



Dipartimento Biotecnologie, Agroindustria e Protezione della Salute
Istituto di Radioprotezione

LA RADIOPROTEZIONE

Opuscolo per la formazione del personale
esposto a radiazioni ionizzanti
per ragioni professionali



Le diverse parti di questo opuscolo sono state preparate a cura di:

Mario Basta

Enrico Borra

Carlo Maria Castellani

Elena Fantuzzi

Lorenzo Florita

Giorgia Iurlaro

Giuseppe Liccione

Andrea Luciani

Sandro Merolli

Elia Rossi

Sandro Sandri

L'attività è stata coordinata dall'Istituto di Radioprotezione

LA RADIOPROTEZIONE

1	I PRINCIPI E LA NORMATIVA DI RADIOPROTEZIONE	5
1.1	PREMESSA	5
1.2	INTRODUZIONE STORICA	5
1.3	PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE	6
1.4	LIVELLI DI ESPOSIZIONE	7
1.5	QUADRO NORMATIVO	8
2	LE RADIAZIONI IONIZZANTI	11
2.1	SORGENTI DI RADIAZIONI IONIZZANTI	11
2.2	I PRINCIPALI TIPI DI RADIAZIONI IONIZZANTI	14
2.3	MODALITÀ DI ESPOSIZIONE	15
2.4	EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI	16
2.5	GRANDEZZE FISICHE , GRANDEZZE RADIOPROTEZIONISTICHE E UNITÀ DI MISURA	19
2.6	MISURA DELLE RADIAZIONI	19
3	LA RADIOPROTEZIONE NEGLI AMBIENTI DI LAVORO	21
3.1	LE FIGURE E I RUOLI NEL SISTEMA DI RADIOPROTEZIONE	21
3.2	LIMITI DI DOSE	24
3.3	CLASSIFICAZIONE DELLE AREE E DEI LAVORATORI	24
3.4	SEGNALETICA DI SICUREZZA	26
3.5	OBBLIGHI DEL DATORE DI LAVORO, DEL DIRIGENTE E DEL PREPOSTO	28
3.6	OBBLIGHI DELL'ESPERTO QUALIFICATO	29
3.7	OBBLIGHI DEL MEDICO COMPETENTE O AUTORIZZATO	30
3.8	OBBLIGHI DEL LAVORATORE	31
3.9	MEZZI DOSIMETRICI E LORO IMPIEGO	33
3.10	DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE (DPI)	37
3.11	NORME INTERNE DI RADIOPROTEZIONE	37
4	CONCLUSIONI	38
5	GLOSSARIO SU GRANDEZZE E UNITÀ DI MISURA	39

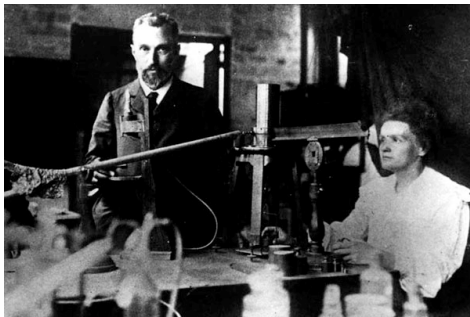
1 I PRINCIPI E LA NORMATIVA DI RADIOPROTEZIONE

1.1 Premessa

La normativa italiana ha recepito le nuove direttive europee in materia di impiego pacifico delle radiazioni ionizzanti con l'emanazione dei Decreti Legislativi 26 maggio 2000 n. 241 e 9 maggio 2001, n. 257, con i quali è stato modificato il precedente Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230. Nel seguito per citare questa norma integrata costituita dai decreti citati si userà spesso la sigla D.Lgs. 230/95 e s.m.i..

1.2 Introduzione storica

La radioprotezione nasce all'inizio del secolo scorso quando nei laboratori e negli studi medici si comincia a lavorare con i raggi X e, in



seguito, con alcune altre sorgenti di radiazioni ionizzanti. Verso il 1920 sono già ben noti gli effetti dannosi immediati delle alte dosi di radiazioni, mentre non si ha ancora coscienza degli effetti ritardati (essenzialmente tumori) più difficili da diagnosticare e da collegare alle radiazioni. L'evidenza degli effetti immediati delle radiazioni

al di sopra di certe soglie da una parte impone la necessità di proteggere gli operatori e gli sperimentatori intervenendo essenzialmente con schermature e dall'altra porta a definire una dose "di tolleranza" al di sotto della quale non vi sono rischi né per i lavoratori né per la popolazione.

La dose di tolleranza è chiaramente definita solo verso la fine degli anni 30, ed è posta pari a 1 "roentgen" a settimana, ovvero all'incirca 500 millisievert all'anno in unità moderne (si veda nel seguito il capitolo dedicato a grandezze e unità di misura).

Per avere un'idea dell'entità di tale limite, si pensi che attualmente il limite annuale per la popolazione è di 1 millisievert, cioè 500 volte più basso.

Solo negli anni '40 si comincia a notare che le radiazioni ionizzanti sono responsabili anche di effetti genetici e si pensa sia necessario limitare l'esposizione delle gonadi ovvero le dosi geneticamente significative, che possono indurre mutazioni nella progenie.



Il concetto di rischio anche a basse dosi, o meglio di rischio senza soglia inferiore ma semplicemente direttamente proporzionale alla dose, si afferma definitivamente nel secondo dopoguerra, quando la sperimentazione avanzata su cavie da laboratorio prima e gli effetti conseguenti alle bombe di Hiroshima e Nagasaki poi, indicano l'esistenza di correlazioni tra dosi non elevate ed effetti tardivi non reversibili.

Nel 1958 l'International Commission on Radiological Protection (ICRP) fissa valori di riferimento compatibili con le nuove risultanze e quindi molto più bassi dei precedenti. In particolare si differenzia la massima dose ammissibile annuale per i lavoratori da quella per gli individui della popolazione: la prima è portata a 5 rem (50 millisievert), mentre per la popolazione il limite è dieci volte più basso, pari a 0,5 rem (5 millisievert).

Contemporaneamente si fa strada la convinzione che sia necessario ridurre l'esposizione il più possibile o meglio quanto ragionevolmente ottenibile compatibilmente con i costi e le necessità. Il principio è sancito nella pubblicazione ICRP del 1965 ed è poi riproposto anche nella pubblicazione n. 26 del 1978, con la frase inglese *As Low As Reasonably Achievable* il cui acronimo, ALARA, è ormai accettato a livello internazionale come sinonimo di ottimizzazione della radioprotezione o di processo di riduzione dell'esposizione.

Siamo ormai ai giorni nostri con la più recente raccomandazione dell'ICRP sull'applicazione generale della radioprotezione. Si tratta della pubblicazione n. 60 del 1990, che ribadisce in pratica i principi enunciati nelle pubblicazioni precedenti e riduce ulteriormente i limiti per lavoratori e popolazione portandoli ai valori oggi adottati da tutte le normative dei Paesi più avanzati.

1.3 Principi della radioprotezione

L'ipotesi di linearità senza soglia equivale a quella di ammettere che ogni dose, per quanto piccola, possa comportare effetti dannosi, anche gravi, per la salute degli individui esposti. Ciò comporta evidenti e gravi difficoltà per la individuazione di un sistema di limitazione delle dosi universalmente accettabile. La filosofia di limitazione delle dosi proposta dall'ICRP ed accettata dalle principali normative europee e nazionali, si basa su due esigenze:

- LA PREVENZIONE DEGLI EFFETTI DETERMINISTICI;
- LA LIMITAZIONE DELLA PROBABILITÀ DI EFFETTI PROBABILISTICI ENTRO VALORI CONSIDERATI ACCETTABILI.

Per il perseguimento dei predetti obiettivi l'ICRP ha introdotto i seguenti tre principi fondamentali della radioprotezione:

- GIUSTIFICAZIONE;
- OTTIMIZZAZIONE;
- LIMITAZIONE DEL RISCHIO INDIVIDUALE.

Alla luce del primo principio *“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” (D.Lgs. 230/95 art. 2 comma 1). In altre parole è necessario fare un accurato bilancio tra i benefici di ogni tipo, inclusi quelli economici, ottenibili per mezzo delle attività in esame, e i rischi ad essa connessi, ritenendo giustificate le sole attività che comportino un beneficio netto e dimostrabile per la società o per gli individui esposti.

Per ottimizzazione si intende che *“qualsiasi pratica deve essere svolta in modo da mantenere l'esposizione al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali” (D.Lgs. 230/95 art. 2 comma 3).*

Secondo l'impostazione dell'ICRP una corretta applicazione dei primi due principi dovrebbe essere sufficiente a garantire un'efficace protezione dalle radiazioni, soprattutto ai fini della tutela della sanità a livello generale. Poiché ciò in taluni casi potrebbe non garantire una sufficiente protezione del singolo, specie per le esposizioni dovute alla combinazione di più di una pratica, è stato introdotto il terzo principio, secondo cui, sempre nella forma recepita dalla legislazione italiana : *“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” (D.Lgs. 230/95 art. 2 comma 4).*

1.4 Livelli di esposizione

Il contributo di gran lunga più importante all'esposizione dell'uomo alle radiazioni ionizzanti è quello dovuto a sorgenti naturali, eventualmente modificate dall'intervento umano. Nella tabella 1 sono raccolti i contributi medi, a livello mondiale, delle principali tra di esse.

Tabella 1 - Esposizione a sorgenti naturali

Sorgente	Media mondiale (mSv / anno)
<i>Raggi cosmici:</i>	
Al livello del mare	0,270
A tutte le quote	0,380
Viaggi aerei	0,002
<i>Radioisotopi naturali:</i>	
Irradiazione esterna	0,460
Irradiazione interna (escluso radon)	0,230
Irradiazione interna da radon	1,2
Totale da tutte le sorgenti	2,4 mSv/anno

1.5 Quadro normativo

Il sistema di radioprotezione in Italia e nel resto del mondo è basato su una struttura ormai consolidata di norme che includono leggi nazionali, direttive transnazionali, raccomandazioni internazionali e normative di buona tecnica.

Attualmente l'organismo che a livello internazionale indica le linee guida sulle quali si basano poi le normative specifiche dei vari Paesi è l'autorevole ICRP, che diffonde concetti e norme attraverso pubblicazioni periodiche in lingua inglese.

Le autorità nazionali si attengono in genere alle norme riportate nelle pubblicazioni di questo autorevole organismo per legiferare in questa materia e quando questo non avviene sono le norme di buona tecnica di ogni Stato ad anticipare le leggi o comunque a riprendere le norme internazionali dell'ICRP.

