

INDAGINE NAZIONALE SULLA ESPOSIZIONE
DEL PERSONALE DI VOLO AI RAGGI COSMICI

*Rapporto finale sulla giornata di informazione
tenuta presso l'A.N.P.A. il 23 giugno 1998*

A.N.P.A. - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

D.I.A.S. - Dublin Institute for Advanced Studies

I.N.F.N. - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Universita' di Pisa - Dipartimento Costruzioni Meccaniche e Nucleari

USAAR - Universitat des Saarlandes

RTI ANPA-NUC 99/1

Premessa

L'Indagine Nazionale sulla esposizione del personale di volo ai raggi cosmici è stata realizzata dall'ANPA su richiesta del Ministero del Lavoro (Ispettorato Medico Centrale) con il supporto dell'Alitalia ed in collaborazione con il Dublin Institute for Advanced Studies (DIAS), con i Laboratori Nazionali di Frascati (INFN), con il Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari dell'Università di Pisa e con la Universitat des Saarlandes (USAAR)

I rapporti con l'Ispettorato Medico Centrale del Ministero del Lavoro, con l'Alitalia e con il Registro Aeronautico Italiano sono stati curati rispettivamente da Silvana Piermattei e Luigi Tommasino.

Il coordinamento delle attività di misura della campagna è stato svolto da Luigi Tommasino.

Per quanto riguarda gli altri istituti, i responsabili dell'iniziativa sono stati rispettivamente Denis O'Sullivan (DIAS), Maurizio Pelliccioni (INFN), Giorgio Curzio (Università di Pisa), e Rudolph Grillmaier (Università di Saarland). Il coinvolgimento dei laboratori stranieri nella indagine nazionale è stato facilitato da 2 diversi contratti multinazionali di ricerca finanziati dalla Direzione Generale XII della Commissione delle Comunità Europee.

Il contributo fornito dall'Alitalia è stato eccezionale in tutte le attività della campagna, soprattutto per quanto riguarda il supporto del personale di volo e quello dell'area tecnica. In particolare, Giuseppe Grisafulli e Antonio Tasso dell'area tecnica di Fiumicino hanno curato l'assistenza a terra ed in volo delle squadre di misura con dedizione e responsabilità tali da risolvere tutti i problemi che di volta in volta sono emersi.

Nelle diverse fasi dell'intera campagna, hanno partecipato alle attività (campagne di misure con sistemi passivi, analisi di laboratorio, realizzazione del pianale, organizzazione dei turni di misura, etc..) Marco Cavaioli e Massimo Notaro dell'ANPA. Per quanto riguarda le misure a bordo degli aerei e l'assistenza tecnica a terra prima e dopo i voli, hanno partecipato, oltre ai suddetti collaboratori, Giancarlo Freddi e Andrea Marchetti, anch'essi dipendenti dell'ANPA. Quest'ultimo ha, tra l'altro, assicurato il corretto funzionamento della Reuter Stokes durante tutta la campagna.

Per quanto riguarda il Dublin Institute of Technology, Dazhuang Zhou, oltre a contribuire alle misure e all'analisi dei dati, ha reso possibile una stretta e proficua collaborazione tra il DIAS e l'ANPA, anche grazie a soggiorni pluriennali effettuati in entrambi gli istituti. Si ringrazia inoltre Eileen Flood sempre del DIAS per il suo lavoro di raccolta dei dati. Le misure con la strumentazione dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN sono state effettuate da Maurizio Chiti e Adolfo Esposito, che hanno curato la calibrazione e la tenuta in efficienza della strumentazione impiegata. Francesco d'Errico e Aldo Del Gratta del Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari hanno partecipato alle squadre per le misure in volo, curando tra l'altro il corretto funzionamento del sistema di rivelazione a bolle. L'uso del Contatore Proporzionale a Tessuto Equivalente-TEPC ha richiesto sforzi particolari sia per le misure in volo che per l'analisi dei dati raccolti. Queste attività sono state possibili grazie al contributo di diversi ricercatori della Universitat des Saarlandes, con particolare riferimento a Elmar Arend, Stephan Gerdung, e Taeho Lim.

INTRODUZIONE

Le radiazioni possono essere di diverso tipo quali: la luce, le radioonde e le radiazioni ionizzanti. Queste ultime radiazioni sono definite ionizzanti perchè producono la ionizzazione quando interagiscono con la materia.

Fin dai primordi della vita sulla Terra, tutti gli esseri viventi sono esposti alle sorgenti naturali di radiazioni rispettivamente il cosmo che irradia continuamente la terra con i raggi cosmici e la biosfera della terra che comprende radionuclidi che sono esistiti principalmente nella crosta terrestre per miliardi di anni. L'esposizione dell'uomo dovuta alle sorgenti naturali di radiazioni può essere classificata in:

- Esposizione esterna quando 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 (capaci di emettere radiazioni) che entrano nel corpo umano per ingestione con gli alimenti nonché per inalazione attraverso le vie respiratorie.

Per quanto riguarda i raggi cosmici, l'esposizione è soprattutto di tipo esterno ed interessa tutto il corpo. La radiazione terrestre è di gran lunga la più grande sorgente naturale di irraggiamento e contribuisce fino all'85% alla dose media annuale della popolazione.

Inoltre più del 2/3 della esposizione alle radiazioni naturali ha luogo internamente ed è determinata dall'inalazione dei prodotti di decadimento del radon (discendente dalla famiglia dell'Uranio), gas radioattivo presente nel terreno, nelle rocce e nei materiali da costruzione.

La concentrazione del radon generalmente assai più elevata all'interno degli edifici che non all'aperto, è caratterizzata da una grande variabilità nello spazio e nel tempo, dovuta non solo alle sorgenti, ma anche a tanti altri fattori, legati al microclima, al tipo di costruzione, alle abitudini di vita delle persone, ecc. A differenza del radon, la esposizione ai raggi cosmici, in assenza di eruzione solari, è relativamente costante nel tempo ed, oltre ad essere affetta dal campo magnetico terrestre, dipende essenzialmente dall'altitudine. Al livello del mare, la esposizione della popolazione ai raggi cosmici è pari al 15% della dose media annuale dovuta a sorgenti naturali. Tuttavia nelle città situate in alta quota (come Denver, Bogotà, La Paz) la dose annuale di radiazioni ai residenti può essere fino a 5 volte più elevata del valore al livello del mare.

Alle altitudini dei voli commerciali, l'intensità dei raggi cosmici può essere circa 100 volte più grande di quella al livello del mare.

I viaggi aerei sottopongono i passeggeri e l'equipaggio a irraggiamento di radiazioni cosmiche relativamente elevato.

Mentre per i passeggeri occasionali i periodi di esposizione sono molto limitati per cui le dosi sono trascurabili, il problema si pone per gli equipaggi di volo.

La Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP) sin dal 1991 (ICRP-60) ha raccomandato, per la prima volta, di includere le sorgenti naturali come parte dell'esposizione professionale mettendo in evidenza in particolare, il problema della esposizione degli equipaggi di volo ai raggi cosmici.

Le suddette raccomandazioni dell'ICRP sono state adottate dalla Direttiva CEE 96/29/EURATOM (il cui termine di recepimento è il 13 maggio 2000) che, tra l'altro, dispone che ciascun Stato membro adotti le misure necessarie affinché le società di navigazione aeree tengano conto dell'esposizione alle radiazioni cosmiche del personale navigante, la cui dose potrebbe superare il valore di un millesimo di Sievert (1 mSv) all'anno.

L'unità di misura, mSv, viene utilizzata per valutare la *dose efficace*, E, che è una grandezza utilizzata nella protezione delle radiazioni ionizzanti per confrontare le conseguenze associate alle diverse sorgenti di radiazioni. Come descritto in Appendice B, la *dose efficace* viene utilizzata per esprimere i limiti di dose e non è misurabile. Le grandezze dosimetriche misurabili sono il *massimo di equivalente di dose*, MADE, e l'*equivalente di dose ambiente*, H*(10), che sono espresse in termini di mSv come la *dose efficace* (Appendice B).

Per poter ottemperare alle nuove Direttive dell'Unione Europea, l'ANPA, dietro richiesta anche del Ministero del Lavoro e con la collaborazione dell'Alitalia ha promosso una campagna di misure per valutare le dosi al personale di bordo.

Per la campagna di misure della esposizione del personale di volo ai raggi cosmici è stato necessario l'uso di strumentazione molto avanzata resa disponibile grazie alla collaborazione con il *Dublin Institute for Advanced Studies* (DIAS), i Laboratori Nazionali di Frascati (INFN), la *Universitat des Saarlandes* (USAAR) e il Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari dell'Università di Pisa.

Uno dei problemi più complessi per la determinazione della esposizione del personale di volo è la misura della componente di neutroni di alta energia e delle particelle di carica ed energia elevata, ragion per cui i dati esistenti non sono ritenuti sufficienti per una accurata valutazione della dose (Menzel, 1993).

A tal fine sono stati sviluppati dei nuovi sistemi di rivelazione in stretta collaborazione con il *Dublin Institute for Advanced Studies*, sfruttando, tra l'altro, finanziamenti della Commissione delle Comunità Europee nell'ambito di diversi programmi multinazionali di ricerca.

RADIAZIONE COSMICA

Il termine radiazione cosmica viene utilizzato indifferentemente sia per la radiazione di origine galattica che quella di origine solare cioè radiazioni provenienti da due sorgenti molto diverse tra loro.

Radiazione di Origine Galattica

La radiazione cosmica di origine galattica è costituita da protoni di alta energia (85%), nuclei di elio (12%), nuclei pesanti (1%) ed elettroni (2%).

