

Indice

PREMESSA

- 1. GENERALITÀ 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**
 - 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'INFN**
 - 11. LE ATTIVITÀ PRESSO SEDI ESTERNE**
- GLOSSARIO**

PREMESSA

L'art. 61, comma 3, lettera e), del D. Lgs. 230/95^(*), fa obbligo ai datori 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 nè 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, ai 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.

^(*) D.Lgs. 17 marzo 1995, n. 230, come modificato e integrato dal D.Lgs. 26 maggio 2000, n. 241. Attuazione delle direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 92/3/Euratom e 96/29/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti.

1. GENERALITÀ 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 è 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, nè 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. Multipli 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. 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*.

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: U-238, U-235, U-233, etc. 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: ${}_{92}^{238}\text{U}$; ${}_{92}^{235}\text{U}$; ${}_{92}^{233}\text{U}$. Gli isotopi radioattivi sono detti radioisotopi.

L'elemento più semplice esistente in natura, (${}^1_1\text{H}$) l'idrogeno ha due isotopi, il deuterio (${}^2_1\text{H}$) e il tritio (${}^3_1\text{H}$) Quest'ultimo è radioattivo ed emette particelle beta negative.

In generale un nuclide il cui simbolo sia Y è rappresentato da ${}^A_Z\text{Y}$ 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 $A - Z$ rappresenta il numero di neutroni. Se il nuclide è radioattivo, si parla 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.

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 radionuclide. L'energia media di questi elettroni è dell'ordine di un terzo

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

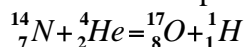
Il numero di disintegrazioni che avvengono nell'unità di tempo in una data quantità di materiale radioattivo costituisce la sua *attività*. L'attività si misura in bequerel (Bq): 1 Bq=1 disintegrazione al secondo. Quando l'attività è riferita alla contaminazione presente su una superficie, si suole esprimerla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

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 ${}^4_2\text{He}$) colpendo un nucleo di azoto ${}^{14}_7\text{N}$ produce, in seguito a reazione nucleare, un nucleo di ossigeno ${}^{17}_8\text{O}$ con emissione di un ${}^1_1\text{H}$ protone. Spesso si usa una notazione abbreviata, e l'equazione precedente si scrive ${}^{14}_7\text{N} (\alpha, \text{p}) {}^{17}_8\text{O}$ 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.

Per ottenere effettivamente reazioni nucleari con particelle proiettile 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 2_1H oppure d) e come bersaglio il deuterio stesso o l'altro isotopo dell'idrogeno, cioè il tritio (3_1H) Simbolicamente tali reazioni si scrivono ${}^2_1H(d,n){}_2^3He$; ${}^3_1H(d,n){}_2^4He$.

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 radionuclidi e fatti interagire con nuclei leggeri bersaglio come boro o berillio. Una tipica sorgente di neutroni si ottiene miscelando polvere di Am-241 (radionuclide 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, apparecchiature 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 in 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. 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.

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.

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.

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 le plastiche, quando sono colpiti da radiazioni densamente ionizzanti come le particelle alfa, diventano nel tempo fragili e pulverulenti (danno da radiazioni nei materiali). Questo problema è da tener 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. Solo particelle 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 tener presente la produzione di fotoni da 0,511 MeV nei processi di annichilazione.

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. Detti spessori, quando espressi in $g\cdot cm^{-2}$, 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, mentre espressi in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ risultano tra loro confrontabili (circa $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$).

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 allorchè 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 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$.

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 ponderazione delle radiazioni*, w_R . 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 w_R uguale a 1. Il prodotto della dose assorbita media in un organo o tessuto, D_T , per il fattore di

ponderazione delle radiazioni, w_R , prende il nome di *dose equivalente nel tessuto o organo T*, H_T ($H_T = w_R D_T$). L'unità di misura della dose equivalente prende il nome di sievert (Sv). Nel caso dei fotoni e degli elettroni, $w_R = 1$, e la dose assorbita di un gray corrisponde alla dose equivalente 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 $w_R = 20$. Alla dose assorbita di 1 Gy corrisponde allora una dose equivalente di 20 Sv. Anche i neutroni sono più pericolosi dei fotoni e si assume per essi un w_R compreso tra 5 e 20 a seconda della loro energia.

