

Introduzione

CENNI DI DOSIMETRIA

I processi di ionizzazione degli atomi e delle molecole associati al passaggio delle radiazioni ionizzanti nella materia, sono all'origine degli effetti indotti osservati nei mezzi attraversati. Nel caso dell'organismo umano, il trasferimento di energia dalle particelle ionizzanti ai vari tessuti e organi irradiati può concludersi con la manifestazione di un certo effetto biologico, nella strumentazione il danno può manifestarsi a livello di malfunzionamento dell'elettronica.

Quando si è interessati a conoscere le deposizioni di energia in una ben precisa regione intorno alla traccia delle particelle incidenti si fa ricorso al LET, acronimo di Linear Energy Transfer, il cui simbolo è L_{Δ} , che è definito come:

$$L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\Delta}$$

dove dE rappresenta l'energia ceduta localmente per collisioni da una particella carica lungo un segmento di traccia dl , considerando solo le collisioni che comportano un trasferimento di energia minore di L_{Δ} . Il LET si esprime abitualmente in $\text{keV}\mu\text{m}^{-1}$. Se si prendono in considerazione tutte le perdite di energia si ottiene per il LET, che in questo caso si indica con L_{∞} , lo stesso valore numerico del potere frenante. Con riferimento al LET_{∞} , si usa distinguere particelle ad alto LET e particelle a basso LET; il confine tra le due categorie si situa intorno ai 30 - 50 $\text{keV}\mu\text{m}^{-1}$. In linea di massima si può affermare che gli elettroni sono a basso LET, mentre i protoni, i neutroni e le alfa ad ancor più i nuclei pesanti (HZE) sono usualmente ad alto LET.

La ionizzazione degli atomi provocata dalle perdite di energia delle radiazioni all'interno di una cellula vivente può avere effetti profondi sulla chimica e di conseguenza sulla futura attività della cellula.

Il bersaglio principale dell'irradiazione di cellule viventi è il DNA, molti degli effetti acuti osservati negli organismi sono dovuti alla morte delle cellule quando cercano di riprodursi. Non appena si ha un'anomalia nel DNA, vengono messi in moto meccanismi per la sua riparazione; nel caso in cui essa sia effettuata in maniera errata il DNA si modifica, con conseguenti danni biologici di varia entità.

Allo scopo di assicurare la protezione degli individui esposti, della loro progenie e del genere umano nel suo insieme, dagli eventuali danni che potrebbero derivare dallo svolgimento delle attività con rischio da radiazioni ionizzanti, si è andata sviluppando, parallelamente all'uso delle tecnologie nucleari, una nuova disciplina: la radioprotezione.

Ci sono tre tipi di grandezze definite specificamente per l'uso in radioprotezione:

grandezze fisiche, esse sono direttamente misurabili, caratterizzano il campo di radiazione e danno un'indicazione della dose assorbita;

- grandezze radioprotezionistiche, definite dall'ICRP, non sono direttamente misurabili, servono a tenere conto dei diversi tipi di radiazione su un medesimo tessuto e delle diverse risposte dei vari organi su cui incide la radiazione;
- grandezze operative, sono definite dall'ICRU, per il monitoraggio ambientale e personale. Queste grandezze danno una stima delle quantità dosimetriche.

Grandezze fisiche

Alle grandezze che caratterizzano il campo di radiazione si aggiungono le cosiddette grandezze dosimetriche che godono della proprietà di potersi esprimere come prodotto di una grandezza di campo per una costante caratteristica del mezzo coinvolto (coefficiente di interazione).

Fluenza di particelle. Si definisce fluenza di particelle in un certo punto di un mezzo materiale, e si indica con il simbolo Φ , la quantità:

$$\Phi = \frac{dN}{dA}$$

dove dN rappresenta il numero di particelle incidenti su una sfera di sezione massima da avere centro nel punto considerato.

La fluena di particelle si esprime nel Sistema Internazionale delle unità di misura (SI) in m^{-2} .

Energia impartita. L'energia impartita ε in un certo volume di mezzo irradiato dalle particelle ionizzanti che lo attraversano è definita dalla seguente relazione:

$$\varepsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

dove R_{in} rappresenta l'energia radiante incidente nel volume, cioè la somma delle energie (escluse quelle di massa) di tutte le particelle, direttamente o indirettamente ionizzanti, che entrano nel volume considerato; R_{out} è l'energia radiante uscente dallo stesso volume, cioè la somma delle energie (escluse quelle di massa) di tutte le particelle, direttamente o indirettamente ionizzanti, che lasciano il volume, $\sum Q$, infine, è la somma di tutti i cambiamenti nelle energie di massa di riposo dei nuclei e delle particelle elementari in tutte le interazioni che avvengono nel volume. L'unità di misura è il joule. Si tratta di una grandezza stocastica, il cui valore atteso ε , detto energia media impartita, è collegato alla più importante delle grandezze dosimetriche la dose assorbita D .

Dose assorbita D . Si definisce dose assorbita la seguente quantità:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

$d\bar{\varepsilon}$, come anticipato è l'energia media impartita nel volume elementare di massa dm ; l'unità di misura è il gray (Gy) nel S.I. ($1\text{Gy} = 1\text{Jkg}^{-1}$).

La valutazione di $d\bar{\varepsilon}$, in linea di principio, richiede ripetute esposizioni di elementi finiti di massa nel campo di radiazione interessato, con relativa operazione di media dei valori ε misurati.

Grandezze radioprotezionistiche

Nessuna delle grandezze fisiche presentate è per sua natura idonea ad interpretare in modo completo gli effetti provocati dal trasferimento di energia dalle radiazioni ionizzanti alla materia vivente. La dose assorbita, ad esempio, non consente di tener conto della diversità degli effetti biologici indotti da radiazioni di differente qualità.

A tal proposito si parla di efficacia biologica relativa (RBE) di ciascun tipo radiazione. Si definisce efficacia biologica relativa di un certo tipo di radiazione B, rispetto ad una radiazione di riferimento A, per un determinato effetto biologico di probabilità p il rapporto:

$$R_B(p) = \frac{D_A(p)}{D_B(p)}$$

dove D_A e D_B , rispettivamente per le radiazioni A e B, sono le dosi assorbite necessarie per provocare il livello di probabilità p per l'effetto considerato.

Di norma, si assume come radiazione di riferimento quella elettromagnetica, la cui RBE è posta per definizione uguale all'unità per tutti gli effetti indotti.

A parità di dose assorbita e di qualità della radiazione incidente, il danno biologico può essere diverso a seconda del tipo di tessuto irradiato. Quindi, è lecito affermare che ciascun tipo di radiazione è caratterizzata da una sua propria "pericolosità" biologica; viceversa ciascun tessuto (o organo umano) è caratterizzato da una propria suscettibilità alle radiazioni.

Si può affermare che le grandezze radioprotezionistiche siano quantità dosimetriche specificate nel corpo umano dall'ICRP, nel tentativo di quantificare attraverso opportuni coefficienti, seppur in modo empirico, i rischi di esposizione ai diversi tipi di radiazioni ionizzanti; tali grandezze rivestono, quindi, più carattere biologico che fisico. Inoltre i coefficienti, precedentemente menzionati, sono naturalmente destinati a cambiare, man mano che progredisce la conoscenza degli effetti biologici da considerare e nel peso da attribuire a ciascuno di essi. Le grandezze radioprotezionistiche specificate dall'ultima pubblicazione dell'ICRP (ICRP 74) sono:

1. La dose equivalente H_T in un tessuto o un organo:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

l'unità di misura è il sievert ($1\text{Sv} = 1\text{Jkg}^{-1}$), utilizzato per evitare pericolose confusioni tra H e D. Con $D_{T,R}$ si indica la dose assorbita, mediata su uno specifico organo o tessuto T, dovuta alla radiazione R e si definisce come:

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_m D dm$$

dove m_T è la massa del tessuto o organo T considerato e D è la dose assorbita nell'elemento di massa dm, l'unità di misura è il Gy.

