerche europee ed è a tutt'oggi impegnata nei gruppi di lavoro ancora attivi.

Il coinvolgimento degli stati europei a sua volta ha avuto origine da alcune direttive che sono state poi recepite a livello nazionale e tradotte in legge.

In questo contesto uno degli aspetti fondamentali è quello di informare tutti i lavoratori soggetti a sorgenti naturali di radiazioni, nel nostro caso gli equipaggi di volo, sul tema della esposizione a radiazioni ionizzanti e dei loro effetti sulla salute.

Tale obiettivo si concretizza oggi anche in questa pubblicazione con la quale cerchiamo di illustrare con semplicità, ma con rigore una materia così complessa.

In tal senso l'opuscolo si sofferma sugli aspetti più rilevanti per il trasporto aereo ed in particolare per i naviganti, trattando il tipo di radiazioni a cui si è esposti in alta quota, la loro misurazione, gli obblighi stabiliti dal più recente provvedimento legislativo e i risultati emersi dalle ricerche effettuate. E, per quanti abbiano il desiderio di rinfrescare o la curiosità di approfondire temi così coinvolgenti, c'è anche un'appendice in cui sono disponibili ulteriori informazioni che aiuteranno a comprendere meglio il fenomeno delle radiazioni cosmiche.

Forse dopo aver letto questa pubblicazione potreste ritenere gli odierni risultati medico scientifici non del tutto appaganti la vostra voglia di

chiarezza, d'altra parte scoprirete che l'attuale conoscenza non è ancora in grado di sciogliere qualsiasi dubbio in materia e quindi indirizza i legislatori e gli operatori verso l'adozione di interventi fortemente cautelativi.

La nostra volontà come Compagnia aerea è di impegnarci per fornire un contributo affinché le ricerche attualmente in corso pervengano ad una rapida e favorevole conclusione.

Al momento, realizzando questo opuscolo, crediamo di aver fornito elementi di conoscenza utili a prevenire alcuni potenziali rischi e sicuramente ad inquadrare più correttamente il fenomeno delle radiazioni cosmiche.

ALCUNE TAPPE FONDAMENTALI

- 1991** Emanazione a cura di ICRP (International Commission for Radiological Protection) di una raccomandazione (ICRP 60) affinché anche gli equipaggi dell'aviazione civile vengano considerati professionalmente esposti a sorgenti naturali di radiazioni.

- 1992** Costituzione di un Gruppo di Lavoro a cura di EURADOS (European Radiation Dosimetry Group) in collaborazione con l'Unione Europea, incaricato di indagare gli aspetti scientifici e tecnici della dosimetria che interessa il Personale Navigante dell'aviazione civile.

- 1996** Emanazione della Direttiva Euratom 96/29 a cura della Unione Europea con le prescrizioni per la regolamentazione della materia entro il 13 maggio 2000.

- 2000** Emanazione del Decreto Legislativo n° 241 del 26 maggio 2000, a cura dello Stato italiano che recepisce la Direttiva europea. Il decreto è stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n° 203 del 31 agosto 2000 ed entrerà in vigore il 1° gennaio 2001.

Che cosa sono le radiazioni

Per meglio comprendere il tema specifico oggetto di questo opuscolo, appare utile fornire alcune informazioni di carattere generale sul tema delle radiazioni. Innanzitutto è bene ricordare che le radiazioni costituiscono una componente naturale dell'ambiente in cui viviamo ed anzi alcune di esse, come la luce e il calore, sono essenziali per la nostra sopravvivenza.

A

Per saperne di più consultate le Appendici A.2 e A.1 a pag. 24 e 23

Con il termine radiazione si indica il prodotto di un processo di trasformazione di alcuni atomi che, resi instabili dalla loro particolare struttura, tendono a raggiungere una configurazione più stabile emettendo energia e materiale corpuscolare.

G

Vedi Glossario a pag. 33

I vari tipi di radiazioni esistenti possono essere suddivisi in base a criteri diversi.

In primo luogo in base alla capacità di innescare il fenomeno della ionizzazione le radiazioni vengono classificate come:

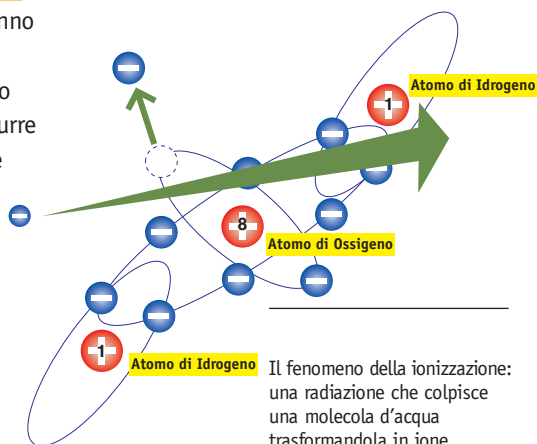
A

Per saperne di più consultate le Appendici 2.1 e 2.2 a pag. 24 e 25

Radiazioni non ionizzanti

Radiazioni ionizzanti

Le radiazioni che hanno sufficiente energia possono, nell'impatto con la materia, produrre interazioni elettriche che determinano la perdita di elettroni dagli atomi con cui interagiscono, innescando così il fenomeno definito ionizzazione.



Il fenomeno della ionizzazione: una radiazione che colpisce una molecola d'acqua trasformandola in ione.

Secondariamente, le radiazioni possono essere di origine naturale o artificiale e quindi:

•  **Radiazioni di origine naturale**

- attività radioattiva propria della crosta terrestre;
- radiazioni di origine cosmica presenti fino al livello del suolo.

•  **Radiazioni artificiali**

- reattori nucleari;
- ricadute di esplosioni atomiche;
- sorgenti radioattive prodotte dall'uomo, tra cui quelle usate in campo sanitario a fini diagnostici o terapeutici;
- raggi X.

Infine, possiamo distinguere tra le radiazioni che troviamo sulla superficie della terra e quelle presenti nell'atmosfera.

•  **Radiazioni presenti a livello del suolo**

- si tratta di un mix di radiazioni comunemente definito, anche ai sensi di legge, fondo naturale di radiazioni.

•  **Radiazioni presenti nell'atmosfera**

- le più importanti tra le radiazioni presenti nell'atmosfera sono le radiazioni cosmiche. Di esse tratteremo in modo più approfondito nel paragrafo seguente data la loro particolare rilevanza per gli equipaggi di volo; gli equipaggi sono anche interessati da altri tipi di radiazioni la cui incidenza risulta tuttavia marginale.

A

Per saperne di più
consultate le
Appendici R.4
e R.3 a pag. 26

Che cosa sono le radiazioni cosmiche

1. Origine: radiazioni primarie

Le radiazioni cosmiche sono radiazioni ionizzanti che si incontrano nell'atmosfera e che arrivano fino al livello del suolo tanto è vero che sono una delle componenti del fondo naturale di radiazioni a cui siamo abitualmente esposti.

Le radiazioni cosmiche primarie sono originate da sorgenti stellari, galattiche e dal sole.

La componente più rilevante è quella di origine galattica e stellare che risulta costituita da:

- 85% protoni
- 12% elio
- 1% ioni
- 2% elettroni

G

Vedi Glossario
a pag.35

Prima di raggiungere l'atmosfera, le radiazioni cosmiche primarie interagiscono con il campo magnetico terrestre subendo una prima

Un altro fenomeno che può modificare la intensità della radiazione cosmica è il **solar flare** un evento solare raro, non prevedibile in termini di durata, intensità e spettro della radiazione.

modificazione della loro intensità in quanto vengono in parte respinte e in parte deviate verso i poli, in proporzione all'intensità del campo magnetico stesso.

Tale campo è a sua volta influenzato dall'attività solare che segue un ciclo di 11 anni. Durante questo periodo di tempo l'emissione di radiazioni da parte del sole fluttua da un minimo ad un massimo, influenzando in misura proporzionale l'intensità del campo magnetico terrestre, a causa delle diverse interazioni

elettromagnetiche presenti.