Si parla di *intensità o rateo di dose equivalente* quando ci si riferisce alla dose equivalente ricevuta nell'unità di tempo. Essa si esprime in $Sv \cdot s^{-1}$ o più comunemente in $\mu Sv \cdot h^{-1}$.

Per tener conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano per gli effetti stocastici (cfr. § 7), si introduce la *dose efficace*, E, somma delle dosi equivalenti medie nei diversi organi e tessuti, H_T , ciascuna moltiplicata per un fattore di ponderazione, w_T , che tiene appunto conto della diversa radiosensibilità degli organi e tessuti irraggiati^(*). I valori assunti nel D.Lgs. 230/95 per i w_T sono i seguenti: 0,20 per le gonadi, 0,12 per midollo osseo rosso, colon, stomaco e polmone, 0,05 per vescica, mammella, fegato, esofago e tiroide, 0,01 per la pelle e le superfici ossee, 0,05 complessivamente per altri dieci organi e tessuti del corpo umano scelti in base alla loro suscettibilità radiologica. Anche la dose efficace si esprime in Sv. E' del tutto evidente che, a parità di dose equivalente, per es. nell'irradiazione delle sole gonadi o della sola mammella, la dose efficace sarà nel primo caso 4 volte più elevata che nel secondo.

Quando si verifica un'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 equivalente ricevuta da un certo organo o tessuto in tale periodo prende il nome di *dose equivalente impegnata*. Allo stesso modo, la dose efficace ricevuta in quel periodo prende il nome di *dose efficace impegnata*. Nel caso dei lavoratori il calcolo delle dosi impegnate viene effettuato cautelativamente su un periodo di 50 anni a partire dall'introduzione.

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

^(*) La dose efficace è quindi definita come: $E = \sum w_T H_T$

continua a fornire il maggior contributo alla dose ricevuta dalla popolazione mondiale 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 extra-terrestre. 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 e dai radionuclidi cosmogenici. Quando ci si riferisce a tutte 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 $100 \div 700 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ per il K-40, tra $10 \div 50 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 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. 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 $77 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. Le percentuali di case con concentrazioni superiori a $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ o a $400 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ sono risultate rispettivamente il 5% e l'1%. Un livello di $200 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 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 radionuclidi 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 ancora di protoni e particelle cariche positive.

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 muoni, elettroni, fotoni, neutroni e protoni.

TAB. 1 - Esposizione media mondiale alle sorgenti naturali.

Sorgente di esposizione	Dose efficace annuale (mSv)	
	Media	Intervallo tipico
Radiazione cosmica		
Componenti direttamente ionizzanti e fotoni	0,28	
Neutroni	0,10	
Radionuclidi cosmogenici	0,01	
Totale	0,39	0,3-1,0
Esposizione esterna alla radiazione terrestre		
All'aperto	0,07	
In luoghi chiusi	0,41	
Totale	0,48	0,3-0,6
Esposizione per inalazione		
Serie dell'uranio e del torio	0,006	
Radon (Rn-222)	1,15	
Toron (Rn-220)	0,10	
Totale	1,26	0,2-10
Esposizione per ingestione		
K-40	0,17	
Serie dell'uranio e del torio	0,12	
Totale	0,29	0,2-0,8
Totale	2,4	1-10

Ai poli il contributo di dose dovuto ai raggi cosmici è maggiore rispetto alle zone equatoriali, per effetto dell'azione del campo magnetico terrestre. 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.

In Tabella I sono riportate le dosi efficaci annuali ricevute 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.