Il fattore peso della radiazione w_R serve per rivalutare la dose assorbita agli organi in base alla RBE dei diversi tipi di radiazione (valori di RBE più elevati per neutroni e particelle ad alto LET, se confrontati con quelli delle particelle a basso LET).

La tabella sotto fornisce i valori di w_R come raccomandati dall'ICRP60 è da **notare come per i neutroni e gli ioni pesanti il fattore di danno biologico sia il più elevato (pari a 20).**

Tipo di radiazione e intervalli energetici	Fattori di peso della radiazione, w_R
Fotoni, tutte le energie	1
Elettroni, tutte le energie	1
Muoni, tutte le energie	1
Neutroni, energie:	
<10 keV	5
10 - 100 keV	10
100 keV - 2 MeV	20
2 - 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protoni, non di rinculo con energia < 2 MeV	5
Particelle alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

2. La *dose efficace* E si ottiene dall'espressione:

$$E = \sum_T w_T H_T$$

essa equivale alla somma delle dosi equivalenti H_T , relative a tutti gli organi o tessuti del corpo, pesate sui tessuti dal fattore di ponderazione w_T .

Il fattore peso del tessuto w_T , tiene conto della diversità del danno stocastico relativo, risultante dall'esposizione di differenti tessuti od organi ad una identica dose equivalente. Nella tabella seguente sono riportati i valori numerici di w_T per i diversi organi e tessuti. Nel calcolo l'ICRP ha preso in considerazione non solo i tumori ad esito fatale e le malformazioni gravi, ma anche i tumori fatali e la perdita relativa di vita media. I fattori relativi a questi effetti vengono poi moltiplicati tra loro e normalizzati ad uno per fornire la base del calcolo dei fattori di ponderazione.

Organi o tessuti	Fattori di peso dei tessuti, 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 organi e tessuti	0.05

Grandezze operative

La dose assorbita agli organi $D_{T,R}$ non può essere, in genere, valutata sperimentalmente, quindi le quantità H_T ed E non possono essere direttamente misurate. Per questo motivo l'ICRU ha definito un altro set di grandezze, dette operative, che si distinguono per le seguenti caratteristiche:

possibilità di essere misurate direttamente, o di essere ricavate dalle risposte degli strumenti;

a partire dalla loro misura, possibilità di ottenere una stima conservativa di quantità radioprotezionistiche e/o fisiche, ossia una stima che non sottovaluti in nessun caso l'entità reale della quantità radioprotezionistica o fisica;

contemporaneamente, capacità di evitare eccessive sovrastime delle grandezze radioprotezionistiche e fisiche.

Le grandezze operative abitualmente usate sono:

Equivalente di dose ambientale, $H^*(d)$,

Equivalente di dose personale, $H_p(d)$.

Programma scientifico

L'impatto degli effetti da radiazione sta aumentando criticamente con l'avvento di nuove tecnologie nell'aerospazio ed in settori militari e commerciali. L'incremento dell'uso di **strumentazioni** di alta precisione nell'ambito delle missioni spaziali ha aumentato la suscettibilità dei sistemi al danno da radiazione. E' perciò importante proteggere in modo efficiente gli strumenti impiegati nelle missioni spaziali, in modo da evitare la perdita di grandi quantità di dati, come avviene tuttora.

I raggi cosmici sono inoltre altamente pericolosi per gli **astronauti**: l'esposizione prolungata a radiazioni è in grado di provocare danni biologici di forte entità, come diversi tipi di cancro. Un altro fattore di rischio riguarda profonde alterazioni genetiche, che possono anche essere trasmesse ai discendenti degli astronauti. Il danneggiamento diretto dovuto alla radiazione può avere effetto già a breve termine: eritemi, insorgenza di cataratte e gravi danni a livello del sistema nervoso centrale sono solo alcuni esempi. Un recente settore di ricerca, la **dosimetria della radiazione spaziale**, si occupa della protezione degli strumenti e degli astronauti durante la loro permanenza nello spazio. Attualmente, possediamo soltanto una quantità relativamente piccola di dati sperimentali, costituiti da misure compiute a bordo delle missioni lunari Apollo, della quantità di radiazione incidente sull'equipaggio al di fuori della magnetosfera terrestre. Per questo motivo, negli studi preliminari di dosimetria per le missioni spaziali **ESA** e **NASA** le stime di radiazione assorbita dall'equipaggio e dalla strumentazione sono attualmente basate su modelli di simulazione

al calcolatore. Modelli che garantiscono comunque un alto livello di affidabilità e vengono usati in diversi altri ambiti di ricerca, come la fisica sanitaria. Il programma del progetto consiste nella messa a punto di un sistema di rilevazione per la radiazione ad alto LET da utilizzarsi in ambito aerospaziale.

Panoramica sull'esposizione in attività spaziali

Il campo di radiazione cosmica raggiunge difficilmente la Terra, ma diventa un fattore determinante per quanto riguarda l'esposizione a radiazioni ionizzanti degli equipaggi impegnati in missioni nello spazio e della strumentazione di bordo.

Nell'ICPR Publication 60 è stata pubblicata una classificazione delle soglie in dose relative alle diverse categorie di soggetti esposti a rischio di radiazione e delle precauzioni da adottare in ambito radioprotezionistico.

Soggetti	Soglie di esposizione (mSv/anno)	Valutazioni dosimetriche
Popolazione	≤ 1	no
Lavoratori esposti: Categoria A	≤ 100 in 5 anni di cui 50 max in un anno	valutazione sistematica della dose individuale
Categoria B	≤ 6	sorveglianza fisica dell'ambiente di lavoro

Le tabelle successive illustrano le dosi abitualmente ricevute da alcuni tipi di lavoratori esposti e le dosi assorbite durante alcune missioni nello spazio.

Occupazione	Esposizione annua (mSv/anno)
Addetti centrali nucleari	4.76
Tecnici radiografia industriale	3.34
Personale reparti medicina nucleare	1.22
Piloti ed assistenti di volo	1-5

Programma	Quota media in km	Membri equipaggio	Dose rate (mSv/giorno)	Dose totale
Apollo		33	1.3 (3.9 max)	12.2 (33 max)
Skylab	381 (435 max)	9	1.2 (2.1 max)	72 (170 max)
MIR	341 (355 max)	4	0.72 (1.0 max)	100 (140 max)
ISS	360 (450 max)	280	0.5 (1.0 max)	80(180 max)
Mars		4 (8 max)	1.5 (2.0 max)	400 (1200 max)

Livelli di radiazione misurata o stimata nelle missioni spaziali (i valori massimi sono riportati nella parentesi).

Ref.: M. Durante "Radiation protection in space", La Rivista del Nuovo Cimento, 25-4-8 (2002).

Gli elevati ratei di dose stimati per le missioni spaziali rispetto i valori abituali sottolineano l'importanza di una corretta stima della dose in questo tipo di esposizioni.

L'ambiente di radiazione spaziale

Gli effetti radiativi più importanti per ciò che riguarda la protezione di strumentazioni ed astronauti sono inquadrabili in tre categorie:

- dose totale ed effetti di degenerazione
- effetti da evento singolo (SEE)

-displacement damage (traducibile con “danno da spostamento”).

Protoni ed elettroni confinati e protoni da evento solare (come i brillamenti) sono i primi responsabili della dose totale; inoltre, quando gli elettroni sono rallentati, la loro interazione con gli orbitali degli atomi che compongono il materiale di shielding producono una radiazione secondaria di fotoni, la bremsstrahlung, che contribuisce anche essa alla dose totale.

Gli SEE sono indotti invece da singole collisioni di particelle con le componenti sensibili degli apparati elettronici. E' quindi evidente che costituiscono una gravissima minaccia all' efficienza degli strumenti ed alla salute degli astronauti.

Le principali cause degli SEE sono i raggi cosmici galattici (GCR): particelle da eventi solari, protoni confinati e neutroni secondari.