In sintesi, quando l'attività solare è al massimo, il campo magnetico terrestre si rafforza, schermando in misura maggiore la terra e l'atmosfera circostante, pertanto la radiazione galattica che potrà raggiungere l'atmosfera sarà maggiore quando l'attività solare è al minimo e viceversa sarà minore quando l'attività solare è al massimo.

2. Trasformazione: radiazioni secondarie

Quando le particelle primarie penetrano nella parte più esterna dell'atmosfera, interagiscono con gli atomi che la costituiscono e provocano così la formazione di particelle secondarie, come **elettroni** e **neutroni**, e di radiazione elettromagnetica non corpuscolare, come i raggi X e γ (gamma), che a loro volta possono interagire con altri atomi innescando un fenomeno di ionizzazione a cascata.

Sono proprio queste particelle secondarie che costituiscono la radiazione cosmica che interessa gli equipaggi dell'aviazione civile.

L'atmosfera agisce da schermo filtrante che in buona parte ci protegge dalle radiazioni in quanto la maggioranza delle particelle, interagendo con essa dissipa parte della propria energia prima di raggiungere le quote di volo.

Un altro elemento che interviene a modificare il corso naturale delle radiazioni cosmiche è il campo elettromagnetico terrestre che provoca la deviazione verso i poli di alcune delle particelle provenienti dallo spazio.

Per questa ragione la protezione maggiore si ha al livello dell'equatore e diminuisce man mano che ci si avvicina ai due poli, al punto che il livello di radiazione in queste regioni, alla quota di crociera degli aerei di linea, è circa il doppio del livello di radiazione all'equatore, alla stessa altitudine (ved. grafici n° 1 e n° 2 a pagina 11 e 12).

Per quanto detto finora si può affermare che i principali elementi che concorrono a determinare l'intensità della radiazione cosmica sono, in ordine di importanza:

1. altitudine (quota);
2. **latitudine**;
3. attività solare.

G

Vedi Glossario
a pag. 34 e 35

A

Per saperne di più
consultate
L'Appendice 2.3
a pag. 25

G

Vedi Glossario
a pag. 35

Metodi di misura delle radiazioni cosmiche

Strumenti di misurazione

G

Vedi Glossario
a pag. 36

Non percepibili dai nostri sensi, le radiazioni ionizzanti, tra cui come detto rientrano le radiazioni cosmiche, si misurano con strumenti che sfruttano principalmente la loro proprietà di trasmettere energia e produrre ionizzazione nei materiali da esse attraversati. Le radiazioni cosmiche sono molto difficili da misurare in quanto presentano una molteplicità di componenti (raggi α , β , γ , X, neutroni, etc.) diversi per qualità ed energia. Per questa ragione non è possibile ricorrere per la misura di questo particolare tipo di radiazioni a sistemi semplici e funzionali come i dosimetri (badge) indossati dai lavoratori esposti a sorgenti artificiali di radiazioni. Al contrario, a causa della complessa natura delle radiazioni cosmiche è necessario ricorrere all'impiego contemporaneo di diversi dispositivi di misura.

A

Per saperne di più
consultate
L'Appendice A.5
a pag. 28

Modelli di calcolo della dose

Negli ultimi 20 anni sono state effettuate numerose misurazioni delle radiazioni su voli di lungo raggio alle quote di interesse dell'aviazione civile, ad opera di diversi stati europei in collaborazione con le rispettive compagnie aeree.

A fronte di tutte le misure effettuate si è resa disponibile una grande quantità di dati, che sono utili anche alla verifica dell'accuratezza dei modelli matematici di calcolo utilizzati, per le sole quote di volo indicate dalla legge, in alternativa alle misurazioni dirette, che risultano particolarmente complesse ed onerose.

Il più diffuso programma di calcolo è il CARI sviluppato in USA dal CAMI (Civil Aviation Medicine Institute) della FAA (Federal Aviation Authority).

Il CARI elabora la cosiddetta **dose rotta**, cioè la dose efficace ricevuta su una determinata rotta, in base alla data ed al profilo caratteristico del

G

Vedi Glossario
a pag. 34

volo. Il programma acquisisce anche il valore del potenziale eliocentrico, riferito al livello dell'attività solare di quella data. A partire dal valore di dose rotta di ogni volo si potrà poi calcolare il valore di dose annua individuale per ciascun membro d'equipaggio. Il programma è periodicamente aggiornato sulla base delle più recenti conoscenze scientifiche e sperimentali; la versione attualmente in uso è il CARI 6.

Unità e misura

L'unità di misura attualmente utilizzata per le radiazioni ionizzanti è il Sievert, che misura l'energia ceduta alla materia dalla radiazione ionizzante. In particolare:

1 Sievert corrisponde a 1 Joule/Kg

Considerando i bassi dosaggi in gioco, si utilizzano i sottomultipli quali il milliSievert (un millesimo di Sievert, simbolo mSv) ed il micro Sievert (un milionesimo di Sievert, simbolo μ Sv). Il primo è generalmente associato ai valori della **dose annua** di esposizione, mentre il secondo è generalmente associato ai valori della dose oraria o della dose rotta. Per quanto riguarda il valore delle **dosi di radiazioni assorbite** dagli individui esposti a radiazioni ionizzanti, bisogna fare riferimento anche ai concetti di dose equivalente e di dose efficace.

Con l'espressione **dose equivalente** si indica la dose assorbita valutata tenendo conto del diverso potenziale di danno caratteristico dei vari componenti della radiazione.

Con l'espressione **dose efficace** si indica la dose equivalente valutata tenendo conto della diversa radiosensibilità di organi e tessuti.

Quando troverete riferimenti ai valori di dose misurati o calcolati per gli equipaggi di volo, si tratterà sempre di dose efficace.



Rolf Sievert (1896-1966)
fisico svedese

G

Vedi Glossario
a pag. 33 e 34

Entità della dose rilevata dalla ricerca ANPA

A

Per saperne di più
consultate
L'Appendice A.6
a pag. 30

Il calcolo di alcuni valori delle dosi efficaci riferite agli equipaggi di volo è stato reso possibile a livello empirico da una serie di campagne di misurazione.

In particolare tra il 1995 e il 1997 l'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente) ha effettuato una campagna di misure su 36 voli AZ, sulle rotte Milano-Los Angeles-Milano, Milano-Tokyo-Milano e Milano-Rio de Janeiro-Milano, per la realizzazione della quale l'Alitalia ha garantito un attivo supporto tecnico e logistico.

Nel Rapporto Finale sulla Indagine Nazionale sulla esposizione del personale di volo ai raggi cosmici, presentato presso l'ANPA il 23 giugno 1998, si afferma che *"le dosi annuali del personale di volo della compagnia di bandiera sono risultate tutte comprese tra 1 mSv e 6 mSv per 700 ore di volo all'anno al di sopra di 8.000 metri (26,400 feet). E' possibile superare 6 mSv soltanto volando per più di 1000 ore su rotte transoceaniche a latitudini elevate."*

Il grafico n.1 illustra le variazioni della dose in relazione alla quota e mostra come tale variazione sia più significativa alle latitudini elevate. Infatti è visibile la stima della dose efficace ricevuta al polo nord (60° N, 0° E)

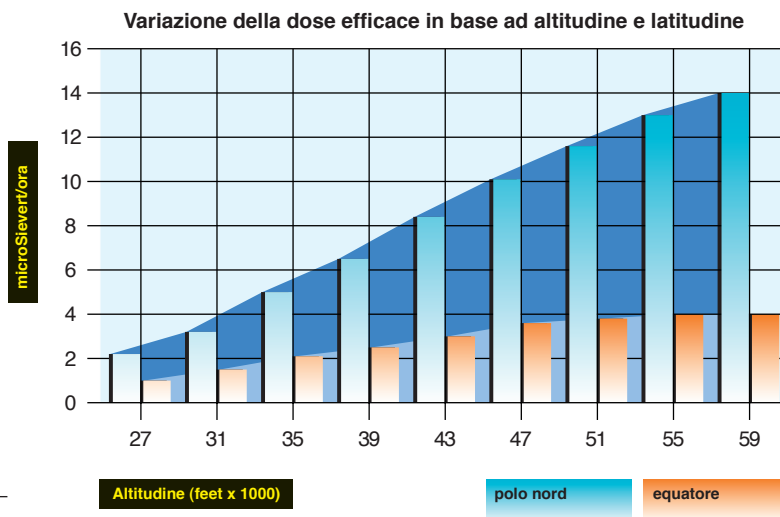


Grafico n.1

e la stima della dose efficace ricevuta all'equatore (0° N, 0° E), entrambe calcolate con il CARI-5E (con un potenziale eliocentrico di 735 MeV che rappresenta la media degli ultimi 4 anni del ciclo solare da gennaio 1987 a dicembre 1997).