Il problema dell'esposizione dei lavoratori e della popolazione alla radioattività naturale è preso in considerazione nella normativa di legge italiana, che stabilisce le appropriate misure di protezione da adottare. Sono in particolare soggette alla normativa anche le attività convenzionali che si svolgono in particolari luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e sotterranei. In tali luoghi di lavoro, la concentrazione di radon e toron potrebbe infatti essere particolarmente elevata.

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 irradiator, 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 risoluzione spaziale (PET: tomografia ad emissione di positroni; TAC: tomografia assiale computerizzata a raggi X).

Dopo la scoperta dei 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 campi di applicazione scientifica. Un cenno particolare merita però, per le 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 di 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. II).

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 (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 (specialmente 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").

TAB. II - 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		
	Dose equivalente ricevuta in una singola breve esposizione (Sv)	Dose equivalente ricevuta per esposizioni fortemente frazionate o protratte (Sv)	Dose annuale se ricevuta per esposizioni fortemente frazionate o protratte per molti anni (Sv/anno)
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			
Opacità osservabili (b)	0,5-2,0	5,0	> 0,1
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.

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 (onicopatìa), 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, gastro-intestinale e neurologica) progressivamente ingravescenti che sopravvivono in funzione delle rispettive dosi-soglia (Tab. III).

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

Forma ematologica	0,25	sopravvivenza virtualmente certa
	1	soglia della sindrome ematologica (ospedalizzazione)
	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 neutrofili 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, sulla base dei risultati degli studi epidemiologici sull'uomo, è assunta in radioprotezione 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 intellegibili sul piano epidemiologico perchè 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 ^{224}Ra) 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 possono determinare la morte dell'embrione stesso (l'evento può passare inosservato perchè la donna non sa ancora di essere incinta) o, in alternativa, non avere conseguenze sul suo sviluppo e sulla sopravvivenza postnatale, 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 formano 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'8^a e la 15^a 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 16^a e la 25^a settimana dal concepimento ed è trascurabile o assente prima dell'8^a settimana e dopo la 25^a 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 (International Commission on Radiological Protection) 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, 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:

1. *Nuovi tipi o nuove categorie di pratiche che comportano un'esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere giustificati, anteriormente alla loro prima adozione o approvazione, dai loro vantaggi economici, sociali o di altro tipo rispetto al detrimento sanitario che ne può derivare.*
2. *I tipi o le categorie di pratiche esistenti sono sottoposti a verifica per quanto concerne gli aspetti di giustificazione ogniqualvolta emergano nuove ed importanti prove della loro efficacia e delle loro conseguenze.*
3. *Qualsiasi pratica deve essere svolta in modo da mantenere l'esposizione al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali.*
4. *La somma delle dosi derivanti da tutte le pratiche non deve superare i limiti di dose stabiliti per i lavoratori esposti, gli apprendisti, gli studenti e gli individui della popolazione.*

Si richiama in particolare l'attenzione sul secondo basilare principio, detto anche principio ALARA (precedente punto 3.), 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 (precedente punto 4.), 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:

- 20 mSv/anno per la dose efficace;
- 150 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;
- 500 mSv/anno per la dose equivalente alla pelle;
- 500 mSv/anno per la dose equivalente a mani, avambracci, piedi, caviglie.

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

- 1 mSv/anno per la dose efficace;
- 15 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;
- 50 mSv/anno per la dose equivalente alla pelle.

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 autonome dell'esperto qualificato, o di collaborazione nei confronti del datore di lavoro, 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*.

È 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 la dose efficace;

45 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;

150 mSv/anno per la dose equivalente a pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie.

È 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 la dose efficace;

15 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;

50 mSv/anno per la dose equivalente alla pelle.

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

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). Nell'INFN, ai fini delle norme di igiene e sicurezza, il datore di lavoro coincide con il Direttore della Struttura.