L'ICRP nasce nel 1928 con la denominazione di International X-Ray and Radium Protection Committee (IXRPC). Il primo presidente del comitato è Rolf Sievert, il fisico svedese che darà poi il nome all'unità di misura della dose equivalente. Il comitato è costituito ancora oggi da vere personalità della radioprotezione, nominate in base ai loro meriti scientifici e non in base a mandati governativi.

L'ICRP oggi è composto da una Commissione Principale e da quattro Comitati: 1) Effetti della Radiazione, 2) Dosi da Esposizione da Radiazione, 3) Protezione in Medicina e 4) Applicazione delle Raccomandazioni. Tutti sono serviti da un piccolo Segretariato Scientifico.

La Commissione Principale consiste di dodici membri ed un Presidente.

Analogamente alle altre accademie scientifiche, la Commissione elegge i suoi propri membri. Il rinnovamento è assicurato in quanto da 3 a 5 membri devono essere cambiati ogni quattro anni. I Comitati comprendono tipicamente 15-20 membri. Biologi e medici dominano la composizione corrente, anche se i fisici sono comunque ben rappresentati.

Accanto all'ICRP è necessario ricordare anche l'influenza di alcuni altri istituti internazionali che godono di analoga credibilità. Si tratta in particolare dell'International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), della Nuclear Energy Agency (NEA) facente parte dell'Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) e dell'International Atomic Energy Agency (IAEA). L'ICRP si dedica in modo esclusivo alla radioprotezione, l'ICRU è orientata agli aspetti legati alla misura delle radiazioni ionizzanti e alle relative unità, la NEA e l'IAEA curano soprattutto, ma non esclusivamente, la gestione dei sistemi per lo sfruttamento dell'energia atomica e le problematiche connesse.

Per quanto riguarda la diffusione e la preparazione di norme e leggi a livello delle singole nazioni europee e dell'Italia in particolare, attualmente la procedura si articola nei seguenti passaggi principali:

1. emanazione di raccomandazioni da parte dell'ICRP e degli altri organismi internazionali;
2. conseguente emanazione di direttive e raccomandazioni europee collegate;
3. recepimento delle direttive e/o inclusione delle raccomandazioni nelle norme e leggi nazionali.

Proprio sulla base di questa procedura si è sviluppato il corpo di leggi che regolano oggi il sistema di radioprotezione nel nostro Paese. Nel 1990 l'ICRP ha pubblicato le sue ultime (in ordine di tempo) raccomandazioni di carattere generale nel volume n. 60 dei suoi annali. Sulla base di tali raccomandazioni sono state emanate alcune direttive comunitarie tra cui la più importante e completa è stata la 96/29/Euratom.

In recepimento di alcune di queste direttive Euratom, in Italia è stato promulgato il D.Lgs. 17 marzo 1995, n. 230, poi modificato e integrato con il recepimento delle direttive più recenti, tra cui la 96/29 del 1996 appunto.

Attualmente (dal 2001) nel nostro Paese si fa pertanto riferimento al D.Lgs. 17 marzo 1995, n. 230, coordinato con le disposizioni dei Decreti Legislativi: 26 maggio 2000, n. 187, per l'attuazione della direttiva 97/43/Euratom; 26 maggio 2000, n. 241, per l'attuazione della direttiva 96/29/Euratom; 9 maggio 2001, n. 257, di integra-

zione e correzione al D.Lgs. n. 241/2000. Come già detto, solitamente si fa riferimento a questo insieme coordinato di leggi con la sigla: D.Lgs. 230/95 e s.m.i..

Il corpo di leggi costituito dal **D.Lgs. 230/95 e s.m.i.** include dodici allegati tecnici che contengono tabelle e dati numerici tali da rendere il tutto completamente operativo, lasciando, in linea di massima, all'interpretazione delle figure designate solo aspetti squisitamente professionali.

Nonostante questo, una parte dei provvedimenti di protezione dalle radiazioni ionizzanti può essere assunta facendo riferimento a riconosciute **norme di buona tecnica**. Queste norme sono emanate principalmente da due organismi nazionali preposti a questo scopo: l'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) e il CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano).

Questi Enti hanno i loro corrispondenti internazionali rispettivamente nell'ISO (International Standardization Organization) e nell'IEC (International Electrotechnical Committee). Sono in realtà questi ultimi che preparano le norme di buona tecnica, a livello internazionale, adottate poi dagli organismi nazionali che fanno a loro riferimento.

Nella comune pratica professionale sono inoltre impiegate anche norme di buona tecnica emanate da enti di altre nazioni come lo statunitense NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) e il britannico NRPB (National Radiological Protection Board) che dal 2005 è diventato una sezione della Health Protection Agency.

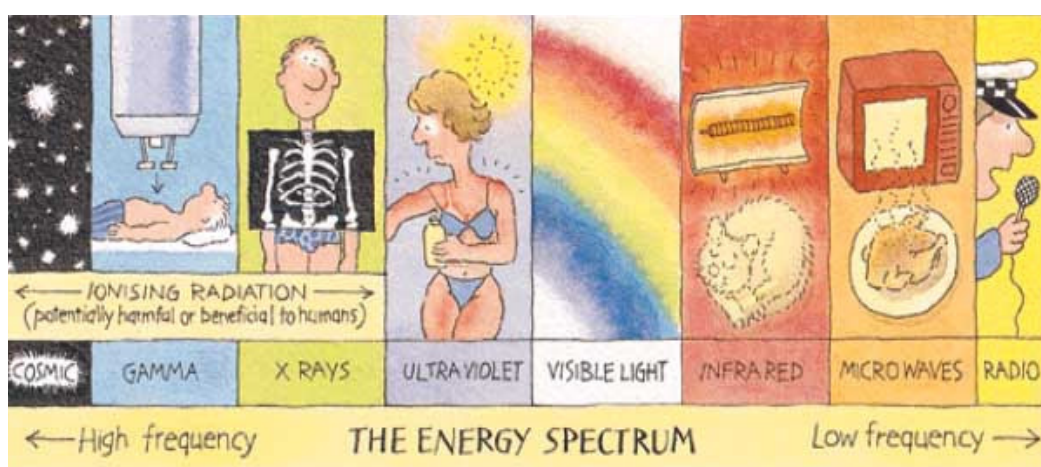
L'applicazione corretta delle leggi e delle norme di buona tecnica è sottoposta, tra l'altro, alla **vigilanza di alcuni organi di controllo** che operano o a livello nazionale, come l'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici) e l'ISPESL (Istituto Superiore Prevenzione e Sicurezza sul Lavoro), o a livello delle strutture amministrative locali, come Unità Sanitarie Locali, Agenzie regionali di protezione dell'ambiente e Comandi provinciali dei Vigili del Fuoco.

Queste strutture intervengono sia nelle fasi progettuali, nelle quali formulano dei pareri vincolanti e possono indicare prescrizioni alla realizzazione dei diversi presidi, sia durante le fasi di esercizio, quando possono intimare modifiche o anche agire come organi di vigilanza, elevando ad esempio sanzioni o disponendo la sospensione delle attività.

2 LE RADIAZIONI IONIZZANTI

La locuzione "radiazioni ionizzanti" indica una vasta categoria di meccanismi di trasferimento dell'energia caratterizzati da due aspetti peculiari:

- la presenza di meccanismi di trasporto dell'energia tra punti diversi dello spazio senza movimento di corpi macroscopici e senza bisogno di un mezzo di propagazione materiale, caratteristiche che individuano appunto una "radiazione";
- la capacità della radiazione in esame di produrre la ionizzazione in una parte degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato.



Una distinzione fondamentale tra i diversi tipi di radiazioni ionizzanti è quella tra le *radiazioni corpuscolari*, costituite da particelle subatomiche che si muovono con velocità assai elevate, e le *radiazioni elettromagnetiche*, che sono onde di tipo elettromagnetico e cioè della stessa natura della luce ordinaria, ma con lunghezza d'onda inferiore a circa 100 nm.

Le radiazioni corpuscolari costituite da particelle elettricamente cariche ionizzano la materia *direttamente*, a causa dell'interazione coulombiana tra la particella in moto e gli elettroni del mezzo. Le radiazioni corpuscolari costituite da particelle elettricamente neutre e le radiazioni elettromagnetiche ionizzano la materia in via *indiretta* e cioè liberando, nei fenomeni di interazione elementare con gli atomi o i nuclei del mezzo, particelle cariche capaci di dar luogo a fenomeni di ionizzazione. Queste forme di radiazione vengono perciò dette *indirettamente ionizzanti*.

2.1 Sorgenti di radiazioni ionizzanti

Le sorgenti di radiazioni ionizzanti che possono dar luogo ad esposizione dell'uomo sono:

- sorgenti radioisotopiche (naturali, artificiali, modificate dall'uomo);
- macchine radiogene;
- sorgenti extraterrestri (raggi cosmici).

Le **sorgenti radioisotopiche** sono costituite da materiali di origine naturale o artificiale (anche solo parzialmente) i cui atomi sono caratterizzati dall'instabilità dei loro nuclei. In pratica per cause naturali o provocate dall'uomo i nuclei delle sostanze radioisotopiche tendono spontaneamente a cambiare il loro stato e nel fare questo emettono radiazioni ionizzanti di vario genere.

Un nucleo che emette una radiazione segue un processo denominato *decadimento radioattivo* (si dice che *decade* ed il processo è denominato semplicemente *decadimento*) con il quale si modifica in modo anche molto rilevante cambiando la sua composizione.



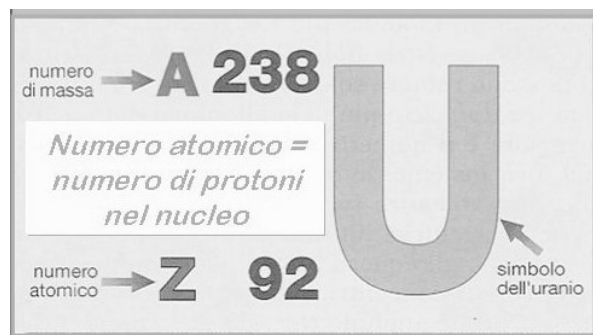
I costituenti del nucleo atomico sono i ben conosciuti (o per lo meno spesso citati) *protoni* e *neutroni*, che insieme sono chiamati *nucleoni*. I protoni hanno carica elettrica positiva, di entità pari a quella degli elettroni, mentre i neutroni non hanno carica elettrica. Il numero totale di nucleoni in un nucleo è detto *numero di*

massa di tale nucleo mentre il numero dei soli protoni è detto *numero atomico* e caratterizza l'atomo dal punto di vista chimico. Per identificare immediatamente un nucleo atomico con le sue caratteristiche si usa un semplice simbolo: una lettera maiuscola eventualmente seguita da una minuscola precedute da due numeri uno in alto e l'altro in basso (in apice e in pedice).