Queste radiazioni provengono da sorgenti presenti nella nostra galassia all'esterno del sistema solare. L'origine esatta di queste radiazioni non è tuttora ben nota anche se in generale si ritiene che vengano prodotte da esplosioni di stelle, di supernovae e di nuclei galattici (Reitz, 1993).

Nell'ultimo miliardo di anni, il flusso di queste particelle galattiche che arriva sull'atmosfera terrestre è cambiato soltanto di un fattore 2 (Reitz, 1993).

Prima di arrivare sulla superficie terrestre i raggi cosmici devono interagire con il campo magnetico associato al vento solare, eruzioni solari, con il campo magnetico terrestre e con l'atmosfera terrestre.

Come risultato di queste interazioni, la intensità della radiazione cosmica dipende dalla latitudine, dall'altitudine e dalla attività solare. L'intensità del vento solare, che consiste principalmente di protoni ed elettroni, varia durante il ciclo di 11 anni dell'attività solare. Le particelle del vento solare sono di bassa energia per cui non contribuiscono al campo di radiazioni all'interno dell'atmosfera.

Durante il periodo di elevata attività solare, il vento solare ed il campo magnetico ad esso associato è più intenso, per cui l'intensità dei raggi cosmici che arriva sull'atmosfera è più bassa.

Il contrario avviene nei periodi di bassa attività solare a cui corrisponde una maggiore intensità della radiazione cosmica che arriva sull'atmosfera terrestre.

I raggi cosmici devono anche interagire con il campo magnetico terrestre prima di entrare in atmosfera. In queste interazioni, le radiazioni perpendicolari al campo magnetico terrestre vengono deviate a seconda della loro energia. Nessuna interazione avviene quando le radiazioni hanno un percorso parallelo al campo magnetico.

Questo in pratica significa che all'equatore soltanto particelle di alta energia possono raggiungere l'atmosfera. Con l'aumentare della latitudine l'effetto del campo magnetico si riduce fino ad annullarsi ai poli, essendo in questo caso il percorso delle particelle parallelo alla direzione del campo magnetico terrestre.

Una volta entrate nell'atmosfera, le particelle primarie interagiscono con gli atomi e le molecole dell'aria e producono la radiazione cosmica secondaria costituita principalmente da neutroni, protoni, pioni ed i loro prodotti di decadimento (muoni, elettroni, raggi gamma e neutrini).

Il flusso di particelle è relativamente costante tra 150 km e 50 km di altitudine. Esso comincia a crescere a 50 km per il contributo delle particelle secondarie e raggiunge un massimo a circa 20 km (massimo di Pfozter) ed eventualmente diminuisce fino al livello del mare a causa dell'assorbimento delle particelle da parte dall'atmosfera.

Radiazioni di Origine Solare

Il sole ha una attività intensa e permanente durante la quale emette radiazioni corpuscolari ed elettromagnetiche (vento solare) di bassa energia e quindi poco penetrante nell'atmosfera. Questa attività solare è caratterizzata da un ciclo solare di circa 11 anni durante il quale si verificano delle eruzioni solari, costituite da improvvise esplosioni sulla superficie del sole con enorme rilascio di energia.

Le eruzioni solari possono essere di tipo relativistico se costituite da flussi intensi di protoni di energia elevata fino a 1.000 MeV ed eruzioni non relativistiche se formate da flussi ed energia dei protoni relativamente più bassi.

Le eruzioni più importanti avvengono alla fine del periodo di massima attività solare.

Solo raramente durante tali eruzioni (anche se relativistiche) le radiazioni giungono fino all'atmosfera terrestre e soltanto una piccola frazione di queste ultime può aumentare l'esposizione alle altitudini dei voli commerciali.

Alcune eruzioni solari danno origine ad un rapido aumento del rateo di dose (fino ad alcuni mSv per ora) ma hanno una durata breve, per cui possono produrre dosi totali di alcuni mSv alle altitudini di volo.

Una previsione a lungo termine delle eruzioni solari non è tuttora possibile. Negli ultimi anni è migliorata la previsione delle eruzioni solari a breve termine.

Contrariamente alla esposizione alla radiazione di origine galattica, quella dovuta ad eruzioni solari è totalmente imprevedibile ed estremamente variabile. Essa può essere valutata soltanto in modo retrospettivo. Le informazioni necessarie per la dosimetria retrospettiva riguardano, tra l'altro, la conoscenza dello spettro di radiazioni, soprattutto, lungo le rotte polari dove la esposizione è massima.

MISURE DI RAGGI COSMICI

Cenni Storici

La prima misura dei raggi cosmici è stata effettuata nel 1910 da Theodor Wulf, un gesuita, sulla cima della Torre Eifel a 300 metri d'altezza. Utilizzando come strumento un elettroscopio a foglie, osservò che la diminuzione della ionizzazione dell'aria da parte della radiazione terrestre era inferiore a quella che ci si aspettava a quell'altezza. Per queste ragioni Wulf concluse che la radiazione proveniente da terra entrava in competizione con un altro tipo di radiazione proveniente dal cielo (Fraser et al, 1994).

Sulla base di queste osservazioni, Victor Hess, con l'aiuto dell'Aero Club austriaco riuscì, nel 1911, ad effettuare una serie di misure con palloni aerostatici. Scopì che la ionizzazione aumentava velocemente con l'altitudine e a 5.000 metri era molto più intensa che a terra.

Per scoprire da dove veniva tale radiazione extra-terrestre, il 12 aprile 1912 Hess fece un volo in pallone aerostatico durante un'eclisse quasi totale del sole, ma non osservò nessuna riduzione della intensità della radiazione cosmica. Dopo la prima guerra mondiale gli studi ripresero sia in America che in Europa, in particolare da parte dell'americano Robert Millikan, che nel 1925 coniò il nome dei raggi cosmici, poichè la radiazione sembrava provenire dal cosmo (Fraser et al., 1994).

Dosimetria della Radiazione Cosmica: Rassegna dei dati esistenti.

Le prime valutazioni di tipo dosimetrico delle radiazioni cosmiche sono state effettuate soltanto dopo la seconda guerra mondiale da Patterson et al (1959). L'interesse per la dosimetria della radiazione cosmica in atmosfera alle altitudini di volo nasce soprattutto con l'avvento del Concorde.

La maggior parte dei dati di misura della radiazione cosmica alle altitudini di volo supersonico e subsonico è stata raccolta in America nell'ex Unione Sovietica tra il 1965 ed il 1972 (Bartlett et al., 1997). In questo periodo la NASA ha effettuato circa 300 voli con strumentazione a bordo.

Nel 1992, l'EURADOS (Associazione Europea dei Laboratori di Dosimetria) in collaborazione con la Commissione delle Comunità Europee (Direzione Generale XI di Luxembourg) ha organizzato un gruppo di lavoro (WG XI) formato da 16 esperti di dosimetria provenienti da tutta l'Europa, per la valutazione dei dati esistenti sulla esposizione in alta quota e lo studio dei problemi tecnici e scientifici concernenti la dosimetria del personale di volo (McAulay et al., 1996).

Questo gruppo di lavoro ha effettuato, tra l'altro, una rassegna dei dati sulla esposizione in alta quota esistenti fino a tutto il 1993. Questi dati sono riportati in Fig.1 in funzione dell'altitudine a diverse latitudini.

Da questa figura possono essere tratte le seguenti conclusioni:

- I ratei di dose dipendono dalla latitudine, aumentando dall'equatore fino a circa 50°N
- I ratei di dose aumentano in funzione dell'altitudine a tutte le latitudini.
- I ratei di dose sono correlati con l'attività solare essendo più alti nel periodo 1974-1976 (minimo solare) che nel 1991 (massimo solare).
- I ratei di dose vanno da un minimo di 1 μ Sv/h a basse latitudini (equatore) e basse altitudini (9 km) ad un massimo di 10 μ Sv/h ad alte latitudini ed altitudine. Con 1.000 ore di volo all'anno, al di sopra di 9 km, le dosi annuali superano un mSv/anno e sono comunque sempre inferiori a 10 mSv/anno.

Le grandezze utilizzate per la maggior parte dei dati riportati in Fig. 1 non vengono riportate negli articoli da cui detti dati sono stati ripresi (Bartlett et al, 1997).

Nonostante queste incertezze si può in pratica concludere che la componente neutronica è stata calcolata in passato da diversi laboratori con una incertezza del 30%, mentre per la componente non neutronica, l'incertezza è di appena il 10%. Una delle conclusioni più importanti del rapporto finale del gruppo di lavoro XI dell'EURADOS riguarda la necessità di ottenere informazioni più precise sul contributo alla dose totale dovuto ai neutroni ed alle particelle di carica ed energia elevata, HZE.

VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE DEL PERSONALE DI VOLO: INIZIATIVE IN AMBITO INTERNAZIONALE.

Come già detto, la Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP) ha raccomandato per la prima volta nel 1991 (ICRP-60) di includere le sorgenti naturali, come parte dell'esposizione professionale, mettendo in evidenza, tra l'altro, il problema della esposizione del personale di volo ai raggi cosmici.

A seguito di queste raccomandazioni (ICRP-60), la Commissione delle Comunità Europee ha organizzato un Workshop a Luxembourg nel giugno 1991 per fare il punto della situazione della esposizione del personale di volo.

Fig.1

I problemi più importanti emersi in questo Workshop sono elencati in seguito:

- Necessità di avere maggiori informazioni sul campo di radiazione cosmico soprattutto per quel che concerne i neutroni e le particelle di carica e di energia elevata;
- Necessità di promuovere collaborazioni internazionali per la messa a punto e la calibrazione di strumentazione avanzata per armonizzare le iniziative nei vari Stati Membri.