E' utile ricordare che, in aggiunta alle zone controllate e sorvegliate, nella sorveglianza operativa, si suole delimitare e regolamentare opportunamente anche le cosiddette *zone interdette*, aree ove i ratei di dose potrebbero raggiungere valori particolarmente elevati e per le quali è necessario istituire appropriate procedure di accesso. Dette zone sono usualmente presidiate da adeguati sistemi di sicurezza (microinterruttori sulle porte di accesso, controlli di ronda, etc.) allo scopo di impedire al personale di trovarsi al loro interno durante il funzionamento degli impianti. Tipiche zone interdette sono le aree in cui passano i fasci primari e secondari degli acceleratori ovvero le aree in cui sono presenti importanti sorgenti radioattive.

Le zone controllate, sorvegliate e interdette sono segnalate mediante idonei cartelli di segnalazione posti in corrispondenza degli accessi.

9.2 Classificazione dei lavoratori

Il D.Lgs. 230/95 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. Nell'INFN, 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 limiti fissati per le persone del pubblico.

I lavoratori esposti vengono 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 la dose efficace;

45 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;

150 mSv/anno per la dose equivalente a 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 potenziali conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata.

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 categoria A sono previste la sorveglianza fisica individuale, mediante uno o più apparecchi di misura individuali, e la sorveglianza medica, con frequenza semestrale dei controlli, effettuata da parte del medico autorizzato. Per i lavoratori di categoria B, la sorveglianza fisica

individuale può essere eseguita sulla scorta dei risultati della sorveglianza fisica ambientale e i controlli medici, effettuati dal medico autorizzato o dal medico competente, hanno frequenza annuale.

I lavoratori esposti non possono essere adibiti ad attività con rischio da radiazioni ionizzanti fino a quando il medico addetto alla sorveglianza medica non abbia rilasciato il relativo giudizio di idoneità, sulla base delle risultanze della visita medica preventiva. Il giudizio di idoneità deve poi essere confermato nelle successive visite periodiche.

Tutto il personale esposto al rischio da radiazioni ionizzanti deve inoltre essere preventivamente reso edotto, nell'ambito di un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione, dei rischi specifici cui è esposto, 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 radioprotezione. Il programma di formazione si deve concludere con una verifica dell'apprendimento e il rilascio della relativa certificazione.

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 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, etc.

A proposito dell'uso pratico di questi strumenti conviene ricordare che essi 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. 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 sè 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.

Nel caso dell'irradiazione interna, eventualità per la verità assai remota al momento attuale per i lavoratori dell'INFN, la valutazione della dose individuale potrà essere effettuata a partire dalla rivelazione delle radiazioni che eventualmente fuoriescono dal corpo umano, quando sufficientemente penetranti (per es. raggi gamma), ovvero in base ad idonei metodi radiotossicologici.

10. RISCHI DA RADIAZIONI PRESSO LE STRUTTURE DELL'INFN

Le principali sorgenti di radiazioni presenti presso le Strutture dell'INFN sono costituite da macchine radiogene (le più importanti sono gli acceleratori di particelle) e da sorgenti radioattive.

Per quanto concerne gli acceleratori, i campi di radiazione presenti attorno ad essi possono variare fortemente nel tempo e nello spazio in relazione al tipo di macchina acceleratrice ed alle schermature messe in opera. Negli acceleratori di particelle cariche pesanti (per es. protoni) di alta energia (parecchie centinaia di MeV) il fascio accelerato viene frequentemente estratto e portato al di là delle schermature principali nelle sale sperimentali dove, dopo aver colpito un bersaglio, finisce in un pozzo di spegnimento, un'assorbitore cioè in grado di assorbirlo completamente. In seguito alla interazione dei fasci di alta energia con il bersaglio e/o parti della macchina avviene un gran numero di processi nucleari e possono essere emessi, in relazione all'energia del fascio primario, protoni, neutroni, raggi gamma e altri tipi di particelle.

Negli acceleratori di elettroni di alta energia i maggiori problemi sono legati alla produzione di raggi X di frenamento che a loro volta danno luogo alla fotoproduzione di neutroni. Il campo di radiazione atteso fuori delle schermature è quindi un campo misto di raggi X e gamma e di neutroni. Negli anelli di accumulazione possono essere prodotti i fasci di radiazione di sincrotrone che, sebbene costituiti da raggi X di bassissima energia, sono estremamente pericolosi per la loro elevatissima intensità.

