

DISPENSE DEL CORSO DI RADIOPROTEZIONE

A cura di:

dr.ssa Iole Pinto

AUSL 7 di Siena - Dipartimento di Prevenzione -U.F. Igiene e Tossicologia Industriale
Laboratorio Agenti Fisici - Tel 0577 586097 – Fax 0577 586104- e_mail: i.pinto@usl7.toscana.it

INDICE

1. Brevi nozioni di fisica delle radiazioni ionizzanti	pag.	3
1.2 Sorgenti di radiazioni ionizzanti		4
1.3 Le macchine radiogene		8
2. Grandezze usate in radioprotezione		11
3. La penetrazione delle radiazioni ionizzanti nella materia		13
4. Effetti sull'uomo		15
5. Esposizione della popolazione		19
6. Irradiazione esterna e irradiazione interna		20
7. I principi fondamentali della radioprotezione		25
8. La Radioprotezione del Paziente		27
9. Radioprotezione dei lavoratori e della popolazione		32
10. Radioprotezione nell'esposizione a sorgenti naturali di radiazioni		38
Appendice: Liste di controllo per verifiche nelle strutture sanitarie		45

1. BREVI NOZIONI DI FISICA DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

1.1 I diversi tipi di radiazioni ionizzanti

Le **radiazioni ionizzanti** sono, per definizione, radiazioni capaci di causare, direttamente o indirettamente, la ionizzazione degli atomi e delle molecole dei materiali attraversati.

. In pratica, nell'attraversare la materia, queste radiazioni riescono a strappare, in virtù della loro energia, un elettrone dall'orbita esterna di un atomo creando così una coppia di ioni.

E' utile ricordare che l'energia delle radiazioni ionizzanti si misura in elettronvolt (eV): $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Per produrre una coppia di ioni in aria occorrono mediamente 34 eV.

Le *radiazioni ionizzanti* possono essere costituite o da **particelle** sub-atomiche che si muovono con velocità elevate, spesso prossime alla velocità della luce (radiazioni corpuscolari), o da **radiazioni elettromagnetiche**, costituite da fotoni che si propagano alla velocità della luce (raggi X e raggi γ). A seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta tali radiazioni vengono classificate come direttamente ionizzanti o indirettamente ionizzanti.

Sono **direttamente ionizzanti** le particelle **eletttricamente cariche** (elettroni, particelle beta, particelle alfa, etc.); sono invece **indirettamente ionizzanti** i fotoni (raggi X, raggi gamma), i neutroni ed in generale particelle sub-atomiche prive di carica elettrica.

In particolare, a seconda della massa e della carica **le radiazioni corpuscolari** possono essere suddivise in tre gruppi:

- a) particelle leggere elettricamente cariche: le più importanti sono elettroni e positroni (massa di quiete pari a circa 1/1836 della massa dell'atomo di idrogeno; carica elettrica positiva o negativa, pari alla carica elettrica elementare, ovvero 1.6×10^{-19} Coulomb).
- b) particelle pesanti elettricamente cariche: nuclei di atomi di basso numero atomico, aventi quindi carica positiva (es.: protoni, deutoni, particelle alfa etc.).
- c) particelle neutre: l'esempio più importante è il neutrone, particella priva di carica elettrica e di massa pari a quella del protone.

I **fotoni** invece non hanno massa, nè carica elettrica. Essi costituiscono le radiazioni elettromagnetiche che si propagano con la velocità della luce. In relazione alla loro lunghezza d'onda e alla loro energia le radiazioni elettromagnetiche vengono classificate secondo la nomenclatura di tabella 1.

Come si è detto in precedenza, 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 ($1000=10\text{E}+3 \text{ eV}$), il MeV ($1.000.000 =10\text{E}+6 \text{ eV}$), il GeV ($1.000.000.000=10\text{E}+9 \text{ eV}$). 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.

Dispense del corso di radioprotezione

Considerato che le energie di soglia dei processi di ionizzazione sono di alcuni eV, dall'esame di tab. 1 si comprende che le radiazioni elettromagnetiche in grado di produrre ionizzazione nella materia sono unicamente i raggi ultravioletti di alta frequenza, i raggi X e i raggi gamma.

Alcune caratteristiche dei principali tipi di radiazioni ionizzanti sono riassunte nella tab. 2.

Tab. 1. Alcune caratteristiche dei principali tipi di radiazioni ionizzanti

<i>Tipo di radiazione</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Carica (relativa)</i>	<i>Massa di quiete (relativa)</i>	<i>Massa di quiete (u)</i>	<i>Mc² (MeV)</i>
Elettroni o particelle β^-	e^-, β^-	-1	1/1836.152701	0.00054858	0.510999
Positroni o particelle β^+	e^-, β^+	1	1/1836.152701	0.00054858	0.510999
Protoni	p	1	1	1.007276	938.27231
Deutoni	d	1	2	2.013553	1875.61339
Particelle alfa	α	2	4	4.002777	3727.315
Neutroni	n	0	1	1.008665	939.56563
Raggi X e gamma	X, γ	0			

1.2 La radioattività

Per comprendere la natura delle radiazioni è necessario risalire alla struttura dell'atomo, che 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 interno, ove è concentrata la quasi totalità della massa atomica, e di un guscio esterno di elettroni, di carica elettrica negativa, caratterizzati da livelli energetici ben definiti (orbitali atomici).

Tab. 2. Classificazione di alcuni tipi di radiazioni elettromagnetiche in funzione della loro lunghezza d'onda (λ) e della loro energia ($h\nu$).

<i>Tipo di radiazione</i>	<i>λ</i>	<i>$h\nu$</i>
Onde elettriche	$> 3 \cdot 10^5$ cm	$< 4.1 \cdot 10^{10}$ eV
Radio-onde	da 10^{-1} cm a $3 \cdot 10^5$ cm	da $4.1 \cdot 10^{-10}$ eV a $1.24 \cdot 10^{-3}$ eV
Raggi infrarossi	da 0.78 μ m a 1000 μ m	da 0.00124 eV a 1.59 eV
Luce visibile	da 400 nm a 780 nm	da 1.59 eV a 3.10 eV
Raggi ultravioletti	da 100 nm a 400 nm	da 3.10 eV a 12.40 eV
Raggi X, γ	< 100 nm	> 12.40 eV

Un elettrone, ricevendo energia, può passare da un orbitale ad un altro, rimanendo sempre legato all'atomo, 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" (fig 1), termine che sta a significare che essi occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi di Mendeleev, e che quindi sono chimicamente indistinguibili. Gli isotopi 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.

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.

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

In generale un isotopo il cui simbolo sia Y è caratterizzato dal numero atomico Z, pari al numero dei protoni e degli elettroni, dal numero di massa A, pari al numero totale di particelle presenti nel nucleo e dal numero $N = A - Z$ pari al numero di neutroni. Se l'isotopo è radioattivo, si parla di radioisotopo o anche di radionuclide.

Numerosi elementi esistenti in natura, o prodotti artificialmente in laboratorio mediante reazioni nucleari, sono costituiti da atomi i cui nuclei sono energeticamente instabili. Essi tendono a mutare la propria natura trasformandosi in specie atomiche energeticamente stabili. Il ritorno alla stabilità avviene con emissione di radiazione corpuscolare (alfa o beta), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi gamma). I nuclei instabili si dicono *radioattivi* e il processo di 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 particelle alfa (α) che vengono emesse nei decadimenti radioattivi sono costituite da due neutroni e due protoni, e sono pertanto atomi di elio doppiamente ionizzati.

Le particelle beta (β) emesse nei decadimenti radioattivi sono o elettroni o positroni, questi ultimi del tutto simili agli elettroni, ma dotati di carica elettrica positiva.

I neutroni sono invece emessi nella disintegrazione spontanea di elementi pesanti prodotti artificialmente e nelle reazioni nucleari.

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

Ciascun radionuclide si caratterizza per il tipo (alfa, beta, gamma, neutroni) e l'energia delle radiazioni 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)**, in omaggio allo scienziato che scoprì il fenomeno:

1 Bq=1 disintegrazione al secondo.

Quando l'attività è riferita alla contaminazione presente su una superficie, si suole esprimerla in Bq per unità di area (Bq.cm^{-2}), quando invece è riferita a un volume, si pensi ad esempio alla contaminazione dell'aria, si parla di Bq per unità di volume (Bq.cm^{-3}). Allo stesso modo, nel caso di contaminazione di matrici (per es. alimenti, suolo, etc.), ci si riferisce all'attività per unità di massa (Bq.kg^{-1}). Vengono spesso utilizzati multipli o sottomultipli del Bequerel, come elencato in tabella 23.

Ad esempio, esprimendo in Bequerel la radioattività contenuta nel reattore di Chernobyl al momento del disastro si ottiene il valore 280.000.000.000.000.000 Bq, ovvero 28 seguito da sedici zeri. In casi simili, per semplificare la scrittura e per migliorare la leggibilità del dato, si ricorre alla notazione esponenziale, esprimendo il dato stesso attraverso le potenze di 10.

Con questa notazione lo stesso valore esemplificato in precedenza può essere espresso come $2,8 \times 10^{17}$ Bq: l'esponente di 10 indica il numero delle posizioni di cui occorre spostare la virgola verso destra per avere il valore esplicito del dato.

Analogamente, per esprimere valori molto piccoli rispetto all'unità di misura si impiegano le potenze di 10 con esponente negativo.

Ad esempio, l'espressione $2,8 \times 10^{-17}$ Bq sta ad indicare il valore 0,000000000000000028 Bq: l'esponente di 10 indica il numero delle posizioni di cui occorre spostare la virgola verso sinistra per avere il valore esplicito del dato.

Una ulteriore semplificazione si ottiene utilizzando in luogo delle potenze di 10 i prefissi elencati nella tabella 3. Utilizzando questa notazione il dato esaminato può essere espresso come 280 PBq = 280 peta-Bequerel = 280×10^{15} Bequerel, oppure come 0,28 Ebq = 0,28 exa-Bequerel = $0,28 \times 10^{18}$ Bq.

In passato l'unità di misura della radioattività era il Curie (Ci), pari a $3,7 \times 10^{10}$ Bq:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

Dispense del corso di radioprotezione

Tabella 3- Prefissi utilizzati nella notazione scientifica delle grandezze fisiche

<i>Potenze di 10</i>	<i>Prefisso</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Equivalenza</i>
10^{18}	exa-	E	1 EBq = 1.000.000.000.000.000.000 Bq
10^{15}	peta-	P	1 PBq = 1.000.000.000.000.000 Bq
10^{12}	tera-	T	1 TBq = 1.000.000.000.000 Bq
10^9	giga-	G	1 GBq = 1.000.000.000 Bq
10^6	mega-	M	1 MBq = 1.000.000 Bq
10^3	kilo-	k	1 kBq = 1.000 Bq
10^{-3}	milli-	m	1 mBq = 0,001 Bq
10^{-6}	micro-	μ	1 μ Bq = 0,000001 Bq
10^{-9}	nano-	n	1 nBq = 0,000000001 Bq
10^{-12}	pico-	p	1 pBq = 0,000000000001 Bq
10^{-15}	femto-	f	1 fBq = 0,000000000000001 Bq
10^{-18}	atto-	a	1 aBq = 0,000000000000000001 Bq

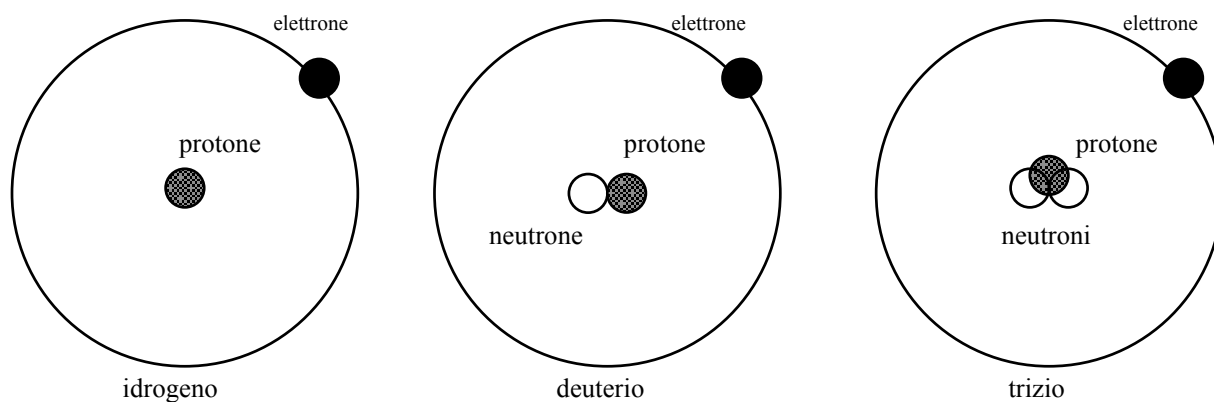


Fig.1 Isotopi dell' idrogeno

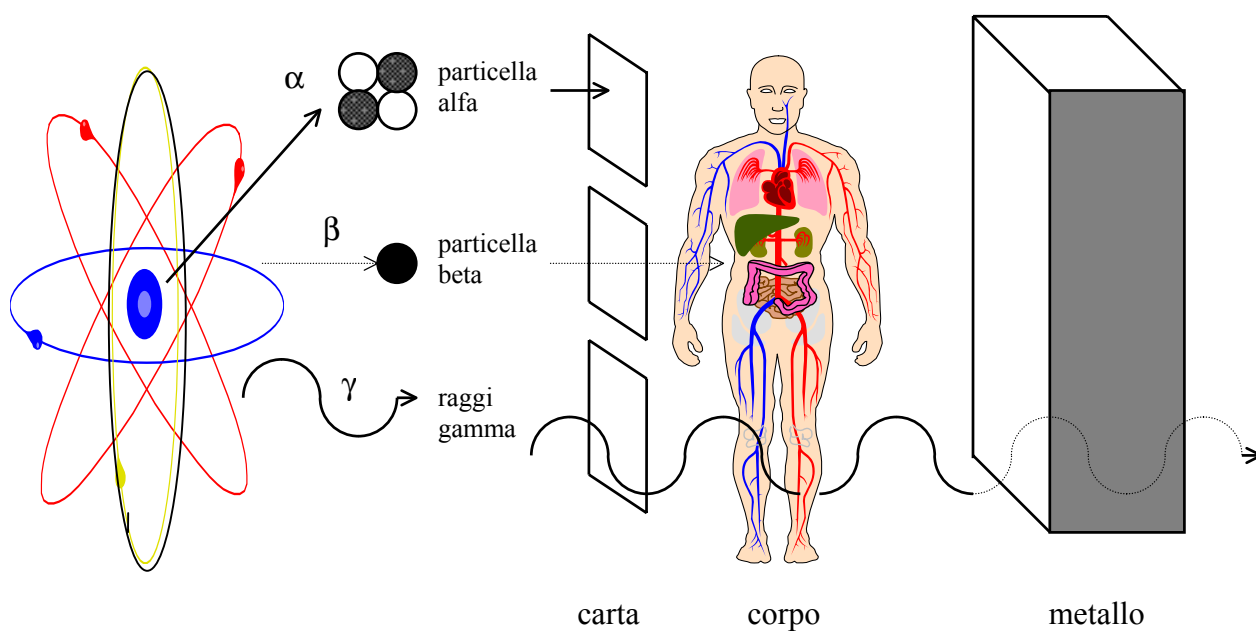


fig. 2 I tre tipi di radiazioni ed il loro potere di penetrazione

1.3 Le macchine radiogene

Radiazioni elettromagnetiche ionizzanti, note come raggi X, sono comunemente prodotte dalle macchine radiogene. Esse sono 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, o nelle radiografie industriali.

