

Note informative sulle Radiazioni Ionizzanti

(A supporto degli incontri di formazione informazione per i lavoratori esposti al rischio delle radiazioni ionizzanti)

*Prof. Terenzio Bernardi
Prof. Giovanni Testoni
Dott. GianCarlo Passerini
Dott.ssa Cinzia Bernardi*

Sommario

SOMMARIO.....	2
GENERALITÀ.....	3
RADIAZIONI IONIZZANTI.....	3
INTERAZIONI DELLE RI CON LA MATERIA.....	3
PRINCIPALI GRANDEZZE E UNITÀ DI MISURA.....	3
SORGENTI DI RADIAZIONI IONIZZANTI.....	4
LE RADIAZIONI IONIZZANTI NELL'AMBIENTE.....	4
PRINCIPI DI RADIOPROTEZIONE.....	5
LA LEGISLAZIONE VIGENTE.....	6
<i>Obblighi del datore di lavoro</i>	6
<i>Obblighi dei lavoratori</i>	6
SORVEGLIANZA FISICA DELLA RADIOPROTEZIONE.....	7
<i>Valutazione dei rischi</i>	7
<i>Classificazione delle aree</i>	9
<i>Classificazione dei lavoratori</i>	9
<i>Norme interne di radioprotezione</i>	10
<i>Dosimetria personale</i>	10
SORVEGLIANZA SANITARIA.....	11
<i>Effetti dannosi delle radiazioni sull'uomo</i>	11
<i>Aspetti operativi di sorveglianza sanitaria</i>	12

Generalità

La nuova normativa in materia di sicurezza e igiene del lavoro, prevede tra l'altro che, all'interno di ogni azienda, sia effettuata la valutazione dei rischi e che sia fornita adeguata informazione e formazione ai lavoratori sui rischi per la sicurezza e la salute sul luogo di lavoro.

In questa breve nota verrà trattato il rischio di esposizione a radiazioni ionizzanti cui possono essere esposti i lavoratori che operano nella sanità, cercando di esaudire alla voce informazione prevista appunto dalle nuove normative.

N.B. Quando non diversamente specificato con il termine radiazione si intenderà radiazione ionizzante (RI).

Radiazioni ionizzanti

Tutte le radiazioni elettromagnetiche (raggi x e γ) e corpuscolari (elettroni, raggi β , particelle α , protoni, neutroni, ecc.) capaci di produrre ionizzazione in un materiale sono chiamate radiazioni ionizzanti. La ionizzazione è il risultato del processo mediante il quale almeno un elettrone viene allontanato da un atomo neutro; in questo modo si forma una coppia di ioni: l'atomo privato di uno o più elettroni (ione positivo) e l'elettrone strappato (ione negativo). In base al meccanismo di produzione degli ioni le radiazioni si suddividono in:

- Direttamente ionizzanti: sono le radiazioni corpuscolari, elettricamente cariche, aventi sufficiente energia cinetica per produrre ionizzazione tramite collisione diretta con gli atomi del materiale investito. Sono elettroni, protoni, particelle α , ecc.
- Indirettamente ionizzanti: sono le radiazioni corpuscolari ed elettromagnetiche, elettricamente neutre, che possono provocare ionizzazione solamente attraverso meccanismi intermedi: a) cedendo la loro energia a particelle cariche, che possono poi ionizzare direttamente, b) provocando reazioni nucleari nella materia attraversata con conseguente emissione di particelle cariche. Sono: raggi x, raggi γ , neutroni.

Interazione delle RI con la materia

Come abbiamo detto l'interazione della radiazione ionizzante con la materia produce ionizzazione nel materiale bersaglio. Come conseguenza alle ionizzazioni prodotte, in un sistema biologico, possono avvenire delle reazioni chimiche che portano ad effetti nocivi.

I parametri che caratterizzano le interazioni sono:

- Tipo di radiazione
- Energia della radiazione
- Caratteristiche del bersaglio (dimensioni, materiale, ecc)

Al variare dei parametri sopra citati la radiazione incidente può essere assorbita, riflessa, trasmessa. E' sulla base di questi elementari principi che si basa la formazione di una immagine radiografica. Parte dei raggi X emessi dall'apparecchio RX vengono assorbiti dal bersaglio (organo da visualizzare) e parte viene trasmessa. Il diverso comportamento del bersaglio alla medesima radiazione (le ossa assorbono più dei tessuti molli, ovvero i tessuti molli trasmettono più del tessuto osseo) consente un diverso annerimento della lastra radiografica.