Il displacement damage è non-ionizzante, cumulativo ed a lungo termine; esso è dovuto a protoni solari ed a neutroni.

Per meglio chiarire i concetti espressi in precedenza, è ora indispensabile inserire una ulteriore classificazione all' interno della nostra descrizione. Infatti, l' ambiente naturale di radiazione è costituito da due categorie di particelle: libere e confinate.

Le particelle libere hanno origine all' esterno dei confini del campo magnetico terrestre (la magnetosfera), mentre quelle confinate si trovano al suo interno.

Le particelle libere si distinguono a loro volta in due gruppi: i raggi cosmici galattici ed i solar particle events, o SPE (traducibili con “eventi da particella solare”).

I raggi cosmici galattici (GCR) sono generati al di fuori del nostro sistema solare, ma comunque entro i confini della nostra galassia. Viaggiando al suo interno, essi vengono gradualmente privati dei loro elettroni e perciò completamente ionizzati. Essendo caratterizzati da un' alta energia, sono molto penetranti: attraversano lo shielding dei veicoli spaziali e colpiscono le regioni sensibili nelle apparecchiature, causando gli SEE.

L' effetto del campo magnetico terrestre è di deflettere alcuni GCR che entrano nella magnetosfera, in modo tale che maggiore sono l' inclinazione e l' altitudine del veicolo spaziale, più alta è la sua suscettibilità per le particelle libere. Questo significa che una navetta che viaggia negli alti strati dell' atmosfera percorrendo una traiettoria molto inclinata, assorbirà una dose importante ed altamente pericolosa di GCR.

I solar particle events (SPE) sono dovuti invece a protoni solari ed a ioni pesanti, originati in seguito a brillamenti solari, e contribuiscono agli effetti della dose totale, al displacement damage ed agli SEE. L' influenza di questi ultimi su strumenti ed umani è superiore a quella dei GCR per diversi ordini di grandezza, il che rende gli SEE particolarmente pericolosi, rendendo necessario un loro studio approfondito.

Le particelle confinate si dividono invece in tre gruppi: protoni energetici, elettroni energetici e ioni pesanti. Gli ioni pesanti confinati non costituiscono un problema per la elettronica perché quando raggiungono l' atmosfera hanno raggiunto ormai una bassa energia, e trovano quindi impossibile penetrare lo shielding dei veicoli spaziali. Al contrario, sia i protoni energetici che gli elettroni energetici sono un rischio potenziale sia in termini di dose totale che di degenerazione. Inoltre, i protoni confinati producono, in alcuni dispositivi, anche gli SEE, componenti molto pericolose della radiazione atmosferica.

Le particelle confinate comprendono le fasce di radiazione magnetiche della Terra, note come le fasce di Van Allen. Esse sono divise in tre regioni concentriche: quella interna, quella esterna e la “slot region”. I protoni energetici, con un range di energie tra 40 keV e 500 MeV, sono i componenti della fascia interna da considerare per primi quando si prendono in esame gli effetti radiativi sui chip.

Ambiente di radiazione LEO

LEO è l' acronimo di Low Earth Orbit: indica l' ambiente atmosferico compreso tra circa 350 e 2000 Km di altitudine, in cui transitano navicelle spaziali, il cui periodo orbitale tipico è di 90 minuti, ed in cui stazionano i satelliti per telecomunicazioni a banda larga ed internet.

Per quanto visto in precedenza, la natura estremamente complessa dei campi di radiazione incontrati nella LEO e nello spazio interplanetario rappresenta una delle maggiori sfide nella disciplina della protezione dalle radiazioni.

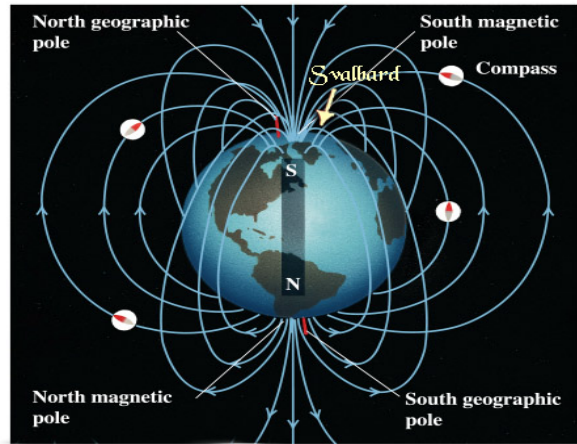
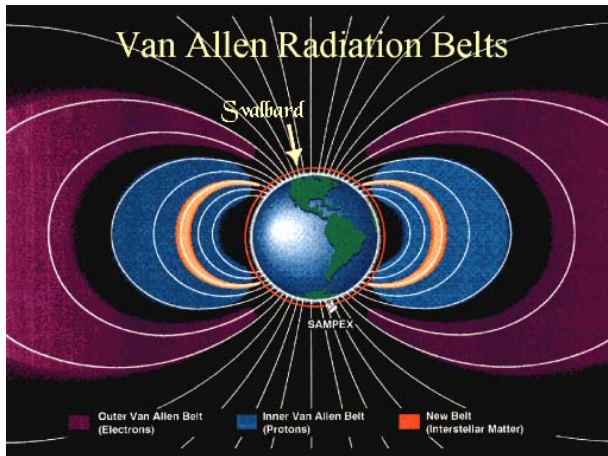
Le misurazioni compiute a bordo della stazione spaziale MIR hanno sottolineato sia la importanza della produzione di particelle secondarie all' interno delle navette spaziali (le SEE), che l' effetto dello shielding sulla dose dell' equipaggio e sulla dose equivalente (i.e. la dose assorbita media in un tessuto o in organo, ponderata in base al tipo ed alla qualità della radiazione). Un esempio è dato dalla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), che orbita a 370 km di altezza con un periodo orbitale di 93 minuti: la sua dose dovrebbe essere costituita per circa la metà da protoni confinati e per metà da raggi cosmici galattici (GCR).

Le navette LEO sono fortemente dipendenti dalla radiazione nelle fasce di Van Allen, ed è principalmente la SAA (Anomalia del Sud Atlantico) che costituisce il più alto rischio per gli umani. La SAA è una regione ad alta radiazione, originata dall' estensione nella atmosfera delle fasce di protoni confinati. La maggior parte dei voli transita tipicamente in una porzione della SAA durante 6 o 7 orbite consecutive ogni giorno, con il risultato che l' Anomalia del Sud Atlantico è la prima causa di esposizione da radiazione per lo shuttle. In effetti, misure eseguite a bordo della MIR e della stazione americana Skylab durante il passaggio in questa zona mostrano che il livello di radiazione è aumentato dalle 6 alle 10 volte.

Per quanto riguarda invece l' influenza del Sole sull' ambiente LEO, essa dipende in massima parte dai brillamenti solari, eventi molto brevi che risultano nell' emissione di elettroni altamente energetici, protoni e ioni pesanti dal Sole. Quando questi si verificano, l' attività dell' astro aumenta sensibilmente e si registra un forte aumento di particolari onde radio, di raggi gamma e di raggi X. Questi periodi, che si verificano all' incirca ogni 11 anni, sono associati anche ad un aumento di SPE (i "solar particle events" definiti precedentemente).

