

LE RADIAZIONI IONIZZANTI

A cura di: G. Moschini, G. Pavarin, M. Pelliccioni, E. Righi.

(Il testo è oggetto dell'opuscolo d'informazione per i lavoratori dell'Università disponibile presso lo stesso Servizio)

Redazione e grafica: N. Bonasia, C. Masiero

Marzo 2000

INDICE

PREMESSA

1. [GENERALITA' SULLE RADIAZIONI IONIZZANTI](#)
2. [SORGENTI DI RADIAZIONI](#)
 - 2.1 [Un cenno all'atomo e ai decadimenti radioattivi](#)
 - 2.2 [Le reazioni nucleari e la radioattività artificiale](#)
 - 2.3 [Le macchine radiogene](#)
3. [LA PENETRAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI NELLA MATERIA](#)
4. [GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE](#)
 - 4.1 [Sorgenti di radiazioni ed equivalente di dose](#)
5. [LE RADIAZIONI IONIZZANTI E L'AMBIENTE IN CUI VIVIAMO](#)
 - 5.1 [Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti](#)
 - 5.2 [Sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti](#)
6. [IRRADIAZIONE ESTERNA E IRRADIAZIONE INTERNA](#)
7. [EFFETTI SULL'UOMO DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI](#)
 - 7.1 [Danni somatici deterministici](#)
 - 7.2 [Danni somatici stocastici](#)
 - 7.3 [Danni genetici stocastici](#)
 - 7.4 [Irradiazione in utero \(embrione e feto\)](#)
8. [I PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA RADIOPROTEZIONE](#)
9. [STRUMENTI OPERATIVI DI SORVEGLIANZA FISICA DELLA RADIOPROTEZIONE](#)
 - 9.1 [Classificazione delle aree](#)
 - 9.2 [Classificazione dei lavoratori](#)
 - 9.3 [Norme interne di radioprotezione](#)
 - 9.4 [La dosimetria individuale](#)
10. [RISCHI DA RADIAZIONI PRESSO LE STRUTTURE DELL'UNIVERSITA' DI PADOVA](#)
 - 10.1 [Servizio di Radioprotezione](#)
 - 10.2 [Tipologia delle sorgenti](#)
 - 10.3 [Tipologia del rischio radiogeno](#)
 - 10.4 [Valutazioni del rischio radiogeno](#)
 - 10.5 [Monitoraggio del rischio radiogeno](#)
 - 10.6 [Iter autorizzativi](#)
 - 10.7 [Rischio presso sedi esterne](#)

APPENDICE

Modalità di decontaminazione

GLOSSARIO

PREMESSA

L'art. 61, comma 3, lettera e), del D. Lgs. 230/95(*), fa obbligo al datore di lavoro, ai dirigenti e ai preposti di: *rendere edotti i lavoratori, nell'ambito di un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione, in relazione alle mansioni cui essi sono addetti, dei rischi specifici cui sono esposti, delle norme di protezione sanitaria, delle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche, delle modalità di esecuzione del lavoro e delle norme interne di cui alla lettera c).*

L'art. 68 dello stesso D.Lgs., di cui si riporta qui di seguito il testo per esteso, stabilisce a sua volta gli obblighi dei lavoratori.

1. I lavoratori devono:

- a) *osservare le disposizioni impartite dal datore di lavoro o dai suoi incaricati, ai fini della protezione individuale e collettiva e della sicurezza, a seconda delle mansioni alle quali sono addetti;*
- b) *usare secondo le specifiche istruzioni i dispositivi di sicurezza, i mezzi di protezione e di sorveglianza dosimetrica predisposti o forniti dal datore di lavoro;*
- c) *segnalare immediatamente al datore di lavoro, al dirigente o al preposto le deficienze dei dispositivi e dei mezzi di sicurezza, di protezione e di sorveglianza dosimetrica, nonché le eventuali condizioni di pericolo di cui vengono a conoscenza;*
- d) *non rimuovere né modificare, senza averne ottenuto l'autorizzazione, i dispositivi, e gli altri mezzi di sicurezza, di segnalazione, di protezione e di misurazione;*
- e) *non compiere, di propria iniziativa, operazioni o manovre che non sono di loro competenza o che possono compromettere la protezione e la sicurezza ;*
- f) *sottoporsi alla sorveglianza medica ai sensi del presente decreto.*

2. *I lavoratori che svolgono, per più datori di lavoro, attività che li espongono al rischio di radiazioni ionizzanti, devono rendere edotto ciascun datore di lavoro delle attività svolte presso gli altri, al fini di quanto previsto al precedente articolo 66. Analoga dichiarazione deve essere resa per eventuali attività pregresse. I lavoratori esterni sono tenuti ad esibire il libretto personale di radioprotezione all'esercente le zone controllate prima di effettuare le prestazioni per le quali sono stati chiamati.*

La presente pubblicazione è stata scritta con il duplice scopo di dare un contributo per l'adempimento dell'obbligo stabilito dall'art. 61, comma 3, lettera e), e di rendere i lavoratori più consapevoli dell'importanza di ottemperare, a loro volta, agli obblighi loro imposti dall'art. 68.

(*) Decreto Legislativo 17 marzo 1995, n. 230. Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti.

1. GENERALITA' SULLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Il termine *radiazione* viene abitualmente usato per descrivere fenomeni apparentemente assai diversi tra loro, quali l'emissione di luce da una lampada, di calore da una fiamma, di particelle elementari da una sorgente radioattiva, etc. Caratteristica comune a tutti questi tipi di emissione è il trasporto di energia nello spazio. Questa energia viene ceduta quando la radiazione è assorbita nella materia. Ciò si può dimostrare constatando un aumento di temperatura in prossimità del punto in cui è avvenuto l'assorbimento.

L'aumento di temperatura non però l'unico effetto prodotto dall'assorbimento di radiazione nella materia. Infatti, la luce può impressionare una lastra fotografica, il calore può generare un incendio, le particelle ionizzanti possono danneggiare l'organismo umano, etc.

L'azione lesiva delle particelle ionizzanti sull'organismo è una diretta conseguenza dei processi fisici di eccitazione e ionizzazione degli atomi e delle molecole dei tessuti biologici dovuti agli urti delle particelle, che sono dette appunto *particelle ionizzanti* o anche *radiazioni ionizzanti*, quando hanno energia sufficiente per produrre questi processi.

A seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta si usa distinguere tra *radiazioni direttamente ionizzanti e radiazioni indirettamente ionizzanti*. Sono direttamente ionizzanti le particelle cariche (elettroni, particelle beta, particelle alfa, etc.); sono invece indirettamente ionizzanti i fotoni (raggi X e raggi gamma), i neutroni, etc.

Le particelle cariche, dotate di massa e di carica elettrica, e i neutroni, dotati di massa, ma non di carica elettrica, sono radiazioni corpuscolari. I fotoni invece non hanno massa, né carica elettrica. Sono radiazioni elettromagnetiche, che si propagano con la velocità della luce.

Le particelle cariche più comuni sono le particelle alfa e le particelle beta, che vengono emesse nei decadimenti radioattivi. Le prime si compongono di due neutroni e due protoni. Le altre sono del tutto simili agli elettroni, ma contrariamente a questi possono avere carica sia negativa che positiva. I neutroni sono emessi nella disintegrazione spontanea di elementi pesanti prodotti artificialmente e nelle reazioni nucleari.

Una caratteristica molto importante delle radiazioni è la loro energia, che si misura in joule, o più diffusamente in fisica delle radiazioni in elettronvolt (eV). Un elettronvolt è l'energia che una carica elementare (quella di un elettrone o di un protone) acquista attraversando una differenza di potenziale di 1 volt.

Multiplici sono il keV (10^3 eV), il MeV (10^6 eV), il GeV (10^9 eV). Ad esempio, in un tubo a raggi X un elettrone, attraversando la differenza di potenziale di 100000 volt acquista una energia di 100000 eV (100 keV). Una particella alfa, avendo carica doppia, attraversando la stessa differenza di potenziale, acquista una energia doppia, pari a 200 keV.

2. SORGENTI DI RADIAZIONI

2.1 Un cenno all'atomo e ai decadimenti radioattivi

L'atomo è la più piccola parte di un elemento che mantiene le caratteristiche dell'elemento stesso e nel contempo è la principale sorgente di radiazioni sia elettromagnetiche che corpuscolari (Fig. 1).

Esso è composto di un nucleo e di particelle più leggere, gli elettroni, di carica elettrica negativa che gli ruotano intorno in orbite energeticamente ben definite. Un elettrone, ricevendo energia, può passare da orbite interne ad orbite esterne, oppure uscire dall'atomo. Nel primo caso l'atomo risulta *eccitato*, nel secondo *ionizzato*.

L'ATOMO

● NEUTRONE ● PROTONE ● ELETTRONE

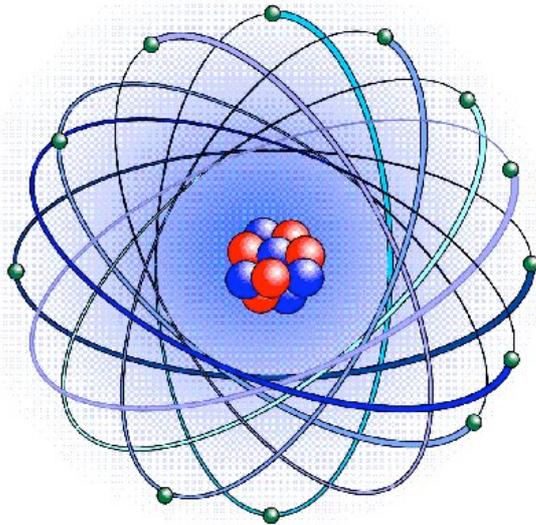
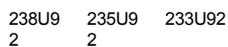


Fig. 1

A sua volta il nucleo è costituito da protoni aventi carica elettrica positiva e neutroni, elettricamente neutri. Protoni e neutroni hanno una massa all'incirca 1835 volte maggiore degli elettroni. Il numero di protoni determina l'elemento cui l'atomo appartiene: un atomo di idrogeno ha un solo protone, un atomo di ossigeno ne ha 8, un atomo di uranio ne ha 92. Ogni atomo ha lo stesso numero di protoni e di elettroni e risulta elettricamente neutro. Gli atomi di uno stesso elemento, pur avendo lo stesso numero di protoni, possono avere diverso numero di neutroni, dando origine ai diversi "isotopi". Essi sono identificati dal numero totale di particelle presenti nel nucleo. Ad esempio, l'uranio (simbolo U) ha vari isotopi: ^{238}U , ^{235}U , ^{233}U . L'uranio-238 ha 92 protoni e $(238-92)=146$ neutroni; l'uranio-235 ha sempre 92 protoni, ma $(235-92)=143$ neutroni; l'uranio-233 ha 92 protoni e 141 neutroni. Simbolicamente i tre isotopi sono rappresentati mediante la scrittura:



L'elemento più semplice esistente in natura, l'idrogeno (^1H) ha due isotopi, il deuterio (^2H) e il tritio (^3H). Quest'ultimo è radioattivo ed emette particelle beta negative.

In generale un isotopo il cui simbolo sia Y è rappresentato da AYZ, dove Z (detto numero atomico) indica il numero dei protoni e degli elettroni, A (detto numero di massa) indica il numero totale di particelle presenti nel nucleo e $N = A - Z$ indica il numero di neutroni. Se l'isotopo è radioattivo, si parla di radioisotopo o anche di radionuclide.

Numerosi elementi esistenti in natura sono costituiti da atomi i cui nuclei sono energeticamente instabili. Il ritorno alla stabilità avviene con emissione di radiazione corpuscolare (alfa o beta), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi gamma). I nuclei in parola si dicono *radioattivi* e la menzionata emissione di radiazione viene detta *decadimento radioattivo* o *radioattività*. Il fenomeno è regolato dalla fondamentale legge del decadimento radioattivo secondo la quale, per ogni radionuclide, deve trascorrere un tempo caratteristico (*tempo di dimezzamento*) affinché il numero di nuclei radioattivi presenti si dimezzi. Il tempo di dimezzamento può essere compreso tra le frazioni di secondo e i milioni di anni (Fig. 2 e 3).

RADIOATTIVITA'

Processo naturale attraverso il quale gli atomi instabili di un elemento emettono energia da parte dei nuclei trasformandosi in atomi di un diverso elemento o in stati energetici di minor energia dello stesso elemento.

ATTIVITA'

Numero di trasformazioni nucleari spontanee di un radionuclide che si producono nell'unità di tempo. Si esprime in Becquerel.

Fig. 2

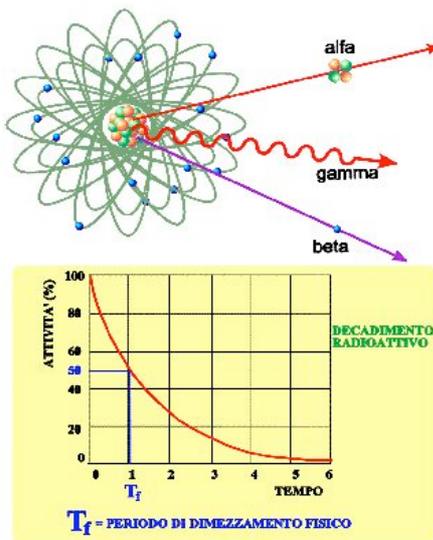


Fig. 3

Le radiazioni alfa e gamma emesse nei decadimenti radioattivi hanno una energia ben definita. La radiazione beta ha invece uno spettro energetico continuo, che si estende fino ad una energia massima tipica di ciascun radioisotopo. L'energia media di questi elettroni è dell'ordine di un terzo dell'energia massima (Fig. 4 e 5).

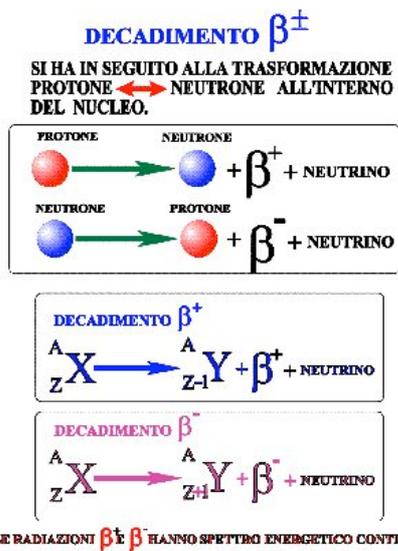


Fig. 4

Ciascun radionuclide si caratterizza per il tipo e l'energia delle particelle emesse e per il tempo di dimezzamento.

Il numero di disintegrazioni che avvengono nell'unità di tempo in una data quantità di materiale radioattivo costituisce la sua *attività*. L'attività si misura in bequerel (Bq): 1 Bq = 1 disintegrazione al secondo. Quando l'attività è riferita alla contaminazione presente su una superficie, si suole esprimerla in Bq per unità di area (Bq·cm⁻²), quando invece è riferita a un volume, si pensi ad esempio alla contaminazione dell'aria, si parla di Bq per unità di volume (Bq·cm⁻³). Allo stesso modo, nel caso di contaminazione di matrici (per es. alimenti, suolo, etc.), ci si riferisce all'attività per unità di massa (Bq·kg⁻¹).

SPETTRO ENERGETICO DELLE PARTICELLE β

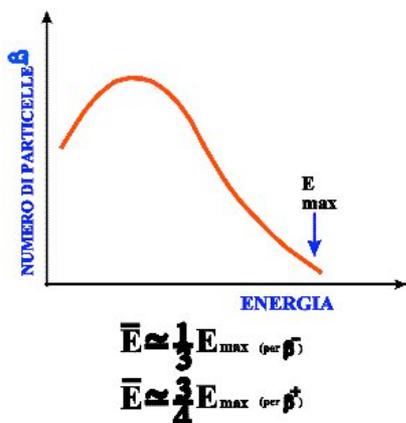


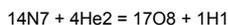
Fig. 5

2.2 Le reazioni nucleari e la radioattività artificiale

Il fenomeno della radioattività può essere indotto artificialmente in nuclei stabili attraverso le reazioni nucleari. In questo caso si parla di *radioattività artificiale* per distinguerla dalla precedente, detta invece *naturale*.