Principali grandezze e unità di misura

Fra le tante grandezze definite in campo radiologico prendiamo in esame le principali comunemente utilizzate:

1. Esposizione
2. dose assorbita
3. dose equivalente
4. dose efficace
5. attività di un preparato radioattivo

Per caratterizzare un fascio di raggi X e γ generalmente si ricorre all'esposizione. Con l'esposizione viene misurata la capacità ionizzante di un fascio X o γ in aria. Si ha in un certo punto P l'esposizione di un R (Roentgen) quando in un cm^3 di aria, a temperatura e pressione standard (STD)(0°C e 760 mmHg), circondante il punto P, il fascio di X o γ produce $2.082 \cdot 10^9$ coppie di ioni. Nel SI (Sistema Internazionale) l'esposizione è misurata in Coulomb/kg (C/kg) ($1\text{C/kg}=3876\text{ R}$).

Per caratterizzare l'energia di qualsiasi radiazione ionizzante assorbita in un mezzo qualunque si ricorre alla dose assorbita. Si ha la dose di un rad (radiation adsorbed dose) quando un grammo di materia assorbe l'energia di 100 erg. Nel SI la dose assorbita si misura in Gray (Gy) ($1\text{ Gy}=100\text{ rad}$).

A parità di radiazione incidente, quindi a parità di R, l'energia assorbita per unità di massa (quindi rad) varia in relazione alla natura del materiale assorbente ed alla energia della radiazione incidente. Generalmente il valore numerico dei R non differisce notevolmente dal valore numerico dei rad.

In campo radioprotezionistico si fa ricorso ad un'altra grandezza: la dose equivalente. La necessità di introdurre quest'ultima grandezza deriva dal fatto che, a parità di dose assorbita, gli effetti biologici possono essere diversi al variare del tipo di radiazione, della sua energia e delle condizioni di irraggiamento.

La dose equivalente si ottiene pertanto moltiplicando la dose assorbita per un fattore chiamato fattore peso della radiazione, che nel caso dei raggi X, γ , β ed elettroni è uguale ad 1. Quindi in campo ospedaliero il valore della dose equivalente è uguale al valore della dose assorbita.

La dose equivalente si misura in rem (rad equivalent man) quando la dose assorbita è espressa in rad, si misura in Sievert (Sv) nel SI quando la dose assorbita è espressa in Gy.

A titolo informativo per le particelle α e neutroni di energia sconosciuta il fattore peso della radiazione è rispettivamente 20 e 10.

A parità di dose equivalente a secondo dell'organo o del tessuto irradiato l'effetto biologico è diverso per la diversa sensibilità alle radiazioni ionizzanti dello stesso organo o tessuto. Per tener conto di questo è stata introdotta la dose efficace che ha le stesse unità di misura della dose equivalente. La dose efficace si ottiene sommando su tutti gli organi o tessuti del corpo il prodotto della dose equivalente per il fattore peso dell'organo o tessuto. La dose efficace è la grandezza di riferimento per la valutazione degli effetti biologici di natura stocastica ovverosia induzioni di tumori e danni genetici. Per esempio una dose equivalente di 1 mSv alle sole gonadi da luogo ad una dose efficace di 0,2 mSv essendo 0,2 il fattore peso delle gonadi. Pertanto 0,2 mSv di dose equivalente uniforme su tutto il corpo ha la stessa efficacia nel produrre effetti biologici di natura stocastica di 1 mSv di dose equivalente alle sole gonadi

Grandezza	Unità di misura				Relazione
	Sist. Internaz. (SI)		Storica (non SI)		
	Nome	Simbolo	Nome	Simbolo	
Attività	Bequerel 1 Bq=1dps	Bq	Curie 1Ci=3.710 ¹⁰ dps	Ci	1 Bq=27pCi 1Ci=37GBq
Dose assorbita	Gray 1Gy=1J/1kg	Gy	rad 1rad=10 ² erg/g	rad	1Gy=100rad
Dose equivalente	Sievert 1Sv=1J/1kg	Sv	rem 100 erg/g	rem	1Sv=10 ² rem 1rem=10mSv
Dose efficace	Sievert 1Sv=1J/1kg	Sv	rem 100 erg/g	rem	1Sv=10 ² rem 1rem=10mSv
Esposizione	Coulomb/kg	C/kg	Roentgen	R	1C/kg=3876 R =250 μ C/kg