Il tubo a raggi X è costituito da un'ampolla di vetro da cui è stata evacuata l'aria ed in cui sono inserite due piastre metalliche, dette elettrodi. Le particelle che vengono accelerate sono elettroni che si sprigionano dal metallo riscaldato di una delle piastre, detta catodo. Questi elettroni, sfuggiti alla massa metallica riscaldata (effetto termoionico), si muovono liberamente nel vuoto.

La differenza di potenziale fra gli elettrodi viene stabilita connettendo il catodo al polo negativo del generatore di alta tensione, e l'altra piastra metallica, detta anodo o anticatodo, al polo positivo. In tal modo gli elettroni, che hanno carica negativa, vengono accelerati in direzione dell'anodo, con una velocità direttamente proporzionale alla tensione fornita dalla sorgente. Quanto più è alta la tensione applicata ai due elettrodi (catodo e anodo), tanto maggiore sarà la velocità acquisita dagli elettroni, che vanno a colpire l'anodo, da cui sono attratti. (fig. 1) Quando gli elettroni accelerati arrivano sul bersaglio (l'anodo) danno origine a raggi X di frenamento, caratterizzati da uno spettro continuo di energie, comprese tra zero e l'energia massima degli elettroni incidenti. A tale spettro continuo di raggi X di frenamento, si aggiungono i raggi X emessi dall'anodo, caratteristici del metallo di cui questo è costituito: essi hanno energie ben definite, in relazione alle caratteristiche fisiche del metallo di cui è costituito l'anodo (fig. 2), e vengono pertanto detti "raggi X caratteristici". I raggi X utilizzati in radiologia diagnostica hanno energie comprese tra le decine e le centinaia di keV. Ad esempio per far funzionare un normale apparecchio radiografico a raggi X, è necessaria una tensione di alimentazione del tubo di circa 70 kV. L'energia massima dei raggi X emessi dal tubo sarà pertanto di 70 keV.

Appare pertanto evidente che, a differenza delle sorgenti radioattive naturali o artificiali, che emettono sempre radiazioni ionizzanti, **i tubi a raggi X emettono radiazioni solo se vengono alimentati dal generatore ad alta tensione.**

fig. 3 Schema di un tubo a raggi X

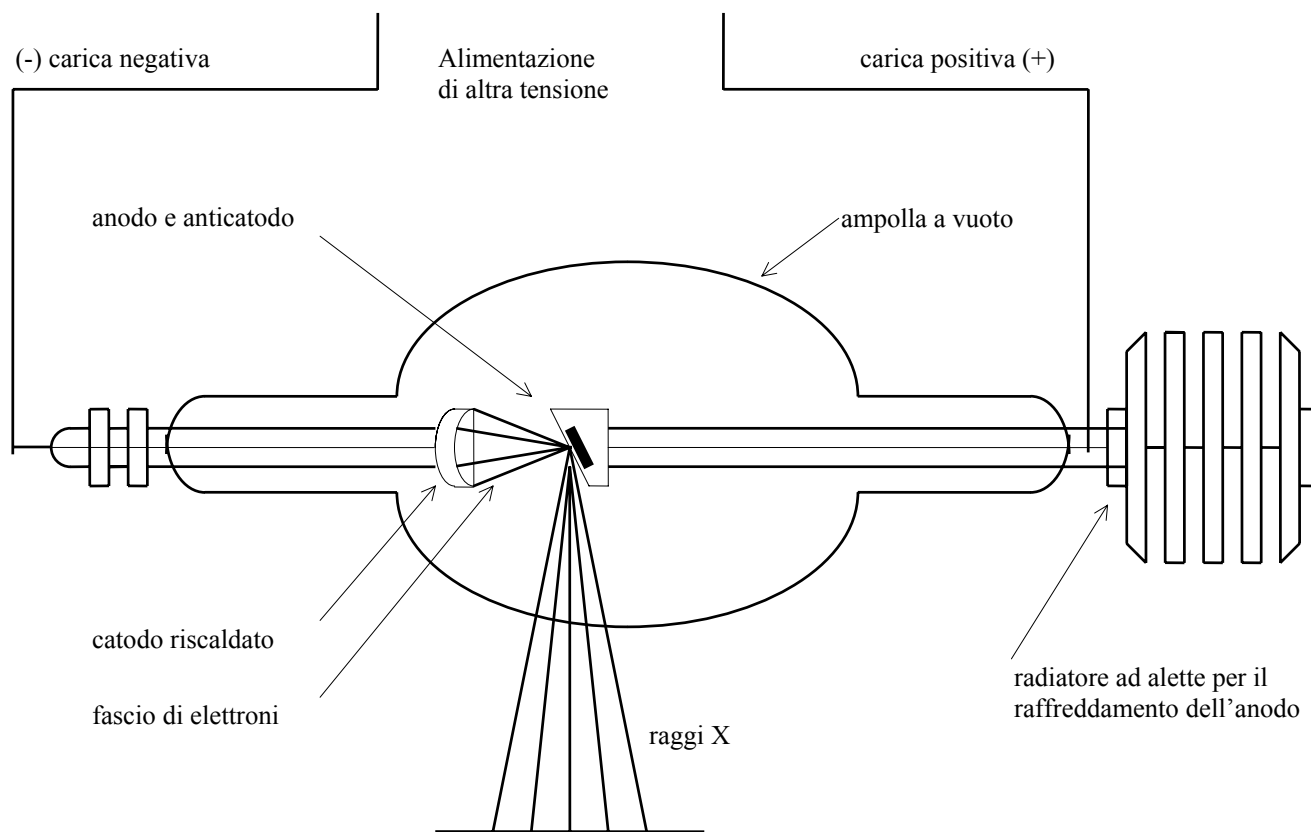


fig. 4 - Tipico spettro dei raggi X emessi da un tubo a raggi X

2. LE PRINCIPALI GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorchè si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato.

In particolare la quantità misurata in dosimetria è la “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.

L'unità di misura della dose assorbita nel Sistema Internazionale è il Gray (Gy). Un gray corrisponde all'assorbimento di un joule in un kg di materia ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$).

E' tuttavia ancora d'uso comune, in dosimetria, il rad, in via di progressivo abbandono.

Per definizione:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Spesso vi è interesse a riferirsi alla dose assorbita per unità di tempo, ovvero all'intensità o rateo (tasso) di dose assorbita, che si misura in Gy/s , o più usualmente in qualche sottomultiplo di questa unità, come ad es. il mGy/h .

La dose assorbita non è per sua natura idonea a tener conto della diversità degli effetti indotti a parità di dose assorbita, a seconda della qualità della radiazione incidente, e non è da sola sufficiente a predire l'entità degli effetti dannosi.

Infatti il rischio derivante dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti non è 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 (potenzialità di indurre un danno ai tessuti biologici) delle differenti tipologie di radiazioni incidenti, si introduce il cosiddetto fattore di ponderazione della radiazione, w_R . Si tratta di un parametro che tiene conto della differente pericolosità delle varie radiazioni - a parità di dose assorbita - rispetto alla radiazione di riferimento (fotoni), cui viene assegnato per definizione un w_R uguale a 1.

Il prodotto della dose assorbita in tessuto, D , per il fattore di ponderazione, w_R prende il nome di **dose equivalente, H (Sievert)**

$$H = w_R D \text{ (Sievert - Sv)}$$

La dose equivalente si misura in Sievert (Sv), e rappresenta la grandezza usata nell'ambito della legislazione italiana (d.lgvo 241/00) e degli standard protezionistici per definire i valori limite, nel caso di esposizioni omogenee del corpo.

In passato, quando si usava il rad per misurare la dose assorbita, la dose equivalente si misurava in rem. Per definizione:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Nel caso dei fotoni e degli elettroni, $w_R=1$, e la dose assorbita di un Gray corrisponde all'equivalente di dose di un Sv.

Sulla base degli esiti degli studi epidemiologici e di radiobiologia si è osservato che, a parità di dose assorbita, le particelle alfa con energia di alcuni MeV, producono un danno biologico 20 volte maggiore dei fotoni (cfr. paragrafo successivo). Pertanto, a queste particelle, è stato assegnato un $w_R=20$. 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. In tabella 4 si riporta la tabella dei valori di w_R . Si parla di intensità o rateo (tasso) di dose equivalente quando ci si riferisce alla dose equivalente ricevuta nell'unità di tempo. Esso si esprime in $\text{Sv}\cdot\text{s}^{-1}$ o più comunemente in $\text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$.

Tabella 4: fattore di ponderazione w_R

Radiazione	Energia	w_R
Fotoni	tutte le energie	1
Elettroni e muoni	tutte le energie	1
Neutroni	< 10 keV	5
"	10 - 100 keV	10
"	100 keV - 2 MeV	20
"	2 - 20 MeV	10
"	> 20 MeV	5
Protoni (escluso rinculo)	> 2 MeV	5
alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	tutte	20

Per tener conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano per gli effetti stocastici (cfr. § 7), si introduce la dose equivalente efficace, E , somma delle dosi equivalenti efficaci nei diversi organi e tessuti, H_T , ciascuno moltiplicato per un fattore di ponderazione, w_T , che tiene appunto conto della diversa radiosensibilità degli organi irraggiati. Questa grandezza è stata definita per tenere conto del diverso effetto sui vari tessuti o organi della radiazione, tramite un fattore che tiene conto della risposta di ciascun organo (o tessuto) alla determinata radiazione mediante la formula::

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

I fattori di ponderazione w_T dei vari tessuti o organi sono riportati nella seguente tabella 5:

Tabella 5: fattori di ponderazione dei vari tessuti o organi

Organo o tessuto	Fattore di ponderazione w_T
Gonadi	0,20
Midollo osseo (rosso)	0,12
Colon	0,12
Polmone (vie respiratorie toraciche)	0,12
Stomaco	0,12
Vescica	0,05
Mammelle	0,05
Fegato	0,05
Esofago	0,05
Tiroide	0,05
Pelle	0,01
Superficie ossea	0,01
Rimanenti organi o tessuti	0,05

Si deve precisare che per calcolare i coefficienti w_T l'ICRP ha preso in considerazione solo i tumori con esito fatale.

Per i rimanenti organi e tessuti, al fine del calcolo della dose efficace, si deve intendere ghiandole surrenali, cervello, vie respiratorie extratoraciche, intestino tenue, reni, tessuto muscolare, pancreas, milza, timo ed utero.

Queste grandezze, che non sono grandezze fisiche ma esclusivamente radioprotezionistiche, si determinano a partire dalla misura (o valutazione) della dose assorbita e da considerazioni di penetrazione della radiazione. In pratica, stante la notevole difficoltà di fare queste misure in vivo, si ricavano da simulazioni su modelli.

Per chiarire meglio l'uso di questa grandezza, anche in relazione con la dose equivalente, sviluppiamo un breve esempio. Supponiamo di irraggiare solo la tiroide con una data dose. Il rischio di una tale esposizione sarebbe 0,05 volte il rischio se tale dose fosse assorbita uniformemente dal corpo intero. Pertanto per conservare la proporzione tra i rischi nei due casi si dovranno aumentare i limiti di dose validi per il corpo intero di un fattore $1/0,05 = 20$ per la sola tiroide (ad es.: il limite di 1 mSv diventa di 20 mSv se riferito alla tiroide). Nel passare dalla dose equivalente alla dose efficace per un dato organo si deve moltiplicare per il fattore opportuno ricavato dalla tabella 6 facendo il reciproco del fattore ivi riportato.

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

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

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), in quanto poco penetranti e facilmente schermabili. Diventano invece estremamente pericolose, una volta introdotte nell'organismo (irradiazione interna), in quanto tutta la loro energia viene allora ceduta agli organi e tessuti interni del corpo umano.

E' utile menzionare che materiali isolanti come la plastiche, quando sono colpiti da radiazioni densamente ionizzanti come le particelle alfa, diventano nel tempo fragili e 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 gamma si suole piuttosto far riferimento agli spessori emivalenti (SEV), attraversando i quali si dimezza l'intensità primaria della radiazione incidente. Detti spessori, quando espressi in g.cm^{-2} , ovvero come prodotto dello spessore espresso in cm per la densità in g.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 g.cm^{-2} risultano tra loro confrontabili (circa 10 g.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, calcestruzzo baritico ecc.

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. Effetti sull'uomo

Gli effetti delle radiazioni sull'uomo possono essere classificati in due differenti tipologie: effetti di tipo **deterministico** ed **effetti di tipo stocastico o probabilistico**. Per i primi esiste una **soglia** al di sopra del quale si manifesta l'effetto ed è definita una funzione dose-gravità dell'effetto. Per gli effetti **stocastici - legati ad esposizioni a dosi inferiori alle soglie richieste per gli effetti deterministici**, non è definibile una soglia di esposizione. L'esposizione in questo caso aumenta **la probabilità** di comparsa del danno, e **non l'entità** del danno stesso.

Effetti deterministici

Sindromi da irradiazione acuta

L'esposizione ad "alte dosi" di radiazioni ionizzanti, sia per irradiazione esterna che interna, determina l'insorgenza di diverse sindromi in rapporto all'entità della dose ricevuta.

Legge di Bergonie e Tribondeau: "la radiosensibilità di un tessuto è direttamente proporzionale all'attività mitotica e inversamente proporzionale al grado di differenziazione delle sue cellule". In pratica non sono i tipi cellulari più o meno radiosensibili, bensì i "processi cellulari" (divisione cellulare).

Le sindromi che si manifestano dopo un'irradiazione acuta variano, in dipendenza della dose, in relazione della maggiore radiosensibilità di alcuni tessuti; è chiaro che a dosi superiori anche i sistemi bersaglio per dosi inferiori vengono interessati, comunque la loro incidenza nella sindrome generale è minore in quanto necessitano di tempi maggiori per manifestare i sintomi.

Sindrome del sistema nervoso centrale: si manifesta ad altissime dosi (oltre 10 Gy) in quanto il tessuto nervoso ha un'attività mitotica praticamente nulla. La morte avviene per variazioni (da infiammazione) della permeabilità dei vasi encefalici con conseguente edema cerebrale e ipertensione endocranica. Per dosi molto forti vi è anche un danno diretto sui neuroni. Dopo un iniziale periodo di ipereattività e convulsioni, segue apatia e coma; la morte interviene entro 48 ore.