Negli acceleratori elettrostatici di bassa energia (fino a 20-30 MeV) di norma il fascio non viene estratto, ma inviato sotto vuoto ad interagire con il bersaglio in studio. Dalla camera di reazione possono emergere in questi casi raggi X, raggi gamma, neutroni.

All'esterno di un acceleratore ben schermato i campi di radiazione sono prevalentemente composti da neutroni di varie energie e da raggi X e gamma. Nel caso di macchine che non presentano schermature verso l'alto (o insufficientemente schermate in tale direzione) un contributo importante ai livelli di radiazione nelle zone circostanti può essere dovuto all'effetto cielo (skyshine), consistente nella diffusione verso il basso da parte dell'aria di radiazioni secondarie inizialmente dirette verso l'alto.

Ad acceleratore spento, un problema potenzialmente molto serio di radioprotezione è posto dalla radioattività indotta nei materiali che sono stati colpiti direttamente dai fasci primari e secondari durante

il funzionamento. La produzione di nuclei radioattivi può avvenire in tutti i materiali presenti, solidi (ad esempio bersagli, strutture della macchina, schermature), liquidi (es. acqua dei circuiti di raffreddamento), gassosi (per es. l'aria). I tempi di dimezzamento dei radionuclidi prodotti possono andare dalla frazione di secondo agli anni. Sarebbe opportuno, per evitare o ridurre di importanza un grave ostacolo all'effettuazione delle riparazioni o dei lavori di manutenzione, utilizzare nella costruzione delle linee di fascio materiali i più puri possibili e con piccola probabilità di dare luogo a produzione di radionuclidi con tempi di dimezzamento lunghi. A titolo di esempio, si elencano alcuni dei radionuclidi più facilmente riscontrabili nelle strutture in acciaio degli acceleratori, con indicato, tra parentesi, il periodo di dimezzamento: Be-7 (53,6 giorni); C-11 (20,4 minuti); F-18 (110 minuti); Na-22 (2,6 anni); K-42 (12,5 ore); V-48 (16 giorni); Cr-51 (27,8 giorni); Mn-54 (300 giorni); Co-56 (77 giorni); Co-57 (270 giorni); Fe-55 (2,94 anni); Co-60 (5,27 anni).

Appena cessato il funzionamento dell'acceleratore, la radiattività indotta diminuisce rapidamente a causa del decadimento dei nuclidi a tempo di dimezzamento breve, mentre successivamente il processo di decadimento diventa molto più lento. Prima di intervenire, è quindi buona norma attendere almeno il decadimento dei prodotti di attivazione a vita media breve.

L'attivazione dell'aria comporta produzione di gas radioattivi, quali N-13 (10 minuti), O-15 (2,1 minuti), C-11 (20,5 minuti), radionuclidi con tempi di dimezzamento assai brevi. All'irradiazione dell'aria può essere associata anche la produzione di gas tossici, il più importante dei quali è l'ozono. La concentrazione di gas radioattivi e tossici prodotti in aria dipende da numerosi fattori quali l'intensità ed energia del fascio e il suo percorso, la natura dei bersagli, il volume degli ambienti, la rapidità del ricambio dell'aria, etc. Di norma questi problemi possono essere trascurati presso gli acceleratori di particelle cariche pesanti (protoni e ioni pesanti) di bassa energia.

Oltre agli acceleratori di particelle, vengono spesso usati, presso le Strutture dell'INFN, alcuni altri tipi di macchine radiogene (valvole di potenza, diffrattometri, tubi a raggi X, etc.), intorno alle quali i rischi di esposizione sono prevalentemente dovuti ai raggi X emessi. Non è superfluo ricordare che si può avere emissione di radiazione X, sia pure indesiderata, ogniqualvolta si applichi un'alta tensione sotto vuoto (per es. cavità a radiofrequenza). In tutti questi casi è opportuno richiedere sempre un controllo preventivo da parte dell'esperto qualificato.