Per poter affrontare al meglio i suddetti problemi sono sorte diverse iniziative promosse e finanziate dalla Commissione delle Comunità Europee, quali:

- Realizzazione del gruppo di lavoro EURADOS, già descritto sopra, per la raccolta e la valutazione dei dati esistenti sulla esposizione ai raggi cosmici in alta quota;
- Programmi multinazionali di ricerca per la messa a punto e la calibrazione di strumentazione avanzata con fasci di neutroni e di particelle cariche pesanti;
- Campagne di interconfronto di strumentazione diversa con fasci di radiazione di alta energia, quali quelli del Centro Internazionale di ricerca (CERN) di Ginevra, dell'Università di Uppsala (Svezia) e del Paul Scherrer Institute (Svizzera).
- Campagne di misure in alta montagna (Cervino, Chachaltaya) ed in atmosfera (Palloni sonda, Concorde, Voli dedicati della NASA, ecc).

CAMPAGNA NAZIONALE DI MISURE DELLA ESPOSIZIONE DEL PERSONALE DI VOLO

A seguito della pubblicazione n° 60 dell'ICRP, l'Ispettorato Medico Centrale del Ministero del Lavoro ha chiesto la collaborazione dell'allora ENEA-DISP (oggi ANPA) per affrontare il problema della esposizione del personale di volo.

A tal fine è stata organizzata una campagna di misure sui voli della Compagnia di Bandiera in cui l'ANPA ha, tra l'altro, assicurato il supporto economico per l'assistenza a terra ed in volo delle squadre di misure. Un contributo eccezionale è stato dato dall'Alitalia soprattutto per quel che riguarda il supporto del personale dell'area tecnica e del personale di volo durante tutte le fasi della campagna.

Gli obiettivi principali della campagna di misure si articolano nel modo seguente:

- Valutazione della esposizione del personale di volo su rotte di breve e lungo raggio;
- Studio della riproducibilità della dose di rotta.

Strategia della Campagna di Misure

Le campagne di misura della esposizione del personale di volo ai raggi cosmici sono state realizzate in passato rispettivamente o con strumentazione di tipo attivo o con quella di tipo passivo. I sistemi di rivelazione di tipo passivo consentono la valutazione della dose totale ricevuta per tempi lunghi di esposizione, mentre i sistemi attivi consentono la misura puntuale del rateo di dose in funzione della latitudine e dell'altitudine.

La strategia adottata nella campagna nazionale di misure della esposizione del personale di volo è stata quella di utilizzare simultaneamente a bordo i sistemi di rivelazione più avanzati sia di tipo attivo che passivo. L'uso simultaneo della strumentazione attiva o passiva richiede esposizioni per centinaia di ore di volo a causa della differenza di sensibilità di risposta dei diversi sistemi di rivelazione.

Questa campagna di misure ha richiesto uno sforzo organizzativo e tecnico, che ha visto coinvolti, oltre alla Compagnia di Bandiera, i Laboratori Nazionali di Frascati (INFN), il *Dublin Institute for Advanced*

Studies (DIAS), la *Universitat des Saarlandes* e il Dipartimento di Costruzioni Meccaniche Nucleari dell'Università di Pisa.

I sistemi di rivelazione utilizzati (ved. Appendice A) sono sensibili a neutroni di tutte le energie e sono stati sviluppati (e/o messi a punto) dagli stessi laboratori che hanno partecipato alla campagna. Essi si dividono in due categorie, quali:

Sistemi attivi:

-*Extended Rem-Counter* (LINUS) - Sviluppato nei laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Birattari et al., 1998).

-*Tissue Equivalent Proportional Counter* - TEPC-HANDI - Sviluppato per misure in volo dalla *Universitat des Saarlandes* (USAAR) - Germania (Kunz et al., 1992).

Sistemi Passivi:

-Stack ANPA. - Sviluppato migliorando tecnologie di concezione ENEA per la rivelazione dei neutroni di alta energia ed utilizzando i rivelatori a bolle di tipo passivo per i neutroni di bassa energia (Tommasino et al., 1996).

-Stack DIAS- Sviluppato dal *Dublin Institute for Advanced Studies* (D.I.A.S.), utilizzando sistemi di dosimetria spaziale (O'Sullivan et al, 1999).

Altri sistemi utilizzati sono formati da dosimetri a bolle di tipo attivo per i neutroni di bassa energia resi disponibili dal Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari dell'Università di Pisa nonché camere a ionizzazione del tipo Reuter Stokes, materiali termoluminenti, ecc. In particolare per quanto riguarda i sistemi passivi a termoluminescenza sono stati adottati rispettivamente i dosimetri a bulbo dei Laboratori Nazionali dell'INFN di Frascati ed i dosimetri del tipo a pasticca di fluoruro di litio dell'ANPA.

Per poter utilizzare la strumentazione a tempo reale a bordo degli aerei è stato necessario avere l'autorizzazione da parte del Registro Aeronautico Italiano (RAI).

A tal fine sono state fatte prove diverse sia per il fissaggio della strumentazione a bordo degli aerei sia per assicurare l'assenza di interazioni di tipo elettromagnetico con la strumentazione di bordo.

In particolare è stato necessario utilizzare schermature speciali per gli strumenti e progettare un pianale per il loro fissaggio a bordo.

La campagna di misure è iniziata soltanto dopo aver ottenuto l'autorizzazione del Registro Aeronautico Italiano nell'agosto del 1995. Le misure sono state effettuate nel periodo settembre 1995-luglio 1997 su aerei diversi su rotte di lungo raggio a diverse latitudini. Questo periodo corrisponde ad 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 1 riporta le informazioni concernenti le rotte, il tipo di aereo, e il numero di ore di volo per ogni rotta al di sopra di 8 km.

TABELLA 1: INFORMAZIONI SUI VOLI DELLA CAMPAGNA

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

--	--	--	--

La strumentazione è stata accesa soltanto ad altitudini superiori a 8 km, non solo perchè la intensità dei raggi cosmici diventa significativa ad altitudini elevate, ma anche per evitare l'uso degli strumenti durante la fase di decollo e di atterraggio, come da richiesta del Registro Aeronautico Italiano.

Grandezze per la Misura dell'esposizione ai Raggi Cosmici

Come già accennato in precedenza, la grandezza radioprotezionistica *dose efficace*, E, su cui si basano i limiti di dose non è misurabile. La risposta e la calibrazione della strumentazione si basano su grandezze operative (Appendice B), quali *il massimo di equivalente di dose*, MADE, e *l'equivalente di dose ambiente*, H*(10).

Secondo il decreto legislativo, D.L.vo 230/95 (1995), la grandezza da utilizzare tuttora in Italia per la valutazione della dose è *il massimo di equivalente di dose*.

Con il recepimento della Direttiva Europea 96/29/ EURATOM(1996), a partire dal 13 maggio 2000, la grandezza per la misura e la valutazione della dose dovrà essere l' *equivalente di dose ambiente* H*(10), già adottata dalla maggior parte dei paesi europei.

Data la necessità di confrontare i risultati della campagna nazionale con quelli raccolti in campagne analoghe realizzate contemporaneamente in ambito internazionale, i dati vengono riportati in termini di H*(10), così come viene raccomandato dalla Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP-60 , 1991).

D'altro canto, per poter confrontare i risultati ottenuti con quelli raccolti negli anni '70 è necessario riportare i dati in termini della grandezza MADE.

Risultati della Campagna Nazionale

I risultati ottenuti con la strumentazione attiva, sono in termini di ratei di dose (dovuta sia alle radiazioni debolmente ionizzanti-bassoLET che a quelle altamente ionizzanti-alto LET) in funzione dell'altitudine e latitudine, mentre quelli concernenti i sistemi passivi rappresentano il valore della dose integrata (per le stesse radiazioni a basso e alto LET) su tutto il periodo di esposizione. La Fig. 2 riporta i dati ottenuti con i contatori proporzionali a tessuto equivalente, TEPC (AppendiceA) concernenti 5 voli andata/ritorno sulla rotta Milano-Tokio in funzione del tempo di volo al di sopra di 8 km. Nella stessa figura la linea parallela all'asse delle ascisse rappresenta il valore medio del rateo di dose ottenuto con i rivelatori passivi (Stack ANPA, Stack DIAS e rivelatori termoluminescenti) effettuando il rapporto tra la dose totale dei 5 voli ed il numero di ore di volo ad altitudini superiori a 8 km.

Per poter effettuare il confronto delle diverse misure è stato calcolato il rateo medio di dose anche per i risultati ottenuti con la strumentazione attiva.

La Tabella 2 riporta i valori medi del rateo di dose (*equivalente di dose ambiente*) ottenuti rispettivamente lungo le rotte Milano-Los Angeles, Milano-Tokio e Roma-Rio de Janeiro. Essendo i sistemi passivi (Stack ANPA. Stack DIAS) ed il Linus sensibili preferenzialmente ai neutroni, per ottenere il rateo totale di dose, la componente non neutronica è stata determinata con i dosimetri a termoluminescenza.

L'accordo tra le diverse misure è particolarmente buono (entro gli errori sperimentali), soprattutto se si considera che i sistemi dosimetrici sfruttano principi di rivelazioni diversi e sono state calibrate con procedure e fasci di radiazioni altrettanto diversi.

I valori medi dei ratei di dose dei rivelatori attivi sono stati ottenuti con misure ripetute lungo la stessa rotta e lo stesso tipo di aereo.