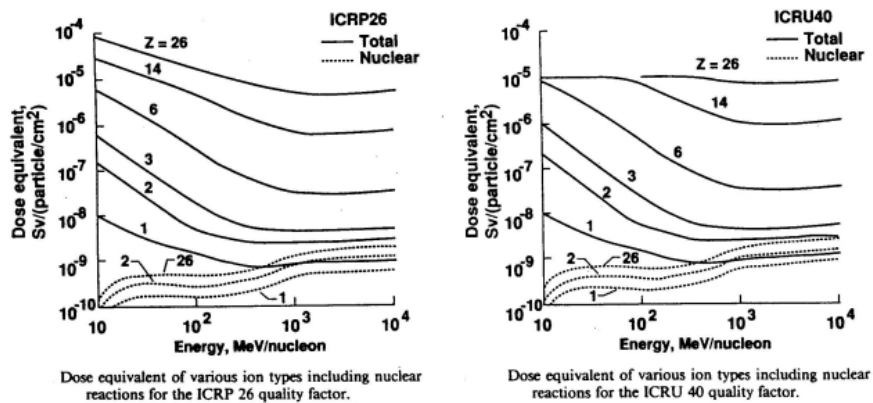
La maggior parte delle particelle cariche non riuscirà a raggiungere direttamente la LEO, perché sono affette dal campo geomagnetico; tuttavia, i flussi generici nella fascia di radiazione possono aumentare durante questi eventi, e particelle secondarie (ad esempio neutroni) prodotti dall' interazione fra le particelle in arrivo e le molecole nell' atmosfera possono portare ad un aumento generale della radiazione totale.

Anche i raggi cosmici galattici (GCR) interessano le navette LEO: i GCR costituiscono un flusso continuo di particelle ad alta energia, anticorrelato al ciclo di brillamenti solari. Questo avviene perché il vento solare, la cui intensità è maggiore durante l' apice del ciclo della stella, tende ad esercitare una pressione che contrasta i GCR, riducendone così il flusso. Le particelle massive ad alta energia (HZE) dei GCR possono penetrare nella atmosfera in profondità, anche fino al suolo, ma in questo caso le energie d' impatto diventano molto basse. L' effetto principale è la produzione di particelle secondarie (protoni, neutroni, elettroni e ioni pesanti) nell' interazione fra HZE ed atmosfera, ed il problema consiste nei neutroni prodotti, che possono raggiungere livelli energetici di alcune centinaia di MeV, risultando quindi altamente pericolosi per le navette spaziali.



HZE

Gran parte della dose totale in quota è dovuta agli ioni pesanti o HZE, in particolare sono i nuclei più pesanti ($Z \geq 10$) che pongono i problemi più complessi dal punto di vista protezionistico, soprattutto per quel che riguarda i nuclei del gruppo del ferro che contribuiscono per il 50% alla dose totale di queste particelle. 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 con 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 millimetri della traccia stessa. Per questo motivo i fattori di conversione flusso-dose per questo tipo di particelle sono molto elevati, come si può osservare dalla figura qui di seguito.



Fattori di qualità per ioni pesanti secondo ICRP 26 e ICRU 40

I modelli esistenti per la valutazione del flusso di particelle HZE a diverse altitudini sono poco accurati per la scarsità di dati sulle interazioni di queste particelle con l'atmosfera, ma da un lavoro effettuato da ricercatori della NASA (W. Wilson, Cucinotta "Overview of Radiation Environments and Human Exposures") si può concludere che il contributo alla dose totale degli ioni pesanti comincia ad essere rilevante ad altezze di circa 24 km per diventare dominante a 30 km.

Component	60 000 ft	70 000 ft	80 000 ft	100 000 ft
\dot{D} , $\mu\text{Gy}\cdot\text{hr}^{-1}$	5.9-7.8	6.9-9.1	7.4-9.7	7.4-9.8
$(Q_i - 1)\dot{D}_i$:				
Subnuclear, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 0.01	≈ 0.01	≈ 0.01	
Neutrons, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	4.5-18.0	5.0-20.0	5.1-20.2	2.1-8.4
$Z = 1$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 1.5	≈ 1.8	≈ 2.0	≈ 2.5
$Z = 2$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 2.4	≈ 2.6	≈ 2.8	≈ 3.1
$Z > 2$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	0.2-0.6	0.6-1.7	1.3-3.8	9.6-12.7
H , $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	14.5-30.3	16.9-35.2	18.6-38.5	24.7-36.5

Il danno alla strumentazione

In nessun sistema spaziale gli effetti derivanti dalla radiazione possono essere trascurati, tali effetti possono limitare enormemente la durata di una missione spaziale provocando la degradazione della strumentazione e in casi estremi risolversi nel fallimento della stessa. Altri effetti meno catastrofici ma non per questo trascurabili sono la creazione di interferenze nella strumentazione e quindi un degrado dell'efficienza della missione. Per poter fare una valutazione degli effetti di radiazione sono necessari dei test, sia per confermare la compatibilità dei componenti con l'ambiente in cui operano e per fornire analisi quantitative degli effetti di radiazione. Anche se in alcuni casi si hanno nella letteratura informazioni in merito agli effetti di radiazione su determinati componenti tali informazioni devono essere usate con molta cautela poiché verificare che tali dati siano adattabili alle componenti utilizzate non è semplice.

I meccanismi con cui la radiazione produce effetti sulla strumentazione sono principalmente tre:

1. TOTAL IONISED DOSE (TID)
2. NOT-IONISING ENERGY LOSS (NIEL)
3. SINGLE EVENT EFFECTS

TID

Ha i principali effetti sulle seguenti apparecchiature e materiali:

- ∞ MOS (Semiconduttori) (diminuzione nella velocità di switch e spostamento della soglia di tensione)
- ∞ Transistors Bipolari e Transistors a Giunzione
- ∞ Microcircuiti analogici (diminuzione del guadagno e cambiamento nella corrente di offset)
- ∞ Microcircuiti digitali (problemi logici in seguito alla diminuzione del guadagno e cambiamenti nella velocità di switch)
- ∞ Cristalli al quarzo risonante (spostamento della frequenza)
- ∞ Materiali ottici (aumento dell'assorbimento)
- ∞ Superfici esterne polimeriche (degradazione meccanica)

Le componenti maggiormente sensibili alla TID sono gli strumenti elettronicamente attivi come transistors e circuiti integrati.

NIEL

Questo meccanismo è generato da tutte le particelle componenti la radiazione cosmica i quali se sufficientemente energetici possono danneggiare i materiali inducendo spostamenti negli atomi del reticolo cristallino. Tali spostamenti hanno effetti che dipendono da diversi fattori e possono essere riassunti come segue:

- ∞ Generazione di coppie elettrone-lacuna che instaurano una corrente di buio nei detectors
- ∞ Ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna con riduzione della vita dei portatori minoritari nei transistors e effetti nei LEDs e nei diodi laser

- ⌘ Creazione di trappole per i portatori di cariche che induce una perdita nell'efficienza del trasporto di carica nei CCDs (Charge Coupled Devices)
- ⌘ Compensazione di donatori e accettori che porta a una rimozione dei portatori in alcune apparecchiature

SINGLE EVENT EFFECTS

Inducono nelle apparecchiature effetti irreparabili o temporanei. Gli effetti irreparabili si riscontrano soprattutto nelle apparecchiature dotate di transistor (semiconduttori) poiché i single events possono causare problemi nella struttura cristallina dello strumento alterandone le caratteristiche. Gli effetti temporanei influenzano invece le memorie e i registri inducendo dei cambiamenti nei bits delle stesse e quindi cambiamenti nelle informazioni registrate.

Bisogna tenere anche conto che oltre a tutte le apparecchiature di bordo l'esposizione alla radiazione ionizzante con dosi elevate degrada anche i polimeri e i materiali ottici inducendo effetti deleteri sulle proprietà dei materiali passivi usati durante una missione.

In tale contesto si rende dunque necessario l'utilizzo di strumenti di simulazione che permettano di ottimizzare la schermatura delle apparecchiature compatibilmente con i requisiti di massa della missione.

A tale scopo si usano tre diverse stime della schermatura da radiazione, progressivamente più dettagliate:

⌘ Uso di una curva "DOSE-PROFONDITÀ"

Le specifiche sull'ambiente di una missione solitamente riportano la dose (ionizzante e non ionizzante) o la fluenza delle particelle come funzione dello spessore di uno schermo (assunto sempre in alluminio).

Dalla configurazione del sistema si stima poi il valore minimo di schermaggio tra i bersagli e lo spazio e la curva DOSE-PROFONDITÀ indica la dose depositata attraverso uno schermo con tale spessore minimo. Se alcune direzioni hanno uno schermaggio maggiore una dose più bassa può essere calcolata pesando il valore corrispondente della curva sulla frazione di angolo solido totale sottesa.