L'approssimazione di queste stime è di $\pm 20\%$.

Il grafico n.2 indica il numero di ore di volo necessarie alle diverse quote per raggiungere una dose efficace di 6 mSv/anno rispettivamente al polo nord (60° N e 0°E) e all'equatore (0° N e 0° E).

Le stime sono calcolate con il CARI-5E (con un potenziale eliocentrico di 735 MeV che rappresenta la media degli ultimi 4 anni del ciclo solare da gennaio 1987 a dicembre 1997) ed hanno un'approssimazione di $\pm 20\%$.

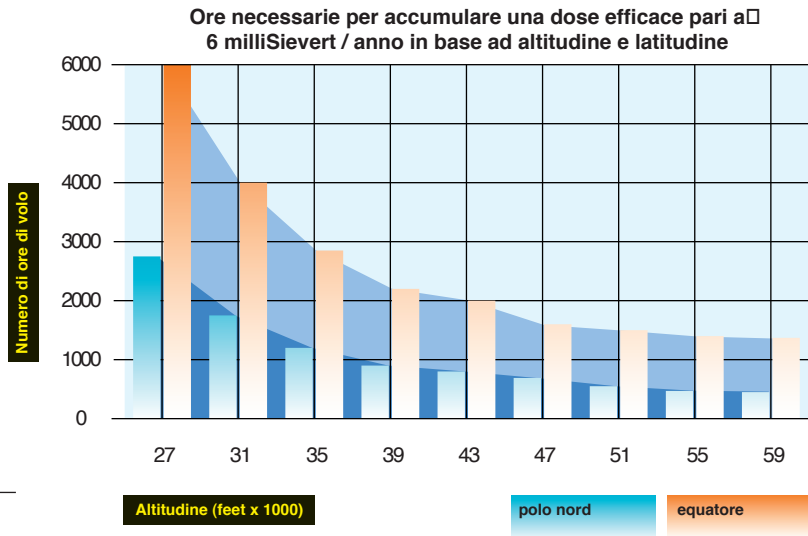


Grafico n.2

Limite di dose e riferimenti legislativi

Con il Decreto legislativo n° 241 del 26 maggio 2000, che recepisce la direttiva EURATOM 96/29, vengono definite per lo Stato italiano le norme di tutela dei lavoratori esposti a particolari sorgenti di radiazioni. Per quanto concerne il **Personale Navigante**, il decreto stabilisce il suo ambito di applicazione con riferimento a tutti i membri d'equipaggio che effettuano voli a quote comprese tra gli 8.000 e i 15.000 metri

Per quanto riguarda voli effettuati a quote inferiori a 15.000 m, il decreto stabilisce che la valutazione della dose possa essere effettuata mediante appositi codici di calcolo, accettati a livello internazionale e validati da misure su aeromobili in volo su almeno 2 rotte di lungo raggio a latitudini diverse.

(26,400 – 49,500 feet), identificando in 20 milliSievert il limite di dose annua a cui possono essere esposti.

Non sono compresi i naviganti che operano a quote inferiori, poiché fino agli 8.000 metri non sono

considerati suscettibili di superare il limite di 1 milliSievert all'anno, che è il limite di esposizione della popolazione civile. Ricordiamo a questo proposito che tale valore, **1 mSv, non rappresenta una soglia di rischio ma il valore di riferimento che distingue la popolazione civile dai lavoratori professionalmente esposti.**



Venendo alle specifiche previsioni contenute nel decreto, per tutti i membri di equipaggio che volano a quote uguali o superiori ad 8.000 metri, la Compagnia in applicazione dello stesso attuerà, tra le altre, le seguenti misure:

- programmare opportunamente i turni di lavoro e ridurre l'esposizione dei lavoratori maggiormente esposti;
- informare i lavoratori dei rischi specifici a cui sono esposti;
- fornire ai lavoratori i risultati della valutazione individuale della dose;
- non adibire le lavoratrici gestanti ad attività che potrebbero esporre il nascituro ad una dose che ecceda 1 mSv durante il periodo della gravidanza;
- assicurare con periodicità annuale e secondo le modalità vigenti nel settore la sorveglianza sanitaria dei lavoratori che non siano suscettibili di superare i 6 mSv anno di dose efficace.

È bene ribadire ancora che i limiti di dose cui la norma si riferisce non rappresentano una soglia di rischio individuato dalla comunità scientifica, ma indicano diversi livelli di azione che lo Stato individua al fine di garantire la massima tutela della salute del lavoratore.



Ulteriore conferma di quanto il legislatore abbia privilegiato un orientamento di grande cautela ci viene dal confronto con alcuni riferimenti normativi d'oltreoceano.

Lo statunitense NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) stabilisce che il limite massimo per i lavoratori professionalmente esposti è di 50 milliSievert all'anno e di 5 milliSievert all'anno per le lavoratrici gestanti.

Al di là delle specifiche indicazioni normative dei diversi contesti presi in esame, il corpus legislativo per la **radioprotezione** si fonda sul principio che tutte le dosi di radiazioni, indipendentemente dalla entità, accrescano il rischio di provocare un danno alla salute.

La questione che risulta a tutt'oggi irrisolta riguarda la identificazione delle soglie di rischio alle basse dosi di esposizione, in quanto la comunità scientifica è ancora oggi d'accordo nell'affermare che **non è possibile stimare accuratamente il rischio delle radiazioni a dosi inferiori a 100 mSv**.

Al contrario, gli unici dati statisticamente significativi fanno tutti riferimento a popolazioni esposte a dosi di radiazioni assolutamente non paragonabili (Hiroshima, Nagasaki, sopravvissuti ad incidenti nucleari) alle dosi di esposizione degli equipaggi dell'aviazione civile o di altre categorie di lavoratori professionalmente esposti.



Poiché gli effetti dannosi alla salute attribuiti a basse dosi di radiazioni sono imputabili anche a tanti altri fattori ambientali, un esperimento scientifico che possa stabilire una relazione certa tra la dose ricevuta e l'insorgenza di un danno specifico richiederebbe l'impiego di svariati milioni di soggetti e quindi studi sperimentali di questo tipo non sono percorribili.

Per questa ragione si ricorre all'impiego di modelli predittivi, utili a prevedere gli effetti di basse dosi di radiazioni sulla base delle conoscenze rese disponibili dalle esposizioni ad alte dosi.

Tali modelli sono di tipo lineare (LN-T model) cioè si fondano sull'assunto che la relazione dose-effetto segue un andamento lineare dalle dosi più alte a quelle più basse.

G

Vedi Glossario
a pag. 36

In altre parole, la linearità implica che dosi diverse di radiazione provocano il medesimo tipo di effetto e quello che cambia è soltanto la frequenza con cui tale effetto si manifesta all'interno della popolazione esposta alla radiazione.

Diversamente, è possibile supporre che a dosi molto basse certi tipi di effetti non vengano affatto generati tuttavia, in assenza di studi che possano convalidare tale posizione, si preferisce adottare comportamenti fortemente cautelativi come quelli suggeriti dall'ipotesi della linearità.

È in questo contesto che vanno letti gli interventi legislativi a cui abbiamo fatto riferimento.

Ricerche e studi sugli effetti delle radiazioni cosmiche

Per completare il quadro informativo sui possibili effetti delle radiazioni ci pare interessante fare riferimento ad alcuni studi **citogenetici** ed **epidemiologici** conclusi di recente o ancora in corso di svolgimento.

Le radiazioni ionizzanti, al pari di fumo, alcool, determinate sostanze chimiche e raggi ultravioletti (limitatamente a cute e occhio), possono causare delle aberrazioni cromosomiche cioè delle rotture e dei riaggiustamenti nei filamenti di **DNA** che costituiscono i **cromosomi** umani.