Per un dato sistema di rivelazione l'errore (una deviazione standard) relativo al rateo medio di dose dipende, oltre che dalla precisione della misura, dalla riproducibilità della dose di rotta.

Essendo detto errore circa il 10% del valore medio del rateo di dose, la dose di rotta si può ritenere molto riproducibile.

Fig. 2

TABELLA 2: CONFRONTO DELLE MISURE IN VOLO

SISTEMA DOSIMETRICO	RATEO DELL'EQUIVALENTE DI DOSE AMBIENTE (mSv/h)
MILANO - TOKIO - MILANO <i>(8 Voli andata/ritorno)</i> <i>(Maggio - Giugno 1997)</i>	
LINUS (INFN) + TLD	$4,6 \pm 0,5$
TEPC (USAAR)	$4,7 \pm 0,4$
STACK (ANPA) + TLD	$4,7 \pm 0,4$
STACK (DIAS) + TLD	$4,9 \pm 0,6$
ROMA - RIO DE JANEIRO - ROMA <i>(18 Voli andata/ritorno)</i> <i>(Ottobre - Dicembre 1996)</i>	
LINUS (INFN) + TLD	$2,0 \pm 0,2$
TEPC (USAAR)	$2,3 \pm 0,3$
STACK (ANPA) + TLD	$2,1 \pm 0,2$
STACK (DIAS) + TLD	$2,4 \pm 0,3$
MILANO - LOS ANGELES - MILANO <i>(10 Voli andata/ritorno)</i> <i>(Settembre - Ottobre 1995)</i>	

LINUS (INFN) + TLD	4,6 ± 0,6
TEPC (USAAR)	4,7 ± 0,6
STACK (ANPA) + TLD	4,7 ± 0,5
STACK (DIAS) + TLD	4,8 ± 0,6

Confronto con i Dati Ottenuti in Passato

Come già accennato sopra, la campagna di misure realizzata nel periodo 1995-1997 è avvenuta durante la fase di attività solare minima, per cui i ratei di dose ottenuti rappresentano dei limiti superiori di tutti i possibili valori (della radiazione di origine galattica) registrabili lungo l'intero ciclo solare.

La Fig.3 riporta il confronto dei risultati della campagna con quelli raccolti in passato nel periodo di attività solare minima (74-76) e di attività solare massima (1991).

I dati ed il tipo di grafico utilizzati, sono gli stessi di quelli riportati in Fig. 1.

Per facilitare il confronto tra i dati raccolti durante la stessa fase di attività solare, i ratei di dose del periodo 95-97 sono stati espressi in termini di massimo di dose equivalente, MADE, cioè utilizzando la stessa grandezza in uso nel periodo 74 - 76.

Da questo confronto risulta che i dati ottenuti nel periodo 95-97 sono in media di circa il 20% più elevati di quelli ottenuti nel periodo 74-76 cioè nella stessa fase di minimo solare.

Queste differenze possono essere attribuite all'uso di strumentazione avanzata (con risposta sensibile anche ai neutroni di alta energia) nella campagna nazionale di misura.

CAMPAGNA DI MISURE REALIZZATA CON LO STACK ANPA

L'esposizione simultanea di strumenti diversi a bordo degli aerei è necessaria per confrontare la loro risposta direttamente in campo.

Una volta effettuato questo confronto, uno qualsiasi dei sistemi di rivelazione calibrato in volo può essere sufficiente per effettuare le misure.

Pertanto è stato possibile effettuare campagne di misure su rotte diverse di breve e lungo raggio utilizzando soltanto lo Stack ANPA soprattutto nel periodo (1993-1995) antecedente alla campagna nazionale.

Le caratteristiche di semplicità (nessuna assistenza tecnica a bordo), compattezza, basso peso, assenza di alimentazione, consentono la esposizione dello Stack in una moltitudine di rotte e posti diversi, potendo sfruttare, tra l'altro, il supporto dei piloti, del personale di cabina, dei colleghi dell'ANPA in viaggio per ragioni di lavoro, nonché lo stesso servizio di posta celere.

In particolare, gli Stack ANPA sono stati esposti sul pallone sonda a 50 Km di altitudine, sul Concorde, su montagne a latitudini ed altitudini diverse, su voli Roma-Rio de Janeiro e Roma-Los Angeles, su rotte diverse in ambito europeo ed internazionale, al livello del mare (aeroporto di Fiumicino), in talune abitazioni romane del personale di volo e sotto il Gran Sasso.

I dati di maggiore interesse ai fini della valutazione della esposizione del personale di volo ai raggi cosmici vengono riportati nella Tabella 3.

Questi dati riguardano il rateo medio di dose e le dosi annuali ricevute dal personale di volo rispettivamente sul Concorde, sulla rotta Milano-Tokio, nonché sui voli transeoceanici di lunga durata (> 6h) e sui voli di breve durata (< 1h).

Nella stessa tabella viene riportata la dose di raggi cosmici ricevuta al livello del mare in un anno, determinata esponendo lo Stack ANPA. nell'area tecnica dell'aeroporto di Fiumicino.

La dose ricevuta in un anno dal personale di volo è data dal prodotto del rateo medio di dose per il numero di ore di volo al di sopra di 8 km, riportate in parentesi nella prima colonna della tabella 3. Nella stessa colonna viene riportato il numero di block hours, cioè il numero totale di ore trascorse all'interno dell'aereo, incluse quelle durante la sosta in pista a sportelloni chiusi.

Fig.3

**TABELLA 3: DOSE ANNUALE IN FUNZIONE
DEL NUMERO DI ORE SOPRA 8 KM.
(Misure ottenute con lo Stack ANPA)**

Esposizione Durata	Rateo di <i>equivalente</i> di dose ambiente	Dose annuale
Concorde (300) 312 ore	11 μ Sv/h	3,3 mSv
Milano - Tokio (700)750 ore	4,83 μ Sv/h	3,4 mSv
Voli (>6 ore) (700) 770 ore	3,6 μ Sv/h	2,5mSv
Voli (~1 ora) (450) 700 ore	2,26 μ Sv/h	1,02 mSv
Fiumicino 1 anno		0,42 mSv

Da questi dati risulta che le esposizioni occupazionali del personale di volo della compagnia di bandiera sono tutte comprese tra 1mSv/anno e 6 mSv/anno per 700 ore di volo.

E' possibile superare 6mSv/anno soltanto volando per più di 1000 ore su rotte transeoceaniche a latitudini elevate.

CONFRONTO TRA I VALORI CALCOLATI E LE MISURE SPERIMENTALI

Uno dei modelli di calcolo della esposizione del personale di volo è noto come il CARI (Friedberg et al., 1998) che è un metodo di calcolo relativamente semplice derivato dal programma LUIN, messo a punto da O'Brien negli anni '70 al Laboratorio di Misure Ambientali di New York (O'Brien, 1996).

L'ultima versione del LUIN (nota come LUIN 98F) è quella aggiornata di recente per tener conto della componente dei neutroni di alta energia e dei nuovi coefficienti di conversione concernenti la grandezza *dose efficace*, E (Pelliccioni, 1998a).

Da quest'ultima versione (LUIN 98 F) è stato derivato il CARI 5.

All'INFN di Milano è stato adottato un programma di calcolo, noto come FLUKA, per lo studio dei raggi cosmici (Ferrari et al., 1997; Ferrari e Sala, 1997). Questo metodo di calcolo è stato, tra l'altro, utilizzato da Pelliccioni per la dosimetria delle radiazioni di alta energia soprattutto per quel che riguarda il calcolo dei coefficienti di conversione tra le fluenze di radiazioni di alta energia e la dose efficace, E (Ferrari e Pelliccioni 1994; Ferrari et al, 1997; Pelliccioni, 1998a, 1998b)

Questi ed altri programmi di calcolo sono oggetto di studio nell'ambito del programma multinazionale di ricerca, tuttora in corso, finanziato dalla Commissione delle Comunità Europee.

Nella Tabella 4 vengono riportati i valori dei ratei medi di dose (lungo le rotte Milano-Tokio e Roma-Rio de Janeiro) misurati e quelli calcolati con CARI 5. Nella stessa tabella vengono riportati anche i dati calcolati con il CARI 3. I valori del CARI 5 e del CARI 3 sono stati ottenuti facendo la media dei ratei medi di dose calcolati su decine di voli ripetuti lungo la stessa rotta, per cui gli errori dipendono essenzialmente dalla riproducibilità della dose di rotta.

I ratei di dose misurati sono stati ottenuti (effettuando la media dei dati riportati nella tabella 2) in termini di ratei di *equivalente di dose ambiente* mentre quelli calcolati sono espressi in termini di *dose efficace*, E. I dati sperimentali sono uguali entro gli errori a quelli calcolati con il CARI 5, mentre i dati ottenuti con il CARI 3 sono sistematicamente più bassi. Queste differenze potrebbero essere essenzialmente spiegate dal fatto che il CARI 3 non prende in considerazione il contributo dei neutroni di alta energia (Friedberg et al., 1998).

TABELLA 4: CONFRONTO TRA MISURA E CALCOLO

ROTTA	MISURA $\mu\text{Sv/h}$	CALCOLO CARI 5 $\mu\text{Sv/h}$	CALCOLO CARI-3 $\mu\text{Sv/h}$
Milano - Tokio	$4,7 \pm 0,2$	$4.9 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,4$
Roma - Rio	$2,2 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,2$	$1.5 \pm 0,2$

***PARTICELLE DI CARICA (Z) E DI ENERGIA (E) ELEVATA (H):
PARTICELLE HZE.***

Molto spesso in passato è stata evidenziata la necessità di ottenere una valutazione accurata della dose dovuta a particelle di carica ed energia elevata, HZE, alle altitudini dei voli commerciali (Menzel, 1991; Nguyen et al., 1993; Wilson et al., 1995), per cui la Commissione delle Comunità Europee ha finanziato due diversi programmi di ricerca per la soluzione, tra l'altro, di questo problema.