Le lettere rappresentano l'abbreviazione del nome dell'atomo, che identifica anche il numero atomico, lo stesso che precede le lettere come pedice, mentre in apice è il numero di massa.

Un materiale identificato da un solo atomo è detto *elemento* ed ha un numero atomico univoco; ad esempio il numero atomico dell'ossigeno è 8 mentre quello dell'idrogeno è 1.

In figura è riportato un esempio del simbolismo impiegato per rappresentare un elemento e le sue caratteristiche nucleari (atomo di uranio).



Due nuclei che differiscono per il numero di massa ma che hanno lo stesso numero atomico costituiscono due *isotopi* diversi dello stesso elemento. In genere per ogni elemento catalogato si conoscono uno o più isotopi radioattivi.

Nel decadimento radioattivo si ha una riduzione dei nuclei che emettono radiazioni, questo avviene secondo una regola temporale in base alla quale se si hanno inizialmente N_0 nuclei di un certo radioisotopo, dopo un tempo t il numero dei nuclei rimasti (sopravvissuti ai decadimenti spontanei) sarà:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

dove τ è la vita media, caratteristica del radioisotopo in questione.

Solitamente si preferisce indicare il tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ del radioisotopo, definito come il tempo nel quale il numero di nuclei si dimezza in seguito al decadimento. La grandezza che rappresenta il numero di decadimenti radioattivi nell'unità di tempo dovuti ad una certa quantità di radioisotopo è **l'attività**.

L'unità di misura dell'attività è il **becquerel**. *Un becquerel equivale ad una transizione, o un decadimento, per secondo ed il suo simbolo è Bq.* La vecchia unità di misura dell'attività è il **curie (Ci)**, la nostra normativa raccomanda di usare i seguenti fattori di conversione tra Ci e Bq:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Naturalmente anche l'attività di una certa quantità di radioisotopo diminuisce con la medesima legge accennata in precedenza, relativa al decadimento radioattivo che comporta la diminuzione della massa totale dell'isotopo stesso, valgono quindi le stesse costanti di tempo già citate.

Sono **macchine radiogene** tutti quei dispositivi che per applicazioni diverse producono radiazioni ionizzanti. Si va dai semplici tubi a vuoto per la produzione di raggi X agli acceleratori di particelle impiegati nei



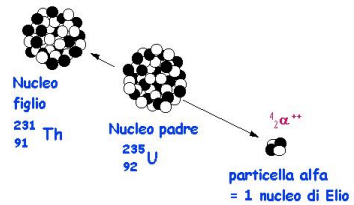
grandi centri di ricerca. Le più diffuse sono le macchine che accelerano elettroni producendo poi radiazione elettromagnetica a causa del fenomeno del *frenamento*. Tra queste si possono ricordare:

- tubi RX per indagini diagnostiche o indagini non distruttive sui materiali;
- apparati per diffrazione;
- acceleratori per radioterapia, applicazioni industriali e di ricerca;
- apparati per controllo di merci.

2.2 I principali tipi di radiazioni ionizzanti

Nel seguito sono indicate le caratteristiche fondamentali dei principali tipi di radiazioni ionizzanti.

Particelle alfa: sono nuclei di elio con carica pari a $2e^+$ e massa pari a 4 u.m.a., composte da due neutroni e due protoni. Sono prodotte nel decadimento di molti radionuclidi naturali e sono caratterizzate da una ionizzazione specifica estremamente elevata, da traiettorie praticamente rettilinee e percorsi massimi notevolmente brevi (pochi cm in aria, pochi micron nel tessuto vivente). Non danno luogo ad alcun rischio di esposizione esterna, ma solo interna nel caso di incorporazione di radionuclidi α -emettitori.



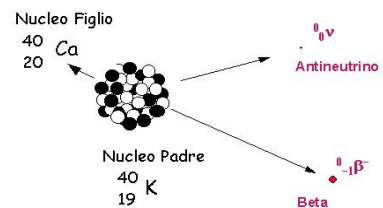
Particelle beta (elettroni): sono elettroni prodotti nel decadimento di gran parte dei radionuclidi naturali o artificiali. Hanno la stessa natura e le stesse caratteristiche di elettroni della stessa energia prodotti da altri fenomeni, per esempio per emissione da un catodo ed accelerazione tramite campi elettrici.

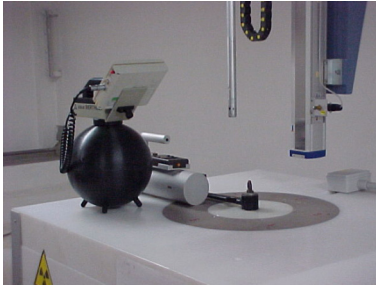


Sono soggetti a interazioni elettrostatiche dello stesso tipo di quelle subite dalle particelle α , ma a causa della massa molto più bassa evidenziano caratteristiche comple-

tamente diverse: la ionizzazione specifica è drasticamente inferiore, le traiettorie sono notevolmente tortuose, con percorsi massimi molto più lunghi di quelli delle α a parità di energia. Possono di norma dar luogo ad esposizione esterna, soprattutto della cute e del cristallino, oltre che, naturalmente, ad esposizione interna nel caso di incorporazione di radionuclidi β -emittenti.

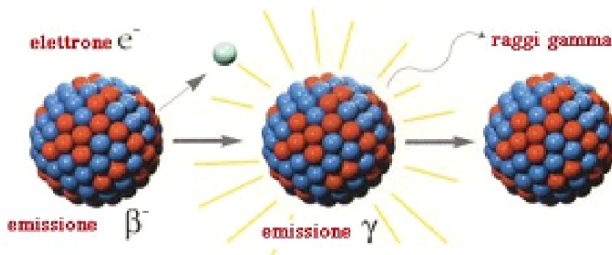
Un'altra differenza sostanziale, rispetto al caso delle particelle α , è la capacità di produrre una radiazione elettromagnetica secondaria, i ben noti raggi X. In pratica quando incidono su un qualsiasi materiale, gli elettroni possono subire una brusca deviazione passando nel campo coulombiano di un nucleo del mezzo ed emettere una frazione anche consistente della loro energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. I raggi X così prodotti sono detti anche radiazione di frenamento o di *bremstrahlung*. Essi sono molto più penetranti degli elettroni primari e possono dar luogo a significativi problemi di esposizione esterna.





Neutroni: sono privi di carica elettrica per cui esplicano i loro effetti solo per via indiretta, tramite le particelle cariche prodotte nelle collisioni con i nuclei atomici; sia per l'irradiazione dei tessuti che per l'assorbimento dei neutroni è particolarmente importante il ruolo dei protoni di rinculo prodotti da scattering elastico su nuclei di idrogeno. Essendo le interazioni responsabili del rallentamento dei neutroni relativamente rare, questo tipo di radiazione è caratterizzato da notevole capacità di penetrazione nella materia.

Raggi gamma: sono radiazioni elettromagnetiche (fasci di fotoni energetici) capaci di produrre ionizzazione fisicamente indistinguibili dai raggi X prodotti artificialmente per collisione di fasci di elettroni contro una sostanza ad alto numero atomico. Essi si producono nella transizione di un nucleo da uno stato eccitato a un altro generalmente stabile, principalmente a seguito di un decadimento α o β . I raggi gamma, come del resto i raggi X, producono ionizzazione in modo indiretto, cioè come già visto per mezzo di particelle cariche

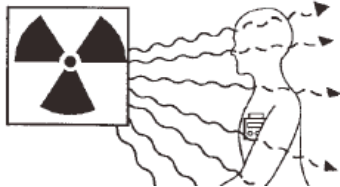


messe in moto nella materia irradiata, in questo caso principalmente gli elettroni secondari prodotti in interazioni di tipo fotoelettrico, Compton e creazione di coppie.

2.3 Modalità di esposizione

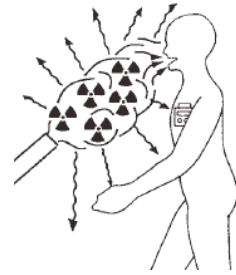
Esistono due diverse modalità di esposizione dell'uomo:

- esposizione esterna;
- esposizione interna.



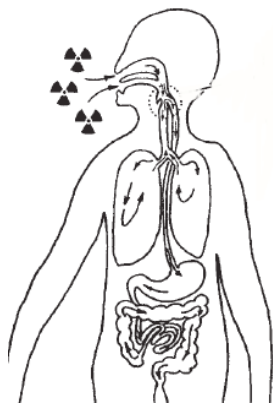
Nell'**esposizione esterna**, che è l'unica che interessa il caso delle macchine radiogene (fatti salvi problemi di *attivazione*), la sorgente di radiazioni è situata all'esterno del corpo. L'irradiazione in questo caso cessa al termine dell'esposizione, cioè non appena la sorgente venga spenta o allontanata. L'entità dell'irradiazione dipende dal tempo di esposizione, dalla presenza o meno di materiali schermanti tra la sorgente e la persona esposta e dalla geometria di esposizione (per esempio è inversamente proporzionale al quadrato della distanza).

Si parla invece di **esposizione interna** nei casi in cui nell'organismo della persona esposta siano state incorporate sostanze radioattive. Queste sostanze sono di norma metabolizzate con modalità legate alle loro proprietà chimiche e trattenute nell'organismo fino alla loro eliminazione con i normali meccanismi di escrezione o al loro decadimento fisico.

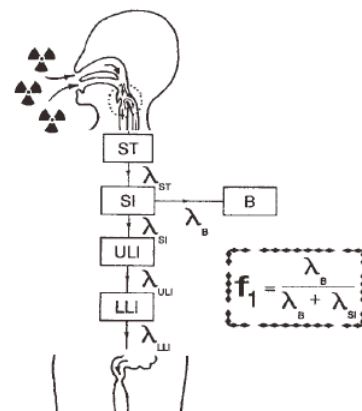


Per tutta la durata della loro permanenza nell'organismo queste sostanze radioattive, che possono anche essere concentrate in particolari organi, continuano ad irradiarne i tessuti.