G

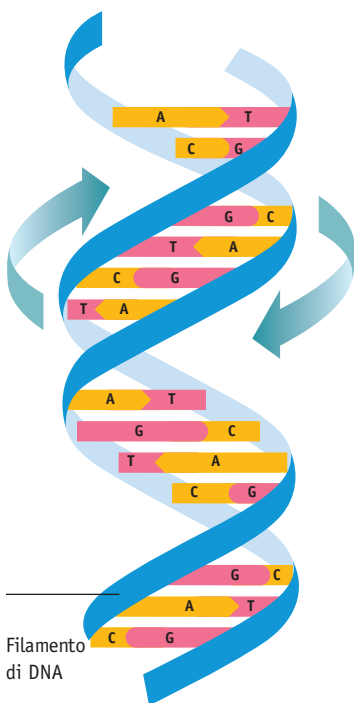
Vedi Glossario
a pag. 33 e 35

L'analisi di queste aberrazioni rappresenta quindi un presidio molto importante nello studio dei danni cellulari indotti dalle radiazioni, ma va

sottolineato che in virtù del naturale potere riparativo presente nei cromosomi, per basse dosi di radiazioni (come nel caso degli equipaggi di volo) non c'è una correlazione diretta tra comparsa di aberrazioni cromosomiche ed eventuale comparsa a distanza di patologie.

Nella volontà di offrire un contributo innovativo utile al tema, l'Alitalia ha avviato un studio di citogenetica in collaborazione con l'ISPESL (Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul Lavoro) condotto su un campione di PNT (Personale Navigante Tecnico) con almeno 5 anni di attività di lungo raggio, i cui risultati preliminari saranno presumibilmente disponibili entro il 2001.

Un altro filone di studio è quello delle ricerche epidemiologiche, volte ad individuare in popolazioni omogenee di equipaggi di volo la eventuale maggiore incidenza (rispetto ad una popolazione di controllo) di eventi patologici



riconducibili all'esposizione a radiazioni.

Le ricerche effettuate a tutt'oggi, condotte da diversi istituti scientifici e vettori europei, non hanno fornito evidenze concordi e conclusive circa la correlazione tra eventi patologici e l'attività professionale dei naviganti dell'aviazione civile.

Con l'intento di approfondire le conoscenze sui rischi professionali del personale navigante, attualmente è in corso un programma europeo di ricerca che coinvolge numerosi Stati Membri e le relative compagnie di bandiera.

Per quanto riguarda il nostro Paese, l'Istituto Superiore di Sanità ha in corso di realizzazione uno studio epidemiologico sulle cause di morte della popolazione di naviganti impiegati in Italia dal 1965 al 1996.

Alitalia ha fornito un fattivo contributo alla realizzazione dello studio, consentendo l'acquisizione di una considerevole mole di dati e fornendo il supporto tecnico e logistico per il completamento del Programma di ricerca dell'Istituto.

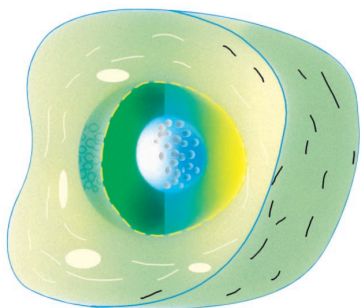
I risultati della ricerca italiana confluiranno nei risultati della ricerca europea denominata ESCAPE, che riguarderà complessivamente una popolazione statisticamente significativa di circa 50.000 assistenti di volo, piloti e tecnici di volo.

Effetti sulla salute correlati all'esposizione a radiazioni cosmiche

I tessuti biologici di tutti gli essere viventi sono costituiti da cellule e da materiale extra cellulare prodotto dalle cellule stesse. Le cellule, a loro volta, sono costituite da una membrana esterna che le delimita (e che permette gli scambi con l'esterno), dal citoplasma contenente numerosi corpuscoli dotati delle più varie funzioni e dal nucleo che contiene il materiale genetico (cromosomi, costituiti dal DNA e RNA). Singoli tratti delle catene del DNA costituiscono i geni, ovvero le unità elementari di informazione genetica che provvedono come un vero e proprio "software", sia a trasmettere le caratteristiche tipiche delle cellule dall'una all'altra quando si duplicano, sia a codificare le sostanze specifiche prodotte dalle cellule stesse (es.: tessuto osseo prodotto dagli osteociti, ormone tiroideo prodotto dalle cellule tiroidee, etc.).

G

Vedi Glossario a pag. 33 e 36



La cellula e il suo nucleo.

Per valutare il potenziale danno prodotto dalle radiazioni ionizzanti elettromagnetiche (X, gamma) e corpuscolari (neutroni, radiazioni beta e alfa) bisogna valutare non solo la quantità di radiazione assorbita ma anche la velocità e l'energia delle singole particelle e il loro LET (trasferimento lineare di energia), ovvero il potere che hanno le singole radiazioni di concentrare la loro energia in un tratto più o meno lungo di percorso attraverso i tessuti biologici.

In funzione di tipo, quantità ed energia della radiazione stessa, i vari tipi di radiazione hanno una possibilità, sia pure molto bassa, di danneggiare il DNA contenuto nei cromosomi. Questa possibilità dipende anche dalla probabilità di incontrare nel proprio tragitto le strutture del DNA stesso e quindi dal tipo di cellule irradiate.

I tessuti biologici più sensibili alle radiazioni ionizzanti sono, sia pure

con alcune eccezioni, quelli in cui è presente un notevole ricambio cellulare: ciò a causa della maggiore vulnerabilità alle radiazioni delle cellule stesse quando entrano in mitosi (mitosi = divisione cellulare).

In conseguenza di questo e di altri complessi motivi biologici, i tessuti umani considerati più radiosensibili sono il midollo osseo (dove vengono prodotte gran parte delle cellule del sangue), le **gonadi** maschili e femminili, la tiroide (in età pediatrica e molto giovanile), molti **tessuti epiteliali** tra i quali quelli che rivestono internamente l'intestino, e il cristallino dell'occhio.

G

Vedi Glossario
a pag. 35 e 36

A

Per saperne di più
consultate
L'Appendice A.7
a pag. 31

Tra i tessuti più radiosensibili di altri vanno segnalati gli organi dell'embrione e del feto umano, a causa delle continue divisioni cellulari al loro interno; questa sensibilità è variabile in funzione dello stadio di sviluppo.

Poco sensibili risultano invece i tessuti muscolare, osseo e nervoso (cervello, midollo spinale e nervi).

Ricordiamo tuttavia che i danni biologici causati da basse dosi di radiazioni ionizzanti possono essere solo di tipo probabilistico (o stocastico): ovvero al crescere della dose può aumentare la probabilità statistica di osservare dopo molti anni fenomeni patologici. In pratica, per i livelli di dose

Nel caso del personale navigante femminile del Gruppo Alitalia, i rischi cui possono incorrere le lavoratrici gestanti risultano ampiamente prevenuti dal momento che in azienda, da molti anni prima dell'emanazione della direttiva EURATOM 96/29 e del D. L.vo 241, il personale femminile si astiene dalle attività di volo sin dal momento della comunicazione dello stato di gravidanza e per tutta la sua durata, garantendo così un livello di esposizione che è sicuramente inferiore ad 1 milliSievert. Risulta quindi evidente come la comunicazione dello stato di gravidanza, non appena accertato, non sia solo un obbligo stabilito dalla legge ma un interesse specifico delle lavoratrici.

assorbiti dagli equipaggi dell'aviazione civile, la probabilità di danni biologici è stimata in una misura estremamente bassa.

Infatti, **gli studi epidemiologici** effettuati comparando popolazioni di esposti a radiazioni ionizzanti con popolazioni di non esposti, **non hanno rilevato alcuna patologia fino a dosi di 400 milliSievert, purché assorbite in modo protratto e continuato** (basso rateo di dose, ovvero

bassa intensità di dose istantanea).