Si ha una reazione nucleare quando delle particelle (ad esempio protoni, neutroni, alfa) colpiscono i nuclei della materia: il nucleo colpito (nucleo bersaglio) assorbe la particella lanciata ("proiettile") ed in generale ne emette un'altra o più di una, restando modificato nella sua struttura. Si possono considerare come particolari reazioni nucleari anche i casi in cui la particella emessa è la stessa incidente, ovvero quando si verifica una semplice deviazione di questa (fenomeno detto "diffusione"): il nucleo non cambia natura, ma tutt'al più si eccita (diffusione anelastica) o resta inalterato (diffusione elastica). Sino al 1932 i soli proiettili di cui si disponeva per produrre reazioni nucleari erano le particelle alfa emesse dai nuclei radioattivi. L'invenzione degli acceleratori di particelle ha enormemente allargato le possibilità: attualmente si possono accelerare i nuclei di quasi tutti gli atomi esistenti in natura e di molti di quelli prodotti artificialmente. A seconda della massa degli ioni accelerati, si dispone di acceleratori di ioni leggeri (ad esempio protoni, deutoni, alfa) o di ioni pesanti (ad esempio carbonio, ossigeno, fluoro, rame etc.). Anche i bersagli (cioè i nuclei bersaglio) che si utilizzano possono essere i più svariati, con produzione di una amplissima gamma di nuclei radioattivi (radioisotopi artificiali, prodotti dall'uomo).

Una determinata reazione nucleare si può indicare con una simbologia simile a quella usata in chimica. L'interpretazione, ad esempio, della reazione:



è la seguente: una particella alfa (cioè un nucleo di elio 4He_2) colpendo un nucleo di azoto ${}^{14}\text{N}_7$ produce, in seguito a reazione nucleare, un nucleo di ossigeno ${}^{17}\text{O}_8$ con emissione di un protone ${}^1\text{H}_1$. Spesso si usa una notazione abbreviata, e l'equazione precedente si scrive ${}^{14}\text{N}_7(a, p) {}^{17}\text{O}_8$, ove il primo simbolo denota il nucleo bombardato, la prima lettera tra parentesi il proiettile, la seconda lettera la particella espulsa e l'ultimo simbolo il nucleo residuo.

Quando quest'ultimo si trova in uno stato energeticamente instabile, si ha il fenomeno della radioattività, in questo caso artificiale (Tab. 1).

PRODUZIONE DI RADIOISOTOPHI MEDIANTE REAZIONI NUCLEARI	
RADIONUCLIDE	REAZIONE NUCLEARE
123I	${}^{124}\text{Te}(p, 2n) {}^{123}\text{I}$
201Tl	${}^{203}\text{Tl}(p, 3n) {}^{201}\text{Pb} @ {}^{201}\text{Tl}$
67Ga	$\text{natZn}(p, xn) {}^{67}\text{Ga}$
81Rb/81mKr	$\text{natKr}(p, xn) {}^{81}\text{Rb} @ {}^{81}\text{mKr}$
195m, 195Hg/195mAu	${}^{197}\text{Au}(p, 3n) {}^{195}\text{Hg}$
11C	${}^{14}\text{N}(p, a) {}^{11}\text{C}$
	${}^{10}\text{B}(d, n) {}^{11}\text{C}$
	${}^{11}\text{B}(p, n) {}^{11}\text{C}$
13N	${}^{13}\text{C}(p, n) {}^{13}\text{N}$
	${}^{16}\text{O}(p, a) {}^{13}\text{N}$
	${}^{12}\text{C}(d, n) {}^{13}\text{N}$
15O	${}^{15}\text{N}(p, n) {}^{15}\text{O}$
18F	${}^{14}\text{N}(d, n) {}^{15}\text{O}$
	${}^{18}\text{O}(p, n) {}^{18}\text{F}$
	${}^{20}\text{Ne}(d, a) {}^{18}\text{F}$

Tab. 1

Per ottenere effettivamente reazioni nucleari con particelle proiettili di tipo carico come protoni o alfa è necessario che esse abbiano energia tanto maggiore quanto maggiore è il numero atomico Z del nucleo bombardato. Ciò si spiega in quanto avendo tali particelle carica positiva, tendono ad essere respinte dalla carica positiva dei nuclei. Diverso è il caso per proiettili come i neutroni, privi di carica: essi possono produrre reazioni su nuclei di qualsiasi numero atomico Z , anche se la loro energia è molto modesta (frazione di eV).

Come abbiamo già visto, i neutroni non sono emessi in fenomeni radioattivi, ma possono esserlo in fenomeni di fissione spontanea (cioè nella rottura di un nucleo in due frammenti) a partire da elementi molto pesanti (un esempio è il californio-252). Sorgenti anche molto intense di neutroni si ottengono mediante reazioni nucleari prodotte da acceleratori di particelle. Tipiche reazioni per produrre neutroni utilizzano come proiettile il nucleo di un isotopo dell'idrogeno, cioè il deuterio (simbolo $2H1$ oppure d) e come bersaglio il deuterio stesso o l'altro isotopo dell'idrogeno, cioè il tritio ($3H1$).

Simbolicamente tali reazioni si scrivono: $2H1(d, n)3He2$; $3H1(d, n)4He2$. In seguito alle due reazioni si formano rispettivamente elio-3 o elio-4.

Sorgenti portatili di neutroni da laboratorio si ottengono facilmente da reazioni nucleari prodotte da particelle alfa o raggi gamma emessi da radioisotopi e fatti interagire con nuclei leggeri bersaglio come boro o berillio. Una tipica sorgente di neutroni si ottiene miscelando polvere di Am-241 (radioisotopo che emette particelle alfa) con polvere di Berillio. I neutroni emessi hanno uno spettro energetico che si estende fino a circa 10 MeV, con un'energia media di 4,5 MeV.

2.3 Le macchine radiogene

Sorgenti di radiazioni sono infine le macchine radiogene, apparecchiatura nelle quali vengono accelerate particelle elementari cariche, che interagendo su opportuni bersagli producono i fasci di radiazione da utilizzare. L'esempio più noto è quello dei tubi a raggi X, utilizzati nella radiologia medica, ove fasci di raggi X vengono appunto prodotti per interazione degli elettroni accelerati con idonei bersagli di elevato numero atomico.

Un tubo a raggi X non è altro che un piccolo acceleratore di elettroni, emessi da un filamento riscaldato e poi accelerati verso l'anodo per mezzo di una differenza di potenziale (Fig. 6). Questi elettroni quando arrivano sul bersaglio (l'anodo) danno origine a raggi X di frenamento, di tutte le energie fino a quella degli elettroni incidenti, cui si aggiungono i raggi X caratteristici dell'elemento di cui è costituito l'anodo, di energia ben definita (Fig. 7, 8 e 9).

Naturalmente, sono macchine radiogene anche gli acceleratori di particelle, ben noti per la loro utilizzazione nella ricerca scientifica.

Le macchine radiogene, come si descriverà più avanti, vengono abitualmente impiegate in un gran numero di applicazioni della vita civile, che non riguardano soltanto le applicazioni mediche e scientifiche, ma anche altri settori, tra i quali principalmente quello industriale.

PARTI PRINCIPALI DI UN MODERNO TUBO A RAGGI X AD ANODO ROTANTE

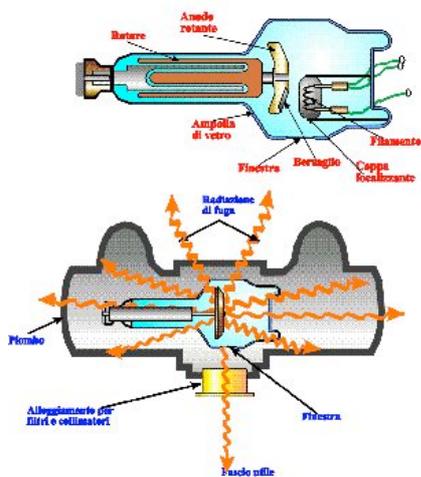


Fig. 6

SPETTRO ENERGETICO DEI RAGGI X DI FRENAMENTO

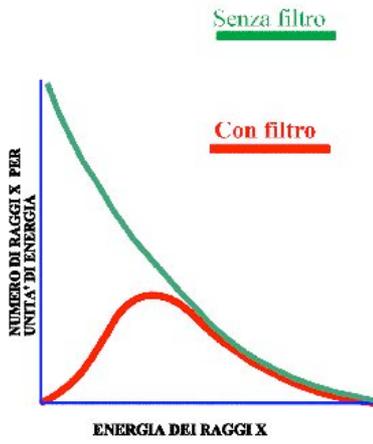


Fig. 7

SPETTRO ENERGETICO DEI RAGGI X CARATTERISTICI EMESSI DAGLI ATOMI ECCITATI E IONIZZATI

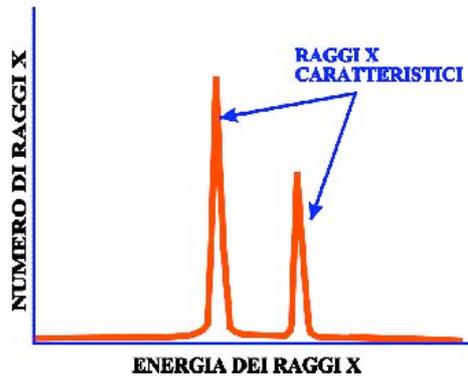


Fig. 8

SPETTRO DI EMISSIONE DEI RAGGI X DA PARTE DI UN TUBO A RAGGI X

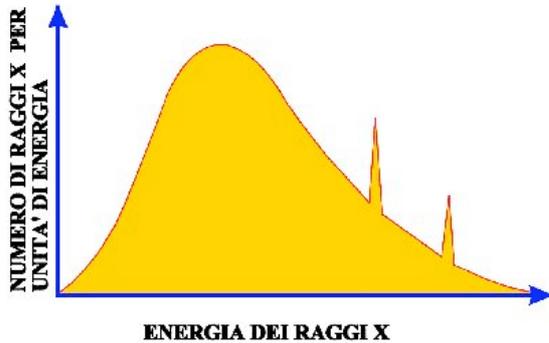


Fig. 9

3. LA PENETRAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI NELLA MATERIA

Le radiazioni ionizzanti propagandosi nello spazio possono incontrare materia vivente e non, con la quale interagiscono. I meccanismi di interazione sono diversi a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche del materiale attraversato. Ne segue una diversa capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazioni nei vari materiali (Fig. 10).

RADIAZIONI E LORO POTERE DI PENETRAZIONE

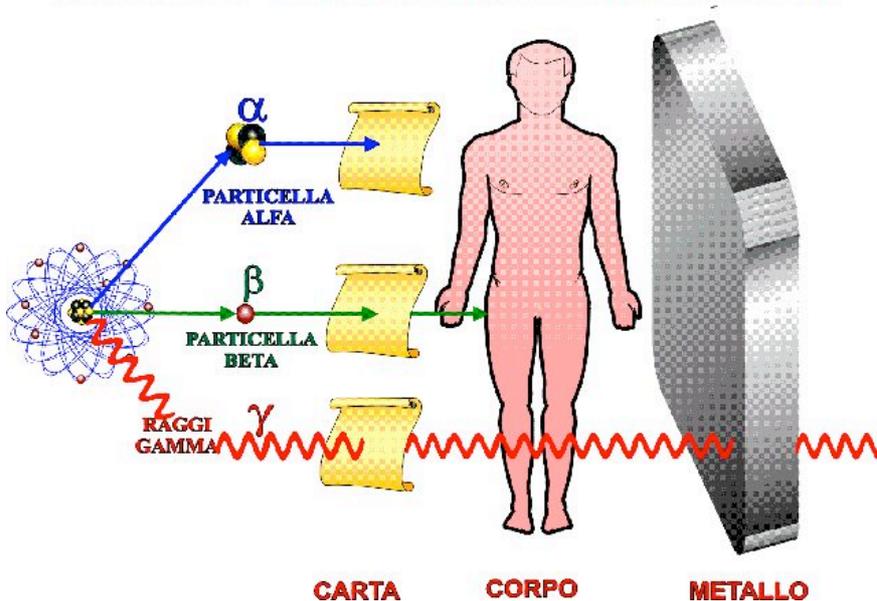


Fig. 10

Le particelle alfa si caratterizzano per la produzione di una elevata densità di ionizzazione lungo le loro tracce. Il percorso nella materia di queste particelle è quindi sempre assai modesto. Esse possono essere arrestate in meno di 10 cm di aria oppure da un semplice foglio di carta. Solo se hanno una energia maggiore di circa 7 MeV sono in grado di superare lo spessore di 70 micrometri di tessuto e possono quindi raggiungere lo strato germinativo della cute. Non sono pertanto molto pericolose fin quando la sorgente resta al di fuori dell'organismo umano (irradiazione esterna). Diventano invece estremamente pericolose, una volta introdotte nell'organismo (irradiazione interna), in quanto tutta la loro energia viene allora ceduta agli organi e tessuti interni del corpo umano.

E' utile menzionare che materiali isolanti come la plastiche, quando sono colpiti da radiazioni densamente ionizzanti come le particelle alfa, diventano nel tempo fragili e polverulenti (danno da radiazioni nei materiali). Questo problema è da tenere presente, ad esempio, nelle sorgenti alfa emittenti da laboratorio, che devono essere periodicamente sostituite, a causa del danneggiamento subito dal sottile strato di plastica con il quale vengono

sigillate.

Anche le particelle beta e gli elettroni hanno una modesta capacità di penetrazione nella materia, ma i loro percorsi sono comunque assai maggiori di quelli delle particelle cariche pesanti. Elettroni da 1 MeV sono arrestati in 4 metri di aria o in 4 mm di acqua (Tab. 2).

PERCORSO IN ARIA E IN ACQUA DI ELETTRONI MONOENERGETICI DI VARIA ENERGIA		
Energia (MeV)	Percorso in aria (m)	Percorso in acqua (cm)
10 ⁻²	2 x 10 ⁻³	3 x 10 ⁻⁴
2 x 10 ⁻²	7.5 x 10 ⁻³	1 x 10 ⁻³
10 ⁻¹	1.3 x 10 ⁻¹	15 x 10 ⁻³
1.5 x 10 ⁻¹	2.5 x 10 ⁻¹	30 x 10 ⁻³
1.0	4.0	0.4
2.0	10.0	1
10.0	50.0	5.1
102	270	40

Tab. 2

Solo elettroni con energie maggiori di 70 keV riescono a raggiungere lo strato germinativo della cute.

Quando si vogliono schermare le sorgenti di elettroni, conviene introdurre un primo strato di materiale leggero, al fine di ridurre l'intensità dei raggi X di frenamento che queste particelle producono, cui far seguire un successivo strato di materiale pesante per ridurre i raggi X prodotti. Per gli elettroni positivi (positroni) bisogna inoltre tenere presente la produzione di fotoni da 0,511 MeV nei processi di annichilazione (Fig. 11).

PROCESSO DI ANNICHILAZIONE DELLA RADIAZIONE β^+

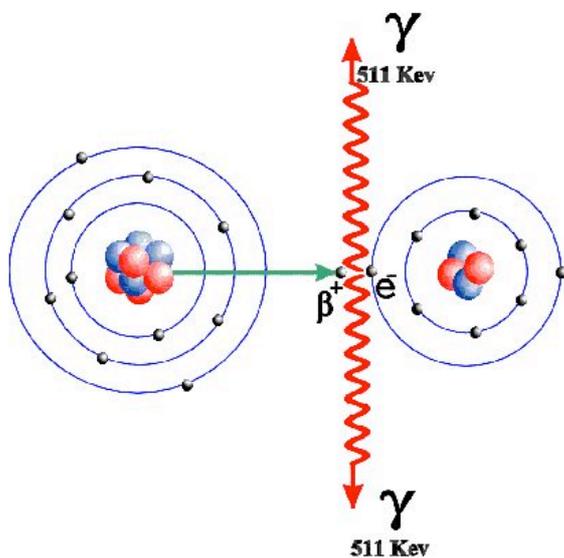


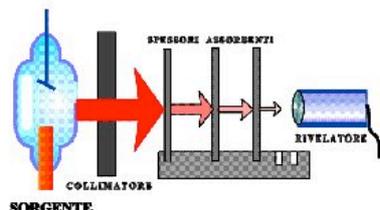
Fig. 11

Nel caso delle radiazioni indirettamente ionizzanti (le principali sono i raggi X e gamma e i neutroni), la cui penetrazione nella materia è assai maggiore delle particelle cariche, in considerazione della tipologia delle loro interazioni, non ha senso parlare di percorso nella materia. Con i raggi X e γ si suole piuttosto far riferimento agli spessori emivalenti (SEV), attraversando i quali il loro numero viene ridotto alla metà (Fig. 12).