⌘ SECTORING ANALYSIS

Il metodo di Sectoring stima gli effetti dello schermaggio attorno a un punto di interesse considerando anche la complessità della geometria. Il metodo campiona tutte le direzioni dal punto, ricava lo schermaggio totale in ogni direzione e come risultato la dose totale è calcolata integrando su tutti i contributi. Bisogna ricordare che questa è solo una approssimazione poiché la curva dose-profondità usata si deriva assumendo lo schermaggio sferico. In realtà, la radiazione propagandosi attraverso la struttura della navetta diffonde in diverse direzioni e genera radiazione secondaria. Inoltre un'altra approssimazione è dovuta al fatto che questi tool di analisi generalmente convertono tutti i materiali nell'equivalente in alluminio, ignorando ovviamente le differenze nello schermaggio, diffusione e produzione di radiazione secondaria.

⌘ Analisi con METODI MONTE-CARLO

Tali metodi di analisi permettono il tracciamento completo delle particelle di tipo e energia voluta attraverso un modello 3D che riproduca la geometria della navetta, con corrette attribuzioni del tipo di materiale dando quindi il miglior risultato di dose stimata.

Per l'analisi di radiazione dell'MPO (Mercury Planetary Orbiter) della missione Bepi Colombo verso Mercurio, prevista per il 2012, si è utilizzato il programma ESABASE per effettuare la sectoring analysis. In particolare è stato utilizzato il pacchetto DOSRAD che permette il calcolo della dose depositata negli elementi sensibili fornendo le curve dose-profondità relative all'ambiente di radiazione calcolato per tale missione.

Il sistema di misura della radiazione ad alto LET proposto:

Il rivelatore per neutroni in un basso range energetico (10 keV-20 MeV) è uno strumento passivo, costituito da un insieme di rivelatori diversi, in grado di rivelare neutroni con energia compresa tra i 10 keV e i 20 MeV e di fornire informazioni sulla loro distribuzione energetica. Lo spettrometro BDS è stato messo a punto dalla Bubble Technology Industries, ciascun elemento componente è costituito da una fialetta cilindrica, trasparente e infrangibile di piccole dimensioni (diametro dell'ordine del cm, lunghezza intorno ai 10 cm), contenente un polimero elastico tessuto equivalente, all'interno del quale sono disperse goccioline di un liquido in condizioni di sovrariscaldamento. L'interazione fra i neutroni incidenti e nuclei del polimero, con la conseguente cessione di energia al nucleo, induce l'emissione di particelle cariche di rinculo (tipicamente protoni), le quali sono in grado di provocare l'esplosione di bollicine di liquido disperso. Queste bolle si ingrossano diventando visibili ad occhio nudo in un breve lasso di tempo, ma rimangono intrappolate all'interno del fluido elastico. La presenza di rivelatori con soglie diverse è dovuta a differenze nella composizione chimica.

I vantaggi nell'utilizzo di questo tipo di rivelatore sono molteplici:

- ❑ risposta angolare isotropa;
- ❑ passività dello strumento, con conseguente possibilità di utilizzo anche in presenza di possibili interazioni con elettronica di bordo nel caso di voli;
- ❑ buona capacità di rivelazione su un ampio intervallo di dose;
- ❑ indipendenza dal rateo di dose incidente;
- ❑ materiale componente il rivelatore tessuto-equivalente;
- ❑ praticità e facilità di utilizzo;
- ❑ buona risoluzione spaziale date le dimensioni.

Lo spettrometro, come già detto, è caratterizzato dalla presenza di sei tipi di rivelatori, ognuno con una diversa soglia energetica: rispettivamente 10, 100, 600, 1000, 2500, 10000 keV. Un rivelatore appartenente ad un determinato gruppo, vede solo i neutroni con energie maggiori della sua soglia.

Possibilità di riutilizzo: la camera di compressione consente di sottoporre i dosimetri a pressioni abbastanza elevate, dell'ordine delle 10 atm, tramite l'acqua distillata in esso contenuta, in modo tale da eliminare entro un certo periodo di tempo (circa 20 minuti) le bolle che si formano in seguito all'esposizione ai neutroni. In questa maniera, i dosimetri sono azzerati e pronti per una nuova misura.



Elementi dello spettrometro BDS.

Unfolding

Le informazioni che si possono ricavare dalle letture effettuate con lo spettrometro BDS da sole non sono sufficienti per ricavare informazioni sullo spettro completo dei neutroni nel range di energia coperto dalle soglie dei sei rivelatori (10 keV, 20 MeV). Per ricavare i valori di fluensa dello spettro neutronico nell'intervallo energetico desiderato occorre risolvere un sistema di equazioni integrali, dette equazioni di Fredholm, che hanno la seguente forma:

$$Y_j = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_j(E) \Phi_E(E) dE \quad j=1, \dots, M$$

dove $\Phi_E(E)$ è la distribuzione in fluenza dell'energia dei neutroni, $R_j(E)$ è la risposta del j-esimo rivelatore, Y_j è la lettura del j-esimo dosimetro; per noi i valori di j corrono da 1 a 6 e rappresentano i sei rivelatori alle sei diverse soglie. Solitamente la funzione di risposta $R_j(E)$ non è nota analiticamente: nel nostro caso, ad esempio, si conosce una matrice di risposta dei rivelatori.

L'equazione integrale scritta sopra è quindi sostituita da un sistema di M equazioni lineari in N incognite, dove N è il numero di punti necessari a definire lo spettro:

$$Y_j = \sum_1^N R_j(E) \Phi_E(E) \quad j=1, \dots, M$$

con N maggiore di M. Questo implica l'esistenza di infinite soluzioni, da un punto di vista matematico. Molte di queste soluzioni però non avranno alcun significato fisico (non esistono fluenze negative o molto oscillanti). Si dicono soluzioni esatte tutte quelle che soddisfano il sistema, approssimate quelle che soddisfano il sistema entro ragionevoli limiti d'errore, appropriate quelle soluzioni approssimate del sistema che offrono le descrizioni fisicamente più appropriate.

La ricerca della soluzione appropriata da un insieme di soluzioni approssimate è un problema di analisi numerica, comunemente chiamato unfolding o deconvoluzione. L'idea da cui si parte nell'unfolding di un set di dati sperimentali è ipotizzare una forma dello spettro su cui un programma elaborerà le soluzioni che meglio si adattano al problema in questione.

Il metodo utilizzato nell'unfolding dei dati sperimentali è in grado di trovare soluzioni fisiche anche in assenza di informazioni precise sullo spettro iniziale (spettro iniziale piatto). **BUNTO** è basato sull'algoritmo SPUNIT del codice BUNKI: il programma cerca soluzioni non negative attraverso una procedura iterativa che è stata appositamente studiata per superare il problema rappresentato dalla grande incertezza delle misure sperimentali, intrinseca nell'utilizzo di rivelatori passivi.

Nella procedura adottata in BUNTO la soluzione $\Phi_E(E)$ è la media calcolata da un numero di spettri $\Phi_{E,i}(E)$. Ogni spettro $\Phi_{E,i}(E)$ è ottenuto da una generazione random di valori $Y_{j,i}$, campionati su una distribuzione normale i cui parametri μ e σ sono le letture sperimentali e l'incertezza associata a ciascuna lettura. Per un migliore trattamento delle incertezze viene usato un ulteriore criterio di convergenza che si basa sulla fluenza integrale e serve a minimizzare la differenza tra le risposte dei singoli rivelatori calcolate e misurate.

Lo spettrometro BDS è già stato utilizzato con successo dal nostro gruppo per misure di spettri neutronici nel laboratorio d'alta montagna Testa Grigia (3480 m).

Rivelazione di neutroni d'alta energia (stack a fissione).