Osserviamo a tale proposito che, a parità di dose totale, gli effetti sono tanto maggiori quanto minore è il tempo in cui la dose stessa viene somministrata, in quanto minori sono i processi riparativi che il tessuto biologico può attuare.

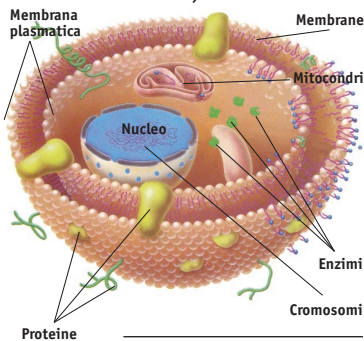
Infatti nelle nostre cellule sono presenti particolari **enzimi** specificamente dedicati a favorire la riparazione dei filamenti del DNA eventualmente danneggiati dalle radiazioni. L'insieme di questi enzimi (pool enzimatico) è prodotto lentamente ed è prontamente disponibile in piccole quantità, pertanto danni al DNA che si producano in modo diluito nel tempo trovano disponibili gli enzimi riparatori, mentre se gli stessi danni si producono tutti contemporaneamente a causa di una irradiazione concentrata, si può andare incontro ad un temporaneo esaurimento del "pool enzimatico" riparatore. Il concetto di basso rateo di dose è tipico delle esposizioni a basse dosi di radiazione naturale: ricordiamo infatti che un equipaggio di a/m commerciale che vola sul lungo raggio per circa 700 ore all'anno può assorbire una dose di circa 3-4 mSV/anno.

Come già precedentemente sottolineato, per stimare la possibile insorgenza di malattie per dosi molto basse, inferiori alle dosi soglia evidenziate dagli studi epidemiologici, è stata adottata dalla ICRP (International Commission on Radiological Protection) l'ipotesi della linearità senza soglia (LN-T model).

Tale ipotesi prevede che possa esistere un rischio sia pure statisticamente minimo crescente in modo direttamente proporzionale (o lineare) al crescere della dose assorbita anche al di sotto di un valore soglia.

La stessa ICRP definisce tali ipotesi come cautelativa e non dimostrata da ritenere valida, quindi, più per scopi protettivi che predittivi.

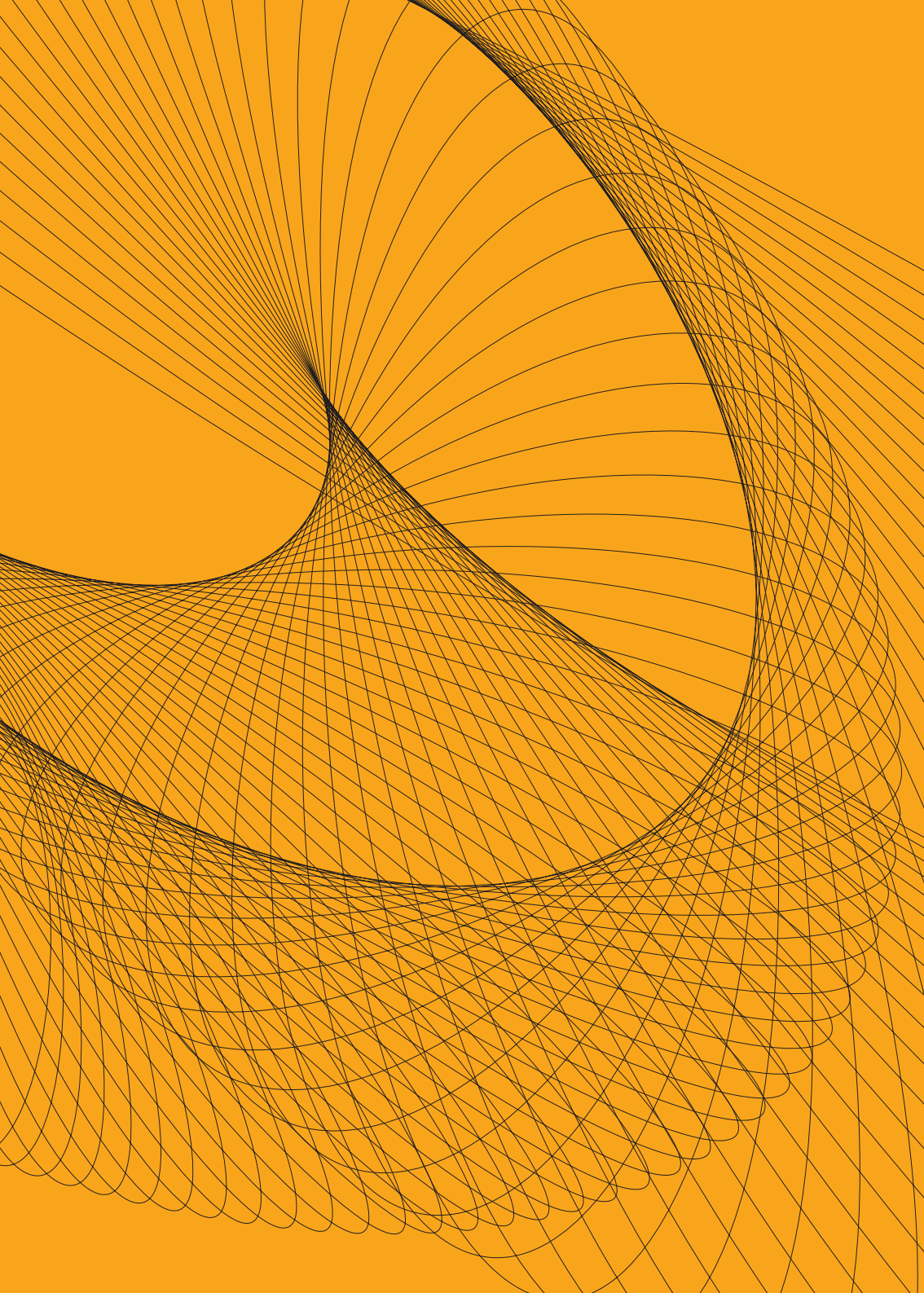
Altra ipotesi, anche questa non dimostrata, prevede che piccole dosi di radiazioni ionizzanti a basso rateo di dose possano al contrario stimolare la riparazione biologica di un danno da radiazione precedentemente subito diminuendone in tal modo le conseguenze (ipotesi dell'ormesi).



Spaccato di cellula.

G

Vedi Glossario
a pag. 35



A.1 Cenni sulla costituzione dell'atomo

Per definire correttamente le radiazioni è necessario brevemente accennare alla struttura della materia a partire dal suo componente di base che è l'atomo.

Ogni atomo è costituito da un nucleo centrale carico positivamente e da un numero di elettroni di carica negativa che orbitano intorno al nucleo. Il nucleo contiene **protoni**, con carica positiva, e neutroni che, come suggerisce il nome, sono privi di carica. Poiché in condizioni normali i protoni del nucleo sono in numero uguale agli elettroni gli atomi risultano elettricamente neutri.

Il numero di protoni nel nucleo è chiamato **numero atomico** e conferisce ad ogni elemento la propria caratteristica: il numero atomico del carbonio è 6 mentre per il piombo è 82.

Il **peso atomico** (detto anche numero di massa) indica invece il numero totale di protoni e neutroni presenti nel nucleo che è il luogo in cui è concentrata la maggior parte della massa di un atomo.

Un medesimo elemento chimico, caratterizzato da uno specifico numero atomico e cioè da un numero fisso di protoni, può avere un numero variabile di neutroni e quindi avere pesi atomici diversi. Gli atomi di uno stesso elemento che differiscono per il numero di neutroni presenti nel nucleo sono definiti **isotopi** dello stesso elemento.

Per esempio l'idrogeno ha tre isotopi: l'idrogeno-1 il cui nucleo ha 1 protone e nessun neutrone, l'idrogeno-2 (denominato deuterio) che ha 1 protone ed 1 neutrone ed infine l'idrogeno-3 (detto anche trizio) che ha 1 protone e 2 neutroni.

La **stabilità** degli atomi è variabile e correlata al numero di protoni e neutroni che contengono nei loro nuclei. I nuclei con molti neutroni tendono a raggiungere una configurazione più stabile, eliminando spontaneamente particelle elementari ed energia. Questo processo di

G

Vedi Glossario
a pag. 36

trasformazione che può avvenire secondo una grande varietà di schemi e combinazioni viene denominato **decadimento radioattivo**.