ATTENUAZIONE DELLA RADIAZIONE X- γ

LA RIDUZIONE DI INTENSITA' (ATTENUAZIONE) E' IL RISULTATO DELLA SUA INTERAZIONE CON LA MATERIA.

UN MODO PER MISURARE L'ATTENUAZIONE E' QUELLO DI INTERPORRE TRA LA SORGENTE ED UN RIVELATORE DEGLI SPESSORI DEL MATERIALE IN ESAME.



NEL CASO DI RAGGI X O GAMMA L'ATTENUAZIONE HA SEMPRE UN ANDAMENTO COME IN FIGURA

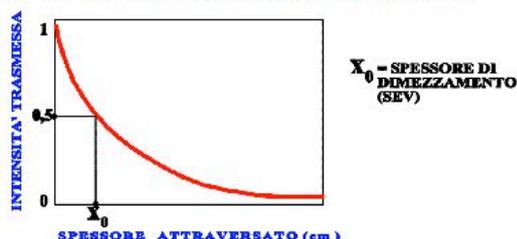


Fig. 12

Detti spessori, quando espressi in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, ovvero come prodotto dello spessore espresso in cm per la densità in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, risultano grosso modo indipendenti dal tipo di materiale preso in considerazione, almeno per energie dei fotoni non troppo modeste. Ad esempio, a 1 MeV gli spessori di dimezzamento in acqua, calcestruzzo e piombo sono rispettivamente di 10 cm, 4,5 cm e 0,9 cm (Tab. 3), mentre espressi in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ risultano tra loro confrontabili (circa $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$).

VALORI APPROSSIMATIVI DELLO SPESSORE DI DIMEZZAMENTO SEV PER I FOTONI DI ALCUNI RADIOISOTOPI E PER PESI DI RAGGI X

ENERGIA / NUCLIDE	SEV	
	PIOMBO (mm)	Calcestruzzo (cm)
50 kV	0,06	0,6
70 kV	0,15	1,2
85 kV	0,24	1,95
100 kV	0,26	2,1
125 kV	0,27	2,1
150 kV	0,27	2,4
200 kV	0,60	2,7
250 kV	0,90	3,0
300 kV	1,80	3,0
192Ir	6	4,1
131I	7	4,6
137Cs	7	4,9
198Au	11	4,1
182Ta	12	--
60Co	12	6,1
226Ra	13	7
124Sb	14	7
24Na	17	--

Tab. 3

Per attenuare efficacemente le radiazioni X e gamma si devono usare materiali pesanti con elevato numero atomico Z, cioè ad alta densità elettronica, quali piombo, tungsteno, uranio, etc.

I neutroni, infine, perdono energia tramite le interazioni con i nuclei degli atomi dei materiali attraversati. In un ampio intervallo di energia, tra circa 10 keV e 10 MeV, il principale meccanismo di interazione con la materia biologica è la diffusione elastica con la messa in moto di nuclei di rinculo, principalmente i protoni dell'idrogeno. A energie molto basse, al di sotto di 0,5 eV, prevalgono invece le reazioni di cattura da parte dei nuclei, con

emissione di raggi gamma e altre particelle.

Trattandosi di radiazioni indirettamente ionizzanti, anche per i neutroni si può tentare di introdurre in linea di principio lo spessore di dimezzamento, sebbene molto meno significativo che nel caso dei fotoni. A titolo esemplificativo, si menziona che in acqua, a neutroni da 3 MeV e 10 MeV, corrispondono SEV dell'ordine di 3 cm e 14 cm rispettivamente.

Per attenuare i fasci di neutroni i migliori materiali sono quelli con elevato contenuto di protoni e nuclei leggeri, quali acqua, paraffina, calcestruzzo, etc.

4. GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorché si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare il danno subito dai tessuti biologici è in relazione all'energia assorbita per unità di massa. Di questa circostanza si tiene conto per mezzo della grandezza *dose assorbita*, D , definita come il quoziente tra l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un certo elemento di volume e la massa di materia contenuta in tale elemento di volume.

La dose assorbita si misura in gray, Gy. Un gray corrisponde all'assorbimento di un joule in un kg di materia ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Spesso vi è interesse a riferirsi alla dose assorbita per unità di tempo, ovvero *all'intensità o rateo di dose assorbita*, che si misura in $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$, o più usualmente in qualche sottomultiplo di questa unità, come ad es. il $\text{m Gy} \cdot \text{h}^{-1}$.

Il grado di rischio derivante dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti non è però solo proporzionale alla dose assorbita, ma è anche strettamente legato al tipo di radiazione incidente e alla radiosensibilità dei vari organi e tessuti irradiati.

Per tener conto della diversa pericolosità delle radiazioni incidenti, si introduce il *cosiddetto fattore di qualità* della radiazione, Q . Si tratta di un parametro che tiene conto della pericolosità delle varie radiazioni rispetto alla radiazione di riferimento (fotoni), cui viene assegnato per definizione un Q uguale a 1. Il prodotto della dose assorbita in tessuto, D , per il fattore di qualità, Q , prende il nome di *equivalente di dose*, H ($H=QD$). L'equivalente di dose si misura in sievert (Sv). Nel caso dei fotoni e degli elettroni, $Q = 1$, e la dose assorbita di un gray corrisponde all'equivalente di dose di un Sv. Sulla base degli esiti degli studi epidemiologici e di radiobiologia si è osservato che, a parità di dose assorbita, le particelle alfa con energia di alcuni MeV, producono un danno biologico 20 volte maggiore dei fotoni. Pertanto, a queste particelle, è stato assegnato un $Q=20$. Anche i neutroni sono più pericolosi dei fotoni e si assume per essi un Q compreso tra 3 e 11 a seconda della loro energia. Quando la dose è dovuta a radiazioni di diverse energie, si introduce un valore medio del fattore di qualità che viene detto *fattore di qualità efficace* (Q).

Si parla di *intensità o rateo di equivalente di dose* quando ci si riferisce all'equivalente di dose ricevuto nell'unità di tempo. Esso si esprime in $\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$ o più comunemente in $\text{m Sv} \cdot \text{h}^{-1}$.

Per tener conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano per gli effetti stocastici (cfr. §7), si introduce *l'equivalente di dose efficace*, E , somma degli equivalenti di dose medi nei diversi organi e tessuti, HT , ciascuno moltiplicato per un fattore di ponderazione, w_T , che tiene appunto conto della diversa radiosensibilità degli organi irraggiati(*). I valori assunti nel D.Lgs. 230/95 per i w_T sono i seguenti: 0,25 per le gonadi, 0,15 per le mammelle, 0,12 per il midollo osseo rosso e per il polmone, 0,03 per la tiroide e per le superfici ossee, 0,06 per ciascuno dei rimanenti 5 organi più irraggiati.

Anche l'equivalente di dose efficace, per mezzo del quale si stabiliscono i limiti per le esposizioni non omogenee, si esprime in Sv.

Nel caso dell'introduzione di radionuclidi nel corpo umano (contaminazione interna) si deve tener conto che l'irraggiamento si protrarrà fin quando il radionuclide introdotto è presente nel corpo. La dose ricevuta da un certo organo o tessuto in tale periodo prende il nome di *equivalente di dose impegnata*. Nel caso dei lavoratori il calcolo della dose impegnata viene effettuato cautelativamente su un periodo di 50 anni a partire dall'introduzione.

(*) L'equivalente di dose efficace è quindi definito come: $HE=STwTHT$

4.1 Sorgenti di radiazioni ed equivalente di dose

Di seguito sono riportate le caratteristiche di tipiche sorgenti di radiazioni e dei relativi equivalenti di dose in relazione a sorgenti radioisotopiche (Tab. 4-8) e tubi a raggi X (Fig. 13).

Un attento esame di questi dati consente ai lavoratori di trarre utili informazioni sulle modalità di utilizzo di dette sorgenti in condizioni di sicurezza.

RADIOISOTOPI GAMMA-EMITTENTI

	Cr-51	I-125	U-nat (U-238)	Th-nat (Th-232)
PRODOTTO DEL DECADIMENTO	V-51	Tc-125	Th-234Pb-206	Ra-228Pb-208
T 1/2	27,7 gg	60 gg	4,5x10 ⁹ aa	1,4x10 ¹⁰ aa
RADIO-TOSSICITÀ (GRUPPO)	DEBOLISSIMA IV	ELEVATA II	DEBOLISSIMA IV	ELEVATA II
EMISSIONE (% ENERGIA)	gamma (3,8) 320 KeV	X (140) 27-32 KeV gamma (7) 36 KeV	ALFA (100) 4,2 MeV beta gamma	ALFA (100) 4 MeV beta gamma
I = $\frac{\mu\text{Sv cm}^2}{\text{h MBq}}$	50	200		
SENSIBILITÀ MODERATA (ESPOSIZIONE)	370	0.37	20-500 Bq	1 Bq
SCHEMATURE	Pb mm	Pb mm	Pb mm	Pb mm
RISCHIO DI INFEZIONE (ESPOSIZIONE)	35	78	100	
RISCHIO DI LESIONI (ESPOSIZIONE)	5-6	50-80		
LIMITE DI ESPOSIZIONE (ESPOSIZIONE)	2000 MBq	2 MBq	0.002 MBq	40 Bq

Tab.4

RADIOISOTOPI BETA - EMITTENTI

	H-3	C-14	P-32	P-33	S-35	Ca-45	Ni-63
PRODOTTO DEL DECADIMENTO	He-3	N-14	S-32	S-33	Cl-35	Sr-45	Cu-63
T 1/2	12.35 aa	5730 aa	14.29 gg	25.4 gg	87.44 gg	163 gg	96 aa
RADIO-TOSSICITÀ (GRUPPO)	DEBOLISSIMA IV	MODERATA III	MODERATA III	MODERATA III	MODERATA III	MODERATA III	MODERATA III
EMISSIONE (% ENERGIA)	BETA MENO	BETA MENO	BETA MENO	BETA MENO	BETA MENO	BETA MENO	BETA MENO
% EMISSIONE	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
ENERGIA MASSIMA (KeV)	18	155	1710	250	167	250	66
ENERGIA MEDIA (KeV)	5,7	49,5	694,7	76,6	48,8	77,2	17
PERCORSO IN ARIA (cm)	0,6	30	600	60	30	60	5
PERCORSO IN ACQUA (mm)	0,0052	0,29	8	0,6	0,32	0,6	0,067
MISURE (ESPOSIZIONE)	37	3,7	0,37	3,7	3,7	0,37	0,37
SCHEMATURE	NO	NO	1 cm plexi	NO	NO	NO	NO
LIMITE DI ESPOSIZIONE (ESPOSIZIONE)	60	95	98	96	95	96	85
LIMITE DI ESPOSIZIONE (ESPOSIZIONE)	3000	90	10	100	80	30	30

Tab. 5

RATEO DI EQUIVALENTE DI DOSE ALLA DISTANZA DI 1 METRO DA SORGENTI PUNTIFORMI DI g - EMITTENTI CON ATTIVITA' 37 MBq		
Radioisotopi	Energie g (MeV)	Rateo di Equivalente di Dose (m Sv h ⁻¹)
125I	36 keV (x: 27-32 keV)	0.74
99mTc	140 keV	0.74
51Cr	320 keV	0.74
60Co	1.17 (100%) 1.33 (100%)	13
131I	0.08 - 0.72	2.2
137Cs	0.66 (85%)	3.2
226Ra	0.047 - 2.4	8.25

Tab. 6

RATEO DI EQUIVALENTE DI DOSE A VARIE DISTANZE DA SORGENTI PUNTIFORMI DI BETA EMITTITORI CON ATTIVITA' 37 kBq			
Emax (MeV)	Rateo di equivalente di Dose (m Sv h ⁻¹)		
	10 cm	30 cm	100 cm
0.3	25	0.15	0
0.5	30	1.5	0
1.0	30	2.5	0.06
1.7	30	2.5	0.16
2.0	30	2.5	0.17
3.0	30	2.5	0.21

Tab. 7

RATEO DI EQUIVALENTE DI DOSE A VARIE DISTANZE AL DI SOPRA DI SUPERFICI UNIFORMEMENTE CONTAMINATE CON 4 Bq/cm ² DI RADIOISOTOPI BETA EMITTENTI			
Emax (MeV)	Rateo di equivalente di Dose (m Sv h ⁻¹)		
	1 cm	10 cm	100 cm
0.6	15	5	0
1.5	10	5.5	1.3
30	6	4.5	1.5

Tab. 8

**TIPICHE EMISSIONI DA UN GENERATORE DI RAGGI X
CON ANODO DI TUNGSTENO ALIMENTATO CON TENSIONE
COSTANTE.**

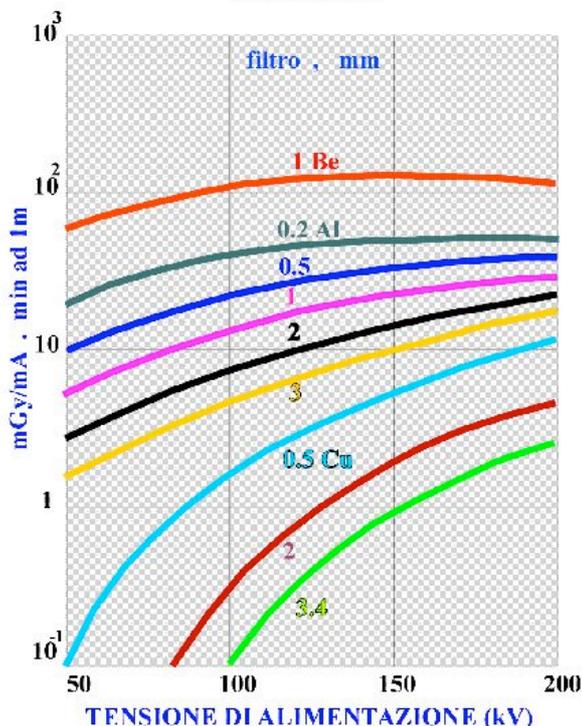


Fig. 13

5. LE RADIAZIONI IONIZZANTI E L'AMBIENTE IN CUI VIVIAMO

5.1 Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

Com'è noto, la radioattività è una normale componente dell'ambiente naturale. L'uomo è stato costantemente esposto alle radiazioni di origine naturale fin dal suo apparire sulla terra e queste sono rimaste l'unica fonte di irradiazione fino a poco meno di un secolo fa. Ancora adesso, malgrado il largo impiego di sostanze radioattive artificiali e di impianti radiogeni di vario genere, la radioattività naturale continua a fornire il maggior contributo alla dose ricevuta dalla popolazione ed è assai improbabile che ciò non continui a verificarsi anche in futuro.

Nella radioattività naturale si distinguono una componente di origine terrestre e una componente di origine extraterrestre. La prima è dovuta ai radionuclidi cosiddetti primordiali presenti in varie quantità nei materiali inorganici della crosta terrestre (rocce, minerali) fin dalla sua formazione. La seconda è costituita dai raggi cosmici. Quando ci si riferisce a queste sorgenti, si parla di fondo naturale di radiazioni.

I principali radionuclidi primordiali sono il K-40, il Rb-87 e gli elementi delle due serie radioattive dell'U-238 e del Th-232. Si tende in genere ad ignorare la serie dell'U-235, per la modesta abbondanza relativa del capostipite, anche se ciò può non essere giustificato in termini dosimetrici.

La concentrazione dei radionuclidi naturali nel suolo e nelle rocce varia fortemente da luogo a luogo in dipendenza della conformazione geologica delle diverse aree. In generale le rocce ignee e i graniti contengono U-238 in concentrazioni più elevate delle rocce sedimentarie come il calcare e il gesso. Alcune rocce sedimentarie di origine marina possono però contenere U-238 in concentrazione assai elevata. L'uranio, come anche il torio, è più abbondante nelle rocce acide che in quelle basiche.

Tipici valori di concentrazioni di attività nel suolo sono compresi tra 100, 700 Bq·kg⁻¹ per il K-40, tra 10, 50 Bq·kg⁻¹ per i radionuclidi delle serie radioattive dell'U-238 e del Th-232.

Nell'aria, la radiazione naturale è dovuta principalmente alla presenza di radon e toron, cioè di gas (7,5 volte più pesanti dell'aria) appartenenti alle famiglie dell'uranio e del torio. Il decadimento dell'uranio-238 porta infatti alla formazione di Ra-226 che, emettendo una particella alfa, decade in Rn-222, cioè radon; nella famiglia del torio, il decadimento del Ra-224 porta alla formazione del Rn-220, un gas chiamato toron (Fig. 14).