Assai frequente è anche l'uso di sorgenti radioattive per la calibrazione degli strumenti. Ve ne sono di vari tipi e i relativi problemi di radioprotezione sono diversi a seconda delle sorgenti impiegate. Agli utilizzatori vengono sempre consegnati, insieme alla sorgente prescelta, custodita in apposito contenitore di sicurezza, un cartello di segnalazione (il simbolo di pericolo da radiazioni è riportato nella copertina del presente opuscolo) e una scheda con la descrizione delle caratteristiche del materiale radioattivo e delle principali precauzioni da adottare. E' utile ricordare che l'uso di qualsiasi sorgente radioattiva può sempre comportare qualche rischio, specie se trattata in modo non appropriato. E' pertanto buona norma far uso di sorgenti aventi la più bassa attività possibile compatibilmente con la misura da fare.

Un discorso a parte meritano le sorgenti di particelle alfa usate per la calibrazione dei rivelatori. Si è già detto che in questo caso non vi sono problemi di irradiazione esterna. Tuttavia si deve tenere ben presente che dette sorgenti sono costituite da un deposito di materiale radioattivo estremamente fragile che può dare luogo a dispersione del materiale stesso se non utilizzate con la cautela prescritta. In tal caso l'operatore potrebbe subire una contaminazione interna, per inalazione, ingestione o introduzione del materiale radioattivo attraverso eventuali ferite. Nella manipolazione di queste sorgenti si devono quindi seguire con particolare scrupolo le istruzioni date di volta in volta dall'esperto qualificato.

Nel concludere merita rilevare che la qualità della radioprotezione posta in essere nell'INFN ha permesso di raggiungere risultati estremamente lusinghieri. Negli ultimi anni, la maggior parte del personale sottoposto a controllo dosimetrico personale ha ricevuto dosi praticamente indistinguibili dal fondo strumentale e soltanto pochi lavoratori hanno ricevuto dosi al più di qualche mSv/anno.

11. LE ATTIVITÀ PRESSO SEDI ESTERNE

E' noto che l'INFN svolge gran parte delle attività di proprio interesse presso i grandi acceleratori di particelle, dislocati nei laboratori di vari Paesi del mondo. In linea di principio, salvo sperimentazioni del tutto particolari, i rischi di esposizione alle radiazioni in queste attività non sono sostanzialmente diversi da quelli descritti nel paragrafo precedente. Possono invece essere diverse le regole di radioprotezione seguite, specie nei Paesi non appartenenti alla Comunità Europea.

Sulla base dell'esperienza maturata in questi ultimi anni, si può in genere affermare che la qualità della radioprotezione presso i Centri che ospitano i grandi acceleratori di particelle deve comunque ritenersi sempre eccellente. Le dosi ricevute dai lavoratori dell'INFN sono risultate in tutti i casi assai modeste quando non coincidenti con il fondo strumentale. Questa è peraltro l'attesa conseguenza dell'ormai diffusa applicazione del principio di ottimizzazione della radioprotezione nei Laboratori di quasi tutti i Paesi del mondo.

E' comunque opportuno che in tutti i casi i responsabili delle attività prendano preventivamente contatto con i locali servizi di radioprotezione per far avere ai lavoratori tutte le necessarie informazioni in ordine ai specifici rischi da radiazione connessi con le attività da svolgere e alle regole da seguire. Si richiama in particolare l'attenzione sulla necessità di richiedere sempre il controllo dosimetrico individuale e di prender visione delle norme interne di radioprotezione vigenti presso gli impianti in cui si intende lavorare, prima dell'inizio delle attività.

E' appena il caso di osservare che qualora non venissero fornite le garanzie sopra menzionate (informazione sui rischi, norme interne di radioprotezione, dosimetri individuali) sarebbe preferibile non iniziare le attività programmate e segnalare la situazione all'esperto qualificato della Struttura dell'INFN di appartenenza o al Servizio Protezione dalle Radiazioni per le azioni del caso.