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. Tra questi 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. Con questi fogli di plastica è possibile ottenere la rivelazione diretta delle particelle carica 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, oltre ai rivelatori di tracce, vengono utilizzati rivelatori a bolle di tipo passivo analoghi al BDS. 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.

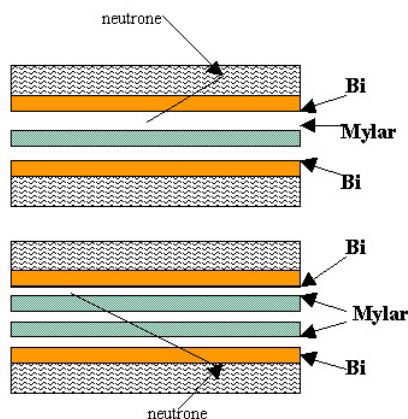
La scansione di aree così grandi può essere effettuata in modo relativamente semplice e rapido.

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.

Lo stack realizzato 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.

Brevemente i vari rivelatori che compongono lo stack sono:

1. Rivelatori a bolle (già descritti nella sezione precedente)
2. Il rivelatore Rivelatore a polycarbonato (1 MeV – 100 MeV) è costituito da fogli di polycarbonato. Le tracce lasciate dai prodotti di rinculo, che si generano dall'interazione con i neutroni, sono rivelate con tecniche di etching.
3. Rivelatore a fissione (^{209}Bi) (100 MeV – 100 GeV): strati di ^{209}Bi sono depositati su fogli di polycarbonato (mylar), dall'interazione del neutrone con il ^{209}Bi vengono prodotti frammenti di fissione che lasciano delle tracce nel mylar. Queste tracce possono essere contate attraverso uno spark counter. In figura è esemplificato il meccanismo di rivelazione.



Analogamente a quanto descritto per lo spettrometro BDS i dati raccolti dai vari strumenti che compongono lo Stack vanno analizzati con il codice di unfolding BUNTO.

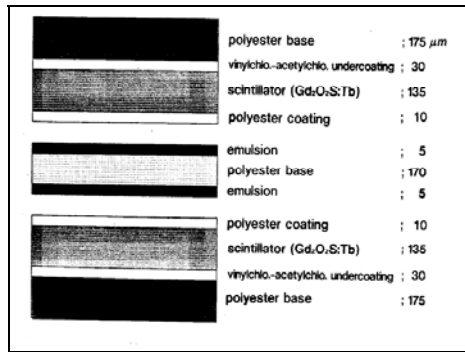
Lo stack è stato progettato e realizzato insieme dall'APAT (Roma, dott. Tommasino).

Il sistema di spettrometria neutronica è già stato testato in laboratori di alta montagna.

Rivelazione HZE

Il nostro rivelatore, del tutto passivo, risulta costituito essenzialmente da due elementi: una lastra scintillante 'intensifying screen' (in alcuni casi due) e un film in grado di assorbire la lunghezza d'onda emessa dal suddetto scintillatore.

In figura si notano i vari strati che compongono la lastra e il film.



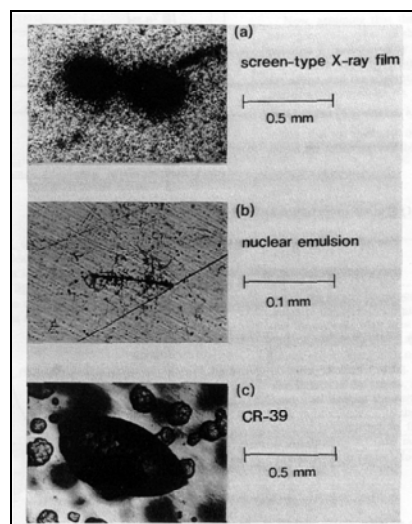
Struttura dell'X-Ray film schermato dall'intensifying screen (in questo caso Fuji HR-8). Il sistema di rivelazione, nel suo complesso, viene identificato con la sigla SXF (screen type X-Ray film)

Nel nostro caso specifico abbiamo utilizzato una combinazione di Fuji HR-8 intensifying screen e Fuji RXO-film (dopo aver dimostrato con prove sequenziali di irraggiamento in laboratorio che questo tipo di film fosse il migliore nella rivelazione della luce emessa dallo schermo scintillante HR-8).

Le lastra scintillanti HR-8 sono composte da Gd₂O₂S (“ossisulfide di gadolinio”) drogato con l'1% di Terbio.

Quando una particella carica passa attraverso l'SXF (screen type X-ray film) viene emessa luce di scintillazione da entrambi gli schermi la quale impressiona il film inserito fra di essi formando su quest'ultimo uno spot misurabile, dopo lo sviluppo della pellicola, tramite un densitometro ottico. I vantaggi di questo sistema di rivelazione sono innumerevoli: in primo luogo la semplicità di rivelazione, poi la maneggevolezza e quindi la semplicità di trasporto ed utilizzo sui voli di palloni aerostatici veicoli spaziali; infine sono evidenti i vantaggi rispetto a d altri rivelatori come le camere ad emulsione (queste hanno una bassa efficienza di rivelazione delle interazioni indotte da primari pesanti, dal momento che la maggior parte delle cascate elettromagnetiche rivelate nella parte calorimetria risultano generate da elementi leggeri come protoni e particelle α , in particolare dai primi) o il CR-39 (questo sistema presenta grandi limiti di rivelazione delle tracce inclinate con velocità relativistica, mentre l'SXF ha la capacità di rivelazione di raggi cosmici sotto un grande angolo solido ed è di più facile trasporto).

Nella figura seguente viene mostrata la rivelazione di una traccia di ferro da parte dei tre tipi di rivelatori citati.



Fotografie di tracce di ferro con inclinazione di 48.7° rivelate da (a) SXF (b) emulsione nucleare (Fuji ET7B) e (c) CR-39

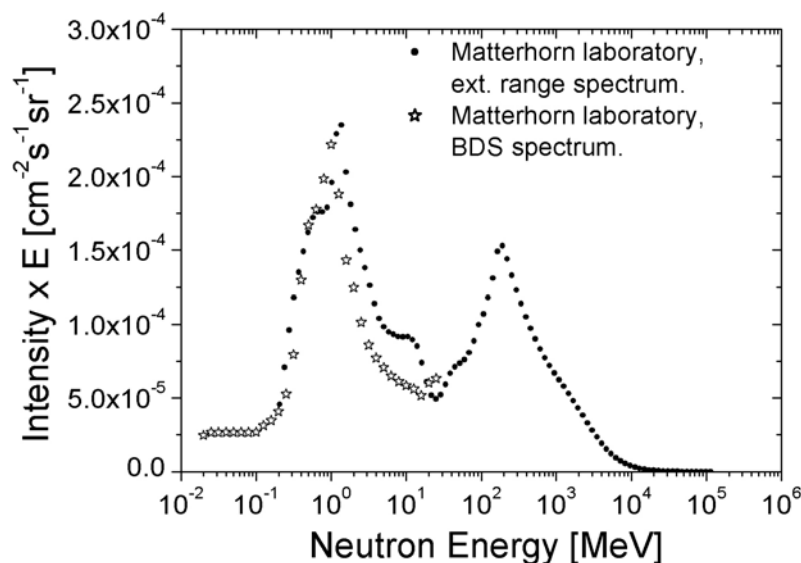
Dimostrazione

Neutroni

Nell'ambito dell'esperimento INFN ATPROMO (finanziato per gli anni 2003 e 2004) i due sistemi di rivelazione per neutroni sono stati testati presso il laboratorio Testa Grigia del CNR (Monte Cervino 3480 m).

Lo scopo dei test era provare l'adattabilità del sistema per la rivelazione dello spettro neutronico dei raggi cosmici secondari in atmosfera e controllare che i due sistemi fossero in grado di ricostruire conservativamente i picchi di tale spettro.