Sindrome gastrointestinale: la superficie dell'intestino è in continuo rinnovamento da parte di cellule ad alto indice mitotico situate nelle cripte. Dopo un'irradiazione acuta (6 - 10 Gy) si ha una disepitelizzazione dell'intestino per mancato rinnovo della mucosa con conseguente perdita di liquidi ed elettroliti e danno nutrizionale. La perdita della barriera epiteliale facilita inoltre l'insorgenza di infezioni dovute anche alla carenza di leucociti per il contemporaneo insorgere della sindrome emopoietica. La morte sopravviene entro 3 - 5 giorni dall'irradiazione.

Sindrome emopoietica: il midollo osseo contiene tutti i precursori delle cellule del sangue: l'attività mitotica è pertanto intensa in considerazione del continuo rinnovamento delle cellule circolanti (vita media dei leucociti: 3 - 5 giorni, eritrociti: 120 giorni). Questo fatto spiega la notevole radiosensibilità del midollo osseo e il differente andamento delle curve di sopravvivenza nel midollo e nel sangue circolante (le cellule mature sono molto meno radiosensibili). La sindrome emopoietica si manifesta per dosi di 2 - 6 Gy. La DL 50/30 (dose letale per il 50% dei soggetti in 30 giorni) dell'uomo si colloca a circa 3 Gy.

<i>Sindromi da irradiazione acuta nell'uomo</i>	
0,25 ÷ 1 Gy	sopravvivenza virtualmente certa
1 ÷ 2 Gy	sopravvivenza probabile
	<i>soglia della sindrome ematologica</i>
2 ÷ 5 Gy	sopravvivenza possibile
	DL _{50/60}
5 ÷ 6 Gy	sopravvivenza virtualmente impossibile -----
	DL ₁₀₀
6 ÷ 10 Gy	<i>sindrome gastrointestinale</i>
10 Gy e oltre	<i>sindrome neurologica</i>

Effetti sulle gonadi: dosi di 1 - 2 Gy su entrambe le ovaie determinano sterilità temporanea e assenza di mestruazioni per 1-3 anni; 4 Gy causano sterilità permanente. Nell'uomo 0.1 Gy causano oligospermia per 12 mesi; 2.5 Gy: sterilità per 2-3 anni; 4-6 Gy: sterilità definitiva.

Effetti sulla cute: sede principale del danno è lo strato germinale dell'epidermide, anche se la risposta più pronta è l'eritema temporaneo dovuto alla dilatazione dei capillari. Dopo 2-3 settimane ricompare l'eritema per danno ai capillari e flittene con necrosi per deficit proliferativo dello strato germinale.

Effetti sull'organismo in sviluppo: chiaramente l'embrione e il feto presentano in tutti i propri organi e tessuti un alto indice mitotico. L'irradiazione di 1 Gy nei primi 6 giorni di gravidanza determina la morte del 50% degli embrioni; i sopravvissuti si sviluppano in modo normale. L'esposizione dal 9° al 60° giorno determina una mortalità di grado inferiore e un notevolissimo aumento delle malformazioni anche per dosi relativamente basse. Nel periodo fetale si riduce gradualmente il rischio di malformazioni e la radiosensibilità si avvicina a valori simili a quelli dei bambini. Da qui la raccomandazione per tutte le donne in età feconda di sottoporsi ad esami radiologici esclusivamente nei primi 10 giorni del ciclo (art. 111, comma 2, lett. C), D.Lgs. n. 241/2000)

Effetti stocastici (su probabilità statistica)

L'esposizione a "basse dosi" di radiazioni ionizzanti non determina la comparsa di danni immediati, bensì aumenta le probabilità statistiche di comparsa di danni a distanza. Queste malattie non presentano diversità rispetto a quelle dovute a cause "naturali" e quindi la loro discriminazione è estremamente difficoltosa; i dati finora ottenuti si basano sull'aumento dell'incidenza delle suddette malattie.

Le caratteristiche principali degli effetti stocastici sono:

- Non richiedono il superamento di una dose-soglia.
- Riguardano solo una piccola frazione degli esposti con frequenza di comparsa proporzionale alla dose.
- La gravità non dipende dalla dose in quanto sono del tipo *tutto o nulla*.

Radiazioni e tumori: a causa dei danni a carico del materiale cromatidico cellulare, le radiazioni ionizzanti possono indurre l'insorgenza di tumori solidi e leucemie. I tempi di latenza sono estremamente lunghi: da pochi anni per le leucemie a oltre 20 anni per il carcinoma polmonare.

I dati attuali ci indicano un rischio totale di cancerogenesi di $1.25 \times 10^{-2} \times \text{Sv}^{-1}$, per cui, ad esempio, ad una dose di 10 mSv è associato un rischio pari a 1.25×10^{-4} .

Effetti genetici: si è visto che le radiazioni ionizzanti provocano il danno maggiore a carico del

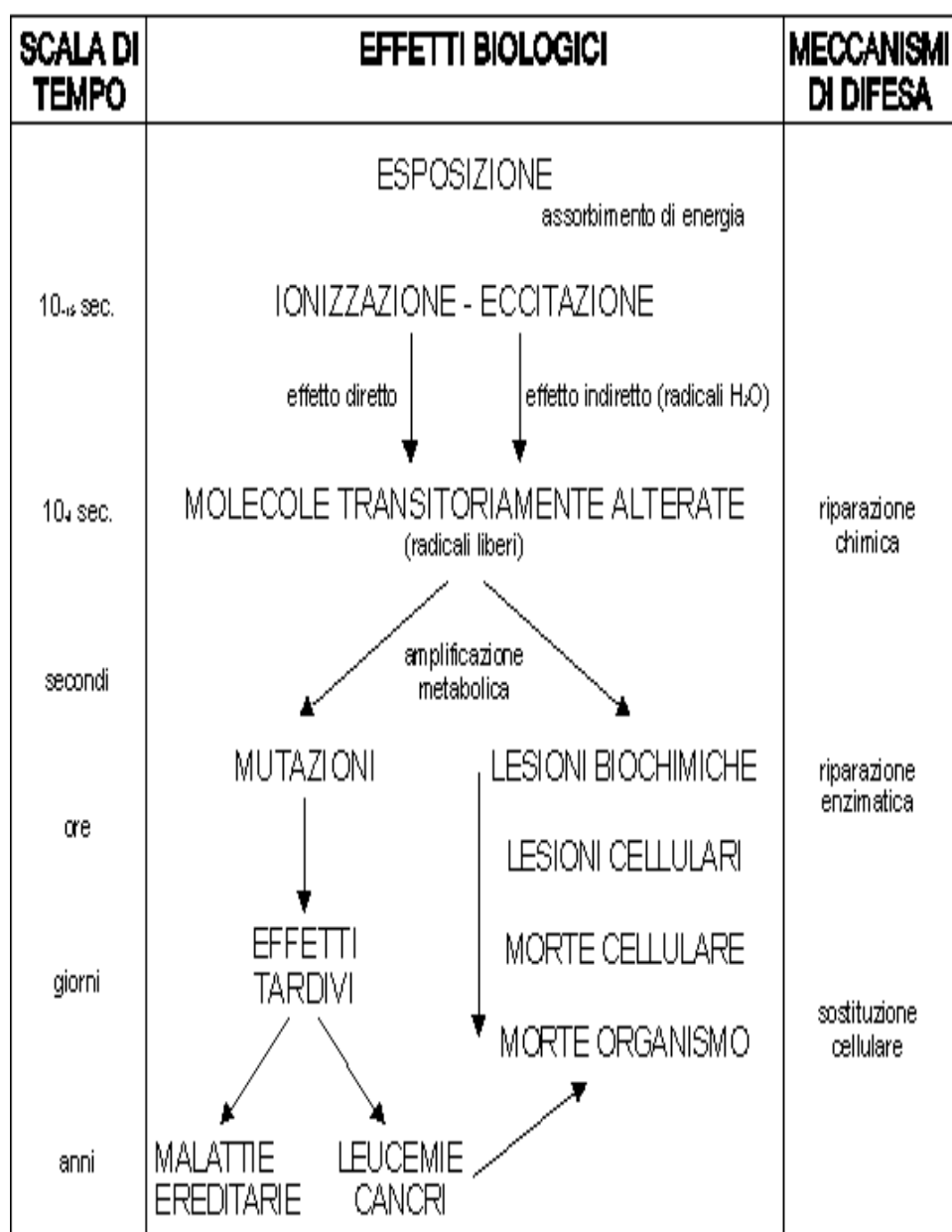
DNA; è quindi comprensibile che anche basse dosi di radiazioni possano creare dei danni genetici che si evidenzieranno nella prole in prima o successive generazioni. L'incidenza naturale di malformazioni (gravi, lievi, lievissime) è calcolata in 105.000 casi per milione di nati vivi. Studi su animali valutano in 1 Gy la dose di raddoppio: ovvero se 1 milione di individui ricevessero 1 Gy, si avrebbe il raddoppio delle malformazioni. Estrapolando si calcola che 10 mGy provochino 185 nuovi casi per milione, pari ad un incremento dello 0.17% dei casi naturali.

In conclusione si è visto che le radiazioni ionizzanti determinano effetti dannosi sugli organismi viventi. Tali effetti si dividono in "ereditari" (sulla generazione) e in "somatici" (sull'individuo esposto).

A loro volta questi ultimi si dividono in:

- deterministici, che si manifestano per dosi relativamente elevate e su tutti gli individui esposti e in cui esiste una correlazione dose/effetto con un valore di soglia al di sotto del quale non si manifestano;
- stocastici (con probabilità statistica), che si manifestano per dosi basse – ben al di sotto delle soglie di insorgenza degli effetti deterministici - e solo su alcuni individui esposti; per tali effetti non vi è un'apparente dose soglia, l'entità del danno è indipendente dalla dose ricevuta e le caratteristiche del danno sono identiche alle malattie di origine "naturale".

Quadro sinottico degli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti



5. L' ESPOSIZIONE DELLA POPOLAZIONE A RADIAZIONI IONIZZANTI

Vi sono vari tipi e modalità di irradiazione esterna o interna a cui l'uomo può essere esposto nel corso della sua vita. Esse verranno brevemente analizzate nel seguito, sulla base della seguente classificazione:

Sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

Sorgenti artificiali: esposizioni mediche, centrali nucleari etc.

Sorgenti naturali modificate da tecnologie

5.1 Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

Come 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.

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

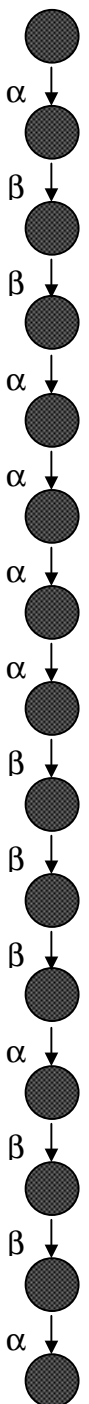
I principali radionuclidi primordiali sono il K-40, il Rb-87 e gli elementi delle due serie radioattive dell'U-238 e del Th-232. Si tende in genere ad ignorare la serie dell'U-235, per la modesta abbondanza relativa del capostipite, anche se ciò può non essere giustificato in termini dosimetrici.

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

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

Nell'aria, la radiazione naturale è dovuta principalmente alla presenza di radon e toron, cioè di gas (7,5 volte più pesanti dell'aria) appartenenti alle famiglie dell'uranio e del torio (fig. 5). Il decadimento dell'uranio-238 porta infatti alla formazione di Ra-226 (radio) che, emettendo una particella alfa, decade in Rn-222, cioè gas Radon; nella famiglia del torio invece, 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, a seguito della sua inalazione in luoghi chiusi.

Fig. 5 - Schema di decadimento dell'Uranio-238

tipo di radiazione	nuclide	tempo di dimezzamento
	uranio-238	4,47 miliardi di anni
α	torio-234	24,1 giorni
β	protoattinio-234	1,17 minuti
β	uranio-234	245.000 anni
α	torio-230	8.000 anni
α	radio-226	1.600 anni
α	radon-222	3.823 giorni
α	polonio-218	3,05 minuti
β	piombo-214	26,8 minuti
β	bismuto-214	19,7 minuti
β	polonio-214	0,000164 minuti
α	piombo-210	22,3 anni
β	bismuto-210	5,01 giorni
β	polonio-210	138,4 giorni
α	piombo-206	stabile

Numerosi materiali da costruzione emettono quantità relativamente modeste di radon. Tra i materiali da costruzione quelli 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 consiste quasi sempre nel terreno sottostante le case. I livelli di concentrazione nell'aria sono fortemente variabili a seconda delle condizioni ambientali. Sulla base degli esiti di una recente campagna nazionale, il valore medio della concentrazione di radon in aria nelle abitazioni italiane è risultato di 77 Bq.m^{-3} . Le percentuali di case con concentrazioni superiori a 200 Bq.m^{-3} o a 400 Bq.m^{-3} sono risultate rispettivamente il 5% e l'1%. Un livello di 200 Bq.m^{-3} implica una dose efficace di 3 mSv/anno .

Anche le acque contengono una certa quantità di radioattività, dovuta sia alle piogge che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia alle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici sostanze radioattive presenti nelle rocce e nel suolo. Significativamente radioattive sono le acque calde solfuree usate negli impianti termali, per produrre elettricità e per riscaldare gli edifici. Attraverso la catena alimentare entrano nel corpo umano piccole quantità di sostanze radioattive. I principali radioisotopi presenti sono il K-40, il Ra-226, il Ra-228 e il C-14.

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

L'interazione di queste particelle di alta energia (raggi cosmici primari) con l'atmosfera terrestre comporta l'emissione di numerosi prodotti secondari, quali ad esempio mesoni (particelle di massa compresa tra l'elettrone ed il protone), elettroni, fotoni, protoni e neutroni che a loro volta possono creare altre particelle secondarie. Per la maggior parte i raggi cosmici primari vengono assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera e sulla terra i raggi cosmici secondari sono principalmente costituiti da mesoni, elettroni, fotoni, neutroni e protoni. Ai poli il contributo di dose dovuto ai raggi cosmici è maggiore rispetto alle zone equatoriali, in quanto il campo magnetico della terra devia la radiazione. Il livello di dose aumenta con l'altitudine, con il ridursi dello spessore d'aria che fa da schermo. A 10 km di altitudine, ad esempio, l'esposizione alla radiazione cosmica è quasi 100 volte più elevata di quella a livello del mare. L'atmosfera produce infatti al livello del mare una protezione equivalente a quella di uno schermo di calcestruzzo di circa 4 m di spessore, mentre alla quota di 10000 m l'effetto di schermaggio si riduce a circa 1 m. L'esposizione alla radiazione cosmica è di notevole interesse per gli equipaggi degli aerei destinati ai voli intercontinentali. In Tabella 3 sono riportati gli equivalenti di dose efficace ricevuti mediamente dalla popolazione mondiale che vive in aree a fondo naturale di radiazioni normale, secondo stime dell'UNSCEAR (1998). 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. Da tabella 3 si evince che la dose efficace media annuale ricevuta dalla popolazione a causa di tutti i contributi presenti nel fondo naturale, complessivamente stimata in 2.4 mSv/anno . Questo valore medio è soggetto ad ampie

variazioni, ed il range di dosi individuali è ampio. Il 65% circa della popolazione, infatti, riceve una dose efficace media annuale che varia da 1 a 3 mSv, il 25% riceve una dose inferiore ad 1 mSv ed il restante 10% dovrebbe ricevere una dose superiore ai 3 mSv (tab.3).