Il giudizio di idoneità rilasciato dal medico addetto alla sorveglianza medica presso la Struttura dell'INFN di appartenenza viene abitualmente riconosciuto presso i Laboratori esterni (certamente nei

Paesi della Comunità Europea, ma anche al CERN, al PSI, etc.) e spesso esplicitamente sollecitato (CERN, PSI, etc.). I lavoratori eventualmente classificati in categoria A devono far uso del libretto personale di radioprotezione (cfr. art. 68, comma 2, in Premessa) anche nelle attività con rischio da radiazioni svolte nei Laboratori esteri.

E' infine opportuno ricordare che le sedi esterne presso le quali si svolgono le attività in parola devono essere state menzionate nella scheda di radioprotezione dei lavoratori affinché l'esperto qualificato ne possa aver tenuto conto nella classificazione di radioprotezione degli stessi e sia poi in grado di richiedere le dosi da essi ricevute per riportarle sulle schede dosimetriche personali.

GLOSSARIO

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; $1 \text{ Bq} = 1$ 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.

Dose assorbita: energia assorbita per unità di massa di materiale irraggiato; si esprime in gray.

Dose efficace: somma delle dosi equivalenti nei diversi organi e tessuti del corpo umano moltiplicate per gli appropriati fattori di ponderazione; si esprime in Sv.

Dose efficace impegnata: somma delle dosi equivalenti impegnate nei diversi organi e tessuti risultanti dall'introduzione di uno o più radionuclidi, ciascuna moltiplicata per il fattore di ponderazione del tessuto w_T . L'unità di dose efficace impegnata è il sievert.

Dose equivalente: prodotto della dose assorbita media in un tessuto o organo per il fattore di ponderazione delle radiazioni; si esprime in sievert.

Dose equivalente impegnata: dose equivalente ricevuta da un organo o da un tessuto, in un determinato periodo di tempo, in seguito all'introduzione di uno o più radionuclidi; si esprime in sievert.

Emergenza: una situazione che richiede azioni urgenti per proteggere lavoratori, individui della popolazione ovvero l'intera popolazione o parte di essa.

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 accidentale: esposizione di singole persone a carattere fortuito e involontario.

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

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

Esposizione totale: combinazione dell'esposizione esterna e interna.

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.

Esposizione potenziale: esposizione che, pur non essendo certa, ha una probabilità di verificarsi prevedibile in anticipo.

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 ponderazione delle radiazioni: fattore per il quale si moltiplica la dose assorbita in un organo 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; $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Gruppi di riferimento della popolazione: gruppi che comprendono persone la cui esposizione è ragionevolmente omogenea e rappresentativa di quella degli individui della popolazione maggiormente esposti, in relazione ad una determinata fonte di esposizione.

Incidente: evento imprevisto che provoca danni ad un'installazione o ne perturba il buon funzionamento e può comportare, per una o più persone, dosi superiori ai limiti.

Introduzione: attività dei radionuclidi che penetrano nell'organismo provenienti 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.

Lavoratori esposti di categoria A: lavoratori suscettibili di ricevere in un anno solare una dose superiore a 3/10 di uno dei pertinenti limiti raccomandati.

Lavoratori esposti di categoria B: lavoratori esposti non classificati in categoria A.

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 ricomprese 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.

Medico competente: medico addetto alla sorveglianza medica ai fini del D.Lgs. 626/94.

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

Radiazioni ionizzanti: trasferimento di energia in forma di particelle o onde elettromagnetiche con lunghezza di onda non superiore a 100 nm o con frequenza non minore di $3 \cdot 10^{15}$ Hz in grado di produrre ioni direttamente o indirettamente.

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 della dose equivalente e della dose efficace; se il fattore di ponderazione 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, ancorchè contenuta in apparecchiature o dispositivi 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 naturale di radiazioni: sorgente di radiazioni ionizzanti di origine naturale, sia terrestre che cosmica.

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.