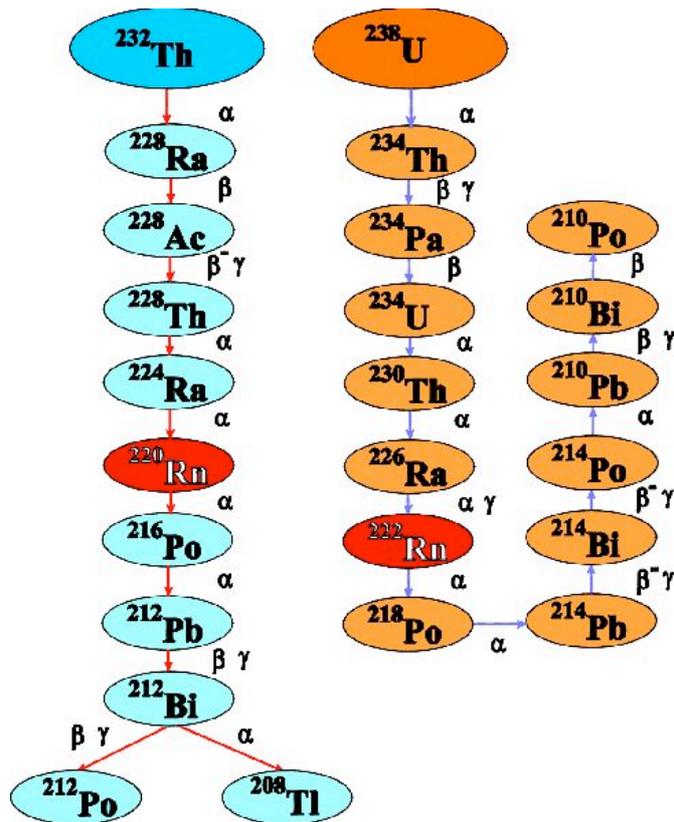


Fig. 14

Il radon-222 è 20 volte più importante del radon-220. Il contributo maggiore alla dose deriva dai figli del radon piuttosto che dal gas stesso e principalmente dalla sua inalazione in luoghi chiusi.

Numerosi materiali da costruzione emettono quantità relativamente modeste di radon. Molto più radioattivi sono il granito, la pietra pomice, alcuni prodotti di scarto usati nell'edilizia come il fosfato di gesso e le scorie di altiforni, nonché il tufo e la pozzolana, pure diffusamente utilizzati in edilizia. Tuttavia la principale sorgente di radon si situa quasi sempre nel terreno sottostante le case. I livelli di concentrazione nell'aria sono fortemente variabili a seconda delle condizioni ambientali. Sulla base degli esiti di una recente campagna nazionale, il valore medio della concentrazione di radon in aria nelle abitazioni italiane è risultato di 77 Bq·m⁻³. Le percentuali di case con concentrazioni superiori a 200 Bq·m⁻³ a 400 Bq·m⁻³ sono risultate rispettivamente il 5% e l'1%. Un livello di 200 Bq·m⁻³ implica una dose efficace di 3 mSv/anno.

Anche le acque contengono una certa quantità di radioattività, dovuta sia alle piogge che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia alle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici sostanze radioattive presenti nelle rocce e nel suolo. Significativamente radioattive sono le acque calde solfuree usate negli impianti termali, per produrre elettricità e per riscaldare gli edifici.

Attraverso la catena alimentare entrano nel corpo umano piccole quantità di sostanze radioattive. I principali radioisotopi presenti sono il K-40, il Ra-226, il Ra-228 e il C-14.

I raggi cosmici provengono, per la maggior parte, dal profondo spazio interstellare e sono costituiti principalmente da particelle cariche positivamente (protoni, alfa, nuclei pesanti), che quando giungono in prossimità della terra, risentono dell'azione derivante dal campo magnetico terrestre. C'è anche una componente solare che trae origine dalle esplosioni nucleari sul sole e consiste essenzialmente di protoni.

L'interazione di queste particelle di alta energia (raggi cosmici primari) con l'atmosfera terrestre comporta l'emissione di numerosi prodotti secondari, quali ad esempio mesoni (particelle di massa compresa tra l'elettrone ed il protone), elettroni, fotoni, protoni e neutroni che a loro volta possono creare altre particelle secondarie. Per la maggior parte i raggi cosmici primari vengono assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera e sulla terra i raggi cosmici secondari sono principalmente costituiti da mesoni, elettroni, fotoni, neutroni e protoni.

Ai poli il contributo di dose dovuto ai raggi cosmici è maggiore rispetto alle zone equatoriali, in quanto il campo magnetico della terra devia la radiazione. Il livello di dose aumenta con l'altitudine, con il ridursi dello spessore d'aria che fa da schermo. A 10 km di altitudine, ad esempio, l'esposizione alla radiazione cosmica è quasi 100 volte più elevata di quella a livello del mare. L'atmosfera produce infatti al livello del mare una protezione equivalente a quella di uno schermo di calcestruzzo di circa 4 m di spessore, mentre alla quota di 10000 m l'effetto di schermaggio si riduce a circa 1 m. L'esposizione alla radiazione cosmica è di notevole interesse per gli equipaggi degli aerei destinati ai voli intercontinentali (Fig. 15).

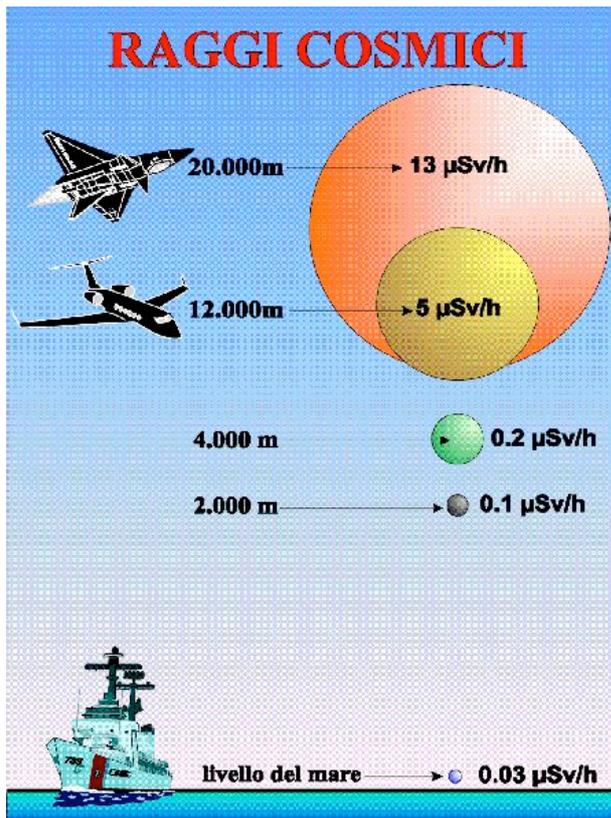


Fig. 15

In Tabella 9 sono riportati gli equivalenti di dose efficace ricevuti mediamente dalla popolazione mondiale che vive in aree a fondo naturale di radiazioni normale, secondo recenti stime dell'UNSCEAR.

Come si può notare, circa la metà della dose ricevuta è attribuibile all'inalazione dei discendenti a vita breve del radon-222 e del radon-220, prodotti di decadimento dell'U-238 e del Th-232.

Dosi esterne più elevate possono essere ricevute da gruppi di popolazione abitanti in località di alta montagna o in regioni a fondo naturale elevato.

TAB. 9 - Equivalenti di dose efficace annuali dovuti a sorgenti naturali di radiazioni ricevuti in aree con fondo normale (mSv/anno)

Sorgente	Irradiazione esterna	Irradiazione interna	Totale
Raggi cosmici			
Componente dirett. lon.	0,30		0,30
Neutroni	0,055		0,0055
Radionuclidi cosmogenici		0,015	0,0015
Radionuclidi primordiali			
K-40	0,15	0,18	0,33
Kb-87		0,006	0,006
U-238 (serie)	0,10	1,24	1,34
Th-232 (serie)	0,16	0,18	0,34
Totale (arrotondato)	0,8	1,6	2,4

In Fig. 16 sono riportati tipici valori di equivalente di dose ambientale in Italia.



Fig. 16

5.2 Sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti

L'impiego di radiazioni ionizzanti è diventato ormai essenziale in molte attività umane, nelle quali vengono abitualmente impiegate sorgenti di radiazioni prodotte dall'uomo. E' qui sufficiente limitarsi a ricordare l'impiego di radionuclidi artificiali e di macchine radiogene nei settori industriale, sanitario e della ricerca.

Numerosissime sono le sorgenti radioattive artificiali contenute in strumenti di uso quotidiano impiegate per le più svariate applicazioni industriali (rivelatori di incendio, rivelatori di livello, rivelatori di umidità e contenuto d'acqua, quadranti di orologio, sistemi antistatici, insegne luminose, etc.). Vengono inoltre usati, anche se più diffusamente in altri Paesi, dispositivi a raggi X e gamma (grandi irradiatorii, acceleratori di particelle) per la determinazione di difetti nelle saldature e nelle strutture di fusione, per la sterilizzazione di derrate alimentari e di prodotti medicali, etc.

Riferendosi al settore industriale, per la particolare situazione determinatasi nel nostro Paese, si è tralasciato di considerare i reattori di potenza per la produzione di energia elettrica, che costituiscono invece gli impianti industriali di maggior rilevanza in vari Paesi del mondo.

Per quanto riguarda il settore medico, è a tutti noto il diffusissimo impiego delle sorgenti di radiazioni sia in diagnostica che in terapia. Attualmente le applicazioni in questo settore costituiscono la seconda causa di esposizione della popolazione alle radiazioni ionizzanti e la maggior fonte di esposizione alle radiazioni artificiali. Oltre alle tradizionali apparecchiature a raggi X della radiologia, conviene ricordare l'utilizzazione dei radioisotopi nella medicina nucleare, ove si ricorre alla rivelazione dei radionuclidi iniettati nell'uomo per lo studio di numerosi processi e per la localizzazione di tumori. Questi radionuclidi vengono prodotti principalmente con i reattori nucleari, ma anche con gli acceleratori di particelle e, in primo luogo, con i ciclotroni. Conviene anche ricordare l'impiego degli acceleratori di particelle (soprattutto acceleratori lineari e betatroni) e dei radionuclidi (sorgenti di cesio e di cobalto) nella radioterapia tumorale. In questo ambito merita inoltre menzionare i notevoli sviluppi tecnologici verificatisi negli ultimi lustri con la produzione dei tomografi, che mediante raggi X e gamma forniscono immagini di organi con elevata soluzione spaziale (PET: tomografia ad emissione di positroni; TAC: tomografia assiale computerizzata a raggi X).

Dopo la scoperta del raggi X da parte di Roentgen nel 1895 e della prima reazione nucleare da parte di Lord Rutherford nel 1919, le radiazioni sono state infine impiegate sempre più estensivamente nel campo della ricerca, nelle più diverse discipline. Praticamente impossibile elencare tutti i settori di applicazione scientifica. Un cenno particolare merita però, per la enormi ricadute anche extra-scientifiche che ne sono conseguite, la ricerca nel campo della fisica nucleare che si svolge principalmente presso gli acceleratori di particelle. Nello studio della costituzione intima della materia uno degli aspetti più rilevanti è stato quello della identificazione delle cosiddette "particelle elementari", cioè di quelle particelle fondamentali di cui è composto il nostro universo. Con il procedere degli studi sono state identificate strutture interne in particelle precedentemente considerate "elementari", cioè indivisibili. Ad esempio, l'atomo è risultato composto di un nucleo ed elettroni, il nucleo è risultato a sua volta composto di neutroni e di protoni. In anni recenti anche questi hanno evidenziato una struttura interna fatta di quarks.

Questi studi vengono portati avanti facendo interagire le particelle accelerate ad alta energia con altre particelle. Più piccola è la struttura da evidenziare, più elevata è l'energia necessaria per evidenziarla. Di qui la necessità, per la ricerca fisica, di disporre di acceleratori sempre più potenti.

6. IRRADIAZIONE ESTERNA E IRRADIAZIONE INTERNA

Si è già detto che si parla di irradiazione o esposizione esterna quando la sorgente di radiazioni resta all'esterno del corpo umano. Quando la sorgente viene invece introdotta nell'organismo (contaminazione interna) si parla di irradiazione o esposizione interna. La contaminazione interna può verificarsi tutte le volte che si manipolano sorgenti non sigillate, sorgenti cioè prive di un involucro inerte o, se presente, non tale da prevenire, in condizioni normali di impiego, la dispersione delle materie radioattive.

Nel primo caso, i provvedimenti da adottare per ridurre l'esposizione e quindi le dosi ricevute sono piuttosto semplici. Essi consistono infatti nello:

- a) schermare la sorgente;
- b) aumentare la distanza tra sorgente e persona esposta;
- c) diminuire il tempo di esposizione.

Le regole sopra indicate restano valide, per quanto applicabili, anche nel caso della manipolazione di sorgenti non sigillate. Ad esse si devono però aggiungere appropriate procedure di igiene del lavoro (uso di indumenti protettivi, barriere di contenimento, etc.) che rendano di fatto del tutto improbabile l'introduzione della contaminazione nell'organismo umano. Merita ricordare infatti che, in materia di contaminazione interna, l'unica misura realmente efficace è proprio quella di prevenire qualsiasi introduzione.

7. EFFETTI SULL'UOMO DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

I danni prodotti dalle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono essere distinti in tre categorie principali:

- a) danni somatici deterministici;
- b) danni somatici stocastici;
- c) danni genetici stocastici.

Si dicono *somatici* i danni che si manifestano nell'individuo irradiato, *genetici* quelli che si manifestano nella sua progenie.

7.1 Danni somatici deterministici

Per *danni deterministici* s'intendono quelli in cui la frequenza e la gravità variano con la dose e per i quali è individuabile una dose-soglia. In particolare, i danni deterministici hanno in comune le seguenti caratteristiche:

- a) compaiono soltanto al superamento di una dose-soglia caratteristica di ogni effetto;
- b) il superamento della dose-soglia comporta l'insorgenza dell'effetto in tutti gli irradiati, sia pure nell'ambito della variabilità individuale; il valore della dose-soglia è anche in funzione della distribuzione temporale della dose (in caso di esposizioni protratte la soglia si eleva secondo un "fattore di protrazione");
- c) il periodo di latenza è solitamente breve (qualche giorno o qualche settimana); in alcuni casi l'insorgenza è tardiva (qualche mese, alcuni anni);
- d) la gravità delle manifestazioni cliniche aumenta con l'aumentare della dose.

Di grande importanza radioprotezionistica sono al riguardo i valori-soglia per i danni deterministici a carico dei testicoli, ovaie, cristallino e midollo osseo, per l'esposizione singola di breve durata e per l'esposizione protratta e frazionata, sia annuale che totale (Tab. 10).

TAB. 10 - Stima nell'individuo adulto della soglia di dose per danni non stocastici a carico dei testicoli, delle ovaie, del cristallino e del midollo osseo.

Tessuto ed effetto	Soglia di dose		
	Equivalente di dose totale ricevuto in una singola breve esposizione (Sv)	Equivalente di dose totale ricevuto per esposizioni fortemente frazionato o protratte (Sv)	Dose annuale se ricevuta per esposizioni fortemente frazionato o protratte per molti anni (Sv)
Testicoli			
Sterilità temporanea	0,15	NA (a)	0,4
Sterilità permanente	3,5	NA	2,0
Ovaie			
Sterilità	2,5-6,0	6,0	> 0,2
Cristallino	0,5-2,0	5,0	> 0,1
Opacità osservabili (b) 0,5-2,0 5,0 > 0,1	5,0	> 8,0	> 0,15
Deficit visivo (cataratta) 5,0 > 8,0 > 0,15			
Midollo osseo			
Depressione dell'emopoiesi	0,5	NA	> 0,4
Aplasia mortale	1,5	NA	> 1

(a) NA indica "Non applicabile", in quanto la soglia dipende dall'intensità di dose più che dalla dose totale.

(b) Opacità lenticolari appena osservabili.

Oltre alle sedi indicate nella Tabella II, anche per le radiolesioni cutanee causate da esposizione acuta alle radiazioni ionizzanti è possibile descrivere

un quadro clinico che comprenda i vari tipi di alterazione cutanea radioindotta con le relative dosi-soglia e gli andamenti evolutivi.