Le particelle HZE sono in pratica formate da nuclei di carica $Z \geq 2$ in grado di penetrare almeno un millimetro di tuta spaziale.

In particolare sono i nuclei più pesanti ($Z \geq 10$) che pongono i problemi più complessi dal punto di vista radioprotezionistico, soprattutto per quel che riguarda i nuclei del gruppo del ferro che contribuiscono per il 50% alla dose totale di queste particelle (Fukui e Young, 1971, Wilson et al., 1995). L'interesse per questi nuclei pesanti è determinato dal fatto che i meccanismi di danno radiobiologico potrebbero essere diversi da quelli prodotti da altri tipi di radiazione, ivi inclusi i neutroni che interagiscono con il tessuto producendo particelle di carica $Z < 10$ e di energia relativamente bassa. Con questi ioni pesanti, una quantità talmente elevata di energia viene depositata in prossimità della loro traccia da inattivare la maggior parte delle cellule attraversate soprattutto negli ultimi mm della traccia stessa. Pertanto il rischio radiologico non può essere valutato utilizzando le grandezze dosimetriche convenzionali e devono essere presi in considerazione gli effetti di ogni singola traccia (Fuller e Day, 1971; Allkofer e Heinrich, 1974, Curtis, 1987), che può produrre una *microlesione*, formata da una colonna di cellule inattivate lungo la traccia circondate da cellule irraggiate ma sopravvissute (Todd and Walker, 1984).

I modelli esistenti per la valutazione del flusso delle particelle HZE a diverse altitudini sono poco accurati per la scarsità di dati sulle interazioni di queste particelle con l'atmosfera (Wilson et al., 1995). Per ottenere una valutazione accurata del flusso di queste particelle sono stati fatti sforzi notevoli (anche grazie al supporto della Commissione delle Comunità Europee) sia per lo sviluppo di strumentazione adeguata che per le campagne di misure ad altitudini diverse (Pallone sonda, Concorde, Voli subsonici).

In particolare, un sistema a scansione molto rapida è stato realizzato dall'ANPA per la determinazione delle particelle HZE con $Z \geq 10$ (Appendice A).

Questo sistema di rivelazione è stato esposto per 50 ore su un pallone sonda a 40 Km di altitudine, per 350 ore sul Concorde e per circa 1000 ore sui voli Alitalia lungo la tratta Milano-Los Angeles.

Nella esposizione sul pallone sonda sono state rivelate circa 50 particelle di carica $Z \geq 10$ su un'area di rivelazione di 225 cm², mentre sul Concorde è stato rivelato un solo evento sulla stessa area di rivelazione per un totale di 350 ore di esposizione.

Nessuna di queste particelle è stata rivelata sui voli subsonici. La probabilità di trovare particelle di carica $Z \geq 10$ alle altitudini dei voli subsonici è risultata estremamente bassa, per cui il rischio radiologico si può ritenere trascurabile.

Per la rivelazione dei nuclei relativistici di carica $Z < 10$ è stato necessario utilizzare il Substack sviluppato dalla Scuola di Fisica dei raggi cosmici del *Dublin Institute for Advanced Studies* (DIAS) (Appendice A), che ha effettuato uno studio sistematico sulla spettrometria di queste

particelle su voli supersonici e subsonici (Byrne et al., 1995; O'Sullivan, 1995; O'Sullivan et al., 1999).

Per quanto riguarda le misure effettuate sui voli dell'Alitalia sono stati rivelati flussi molto bassi di particelle di carica $Z \leq 7$, pari a circa una particella per cm^2 per 1.000 ore di esposizione sui voli Milano-Los Angeles. E' importante, a questo punto, far notare che, date le difficoltà di misura, è la prima volta che dette particelle vengono rivelate alle altitudini dei voli subsonici. La dose associata a queste particelle è stata determinata adottando procedure analoghe a quelle utilizzate per la dosimetria dei neutroni mediante TEPC e Stack DIAS (Appendice A). Questa dose è risultata trascurabile e pari a circa l'1% della dose dovuta ai neutroni.

CONCLUSIONI

Misure delle esposizioni ai raggi cosmici alle altitudini dei voli supersonici e subsonici sono state fatte in passato soprattutto in occasione dell'avvento del Concorde (Bartlett et al., 1997).

Nella campagna di misure effettuata in Italia, oltre ad utilizzare la strumentazione più avanzata non disponibile nelle precedenti indagini, è stato finalmente effettuato il confronto delle misure ottenute con strumentazione sia passiva che attiva, esposta simultaneamente a bordo di aerei su rotte a latitudini diverse. Queste misure, pur essendo state ottenute con diversi sistemi dosimetrici, calibrati con fasci di radiazione altrettanto diversi, sono risultate uguali entro gli errori sperimentali.

La campagna nazionale è avvenuta nel periodo 95-97, che corrisponde al minimo dell'attività solare, in cui la intensità di esposizione alla radiazione di origine galattica acquista i valori massimi. I valori dei ratei di dose in detto periodo sono risultati in media di circa il 20% più elevati di quelli ottenuti nel periodo 74-76, cioè nella stessa fase di minimo solare. Queste differenze possono essere attribuite all'uso di strumentazione avanzata (con risposte sensibili anche ai neutroni di alta energia) nella campagna nazionale.

Le dosi annuali del personale di volo della compagnia di bandiera sono risultate tutte comprese tra 1mSv a 6 mSv per 700 ore di volo all'anno al di sopra di 8km. E' possibile superare 6 mSv soltanto volando per più di 1000 ore su rotte transeoceaniche a latitudini elevate.

I suddetti valori di dose riguardano essenzialmente le radiazioni di origine galattica, che nei periodi di minimo solare sono molto riproducibili nel tempo.

Non esistono invece sufficienti dati sperimentali per quanto riguarda le eruzioni solari, che pur essendo eventi molto rari, possono aumentare il rateo di dose di un fattore 100 o più per brevi periodi. Quando confrontata con la radiazione di origine galattica, quella dovuta alle eruzioni solari è totalmente imprevedibile in termini di spettro di energia, intensità, durata, ecc.

Con l'avvicinarsi del massimo solare previsto per il 2000 è necessario continuare le misure sulle rotte Milano-Tokyo e Roma-Ryo con sistemi dosimetrici, che non richiedono assistenza tecnica in volo o a terra (cioè sistemi di tipo passivo), rispettivamente per:

- studiare la dipendenza della esposizione dal personale di volo in funzione dell'attività solare,
- assicurare la presenza a bordo (di aerei a latitudini diverse) di un sistema adatto per la dosimetria retrospettiva in caso di eruzioni solari di intensità ed energia elevata.

APPENDICE A: SISTEMI DOSIMETRICI

Metodi ed Apparati

Il campo di radiazione alle altitudini dei voli commerciali è estremamente complesso e consiste di radiazioni molto diverse tra loro con energie anche molto elevate.

La valutazione della dose in questi campi di radiazioni può essere effettuata mediante due diversi metodi, quali:

I. Determinazione dettagliata di ciascuna delle componenti del campo di radiazione in termini, per esempio, di energia, fluenza ed angolo di incidenza; uso di coefficienti di conversione appropriati per ogni componente del fascio per ottenere l'equivalente di dose desiderato in termini di MADE, E, H*(10).

II. Valutazione dello spettro delle perdite lineari di energia, LET, delle radiazioni insieme alle dosi assorbite in una quantità microscopica di tessuto, da cui derivare con buona approssimazione l'equivalente di dose (tipicamente in termini di *equivalente di dose ambiente*). Questo approccio sfrutta il concetto radioprotezionistico che, a parità di energia depositata in un volume microscopico (quale il nucleo cellulare ritenuto il bersaglio radiobiologico), radiazioni molto diverse tra loro, ma aventi lo stesso LET, producono lo stesso rischio.

Per quanto riguarda il primo metodo, è necessario utilizzare diversi sistemi di misura per le diverse componenti del fascio. In questo caso si pone il problema che un dato rivelatore, pur misurando in modo accurato un tipo di radiazione, può essere sensibile anche alle altre componenti del fascio. Da questo risulta che la stessa componente del campo di radiazione potrebbe essere misurata (pur con sensibilità diversa) da quasi tutti i rivelatori utilizzati, per cui la dose totale risulterebbe sovrastimata. Negli ultimi anni sono stati fatti sforzi notevoli per ridurre al minimo il numero dei rivelatori necessari per queste misure. Attualmente è possibile utilizzare due sistemi soltanto di rivelazione destinati rispettivamente alla misura della componente neutronica (come per esempio il Linus) e a quella non neutronica (come per esempio la Reuter Stokes, i dosimetri a termoluminescenza, ecc). Anche in questo caso, talune componenti del fascio quali i protoni, i pioni ecc vengono rivelati sia con il Linus che con l'altro sistema utilizzato per la misura della componente non neutronica. Quanto appena detto per il Linus è altrettanto vero per lo Stack ANPA, che, tra l'altro, alle alte energie, è relativamente più sensibile ai protoni che ai neutroni.

L'unico modo di misurare tutte le componenti di un fascio complesso di radiazioni con un solo sistema dosimetrico è offerto dal secondo metodo di valutazione della dose. Come già accennato sopra, questo metodo sfrutta il concetto radioprotezionistico che il rischio dipende, oltre che dalla dose assorbita in un volume microscopico di tessuto, anche dal LET delle radiazioni.