Sorgenti di radiazioni ionizzanti

Le principali sorgenti di radiazioni ionizzanti impiegate in campo medico sono:

- le macchine radiogene impiegate per la roentgendiagnostica e la roentgenterapia;
- le sostanze radioattive impiegate sia in forma non sigillata in medicina nucleare (Tecnezio 99 metastabile, Tc-99m e Iodio 131, I-131) e in radioimmunologia (laboratori RIA) come lo Iodio-125, sia in forma sigillata in radioterapia con fasci esterni (bombe di cobalto, Co-60), in radioterapia endocavitaria (sorgenti di Cs-137 e Co-60) ed in radioterapia interstiziale (fili di Iridio 192, Ir-192).

Nelle macchine radiogene (apparecchi a raggi X) la sorgente di radiazione è costituita dal tubo a raggi X (tubo di Coolidge) in cui elettroni emessi da un filamento riscaldato (catodo) e poi accelerati, sempre sottovuoto, da un'alta tensione (kVp) contro un bersaglio (anodo) generalmente di Tungsteno (Molibdeno solitamente nel mammografo), danno origine ai raggi X di frenamento e ai raggi X caratteristici del materiale di cui è fatto l'anodo.

E' bene ricordare che nelle vicinanze dell'apparecchio RX ci sono radiazioni solo negli istanti in cui viene scattata una radiografia o effettuata una radioscopia; subito prima e subito dopo non ci sono raggi X. Inoltre il paziente sottoposto ad indagine radiologica non emette assolutamente né raggi X ne nessun'altra radiazione ionizzante.

Le radiazioni ionizzanti nell'ambiente

L'uomo è stato continuamente esposto alle radiazioni di origine naturale fin dal suo apparire sulla terra. Come è possibile osservare dalla tabella, secondo recenti stime, l'irradiazione totale esterna ed interna è di circa 2.4 mSv/anno con una componente dovuta all'irradiazione esterna di 0.8 mSv/anno ed una componente di irradiazione interna di 1.6 mSv/anno. Le sorgenti di questa irradiazione sono costituite da:

i raggi cosmici che giungono dallo spazio sulla terra, attenuati dallo spessore dell'atmosfera;

- i radionuclidi primordiali: quali K-40, Rb-87 e la serie radioattiva della U-238 e Th-232 presenti nel terreno (suolo e rocce).
- radionuclidi cosmogenici come C-14, H-3, e Be-7 prodotti nell'atmosfera per interazione con i raggi cosmici.

Equivalente di dose efficace (mSv/anno)			
Sorgente	Irradiazione esterna	Irradiazione interna	Totale
Radiazione cosmica			
Componente direttamente ionizzante	0.30		0.30
Neutroni	0.055		0.055
Radionuclidi cosmogenici		0.015	0.015
Radionuclidi primordiali			
K-40	0.15	0.18	0.33
Rb-87		0.006	0.006
U-238	0.10	1.24	1.34
Th-232	0.16	0.18	0.34
Totale arrotondato	0.8	1.6	2.4

Tabella 1. Equivalenti annuali di dose efficace dovuti al fondo naturale nelle aree "normali" (dati tratti da UNSCEAR88).

I radionuclidi primordiali contribuiscono sia alla irradiazione interna che alla irradiazione esterna. E' da sottolineare il notevole contributo di irradiazione interna dovuto alla serie dell'U-238.

Il valore di 1.24 mSv/anno è dovuto infatti all'inalazione del radon (esso è presente nel suolo e in alcuni materiali da costruzione) che discende dal radio che a sua volta discende dall'U-238.

Dosi esterne, più elevate, per irradiazione dei raggi cosmici, possono essere assorbite, all'aumentare dell'altitudine (a 1500m circa il doppio di quella del livello del mare, a 10 km è circa 100 volte più elevato).

Dosi esterne più elevate, per irradiazione da radionuclidi primordiali, sono assorbite in regioni la cui crosta terrestre è più ricca di K-40, di U-238 e di Th-232.