Tabella 2 – Dose media dovuta alle sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

<i>Sorgente</i>	<i>Dose efficace annuale media della popolazione mondiale (mSv)</i>	<i>Range tipico (mSv)</i>
Esposizione esterna		
Raggi cosmici	0.4	0.3 – 1.0 ^a
Radiazione gamma terrestre	0.5	0.3 – 0.6 ^b
Esposizione interna		
Inalazione (principalmente radon)	1.2	0.2 – 10 ^c
Ingestione	0.3	0.2 – 0.8 ^d
TOTALE	2.4	1 – 10

- a. Range tipico dal livello del mare fino ad alta quota
- b. In funzione della composizione in radionuclidi del suolo e dei materiali da costruzione
- c. In funzione dell'accumulo indoor di radon
- d. In funzione della composizione in radionuclidi di cibi ed acqua potabile

5.2 Sorgenti artificiali e sorgenti naturali modificate da tecnologia

Le varie sorgenti di radiazioni artificiali o naturali modificate da tecnologia cui l'uomo è abitualmente esposto comprendono:

- **sorgenti impiegate in medicina: diagnostica e terapia**
- sorgenti da ricadute di bombe atomiche (fallout)
- sorgenti associate con la produzione di energia nucleare (estrazione e trattamento del combustibile, rilasci delle centrali, riprocessamento del combustibile, rifiuti)
- sorgenti in alcuni prodotti di consumo (orologi luminescenti, talune protesi dentarie, taluni vetri per lenti, taluni sistemi antistatici, parafulmini radioattivi etc.)
- sorgenti naturali modificate da tecnologia:
materiali da costruzione; viaggi in aereo ad alta quota; combustione del carbon fossile

Attualmente gli usi medici costituiscono la maggiore fonte di esposizione dell'uomo alle radiazioni artificiali. Ovviamente le dosi individuali variano enormemente da zero, per coloro che non sono mai stati sottoposti ad esami radiologici, a un valore pari a molte migliaia di volte la radiazione annuale media da radiazioni naturali. I raggi X usati in diagnostica sono la forma più comune di radiazioni usate a scopo medico: alcuni dati provenienti dai paesi industrializzati indicano valori che variano da 300 a 600 esami ogni 1000 abitanti, escludendo dal computo radiografie dentali e schermografie di massa. Nella maggior parte dei paesi quasi la metà di tutte le radiografie riguarda il torace.

Numerose istituzioni nazionali ed internazionali hanno emanato linee guida e protocolli che, se applicati correttamente, dovrebbero consentire una riduzione delle dosi superflue nei pazienti sottoposti a raggi X; purtroppo indagini effettuate a livello nazionale ed internazionale mostrano che attualmente le dosi variano ampiamente da ospedale ad ospedale, anche nello stesso paese, con dosi ricevute dal paziente, per lo stesso esame radiologico, che variano fino a fattori cento. Da tali

Dispense del corso di radioprotezione

indagini risulta inoltre che la parte del corpo irradiata risulta -in taluni casi - fino a due volte più ampia del necessario.

A titolo di esempio si riportano nel seguito dosi al paziente tipicamente ricevute in comuni esami radiologici, e le stime di rischio associate, calcolate sulla base dei criteri dettati dalle raccomandazioni emanate dall'ICRP.

Tab. 5 Esempio di stima di rischio per donna adulta sottoposta ad esame radiologico della colonna

Dati tecnici esame: Donna adulta - spessore 30 cm - Esame alla colonna - tratto lombosacrale - proiezione AP
Pellicola: 35.6 x 43.2 cm² - Tensione 80 KV trifase- 40 mAs Filtrazione: 2.5 mm Al - HVL: 2.70 mm Al - Kerma in aria al SSD: 8.625 mGy

Organo	dose (mSv)	fattore di rischio (Sv ⁻¹)	tipo di danno	probabilità di danno
Tiroide	0.000	8×10^{-4}	cancro	-
Polmoni	0.126	85×10^{-4}	cancro	1.07×10^{-6}
Midollo	0.386	50×10^{-4}	cancro	1.93×10^{-6}
Ovaie	2.230	10×10^{-4}	cancro	2.23×10^{-6}
Torace	0.000	20×10^{-4}	cancro	-
Utero (embrione)	2.886	40×10^{-4}	deficit mentale	11.54×10^{-6}
Totale corpo	0.945	500×10^{-4}	cancro	47.25×10^{-6}
“	“	100×10^{-4}	malattie ereditarie	9.45×10^{-6}

Come si vede dall'esempio la probabilità di danno per comuni esami radiologici è relativamente bassa. Nel caso dell'esempio abbiamo circa 50 probabilità su un milione di produrre un tumore, 10 probabilità su un milione di produrre danni ereditari ed altrettanto di indurre gravi deficienze nell'embrione (se esiste): per quanto bassi essi siano, sono comunque valori da rapportare al beneficio indotto dalla possibile risoluzione del quesito diagnostico. Una probabilità di danno, per quanto piccola è indebita se non correttamente giustificata. Inoltre, per inquadrare correttamente il problema del rischio per la popolazione nel suo insieme, bisogna considerare che in Italia, ogni anno, si eseguono oltre 100 milioni di esami con impiego di radiazioni ionizzanti; quindi, mediamente, è possibile ipotizzare diverse migliaia di tumori per anno indotti dalla radiodiagnostica e molte centinaia di danni ereditari gravi. L'impiego di apparecchiature efficienti, l'uso di adeguati parametri tecnici, l'impiego delle radiazioni ionizzanti solo quando realmente necessario, può ridurre notevolmente il rischio associato alla pratica radiologica. E' auspicabile che la recente emanazione di specifiche normative inerenti la radioprotezione del paziente, sia a livello nazionale che comunitario, contribuisca al conseguimento degli obiettivi di ottimizzazione nelle esposizioni mediche.

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 caso di sorgenti sigillate o tubi radiologici, che determinano esclusivamente irradiazione esterna, 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.
- d) utilizzare mezzi di protezione se non è evitabile l'irradiazione diretta del corpo o di parte di esso.

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, idonee norme comportamentali e metodiche di lavoro etc.) che rendano di fatto del tutto improbabile la contaminazione dell'organismo umano: fino dai tempi del progetto Manhattan apparve infatti evidente che l'unico provvedimento di radioprotezione realmente efficace a proposito di introduzione della radioattività nell'organismo umano è quello di non introdurre affatto!

7. I principi della radioprotezione ed il quadro normativo nazionale

La circostanza che nessuna esposizione alle radiazioni ionizzanti, per quanto modesta, possa essere considerata completamente sicura, ha spinto l'ICRP (International Commission on Radiation Protection), istituzione internazionale cui viene riconosciuto un ruolo di assoluta preminenza nel campo della radioprotezione, a raccomandare, a partire dagli anni '70, un sistema di protezione radiologica basato su tre fondamentali principi:

- giustificazione della pratica;
- ottimizzazione della protezione;
- limitazione delle dosi individuali.

Tali principi, pubblicati originariamente nella pubblicazione fondamentale dell' ICRP n. 26 nel 1977, sono stati pienamente recepiti dalla normativa di legge italiana entrata in vigore, attraverso i D.Lgs. 230/95, 241/2000, 187/200 che ne stabilisce il rispetto, nella disciplina delle attività con rischio da radiazioni ionizzanti, come verrà illustrato nel seguito delle lezioni.

I tre principi della radioprotezione, nella loro formulazione originaria, sancivano quanto segue:

- a) i tipi di attività che comportano esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere preventivamente **giustificati** e periodicamente riconsiderati alla luce dei benefici che da essi derivano;
- b) le esposizioni alle radiazioni ionizzanti debbono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali;
- c) le dosi individuali ricevute in ciascuna tipologia di esposizione (lavoratori, popolazione) non devono comunque superare i limiti prescritti dalla normativa.

Il principio di giustificazione dell'attività sancisce la necessità, peraltro comune a tutte le attività umane, di effettuare un'attenta analisi di vantaggi e svantaggi che una certa pratica con rischio da radiazioni ionizzanti comporta, prima che questa venga intrapresa. L'obiettivo è quello di assicurare che il detrimento totale sia sufficientemente modesto rispetto ai benefici attesi. Lo strumento adottato è generalmente l'analisi costi/benefici. Senza addentrarsi in dettaglio in tali metodiche, merita in questo contesto precisare che nell'effettuare tale tipologia di analisi possono intervenire, e di norma intervengono, parametri di natura extra-scientifica, la cui quantificazione è fortemente controvertibile. Le valutazioni tecniche di radioprotezione rappresentano solo uno degli aspetti presi in considerazione in tale fase. La giustificazione della pratica è in generale principalmente sostenuta da motivazioni di carattere economico e politico. Nel paragrafo successivo si approfondirà tale concetto nel contesto della radioprotezione del paziente.

Il secondo basilare principio, quello dell'ottimizzazione, detto anche principio "ALARA", è di particolare rilevanza per i differenti soggetti che operano con radiazioni ionizzanti; esso stabilisce di fatto gli obiettivi di radioprotezione da osservare nelle varie attività, e con questi i valori massimi delle dosi che riceveranno i lavoratori e le persone del pubblico; queste di norma, dovrebbero essere di ordini di grandezza inferiori dei limiti individuali fissati con il terzo principio. Il rispetto dei valori limite (terzo principio) viene 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, si riportano nel seguito i valori limite per i lavoratori esposti e per le persone del pubblico fissati dalla vigente normativa nazionale (d.lgvo 241/2000).

Tabella 1- Limiti di riferimento di dose (H) per la classificazione dei lavoratori (mSv/anno)

	Categoria A	Categoria B	NON ESPOSTI
Equivalente di dose globale	$6 < H < 20$	$1 < H < 6$	< 1
Equivalente di dose al cristallino	$45 < H < 150$	$15 < H < 45$	< 15
Equivalente di dose pelle/estremità	$150 < H < 500$	$50 < H < 150$	< 50

E' importante sottolineare che i tre principi sopraelencati devono essere applicati in sequenza: si passa al secondo (ottimizzazione) soltanto quando si sia verificato il primo (giustificazione) e al terzo quando lo siano i primi due.

E' utile svolgere a questo punto alcune considerazioni circa le basi logiche che hanno portato all'individuazione di detti valori limite. I valori raccomandati per gli effetti stocastici sono stati stabiliti dall'ICRP sulla base di un confronto tra i rischi attesi nelle attività radiologiche e quelli delle altre attività lavorative considerate "*ad elevato livello di sicurezza*". Si giudicano attualmente tali quelle in cui la mortalità media annuale è **inferiore a 10^{-4}** . Il rispetto di questo criterio lascia presumere nel futuro un progressivo abbattimento dei limiti raccomandati, con il prevedibile ed auspicabile miglioramento delle condizioni di sicurezza in tutte le attività lavorative.

Per quanto riguarda gli individui della popolazione l'ICRP, sempre sulla base di un confronto con l'entità degli altri rischi societari giudicata accettabile, ha stabilito per gli effetti stocastici dei limiti 10 volte inferiori a quelli dei lavoratori. Il rischio ritenuto in media accettabile per piccoli gruppi di individui della popolazione è quello che causa un numero di eventi mortali per anno compreso tra **10^{-5} - 10^{-6} , cioè circa 5×10^{-6}** . A questo numero corrisponderebbe un equivalente di dose efficace ricevuto in un anno di 5×10^{-4} Sv (0,5 mSv). Con un discutibile ragionamento, svolto peraltro anche nel caso delle esposizioni professionali, l'ICRP ha ritenuto accettabile un valore di 5 mSv/anno, in base all'osservazione che in pratica i valori medi annuali si attesterebbero così proprio intorno a 0,5 mSv. Successivamente, nel 1984, tale limite è stato prudentemente ridotto a **1 mSv/anno**, per quei membri del pubblico suscettibili di rimanere ripetutamente esposti per periodi prolungati alle radiazioni ionizzanti.

8. Radioprotezione del paziente

8.1 Quadro normativo

Il d.lgvo 187/00 che recepisce le norme comunitarie in materia di radioprotezione del paziente, detta specifiche norme per l'applicazione dei principi di giustificazione ed ottimizzazione ai fini della radioprotezione del paziente.

In particolare, il principio di giustificazione stabilisce che:

Principio di giustificazione

1. E' vietata l'esposizione non giustificata
2. Le esposizioni mediche devono mostrare di essere sufficientemente efficaci mediante la valutazione dei potenziali vantaggi diagnostici o terapeutici complessivi da esse prodotti inclusi i benefici diretti per la salute della persona e della collettività, rispetto al danno alla persona che l'esposizione potrebbe causare, tenendo conto dell'efficacia, dei vantaggi e dei rischi di tecniche alternative disponibili, che si propongono lo stesso obiettivo, ma che non comportano un'esposizione, ovvero comportano una minore esposizione alle radiazioni ionizzanti. In particolare:
 - a) tutti i nuovi tipi di pratiche che comportano esposizioni mediche devono essere giustificate preliminarmente prima di essere generalmente adottate;
 - b) tutti i tipi di pratiche esistenti che comportano esposizioni mediche possono essere riveduti ogni qualvolta vengano acquisite prove nuove e rilevanti circa la loro efficacia o le loro conseguenze;
 - c) il processo di giustificazione preliminare e di revisione delle pratiche deve svolgersi nell'ambito dell'attività professionale specialistica tenendo conto dei risultati della ricerca scientifica.

Va notato che la normativa definisce esposizioni mediche qualsiasi esposizione radiologica effettuata ai fini diagnostici, terapeutici, medico-legali, ai fini della sorveglianza sanitaria professionale, nell'ambito di programmi di ricerca, e le esposizioni di persone che coscientemente e volontariamente, al di fuori della propria occupazione, assistono o confortano persone sottoposte ad esposizioni mediche.

3. Il Ministero della Sanità può vietare, sentito il Consiglio superiore di sanità, tipi di esposizioni mediche non giustificati.
4. ***Tutte le esposizioni mediche individuali devono essere giustificate preliminarmente, tenendo conto degli obiettivi specifici dell'esposizione e delle caratteristiche della persona interessata. Se un tipo di pratica che comporta un'esposizione medica non è giustificata in generale, può essere giustificata invece per il singolo individuo in circostanze da valutare caso per caso.***
5. ***Il prescrittore e lo specialista, per evitare esposizioni non necessarie, si avvalgono delle informazioni acquisite o si assicurano di non essere in grado di procurarsi precedenti informazioni diagnostiche o documentazione medica pertinenti alla prevista esposizione.***
6. Le esposizioni mediche per la ricerca clinica e biomedica sono valutate dal comitato etico istituito ai sensi delle norme vigenti.
7. Le esposizioni ai fini medico legali, che non presentano un beneficio diretto per la salute delle persone esposte, devono essere giustificate in modo particolare e devono essere

effettuate in maniera che la dose derivante dall'esposizione sia mantenuta al livello più basso ragionevolmente ottenibile.