L'irradiazione interna può pertanto proseguire anche per periodi molto prolungati dopo l'esposizione (in alcuni casi per tutta la vita dell'individuo esposto).



Perché si possa parlare di esposizione interna vi deve essere comunque un'introduzione di sostanze radioattive (per **inalazione**, assorbimento transcutaneo, **ingestione** o iniezione).



2.4 Effetti biologici delle radiazioni

Gli effetti biologici da radiazioni ionizzanti sono legati a complessi fenomeni che dall'evento iniziale di ionizzazione o eccitazione portano a danni alle cellule:

- morte;
- perdita della capacità riproduttiva della cellula;
- alterazioni dannose senza perdita della capacità riproduttiva.

Questi danni sono comunque legati alla quantità di energia ceduta ai tessuti viventi sotto forma di ionizzazione e eccitazione. Da questa circostanza deriva la conseguenza che il danno biologico è in ogni caso correlabile con la grandezza dosimetrica dose assorbita nel tessuto (energia assorbita per unità di massa).

Tipologia di effetti:

- effetti somatici deterministici (per il passato denominati effetti somatici non stocastici o anche, da noi in Italia, effetti graduati) che l'individuo subisce entro "breve tempo" a seguito di esposizione di entità rilevante, la cui incidenza è caratterizzata da una relazione dose-effetto con soglia;

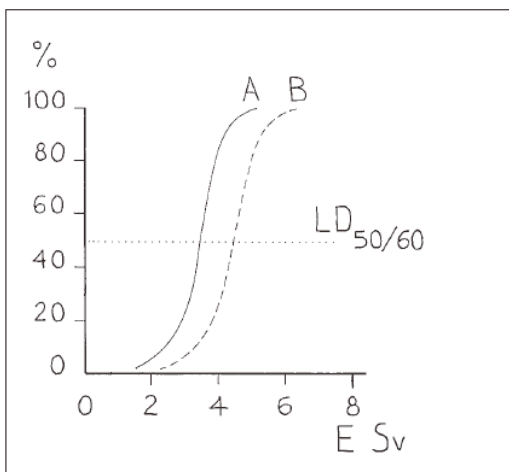
- effetti somatici stocastici che conseguono all'individuo a seguito di esposizioni, anche di bassa entità, la cui incidenza è caratterizzata da una relazione dose-probabilità;
- effetti genetici che conseguono ai discendenti della popolazione esposta, la cui incidenza si suppone avvenga anche nella specie umana, in conformità ad una relazione dose-probabilità.

Tabella 2 - Classificazione degli effetti delle radiazioni ionizzanti

SOMATICI (individuo esposto)	<ul style="list-style-type: none"> <i>Deterministici</i> <i>Stocastici</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Riodermite</i> <i>Infertilità</i> <i>Cataratta</i> <i>Sindrome acuta da irradiazione</i> <i>Altri</i>
		<ul style="list-style-type: none"> <i>Tumori solidi</i> <i>Leucemie</i>
GENETICI (progenie)	<i>Stocastici</i>	<ul style="list-style-type: none"> <i>Mutazioni geniche</i> <i>Aberrazioni cromosomiche</i>

Tabella 3 - Caratteristiche degli effetti deterministici

<ul style="list-style-type: none"> • Dose (elevata) determina 	<ul style="list-style-type: none"> Gravità Frequenza
<ul style="list-style-type: none"> • Relazione dose effetto non lineare (sigmoide) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Dose soglia dipendente da: 	<ul style="list-style-type: none"> Tipo e qualità della radiazione Fattore di protrazione della dose Tessuto o organo irradiato Variabilità individuale Sensibilità del metodo diagnostico
<ul style="list-style-type: none"> • Danno policitico (volume tessuto irradiato) • Reversibilità (entro certi limiti) • Insorgenza per lo più precoce • Danno (relativamente) specifico 	



Percentage of mortality following whole body exposure.

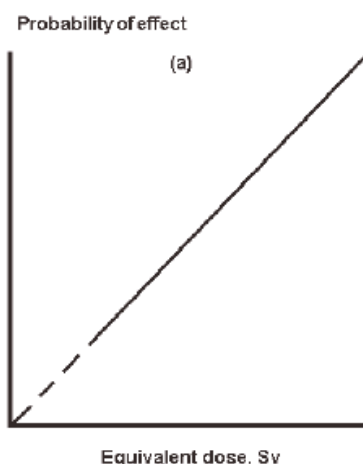
In figura vengono riportati le percentuali di mortalità in seguito a esposizione complessiva del corpo senza trattamento medico (curva A) e con trattamento medico sul midollo osseo (curva B).

LD_{50/60} sta a significare dose letale nel 50% dei casi entro 60 giorni dall'irraggiamento del corpo intero. Il valore di LD_{50/60} è 3,5 Gy (Sv) per senza trattamento e LD_{50/60} tra 4 e 5 Gy (Sv) con trattamento corretto.

Tabella 4 - Caratteristiche degli effetti stocastici

- Dose (anche molto bassa)
 - { Non determina la gravità (legge del "tutto o nulla")
 - { Determina la probabilità di comparsa
- Relazione dose-effetto lineare passante per l'origine.
- Dose soglia supposta assente per i fini della radioprotezione.
- Danno monocitico.
- Latenza lunga o molto lunga.
- Assenza di reversibilità.
- Danno aspecifico.
- Attribuzione eziologica su base probabilistica.

In figura è riportato l'andamento della probabilità accadimento di effetti nocivi per effetti stocastici in funzione della dose efficace. Il fattore di proporzionalità vale $5 \times 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$.



2.5 Grandezze fisiche, grandezze radioprotezionistiche e unità di misura

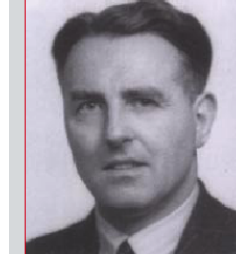
Per la quantificazione del danno dovuto a radiazioni ionizzanti sono state introdotte delle grandezze.

L'unità di misura nel SI per la grandezza dose assorbita è il **Gray (Gy)**. Per definizione 1 Gy corrisponde all'assorbimento di 1 J di energia radiante per kg di materia (1 J/kg).

A parità di dose assorbita i danni biologici dipendono fortemente anche da altri fattori, quali:

- la qualità della radiazione (tipo ed energia);
- le modalità temporali dell'irradiazione;
- il particolare effetto biologico considerato;
- il bersaglio biologico considerato (a livello di cellula, tessuto, organo, organismo).

Harold Gray
(1905–1965)



Rolf Sievert
(1896–1966)

Allo scopo di poter esprimere la possibilità di danni da radiazione sulla base di un unico indice di rischio, è stato necessario introdurre alcune **grandezze dosimetriche protezionistiche** (tra le quali *la dose equivalente e la dose efficace*, definite nell'allegato IV del D. Lgs. 230/95), ottenibili dalla dose assorbita nei tessuti moltiplicata per opportuni fattori correttivi. Queste grandezze esprimono, in modo sintetico e su una scala comune, la probabilità di effetti dannosi per esposizioni a bassi livelli (riscontrabili per le esposizioni lavorative). L'unità di misura del SI per la dose equivalente è il **sievert (Sv)**.

Oltre alle unità di dose ed ai loro multipli e sottomultipli, nella pratica protezionistica sono molto usate anche le corrispondenti unità di intensità di dose, quali Gy/h, mSv/s ecc., che esprimono le dosi per unità di tempo.

I limiti di dose vigenti in Italia sono espressi tramite le unità protezionistiche sopra indicate.

2.6 Misura delle radiazioni

Le radiazioni ionizzanti sono rivelate attraverso strumenti e metodi che si basano sulla capacità di ionizzazione del materiale che viene attraversato dalla radiazione stessa.

Nella sorveglianza fisica della protezione dalle radiazioni, riveste fondamentale importanza la strumentazione impiegata.

Essa ha l'importante funzione di indicare oltre alla presenza di radiazioni, il tipo, il rateo di dose assorbita da esposizione e la dose assorbita integrata in un prefissato intervallo di tempo.

La misura si divide in due tipi:

- **misura diretta**
- **misura indiretta.**

La **misura diretta** si effettua mediante strumentazione portatile o fissa ed è particolarmente indicata per le misure di intensità di dose sia in laboratorio che in campo, quando è necessario disporre immediatamente di valori di misura prima dell'avvio delle attività lavorative e nel corso di queste ultime.

La **misura indiretta** si effettua, in particolare per le superfici e per gli ambienti di lavoro, mediante il prelevamento di alcuni campioni sul luogo che si intende controllare, trasferendo poi tali campioni nel laboratorio di misura. Essa in particolare è indicata nei luoghi ove sussiste rischio di contaminazione. Considerata la maggiore sensibilità della strumentazione impiegata, è necessaria per tutti i casi dove ratei di intensità di dose superiori ai normali valori di dose ambiente non consentono di procedere ad una misura di tipo diretto.

La strumentazione impiegata per la rivelazione e la misurazione delle radiazioni si può distinguere in tre categorie:

1. **strumentazione portatile**, impiegata nel programma di sorveglianza per l'indicazione dei livelli di irradiazione o di contaminazione radioattiva;
2. **strumentazione fissa** quale catene di conteggio, catene di misura spettrometriche e monitori per la radioattività degli ambienti di lavoro con la funzione di fornire, in particolare per questi ultimi:
 - informazioni sul tipo di radiazione misurata;
 - registrazione dei livelli misurati;
 - segnale acustico di allarme al superamento dei prefissati valori di misura.
3. **strumentazione dosimetrica per la sorveglianza individuale e ambientale**, ossia strumenti di misura di dimensioni ridotte, particolarmente adatti per essere indossati dai lavoratori che frequentano le zone con presenza di radiazione e/o contaminazione. Tale strumentazione, che fornisce l'indicazione della dose accumulata in un prefissato intervallo di tempo, è suddivisa a sua volta in due tipi di dosimetri:

- *dosimetri passivi*, cioè dosimetri che per fornire il risultato richiedono una fase di lettura successiva a quella di esposizione;
- *dosimetri attivi o elettronici*, ovvero dosimetri in grado di fornire la misura della dose accumulata in tempo reale, cioè durante l'esposizione.