A.2 Le radiazioni

Come accennato più sopra, quando un atomo è in una condizione di instabilità si attivano una serie di processi (come l'eliminazione spontanea di particelle elementari ed energia) finalizzati a riportare l'atomo ad una condizione di stato stabile. L'emissione da parte di un atomo di due protoni e due neutroni costituisce la **radiazione alfa**; l'emissione di un elettrone costituisce la **radiazione beta**. L'emissione di particelle spesso non è sufficiente a ridurre l'eccitazione del nucleo fino a portarlo ad uno stato stabile ed allora l'eccesso di energia viene liberato sotto forma di **radiazioni gamma e X** che, a differenza delle precedenti alfa e beta, non hanno massa né carica, in quanto sono **fotoni** ad alta energia, cioè quantità discrete di energia.

G

Vedi Glossario
a pag. 35

Questi processi di trasformazione costituiscono quello che definiamo **radioattività** e i nuclei che si trasformano ed emettono radiazioni sono denominati radionuclidi.

Quando la radiazione attraversa la materia vi deposita energia in modi diversi a seconda che si tratti di particelle alfa e beta, dotate di cariche elettriche, o di radiazioni gamma o X.

2.1 Le radiazioni non ionizzanti

Le radiazioni non ionizzanti, di natura elettromagnetica, sono radiazioni che non hanno energia sufficiente a indurre il distacco di elettroni da un atomo, e non possono quindi determinare il fenomeno della ionizzazione della materia con cui interagiscono.

Esse possono essere prodotte da sorgenti naturali o artificiali e comprendono a titolo d'esempio:

- luce visibile;
- radiazioni ultraviolette non visibili;
- onde radio (tra cui microonde ed emissioni radar);
- radiazioni infrarosse (il calore);
- emissioni laser (infrarosse, ultraviolette o visibili).

2.2 Le radiazioni ionizzanti

Le radiazioni ionizzanti sono caratterizzate da una energia maggiore di quella caratteristica delle non ionizzanti prima descritte, sufficiente quindi a provocare il fenomeno della ionizzazione degli atomi conseguente alla perdita di elettroni.

Le radiazioni ionizzanti sono costituite da particelle elementari ad alta energia conosciute come particelle alfa (costituite da 2 neutroni e due protoni), da particelle beta (costituite da un elettrone) e da raggi X e gamma di natura elettromagnetica non corpuscolare.

Le radiazioni ionizzanti di origine cosmica presentano in atmosfera anche una componente secondaria di neutroni. I componenti della radiazione hanno effetti diversi sulla materia inorganica ed organica in base ai differenti livelli di energia, e quindi di penetrazione, e alle cariche elettriche che li caratterizzano. Le radiazioni alfa, con la loro componente pesante di neutroni e protoni, possono essere intercettate da un foglio di carta, le particelle beta da un sottile foglio di alluminio; i neutroni, come d'altronde i raggi X e gamma ed altre particelle, possono avere diversi livelli energetici ed attraversare le pareti dell'aeromobile senza impedimenti.

2.3 Le radiazioni elettromagnetiche

Le radiazioni elettromagnetiche si possono immaginare come onde di pura energia senza massa. Esse sono invisibili, senza sostanza fisica e possono attraversare lo spazio alla velocità della luce.

Tutti possiamo essere esposti a questo tipo di radiazioni durante le più comuni attività quotidiane. Per esempio, sono radiazioni elettromagnetiche le onde radio, le microonde, i raggi X e la luce visibile. Differiscono tra loro per la energia che le caratterizza.

La più piccola unità della radiazione elettromagnetica è il fotone. Per cercare di immaginare le dimensioni del fotone, basti pensare che una normale lampadina emette innumerevoli milioni di fotoni di luce al secondo.

Come le radiazioni corpuscolari, le radiazioni elettromagnetiche possono trasferire energia agli atomi della materia con cui vengono a contatto, determinando variazioni fisiche e chimiche e come per tutte le altre radiazioni si dice che la materia esposta a radiazioni elettromagnetiche è stata irradiata.

A.3 Altre sorgenti di radiazioni presenti nell'attività di volo

L'attività di volo può comportare l'esposizione ad altre, se pur trascurabili, fonti di radiazioni ionizzanti e non:



Altre fonti di radiazioni ionizzanti

- Trasporto di materiali radioattivi:
Il trasporto di materiali radioattivi, in quantità controllate, nelle stive degli aerei di linea è regolamentato da una specifica e stringente normativa internazionale (Dangerous Goods Regulation). La dose annua di radiazione che può essere ricevuta dagli equipaggi da tale fonte è inferiore a 0,1 mSv.



Altre fonti di radiazioni non ionizzanti

- Radiazioni ultraviolette:
Sono radiazioni non ionizzanti a noi ben note, che hanno origine dal sole e giungono fino a noi con la luce visibile. Determinano fenomeni sull'epidermide quali l'abbronzatura o le scottature. Le esposizioni prolungate e ricorrenti al sole possono determinare l'insorgenza di tumori della pelle. All'interno dell'aeromobile l'esposizione a questo tipo di radiazioni è prevenuto dall'effetto schermante dei finestrini (pari a circa il 99,9 %).
- Campi elettromagnetici:
I campi elettromagnetici presenti negli aeromobili sono generati dalle apparecchiature elettriche e dalla strumentazione di bordo.

A.4 Valore di fondo delle radiazioni

G

Vedi Glossario
a pag. 36

Tutti gli esseri viventi sono esposti alle sorgenti naturali di radiazioni provenienti dal cosmo e prodotte nella biosfera della terra dai **radionuclidi** contenuti nella crosta terrestre da miliardi di anni. La radiazione terrestre contribuisce fino all'85% della dose media annuale della popolazione. Le più comuni sorgenti di radiazione a livello del suolo sono rappresentate da:

- suolo ed edifici;
- cibo e acqua;
- radioattività naturale nell'aria;

- diagnostica medica;
- test nucleari;
- centrali nucleari;
- raggi cosmici.

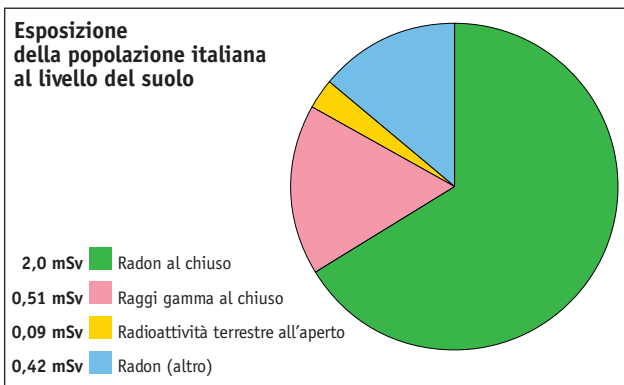
L'esposizione dell'uomo dovuta alle sorgenti naturali di radiazioni può essere classificata in:

esposizione esterna: prodotta da sorgenti esterne al corpo umano quali i raggi cosmici e le radiazioni emesse da sostanze radioattive di origine terrestre;

esposizione interna: prodotta da sostanze radioattive che entrano nel corpo umano per ingestione con gli alimenti o per inalazione attraverso le vie respiratorie.

La maggior parte dell'esposizione a radiazioni naturali è interna.

Solo recentemente i ricercatori hanno potuto affermare che la più importante sorgente di radiazione naturale è rappresentata dall'inalazione dei prodotti di decadimento di un gas discendente della famiglia dell'uranio, insapore, inodore, invisibile e più leggero dell'aria: **il radon**.



Livello del fondo totale annuo di esposizione a radiazioni ionizzanti in Italia

Elaborazione Fonte:
 Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

Il radon si diffonde in ogni parte della terra ed i livelli di concentrazione nell'aria, all'aperto, variano considerevolmente da luogo a luogo. Tuttavia, è soprattutto negli ambienti confinati, dove la scarsa ventilazione non facilita la dispersione del gas, che vi può essere la maggiore esposizione a radon.