Per quanto riguarda l'irradiazione frazionata della cute, merita precisare in via indicativa che le dosi-soglia per ulcerazioni e fibrosi cutanee a 5 anni dal trattamento radioterapico con raggi X o radiazioni g (campo 100 cm²) sono state stimate come segue:

- dose che causa l'effetto in 1-5% dei pazienti: 55 Gy;
- dose che causa l'effetto in 25-50% dei pazienti: 70 Gy.

Nell'irradiazione cronica della pelle (soprattutto in corrispondenza delle mani) l'esperienza clinica, acquisita soprattutto nella "fase eroica" della radiologia, ha dimostrato che sono necessarie dosi di qualche decimo di Gy alla settimana e per lunghi periodi (molti mesi, anni) per causare una radiodermite cronica ("cute del radiologo").

Questa radiolesione cutanea è caratterizzata da cute secca e sottile, con verruche, ispessimenti irregolari dello strato corneo (ipercheratosi), dilatazione dei capillari venosi (telangiectasie), alterazioni delle unghie (onicopatia), stentata riparazione delle piccole ferite cutanee. In una frazione dei casi dopo molti anni può comparire un tumore (epitelioma) nell'ambito delle suddette alterazioni cutanee.

Un ulteriore riferimento a livello cutaneo è rappresentato dal fatto che alterazioni delle arteriole e venule dello strato inferiore della pelle (vasi dermici), sono svelabili, in assenza di segni clinici a carico della cute, con metodi diagnostici microscopici (capillaroscopia) soltanto per esposizioni a dosi dell'ordine di 10 - 30 Gy di radiazioni di basso LET (fotoni, elettroni) accumulate in un periodo di 8 - 25 anni.

Qualora l'irradiazione acuta avvenga al corpo intero o a larga parte di esso (irradiazione globale), viene a determinarsi, per dosi sufficientemente elevate, la cosiddetta *sindrome acuta da irradiazione*.

Questa sindrome è caratterizzata da tre forme cliniche (ematologica, gastrointestinale e neurologica) progressivamente ingravescenti che sopravvivono in funzione delle rispettive dosi-soglia (Tab. 11).

TAB. 11 - Sindrome acuta da irradiazione: forme cliniche ai vari livelli di dose assorbita (espressa in Gy)

	0,25	Sopravvivenza virtualmente certa
	1	Soglia della sindrome ematologica (ospedalizzazione)
Forma ematologica	1, 2	Sopravvivenza probabile
	2, 5	Sopravvivenza possibile
	5, 6	Sopravvivenza virtualmente impossibile
Forma gastrointestinale	6, 7	Soglia della sindrome gastrointestinale
Forma neurologica	10	Soglia della sindrome neurologica

Nella prima fase della sindrome acuta da irradiazione, particolare attenzione va rivolta all'insorgenza di sintomi, quali nausea e vomito: la brevità della latenza, l'intensità e la persistenza dei sintomi sono indicative della gravità della prognosi. Il vomito dovuto ad irradiazione compare in genere tra i 20 minuti e le 3 ore dopo l'esposizione. Qualora i sintomi dovessero insorgere oltre le prime 5-6 ore dall'esposizione è poco probabile che siano di natura radiopatologica.

In fase precoce possono comparire anche arrossamento degli occhi (iperemia congiuntivale) per dosi di 1,5 Gy ed oltre, e arrossamento cutaneo (eritema cutaneo), spesso fugace, per dosi di 5 Gy ed oltre.

La diminuzione delle cellule linfocitarie nel sangue circolante (linfopenia) rappresenta un indicatore particolarmente significativo della gravità dell'irradiazione.

L'improvviso e breve aumento delle cellule granulocitarie nel sangue circolante (punta ipergranulocitaria) osservabile nelle prime 24-36 ore, per quanto utile sul piano diagnostico, non riveste la stessa importanza clinico-dosimetrica della linfopenia.

Nel periodo di stato *della forma ematologica* (cioè nella fase conclamata della malattia) il quadro clinico è dominato da stato febbrile, infezioni (per riduzione nel sangue dei globuli bianchi neutrofilii o neutropenia) ed emorragie (per riduzione nel sangue delle piastrine o piastrinopenia).

Nella forma gastrointestinale prevalgono vomito, diarrea, squilibrio elettrolitico, febbre ed emorragie digestive. *Nella forma neurologica* sono presenti offuscamento della coscienza (obnubilamento del sensorio), disorientamento, convulsioni.

Le opacità del cristallino dell'occhio indotte dalle radiazioni ionizzanti rappresentano un tipico effetto deterministico tardivo (la latenza è in genere di alcuni anni per dosi non elevate). Merita precisare al riguardo che viene chiamata *cataratta una* qualsiasi opacità del cristallino sufficiente a provocare una diminuzione della vista.

La cataratta situata nella porzione posteriore del cristallino (varietà corticale subcapsulare posteriore), oltre ad essere radioindotta, può essere causata da molti altri fattori quali radiazioni infrarosse, radiofrequenze, ultrasuoni, sorgenti luminose di alta intensità, elettrocuzione, fattori chimici e farmacologici (per es. dinitrofenolo, naftalene, cortisonici, etc.). Le stesse caratteristiche anatomiche cliniche possono essere assunte dalla cosiddetta cataratta complicata, che accompagna alcune malattie oculari (cheratite suppurativa, iridociclite, miopia elevata, glaucoma, retinite pigmentosa, etc.) o che viene ad associarsi a malattie extraoculari (sindrome di Marfan, ittiosi, psoriasi, diabete, etc.).

Si consideri inoltre che in una non trascurabile percentuale della comune popolazione sono presenti a carico del cristallino opacità puntiformi non progressive che non disturbano la funzione visiva.

Queste opacità, localizzate nell'area centrale o periferica del cristallino, sono in genere multiple, molto piccole e di forma irregolare. In particolare, le opacità puntiformi cosiddette "malformative" possono essere distinte in congenite (embrionarie), situate in prevalenza nel nucleo centrale del cristallino, ed in post-natali (adolescenziali) localizzate alla sua periferia (localizzazione corticale periferica). Queste ultime, osservabili dilatando la pupilla (midriasi) con farmaci, presentano una incidenza intorno al 25% nella popolazione nel suo insieme. La frequenza delle opacità del cristallino nella comune popolazione (non esposta) aumenta con l'età.

7.2 Danni somatici stocastici

I danni somatici stocastici comprendono le leucemie e i tumori solidi. In questa patologia soltanto la probabilità d'accadimento, e non la gravità, è in

funzione della dose ed è cautelativamente esclusa l'esistenza di una dose-soglia. Danni di questo tipo hanno in particolare le seguenti caratteristiche:

- a) non richiedono il superamento di un valore-soglia di dose per la loro comparsa (ipotesi cautelativa ammessa per gli scopi preventivi della radioprotezione);
- b) sono a carattere probabilistico;
- c) sono distribuiti casualmente nella popolazione esposta;
- d) sono dimostrati dalla sperimentazione radiobiologica e dall'evidenza epidemiologica (associazione causale statistica);
- e) la frequenza di comparsa è maggiore se le dosi sono elevate;
- f) si manifestano dopo anni, talora decenni, dall'irradiazione;
- g) non mostrano gradualità di manifestazione con la dose ricevuta, quale che sia la dose;
- h) sono indistinguibili dai tumori indotti da altri cancerogeni.

Per i danni stocastici è ammessa in radioprotezione in via cautelativa una relazione dose-effetto di tipo lineare con estrapolazione passante per l'origine delle coordinate (assenza di soglia).

L'elaborazione della relazione dose-effetto è avvenuta nel corso degli anni sulla base di osservazioni epidemiologiche che riguardano esposizioni a dosi medio-alte (sopravvissuti giapponesi alle esplosioni atomiche, pazienti sottoposti ad irradiazioni per scopi medici, esposizioni lavorative). I dati epidemiologici sono abbastanza numerosi per le alte dosi, sono piuttosto rari per le dosi medie e mancano per le piccole dosi.

L'assenza di evidenza epidemiologica alle basse dosi può essere correlata alla possibile inesistenza degli effetti radioindotti, oppure al "mascheramento" degli stessi che, pur presenti, non si rendono intelligibili sul piano epidemiologico perché compresi nelle fluttuazioni statistiche dell'incidenza "naturale" o "spontanea" dei tumori. Pertanto, la stima del rischio di ammalare di leucemia o di tumore radioindotti viene abitualmente effettuata estrapolando alle basse dosi i dati delle alte dosi.

In seguito all'irradiazione è necessario considerare un periodo minimo di risposta clinicamente silente (latenza), seguito da un periodo a rischio, in cui è attesa la comparsa (a livello diagnostico) dei tumori dovuti alla radioinduzione.

Per tutte le forme di leucemia (esclusa la leucemia linfatica cronica per la quale manca la dimostrazione radioepidemiologica) e per il cancro osseo (da a del radio-224) i dati epidemiologici indicano un andamento temporale ad onda con inizio dopo circa 2 anni dall'esposizione e con un picco dopo 5 - 8 anni, seguito da un lento decremento fino al ritorno verso i valori dell'incidenza "naturale" entro 30 anni o meno dall'irradiazione.

Per le restanti "sedi" tumorali è stato stabilito un tempo minimo di risposta (latenza) di 5 anni seguito da un graduale e lento incremento della probabilità di comparsa fino a 10 anni e da un incremento costante, sempre in termini probabilistici, nel periodo successivo. Il periodo a rischio deve essere cautelativamente considerato esteso a tutta la comune durata della vita.

7.3 Danni genetici stocastici

Non è stato possibile sinora rilevare con metodi epidemiologici un eccesso di malattie ereditarie nella progenie di soggetti esposti alle radiazioni ionizzanti rispetto alla progenie di soggetti non esposti. Lo studio radioepidemiologico più importante è stato quello sui discendenti dei sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki, nel corso del quale è stato effettuato un confronto tra 30000 bambini di cui almeno uno dei genitori era stato irradiato e 40000 bambini i cui genitori non erano stati irradiati. Nessuna differenza statisticamente significativa è apparsa tra i due gruppi per quanto concerne lo sviluppo psicofisico, le malformazioni di origine genetica ed alcuni indicatori di natura citogenetica e biochimica.

Altre indagini condotte su popolazioni umane, per quanto di minore rilevanza, non hanno fatto evidenziare effetti genetici alla prima generazione. Sebbene non sia stato dimostrato a tutt'oggi nella specie umana che le radiazioni ionizzanti possono produrre danni ereditari, studi sperimentali su piante ed animali indicano che tali danni possono di fatto insorgere. Il rischio genetico nell'uomo viene pertanto calcolato per estrapolazione partendo dalle sperimentazioni sugli animali da laboratorio.

7.4 Irradiazione in utero (embrione e feto)

L'embrione e il feto sono sensibili alle radiazioni ionizzanti e, come avviene anche nell'esposizione agli altri agenti fisici e ad agenti chimici, questa sensibilità è variabile in funzione dello stadio di sviluppo.

Prima dell'impianto dell'embrione (nella specie umana al 9° giorno dalla fecondazione) gli effetti di una irradiazione sono del tipo "tutto-o-nulla". Questi effetti possono determinare infatti la morte dell'embrione (l'evento può passare inosservato perché la donna non sa ancora di essere incinta) o, in alternativa, non avere conseguenze sullo sviluppo e sulla sopravvivenza post-natale che possono quindi risultare del tutto normali (nello stadio di pre-impianto la morte di una o di alcune cellule, non ancora differenziate, può non essere grave).

Nel periodo di morfogenesi, compreso tra il 9° giorno e la fine del 2° mese di gravidanza, si fanno gli abbozzi dei vari organi e tessuti. In corrispondenza della fase di differenziazione e di organizzazione di ciascun tessuto è presente un'elevata radiosensibilità e in questa fase l'irradiazione può indurre più facilmente la comparsa di malformazioni.

Durante *la fase fetale* (dall'inizio del 3° mese fino al termine della gravidanza) la frequenza e la gravità delle malformazioni diminuiscono, mentre risulta rilevante il rischio di uno sviluppo difettoso del sistema nervoso centrale che resta radiosensibile per una buona parte di questo periodo. L'insieme delle osservazioni sull'uomo, e precisamente i dati di Hiroshima e Nagasaki, dimostrano che la sensibilità alle radiazioni ionizzanti del cervello del feto è massima tra l'8a e la 15a settimana dal concepimento. Durante questo periodo, i neuroblasti (elementi cellulari precursori dei neuroni) si moltiplicano in maniera esponenziale e migrano nella sede definitiva che è la corteccia cerebrale. Una irradiazione può interferire con questi complessi meccanismi evolutivi e quindi determinare un ritardo mentale. La sensibilità del sistema nervoso è minore di circa 4 volte tra la 16a e la 25a settimana dal concepimento ed è trascurabile o assente prima dell'8a settimana e dopo la 25a settimana.

In breve, malgrado che la sensibilità dell'embrione e del feto all'irradiazione sia presente in gradi molto variabili durante tutto il periodo di gestazione, lavori scientifici recenti confermano che il danno principale è il ritardo mentale. Non dovrebbe tuttavia essere apprezzabile alcun effetto sul quoziente di intelligenza fino a dosi dell'ordine di 0,1 Sv.

Nel periodo compreso tra la terza settimana dal concepimento e la fine della gestazione appare probabile che l'esposizione alle radiazioni possa determinare effetti stocastici che si esprimono come aumento della probabilità di neoplasie (soprattutto leucemie) in epoca post-natale. I dati disponibili, provenienti soprattutto da studi sulle madri sottoposte ad esami radiodiagnostici in gravidanza, non sono univoci e sussistono notevoli incertezze interpretative.

8. I PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA RADIOPROTEZIONE

La circostanza che nessuna esposizione alle radiazioni ionizzanti, per quanto modesta, possa essere considerata completamente sicura, ha spinto l'ICRP a raccomandare un sistema di protezione radiologica basato su tre fondamentali principi: *giustificazione della pratica*; *ottimizzazione della protezione*; *limitazione delle dosi individuali*. Detti principi sono stati pienamente recepiti nella normativa di legge italiana recentemente entrata in vigore, attraverso l'art. 2 del D.Lgs. 230/95, che ne stabilisce il rispetto, nella disciplina delle attività con rischio da radiazioni ionizzanti, nei termini seguenti:

a) *i tipi di attività che comportano esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere preventivamente giustificati e periodicamente riconsiderati alla luce dei benefici che da essi derivano;*

- 1. le esposizioni alle radiazioni ionizzanti debbono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali;*
- 2. la somma delle dosi ricevute e impegnate non deve superare i limiti prescritti, in accordo con le disposizioni del presente decreto e dei relativi provvedimenti applicativi.*

Si richiama in particolare l'attenzione sul secondo basilare principio, detto anche principio ALARA, attraverso il quale vengono di fatto stabiliti gli obiettivi di radioprotezione da osservare nelle varie attività, e con questi gli effettivi valori delle dosi che riceveranno i lavoratori e le persone del pubblico, di norma assai più modesti dei limiti individuali fissati con il terzo principio, che vengono così a rappresentare soltanto un'ulteriore garanzia per gli individui esposti. In una pratica appropriatamente ottimizzata raramente le dosi ricevute dai lavoratori potranno eccedere una modesta frazione dei limiti individuali raccomandati.

Per quanto riguarda questi ultimi, conviene qui riportare soltanto i più significativi di essi, per i lavoratori esposti e per le persone del pubblico.

Per i lavoratori esposti detti limiti sono:

- 100 mSv in 5 anni per l'equivalente di dose per esposizione globale e per l'equivalente di dose efficace, ma non più di 50 mSv in un anno solare;
- 13 mSv in un trimestre solare per l'equivalente di dose all'addome nel caso delle lavoratrici in età fertile;
- 150 mSv/anno per l'equivalente di dose al cristallino;
- 500 mSv/anno per l'equivalente di dose alla pelle;
- 500 mSv/anno per l'equivalente di dose a mani, avambracci, piedi, caviglie.

Per i lavoratori non esposti e per le persone del pubblico:

- 1 mSv/anno per l'equivalente di dose per esposizione globale e per l'equivalente di dose efficace;
- 15 mSv/anno per l'equivalente di dose al cristallino;
- 50 mSv/anno per l'equivalente di dose alla pelle;
- 50 mSv/anno per l'equivalente di dose a mani, avambracci, piedi, caviglie.