Quest'ultima quantità, LET, si misura in keV/μm. L'unico strumento in grado di misurare la dose assorbita in tessuto ed il LET (anche se soltanto in modo approssimativo) è il TEPC-*Tissue Equivalent Proportional Counter*.

Questo strumento classifica i campi di radiazione, anche complessi, semplicemente in radiazioni a basso LET e radiazioni ad alto LET, cioè radiazioni debolmente o altamente ionizzanti. Il valore del LET tipicamente utilizzato per differenziare le due categorie di radiazione è di 5keV/μm. La scelta di questo valore è spesso critica per una accurata valutazione della dose.

Il concetto di LET come parametro importante per la valutazione del rischio è ritenuto valido in radioprotezione per la maggior parte delle radiazioni sia naturali che artificiali, aventi

trasferimenti lineari di energia fino ad alcune centinaia di keV/ μm (Fuller and Day, 1971). Nel caso di particelle di carica ed energia elevata, il LET aumenta così rapidamente lungo gli ultimi mm del percorso (fino a circa 4000 keV/ μm), da produrre la inattivazione della maggior parte delle cellule che si trovano a distanze microscopiche dalla traccia stessa. In questo caso il parametro più importante per la valutazione dell'effetto biologico non è più il LET ma la distribuzione di energia in funzione della distanza dalla traccia stessa.

I rivelatori di tracce nucleari mediante fogli di plastica sono particolarmente appropriati per la rivelazione di particelle ad alto potere ionizzanti, soprattutto per il fatto che i meccanismi di formazione delle tracce si basano sulle stesse caratteristiche delle radiazioni che ne determinano l'elevata efficacia biologica (Katz et al, 1972; Tommasino et al, 1979). In particolare, la rivelazione di particelle cariche avviene soltanto quando l'energia depositata a distanze microscopiche dalla traccia supera un dato valore di soglia, che è tipico del particolare rivelatore. Tra tutti i rivelatori di tracce quelli più sensibili sono i polimeri organici. Il rivelatore, noto come CR-39 (Columbia Resin, 1939) è sensibile anche a protoni con perdite di energia superiore a circa 5keV/ μm , per cui è stato utilizzato nello Stack-DIAS per la dosimetria dei neutroni, sfruttando il secondo metodo di determinazione della dose. Per quanto riguarda invece lo Stack ANPA, vengono utilizzati rivelatori con diverse soglie di rivelazione per determinare selettivamente le diverse componenti del fascio, adottando così il primo metodo di rivelazione.

LINUS

Il LINUS (Long Interval NeUtron Survey-meter) è un contatore in grado di determinare l'equivalente di dose ambiente dei neutroni in un intervallo di energia che si estende dai termici ai fino a parecchie centinaia di MeV e, probabilmente, anche ad energie maggiori. Lo strumento è stato realizzato modificando opportunamente il moderatore di un rem-counter standard del tipo Andersson-Braun. Più precisamente, il nuovo strumento è stato ottenuto a partire da un contatore cilindrico commerciale, inserendo tra il plastico borato e la parte esterna del moderatore di polietilene una lastra di piombo di 1 cm di spessore. L'effetto della modifica è quello di aumentare l'efficienza di rivelazione dei neutroni di energia maggiore di 10 MeV tramite i neutroni di evaporazione prodotti per scattering inelastico, senza significativi cambiamenti della risposta per energie minori. Una breve storia del contatore con la descrizione dettagliata delle caratteristiche di rivelazione è stata pubblicata di recente (Birattari et al., 1998).

Stack-ANPA.

In passato sono stati sviluppati diversi metodi ed apparati, che sfruttano nuovi fenomeni elettrici ed elettrochimici in isolanti solidi, che facilitano la rivelazione di radiazione altamente ionizzante (Tommasino, 1980).

Tra questi nuovi sistemi di rivelazione, quelli che hanno avuto maggiori sviluppi applicativi nel campo della dosimetria dei neutroni e delle particelle cariche sono i rivelatori di tracce di danno mediante fogli di plastica (Griffith e Tommasino, 1991). Con questi fogli di plastica è possibile ottenere la rivelazione diretta delle particelle cariche o indiretta dei neutroni, cioè attraverso le particelle cariche prodotte dalla interazione dei neutroni con lo stesso materiale del rivelatore oppure con radiatori esterni.

Nello Stack-ANPA, oltre ai rivelatori di tracce, vengono utilizzati rivelatori a bolle di tipo passivo, formati da gocce microscopiche di liquido surriscaldato disperse in una sostanza gelatinosa. Quando i neutroni interagiscono con il liquido di dette gocce o nelle immediate vicinanze, le bolle passano dalla fase liquida alla fase gassosa, per cui diventano facilmente osservabili anche ad occhio nudo (Ing e Birnboim, 1984). Giova a questo punto ricordare che nella indagine nazionale è stato utilizzato anche il rivelatore a bolle con risposta a tempo reale, messo a disposizione dal Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari dell'Università di Pisa. In questo caso le bolle sono disperse in un liquido e la trasformazione da fase liquida a fase gassosa della bolla produce un segnale acustico facilmente rivelabile (Apfel e Roy, 1984).

Quando confrontati con i rivelatori a bolle, i rivelatori di tracce sono meno sensibili. La risposta di questi rivelatori può essere aumentata utilizzando tempi lunghi di esposizione e grandi aree di rivelazione. Superfici di rivelazione di diversi metri quadrati possono essere facilmente realizzate utilizzando centinaia di rivelatori in uno stack avente un'area di 225 cm² e uno spessore inferiore a 10 cm.

La scansione di aree così grandi può essere effettuata in modo relativamente semplice e rapido.

Il principio di rivelazione di tutte le tecniche dello Stack si basa su processi a valanga, indotti da particelle altamente ionizzanti, per cui la zona di danno lungo la traccia, inizialmente di dimensioni atomiche, diventa osservabile a basso ingrandimento ottico o addirittura ad occhio nudo. Pur essendo le suddette tecniche molto diverse tra loro, le procedure di conteggio manuale o automatico sono le stesse per tutti i rivelatori.

La realizzazione di un particolare stack dipende dalle misure che si intendono fare, quali la dosimetria (e/o spettrometria) dei neutroni, la rivelazione di particelle HZE, etc. (Tommasino et al., 1996).

Stack-ANPA per la dosimetria dei neutroni.

Lo stack realizzato all'ANPA per la dosimetria dei neutroni cosmici è composto da rivelatori a bolle per i neutroni di bassa energia e dai rivelatori di tracce di fissione indotte in bismuto per i neutroni di alta energia. Nell'intervallo di energia fino a qualche centinaia di MeV, il rivelatore a fissione con bismuto, è più sensibile ai protoni che ai neutroni, per cui la risposta risulta (per un fatto puramente accidentale) proporzionale all'equivalente di dose (in termini di H*(10) o di MADE) sia per i neutroni che per i protoni (Cross and Tommasino, 1997). Questa differenza di risposta tra i neutroni ed i protoni tende ad annullarsi con l'aumentare dell'energia, in quanto altre reazioni cominciano a prevalere (spallazione e/o frammentazione) rispetto a quella di fissione (Jin et al, 1998).

Stack-ANPA per particelle HZE.

Le misure di particelle HZE sono molte complesse e laboriose, soprattutto per la presenza sulla superficie del rivelatore di una elevata densità di tracce dovute essenzialmente alle interazioni dei neutroni con il materiale del rivelatore. Queste tracce (di lunghezza $\leq 100 \mu\text{m}$) possono essere differenziate da quelle dovute alle particelle HZE caratterizzate da lunghezze $\gg 100 \mu\text{m}$, utilizzando stack di rivelatori di nitrato di cellulosa (noti commercialmente come LR-115 della Kodak).

Dopo l'esposizione, i film sottili sono sviluppati chimicamente e contati con il contatore a scintille (Tommasino et al., 1996). Questa tecnica consente di identificare rapidamente particelle cariche di $Z \geq 10$ con percorsi superiori a centinaia di micron su superfici di

rivelazione molto grandi (Byrne et al, 1995). Per quanto riguarda la misura di particelle di carica $Z \leq 10$ è stato necessario utilizzare lo stack-DIAS (Byrne et al., 1995; O'Sullivan et al., 1999).

Contatore Proporzionale a Tessuto Equivalente-TEPC

Come già accennato sopra, il TEPC è un sistema dosimetrico che sfrutta gli stessi meccanismi di deposizione di energia delle radiazioni, che sono ritenuti importanti per la induzione degli effetti biologici.

In questo sistema dosimetrico viene misurata la energia depositata da singole particelle in quantità microscopiche di materiale a tessuto equivalente, cioè tali da simulare i nuclei delle cellule di mammifero.

Dal rapporto tra l'energia depositata nel volume sensibile e la massa del materiale a tessuto equivalente (relativa a detto volume sensibile) viene determinata l'energia assorbita. Dividendo invece l'energia depositata nel volume sensibile per il percorso medio delle particelle nello stesso volume è possibile ottenere una quantità chiamata la *Lineal Energy*, che si può considerare con buona approssimazione il LET delle particelle cariche.

Dai valori di LET si determinano i fattori di qualità, Q. Il prodotto tra la dose assorbita ed i fattori di qualità determinano l'equivalente di dose.

In pratica il TEPC è un contatore proporzionale costruito con materiale a tessuto equivalente contenente un gas anch'esso a tessuto equivalente ad una pressione di qualche per cento di quella atmosferica. A tale pressione, l'energia depositata da una particella carica che attraversa il gas sarà la stessa di quella depositata in una quantità microscopica di tessuto.