In particolare, per quest'ultimo tipo di strumentazione va anche detto che:

- i dosimetri per la **sorveglianza dosimetrica individuale** permettono di indicare la dose assorbita dai singoli operatori per verificare la permanenza dei valori di dose al di sotto dei valori preventivamente stabiliti e consentire di accertare, per via indiretta, che permangano le condizioni di sicurezza esaminate in fase di verifica ambientale;
- i dosimetri per la **sorveglianza dosimetrica ambientale** consentono di controllare gli ambienti di lavoro e di verificare che i livelli di dose da radiazioni ionizzanti non siano tali da comportare rischi per i lavoratori e per l'insieme della popolazione.

Generalmente per tutti i tipi di dosimetri elettronici oggi in commercio, vi è la possibilità di fornire un segnale di allarme al superamento dei limiti prefissati.

Nella categoria di strumenti per la sorveglianza individuale di cui al punto **3.**, rientrano anche i monitori mani-piedi che, costituiti da più rivelatori e per questo di dimensioni più generose e pertanto di tipo fisso, consentono la misura dei livelli di contaminazione delle mani, dei piedi e degli indumenti dei lavoratori che escono dalle aree di lavoro.

3 LA RADIOPROTEZIONE NEGLI AMBIENTI DI LAVORO

3.1 Le figure e i ruoli nel sistema di radioprotezione

La legge italiana affronta la progettazione e la gestione del sistema di protezione dalle radiazioni ionizzanti affidando le responsabilità principali alle figure del **datore di lavoro (DDL)** e dell'**esercente**.

Quest'ultimo è ben definito solo in alcuni casi, come in quello relativo agli impianti nucleari e per la protezione da alcune sorgenti naturali coinvolte in particolari processi produttivi. In altri casi le due figure sono sovrapposte e, di fatto, si parla di un unico responsabile che può essere sinteticamente ricondotto al DDL.

Parte delle responsabilità, di tipo esecutivo e operativo, sono comunque affidate anche a coloro che la legge indica come **dirigenti, preposti e lavoratori**. Questi ultimi, come gli altri sono tenuti ad osservare specifici obblighi che saranno dettagliati nel seguito.

L'organizzazione e la gestione tecnica del sistema sono affidate dalla legge a due figure con specifici titoli formativi e professionali: **l'esperto qualificato e il medico competente e autorizzato**. Il primo deve essere incaricato dell'organizzazione degli aspetti fisici della protezione, mentre il secondo si deve occupare degli aspetti medici.

Gli esperti qualificati sono riportati nell'elenco nominativo nazionale, ripartito secondo i seguenti gradi di abilitazione:

a) abilitazione di primo grado, per la sorveglianza fisica delle sorgenti costituite da apparecchi radiologici che accelerano elettroni con tensione massima, applicata al tubo, inferiore a 400 kV;

b) abilitazione di secondo grado, per la sorveglianza fisica delle sorgenti costituite da macchine radiogene con energia degli elettroni accelerati compresa tra 400 keV e 10 MeV, o da materie radioattive, incluse le sorgenti di neutroni, la cui produzione media nel tempo, su tutto l'angolo solido, sia non superiore a 10^4 neutroni al secondo;

c) abilitazione di terzo grado, per la sorveglianza fisica degli impianti come definiti all'articolo 7 del capo II del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. e delle altre sorgenti di radiazioni diverse da quelle di cui alle lettere a) e b).

L'abilitazione di grado superiore comprende quelle di grado inferiore.

Per accedere ai diversi gradi di abilitazione è necessario essere in possesso di adeguato titolo di studio universitario, aver svolto il tirocinio previsto (o avere una specializzazione equipollente) ed aver superato la prescritta prova d'esame.

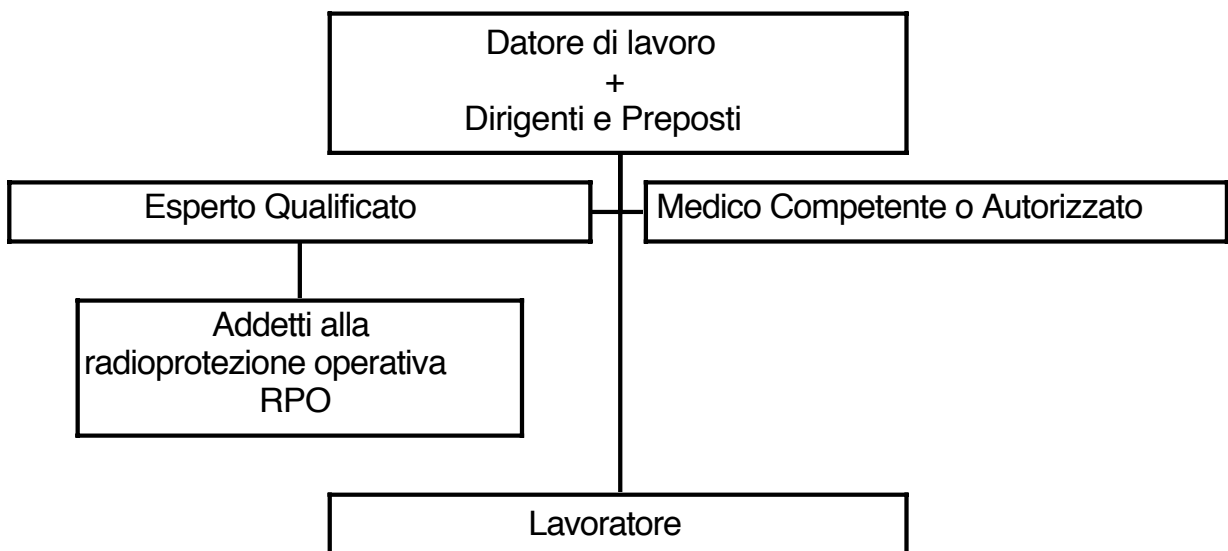
L'esperto qualificato può essere aiutato nell'effettuazione delle azioni di sorveglianza fisica da un **servizio di radioprotezione operativa**. La legge in effetti consente che mansioni strettamente esecutive, inerenti alla sorveglianza fisica della protezione contro le radiazioni, siano affidate dal datore di lavoro a personale non necessariamente provvisto dell'abilitazione da esperto qualificato, scelto d'intesa con l'esperto qualificato stesso e che operi secondo le direttive e sotto la responsabilità di quest'ultimo.

Il medico può essere solo "competente", così come definito dal D.Lgs. 626/94, per la sorveglianza medica di personale a basso rischio di esposizione (esposti di categoria B), ma deve essere necessariamente "autorizzato" per la sorveglianza del personale a più alto rischio di esposizione (esposti di categoria A).

I medici autorizzati sono a loro volta inclusi in un elenco nominativo istituito presso l'Ispettorato medico centrale del lavoro. All'elenco possono essere iscritti, su domanda, i medici competenti ai sensi dell'articolo 2 del Decreto Legislativo 19 settembre 1994, n. 626, che abbiano i requisiti stabiliti per legge e che dimostrino di essere in possesso della capacità tecnica e professionale necessaria per lo svolgimento dei compiti inerenti alla sorveglianza medica della protezione dei lavoratori di categoria A, superando uno specifico esame.

La struttura gerarchica disposta dalle norme di legge attualmente in vigore nel nostro Paese è pertanto quella rappresentata in Figura 1. In questo schema si vede che il DDL ha la responsabilità primaria del sistema di tutela e la esplica attraverso parziali deleghe a dirigenti e preposti, avvalendosi delle competenze specifiche di esperti qualificati e medici competenti/autorizzati. Il lavoratore è comunque incluso nello schema in quanto parte della responsabilità è legata agli obblighi specifici che la legge indica per questa figura e che quindi è anche parte attiva nella protezione dalle radiazioni ionizzanti.

Figura 1 - Schema logico della gerarchia per la tutela del lavoratore



3.2 Limiti di dose

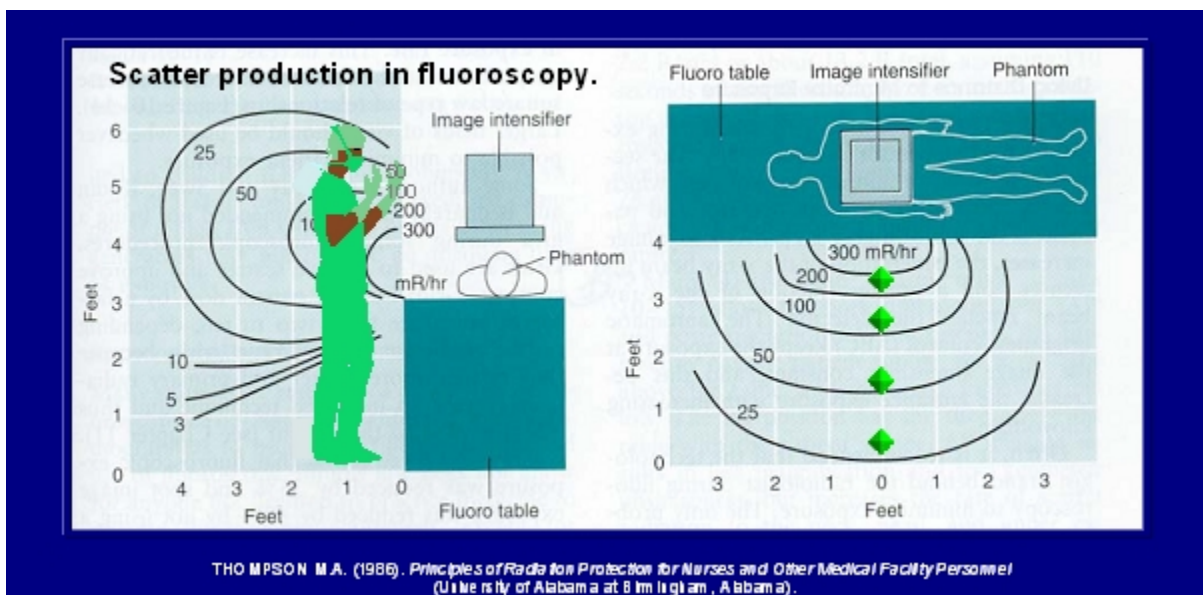
I principali limiti di dose per i lavoratori esposti e per la popolazione previsti dalla normativa vigente, il D.Lgs. 230/95 e s.m.i., corrispondono sostanzialmente (con piccole differenze in senso cautelativo) a quelli raccomandati dalla ICRP e sono raccolti nella tabella 5.