Come si può vedere nel grafico, il maggior contributo all'esposizione di fondo deriva dal radon nelle abitazioni, negli uffici e nelle scuole, mentre il contributo alla radiazione terrestre all'aperto è la meno significativa.

Sebbene tutti siano esposti alla radiazione naturale, terrestre o cosmica, alcuni lo sono molto più di altri, a causa ad esempio della altitudine degli insediamenti abitativi o della località in cui si vive: in certi luoghi, infatti, a causa del suolo e delle rocce particolarmente radioattive le dosi sono molto più alte della media riscontrata altrove.

Anche la quota dell'esposizione dell'uomo alla radiazione naturale dovuta ai raggi cosmici che irradiano la terra è variabile; ad esempio i poli ne ricevono in misura maggiore delle regioni equatoriali, come anche alcuni insediamenti abitativi a quote particolarmente elevate.

A.5 Strumenti per la misura diretta delle radiazioni ionizzanti

Per le misure dirette si usano dispositivi (dosimetri) attivi, a funzionamento elettrico, che rivelano la radiazione mentre la percepiscono indicandone i parametri caratteristici su un display. Appartengono a questa categoria strumenti come:

- contatori Geiger-Mueller (GM) (per radiazioni gamma);
- camera di ionizzazione (per radiazioni gamma);
- camera di scintillazione (per radiazioni gamma);
- contatori proporzionali a tessuto equivalente (TEPC), più adatti per misurare le radiazioni cosmiche. Tale sistema sfrutta gli stessi meccanismi di deposizione di energia delle radiazioni e misura l'energia depositata dalle singole particelle in quantità microscopiche di tessuto atto a simulare il tessuto biologico.

I suddetti strumenti trasformano in corrente elettrica la quantità di ionizzazione prodotta dalla radiazione in una camera a gas o in un materiale equivalente per composizione al tessuto biologico.

I vantaggi dei dosimetri attivi sono:

- lettura diretta del rateo di dose di radiazioni (es. risultato in mSv/ora);
- allerta in caso di imprevedibili incrementi di dose.

Presentano i seguenti limiti:

- richiesta di fornitura di energia elettrica;
- richiesta di supervisione diretta da parte di personale qualificato;
- richiesta di frequenti interventi di manutenzione e calibrazione;
- sensibilità a temperatura, pressione e turbolenze.

Strumenti come quelli descritti (dosimetri attivi) sono in dotazione, secondo le prescrizioni della JAR-OPS 1.390, sugli aeromobili che superano i 15.000 m di quota.

5.1 Misure indirette con dosimetri passivi

Le misure indirette si effettuano con dosimetri cosiddetti passivi perché costituiti da materiali inerti, non alimentati da corrente elettrica, che subiscono sia ionizzazione che effetti fisico chimici di altra natura quando colpiti da una radiazione.

La lettura di questi dispositivi, a differenza di quanto avviene per quelli attivi, avviene in tempi successivi con tecniche di laboratorio.

Gli strumenti passivi più usati sono:

- rivelatori termoluminescenti (TLD);
- rivelatori a bolle;
- film di nitrato di cellulosa (track detectors).

I vantaggi dei dosimetri passivi sono:

- dose di radiazione integrata (risultato in mSv/ora);
- semplici da usare e robusti non richiedono collegamenti elettrici.

Presentano i seguenti limiti:

- coprono piccoli intervalli dello spettro di radiazione cosmica;
- danno risposte influenzate dalla energia della radiazione e pertanto difficili da usare in presenza di radiazioni miste e ad alte e basse energie;
- risultati non sono ottenibili immediatamente, ma dopo lettura in laboratorio.

A.6 Campagna nazionale di misure dell'esposizione del personale di volo

Nel 1995 l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente (ANPA) ha avviato una campagna di misure a bordo degli aerei Alitalia con i seguenti obiettivi:

- valutare l'esposizione del personale di volo su rotte di breve e lungo raggio;
- studiare la riproducibilità della dose rotta.

Poiché i sistemi di rivelazione di tipo passivo consentono la valutazione della dose totale ricevuta nei tempi lunghi di esposizione e quelli attivi la misura puntuale del rateo di dose in funzione della altitudine e della latitudine, l'ANPA in occasione delle misure sugli aerei Alitalia ha messo a punto un set dei sistemi più avanzati di rilevazione di tipo attivo e passivo.

L'uso simultaneo della strumentazione attiva e passiva richiede esposizioni per centinaia di ore di volo a causa della differenza di sensibilità di risposta dei diversi sistemi di rilevazione.

L'impegno organizzativo e tecnico per la effettuazione di misure così complesse ha visto coinvolti i Laboratori Nazionali di Fisica Nucleare di Frascati (INFN), il Dublin Institute for Advanced Studies (DIAS), la Universitaat des Saarlandes, il Dipartimento di Costruzioni Meccaniche Nucleari dell'Università di Pisa e la nostra Compagnia.

L'autorizzazione all'impiego della complessa strumentazione è stata rilasciata dal Registro Aeronautico Italiano (poi confluito nell'ENAC), dopo aver valutato i sistemi di fissaggio della strumentazione a bordo degli aerei e l'assenza di interazioni di tipo elettromagnetico con la strumentazione di bordo.

Le misure sono state effettuate in una fase di minimo solare in cui l'intensità della radiazione cosmica di origine galattica è massima.

Per ottenere esposizioni di centinaia di ore sono state necessarie decine di voli per ogni rotta.

La tabella riporta le informazioni sulle rotte prescelte, sul tipo di aereo e il numero di ore di volo per ogni rotta al di sopra di 8.000 metri.

Fonte:
Agenzia
Nazionale
Protezione
Ambiente
(ANPA).

Confronto tra misura e calcolo			
Rotta	Aereo	Numero di voli	Numero di ore sopra 8 Km
Roma-Rio de Janeiro (1996)	B-747	18	347
Milano-Los Angeles (1995)	MD-11	10	206
Milano-Tokio (1997)	B-747	8	172

A.7 Irradiazione in utero: embrione e feto

I motivi per cui le radiazioni ionizzanti a dosi elevate, comunque non raggiungibili dal personale Alitalia, sono considerate particolarmente critiche per le gestanti, risiedono nel fatto che, come abbiamo già detto, tutti gli organi dell'embrione e del feto umano sono considerati molto radiosensibili a causa delle continue divisioni cellulari al loro interno; tale sensibilità è inoltre variabile in funzione dello stadio di sviluppo. Prima dell'impianto dell'embrione (nella specie umana al 9° giorno della fecondazione) gli effetti di una irradiazione sono del tipo "tutto-o-nulla". Questi effetti possono determinare infatti la morte dell'embrione (l'evento può passare inosservato perché la donna non sa ancora di essere incinta) o, in alternativa, non avere alcuna conseguenza sullo sviluppo e sulla sopravvivenza postnatale (nello stadio di pre-impianto la morte di una o più cellule, non ancora differenziate, può non essere grave).

G

Vedi Glossario
a pag. 34 e 35

Nel periodo di **morfogenesi**, compreso tra il 9° giorno e la fine del 2° mese di gravidanza, si formano gli abbozzi dei vari organi e tessuti. In corrispondenza della fase di differenziazione e di organizzazione di ciascun tessuto è presente una elevata radiosensibilità e in questa fase l'irradiazione può indurre più facilmente la comparsa di malformazioni. Nel periodo compreso tra la 3a settimana dal concepimento e la fine della gestazione l'esposizione alle radiazioni potrebbe determinare **effetti stocastici** che si esprimono come aumento della probabilità di **neoplasie** (soprattutto leucemie) in epoca postnatale. Comunque, tali dati provenienti soprattutto da studi sulle madri sottoposte ad esami radiodiagnostici in gravidanza, non sono univoci e lasciano notevoli incertezze interpretative. Durante la fase fetale (dall'inizio del 3° mese fino al termine della

gravidanza) la frequenza e la gravità delle malformazioni diminuiscono, mentre risulta maggiore il rischio di uno sviluppo difettoso del sistema nervoso centrale che resta radiosensibile per una buona parte di questo periodo. I dati su Hiroshima e Nagasaki, dimostrano che la sensibilità alle radiazioni ionizzanti del cervello del feto è massima tra l'8a e la 15a settimana dal concepimento. Durante questo periodo, i neuroblasti (elementi cellulari precursori dei neuroni) si moltiplicano in maniera esponenziale e migrano nella sede definitiva che è la corteccia cerebrale. Una irradiazione può interferire con questi complessi meccanismi evolutivi e quindi determinare un ritardo mentale. La sensibilità del sistema nervoso è minore di circa 4 volte tra la 16a e la 25a settimana dal concepimento ed è trascurabile o assente prima dell'8a settimana e dopo la 25a settimana.