Nel caso dell'esposizione interna, la legge prevede anche limiti annuali di introduzione (ALI) dei vari radionuclidi nell'organismo umano, il cui rispetto garantisce quello dei sopra menzionati limiti primari di dose efficace. Qualora l'esposizione interna sia dovuta a inalazione, detti limiti di introduzione si devono intendere a loro volta rispettati se le concentrazioni in aria risultano inferiori ai pertinenti limiti derivati di concentrazione (DAC).

Il conseguimento degli obiettivi del sistema di protezione radiologica sopra descritto (prevenzione dei danni deterministici e limitazione degli eventi stocastici) sono demandati all'organizzazione della radioprotezione e in particolare alle azioni della *sorveglianza fisica e medica* della radioprotezione. La sorveglianza fisica viene assicurata tramite la figura *dell'esperto qualificato*, quella medica tramite il *medico addetto alla sorveglianza medica* (medico autorizzato, medico competente).

9. STRUMENTI OPERATIVI DI SORVEGLIANZA FISICA DELLA RADIOPROTEZIONE

L'esperto qualificato è persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari per misurare le radiazioni ionizzanti, per assicurare l'esatto funzionamento dei dispositivi di protezione, per dare le istruzioni e le prescrizioni necessarie a garantire la sorveglianza fisica della radioprotezione.

In questa sua veste fornisce al datore di lavoro, prima dell'inizio di qualsiasi attività con rischio da radiazioni ionizzanti, una consulenza in merito alla valutazione dei rischi che l'attività comporta e ai relativi provvedimenti di radioprotezione da adottare, redigendo apposita relazione.

Rientrano tra le competenze dell'esperto qualificato una serie di fondamentali azioni organizzative generali, le principali delle quali riguardano: la classificazione delle aree con rischio da radiazioni ionizzanti; la classificazione del personale ai fini della radioprotezione; la predisposizione delle norme interne di radioprotezione; la segnalazione mediante contrassegni delle sorgenti di radiazione; la predisposizione di un programma di informazione e formazione, finalizzato alla radioprotezione, allo scopo di rendere il personale edotto dei rischi specifici a cui è esposto.

Nell'ambito dell'esercizio dei propri compiti, l'esperto qualificato deve poi:

- esaminare i progetti degli impianti, rilasciando il relativo benestare;
- provvedere ad effettuare il collaudo e la prima verifica degli impianti;
- verificare periodicamente l'efficacia dei dispositivi ovvero delle tecniche di radioprotezione;
- effettuare il controllo periodico del buon funzionamento della strumentazione di radioprotezione;
- effettuare la sorveglianza ambientale;
- valutare le dosi ricevute dai lavoratori e le introduzioni dei radionuclidi;
- procedere alla valutazione sia in fase di progetto che di esercizio delle dosi ricevute o impegnate dai gruppi di riferimento della popolazione, in condizioni normali di lavoro e nel caso di incidenti; etc.

9.1 Classificazione delle aree

Nel D.Lgs. 230/95 si parla di *zone classificate* per gli ambienti di lavoro sottoposti a regolamentazione per motivi di protezione contro le radiazioni

ionizzanti. Le zone classificate possono essere *zone controllate* o *zone sorvegliate*.

E' classificata *zona controllata* ogni area di lavoro ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei seguenti valori:

- 6 mSv/anno per esposizione globale o di equivalente di dose efficace;
- 45 mSv/anno per il cristallino;
- 150 mSv/anno per la pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie.

E' classificata *zona sorvegliata* ogni area di lavoro, che non debba essere classificata zona controllata, ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei seguenti valori:

- 1 mSv/anno per esposizione globale o di equivalente di dose efficace;
- 15 mSv/anno per il cristallino;
- 50 mSv/anno per la pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie.

Nell'accertamento delle condizioni di cui sopra, l'esperto qualificato deve tener conto anche delle esposizioni conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata, ma non delle esposizioni accidentali o di emergenza.

L'individuazione e la classificazione delle aree ove sussiste rischio da radiazioni deve essere indicata per mezzo di relazione scritta al datore di lavoro ai sensi dell'art. 80, lettera a).

E' utile ricordare che, in aggiunta alle zone controllate e sorvegliate, nella sorveglianza operativa, si suole delimitare e regolamentare opportunamente anche le cosiddette *zone sorvegliate con esposizione minore dei limiti fissati per il pubblico*, aree ove non esiste il rischio di superamento dei limiti fissati per il pubblico ma è comunque presente una sorgente radiogena che viene sottoposta a sorveglianza radioprotezionistica.

Le zone controllate e sorvegliate sono segnalate mediante idonei cartelli di segnalazione posti in corrispondenza degli accessi, così come sono segnalate le fonti radiogene.

9.2 Classificazione dei lavoratori

Il D.Lgs. 230/95, come peraltro già il D.P.R. 185/64, prevede diversi adempimenti di sorveglianza fisica e medica a seconda della categoria in cui i lavoratori esposti al rischio da radiazioni ionizzanti vengono classificati. La classificazione di radioprotezione è quindi un'operazione preliminare, indispensabile per una corretta programmazione delle azioni di radioprotezione, e come tale deve essere effettuata prima di adibire il personale alle attività con rischio da radiazioni.

La classificazione di radioprotezione deve essere formulata dall'esperto qualificato, tenuto conto di tutte le attività svolte dal lavoratore per conto del datore di lavoro. La classificazione di radioprotezione viene formulata per mezzo della *scheda di radioprotezione* sulla base delle condizioni di lavoro come definite dal datore di lavoro. La scheda di radioprotezione deve essere quindi compilata prima che il lavoratore sia adibito alle attività lavorative con rischio da radiazioni ionizzanti.

Sulla base del D.Lgs. 230/95, i lavoratori devono essere distinti in *lavoratori esposti* e *lavoratori non esposti*.

Sono classificati *lavoratori esposti* i soggetti che, in ragione dell'attività svolta per conto del datore di lavoro, sono suscettibili di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore ad uno qualsiasi dei limiti per le persone del pubblico.

Sono considerati *lavoratori non esposti* i soggetti sottoposti, in ragione dell'attività svolta per il datore di lavoro, ad una esposizione non superiore ad uno qualsiasi dei sopra riportati limiti fissati per le persone del pubblico.

I lavoratori esposti devono essere ulteriormente suddivisi in due categorie, A e B.

Appartengono alla *categoria A* i lavoratori suscettibili di un'esposizione superiore a uno dei seguenti valori:

- 6 mSv/anno per esposizione globale o di equivalente di dose efficace;
- 45 mSv/anno per il cristallino;
- 150 mSv/anno per la pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie.

I lavoratori esposti non classificati in *categoria A* sono classificati in *categoria B*.

Nell'accertamento delle condizioni di appartenenza all'una o all'altra delle due categorie, l'esperto qualificato deve tener conto anche delle esposizioni conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata, ma non delle esposizioni accidentali o di emergenza.

Per tale motivo è stato assunto come criterio conservativo quello di assegnare alla categoria dei lavoratori esposti di tipo B anche il lavoratore che impieghi soluzioni non sigillate di radioisotopi tali da non comportare il rischio di superamento dei limiti fissati per il pubblico, ma in quantitativi istantanei superiori agli ALI con frequenza non saltuaria (almeno mensile).

Il D.Lgs. 230/95 ha poi introdotto la categoria degli *apprendisti e studenti esposti* al rischio da radiazioni ionizzanti, che devono essere suddivisi in relazione all'età e al tipo di attività lavorativa o di studio nei seguenti gruppi:

- a) apprendisti e studenti, di età non inferiore a 18 anni, che si avviano a una professione nel corso della quale saranno esposti alle radiazioni ionizzanti, o i cui studi implicano necessariamente l'impiego di sorgenti di radiazioni ionizzanti;
- b) apprendisti e studenti, di età compresa tra 16 e 18 anni, che si trovino nelle condizioni di cui alla precedente lettera a);
- c) apprendisti e studenti, di età non inferiore a 16 anni, che non si trovino nelle condizioni, di cui alla precedente lettera a);
- d) apprendisti e studenti, di età inferiore a 16 anni.

Agli apprendisti e studenti di cui al precedente punto a) si applicano le stesse modalità di classificazione stabilite per i lavoratori. Possono quindi essere inclusi nelle categorie A e B dei lavoratori esposti o in quella dei lavoratori non esposti.

Per i lavoratori di cat. A sono previste la sorveglianza fisica individuale e la sorveglianza medica, con frequenza semestrale dei controlli, effettuata da parte del medico autorizzato. Per i lavoratori di cat. B, la sorveglianza fisica individuale può essere sostituita con quella ambientale e i controlli medici, effettuati dal medico autorizzato o dal medico competente, hanno frequenza annuale.

9.3 Norme interne di radioprotezione

Le norme interne di radioprotezione sono lo strumento per mezzo del quale vengono disciplinate le attività radiologiche intorno a ciascun impianto o sorgente di radiazioni. In esse vengono in particolare specificate le regole da seguire per l'accesso e la permanenza nelle zone classificate ovvero per

la manipolazione e l'utilizzo delle sorgenti radioattive. Vi sono inoltre descritti i sistemi di segnalazione, sicurezza ed emergenza, specificate le responsabilità dei dirigenti e dei preposti e dei preposti e illustrate le azioni da assicurare in condizioni di emergenza. Le norme interne sono predisposte dall'esperto qualificato ed emanate dal datore di lavoro. I lavoratori sono tenuti ad osservare le disposizioni in esse contenute.

9.4 La dosimetria individuale

Nel caso dell'irradiazione esterna, la valutazione della dose individuale ricevuta dai lavoratori viene di norma effettuata mediante dosimetri individuali, le cui letture vengono integrate con i risultati della dosimetria ambientale. Le norme interne di radioprotezione specificano le circostanze nelle quali detti strumenti sono obbligatori. I controlli di cui trattasi vengono abitualmente effettuati con varie apparecchiature: dosimetri a termoluminescenza (cards, chips, bulbi), dosimetri individuali a lettura diretta, dosimetri individuali elettronici, rivelatori a tracce, dosimetri a film, dosimetri a TLD, etc.

A proposito dell'uso pratico di questi strumenti conviene ricordare che il dosimetro per il corpo intero (film-badge) devono essere indossati all'altezza del petto, salvo diversa indicazione da parte dell'esperto qualificato. E' consigliabile in linea di massima attaccarli al bavero del camice o di altro indumento ovvero tenerli nel taschino della giacca. Nel caso di impiego di camice piombifero il dosimetro deve essere di norma indossato sopra il camice salvo diversa prescrizione dell'Esperto Qualificato. Contrariamente il dosimetro per le estremità (anello TLD) deve essere indossato sotto i guanti di lattice o di gomma piombifera. Si ricorda inoltre che i dosimetri personali non devono mai essere lasciati sui tavoli di lavoro o altrove; non devono mai essere scambiati con quelli di altre persone o essere usati per scopi diversi da quelli per cui sono stati assegnati; al termine del lavoro, devono essere riposti nelle apposite bacheche; il loro eventuale smarrimento deve essere immediatamente segnalato all'esperto qualificato.

Conviene infine osservare che il portare un dosimetro di per sé non serve a prevenire l'esposizione alle radiazioni. Tuttavia la conoscenza del dato dosimetrico consente di programmare opportunamente le successive esposizioni, in modo da mantenere la dose ricevuta da ciascun lavoratore quanto più bassa possibile e comunque al di sotto dei limiti stabiliti dalle vigenti leggi.

10. RISCHI DA RADIAZIONI IONIZZANTI PRESSO LE STRUTTURE DELL'UNIVERSITA' DI PADOVA

10.1 Servizio di Radioprotezione

In applicazione della normativa in materia di energia nucleare ed in particolare del D.P.R. 185/64, il Consiglio di Amministrazione dell'Università degli Studi di Padova nella seduta del 2/2/79 ha approvato l'istituzione di un Servizio di Radioprotezione con il compito iniziale di inventariare tutte le attività con rischi da radiazioni ionizzanti presenti nell'ambito universitario evidenziando le carenze e le inadempienze normative.

Il Servizio, articolato in due Sezioni, una Fisica e una Medica, ha successivamente organizzato e messo in atto la prescritta sorveglianza fisica e medica della radioprotezione servendosi dell'apporto di Esperti Qualificati, Medici Autorizzati e personale tecnico e amministrativo ed individuando una sede operativa dotata di idonea strumentazione ed un sistema di gestione dei dati (archivio dosimetrico e sanitario).

LEGISLAZIONE IN MATERIA DI RADIAZIONI IONIZZANTI

LEGGE 31-12-1962, N. 1860

Impiego pacifico dell'energia nucleare

D.P.R. 13-2-1964, N. 185

Sicurezza degli impianti e protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti derivanti dall'impiego pacifico dell'energia nucleare

D. Lgs. 17-3-1995, N. 230

Attuazione delle Direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti

Oltre a supportare a termine di legge l'operato degli Esperti Qualificati e dei Medici Autorizzati, il Servizio di Radioprotezione ha continuato a svolgere il suo compito principale di garantire l'espletamento degli obblighi normativi del datore di lavoro, dei dirigenti e dei preposti, nel campo dell'impiego pacifico dell'energia nucleare in ambito universitario.

In generale il Servizio di Radioprotezione:

- 1) predispone le condizioni affinché il datore di lavoro (Magnifico Rettore), i dirigenti (Direttori e Primari) e i preposti (Responsabili operativi delle attività) ottemperino agli obblighi di legge: in particolare attuare le cautele di protezione e sicurezza, stilare le norme di radioprotezione, fornire ai lavoratori i mezzi di protezione e quelli per la sorveglianza dosimetrica, rendere edotti i lavoratori dei rischi, disporre l'osservanza delle norme da parte dei lavoratori;
- 2) coordina l'organizzazione all'interno dei vari Istituti delle attività con rischi da radiazioni ionizzanti curando gli aspetti radioprotezionistici (registri di carico-scarico, registri di contaminazione superficiale, modulistica sulle modalità di lavoro, modalità di accesso alle zone con rischio, etc.);
- 3) tramite gli Esperti Qualificati valuta gli aspetti fisici del rischio da radiazioni ionizzanti in relazione alle sorgenti utilizzate, agli ambienti e alle modalità di lavoro, ai limiti e alle cautele previste dalla normativa;
- 4) tramite i medici autorizzati e competenti valuta gli aspetti medici del rischio da radiazioni ionizzanti sottoponendo il personale esposto a visite mediche e accertamenti clinico-diagnostici;
- 5) espleta le attività burocratico-amministrative;
- 6) gestisce l'utilizzo della strumentazione radioprotezionistica in dotazione;
- 7) fornisce consulenze su strumentazione, tecniche di lavoro, iter autorizzativi, modalità di smaltimento.



Fig. 17



Fig. 18

10.2 Tipologia delle sorgenti

Le principali sorgenti di radiazioni ionizzanti presenti presso le strutture dell'Università di Padova sono costituite prevalentemente da macchine radiogene e da soluzioni non sigillate di radioisotopi oltre a vari altri tipi di sorgenti radioattive sigillate e non.

MACCHINE RADIOGENE

TUBI A RAGGI X
PER
DIAGNOSTICA

MICROSCOPI
ELETTRONICI

DIFFRATTOMETRI E
SPETTROMETRIA
FLUORESCENZA X

TUBI RX PER
APPLICAZIONI
PARTICOLARI
DI RICERCA

RADIOISOTOPI

SOLUZIONI NON
SIGILLATE DI
 H^3 , C^{14} , P^{32} , P^{33} , S^{35} , Ca^{45} ,
 Cr^{51} , Te^{99} , Tc^{99m} , In^{111} , I^{125} ,
 I^{131}

SALI DI URANIO
NATURALE E TORIO
NATURALE

SORGENTI DI
CALIBRAZIONE
SIGILLATE E NON
 Cs^{137} , Am^{241} , Co^{60} , Fe^{59} ,
 Eu^{152} , Sr^{90} , Na^{22} , Ra^{226}

SORGENTI PER
APPLICAZIONI
PARTICOLARI DI
RICERCA
 Cs^{137} , Am^{241} , Co^{57} ,
 Sr^{90}

Fig. 19

10.3 Tipologia del rischio radiogeno

Per quanto riguarda la tipologia del rischio radiogeno associato all'impiego e/o alla detenzione di tali sorgenti sono presenti rischi di sola esposizione esterna nell'impiego delle macchine radiogene; i rischi sono presenti solo durante la produzione di raggi X e sono assenti subito dopo l'irraggiamento oltre che ovviamente quando la macchina radiogena non è funzionante, potendosi escludere fenomeni di attivazione date le energie utilizzate dalle macchine in dotazione ($E \ll 10$ MeV). In generale tutte le installazioni presenti presso l'Ateneo sono strutturate con barriere protettive costituite sia dalle strutture murarie che da pannelli in materiale ad alto numero atomico (in generale piombo) che consentono agli operatori e alla popolazione di mantenersi in condizioni di sicurezza e protezione durante il funzionamento.