8. Le esposizioni di soggetti che al di fuori della propria occupazione, assistono o confortano persone sottoposte ad esposizioni mediche devono essere sottoposte ad una particolare procedura di giustificazione, devono limitarsi a casi strettamente necessari, scoraggiando esposizioni abituali. E' obbligatorio l'uso di idonei mezzi di protezione. (all.I). Tali esposizioni sono comunque vietate nei confronti dei minori di 18 anni e delle donne con gravidanza in atto.

Il primo punto sancito dalla normativa, in ordine gerarchico, afferma che non sono ammesse pratiche non giustificate che esponano pazienti e/o popolazione a radiazioni ionizzanti. Le pratiche nuove devono essere giustificate prima di entrare in uso, mentre quelle vecchie dovrebbero essere state giustificate precedentemente. Di fatto, tutte le pratiche attualmente in corso devono essere giustificate ex novo.

Le pratiche mediche non giustificate sono vietate (art. 3, comma 1).

La procedura di giustificazione della pratica deve valutare i vantaggi diagnostici e /o terapeutici complessivi, fra i quali vi sono anche i benefici diretti per la salute della persona sottoposta ad esposizione, oltre a quelli della collettività. Questi vantaggi devono essere in grado di superare il bilancio con il danno indotto alla persona oggetto dell'esposizione. Nel fare il bilancio si deve tenere conto delle eventuali tecniche alternative sia che queste facciano uso di radiazioni ionizzanti sia che si avvalgano di altri agenti (art. 3, comma 2).

La pratica nuova deve subire una giustificazione preliminare alla sua adozione (art. 3, comma 2, lettera a) e deve essere soggetta a revisione ogni qualvolta subentri un'evoluzione tecnologica e scientifico-tecnica che ne modifichi il bilancio danno-beneficio (art. 3, comma 2, lettera b).

Il processo di giustificazione, sia preliminare che periodico, deve essere contestualizzato nell'ambito dell'attività specialistica svolta dal medico, tenendo conto dello sviluppo scientifico del settore (art. 3, comma 2, lettera c).

Da quanto esposto finora emergono alcune considerazioni foriere di conseguenze pratiche.

In primo luogo il 187/00 individua due diverse situazioni: la pratica, che deve essere giustificata generalmente, e la singola esposizione, che deve essere giustificata specificamente nel contesto scientifico e personale in cui viene programmata.

Questo caso genera l'esigenza di avere due diversi gruppi di attori del processo di giustificazione. Quello responsabile della giustificazione della singola esposizione e quello che deve provvedere alla giustificazione generale della pratica.

Ogni medico che progetti un'esposizione medica deve assicurarsi che essa sia giustificata nel contesto specialistico professionale in cui verrà svolta. Questo coinvolge il medico che prescrive l'esposizione (prescrivente) e il medico specialista (specialista) che la avalla e la realizza. Entrambe devono usare tutte le informazioni a disposizione: precedenti informazioni diagnostiche o altra documentazione medica. Questo fatto ha una prima implicazione pratica piuttosto evidente: ogni risultato di esposizione medica deve essere refertato ed il referto deve essere rilasciato al paziente o trasmesso prontamente al medico curante o comunque deve essere disponibile. Una seconda conseguenza implica l'aggiornamento professionale obbligatorio, continuativo e periodico del medico specialista e soprattutto del prescrivente per tenersi al passo con l'evoluzione tecnologica del settore (nuove tecniche, nuove apparecchiature o modifiche delle apparecchiature esistenti).

In sostanza il prescrivente non si deve limitare a prescrivere la prestazione specialistica, ma deve analizzare il processo che lo ha condotto a definire quell'esposizione come necessaria, fornendo al medico specialista (radiologo, medico nucleare o radioterapista) la necessaria informazione sul risultato atteso, per provvedere a confrontarla con altre pratiche che potrebbero dare lo stesso risultato, al fine di stabilire se l'esposizione è giustificata o se deve essere sostituita con altra indagine o terapia suscettibile di ridurre o evitare l'esposizione stessa. Lo specialista,

infatti, è il solo responsabile (art. 5) dell'esecuzione dell'esposizione. Uno dei problemi che si può presentare è il caso in cui lo specialista non sia in grado di effettuare la prestazione sostitutiva di quella prescritta per mancanza della strumentazione necessaria. Si rende necessario il rinvio al prescrittente ed un supplemento di valutazione per stabilire una nuova prescrizione, con conseguente perdita di tempo del paziente. A questa problema si potrebbe porre rimedio chiedendo che tutti i presidi, pubblici e privati, abbiano una dotazione standard minima di apparecchiature diagnostiche o terapeutiche alternative, eventualmente prevista per legge.

Inoltre la legge prevede (art. 6, comma 1) la stesura di linee guida contenenti raccomandazioni sui criteri da seguire per l'applicazione del principio di giustificazione da parte del prescrittente e quindi di supporto per la procedura di giustificazione. Naturalmente la stesura e la pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale delle linee guida richiede tempo, mentre la norma è in vigore dal 1 gennaio 2001. Nel frattempo si può seguire quanto proposto nel documento CNR a cura di M. Salvatore dal titolo "Utilizzazione razionale delle indagini di diagnostica per immagini - Introduzione ai percorsi diagnostici", del 1999.

Naturalmente il passo successivo per garantire un corretto processo di giustificazione dell'esposizione consiste nell'impartire una formazione in radioprotezione a tutti i medici (art. 7, commi 1 e 2), in modo da rendere accessibili le informazioni per la giustificazione, per quanto possibile, anche al prescrittente.

Le pratiche devono essere giustificate in maniera generale (art. 3 comma 4) come risulta evidente dalla lettura congiunta del D. Lgs. 241/00, art. 3 commi 1 e 2. Qui si evince che le pratiche generali, intese come l'insieme delle pratiche radiologiche omogenee dal punto di vista della finalità e della metodologia di esecuzione, devono essere giustificate preliminarmente e periodicamente in maniera globale e collettiva. La giustificazione generale della pratica medica, evidentemente, non può ricadere soltanto sul singolo specialista, ma deve vedere coinvolte professionalità e organismi con responsabilità e competenze più ampie di quelle possedute dal singolo.

Una volta che la pratica cessa di essere una categoria generale (quella dell'insieme delle pratiche omogenee messe in opera da tutti gli specialisti del campo) e diviene l'insieme delle esposizioni effettuate dal singolo specialista sull'insieme dei suoi pazienti (pratica locale) egli deve intraprendere un processo di giustificazione della pratica svolta prima di iniziare a svolgerla.

Il principio di ottimizzazione, a sua volta, dice:

Principio di ottimizzazione

1. Tutte le dosi dovute ad esposizioni mediche per scopi radiologici ad eccezione delle procedure radioterapeutiche, devono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile e compatibile con il raggiungimento dell'informazione diagnostica richiesta, tenendo conto di fattori economici e sociali; il principio di ottimizzazione riguarda la scelta delle attrezzature, la produzione adeguata di un'informazione diagnostica appropriata o del risultato terapeutico, la delega degli aspetti pratici, nonché i programmi per la garanzia di qualità, inclusi il controllo di qualità, l'esame e la valutazione delle dosi o delle attività somministrate al paziente.
2. Per tutte le esposizioni mediche a scopo terapeutico, lo specialista deve programmare individualmente l'esposizione dei volumi bersaglio tenendo conto che le dosi a volumi e tessuti non bersaglio devono essere le più basse ragionevolmente ottenibili e compatibili con il fine radioterapeutico perseguita con l'esposizione.
3. Ai fini dell'ottimizzazione dell'esecuzione degli esami radiodiagnostici si deve tenere conto dei livelli diagnostici di riferimento (LDR) secondo le linee guida indicate nell'allegato II.
4. Le procedure di giustificazione e di ottimizzazione della ricerca scientifica comportante esposizioni a radiazioni ionizzanti sono dettate dall'allegato III della normativa.

Dispense del corso di radioprotezione

5. Particolare attenzione deve essere posta a che la dose derivante da esposizione medico-legale sia mantenuta al livello più basso ragionevolmente ottenibile.
6. Le procedure di ottimizzazione e i vincoli di dose per le esposizioni di soggetti che coscientemente e volontariamente collaborano, al di fuori della loro occupazione, all'assistenza ed al conforto dei pazienti sottoposti a diagnosi o, se del caso, a terapia, sono quelli indicati nell'allegato I, parte II.
7. Nel caso di un paziente sottoposto ad un trattamento o ad una diagnosi con radionuclidi, se del caso, il medico nucleare o il radioterapista fornisce al paziente stesso o al suo tutore legale istruzioni scritte volte a ridurre, per quanto ragionevolmente conseguibile, le dosi per le persone in diretto contatto con il paziente, nonché le informazioni sui rischi delle radiazioni ionizzanti. Tali istruzioni sono impartite prima di lasciare la struttura sanitaria.

Il principio di ottimizzazione richiede che, una volta che la pratica radiologica sia stata giustificata, essa venga effettuata in maniera di rendere minime le dosi a parità di beneficio diagnostico o terapeutico. In altre parole di rendere massimi i vantaggi e minimi i costi, dove per costi si intendono tutti i tipi di detrimento sanitario (alla popolazione esposta consapevolmente e non consapevolmente ed ai lavoratori)

Questo processo di ottimizzazione è ben delineato dall'articolato del decreto legislativo e nelle linee guida dell'allegato II. Si distinguono i due casi delle pratiche diagnostiche e di quelle terapeutiche, in quanto esse hanno modalità ben distinte.

Per le pratiche radiodiagnostiche si fa uso di una ottimizzazione collettiva per mezzo dei Livelli Diagnostici di Riferimento (LDR). Questi sono dei valori standard, rilevati su base nazionale per effettuare il confronto, per ogni tipologia di esame, tra parametri dosimetrici di semplice misurabilità, ed i valori utilizzati correntemente nella singola struttura sanitaria. Tale valutazione, effettuata periodicamente, consente la programmazione delle azioni necessarie ai fini del conseguimento di livelli di qualità delle immagini ottimali con l'impiego delle minime dosi per ciascuna tipologia di esame. I valori dei parametri adottati come LDR sono stabiliti dal D. Lgs. 187/00 nell'allegato II, devono essere sottoposti a misura periodica (ogni due anni) da parte di un fisico specialista secondo protocolli prestabiliti da standard europei.

Altro strumento essenziale dell'ottimizzazione sono i controlli di qualità e più in generale il programma di garanzia della qualità. Infatti una macchina in buona condizione di salute difficilmente porta a sbagliare una esposizione e a doverla ripetere. Inoltre anche la conoscenza delle condizioni del proprio parco macchine serve a stabilire una politica di svecchiamento che non sia solo finalizzata al rimanere sul mercato ma anche ad essere efficaci ed efficienti.

Più in generale l'attuazione di un programma di garanzia della qualità che preveda di sottoporre a controllo non la sola apparecchiatura ma anche tutto quanto le è di contorno serve ottimizzare l'efficacia e l'efficienza della singola macchina. Un esempio per tutti è rappresentato dalla sviluppatrice: è inutile avere un apparecchio radiografico di ultima generazione se la sviluppatrice è di scarsa qualità. Tutti gli elementi aventi effetto integrato devono quindi essere sottoposti ad un programma di garanzia della qualità avente come fine il miglioramento dell'efficienza e dell'efficacia dell'insieme completo. L'insieme delle azioni da sottoporre a garanzia della qualità include sicuramente la formazione del personale. Infine anche tutte le apparecchiature alternative dovrebbero essere sottoposte a controllo di qualità al fine di rappresentare una effettiva alternativa alla pratica radiologica. Il trattamento con radionuclidi vede, come momento essenziale, quello di informazione del paziente, al fine di ottimizzare la dose alle persone del pubblico eventualmente in contatto con il paziente dimesso. Stante che la dose al paziente è definita dall'attività che gli viene somministrata, l'informativa dovrà essere messa a punto dal medico specialista e dall'esperto qualificato, ma sotto la responsabilità del medico specialista. Le pratiche radioterapeutiche sono oggetto di ottimizzazione individuale in quanto ciascuna fa caso a sé. Anche se alcune tipologie di trattamento si potrebbero ricondurre ad un denominatore comune rispetto allo svolgimento della pratica, questo non è più vero rispetto

Dispense del corso di radioprotezione

all'individuo irraggiato. Pertanto si dovrà provvedere a mantenere minime le dosi agli organi non bersaglio avendo cura di preservare l'efficacia del trattamento. Questa tendenza dovrebbe trarre sempre maggior impulso dall'esistenza di Servizi di Fisica Sanitaria presenti ed operanti in completa integrazione con i radioterapisti. La formazione ha ricevuto normazione da parte del D. Lgs. 187/00 e sviluppo da parte del programma di Educazione Continua in Medicina.

Gli attori del processo di ottimizzazione sono essenzialmente tre: il responsabile dell'impianto radiologico, il medico specialista (radiologo, radioterapista o medico nucleare) e l'esperto in fisica medica. Eventualmente, e limitatamente a quanto previsto dalla legge, l'esperto qualificato può in alcune circostanze essere intercambiabile con l'esperto in fisica medica. Il responsabile dell'impianto radiologico, unitamente all' esercente, rappresenta il referente ed il responsabile di tutte le azioni e le reazioni conseguenti: attivare il programma di garanzia della qualità, far ripristinare le apparecchiature radiologiche e eventualmente dimetterle qualora non siano più in grado di mantenere lo stesso livello (assoluto se su base nazionale, relativo se sulla base della singola struttura) di efficienza ed efficacia. Lo specialista esegue l'esposizione ed è quindi responsabile dell'ottimizzazione della singola esposizione e del risultato diagnostico o terapeutico conseguito. Il fisico ha competenze specifiche nell'attuazione degli appropriati programmi di garanzia di qualità e controlli di qualità indispensabili ai fini della procedura di ottimizzazione.

Nel seguito si riportano alcuni requisiti minimi per la messa in atto degli adempimenti specifici prescritti dal DECRETO LEGISLATIVO 26 maggio 2000, n. 187: Attuazione della direttiva 97/43/ EURATOM in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche.