Le campagne di raccolta dati si sono tenute in più sessioni tra i mesi di marzo e settembre 2003. La corretta ricostruzione dello spettro ha richiesto un maggior tempo di esposizione per lo Stack ad ampio range energetico (a causa della minore sensibilità rispetto allo spettrometro BDS).



Confronto tra gli spettri misurati presso il laboratorio Testa Grigia con i due diversi sistemi di rivelazione

Come si può notare dalla figura i due sistemi riproducono correttamente il picco dello spettro di energia circa 1 MeV, con lo spettrometro ad ampio range riusciamo a ricostruire anche il picco di alta energia a circa 200 MeV.

HZE

Il primo obiettivo inseguito per la realizzazione corretta del rivelatore è stato quello della scelta del film migliore da utilizzare unitamente alla lastra scintillante di tipo $Gd_2O_2S:Tb$. Per fare tale scelta sono state compiute una serie di prove impacchettando le lastre, opportunamente tagliate in piccole parti da (10x10) cm, con diversi tipi di X-Ray film utilizzati in ambito radiologico, radioprotezionistico e di ricerca.

I rivelatori così ottenuti sono stati sottoposti per 5 minuti alle radiazioni emesse da ^{90}Sr e ^{60}Co e, una volta sviluppati, sono stati selezionati i film che a occhio nudo presentavano una risposta migliore alla radiazione inviata (in particolare densità ottica maggiore). I tipi di pellicole testate sono stati:

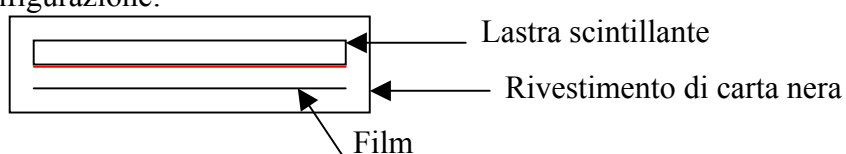
1. X-Omat TL (for therapy localization); Terapia: medie dosi
2. X-Omat TL; Diagnostic: basse dosi
3. Ultra-Vision G; Diagnostic Imaging
4. X-Omat V (for therapy verification); Diagnostic film
5. X-Omat V; Terapia: alte dosi
6. Fuji film

Le pellicole selezionate dopo questa prima fase di verifica sono state la “Ultra-Vision G” e i “Fuji film”. Gli studi successivi sono quindi stati eseguiti utilizzando unicamente questi due tipi di film e in ultima analisi solamente il “Fuji film”.

Le sorgenti utilizzate per i test sul rivelatore sono state per tutto lo svolgimento delle analisi una sorgente di ^{60}Co e una di ^{90}Sr con attività rispettive di 333 KBq (in giugno 1998) e 37 KBq (in gennaio 1995). Il Cobalto 60 emette raggi γ da 1.33 MeV (100%) e 1.17 MeV (99%), i quali producono all'interno della lastra scintillante coppie elettrone-positrone di circa 150 KeV a particella con un angolo fra le due direzioni di emissione di 22° . Sono queste particelle cariche a provocare la scintillazione nella lastra e quindi a essere rivelate impressionando il film. Lo stronzio 90 emette β^- con spettro di emissione avente energia massima pari a 2.284 MeV. L'area di emissione della sorgente di ^{90}Sr è circolare con diametro di 6 mm.

Come prima prova abbiamo irradiato i film in assenza di lastra scintillante per verificare che fosse effettivamente quest'ultima a provocare l'impressionamento del film con la luce da essa emessa.

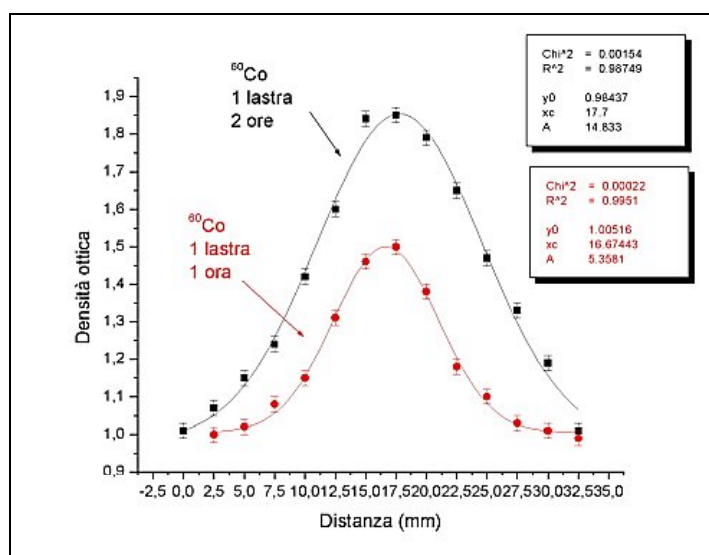
In seguito il primo studio sull'efficienza del rivelatore è stato fatto utilizzando la seguente configurazione:



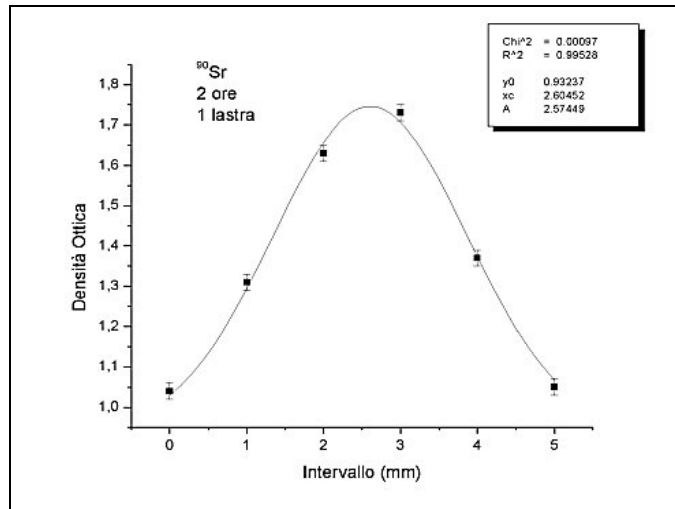
I rivelatori contenenti “Ultra Vision G” o “Fuji film” sono stati irradiati sia con emissioni di ^{90}Sr che con ^{60}Co per 5, 10, 15 minuti, 1 ora e 2 ore.

Le macchie ottenute sono state analizzate tramite un densitometro con apertura dello spot di 2mm di diametro. Questo strumento fornisce la densità ottica delle pellicole impressionate: nel nostro caso per ogni macchia sono state fatte una serie di misure di densità ottica lungo il diametro delle stesse ad intervalli di 1 o 2 mm.

I valori ottenuti sono stati graficati e fittati con curve gaussiane che, come ci si aspettava, approssimano bene l'andamento della variazione della densità ottica in prossimità e in presenza delle macchie.

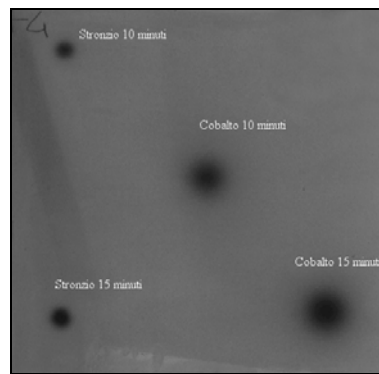


Analisi densitometrica delle macchie ottenute dall'esposizione al Cobalto 60 utilizzando 1 lastra.