Per quanto riguarda i radioisotopi sono presenti rischi di esposizione esterna, che dipendono dall'energia della radiazione emessa oltre che dal tipo di radiazione (α , β , γ , X, n), essendo legati al suo potere di penetrazione. Tali rischi sono presenti in continuo, sia durante l'impiego che durante la sola conservazione delle sorgenti. A tali rischi si aggiungono quelli di esposizione interna qualora le sorgenti siano di tipo non sigillato. Il rischio prevalente di contaminazione, che può essere dovuto al contatto (contaminazione cutanea), all'ingestione indiretta tramite contatto e all'inalazione cronica (contaminazione delle superfici e inalazione del particolato) o acuta (direttamente dalla soluzione), è quello da inalazione cronica.

In generale quasi tutti i laboratori presenti presso l'Ateneo sono dotati di sistemi di aspirazione per il ricambio dell'aria ambiente o di aspirazione dedicata mediante cappe per radiochimica. Le superfici dei pavimenti e per particolari laboratori anche di pareti e soffitto, sono costituite da materiale liscio e raccordato senza spigoli per una facile pulizia che minimizza la presenza di particolato e quindi la risospensione ed inalazione. In molti casi sono presenti strutture di contenimento per confinare il rischio di contaminazione. L'impiego di indumenti dedicati, come ad esempio i guanti di lattice, i camici, a volte le mascherine o i paraspruzzi, riduce poi ulteriormente i rischi di contaminazione della cute.

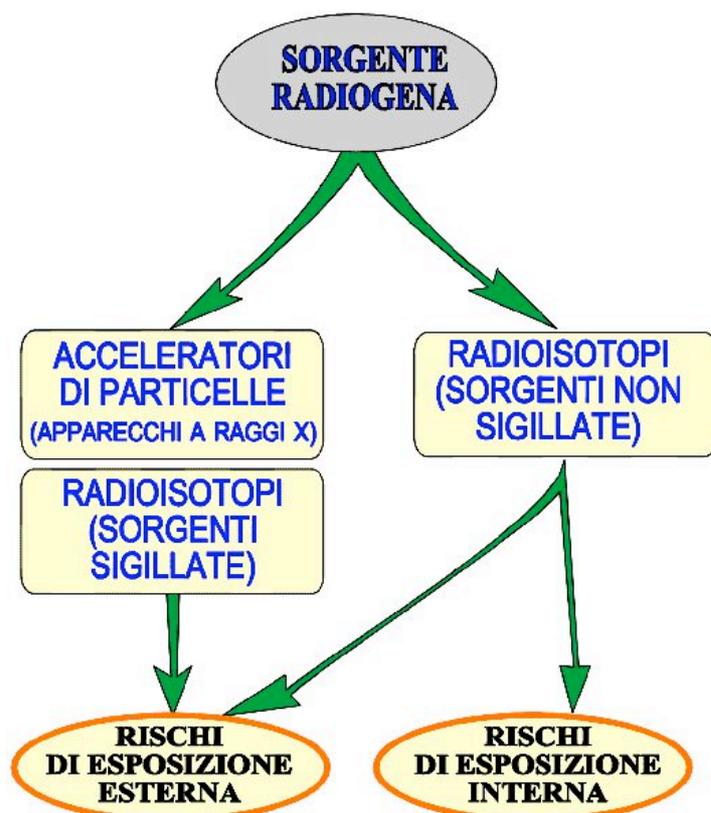


Fig. 20

10.4 Valutazione del rischio radiogeno

La valutazione del rischio radiogeno presente nelle attività svolte presso l'Ateneo viene effettuata con modalità diverse in funzione della sorgente utilizzata. In generale per le apparecchiature a raggi X, alla fase di progettazione teorica delle barriere, in funzione di un carico di lavoro stimato conservativamente per eccesso e delle destinazioni e frequenze dei locali anche confinanti, segue una prima verifica con misure dirette dei campi di irradiazione nelle condizioni di lavoro. Tenuto conto delle situazioni anche più gravose che possono verificarsi e di eventi anomali, si procede alla stima delle dosi nelle varie postazioni o per vari metodiche di lavoro indicando se del caso delle limitazioni o degli accorgimenti per mantenere il rischio entro certi limiti.

Per quanto riguarda i radioisotopi sigillati gli eventuali rischi di esposizione esterna vengono valutati in analogia alle macchine radiogene, in funzione dei tempi di esposizione e delle metodiche di lavoro. Molto diverso è il caso dell'impiego di radioisotopi non sigillati.

In questo caso, oltre ad un eventuale rischio di esposizione esterna (per radiazioni X, g o b energetici) valutabile come per le macchine radiogene, è presente un rischio di contaminazione interna. La valutazione procede in questo caso per ipotesi, sempre conservative, su una serie di parametri che consentono poi di valutare la quantità di radioisotopo introdotta, che viene raffrontata con i limiti annui di incorporazioni (ALI) di cui è nota la dose associata.

I parametri considerati sono i quantitativi di radioisotopi manipolati, i tempi di manipolazione, i ricambi d'aria ambiente, la superficie interessata dalla contaminazione, i fattori di risospensione, i ratei inalatori, la frequenza delle manipolazioni. Si arriva in tal modo a calcolare la frazione di ALI incorporabile e si può così effettuare una classificazione di rischio sia delle aree che degli operatori.

10.5 Monitoraggio del rischio

Tutte le valutazioni effettuate, sia tecniche che sperimentali sono soggette a periodica verifica con misure e valutazioni sul campo mediante una serie di strumenti in dotazione al Servizio di Radioprotezione e ai singoli laboratori o strutture.

Per tali misure sono a disposizione strumenti portatili (camere a ionizzazione, cristalli a scintillazione, Geiger-Muller, contaminometri, dosimetri personali istantanei e non, campionatori d'aria, fantocci, multimetri per controlli di qualità, catena spettrometrica g portatile) e strumenti da laboratorio (catene spettrometriche a, b, X-g con cristalli di NaI e di HPGe, dispositivo per la misura della iodocaptazione tiroidea, lettore di dosimetri a termoluminescenza, attrezzatura per la preparazione di sorgenti di calibrazione).

Di norma le misure ambientali vengono effettuate su ogni area di rischio con frequenza annuale o in tempo reale in caso di segnalazione di eventi anomali o di incidenti.

Nel caso particolare di impiego di radioisotopi non sigillati vengono organizzati controlli di contaminazione superficiale (vedi Appendice per le modalità di decontaminazione) con frequenza quindicinale o mensile a cura degli utilizzatori secondo un protocollo predisposto dall'Esperto Qualificato che lo verifica periodicamente.

10.6 Iter autorizzativi

Chiunque intenda iniziare una attività con rischio da radiazioni ionizzanti presso l'Università di Padova, sia dipendente o dipendente equiparato (studente, borsista, specializzando, laureando, dottorando, etc.) che dipendente da terzi, deve compilare la scheda di destinazione lavorativa e inviarla al Servizio di Radioprotezione, Via Marzolo 3/a - Padova. Di tale scheda, i cui modelli sono a disposizione presso il Servizio di Radioprotezione e le amministrazioni degli Istituti/Dipartimenti, deve essere tenuta copia presso la struttura di lavoro e copia deve essere conservata dal lavoratore per verificare nel tempo se la segnalazione inviata al Servizio di Radioprotezione corrisponde con l'attività effettivamente svolta, aggiornandola con una nuova scheda ad ogni cambiamento (ad esempio aggiunta di un nuovo radioisotopo, variazione consistente delle aree di lavoro con rischio da radiazioni, cambio di qualifica, etc.).

A seguito dell'invio, il lavoratore riceve via posta la comunicazione di assegnazione alla categoria di rischio radiogeno, preceduta per i casi di "esposizione di tipo A o B", dalla convocazione per gli accertamenti medici. Solo dopo tale comunicazione il lavoratore può iniziare l'attività indossando gli eventuali dosimetri individuali che il Servizio di Radioprotezione provvede a fornirgli e a sostituire periodicamente, su indicazione dell'Esperto Qualificato, contattando l'interessato o un incaricato alla struttura. La valutazione di rischio e quindi l'impiego dei dosimetri individuali o gli accertamenti medici dipendono fortemente da quanto indicato nella scheda che deve pertanto indicare quanto più possibile la situazione lavorativa reale.

Le attività indicate nella scheda devono essere già state sottoposte a benessere radioprotezionistico a cura dell'Esperto Qualificato presso la struttura di lavoro.

Per nuove attività (quali ad esempio l'impiego di un nuovo apparecchio Rx o di un nuovo radioisotopo o di un radioisotopo in quantitativi superiori a quelli limite esposte nel laboratorio tramite apposita scheda in busta a sacchetto), bisogna preventivamente contattare il Servizio di Radioprotezione che provvederà a valutare la compatibilità con la normativa, la tipologia del rischio, l'adeguatezza delle strutture, ed a istituire le eventuali pratiche autorizzative. Solo dopo il benessere radioprotezionistico inviato per posta alla Direzione della struttura potrà essere iniziata l'attività.

10.7 Rischio presso sedi esterne

Molti dipendenti dell'Università degli Studi di Padova svolgono attività con rischio da radiazioni ionizzanti presso altre strutture di ricerca o di tipo sanitario.

Salvo casi particolari di accordi tra le strutture, è necessario che prima di iniziare l'attività presso una struttura esterna, il dipendente universitario invii al Servizio di Radioprotezione una scheda di radioprotezione indicando gli estremi della struttura al fine di consentire un contatto con la stessa e concordare le cautele di radioprotezione prescritte dalla normativa. Si dovranno in particolare valutare i rischi presso la struttura ospitante, la necessità dell'uso di dosimetri individuali e il reperimento dei responsi dosimetrici oltre a particolari cautele e protezioni nell'attività.

Il lavoratore dovrà essere reso edotto delle norme interne di radioprotezione vigenti presso la struttura ospitante e le regole da seguire.

APPENDICE

MODALITA' DI DECONTAMINAZIONE

CONTAMINAZIONE RADIOATTIVA

1.1 Contaminazione della persona

1.1.1 Mani

1.1.2 Altre parti del corpo

1.1.3 Ferite

1.1.4 Mucose visibili

1.1.5 Assorbimento digestivo

1.1.6 Vie respiratorie

1.2 Contaminazione dell'ambiente

1.2.1 In breve

CONTAMINAZIONE RADIOATTIVA Nel caso di versamento di materiale radioattivo è necessario, in generale:

- limitare l'introduzione nel corpo dei contaminanti radioattivi per inalazione, ingestione o contatto
- limitare l'estendersi della zona contaminata, circoscrivendola adeguatamente
- rimuovere la contaminazione.

Mentre in alcune situazioni è necessario privilegiare l'intervento sulla dispersione di materiale radioattivo al fine di limitare l'impatto diretto dell'incidente (versamento di grande quantità di liquido a bassa attività senza il coinvolgimento di persone) in altri casi è necessario intervenire in via prioritaria direttamente sulle persone contaminate (contaminazione diretta con liquido radioattivo in prossimità di ferite, mucose, ustioni, con possibilità di ingestione o inalazione).

La priorità degli interventi dipende, evidentemente, dalla valutazione effettuata dagli operatori presenti rispetto alla gravità della contaminazione delle persone e dell'ambiente; in base a tale valutazione dovranno immediatamente essere avvisati il Responsabile dell'attività, l'Esperto Qualificato ed il Medico Autorizzato.

1.1 Contaminazione della persona Lo stesso soggetto contaminato, con l'aiuto dei colleghi che indosseranno camice, guanti e mascherina, se necessario, deve provvedere alla prima decontaminazione sul posto cercando di evitare:

- il passaggio della contaminazione dall'esterno all'interno del corpo;
- il trasferimento della contaminazione a parti del corpo non contaminate;
- di contaminare i soccorritori.

Si dovrà:

- Tamponare con carta assorbente la zona della pelle o gli abiti sui quali è avvenuto il versamento.
- Togliere gli indumenti contaminati (si può agire efficacemente tagliandoli) unitamente ai mezzi protettivi (maschere, guanti, etc); riporre tali oggetti in sacchetti di plastica in modo da evitare la contaminazione di altri oggetti e dell'area. Porre attenzione a non contaminare occhi, bocca e narici.
- Tagliare la ciocca di capelli eventualmente contaminata; non fare assolutamente lo shampoo.
- Misurare la contaminazione dell'area interessata.
- Lavare solo la parte contaminata con acqua corrente tiepida (non usare acqua calda), cercando di non estendere la contaminazione e facendo attenzione a non danneggiare la pelle.
- Per tali operazioni utilizzare il lavello dell'area di decontaminazione ovvero quello del laboratorio raccogliendo i liquidi di risciacquo che, se contaminati, saranno eliminati come rifiuto radioattivo.
- Sospendere la decontaminazione esterna se compaiono segni di irritazione cutanea.

In particolare:

1.1.1 Mani

A. Lavare per 2' con sapone e spazzola morbida insistendo fra le dita e sotto le unghie. Sciacquare per 1'. Ripetere due volte il trattamento. Controllare con un monitor se la radioattività e' scesa rispetto al controllo iniziale.

B. Lavare per 2' con citrosil. Sciacquare per 1'. Ripetere il trattamento. Lavare per 2' con sapone e spazzola indi sciacquare per 1'. Effettuare un controllo.

Se persiste contaminazione:

C. Strofinare con spazzola morbida con pasta al biossido di titanio (senza farla essiccare) per 5'. Sciacquare per 1'. Lavare con sapone e spazzola per 2'. Sciacquare per 1'. Effettuare un controllo.

Se persiste contaminazione:

D. Ungere con pasta Fissan. Fasciare. Contattare il medico autorizzato.

1.1.2 Altre parti del corpo

A. Come le mani.

B. Non praticare la doccia.

C. Evitare ogni rasatura.

In caso di contaminazione diffusa senza ferite:

A. Liberare il sospetto di tutti gli indumenti contaminati.

1.1.3 Ferite

Far sanguinare abbondantemente e lavare ripetutamente con acqua. Praticare una prima medicazione.

1.1.4 Mucose visibili

A. Occhi: acqua corrente per 5' (o soluzione fisiologica)

Soluzione ipertonica (NaCl 1.4%).

B. Naso: soluzione ipertonica (NaCl 1.4%) con irrigatore nasale.

C. Orecchio esterno: irrigazione copiosa con acqua o soluzione fisiologica.

D. Bocca: sciacquare con acqua o soluzione fisiologica.

1.1.5 Assorbimento digestivo

Deve essere impedito favorendo il vomito con stimolazione meccanica dell'orofaringe con un dito, oppure con emetina (iniezione intramuscolare o sottocutanea).

Purgante salino (solfato di magnesio 250 cc vol. 10%).

1.1.6 Vie respiratorie

In caso di contaminazione da inalazione da iodio conviene provocare il "blocco della tiroide", cioè dell'organo critico somministrando iodio stabile il quale impedisce l'assorbimento nella tiroide dei relativi isotopi radioattivi che non sono stabili.

Pertanto, entro i primi minuti e comunque non più tardi di qualche ora bisogna somministrare:

- poche gocce della normale tintura di iodio diluite in poca acqua. Oppure:

- Alcune gocce di liquido di Lugol (soluzione acquosa contenente il 5% di iodio ed il 10% di ioduro di potassio).

La somministrazione di Lugol e' efficace anche se la contaminazione e' per via orale (100-200 mg di KI).

N.B.: in tutti i trattamenti e' importante cercare di mantenere integra la cute e/o le mucose; in caso di arrossamento, sospendere il trattamento.