Tabella 5 - Limiti di dose per i lavoratori esposti e per la popolazione previsti dal D.Lgs. 230 e s.m.i.

GRANDEZZA	LIMITI PER LAVORATORI (mSv / anno)	LIMITI PER LA POPOLAZIONE (mSv / anno)
Dose efficace <i>singolo anno</i>	20	1
Dose equivalente <i>cristallino dell'occhio</i>	150	15
<i>pelle</i>	500	50
<i>mani e piedi</i>	500	

3.3 Classificazione delle aree e dei lavoratori

Il primo fondamentale adempimento di tipo organizzativo ai fini della radioprotezione consiste nella classificazione dei lavoratori e delle aree. Questa operazione permette di individuare le fasce di lavoratori per i quali devono essere garantite diverse categorie di presidi e le aree da sottoporre ai vari tipi di controlli protezionistici.



La classificazione dei lavoratori prevede le seguenti categorie:

- *lavoratori esposti*: sono considerati tali i soggetti che per il loro lavoro sono suscettibili di un'esposizione a radiazioni ionizzanti superiore ai limiti fissati per le persone del pubblico ; nell'ambito dei lavoratori esposti si distinguono due categorie:
 - categoria A, comprendente i lavoratori esposti suscettibili di superare uno dei seguenti valori in un anno:
 - 6 mSv di dose efficace
 - i tre decimi dei limiti di dose fissati per cristallino, pelle, mani avambracci piedi e caviglie
 - categoria B, comprendente i lavoratori esposti non classificati in Categoria A;
- *persone del pubblico*
- *gruppi di riferimento della popolazione*: non sono una suddivisione prevista nella classificazione vera e propria. Comprendono le persone la cui esposizione è ragionevolmente uniforme e rappresentativa di quella degli individui della popolazione maggiormente esposti, in relazione ad una determinata fonte di radiazione.

L'assegnazione di un individuo della popolazione a uno dei gruppi sopraindicati individua le azioni individuali di radioprotezione da svolgere nei suoi confronti.

L'individuazione della corretta classificazione dei singoli lavoratori è basata su una valutazione del rischio di assorbimento di prefissati valori di dose. Si tratta di un'azione di stretta competenza dell'esperto qualificato, cui devono essere forniti tutti i dati necessari nella scheda di posto di lavoro. Sulla base della classificazione, l'esperto qualificato sottopone il lavoratore all'appropriato programma individuale di sorveglianza fisica della radioprotezione.

Una seconda incombenza di pari importanza in fase di pianificazione della protezione è la classificazione delle aree, che determina il tipo di controlli ambientali da mettere in atto in ciascuna di esse. Ogni area di lavoro sottoposto a regolamentazione per motivi di radioprotezione costituisce una *zona classificata*.

Le zone classificate sono suddivise in:

- *Zone Controllate* : sono le aree in cui, sulla base degli accertamenti, sussiste la possibilità che i lavoratori in essa operanti superino i valori previsti per la classifica-zione in Categoria A;
- *Zone Sorvegliate* : sono le aree in cui sussiste per i lavoratori in essa operanti la possibilità di superamento di uno dei limiti previsti per le persone del pubblico.



Tutte le zone classificate (Zone Controllate e Sorvegliate) devono essere evidenziate con apposita segnaletica. Le Zone Controllate sono inoltre essere delimitate e le modalità di accesso in esse sono opportunamente regolamentate.

L'individuazione delle Zone Classificate è anch'essa affidata all'esperto qualificato e viene effettuata sulla base di una valutazione a priori dei rischi.

3.4 Segnaletica di sicurezza

Le zone classificate sono indicate con adeguata segnaletica di sicurezza che ha nel simbolo "pericolo radiazioni ionizzanti" il suo elemento fondamentale. Solitamente è anche indicata la modalità di accesso alle aree classificate. Ogni sorgente radioattiva salvo quelle non sigillate in corso di manipolazione è etichettata con il simbolo internazionale pericolo di radiazioni ionizzanti.

Di seguito è riportata la principale segnaletica di sicurezza presente negli ambienti con rischio di radiazioni ionizzanti ed il relativo significato. Oltre a quelli indicati devono essere comunque considerati i segnali antincendio (estintori, idranti ecc.), di emergenza (vie di esodo ed uscite) e gli specifici segnali di informazione.



Nel seguito sono in particolare riportati dei cartelli informativi che indicano la collocazione di strutture di decontaminazione di emergenza.



Recentemente l'IAEA ha introdotto un nuovo segnale a sfondo rosso, riportato nel seguito, che include il simbolo delle radiazioni ionizzanti sovrastante il teschio del pericolo di morte e l'omino dell'uscita di emergenza. Lo scopo dichiarato per l'uso di questo nuovo segnale è quello di offrire un'indicazione chiara di pericolo a tutte quelle persone, magari analfabete, che possono trovarsi in prossimità di fonti radioattive e che non conoscono lo storico e "astratto" simbolo del "trifoglio", da sempre associato alle radiazioni.

Il nuovo segnale potrà essere impiegato nel prossimo futuro in sostituzione del classico trifoglio in campo giallo e probabilmente sarà utilizzato soprattutto in prossimità di importanti sorgenti di radiazioni.



A supporto della segnaletica di tipo permanente descritta in precedenza, si può utilizzare una segnaletica di tipo luminoso e/o acustico che descrive l'azione che deve essere compiuta in particolari situazioni lavorative. Trattandosi di un tipo di segnalazione occasionale e non sempre definibile a priori è necessario conoscere ogni volta il significato del segnale ricevuto.

Esempi tipici di segnaletica luminosa utilizzata in radioprotezione sono i seguenti:

- indicatori di erogazione raggi o sorgente fuori dal contenimento schermate;
- lampeggiante giallo e rosso.

In caso di pericolo grave e di necessità di sgombero degli ambienti di lavoro si utilizzano segnali acustici e/o comunicazioni verbali che descrivono il comportamento da seguire.

3.5 Obblighi del datore di lavoro, del dirigente e del preposto

L'art. 61 del D.Lgs. 230 e s.m.i. sancisce gli obblighi di datori di lavoro, dirigenti e preposti. Come già citato in quanto precede, la responsabilità principale è assegnata al DDL e, in subordine, ai dirigenti che rispettivamente esercitano (usando il termine impiegato nella legge stessa) e dirigono le attività con impiego di radiazioni ionizzanti.

La legge individua comunque un carico di responsabilità anche per i preposti che sovrintendono alle stesse attività; questi ultimi, nell'ambito delle rispettive attribuzioni e competenze, devono attuare le cautele di protezione e di sicurezza disposte da DDL e dirigenti e comunque previste dalla legge vigente.

Alla base del sistema di responsabilità si colloca la relazione scritta contenente le valutazioni e le indicazioni di radioprotezione inerenti le attività svolte, preparata, prima dell'inizio delle attività, da un esperto qualificato appositamente incaricato dal DDL.

Il DDL ha comunque l'onere di fornire all'esperto qualificato i dati, gli elementi e le informazioni necessarie per la preparazione della relazione di progetto radioprotezionistico. La relazione indica poi le modalità con le quali i DDL devono assolvere agli specifici compiti di responsabilità.

In particolare con il supporto dell'esperto qualificato ed attraverso le funzioni svolte da quest'ultimo il DDL deve provvedere affinché gli ambienti di lavoro in cui sussista un rischio da radiazioni siano individuati, delimitati, segnalati, classificati in zone e che l'accesso ad essi sia adeguatamente regolamentato.

Sempre attraverso l'esperto qualificato, il DDL ha la responsabilità di provvedere affinché i lavoratori interessati siano classificati ai fini della radioprotezione e di predisporre norme interne di protezione e sicurezza adeguate al rischio di radiazioni. Copia di dette norme deve essere consultabile in prossimità delle zone controllate.

Il DDL ha poi delle responsabilità dirette nei confronti dei lavoratori. Queste consistono nel fornire i mezzi adeguati di protezione in relazione ai rischi cui sono esposti, la necessaria formazione e informazione specifica e, in via riservata, i risultati delle valutazioni di dose effettuate dall'esperto qualificato inerenti il singolo lavoratore.

Il DDL è responsabilizzato dalla legge al punto da avere l'obbligo di verificare l'operato dei lavoratori e dei suoi consulenti in materia. In particolare deve provvedere affinché i singoli lavoratori osservino le norme interne, usino i prescritti mezzi di protezione e osservino le corrette modalità di esecuzione del lavoro. Sempre a questo proposito la legge impone al DDL di verificare che siano apposte segnalazioni indicanti il tipo di zona, la natura delle sorgenti ed i relativi tipi di rischio e siano evidenziate, mediante appositi contrassegni, le sorgenti di radiazioni ionizzanti, fatta eccezione per quelle non sigillate in corso di manipolazione.

Il DDL che riceve comunicazione da parte di una **lavoratrice del suo stato di gravidanza**, deve curare che non svolga attività in zone classificate o, comunque, non sia adibita ad attività che potrebbero esporre il nascituro ad una dose che ecceda un millisievert durante il periodo della gravidanza.

È inoltre vietato adibire le donne che allattano ad attività comportanti un rischio di contaminazione.

Nei suddetti casi il DDL adotta le misure necessarie affinché l'esposizione al rischio della dipendente sia evitata, modificandone temporaneamente le condizioni o l'orario di lavoro. Ove la modifica delle condizioni o dell'orario di lavoro non sia possibile per motivi organizzativi o produttivi, il datore di lavoro adibisce la lavoratrice ad altra mansione, dandone contestuale informazione scritta all'Autorità di Vigilanza competente per territorio che provvederà ad emettere i provvedimenti più idonei.

3.6 Obblighi dell'esperto qualificato

Per l'esperto qualificato (EQ) sono previste specifiche attribuzioni all'art 79 del D.Lgs. 230/95 s.m.i.. Si tratta di funzioni da svolgere nell'esercizio della sorveglianza fisica per conto del datore di lavoro che riguardano le fasi progettuale, operativa e conclusiva dell'attività con impiego di radiazioni ionizzanti.

Durante la fase progettuale l'EQ ha il compito di esaminare le problematiche inerenti la protezione dalle radiazioni e di redigere di conseguenza la relazione con cui fornisce le basi tecniche indispensabili alla gestione delle responsabilità specifiche da parte del DDL. L'EQ deve anche fornire il suo benestare di competenza all'esecuzione delle opere iniziali e di eventuale modifica successiva.