Nella indagine nazionale sono stati utilizzati due TEPC portatili, noti come HANDI (*Homburg Area Neutron Dosemeter*), aventi due diversi volumi sensibili (Kuntz et al., 1992).

Uno dei due TEPC consiste di una sfera cava avente un diametro di circa 5 cm e pareti di 2,5 mm di spessore realizzate con materiali a tessuto equivalenti dalla *Far West Technology-USA*. Questo contatore è protetto da un contenitore di alluminio a tenuta di 2 mm di spessore e riempito con un gas a tessuto equivalente a bassa pressione. La quantità di gas nella sfera è tale da simulare una sfera di tessuto di diametro di 2 μ m.

L'altro contatore è stato sviluppato alla *Universitat des Saarlandes* (Gerdung, 1994) ed è formato da un cilindro di materiale a tessuto equivalente avente una lunghezza ed un diametro entrambi di 8 cm.

Lo spessore delle pareti del cilindro è di 3 mm. Il rivelatore è protetto da un contenitore di acciaio inossidabile di circa 1 mm di spessore. Il volume sensibile del rivelatore (ottenuto come sopra con un gas a tessuto equivalente a bassa pressione) corrisponde ad una quantità di tessuto di circa 2 μ m di diametro. La sensibilità di questo TEPC è due volte più grande di quella del precedente contatore.

Stack-DIAS

Il sistema di rivelazione, Stack DIAS, consiste di fogli di plastica conosciuti commercialmente come CR-39 (O'Sullivan, 1995, O'Sullivan et al., 1999). Grazie alle sue eccellenti proprietà ottiche e meccaniche, questo materiale viene utilizzato, tra l'altro, per gli occhiali e per i finestrini degli aerei.

Tra i tanti rivelatori di plastica esistenti, il CR-39 è il più sensibile e consente di rivelare particelle cariche pesanti con $Z \geq 1$ e radiazioni con LET ≥ 5 keV/ μ m.

Il sistema multiplo di rivelazione, Stack-DIAS, è formato soltanto da CR-39, sia per la misura di particelle HZE che per la dosimetria dei neutroni. Con lo stack-DIAS,

l'equivalente di dose dei neutroni viene calcolato sfruttando il secondo metodo di determinazione della dose descritto sopra, che si basa in particolare sulla misura del numero di particelle cariche prodotte dai neutroni e della loro distribuzione di LET.

La determinazione di queste grandezze viene effettuata attraverso la scansione di rivelatori di CR-39 sviluppati chimicamente, in cui, oltre alla densità superficiale delle tracce, vengono analizzate le caratteristiche delle singole tracce con cui viene determinato il LET relativo. La determinazione del LET riguarda tracce sviluppate chimicamente di lunghezza fino a circa 100 µm, dovute a particelle cariche prodotte dall'interazione dei neutroni con il materiale del rivelatore. Per quanto riguarda le particelle HZE, le tracce sviluppate chimicamente possono avere una lunghezza anche di diversi cm.

La determinazione delle particelle HZE richiede l'osservazione delle tracce su rivelatori diversi (usati in coincidenza) prodotte dalla stessa particella. Dalle caratteristiche delle tracce (appartenenti alla stessa particella HZE) sviluppate chimicamente su rivelatori diversi e dal percorso totale della particella nello stack è possibile determinare la carica e l'energia della particella HZE.

???

APPENDICE B: GRANDEZZE RADIOPROTEZIONISTICHE

Nel D.L.vo. 230/95, i limiti di dose individuali vengono espressi in termini di *equivalente di dose* per esposizione globale e di *equivalente di dose efficace*.

L'equivalente di dose, H, in un certo punto del tessuto non è altro che il prodotto della *dose assorbita*, D, per il *fattore di qualità*, Q, in quel punto:

$$H = Q \times D$$

Il fattore di qualità è un parametro che serve a tener conto della diversa pericolosità dei vari tipi di radiazioni. Per stabilirne i valori si fa tradizionalmente riferimento al LET non ristretto in acqua, L, delle particelle cariche che depositano l'energia. Sebbene le dimensioni dell'equivalente di dose siano le stesse della dose assorbita (J/kg), diverso è il nome delle unità di misura delle due grandezze nel Sistema Internazionale. La dose assorbita si esprime in gray (Gy), l'equivalente di dose in sievert (Sv).

Per ogni fissato campo di radiazione, l'equivalente di dose varia da punto a punto del tessuto irraggiato. Quando si considera il valore massimo prodotto in un fantoccio semplificato (blocco di materiale tessuto equivalente di 30 cm di spessore ed estensione laterale infinita), esposto a un fascio parallelo incidente perpendicolarmente, si suole parlare di *massimo di equivalente di dose o MADE (maximum dose equivalent)*.

L'equivalente di dose efficace, H_E , è definito come la somma degli equivalenti di dose medi ricevuti nei diversi organi e tessuti del corpo umano, H_T , ponderati per mezzo di appropriati fattori di peso, w_T , legati alla radiosensibilità di detti organi o tessuti:

$$H_E = \sum w_T H_T$$

I valori numerici dei w_T assegnati ai vari organi e tessuti sono mostrati nella tab. B1. Essi sono stati ricavati in base al rischio di cancro ad esito fatale e di malformazioni genetiche gravi nelle prime due generazioni, secondo le conoscenze epidemiologiche disponibili nel 1997 (ICRP Publication 26). Anche l'equivalente di dose efficace si esprime in sievert.

TAB. B1 Fattori di peso del tessuto, w_T

Organo o Tessuto	w_T
Gonadi	0.25
Mammella	0.15
Midollo osseo (rosso)	0.12
Polmone	0.12
Superficie ossea	0.03
Tiroide	0.03
Rimanti(*)	0.30

(*) Si devono intendere i 5 organi più irraggiati tra quelli non esplicitamente menzionati, a ciascuno dei quali compete un fattore w_T pari a 0.06.

Nel 1991, l'ICRP ha aggiornato le sue raccomandazioni (ICRP Publication 60), introducendo nuove grandezze per esprimere i limiti di dose individuali. Dette nuove grandezze sono state recepite nella Direttiva Europea del 1996 (Direttiva 96/29/Euratom) e dovranno quindi essere adottate nella normativa nazionale entro il 13 maggio 2000.

In luogo dei fattori di qualità, Q , vengono raccomandati i cosiddetti *fattori di peso della radiazione*, w_R , scelti in base al tipo di radiazione incidente e non già in base al tipo di radiazione presente nel punto di interesse, come avviene per i fattori di qualità. I relativi valori numerici sono mostrati nella tab. B2.

Il passaggio dal *fattore di qualità* al *fattore di peso della radiazione* ha prodotto il parziale abbandono dell'*equivalente di dose*, sostituito con una nuova grandezza, la *dose equivalente* in un organo o tessuto, $H_{T,R}$, pure espressa in Sv:

$$H_{T,R} = w_R \times D_{T,R}$$

dove $D_{T,R}$ è la dose media assorbita nell'organo o tessuto T a causa della radiazione R il cui fattore di peso è w_R .

TAB. B2 Valori del fattore di peso delle radiazioni, w_R

Tipo di radiazione	w_R
Fotoni, tutte le energie	1
Elettroni e muoni, tutte le energie	1
Neutroni, di energia < 10 keV	5
> 10 keV a 100 keV	10

> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protoni, diversi dai protoni di rinculo, di energia > 2 MeV	5
Particelle alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

L'ICRP ha inoltre ritenuto di sostituire il nome dell'*equivalente di dose efficace* con quello più semplice di *dose efficace*. La nuova grandezza, E, viene definita in termini di dose equivalente ai vari organi e tessuti, H_T, come:

$$E = \sum_T w_T \times H_T$$

ovvero, tenendo conto della definizione di dose equivalente sopra data:

$$E = \sum_R w_R \sum_T w_T \times D_{T,R} = \sum_T w_T \sum_R w_R \times D_{T,R}$$

dove appunto H_T è la dose equivalente nell'organo o tessuto T, w_T il fattore di peso del tessuto T e D_{T,R} la dose assorbita media nell'organo o tessuto T dovuta alla radiazione R.

Gli organi considerati esplicitamente nel nuovo indicatore del rischio stocastico sono stati portati da 7 a 13 e i fattori di peso w_T ridefiniti, non soltanto per tener conto dei

nuovi organi esplicitamente considerati, ma anche per includervi gli effetti che erano stati trascurati nella precedente definizione di equivalente di dose efficace. I nuovi valori numerici assegnati ai w_T sono mostrati in tab. B3.

TAB. B3 Fattori di peso del tessuto, w_T, raccomandati nella Pubblicazione 60 dell'ICRP e recepiti nella Direttiva 96/29/Euratom

Organo o tessuto	w _T
Gonadi	0.20
Midollo osseo (rosso)	0.12
Colon	0.12
Polmone	0.12
Stomaco	0.12
Vescica	0.05
Mammella	0.05
Fegato	0.05
Esofago	0.05
Tiroide	0.05

Pelle	0.01
Superficie ossea	0.01
Rimanti(*)	0.05

(*) Trattasi di 10 organi specificati nelle Pubblicazioni ICRP, a ciascuno dei quali compete un fattore W_T pari a 0.005.