8.2 Adempimenti prescritti ai fini della radioprotezione del paziente

1. L'esercente (direttore generale) ha l'obbligo di identificare il responsabile dell'impianto radiologico.
2. Il responsabile dell'impianto radiologico ha l'obbligo di sviluppare procedure di accettazione tali da poter dare seguito solo alle richieste d'esame che riportino in modo preciso le indicazioni cliniche e le informazioni necessarie, e, quando queste non siano chiare o siano complesse, si preveda un consulto tra il radiologo e il clinico prima di procedere (art. 3 principio di giustificazione).
3. *Il prescrittente e lo specialista, per evitare esposizioni non necessarie, si avvalgono delle informazioni acquisite o si assicurano di non essere in grado di procurarsi precedenti informazioni diagnostiche o documentazione medica pertinenti alla prevista esposizione. (art. 3 comma 5):* Prima di effettuare un'indagine radiologica è necessario accertarsi che non ne esista già un'altra effettuata in precedenza che renda inutile quella nuova. Dovranno essere attuate procedure specifiche atte a garantire l'applicazione di tale principio.
4. *art. 10 Protezione particolare durante la gravidanza e l'allattamento: . Il prescrittente e, al momento dell'indagine diagnostica o del trattamento, lo specialista devono effettuare un'accurata anamnesi allo scopo di sapere se la donna è in stato di gravidanza, e si informano, nel caso di somministrazione di radiofarmaci, se allatta al seno.*

Ciò significa che gli esami alle donne in età fertile possono essere fatti solo previa anamnesi tesa ad escludere lo stato di gravidanza della donna. In applicazione di tale articolo di legge, le radiografie per donne in età fertile dovrebbero essere contenute il più possibile entro i primi dieci giorni seguenti una mestruazione comprovata e comunque non oltre 25 giorni dopo l'ultima mestruazione. Cio' in quanto il possibile rischio di alterazioni del processo di sviluppo causate dalle irradiazioni dell'utero comincia dopo circa 1 mese dall'ultima mestruazione. E' necessario che venga istituita una procedura scritta, emanata dal medico specialista responsabile della struttura, che preveda espressamente la messa in atto di quanto sopra esposto. Qualora debbano essere effettuate indagini radiologiche su donne in stato di gravidanza dovranno essere seguite procedure specifiche per la valutazione rischio/beneficio prima di procedere all'indagine, con valutazione di dose a cura del fisico specialista.

5. Il responsabile dell'impianto radiologico, avvalendosi dell'esperto in fisica medica, provvede:

Dispense del corso di radioprotezione

- a) che siano intrapresi adeguati programmi di garanzia della qualità, compreso il controllo di qualità, nonché di valutazione della dose o dell'attività somministrata ai pazienti;
 - b) che siano effettuate prove di accettazione prima dell'entrata in uso delle attrezzature radiologiche e quindi prove di funzionamento sia a intervalli regolari che dopo ogni intervento rilevante di manutenzione. In base ai risultati delle prove il responsabile dell'impianto esprime il giudizio di idoneità all'uso clinico delle attrezzature.
6. Il responsabile dell'impianto radiologico, avvalendosi dell'incaricato dell'esecuzione dei controlli di qualità, predispone il protocollo di esecuzione delle prove necessarie ad esprimere il proprio giudizio di idoneità.
 7. Il responsabile dell'impianto radiologico segnala all'esercente la necessità di adottare gli opportuni interventi correttivi per ovviare agli inconvenienti, compreso quello di mettere fuori servizio le attrezzature, qualora permangano condizioni di non idoneità dell'apparecchiatura radiologica. I criteri di accettabilità della apparecchiature radiologiche sono stabiliti dal documento Radioprotezione 91 edito dalla Commissione europea numero di catalogo CR-06-97-755-IT-c ISBN 92-828-1142-5
 8. L'esercente ed il responsabile dell'impianto radiologico, per quanto di rispettiva competenza, provvedono affinché le indagini ed i trattamenti con radiazioni ionizzanti vengano registrati singolarmente, anche in forma sintetica
 9. Il responsabile dell'impianto radiologico verifica ogni due anni i livelli diagnostici di riferimento utilizzati nelle procedure di cui all'allegato II del disposto di legge. In caso di superamento costante dei livelli diagnostici lo segnala all'esercente che adotta gli interventi correttivi necessari per conformarsi alle linee guida di cui all'allegato II. I risultati della verifica e gli interventi correttivi eventualmente effettuati sono annotati su apposito registro.
- I dati relativi ai programmi, ai controlli e alle prove di cui al comma 2 sono registrati e conservati per almeno cinque anni, a cura del responsabile dell'impianto radiologico, anche su supporto informatico; in tale caso, deve essere garantita la permanenza delle registrazioni, anche mediante la duplicazione del supporto.

Obblighi documentali previsti dalla normativa

- Nomina responsabile impianto radiologico
- Istituzione dei programmi di garanzia della qualità e tenuta registri a cura Responsabile impianto radiologico.
- Procedure per l'effettuazione di prove di accettazione prima dell'entrata in uso delle attrezzature radiologiche e prove di funzionamento periodiche
- Registro verifiche biennali LDR e loro registrazione
- Istituzione registro delle indagini e trattamenti con radiazioni ionizzanti.
- Archivio Apparecchiature radiologiche

9. RADIOPROTEZIONE DEI LAVORATORI E DELLA POPOLAZIONE

Con il 1.1.2001 è entrato in vigore il Decreto Legislativo n. 241/00 inerente la protezione della popolazione e dei lavoratori dai rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti: questo Decreto, che recepisce la /29/EURATOM, va ad integrare e modificare il precedente Decreto Legislativo n. 230/95 relativo Direttiva 96allo stesso argomento. Nel seguito si illustrano i principali contenuti di tale articolata direttiva.

9.1 D.lgs 241/2000 - SORVEGLIANZA FISICA DELLA RADIOPROTEZIONE

L'esperto qualificato è -ai sensi del d.lgvo 241/2000 - 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. Per "sorveglianza fisica" si intende 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; essa deve essere effettuata quando le attività svolte comportino la classificazione delle aree (controllate o sorvegliate) e/o di lavoratori esposti .

L'esperto qualificato deve possedere i titoli di studio richiesti (diploma o laurea in discipline scientifiche) e, dopo aver superato un esame di abilitazione, è iscritto in uno speciale elenco depositato presso l'Ispettorato medico centrale del lavoro. Esistono tre gradi di abilitazione con diverse competenze

- 1° grado: apparecchi radiologici che accelerano elettroni con tensione applicata $<400\text{keV}$;
- 2° grado: macchine radiogene con energia degli elettroni $<10\text{ MeV}$, materie radioattive, incluse le sorgenti di neutroni con produzione media $<10^4$ neutroni/sec;
- 3° grado: sorgenti di neutroni e impianti nucleari.

L'abilitazione di 2° grado comprende anche quella di 1°; quella di 3° grado comprende anche quella di 2° e 1° grado.

L'esperto qualificato deve fornire al datore di lavoro, prima dell'inizio di qualsiasi attività con rischio da radiazioni ionizzanti, una consulenza in merito alla valutazione dei rischi che l'attività comporta e ai relativi provvedimenti di radioprotezione da adottare, redigendo apposita relazione.

Rientrano tra le competenze dell'esperto qualificato una serie di fondamentali azioni organizzative generali della radioprotezione, 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.

9.2 Classificazione delle aree

Il D.Lgs. 241/2000 prescrive l'obbligo di classificare 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 esposizione globale o di equivalente di dose efficace;
- 45 mSv/anno per il cristallino;
- 150 mSv/anno per la pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie.

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

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

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

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

E' utile ricordare che, in aggiunta alle zone controllate e sorvegliate, nella sorveglianza operativa, si suole delimitare e regolamentare opportunamente anche le cosiddette zone 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.

9.3 Classificazione dei lavoratori

Il D.Lgs. 241/00, come peraltro già il 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. 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. 241/2000, i lavoratori devono essere distinti in **lavoratori esposti e lavoratori non esposti.**

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

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

I lavoratori esposti devono essere ulteriormente suddivisi in due categorie, A e B, secondo lo schema di tab. 1.

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

Il D.Lgs. 241/2000 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.

Tabella 1- Limiti di riferimento di dose (H) per la classificazione dei lavoratori (mSv/anno)

	Categoria A	Categoria B	NON ESPOSTI
Equivalente di dose globale	$6 < H < 20$	$1 < H < 6$	< 1
Equivalente di dose al cristallino	$45 < H < 150$	$15 < H < 45$	< 15
Equivalente di dose pelle/estremità	$150 < H < 500$	$50 < H < 150$	< 50

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

9.4 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 è compito specifico del datore di lavoro la loro emanazione e l'attuazione di un sistema efficace di sorveglianza sul rispetto delle stesse. I lavoratori devono essere opportunamente formati sulle norme di radioprotezione, e sono tenuti ad osservare le disposizioni in esse contenute.

9.5 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. La dosimetria individuale è obbligatoria per i professionalmente esposti di categoria A (d.lgs 241/2000). Le norme interne di radioprotezione specificano le circostanze nelle quali detti strumenti sono obbligatori, e le modalità di impiego dei dosimetri da parte dei lavoratori. I controlli dosimetrici vengono abitualmente effettuati mediante dosimetri a termoluminescenza (tld) (cards, chips, bulbi), dosimetri individuali a lettura diretta, dosimetri individuali elettronici, dosimetri a film. 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 custoditi secondo le indicazioni fornite dall'esperto qualificato; 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 controllare il conseguimento degli obiettivi di ottimizzazione dell'esposizione, oltre che il rispetto dei limiti stabiliti dal d.lgvo 241/00. I risultati delle dosimetrie devono inoltre essere obbligatoriamente comunicati al medico autorizzato, e devono essere inclusi nel documento sanitario degli esposti a radiazioni ionizzanti.

Nel caso di valutazioni dosimetriche da irradiazione interna, la valutazione della dose individuale deve generalmente essere effettuata mediante tecniche radiotossicologiche specifiche, in relazione alla tipologia di radiocomposto manipolato dal lavoratore.

9.6 Sorveglianza medica

Il datore di lavoro deve affidare la "sorveglianza medica" dei lavoratori esposti, apprendisti e studenti a medici in possesso di precisi requisiti professionali: per i lavoratori classificati in Categoria A a "medici autorizzati", per i lavoratori classificati in Categoria B a "medici autorizzati o medici competenti" (art. 2, D.Lgs. 626/1994). Il medico autorizzato, oltre ad essere medico competente, deve essere iscritto in un elenco nominativo depositato presso l'Ispettorato medico centrale del lavoro dopo aver superato una prova di idoneità per l'accertamento del possesso dei requisiti di preparazione (capo III, D.P.R. 12 dicembre 1972, n. 1150 e art. 88, D.Lgs. n.241/2000). Al medico addetto alla sorveglianza medica sono attribuite le seguenti funzioni (sono di competenza esclusiva del medico autorizzato se espletate su lavoratori di Categoria A o quando è citato l'art. 91 del D.Lgs. n. 241/00):

- studio dei rischi professionali connessi alla destinazione lavorativa nonché la scelta e programmazione di opportune indagini specialistiche e di laboratorio, atte a valutare lo stato degli organi che possono essere maggiormente danneggiati dalle radiazioni
- visite mediche preventive; periodiche e straordinarie, eccezionali, in caso di contaminazioni o irradiazioni accidentali di grado elevato;
- formulazione del giudizio sull'idoneità al lavoro specifico con rischio da radiazioni (artt. 84 e 85,);
- prosecuzione della sorveglianza, per un periodo opportuno, sul personale trasferito ad attività senza rischi di radiazioni (art. 89, comma 1, lett. c) e art. 91);
- indicazioni al lavoratore, nel corso della visita sul significato delle dosi ricevute, delle introduzioni di radionuclidi, degli esami medici e radiotossicologici e del giudizio di idoneità (art. 84, comma 6, D.Lgs. n. 241/2000);

Dispense del corso di radioprotezione

- indicazioni al lavoratore, in caso di cessazione del rapporto di lavoro, sulle eventuali prescrizioni mediche da assumere (art. 85, comma 5);
- indicazioni al datore di lavoro del personale che può essere adibito ad operazioni con rischio di irradiazione eccezionale concordata (art. 89, comma 1, lett. d) e art. 91;
- consulenza al datore di lavoro per la predisposizione di tempestivi provvedimenti sanitari di decontaminazione (art. 89, comma 1, lett. d), D.Lgs. n. 241/2000);
- trattamenti terapeutici d'urgenza, controllo clinico, scelta e programmazione degli esami necessari in casi di contaminazioni o irradiazioni accidentali di grado elevato (art. 91, comma 2,);
decisioni sull'eventuale allontanamento o isolamento del lavoratore accidentalmente irradiato o contaminato (art. 91);
- segnalazioni, in casi di sorveglianza medica eccezionale, entro tre giorni, all'ANPA, al competente Ispettorato provinciale del lavoro, agli organi del S.S.N.. competenti per territorio e all'ISPESL al fine dei relativi adempimenti (art. 92);
- notifica tempestiva al datore di lavoro dei casi di malattie professionali da radiazioni, al fine dei relativi adempimenti di competenza (art. 92);
- istituzione, aggiornamento e conservazione di un documento sanitario personale, per ciascun lavoratore sottoposto a sorveglianza medica, contenente tutti i pertinenti dati di carattere clinico, lavorativo, dosimetrico (art. 89);
- consegna all'Ispettorato medico centrale del lavoro dei predetti documenti sanitari, in caso di cessazione dell'impresa o di risoluzione del rapporto di lavoro (art. 90, D.Lgs. n. 241/2000).

A seguito delle visite preventive e periodiche (art. 84 e 85, D.Lgs. n. 241/2000), il lavoratore può essere classificato in:

- idoneo;
- idoneo a determinate condizioni;
- non idoneo;
- lavoratore sottoposto a sorveglianza medica dopo la cessazione del lavoro che lo ha esposto alle RI (per le sole visite periodiche).

Le risultanze delle visite mediche e degli accertamenti complementari devono essere registrate in un documento sanitario (art. 90), conforme alle caratteristiche fissate dalla normativa, in cui verranno annotate anche la destinazione lavorativa del dipendente e le dosi di radiazioni assorbite comunicate dall'esperto qualificato.

10. Decreto Legislativo n. 241/2000: esposizione a sorgenti naturali di radiazioni

Per quanto concerne il tema che stiamo affrontando, la novità più importante di questa norma è l'introduzione di un sistema regolatorio per l'esposizione occupazionale alla radioattività naturale, come d'altronde il Titolo VII rappresentava una notevole innovazione nell'ambito della Direttiva 96/29/EURATOM.

Il Decreto Legislativo n.241/00 all'art.5 ha introdotto il Capo III-bis "*Esposizione da attività lavorative con particolari sorgenti naturali di radiazioni*". Tale Capo si snoda in diversi articoli: dall'art. 10-bis al 10-octies, quest'ultimo, essendo interamente dedicato alle attività di volo, in questo scritto non verrà preso in considerazione; inoltre di recente è stato introdotto anche un ulteriore articolo, l'art. 10-nonies, riguardante "*Disposizioni particolari per taluni tipi di prodotti*".

Il primo comma dell'articolo 10-bis descrive il campo di applicazione, indicando che la norma si applica a quelle attività lavorative "...*nelle quali la presenza di sorgenti di radiazioni naturali conduce ad un aumento significativo dell'esposizione dei lavoratori o di persone del pubblico che non può essere trascurato dal punto di vista della radioprotezione*". Segue quindi la descrizione delle attività lavorative.