Nella fase operativa l'EQ effettua la sorveglianza fisica che consiste nell'esecuzione di una serie di azioni, molte delle quali espressamente previste dalla legge, atte a garantire e verificare il rispetto delle specifiche salvaguardie progettate e predisposte in fase iniziale. A tale scopo l'EQ effettua controlli e misure sia preliminarmente sia con periodicità ben definite, e soprattutto esegue le periodiche valutazioni delle dosi e delle introduzioni di radionuclidi relativamente ai lavoratori esposti.

La legge concede all'EQ una certa libertà di selezione delle metodiche di misura di supporto alle valutazioni che gli competono, pur imponendo (salvo casi particolari) ad esempio il controllo dell'esposizione per i lavoratori di categoria A mediante uno o più apparecchi di misura individuali, nonché in base ai risultati della sorveglianza ambientale e nel caso di possibile esposizione interna per lo stesso personale, la valutazione di dose deve essere eseguita in base ad idonei metodi fisici e/o radiotossicologici.

Le valutazioni di dose effettuate dall'EQ devono essere comunicate per iscritto, a sua cura, al medico autorizzato, almeno ogni sei mesi nel caso di lavoratori di categoria A e con periodicità almeno annuale, al medico addetto alla sorveglianza medica, quelle relative agli altri lavoratori esposti.

L'esperto qualificato deve anche procedere alle analisi e valutazioni necessarie ai fini della sorveglianza fisica della protezione della popolazione. In particolare deve effettuare la valutazione preventiva dell'impegno di dose derivante dall'attività e, in corso di esercizio, delle dosi ricevute o impegnate dai gruppi di riferimento della popolazione in condizioni normali, nonché la valutazione delle esposizioni in caso di incidente.

3.7 Obblighi del medico competente o autorizzato

Il datore di lavoro deve provvedere ad assicurare mediante uno o più medici la sorveglianza medica dei lavoratori esposti e degli apprendisti e studenti in conformità alle norme del D.Lgs. 230/95 e s.m.i.

Come è già stato accennato, la sorveglianza medica dei lavoratori esposti che non sono classificati in categoria A è assicurata tramite

medici competenti o medici autorizzati, mentre quella dei lavoratori di categoria A deve essere assicurata esclusivamente tramite medici autorizzati.

Il medico incaricato della sorveglianza fisica effettua la visita preventiva del lavoratore esposto e ne determina lo stato di idoneità iniziale. In caso di idoneità le visite dei lavoratori esposti sono ripetute periodicamente con frequenza almeno annuale, frequenza che diventa almeno semestrale per i lavoratori esposti di categoria A. Dopo ogni visita il medico emette il suo giudizio di idoneità inserendo il lavoratore interessato in una delle seguenti categorie:

- a) idonei;
- b) idonei a determinate condizioni;
- c) non idonei;
- d) lavoratori sottoposti a sorveglianza medica dopo la cessazione del lavoro che li ha esposti alle radiazioni ionizzanti.

Il datore di lavoro è tenuto a rispettare il giudizio sintetico espresso dal medico, allontanando dall'attività che li espone al rischio di radiazioni ionizzanti coloro che non sono classificati come idonei.

La legge dispone che il DDL dia la sua completa disponibilità al medico incaricato della sorveglianza in modo da assicurare le condizioni necessarie per lo svolgimento dei suoi compiti, consentendo in particolare l'accesso a qualunque informazione o documentazione che questi ritenga necessaria per la valutazione dello stato di salute dei lavoratori esposti, e delle condizioni di lavoro incidenti, sotto il profilo medico, sul giudizio di idoneità dei lavoratori stessi. Le funzioni di medico autorizzato e di medico competente non possono essere assolte dalla persona fisica del datore di lavoro né dai dirigenti che esercitano e dirigono l'attività disciplinata, né dai preposti che ad essa sovrintendono.

3.8 Obblighi del lavoratore

Si ritiene particolarmente importante richiamare qui gli **obblighi dei lavoratori** addetti alle attività con rischio da radiazioni (come presenti all'art. 68 del D.Lgs. 230/95 e s.m.i.):

- 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 a cui sono addetti;

Esempio: effettuare le operazioni con sorgenti di radiazione nei tempi e nei modi secondo le indicazioni ricevute e secondo eventuali prescrizioni del DDL (o dirigente o preposto)

- usare secondo le specifiche disposizioni i dispositivi di sicurezza, i mezzi di protezione e di sorveglianza dosimetrica predisposti o forniti dal datore di lavoro;

Esempio: portare adeguatamente i dosimetri personali durante la permanenza nelle Zone Classificate e sottoporsi ai controlli di radiotossicologia e WBC nei tempi previsti dalle indicazioni ricevute

- 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 vengano a conoscenza;

Esempio: segnalare immediatamente la rottura di un area monitor, il malfunzionamento di un interblocco, una situazione di non rientro automatico di una sorgente nella propria schermatura

- non rimuovere né modificare, senza averne ottenuta l'autorizzazione, i dispositivi e gli altri mezzi di sicurezza, di segnalazione, di protezione e di misurazione;

Esempio: non by-passare o disconnettere un interblocco per rendere più agevole una serie di irraggiamenti; non rimuovere una schermatura mobile

- non compiere, di propria iniziativa, operazioni o manovre che non sono di loro competenza o che possono compromettere la protezione e la sicurezza;

Esempio: non effettuare operazioni con sorgenti radioattive al di fuori delle mansioni di routine e delle indicazioni ricevute

- sottoporsi alla sorveglianza medica ai sensi del decreto 230/95;

Esempio: essere presenti alla visita medica del medico autorizzato/competente, effettuare gli esami prescritti dal medico autorizzato/competente

- rendere edotto il datore di lavoro dell'esistenza di eventuali altre attività che li esponano o li abbiano esposti in passato al rischio da radiazioni ionizzanti;

Esempio: fornire informazioni su esposizioni in precedenti attività lavorative o in attività lavorative contemporanee a quella in oggetto

- per le sole **lavoratrici**, notificare al datore di lavoro il proprio stato di **gestazione** non appena accertato.

Si tratta naturalmente di adempimenti assai più semplici di quelli richiesti al datore di lavoro o alle sue strutture, ma non per questo meno importanti. A conferma dell'importanza ad essi attribuita dal legislatore si può ricordare che la loro inosservanza è anch'essa sanzionata penalmente.

3.9 Mezzi dosimetrici e loro impiego

Nel seguito si descrive tipologia ed impiego degli strumenti normalmente utilizzati per la determinazione della dosimetria individuale ed ambientale in conformità alla normativa vigente (D.Lgs 17 marzo 1995 n. 230 e s.m.i.).

In particolare si fa riferimento ai seguenti argomenti:

- dosimetri individuali assegnati ai lavoratori esposti;
- dosimetri dislocati negli ambienti di lavoro e nei depositi nei quali sono custoditi materiali radioattivi, a costituire reti di controllo dei livelli di esposizione;
- dosimetri a lettura diretta assegnati a lavoratori, lavoratori autonomi, dipendenti da terzi, lavoratori non esposti, apprendisti e studenti, visitatori ed ospiti, che accedono occasionalmente, per vari motivi, alle zone classificate.

In caso di esposizione a rischio di contaminazione interna, il lavoratore è sottoposto a periodici controlli di radiotossicologia su campioni biologici (escreti) e controlli di misura diretta della eventuale contaminazione (Whole Body Counter).

Principali caratteristiche dei dosimetri utilizzati

I dosimetri individuali ed ambientali sono forniti dal Servizio di Dosimetria dell'Istituto di Radioprotezione dell'ENEA. Sono utilizzati i tipi seguenti:

- **dosimetri x + gamma** impiegati per la misura della dose efficace o per la misura della esposizione ambientale (figura 1);
- **dosimetri gamma + n_t** (gamma e neutroni termici), impiegati per la misura della dose efficace o per la misura della esposizione ambientale (figura 2);
- **dosimetri n_v** (neutroni veloci), impiegati per la misura della dose efficace o per la misura della esposizione ambientale (figura 3);
- **dosimetri ad anello**, impiegati per la misura della dose equivalente x + gamma e beta (figura 4).

I dosimetri dei primi 3 tipi elencati hanno la forma di piccoli parallelepipedi e sono inseriti in una busta di plastica protettiva

Il dosimetro a termoluminescenza per estremità (x+gamma e beta) è fornito con supporto ad anello. La bustina di protezione dell'anello non è sigillata, ne consegue che il dosimetro non è a tenuta di liquido.

Il nominativo dell'utilizzatore dei dosimetri a corpo intero è riportato sulla busta di plastica protettiva insieme ad una codifica contenente caratteri identificativi della società, del reparto, della persona, del dosimetro, del periodo di utilizzo e del tipo di radiazione monitorata.

Il dosimetro per estremità è invece associato all'utilizzatore tramite un numero di identificazione riportato accanto al codice a barre .

Il colore dei supporti per i filtri e delle card dei dosimetri a corpo intero può essere grigio chiaro o scuro; tali colori sono utilizzati alternativamente nei periodi di misura (frequenza del cambio: ogni 45 giorni per i dosimetri per corpo intero x + gamma e gamma + neutroni termici, ogni 90 giorni per i dosimetri per corpo intero neutroni veloci e per quelli x + gamma e beta ad anello).



(Figura 1)



(Figura 2)



(Figura 3)



(Figura 4)

Istruzioni per l'impiego dei dosimetri

L'impiego dei dosimetri è disciplinato dalle norme di seguito riportate, che devono essere obbligatoriamente rispettate per consentire la attuazione di un sistema di dosimetria corretto.

Dosimetri personali

I dosimetri sono strettamente personali e non possono essere ceduti od utilizzati da persone diverse da quelle a cui sono assegnati (compresi i dosimetri di scorta, non nominativi).

I dosimetri non devono essere utilizzati al di fuori del luogo di lavoro per esposizioni diverse da quelle dovute all'attività lavorativa svolta.

I dosimetri devono essere sempre indossati prima dell'ingresso in zone classificate e prima della partecipazione a qualsiasi operazione con rischio radiologico.

I dosimetri per il corpo devono essere applicati a livello del petto, esternamente al taschino del camice o della tuta, od in posizione equivalente, salvo differente indicazione dell'esperto qualificato.

I dosimetri devono essere indossati sotto il camice in piombo, quando utilizzato.

I dosimetri per neutroni devono essere sempre usati esponendo alla radiazione incidente la faccia sulla quale è riportata la codifica.