1.2 Contaminazione dell'ambiente

In caso di spargimento di materiale radioattivo sul pavimento, su superfici o attrezzature, per impedire la diffusione di radioattività sia nell'ambiente che alle persone, l'operatore deve:

- Avvisare verbalmente tutte le persone presenti nelle vicinanze;
- Limitare l'ingresso all'area contaminata ed i movimenti al suo interno. Il personale non necessario alle operazioni di decontaminazione deve lasciare il laboratorio solo dopo essersi sottoposto ai necessari controlli di contaminazione;
- Indossare i guanti, la mascherina e se necessario le soprascarpe; questi indumenti con la carta assorbente, i sacchetti di polietilene e le opportune soluzioni decontaminanti dovrebbero essere contenuti entro un armadietto "presidio di radioprotezione" che dovrebbe trovarsi in ogni laboratorio di radioanalisi;
- Chiudere la sorgente da cui è originata la contaminazione e metterla al sicuro;
- Arrestare tutti i ventilatori che eventualmente convogliano aria in altre zone dell'edificio, arrestare le cappe;
- Applicare sostanze assorbenti, come ad esempio carta assorbente, sopra l'area contaminata;
- Circonscrivere o delimitare l'area contaminata con appositi contrassegni e porre ben in vista un cartello con segnale di pericolo di contaminazione

radioattiva;

- Evitare di sollevare polvere e di spargere la contaminazione.

L'operatore di concerto con il Responsabile di attività deve inoltre:

- Rimuovere immediatamente la contaminazione radioattiva;
- Utilizzare pinze, scopa e paletta per rimuovere il materiale assorbente, strofinare la zona circoscritta con tamponi imbevuti di soluzione detergente. Ripetere l'operazione sino a che il controllo della contaminazione (smear-test o contaminometro) mostrerà che la contaminazione è stata rimossa. Eliminare tutto il materiale raccolto come rifiuto radioattivo. Durante tali operazioni cambiare spesso i guanti e toglierli insieme alle soprascarpe, se si lascia il laboratorio;
- Decontaminare, se riutilizzabile, il materiale utilizzato per la decontaminazione che altrimenti sarà da considerarsi rifiuto radioattivo;

Nel caso in cui non si riesca a rimuovere la contaminazione, isolare la zona con un foglio di polietilene sigillato ai bordi con nastro adesivo, identificandola con il cartello di contaminazione radioattiva e con la data ed il tipo di radionuclide;

°Alla fine delle operazioni, prima di lasciare l'area, controllare la eventuale contaminazione personale degli operatori che hanno eseguito la decontaminazione.

Procedimenti di decontaminazione per alcuni materiali di largo impiego

Materiale	Caratteristiche	Pregi	Difetti	Decontaminazione del materiale allo stato naturale	Comportamento dopo la contaminazione	Trattamento preventivo del materiale per migliorarne le caratteristiche	Decontaminazione del materiale che ha subito un trattamento preventivo
Acciaio comune	Discrete	Largo impiego nell'uso corrente; basso costo	Facilità di formazione di ruggine, facile ricettacolo di contaminazione	Decapare; trattare superficie con uno sgrassante fosforico	Discreto	Applicare una vernice antiruggine	
Acciaio inossidabile	Ottime	Facilmente decontaminabile	Alto costo	Dapprima sgrassare con tricloroetilene e trattare con acido nitrico diluito (1%); aumentare ad ogni successivo trattamento la concentrazione fino ad un massimo del 33%	Ottimo		
Alluminio	Buone	Largo impiego nell'uso corrente		Impiegare una soluzione di soda caustica al 10% per 5 min.; indi neutralizzare con acido nitrico al 33% e sciacquare	Buono		
Asfalto	Discrete	Utilizzato per la pavimentazione e a mattonelle; il materiale conserva una certa fluidità e tende a chiudere le crepe, eventuale sede di contaminazione	Caratteristiche meccaniche non eccellenti	Sostituire e mettere fra i rifiuti radioattivi			
Bronzo	Buone			Agire alternativamente con acido nitrico concentrato ed acido cloridrico addizionato ad acqua ossigenata; indi sciacquare energicamente	Buono		
Cemento	Cattive	Largo impiego nell'uso corrente	Elevata porosità; difficoltà di decontaminazione	1. spargere una sostanza complessante assieme a segatura umida, il cui impiego è opportuno ad evitare la cristallizzazione della soluzione complessante, che renderebbe in	Cattivo	1. rivestire con linoleum oppure 2) utilizzando una resina ostruire dapprima i pori fino ad una profondità di alcuni millimetri ed	1. impregnare prima con un solvente tipo tricloroetilene; indi trattare con una soluzione di citrato di ammonio o di acidi inorganici diluiti; se del caso,

				<p>seguito impossibile asportare la contaminazione; lasciare questo impasto per parecchie ore mantenendolo umido e rivoltandolo frequentemente; se non si riesce così bonificare la superficie bisognerà scalpellarla finché necessario; oppure</p> <p>b) trattare con una soluzione al 33% di acido cloridrico</p>		<p>otturare le crepe; indi applicare un sottofondo ed infine rivestire con resine che, oltre a presentare ottima resistenza chimica agli eventuali agenti contaminanti, siano facilmente decontaminabili (ad esempio algoflon, fluorotene, teflon, politene, duralon 35, insolite, remcoat); completare spalmando uno strato di cera.</p>	<p>sostituire l'intero foglio e metterlo fra i rifiuti radioattivi</p> <p>2. lavare con soluzione di citrato di ammonio e bifloruro di ammonio; indi, se del caso, impiegare sostanze svernicianti.</p>
Ceramica	Buone	Utilizzata per la pavimentazione e a mattonelle	Fragile	<p>1. trattare con acidi inorganici o con citrato d'ammonio o con fosfato trisodico; oppure</p> <p>2. sostituire e mettere fra i rifiuti radioattivi</p>	Buono	Ridurre gli interstizi fra le mattonelle e curarne le giunzioni; buoni risultati utilizzando impasti di resine di noce con furano	
Gomma	Discrete	Utilizzata per la pavimentazione e a mattonelle		<p>1. impiegare detergenti a schiuma frenata o, con parsimonia, utilizzare un solvente tipo tricloroetilene per sciogliere le macchie grasse; oppure</p> <p>2. sostituire e mettere fra i rifiuti radioattivi</p>	Scadente	Ridurre gli interstizi tra una mattonella e l'altra e curarne le giunzioni; buoni risultati utilizzando impasti di resine di noce con furano	
Legno	Cattive	Largo impiego nell'uso corrente	Elevata porosità; possibilità di formazione di crepe; difficoltà di decontaminazione	<p>1. piattare la superficie contaminata; oppure</p> <p>2. sostituire e mettere tra i rifiuti radioattivi</p>	Cattivo	Utilizzando una resina, ostruire dapprima i pori fino ad una profondità di alcuni millimetri ed otturare le crepe; applicare indi un sottofondo ed infine rivestire con resine che, oltre a presentare ottima resistenza chimica agli eventuali agenti contaminanti, siano facilmente decontaminabili (ad esempio algoflon, teflon,	Lavare con soluzione di citrato di ammonio e bifloruro di ammonio; indi, se del caso, impiegare sostanze svernicianti

						fluorotene, politene, duralon 35, insolite, remcoat); completare spalmando uno strato di cera	
Linoleum	Buone	Bassa porosità	Necessità di sostituire l'intero foglio, non potendosi rattoppare la sola zona contaminata, perché formerebbero interstizi, facile ricettacolo di contaminazione	Impregnare prima con un solvente tipo tricloroetilene; indi trattare con una soluzione di citrato di ammonio o di acidi inorganici diluiti; se del caso, sostituire l'intero foglio e mettere fra i rifiuti radioattivi	Buono	Cerare	
Piombo	Buone	Largo impiego nell'uso corrente		Trattare con acido cloridrico	Buono		
Porcellana	Discrete	Largo impiego per il vasellame	Fragile; lo smalto può deteriorarsi alle alte temperature e divenire facile ricettacolo di contaminazione	Sostituire e mettere fra i rifiuti radioattivi			
Rame	Buone	Largo impiego nell'uso corrente		Trattare con acido cloridrico ed acqua ossigenata; indi sciacquare energicamente	Buono		
Vetro	Buone	Facilmente decontaminabile	Fragile	<ol style="list-style-type: none"> 1. trattare con soluzione di acido cromatico; oppure 2. trattare con soluzione al 2% di bifloruro di ammonio 	Buono		

1.2.1 In breve

DECONTAMINAZIONE SUPERFICI

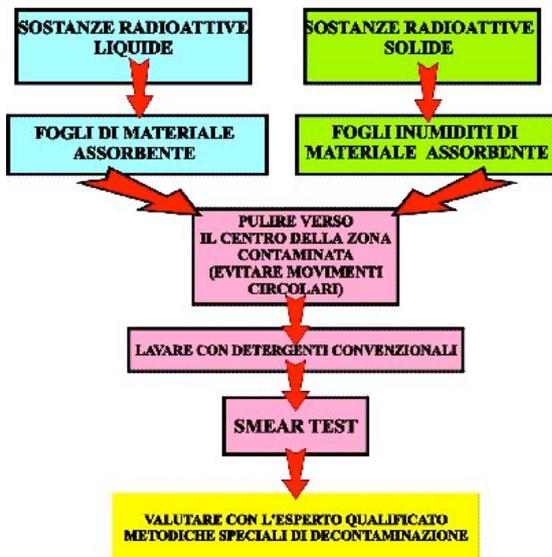


Fig. 21

PARAMETRI PER SMEAR TEST

(ALFA E BETA-EMITTENTI)

- **BATUFFOLO DI COTONE (PICCOLO)**
- **ACQUA PER INUMIDIRE IL BATUFFOLO**
- **SUPERFICIE 1000 cm²**
- **PRESSIONE UNIFORME**
- **LIQUIDO SCINTILLANTE + VIAL**
- **TEMPO DI CONTEGGIO 60 s**
- **SPETTRO COMPLETAMENTE APERTO (CANALI: 0 – 2000)**

GLOSSARIO

ALI: limite derivato per la quantità di un dato radionuclide che può essere introdotta nell'organismo per inalazione o ingestione in un anno (Bq/anno).

ALARA (As Low As Reasonably Achievable): procedura per tenere le dosi ricevute dai lavoratori e dal pubblico le più basse possibili, tenendo conto dei fattori economici e sociali.

Attivazione: processo di produzione di un materiale radioattivo tramite bombardamento con neutroni, protoni o altre particelle.

Attività: numero di trasformazioni nucleari spontanee di un radionuclide che si producono nell'unità di tempo; si esprime in becquerel.

Becquerel (Bq): unità di misura dell'attività; 1 Bq = 1 disintegrazione al secondo.

Contaminazione radioattiva: contaminazione di una matrice, di una superficie, di un ambiente di vita o di lavoro o di un individuo, prodotta da sostanze radioattive.

DAC: limite derivato per la concentrazione in aria di uno specificato radionuclide (Bq·cm⁻³).

Dose assorbita: energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti per unità di massa di materiale irraggiato; si esprime in gray.

Equivalente di dose: prodotto della dose assorbita in tessuto per il fattore di qualità; si esprime in sievert.

Equivalente di dose efficace: somma del prodotto degli equivalenti di dose ricevuti da specifici organi del corpo umano per gli appropriati fattori di ponderazione; si esprime in sievert.

Equivalente di dose (efficace) impegnato: equivalente di dose (efficace) ricevuto da un organo o tessuto, in un determinato periodo di tempo, in seguito all'introduzione di uno o più radionuclidi.

Esperto qualificato: persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari sia per effettuare misurazioni, esami, verifiche o valutazioni di carattere fisico, tecnico o radiotossicologico, sia per assicurare il corretto funzionamento dei dispositivi di radioprotezione, sia per fornire tutte le altre indicazioni e formulare provvedimenti atti a garantire la sorveglianza fisica della protezione dei lavoratori e della popolazione. La sua qualificazione è riconosciuta secondo procedure stabilite per legge.

Esposizione: qualsiasi esposizione di persone a radiazioni ionizzanti.

Esposizione esterna: esposizione prodotta da sorgenti situate all'esterno dell'organismo.

Esposizione interna: esposizione prodotta da sorgenti introdotte nell'organismo.

Esposizione globale: esposizione, considerata omogenea, del corpo intero.

Esposizione parziale: esposizione che colpisce soprattutto una parte dell'organismo o uno o più organi o tessuti, oppure esposizione del corpo intero considerata non omogenea.

Fattore di ponderazione di un organo o tessuto: frazione del rischio stocastico, risultante da un'irradiazione uniforme del corpo, attribuibile all'organo o tessuto considerato.

Fattore di qualità: fattore per il quale si moltiplica la dose assorbita in tessuto per tener conto della qualità della radiazione.

Fondo naturale di radiazioni: insieme delle radiazioni ionizzanti provenienti da sorgenti naturali, terrestri e cosmiche, semprechè l'esposizione che ne risulta non sia accresciuta in modo significativo da attività umane.

Gray: unità di misura della dose assorbita; 1 Gy = 1 J·kg⁻¹.

Introduzione: attività introdotta nell'organismo dall'ambiente esterno.

Irradiazione esterna: vedere esposizione esterna.

Irradiazione interna: vedere esposizione interna.

Lavoratori esposti: persone sottoposte, per l'attività che svolgono, a un'esposizione che può comportare dosi superiori ai pertinenti limiti fissati per le persone del pubblico.

LET: energia ceduta dalle particelle cariche per unità di percorso.

Limiti di dose: limiti fissati per le dosi riguardanti l'esposizione dei lavoratori esposti, degli apprendisti, degli studenti e delle persone del pubblico, per le attività disciplinate dal D.Lgs. 230/95. I limiti di dose si applicano alla somma delle dosi ricevute per esposizione esterna nel periodo considerato e delle dosi impegnate derivanti dall'introduzione di radionuclidi nello stesso periodo.

Materia radioattiva: sostanza o insieme di sostanze radioattive contemporaneamente presenti.

Matrice: qualsiasi sostanza o materiale che può essere contaminato da materie radioattive; sono comprese in tale definizione le matrici ambientali e

gli alimenti.

Medico autorizzato: medico responsabile della sorveglianza medica dei lavoratori esposti, la cui qualificazione e specializzazione sono riconosciute secondo le procedure e le modalità stabilite dalla legge.

Persone del pubblico: individui della popolazione esclusi i lavoratori, gli apprendisti e gli studenti esposti in ragione della loro attività.

Radiazioni ionizzanti: radiazioni costituite da fotoni o da particelle aventi la capacità di determinare direttamente o indirettamente la formazione di ioni.

Radioattività: processo naturale attraverso il quale gli atomi instabili di un elemento emettono l'energia in eccesso da parte dei nuclei trasformandosi in atomi di un diverso elemento o in stati energetici di minor energia dello stesso elemento.

Sievert: unità di misura dell'equivalente di dose e dell'equivalente di dose efficace; se il fattore di qualità della radiazione è uguale a 1, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Sorgente di radiazioni: apparecchio generatore di radiazioni ionizzanti (macchina radiogena) o materia radioattiva, ancorché contenuta in apparecchiatura o dispositivo in genere, dei quali, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività, o la concentrazione di radionuclidi, o l'emissione di radiazioni.

Sorgente sigillata: sorgente formata da materie radioattive solidamente incorporate in materie solide e di fatto inattive, o sigillate in un involucro inattivo che presenti una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive superiore ai valori stabiliti dalle norme di buona tecnica applicabili.

Sorgente non sigillata: qualsiasi sorgente che non corrisponde alle caratteristiche o ai requisiti della sorgente sigillata.

Sorveglianza medica: l'insieme delle visite mediche, delle indagini specialistiche e di laboratorio, dei provvedimenti sanitari adottati dal medico, al fine di garantire la protezione sanitaria dei lavoratori esposti.

Sorveglianza fisica: l'insieme dei dispositivi adottati, delle valutazioni, delle misure e degli esami effettuati, delle indicazioni fornite e dei provvedimenti formulati dall'esperto qualificato al fine di garantire la protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione.

Sostanza radioattiva: ogni specie chimica contenente uno o più radionuclidi di cui, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività o la concentrazione.

Zona controllata: ambiente di lavoro, sottoposto a regolamentazione per motivi di protezione dalle radiazioni ionizzanti, in cui sussiste per i lavoratori in essa operanti il rischio di superamento in un anno solare dei 3/10 di uno qualsiasi dei valori dei limiti per i lavoratori esposti, e in cui l'accesso è segnalato e regolamentato.

Zona sorvegliata: ambiente di lavoro in cui può essere superato in un anno solare uno dei pertinenti limiti fissati per le persone del pubblico e che non è zona controllata.