Diversamente dalla Direttiva europea, il nostro legislatore ha tratteggiato nel dettaglio a quali settori lavorativi vanno applicati i provvedimenti di seguito previsti. In particolare alle:

- a) attività lavorative durante le quali i lavoratori e, se del caso, persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron, o a radiazioni gamma o a ogni altra esposizione in luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei;
- b) attività lavorative durante le quali i lavoratori e, se del caso, persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron, o a radiazioni gamma o a ogni altra esposizione in luoghi di lavoro diversi da quelli di cui alla lettera a) in zone ben individuate o con caratteristiche determinate;
- c) attività lavorative implicanti l'uso o lo stoccaggio di materiali abitualmente non considerati radioattivi, ma che contengono radionuclidi naturali e provocano un aumento significativo dell'esposizione dei lavoratori e, eventualmente, di persone del pubblico;
- d) attività lavorative che comportano la produzione di residui abitualmente non considerati radioattivi, ma che contengono radionuclidi naturali e provocano un aumento significativo dell'esposizione di persone del pubblico e, eventualmente, dei lavoratori;
- e) attività lavorative in stabilimenti termali e attività estrattive non disciplinate dal capo IV;
- f) attività lavorative su aerei per quanto riguarda il personale navigante..."

Le attività lavorative di cui alle lettere a) e b) sono direttamente interessate dall'esposizione al radon (anche se non è da trascurare l'eventuale esposizione al toron o alle radiazioni gamma). In entrambe le situazioni, nell'Allegato I-bis, il legislatore ha fissato un livello di azione di 500 Bq/m³ di concentrazione di attività di radon media in un anno.

Nel caso delle attività di cui alle lettere c) e d) - limitatamente a quelle descritte nell'elenco di cui all'allegato I-bis - ed e) la fonte di esposizione più rilevante è data dai radionuclidi naturali presenti nei materiali utilizzati in alcune lavorazioni speciali o nei rifiuti prodotti: per tale motivo l'esposizione maggiore è alle radiazioni gamma emesse da questi elementi. Nell'Allegato I-bis, per queste attività è previsto un livello di azione per i lavoratori pari ad 1 mSv/anno di dose efficace (e 0.3 mSv/anno per la popolazione), che, tuttavia, per le attività c) e d) non è comprensivo ".....dell'eventuale esposizione a radon derivante da

caratteristiche geofisiche e costruttive dell'ambiente *su cui viene svolta l'attività lavorativa e per la quale si applica il livello di azione di cui alla lettera a).*..” - 500 Bq/m³ di concentrazione di attività di radon media in un anno.

Le attività condotte in stabilimenti termali, all'interno di quelle di cui alla lettera e) rappresentano un'eccezione; per queste ultime vige solo il livello di 1 mSv/anno di dose efficace, tenuto conto anche del radon. La ragione di questo diverso trattamento probabilmente sta nel fatto che gli stabilimenti termali, per loro stessa natura e funzione, sono collocati in zone ove vi è presenza di risalita di fluidi caldi dal suolo, di acque minerali, oppure di fanghi ricchi di radionuclidi naturali (ai quali di solito vengono attribuite le proprietà terapeutiche), ecc., pertanto la presenza di radon è un fatto non aggiuntivo (dovuto alle caratteristiche geofisiche del luogo in cui si svolge una determinata attività), bensì “connaturato” ossia direttamente legato al tipo di materiali utilizzati e di attività svolta.

Per quanto riguarda gli adempimenti dell'esercente e lo scadenziario, seguono alcuni brevi cenni alla luce del testo del Decreto (artt. 10-ter, 10-quater, 10-quinquies, e 37) e della Circolare del Ministero del Lavoro n 5/2001 del 8.1.2001.

Attività lavorative a) e b)

A partire dal 1.3.2002 (o dall'inizio dell'attività) l'esercente delle attività lavorative di cui alla lettera a) ha 24 mesi di tempo per eseguire un controllo radiometrico nei propri luoghi di lavoro e verificare la concentrazione media annuale di gas radon: quest'ultima non deve superare il suddetto livello di azione, di cui all'allegato I-bis.

Il controllo doveva essere effettuato secondo le linee guida emanate da una Commissione tecnica, i cui compiti sono descritti nell'art. 10-septies (Sezione speciale della Commissione tecnica per le esposizioni a sorgenti naturali di radiazioni), considerato che di fatto la Commissione non si è insediata, la Conferenza dei Presidenti delle Regioni ha emanato il 6 febbraio 2003 apposite Linee Guida per la misura del Radon negli ambienti di Lavoro. E' previsto che per tale misurazione l'esercente si avvalga di organismi riconosciuti o di organismi idoneamente attrezzati.

Successivamente al risultato della misura:

- qualora non si sia riscontrato il superamento del livello di azione in alcun ambiente, l'esercente non ha altri obblighi;
- qualora il valore di concentrazione riscontrato in un qualsiasi ambiente è pari all'80% del livello di azione, è richiesta la ripetizione della misura nel corso dell'anno successivo;
- qualora ci si trovi al di sopra del livello di azione, è previsto che l'esercente, avvalendosi dell'esperto qualificato (E.Q.), effettui delle azioni di rimedio per riportare il tenore di radon al di sotto del livello di azione (e soprattutto che abbassi le concentrazioni di radon il più possibile, secondo il principio della ottimizzazione). Chiaramente, ai fini di valutare l'efficacia delle misure di rimedio apportate, è richiesta la ripetizione della misurazione. Per tutto ciò l'esercente ha a disposizione un arco di tempo di 3 anni a partire dalla prima

misurazione, i cui risultati devono essere riportati su una relazione tecnica, redatta da coloro che hanno effettuato la misura ai sensi dell'art. 10-ter, comma 4;

- qualora le azioni di rimedio non abbiano riportato la presenza del radon al di sotto del livello di azione, è necessario proteggere i lavoratori esposti applicando quanto previsto dal Capo VIII “*Protezione dei lavoratori*” (ad esclusione di quanto previsto negli art. 61, commi 2 e 3 lettera g) - relativi agli obblighi del datore di lavoro, dei dirigenti e dei preposti, con particolare riguardo alla relazione dell'E.Q. preliminare all'inizio dell'attività stessa, alla segnalazione di zone a particolare rischio ed alla indicazione della presenza di sorgenti di radiazioni ionizzanti - , art. 69 – inerente le disposizioni particolari per le lavoratrici, art. 79, commi 2 e 3 – inerente la valutazione della dose individuale per i lavoratori di categoria A da parte dell'E.Q. mediante apparecchi di misura individuali per le esposizioni esterne e metodi di misura fisici o radiotossicologici per le esposizioni interne), almeno fino a quando le azioni di rimedio non abbiano risolto il problema in modo sufficiente;
- nel caso in cui il livello di azione sia stato superato, l'esercente non è obbligato a realizzare le azioni di rimedio solo se dimostra che nessun lavoratore è esposto ad una dose efficace superiore a 3 mSv/anno. Questo è il caso, ad esempio, degli ambienti con un basso fattore di occupazione quali i magazzini, ecc; tale eccezione non è applicabile agli ambienti frequentati dai gruppi più sensibili della popolazione quali i bambini, quindi non si applica agli asili-nido, alla scuola materna e dell'obbligo.

Le Linee Guida precedentemente citate considerano esenti dall'obbligo di valutazione del rischio quei luoghi di lavoro sotterranei ove comunque il lavoratore non stazioni per più di dieci ore al mese. Viene inoltre definito locale o ambiente sotterraneo “*locale o ambiente con almeno tre pareti interamente sotto il piano di campagna, indipendentemente che queste siano a diretto contatto con il terreno circostante o meno*”. Pertanto rientrano tra i locali sotterranei oggetto di valutazione del rischio radon anche tutti quelli che hanno una apertura verso l'esterno – ad esempio i locali pubblici che hanno un ingresso sulla strada e i locali circondati da intercapedine areata.

Per quanto concerne le attività di cui alla lettera b) gli adempimenti sono i medesimi; è necessario, però, che le regioni e le province autonome abbiano individuato le aree “a rischio” e le abbiano pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale, secondo quanto previsto dall'articolo 10-sexies. Per tale individuazione la Circolare del Ministero del Lavoro prevede un arco di tempo di 5 anni a partire del 31.8.2000 (data di pubblicazione del Decreto): solo una volta classificate e pubblicate le aree a rischio, decorrono i 24 mesi a disposizione per effettuare il controllo radiometrico.

La scelta di porre il livello di azione a 3 mSv/anno anziché ad 1 mSv/anno, valore di riferimento utilizzato nel D.Lgs. 241/2000 per discriminare le persone del pubblico dai lavoratori esposti, deriva dalla volontà di evitare la classificazione (con tutto ciò che ne consegue: sorveglianza medica, obbligo di formazione e di informazione...) di decine di migliaia di persone che lavorano in zone caratterizzate da una non trascurabile concentrazione di radon; in altre parole la natura ubiquitaria del radon, rende questo agente di rischio difficilmente eliminabile, per tale motivo qualunque livello di azione proposto deve portare un ad numero “significativo ma non ingestibile” di luoghi di lavoro da risanare. Questa,

d'altronde, è la filosofia adottata dagli *ICRP 60* e *ICRP 65*, che, attraverso la Direttiva 96/29/EURATOM, è stata "travasata" nella legislazione italiana.

Non dimentichiamo, inoltre, che la Guida Tecnica al recepimento del Titolo VII della Direttiva 96/29/EURATOM – *Radiation Protection 88* – aveva proposto agli Stati membri, quale range entro il quale fissare il livello di azione, 500 – 1000 Bq/m³ pari 3 – 6 mSv/anno: l'Italia ha scelto di adottare quali livelli nazionali i limiti inferiori dell'intervallo proposto.

In caso di superamento del livello di azione, l'esercente è tenuto a

- inviare entro un mese la relazione tecnica relativa al risultato del controllo radiometrico alle ARPA, agli organi del SSN ed alla Direzione provinciale del lavoro; quest'ultima trasmette i dati al Ministero del lavoro e della previdenza sociale, il quale provvederà ad inserirli in un archivio appositamente predisposto, secondo quanto previsto nell'art. 10-quater;
- ad avvalersi per i successivi adempimenti dell'E.Q.

Per quanto riguarda gli adempimenti previsti in relazione alla registrazione delle dosi, il comma 4 dell'art. 10-quinquies prevede che si faccia riferimento all'Allegato I-bis o all'Allegato IV, ove applicabile (un caso tipico può essere quello in cui si debba valutare la dose ai lavoratori degli stabilimenti termali, in cui il fattore di equilibrio radon/figli può essere differente da 0,4 – valore assunto per convenzione nei luoghi di lavoro in generale).

Attività lavorative c), d) ed e)

Nel caso delle attività c), d) ed e) si prevede che a partire dal 1.9.2003 (o dall'inizio dell'attività) l'esercente, avvalendosi dell'E.Q., effettui una valutazione preliminare del ciclo lavorativo, anche sulla base di misurazioni, espletate secondo le indicazioni che la Commissione tecnica fornirà.

Per le attività c) e d), la valutazione preliminare non deve comprendere anche l'eventuale presenza di radon per ragioni geomorfologiche (natura del sito) e/o costruttive (materiali edilizi impiegati): nel caso quindi il radon sia presente, a quest'ultimo si applica il livello di azione definito per le attività lavorative di cui alle lettere a) e b).

Successivamente al risultato della valutazione:

- qualora non si sia riscontrato il superamento del livello di azione in alcun ambiente, l'esercente non ha altri obblighi, se non la ripetizione della valutazione ogni tre anni oppure in occasione di cambiamenti nel ciclo produttivo;
- qualora il valore di esposizione stimato in un qualsiasi ambiente sia pari all'80% del livello di azione, è richiesta la verifica annuale della valutazione;
- qualora ci si trovi al di sopra del livello di azione, è previsto che l'esercente, avvalendosi dell'esperto qualificato (E.Q.), entro tre anni adotti delle misure (cambiamento dei materiali utilizzati o di parametri chimico-fisici del processo) atte a riportare le dosi stimate per i lavoratori e/o la popolazione al di sotto dei limiti previsti;

Dispense del corso di radioprotezione

- qualora non si possa adottare alcuna misura oppure i provvedimenti non siano stati sufficientemente efficaci, occorre seguire quanto previsto dal Capo VIII “Protezione dei lavoratori” e dal Capo IX “Protezione sanitaria della popolazione”. La relazione relativa alla valutazione dell’esposizione, a cura dell’E.Q., segue i medesimi adempimenti della relazione relativa al controllo radiometrico (relativa alle attività a) e b)); medesimo è anche quanto previsto per la registrazione delle dosi.
- Le ARPA e le ASL sono chiamate a svolgere, sull’applicazione di quanto contenuto nel D.Lgs. 241/00, un’attività di vigilanza la quale viene espletata sulla base:
 - delle competenze attribuite alle singole Amministrazioni dalle disposizioni in vigore (**Capo III D.Lgs. 230/95 integrato dal D.Lgs. 241/00**)
 - di quanto stabilito dal **Capo VIII del D.Lgs. 230/95 integrato dal D.Lgs. 241/00**, relativo alla protezione dei lavoratori, che è correlato a quanto previsto dai commi 5 e 6 dell’art. 10-quinquies del Capo III-bis)

Analizziamo ora l’art. 10-quater “Comunicazioni e relazioni tecniche”: il primo comma prevede che per tutte le attività lavorative (dalla a) fino alla e)), in caso di superamento del livello di azione previsto, l’esercente entro un mese invii una comunicazione scritta alle ARPA, agli organi del SSN competenti per territorio, alla Direzione provinciale del lavoro. Il comma 1 prevede che la comunicazione contenga l’indicazione del tipo di attività lavorativa e la relazione tecnica: quest’ultima, nel caso delle attività di cui alle lettere a) e b), riporteranno il risultato della misurazione rilasciato da un organismo riconosciuto, o nelle more, da un organismo idoneamente attrezzato; nel caso delle attività di cui alle lettere c), d) ed e) la relazione tecnica deve essere redatta dall’E.Q. e deve contenere il risultato della valutazione effettuata, il livello di esposizione dei lavoratori, ed eventualmente di gruppi della popolazione, in relazione all’attività, le misure da adottare ai fini della sorveglianza dell’esposizione, le indicazioni delle eventuali azioni di rimedio per il controllo o la riduzione dell’esposizione.