I dosimetri non devono, per nessuna ragione, essere lasciati nelle zone classificate, appuntati su camici o tute.

Al termine della giornata lavorativa i dosimetri devono essere depositati nell'apposita bacheca.

I dosimetri non devono, per nessuna ragione, essere estratti dalle custodie in plastica, che li proteggono dall'umidità e dagli agenti atmosferici.

I dosimetri devono essere utilizzati con cura, evitandone la deformazione e l'esposizione a fonti di calore.

L'eventuale smarrimento di un dosimetro deve essere immediatamente comunicato alla persona di riferimento per la consegna ed il ritiro (Radioprotezione operativa) che, sentito l'esperto qualificato, provvederà a fornire un dosimetro di riserva ed a raccogliere le informazioni necessarie per le valutazioni dosimetriche.

Dosimetri ambientali

I dosimetri sono posizionati in base alle indicazioni fornite dall'esperto qualificato.

I dosimetri devono essere posizionati in modo che siano visibili e protetti dagli agenti atmosferici.

I dosimetri non devono essere rimossi o cambiati di posizione senza autorizzazione dell'esperto qualificato (ogni anomalia deve essere tempestivamente segnalata alla persona di riferimento).

Dosimetri a lettura diretta

I dosimetri sono di norma forniti a visitatori, ospiti, apprendisti, studenti, lavoratori non classificati e/o dipendenti da terzi (non classificati) che accedono alle zone classificate. Tale tipologia di dosimetro risulta di estrema utilità anche per i lavoratori nel caso in cui si voglia avere una misura immediata della dose personale; deve pertanto essere utilizzato anche dai lavoratori in tutte le operazioni che implicano un rischio di esposizione significativo (contemporaneamente con il dosimetro personale già in dotazione).

Le norme di utilizzo generali sono analoghe a quelle indicate per i dosimetri personali.

In aggiunta va ricordato che generalmente i dosimetri a lettura diretta segnalano lo stato di batteria scarico con un cicalino intermittente (o continuo). In tal caso occorre avvisare la persona di riferimento e procedere con le verifiche di funzionalità dell'apparecchio. Infine è opportuno ricordare che tali dosimetri sono apparecchiature delicate e piuttosto costose devono quindi essere evitati loro urti e cadute.

Controlli di contaminazione interna

Se un lavoratore è esposto al rischio di contaminazione interna, l'EQ stabilisce una serie di misure periodiche su campioni biologici (i.e. urine e/o feci) e/o misure Whole Body Counter (WBC).

La frequenza e la tipologia dei controlli sono stabiliti con opportuni criteri derivati generalmente da raccomandazioni e comunque nel rispetto del principio di limitazione delle dosi individuali.

I tipi di controlli generalmente previsti sono:

- misure gamma, alfa o beta sulle urine;
- misure alfa sulle feci;
- WBC di alta o bassa energia.

La periodicità dei controlli è generalmente semestrale, mentre nel caso di esposizione ad alcuni radionuclidi (vita media più o meno lunga) può essere maggiore o minore rispettivamente.

Il rispetto dei tempi a cui sottoporsi ai controlli garantisce che il monitoraggio stabilito dall'EQ sia efficace e garantisca la limitazione delle dosi.

3.10 Dispositivi di protezione individuale (DPI)

Un dispositivo di protezione individuale (DPI) è qualsiasi attrezzatura destinata ad essere indossata e tenuta dal lavoratore allo scopo di proteggerlo contro uno o più rischi suscettibili di minacciarne la sicurezza o la salute durante il lavoro, nonché ogni complemento o accessorio destinato a tale scopo. È considerato DPI anche l'insieme costituito da diversi dispositivi o articoli abbinati in modo solidale dal fabbricante per proteggere una persona da uno o più rischi che concorrono simultaneamente.

I DPI necessari per la protezione dalle radiazioni ionizzanti sono prescritti dall'EQ e sono forniti gratuitamente dal DDL, che solitamente delega in questo compito il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione (RSPP).

I DPI devono sempre essere in piena efficienza, devono essere sostituiti quando necessario e, se interscambiabili tra i lavoratori, deve essere curato il rispetto rigoroso delle norme igieniche.

Il corretto impiego dei DPI necessari per la protezione dalle radiazioni ionizzanti è descritto a cura dell'EQ. Le situazioni e le condizioni di impiego sono anche riportate nelle norme interne di radioprotezione.

3.11 Norme interne di radioprotezione

Le raccomandazioni riportate in quanto precede sono generalmente raccolte in forma sintetica nelle norme interne che sono elencate tra gli obblighi di legge del DDL. Si tratta in pratica di un elenco breve di raccomandazioni, solitamente contenuto in una sola pagina, alle quali tutti coloro che operano presso la specifica struttura sono tenuti ad adeguarsi.

Come è già stato citato, nel D.Lgs. 230/95 e s.m.i., all'art. 61 comma 3, lettera c, si dice esplicitamente che *"i datori di lavoro, i dirigenti e i preposti devono in particolare: [...] c) predisporre norme interne di protezione e sicurezza adeguate al rischio di radiazioni e curare che copia di dette norme sia consultabile nei luoghi frequentati dai lavoratori, ed in particolare nelle zone controllate"*. L'obbligo è quindi esteso anche a dirigenti e preposti, i quali però sono principalmente responsabili della facile consultazione delle norme e della loro attuazione. L'onere della loro predisposizione spetta in via quasi esclusiva al datore di lavoro. Sempre all'art. 61 del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. si stabiliscono altri obblighi per il datore di lavoro i dirigenti ed i preposti che sono inerenti alle norme interne.

In particolare si stabilisce implicitamente chi ne debba redigere il contenuto dove, al comma 2, si indica la necessità di acquisire una relazione contenente le indicazioni di radioprotezione da un esperto qualificato incaricato della sorveglianza fisica.

Le norme interne di radioprotezione rappresentano comunque una consuetudine da oltre quarant'anni, quando fu inserito nel DPR 13.02.1964 n. 185 l'obbligo per i datori di lavoro di istituirle e renderle disponibili nelle zone di lavoro.

I lavoratori sono obbligati ad attenersi a quanto disposto dalle norme interne, in quanto la legge richiede a questi di 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 a cui sono addetti, ovvero in particolare sono tenuti ad osservare le norme interne disposte sotto la responsabilità del DDL.

Le norme interne sono consultabili sul luogo di lavoro, in particolare presso le zone controllate, ed è un diritto-dovere del lavoratore prenderne visione prima dell'inizio dell'attività, verificando periodicamente se sono state aggiornate.

4 CONCLUSIONI

Questo opuscolo, preparato da esperti del settore operanti all'interno dell'ENEA, nasce per rispondere alle esigenze di formazione e informazione del personale dell'Ente esposto a radiazioni ionizzanti per motivi lavorativi. L'opuscolo rappresenta inoltre lo strumento fornito dal DDL, che insieme ad altre iniziative consente di ottemperare agli obblighi di legge che lo riguardano in termini di formazione.

Il lavoro alla base di questa pubblicazione è stato svolto a cura delle figure che all'interno dell'ENEA sono deputate a garantire la tutela del lavoratore rispetto all'esposizione alle radiazioni ionizzanti e costituisce quindi patrimonio dell'Ente. Queste stesse figure non si limitano a indicare principi, norme e regole con attività divulgative di questo tipo ma sono soprattutto impegnate a garantire la sorveglianza continua relativamente al buon funzionamento e alla corretta applicazione del sistema di radioprotezione all'interno dell'ENEA.

La riuscita di un programma di protezione vede sicuramente nella formazione un momento essenziale, ma richiede in ogni caso il contributo fattivo di tutti gli attori e in particolare dei suoi fruitori, ovvero dei lavoratori stessi. Ha pertanto un valore fondamentale il rispetto delle regole da parte dei lavoratori che sono i veri attuatori della radioprotezione avendo l'interesse primario e potendo impiegare i corretti presidi e applicare le necessarie cautele in ogni singolo atto operativo.

5 GLOSSARIO SU GRANDEZZE E UNITÀ DI MISURA

Grandezze

Attività: numero di decadimenti radioattivi nell'unità di tempo dovuti ad una certa quantità di radioisotopo

Dose Assorbita: rapporto fra 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. Nelle applicazioni di radioprotezione la dose assorbita indica la dose media nella massa di un tessuto od organo.

Dose equivalente: dose assorbita media in un tessuto o organo, ponderata in base al tipo e alla qualità della radiazione. Il fattore di ponderazione esprime la variabilità di danno biologico per diversi tipi ed energia di radiazioni a parità di dose assorbita da parte di un organo o tessuto.

Dose efficace: somma delle dosi equivalenti per i vari tessuti ed organi, ponderate in base al tipo di tessuto od organo. Il fattore di ponderazione esprime la variabilità di danno biologico fra diversi organi o tessuti a parità di dose equivalente.

Unità di misura

Becquerel (Bq): unità di misura dell'attività, equivalente ad una transizione, o decadimento, per secondo.

Curie (Ci): desueta unità di misura dell'attività, equivalente a $3,7 \times 10^{10}$ Bq. La sua definizione deriva dall'attività di 1 grammo di radio, presa come riferimento.

Gray (Gy): unità di misura della dose assorbita, pari all'assorbimento di 1 joule di energia radiante per kg di materia (1 J/kg).

Sievert (Sv): unità di misura della dose equivalente e della dose efficace, pari all'assorbimento di 1 joule di energia radiante per kg di materia (1 J/kg), corretta per gli opportuni fattori di ponderazione.

Nella pratica, sono spesso utilizzati multipli e sottomultipli delle unità di misura sopra riportate. Di seguito in tabella sono richiamati i più comuni.

Prefisso	Fattore di moltiplicazione	Simbolo	Valore
Tera	10^{12}	T	1000000000000
Giga	10^9	G	1000000000
Mega	10^6	M	1000000
kilo	10^3	k	1000
etto	10^2	h	100
deca	10^1	da	10
unità	10^0	-	1
deci	10^{-1}	d	0,1
centi	10^{-2}	c	0,01
milli	10^{-3}	m	0,001
micro	10^{-6}	μ	0,000001
nano	10^{-9}	n	0,000000001
pico	10^{-12}	p	0,000000000001

Edito dall'ENEA
Unità Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Edizione della pubblicazione a cura di Giuliano Ghisu
Copertina: Cristina Lanari
Stampa: Laboratorio Tecnografico C.R. Frascati
Finito di stampare nel febbraio 2008