L'equivalente di dose efficace e la dose efficace non sono evidentemente grandezze misurabili. Su suggerimento dell'ICRU, per scopi di monitoraggio, sono state pertanto introdotte delle grandezze, cosiddette operative, la cui misura dovrebbe fornire una valutazione prudente delle grandezze limiti. Per quanto di interesse in questa sede, la grandezza operativa da considerare è l'*equivalente di dose ambiente (ambient dose equivalent)*, $H^*(d)$. Essa è definita come l'equivalente di dose che sarebbe prodotto dal campo allineato ed espanso corrispondente al campo reale alla profondità d in un particolare fantoccio semplificato, la sfera ICRU, sul raggio opposto alla direzione del campo unidirezionale. Anche l'equivalente di dose ambiente viene espresso in sievert. La profondità d raccomandata per le radiazioni penetranti è 10 mm, e la grandezza viene allora denotata con il simbolo $H^*(10)$. Si deve peraltro tener conto che la stessa ICRP ha ipotizzato che l' $H^*(10)$ possa non essere una prudente misura della dose efficace per il campo di radiazione presente nelle cabine degli aerei che volano ad alta quota (cfr. paragrafi 330 e 357 della Pubblicazione 74).

BIBLIOGRAFIA

Allkofer O.C. e Heinrich W. Measurements of cosmic ray heavy nuclei at supersonic transport altitudes and their dosimetric significance. *Health Physics* 27, 543-551 (1974).

Apfel R.E., and Roy S.C. (1984) Investigation on the applicability of superheated drop detectors in neutron dosimetry. *Nucl. Instr. and Method* 219, 582-587 (1984)

Bartlett D.T. et al. (1997). Dosimetry for occupational exposure to cosmic radiation. *Radiation Protection Dosimetry*. 70, 395-404 (1997).

Birattari C., Esposito A., Ferrari A., Pelliccioni M., Rancati T., and Silari M. The extended range neutron rem counter *Linus*. Overview and latest developments. *Rad. Prot. Dos.*, 76, 135-148, 1998.

Byrne J., O'Sullivan D., Tommasino L., and Zhou D. A new method for the rapid evaluation of $Z \geq 1$ cosmic ray particles-Results from a balloon borne experiment. *Radiation Measurements* 25, 471-474 (1995).

Cross W.G. and Tommasino L. Dosimetry of high energy neutrons and protons by ^{209}Bi fission. *Rad. Prot. Dos.* 70, 419-424 (1997).

Curtis S.B. Effects of low and high LET radiation on neoplastic transformation in cells and the importance of single track effects in space. In *Terrestrial Space Radiation and its Biological Effects*. NATO ASI Series A: Life Sciences Vol. 154 pp 153-161 Editors: P.C. McCormack, C.E. Swenberg, and H. Bucker (1987)

D.L.vo 230/95. -Attuazione delle Direttive Euratom 80/836, 84/466, 89/618, 90/64 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti. Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n°230 pubblicato sul Suppl. ord. G.U. n°136 del 13/6/95.

Direttiva 96/29/EURATOM. Direttiva del Consiglio del 13 maggio 1996, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti. *Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee*. L159 Vol. 39, 29 giugno 1996.

Fassò F., Ferrari A., Ranft J., and Sala P.R. New developments in FLUKA modelling of hadronic and EM interactions. Proc. of the 3rd Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environment, SARE 3, KEK-Tsukuba, May 7-9, 1997, H. Hirayama ed., KEK Report 97-5, p.32 (1997).

Ferrari A., and Pelliccioni M. On the conversion coefficients from fluence to ambient dose equivalent. *Rad. Prot. Dosim.* 51 (4), 251-255 (1994).

Ferrari A., and Sala P.R. Intermediate and high energy models in FLUKA. Improvements, benchmarks and applications. Proc. of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, NDST-97, ICTP, Trieste, Italy, May 19-24, 1997, published by the Italian Physical Society- Conference Proceedings G. Reffo, A. Ventura and G. Grandi eds. ISBN 88-7794-114-4, Bologna Part 1, p 247 (1997).

Ferrari, A., Pelliccioni M. and Pillon M. Fluence to effective dose conversion coefficients for neutrons up to 10 TeV. *Rad. Prot. Dos.* 71 (3) , 165-173 (1997).

Fraser G., Lillestol E., and Sellevag I. *The search for infinity*. Mitchell Bearly. Reed International Books Ltd, London (1994).

Friedberg W., Copeland K., Duke F.E., O'Brien K., Darlen Jr E.B. Guidelines and technical information provided by the U.S. Federal Aviation Administration to promote radiation safety for air carrier crew member.

Paper presented at the International Conference on Cosmic Radiation and Aircrew Exposure. July 1-3, 1998 Dublin-Ireland.

Fukui K., and Young P.S. Evaluation of the density of cosmic ray ends in human tissue from solar minimum to maximum at the level of SST flight. In the Proceedings of the International Congress on Protection against Accelerator and Space Radiation. CERN, Geneva, Switzerland, April 26-30, p. 557-572 (1971)

Fuller E.W., and Day B. Radiological protection in SST aircraft. In the Proceedings of the International Congress on Protection against Accelerator and Space Radiation. CERN, Geneva, Switzerland, April 26-30, pp 524-556(1971)

Gerdung S., Freyermuth M., Grillmaier, R.E., Pihet P., and Segur P. Entwicklung eines gewebeäquivalenten niederdruck proportionalzählers für den Einsatz in Strahlenschutz. Karlsruhe vom 20-26 May 1994, S 573-577

Griffith R.V. and Tommasino L. Etch Track Detectors in Radiation Dosimetry in The Dosimetry of Ionizing Radiations. Vol. III pp323-426.
(K.Kase, B.B. Bjangard, and F.H. Attix, Editors) Academic Press, New York (1991).

Hess W.N., Patterson, H.W., and Wallace R. Cosmic ray neutron energy spectrum. Physical Review, 116 (2), 445-460 (1959).

Katz R., Sharma S.C., and Homayoofoor, M. The structure of particle tracks. In Topics in radiation dosimetry (F.H. Attix ed.) Suppl. 1, pp 317-400. Academic Press, New York (1972).

Kunz, A., Arend E., Dietz E., Gerdung S, Grillmaier R. E., Lim T., Pihet P.
The Homburg Area Neutron dosimeter HANDI: Characteristics and optimization of the operational instrument. Rad. Prot. Dosim. 44 (1-4), 213-218 (1992)

ICRP-60. International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 1991: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 60, Oxford: Pergamon Press(1991).

Ing H., and Birboim H.C. A bubble damage polymer detector for neutrons. Nucl. Tracks Rad. Meas. 8, 285 (1984).

Jin H., Cavaioli M., Hajdas V., Prokofiev A.V., Smirnov A.N., and Tommasino L. Bi-fission detectors for high energy nucleons: II Proton and neutron responses. 19th Int. Conference on Nuclear Tracks in Solids. Aug. 31-Spt. 4 1998. Besancon, France; accepted for publication in the Journal Radiation Measurements.

Mc-Aulay et al. Exposure of air crew to cosmic radiation. European commission-Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection. Radiat. Prot. 85 (1996)

Menzel H.G. Round Table Discussion of the Workshop on Cosmic Ray Exposure, held at Luxembourg June 25-27, 1991, published in Rad. Prot. Dos., 48, 138-139 (1993).

Nguyen,V.D., Lebaron-Jacobs, L., Bouisset P., Kerlau G., Itie C., Montagne C., Pelet D., and Lebuissou M.C. Real time determination of the quality factor and dose equivalent of cosmic radiation aboard French airlines. Paper presented to the 40th Int. Congress of Aviation and Space Medicine, 5-9 October 1992, Tokyo, Giappone (1992).

O'Brien K., Friedberg W., Satter H.H., Smart,D.F., Atmospheric cosmic rays and solar energetic particles at aircraft altitudes. Environment International 22 (suppl. 1): S 9-44 (1996).

O'Sullivan. Some results from the investigation of cosmic rays using SSNTD at Dublin. *Rad. Meas.* 25, 295-300 (1995)

O'Sullivan D., Zhou D., Heinrich W., Roesler S., Donnelly J., Keegan R., Flood E., and Tommasino L. Cosmic rays and dosimetry at aviation altitudes. Accepted for publication in *Radiation Measurements*, 1999.

Patterson, H.W., Hess, W.N., Moyer B.J., and Wallace, R.W. The flux and spectrum of cosmic-ray produced neutrons as a function of altitude. *Health physics* 2, 69 (1959).

Pelliccioni M., Conversion coefficients for high-energy radiation. SATIF-3, Tohoku University, Sendai, Japan, 12-13 May 1997. *OECD Proceedings*, 289-298 (1998a).

Pelliccioni M. Radiation weighting factors and conversion coefficients for high-energy radiation. Paper presented at SATIF 4, Knoxville 17-18, (1998b).

Reitz G. Radiation environment in the stratosphere. *Radiation Protection Dosimetry* 48, 5-20 (1993).

Todd P.W., and Walker J.T. The microlesion concept in HZE particle dosimetry. *Adv. Space Res.* 4, 187-197 (1984).

Tommasino L. Solid dielectric detectors with breakdown phenomena and their applications in radioprotection. *Nuclear Instruments and Methods* 173, 73-83 (1980).

Tommasino L., Whitmore, C.F., and Silini G. A new approach to the analysis of survival data. *Rad. Res.* 77, 129 (1979).

Tommasino L., Caggiati F., Cavaoli M., Notaro M., Teodori R., Torri G., and Zhou D. Passive multidetector stack for the assessment of aircrew exposure. *Environment International* 22, S:115-119 (1996).

Wilson J. W., Nearly J.E., Cucinotta F.A., Shim J.L., Hajnal F., Reginotto, M., Goldhagen, P. Radiation safety aspects of commercial high-speed flight transportation. *NASA Technical Paper* 3524 (1995).