In breve, malgrado la sensibilità dell'embrione e del feto all'irradiazione sia presente in gradi molto variabili durante tutto il periodo di gestazione, lavori scientifici recenti confermano che il danno principale è il ritardo mentale. **Non è tuttavia apprezzabile alcun effetto** sul quoziente di intelligenza **per dosi inferiori a 100 mSv**: una dose, sottolineiamo, che è 100 volte superiore a quella massima prevista dalla legislazione per il personale in gravidanza che come già ricordato è di 1 mSv.

G

Glossario

Vedi pag. 5 **Atomo**

La più piccola frazione in cui può essere suddiviso un elemento chimico in grado di conservarne le caratteristiche chimiche e fisiche; è formato da un nucleo costituito da particelle con carica elettrica positiva (protoni) e particelle neutre (neutroni), attorno al quale orbitano particelle con carica negativa (elettroni).

Vedi pag. 17 **Citogenetica**

Branca della biologia molecolare che studia i fenomeni ereditari osservati a livello cellulare, in particolare nei cromosomi.

Vedi pag. 19 **Citoplasma**

Insieme complesso di sostanze e corpuscoli, racchiuso tra la membrana cellulare e il nucleo, che conferisce alla cellula molte delle sue proprietà vitali.

Vedi pag. 17 **Cromosoma**

Struttura presente nel nucleo delle cellule, in cui sono dislocati i geni portatori dell'informazione genetica, cioè dei caratteri ereditari.

Vedi pag. 17 **DNA**

Sigla dell'inglese DesoxyriboNucleic Acid in italiano acido desossiribonucleico, costituente fondamentale della struttura dei geni.

Vedi pag. 10 **Dose assorbita**

È la quantità di energia depositata in una unità di massa di materia, quando essa è esposta alla radiazione ionizzante. L'unità di misura è il Gray (Gy) che è una unità fisica che non tiene conto dei diversi effetti determinati dai differenti tipi di radiazione ionizzante.

Vedi pag. 10 **Dose equivalente**

È la grandezza che quantifica il rischio per il tessuto biologico, associato all'irradiazione di un singolo organo o

tessuto tenendo conto del tipo di radiazione. Essa si ottiene moltiplicando la dose assorbita dal tessuto biologico per un fattore correttivo che dipende dal tipo di radiazione, detto fattore di peso della radiazione. Il fattore di peso è un valore caratteristico di ogni componente della radiazione e viene usato per quantificare la capacità di ionizzazione dei diversi costituenti.

Vedi pag. 10 **Dose efficace**

È la grandezza che quantifica il rischio associato all'irradiazione di un singolo organo o tessuto tenendo conto della radiosensibilità caratteristica dei diversi organi e tessuti. Essa si ricava dalla somma delle dosi equivalenti moltiplicate per un fattore di ponderazione specifico per i diversi organi e tessuti. Il fattore di ponderazione è un valore caratteristico e viene usato per quantificare la sensibilità alle radiazioni dei diversi organi o tessuti.

Vedi pag. 10 **Dose (efficace) annua**

È la dose efficace ricevuta in un periodo di 12 mesi da un individuo o da un'intera popolazione. Nel caso degli equipaggi di volo essa risulta dalla somma delle singole dosi rotte.

Vedi pag. 9 **Dose rotta**

È la dose efficace ricevuta da un membro di un equipaggio durante un volo. Il valore di dose rotta dipende dal profilo del volo, dalla durata del volo e dall'attività solare.

Vedi pag. 31 **Effetti non stocastici
(deterministici)**

Effetti per i quali la gravità immediatamente rilevabile è funzione della dose ricevuta e per i quali vi può essere un valore limite di soglia.

Vedi pag. 31 **Effetti stocastici
(probabilistici)**

Effetti delle radiazioni la cui gravità è indipendente dalla dose e la cui probabilità che si verifichino si suppone essere proporzionale alla dose, ma per i quali non vi è un valore limite di soglia.

Vedi pag. 8 **Elettrone**

Particella carica negativamente orbitante intorno al nucleo dell'atomo.

Vedi pag. 7 **Elio**

Atomo composto da due protoni e due neutroni (nucleo) e da due elettroni.

Vedi pag. 21 **Enzimi**

Proteine altamente specializzate e sintetizzate dalle cellule, che favoriscono le reazioni chimiche organiche.

Vedi pag. 17 **Epidemiologia**

Branca della medicina che studia la distribuzione e la frequenza delle malattie nella popolazione umana, ricercando i fattori che ne causano la comparsa, il ritmo e la gravità per raggiungere una corretta prevenzione e cura.

Vedi pag. 24 **Fotone**

Quantità finita e indivisibile di energia elettromagnetica.

Vedi pag. 20 **Gonade**

Ghiandola della riproduzione sessuale che produce ormoni e elementi germinali maschili o femminili.

Vedi pag. 7 **Ione**

Atomo o molecola che ha catturato o perso uno o più elettroni. In particolare: ione positivo (catione) è un atomo o una molecola che ha perso uno o più elettroni; ione negativo (anione) è un atomo o una molecola che ha catturato uno o più elettroni.

Vedi pag. 8 **Latitudine terrestre**

Distanza angolare di un luogo dall'equatore terrestre generalmente misurata in gradi con valori tra 90° Sud e 90° Nord.

Vedi pag. 31 **Morfogenesi**

Processo di sviluppo dell'embrione che conduce alla formazione di organi e tessuti.

Vedi pag. 31 **Neoplasia**

Neoformazione patologica, il cui termine viene riferito abitualmente allo sviluppo tumorale benigno o maligno.

Vedi pag. 8 **Neutrone**

Particella costituente il nucleo dell'atomo, priva di carica e di massa uguale a quella del protone.

Vedi pag. 26 **Nuclide**

Nuclei atomici instabili.

Vedi pag. 19 Osteocita (o osteocito)

Ognuno degli elementi cellulari caratteristici del tessuto osseo.

Vedi pag. 15 Radioprotezione

È il complesso di misure adottate per prevenire gli effetti deterministici delle radiazioni e mantenere la probabilità di effetti stocastici ai livelli più bassi ragionevolmente ottenibili.

Vedi pag. 23 Protone

Particella di carica positiva, costituente del nucleo atomico in numero variabile e caratteristico di ogni specie chimica.

Vedi pag. 26 Radionuclide

Nucleo atomico instabile radioattivo.

Vedi pag. 9 Raggi alfa (α)

Particelle emesse dalle sostanze radioattive naturali; sono costituite da due neutroni e due protoni.

Vedi pag. 9 Raggi beta (β)

Particelle emesse dalle sostanze radioattive naturali; sono costituite da elettroni.

Vedi pag. 9 Raggi gamma (γ)

Onde elettromagnetiche prive di massa emesse in vari processi nucleari.

Vedi pag. 9 Raggi Rontgen X

Oscillazioni elettromagnetiche simili ai raggi γ generate da dispositivi elettrici.

Vedi pag. 19 RNA

Sigla dell'inglese RiboNucleic Acid in italiano acido ribonucleico, che si trova sia nel nucleo sia nel citoplasma delle cellule, la cui funzione principale è la sintesi proteica.

Vedi pag. 7 Solar flare

Il solar flare è un fenomeno che si verifica in occasione di esplosioni particolarmente violente sulla superficie del sole in seguito al quale un flusso consistente di particelle investe l'atmosfera terrestre.

Vedi pag. 20 Tessuto epiteliale

Tessuto caratteristico del rivestimento delle superfici esterne del corpo e di alcune mucose.