Un prospetto sintetico del tipo di verifiche da effettuare è di seguito riportato:

per le attività a, b

1) verificare **che** l’esercente – nel caso in cui le misurazioni e le valutazioni messo in luce la presenza di livelli di esposizione superiori al livello di azione – si sia avvalso della consulenza di un Esperto Qualificato per le azioni di rimedio;

2) verificare l’adozione di azioni di rimedio, prescritte dall’E.Q. e recepite dall’esercente (entro tre anni, tenendo conto di un’urgenza che deve essere correlata alla quantificazione del superamento del livello di azione);

3) verificare l’espletamento da parte dell’esercente – che si avvale dell’E.Q. – di nuove misure al fine di verificare l’efficacia delle azioni di rimedio di cui al punto 2;

4) se, nonostante l’applicazione delle azioni di rimedio, si hanno esposizioni che sono al di sopra del livello di azione, verificare l’adozione dei provvedimenti previsti dal CAPO VIII (escluso l’art. 61 comma 2 e 3, l’art. 69, e l’art. 79 commi 2 e 3);

5) verificare le ulteriori azioni di rimedio che tengano conto del principio di ottimizzazione e consentano il superamento di quanto esplicitato al precedente punto 4;

6) verificare l’esecuzione – da parte dell’esercente che si avvale dell’E.Q. – dell’espletamento di un controllo radiometrico ogni qual volta si abbia una modifica del processo lavorativo o delle condizioni ad esso contorno che lascino presupporre una variazione significativa del quadro radiologico;

7) verificare la registrazione delle esposizioni (Bq/m^3 e ore di esposizione), le quali vanno effettuate con le modalità indicate nell’allegato I-bis o nell’allegato IV ove applicabile (da utilizzare per la determinazione ai sensi dell’articolo 96 dei limiti di dose per i lavoratori, per gli

apprendisti, gli studenti e gli individui della popolazione, nonché dei criteri di computo e di utilizzazione delle grandezze radioprotezionistiche connesse);

8) poiché l'esercente non è tenuto ad attuare azioni di rimedio (art. 10-quinquies comma 5) se dimostra, avvalendosi dell'esperto qualificato, che nessun lavoratore è esposto ad una dose maggiore di quella indicata nell'allegato I-bis (livello di azione), verificare in modo puntuale

- a) le mansioni dei singoli lavoratori;
- b) il carico di lavoro dei singoli lavoratori;
- c) le procedure attivate dall'esercente - su indicazione dell'E.Q. - al fine dell'effettiva minimizzazione del rischio, ovvero della minimizzazione del tempo trascorso da ogni singolo lavoratore nella zona identificata a rischio;
- d) il tempo trascorso nelle zone a rischio radon;
- e) il livello di formazione del personale;
- f) il livello di informazione del personale;

Analogamente a quanto detto, occorrerà provvedere a

per le attività c, d ed e

1) **verificare** (innanzitutto sulla base della documentazione cartacea, ma in un secondo tempo anche "sul campo") la correttezza formale e procedurale relativa all'espletamento dei compiti dell'E.Q. incaricato di effettuare:

- a) le misurazioni iniziali (secondo le Linee guida della Commissione),
- b) la valutazione preliminare entro 24 mesi dall'inizio delle attività,
- c) le misurazioni periodiche (ogni 3 anni o ogni anno),
- d) eventuale analisi dei processi lavorativi,
- e) rilascio della relazione tecnica di cui all'art. 10-quater,
- f) in caso di superamento del livello di azione di 1 mSv/anno, attuazione – entro tre anni dal rilascio della relazione tecnica – delle misure di rimedio;

2) verificare l'avvenuta attuazione delle prescrizioni previste - a carico dell'esercente - dall'E.Q., per la adozione di azioni di rimedio tese alla minimizzazione del rischio (entro 3 anni);

3) verificare, nel caso in cui l'adozione delle misure di rimedio non consenta di avere livelli di esposizione inferiori al livello di azione, dell'attuazione delle misure di cui al capo VIII e dal capo IX;

4) verificare l'esecuzione – da parte dell'esercente che si avvale dell'E.Q. – dell'espletamento di un controllo radiometrico ogni qual volta si abbia una modifica del processo lavorativo o delle condizioni ad esso contorno che lascino presupporre una variazione significativa del quadro radiologico;

5) verificare la registrazione delle esposizioni, le quali vanno effettuate con le modalità indicate nell'allegato I-bis o nell'allegato IV ove applicabile (da utilizzare per la determinazione ai sensi dell'articolo 96 dei limiti di dose per i lavoratori, per gli apprendisti, gli studenti e gli individui della popolazione, nonché dei criteri di computo e di utilizzazione delle grandezze radioprotezionistiche connesse).

APPENDICE

LISTE DI CONTROLLO PER STRUTTURE SANITARIE

1. Lista di controllo per verifica delle radiodiagnostiche convenzionali

L'intervento viene svolto in due fasi distinte: esame della documentazione e sopralluogo della struttura

Documenti da esaminare

- *Comunicazione Preventiva di patica (art. 22 d.lgs 241/2000)*
- *Autorizzazione sanitaria: prevista dagli artt 193 e 194 del T.U.L.SS. R.D. 1265/34.*
- *Documentazione relativa alla sorveglianza fisica per la tutela dei lavoratori:*
 - a) relazione di valutazione ed indicazioni di radioprotezione (art 61 Dlgs 241/2000) che costituisce il documento di valutazione di cui all'art. 4 comma 2 del decreto legislativo 626/94 per gli aspetti concernenti i rischi da radiazioni ionizzanti;
 - b) documentazione relativa agli adempimenti dell'esperto qualificato (art.79 Dlgs 241/2000) riferita a:
 - individuazione e classificazione delle zone ove sussiste il rischio da radiazioni;
 - classificazione dei lavoratori in base alla loro esposizione;
 - prima verifica di nuove installazioni;
 - verifiche periodiche dell'efficacia dei dispositivi e delle tecniche di radioprotezione con indicazione della periodicità;
 - dati di sorveglianza ambientale;
 - taratura degli strumenti di misura;
 - eventuali prescrizioni al datore di lavoro e loro osservanza (registro verbali provvedimenti);
 - conformità alla normativa di sicurezza;
 - c) schede personali dosimetriche
 - d) le schede di sicurezza delle sostanze utilizzate e le modalità di smaltimento
- *Documentazione relativa alla sorveglianza sanitaria dei lavoratori:*
 - periodicità delle visite
 - documento sanitario personale e giudizi di idoneità
- *Documentazione relativa alla protezione dei pazienti (cfr. Paragrafo 9):*

2 Lista di controllo per verifica della struttura

In sede di sopralluogo deve essere verificata la congruenza tra quanto indicato nella documentazione e la realtà riscontrata; in particolare porre attenzione a:

- delimitazione della zona controllata e sorvegliata secondo le indicazioni riportate nella relazione dell'esperto qualificato con segnaletica appropriata;
- tipo, marca e matricola di generatori e tubi. In assenza di questi dati o in caso di difficoltà a reperirli, si richiedano i documenti di accompagnamento di ciascuna macchina previsti dalla norma CEI 62.69 ed il rispetto, per gli apparecchi installati dopo il giugno 1998 del DM sulla presenza del manuale d'uso redatto in lingua italiana. Si ricorda che l'etichetta identificativa del tubo riporta in genere anche la dimensione del fuoco;
- presenza di dispositivi di protezione individuale le cui caratteristiche devono essere idonee in

Dispense del corso di radioprotezione

relazione all'uso prevalente della diagnostica. Es.: dispositivi di protezione per addetti all'assistenza in diagnostiche di pronto soccorso o pediatriche. I dispositivi di protezione, preferibilmente individuali, possono essere comuni in base alle indicazioni degli incaricati alla sorveglianza.

- presenza del regolamento interno di radioprotezione.

E' necessario verificare la conformità alle norme CEI di sicurezza sulle apparecchiature radiologiche. In particolare:

- presenza e funzionamento di dispositivi acustici e luminosi di erogazione dei raggi, interni ed esterni al locale (CEI 62.27);
- presenza di contrassegni sul tubo e/o guaina, recante le indicazioni previste dai punti 5.3, 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3 della norma CEI 62.2;
- presenza di interruttore tipo uomo morto (CEI 62.27);
- distanza minima fuoco-pelle da valutare tenendo conto che la posizione del fuoco è segnalata sulla guaina (CEI 62.69). Nel caso in cui non è segnalata si misura da 4 cm sotto il punto di mezzo della guaina;
- nel caso sia presente un solo tavolo di comando per più apparecchi, deve essere chiaramente segnalato, sia sul tavolo di comando che sull'apparecchio, il tubo e/o l'apparecchio prima che abbia inizio la posa;
- l'interruttore di comando degli apparecchi, in assenza di paratie fisse, deve essere almeno a 2 metri di distanza dal fuoco (CEI 62.69).

3 E' opportuno verificare che la valutazione dei rischi abbia preso in considerazione il carico di lavoro per ogni tubo, il tipo e la quantità di pellicola radiografica usata annualmente ed il numero di pazienti/anno.

4 Particolare attenzione deve essere posta alle modalità di sviluppo delle lastre per i problemi di igiene ambientale legati alle sostanze utilizzate e per le caratteristiche di qualità delle immagini. Gli aspetti di qualità delle immagini possono essere desunti dal manuale di qualità previsto per i processi di sviluppo (IEC 1223-2-2). E' opportuno definire le caratteristiche dell'impianto di ricambio dell'aria in camera oscura o in prossimità delle sviluppatrici day-light. Per quanto riguarda le modalità operative assumono importanza i tempi di esposizione, la sensibilità ed il tipo di film utilizzati, la composizione chimica dei bagni di sviluppo e fissaggio, il rispetto dei tempi di scadenza dei prodotti utilizzati.

5 Si ricorda che è necessario verificare che le caratteristiche dei locali corrispondano alle vigenti norme di igiene ambientale, igiene del lavoro e sicurezza degli impianti, abbattimento delle barriere architettoniche. E' inoltre opportuno valutare le caratteristiche di destinazione d'uso dell'immobile e dei locali in rapporto alla contiguità con ambienti di vita interni ed esterni.

6 Particolare attenzione deve essere posta alle **procedure** predisposte dal datore di lavoro ai fini della gestione della sorveglianza fisica e sanitaria della radioprotezione dei lavoratori in accordo con quanto prescritto dal d.lgs 241/00. Tali procedure dovranno in particolare riguardare:

a) Gestione di assunzioni e trasferimento di personale: La procedura gestionale deve essere tale da garantire il rispetto del divieto di adibire il dipendente ad un lavoro che comporta l'esposizione a radiazioni ionizzanti prima che sia stata effettuata la classificazione da parte dell'esperto qualificato e prima che sia dichiarata l'adeguatezza dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti da parte del Medico Autorizzato o del Medico Competente

b) Gestione di personale in gravidanza: La procedura deve garantire quanto segue:

La dipendente deve presentare al Datore di Lavoro/dirigente/preposto certificato di stato di gravidanza, non appena accertato. Il Datore di lavoro provvede all'allontanamento della dipendente

Dispense del corso di radioprotezione

dall'usuale posto di lavoro comportante esposizione a radiazioni ionizzanti, e ne dà comunicazione al Medico Autorizzato o competente, che emette giudizio di non idoneità al lavoro comportante esposizione a radiazioni ionizzanti.

c) Rientro al lavoro dopo gravidanza: La procedura gestionale deve essere tale da garantire il rispetto del divieto di adibire la dipendente a mansioni che comportino esposizioni a radiazioni ionizzanti **prima che** sia stata effettuata la classificazione da parte dell'esperto qualificato e prima che sia dichiarata l'idoneità dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti da parte del Medico Autorizzato o del Medico Competente.

d) Dimissioni del personale: Il D.Lgs. 230/95 prevede, in caso di risoluzione del rapporto di lavoro, il completamento e la chiusura dei documenti relativi alla sorveglianza fisica e sanitaria della radioprotezione. Tale documentazione deve essere inviata obbligatoriamente alla sede dell'Ispettorato Medico Centrale del Lavoro sita in Roma

3. RADIODIAGNOSTICA CON APPARECCHI PORTATILI

Le apparecchiature portatili, per i particolari problemi di radioprotezione che comportano e per la minore qualità delle immagini prodotte, devono essere utilizzate solo in quelle situazioni in cui non si può ricorrere all'utilizzo di apparecchiature fisse, come ad esempio in sale operatorie, reparti di terapia intensiva e rianimazione ed in tutti i casi in cui si abbiano pazienti che, per le loro gravi condizioni, non possono essere spostati dal letto.

Si rimanda al protocollo generale per gli apparecchi di radiodiagnostica richiamando alcuni aspetti specifici utili ad integrare la radioprotezione in questo particolare utilizzo:

- tipo di utilizzo in grafia oppure in scopia ed attività totale annua;
- luogo di deposito quando non in uso;
- specificità del regolamento di radioprotezione;
- verifica delle caratteristiche meccaniche della macchina in relazione al movimento (facilità di movimentazione e bloccaggio) ed al mantenimento della posizione del braccio;
- disponibilità ed uso di dispositivi di protezione (paratie, grembiuli, indicatori acustici e/o luminosi di emissione raggi, cartelli mobili di segnalazione). In particolare le paratie dovranno essere facilmente movimentabili oppure depositati in luoghi facilmente accessibili in prossimità dei reparti d'impiego;
- caratteristiche dei reparti in attuazione alle norme di radioprotezione. In caso di carenza di dispositivi di protezione la distanza tra i letti dovrà essere di almeno due metri o i letti dovranno essere dotati di ruote per essere spostati. Questa norma risulta particolarmente vincolante nel caso delle neonatologie e nei reparti pediatrici;
- conformità all'uso in presenza di gas infiammabili nel caso di utilizzo in sale operatorie o in ambienti ad esse assimilabili (CEI 62.5).

Principali riferimenti normativi

- DECRETO MINISTERIALE 13 luglio 1990, n. 449 (*Regolamento concernente le modalità di tenuta della documentazione relativa alla sorveglianza fisica e medica della protezione dalle radiazioni ionizzanti e la sorveglianza medica dei lavoratori esposti al rischio di tali radiazioni*)
- MINISTERO LAVORO circolare 20 novembre 1991, n. 151 (*Modalità applicative del D.M. 13 luglio 1990, n. 449*)
- DECRETO PRESIDENTE REPUBBLICA 13 aprile 1994, n. 336 (*Regolamento recante le nuove tabelle delle malattie professionali nell'industria e nell'agricoltura*)
- DECRETO LEGISLATIVO 19 dicembre 1994, n. 758 (*Modificazioni alla disciplina sanzionatoria in materia di lavoro*)
- DECRETO LEGISLATIVO 17 marzo 2000, n. 241 (*Attuazione delle direttive EURATOM nn. 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti*)
- DECRETO LEGISLATIVO 25 novembre 1996, n. 645 (*Recepimento della direttiva 92/85/CEE concernente il miglioramento della sicurezza e della salute sul lavoro delle lavoratrici gestanti, puerpere o in periodo di allattamento*)
- DECRETO LEGISLATIVO 26 maggio 2000, n. 187 (*Attuazione della direttiva 97/43/ EURATOM in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche*).

Riferimenti bibliografici citati nel testo

- ICRP Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication n. 26, Pergamon Press, Oxford; 1977
- ICRP Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication n. 60, Pergamon Press, Oxford; 1990
- ICRP Protection of the patient in diagnostic radiology ICRP Publication n. 34, Pergamon Press, Oxford; 1982
- UNSCEAR United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiations: Sources, effects and risks of ionizing radiation, Report to the General Assembly, New York: UN, 1993