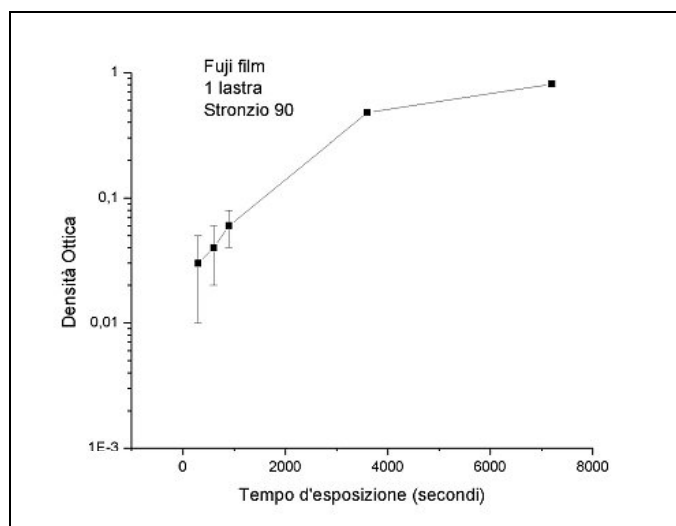
Analisi densitometrica di una macchia ottenuta dall'esposizione allo Stronzio 90 con l'utilizzo di 1 lastra.

Gli spot prodotti dalla sorgente di Cobalto risultano più estesi di quelli dovuti alla sorgente di Stronzio in quanto quest'ultimo emette direttamente elettroni mentre il ^{60}Co emette γ che producono certamente coppie elettrone-positrone.

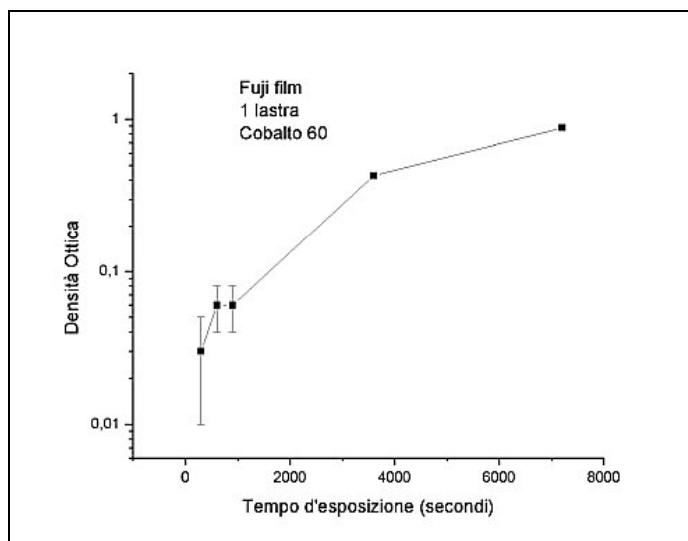


Pellicola impressionata dalle emissioni di Stronzio90 e Cobalto60

Per la costruzione della curva densitometrica di risposta del rivelatore si sono presi i valori massimi delle gaussiane ottenute, con errore pari a ± 0.02 che corrisponde all'accuratezza dello strumento utilizzato. Nelle figure seguenti sono riportate le curve in secondi, tale asse delle ascisse verrà più avanti trasformato in numero di elettroni rivelati, attraverso un semplice calcolo: si determina l'attività attuale della sorgente a partire da quella nota in un determinato anno e conoscendo il tempo di dimezzamento dell'elemento. Dall'attività e dal tempo di esposizione si calcolano gli elettroni emessi.

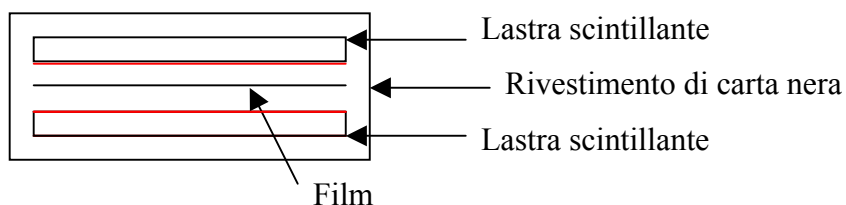


Curva densitometrica per la configurazione con 1 lastra scintillante. Esposizione a Stronzio 90.



Curva densitometrica per la configurazione con 1 lastra scintillante. Esposizione a Cobalto 60.

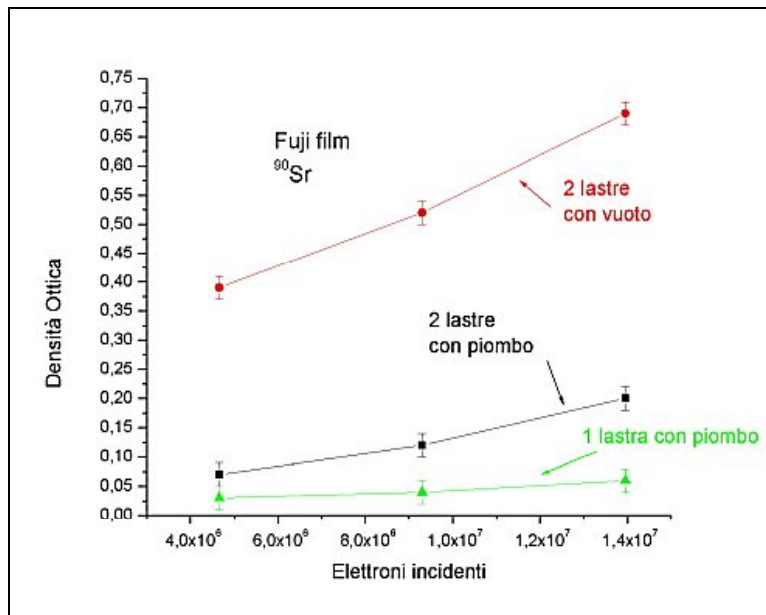
Essendo i risultati trovati in questa prima fase sperimentale piuttosto insoddisfacenti (bassa densità ottica) abbiamo provato ad aumentare l'efficienza ponendo una seconda lastra scintillante al di sotto del film in modo che quest'ultimo venga impressionato sia dalla luce emessa dalla lastra sopra di esso sia da quella posta al di sotto.



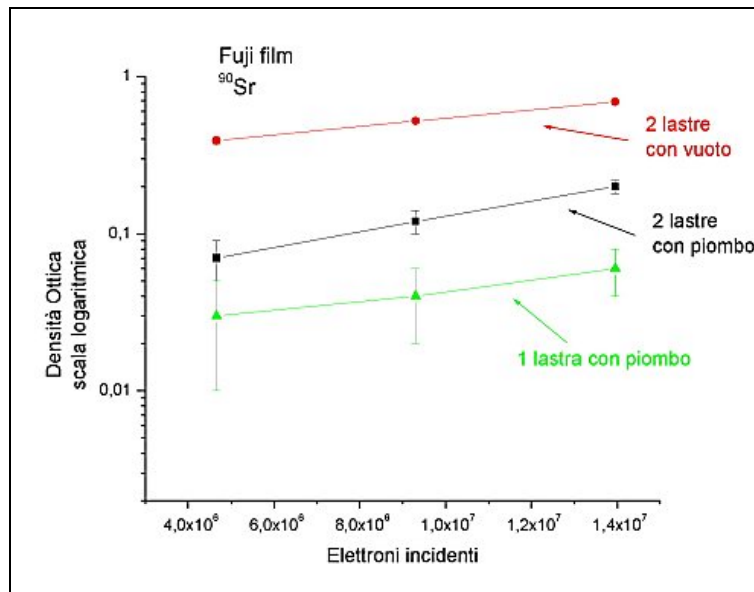
In questo caso abbiamo irradiato per 5, 10, 15 minuti con ^{90}Sr e ^{60}Co e analizzato gli spot ottenuti con il metodo sopra descritto ottenendo risultati migliori del caso precedente.

Un ultimo tentativo di migliorare l'efficienza è stato da noi realizzato tramite disposizione lastre-film come nella configurazione precedente, ma ponendo il tutto sotto vuoto. Quest'ulteriore passaggio ha apportato un soddisfacente miglioramento e nelle figure seguenti riportiamo l'analisi

delle macchie ottenute sulla pellicola del tipo “Fuji film” e le densità ottiche delle tre prove a confronto.



Confronto fra le curve densitometriche delle tre configurazioni sottoposte all'emissioni dello Stronzio90. Asse y in scala lineare.



Confronto fra le curve densitometriche delle tre configurazioni sottoposte all'emissioni dello Stronzio90.