Nella tabella seguente sono riportate, a scopo esemplificativo, le dosi da irradiazione esterna rilevate in varie parti del territorio nazionale.

Dosi rilevate in varie	parti d'Italia	
Viterbo	2.0	mSv/anno
Napoli	1.7	mSv/anno
Roma	1.2	mSv/anno
Emilia Romagna	0.40	mSv/anno
Val D'Aosta	0.09	mSv/anno

Dosi interne più elevate, per irradiazione da inalazione del radon sono assorbite con concentrazioni superiori a circa 80 Bq/m³, per esempio con una concentrazione di 200 Bq/m³ la dose interna è di 3 mSv/anno.

Principi di radioprotezione

Il sistema di protezione radiologica prevede che nell'ambito dell'uso delle radiazioni ionizzanti vengano rispettati i seguenti principi:

1. giustificazione di una pratica;
2. ottimizzazione della protezione;
3. limiti individuali di dose e di rischio.

Tali principi ampiamente trattati nella pubblicazione ICRP 60 (1990) vengono riportati all'articolo 2 del D.Lgs.230/95:e s.m.i.

“Al fine di garantire nella maniera più efficace la protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori e la protezione dell'ambiente dalle radiazioni ionizzanti, devono essere rispettati, nelle attività soggette al presente decreto, i seguenti principi generali:

- i tipi di attività che comportano esposizioni alle radiazioni ionizzanti debbono essere preventivamente giustificati e periodicamente riconsiderati alla luce dei benefici che da essi derivano;
- le esposizioni alle radiazioni ionizzanti debbono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali;
- la somma delle dosi ricevute ed impegnate non deve superare i limiti prescritti, in accordo con le disposizioni del presente decreto e dei relativi provvedimenti applicativi”.

La legislazione vigente

Il quadro normativo in materia di sicurezza e igiene del lavoro ha subito sostanziali modifiche con l'entrata in vigore del D.Lgs. 626/94. Per quanto riguarda in particolare il rischio da radiazioni ionizzanti è entrato in vigore il 1° gennaio 1996 il D.Lgs. 230/95 che oltre ad introdurre nuovi limiti, introduce interessanti novità quali, oltre alla protezione dei lavoratori e della popolazione, la protezione del paziente e dell'ambiente non contemplate nella precedente normativa (D.P.R. 185/64).

Obblighi del datore di lavoro

Secondo quanto stabilito all'articolo 4 comma 1 del D.Lgs.626/94, il datore di lavoro deve valutare, nella scelta delle attrezzature di lavoro e delle sostanze o dei preparati chimici impiegati, nonché nella sistemazione dei luoghi di lavoro, i rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori, ivi compresi quelli riguardanti i gruppi di lavoratori esposti a rischi particolari. All'esito della valutazione di cui sopra il datore di lavoro elabora quello che comunemente viene chiamato documento di valutazione dei rischi.

I datori di lavoro che esercitano le attività disciplinate dal D.Lgs.230/95 (radiazioni ionizzanti) devono prima dell'inizio dell'attività che può esporre al rischio, acquisire da un esperto qualificato una relazione scritta contenente le valutazioni e le indicazioni di radioprotezione inerenti le attività stesse. La relazione costituisce il documento di valutazione dei rischi di cui al D.Lgs.626/94, per gli aspetti concernenti i rischi da radiazioni ionizzanti.

Se il documento di valutazione dei rischi introdotto dal D.Lgs. 626 è una novità, la relazione sui rischi da radiazioni ionizzanti era già contemplata dalla vecchia legislazione DPR 185/64.

Altra novità importante introdotta dal 626 è la costituzione del Servizio di Prevenzione e Protezione (SPP).

Obbligo del datore di lavoro è designare i seguenti partecipanti:

1. Responsabile del SPP,
2. Medico Competente (nei casi in cui è prevista sorveglianza sanitaria dei lavoratori)
3. Esperto Qualificato (nei casi di rischio da radiazioni ionizzanti)

L'altro, o gli altri, componenti chiamati a partecipare al SPP è il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS), che viene eletto o designato dai lavoratori secondo modalità stabilite dallo stesso decreto e secondo accordi stabiliti in sede di contrattazione collettiva.

4. Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS).

I datori di lavoro sono obbligati a mettere in atto tutte quelle misure di prevenzione e protezione indicate nella relazione redatta dall'esperto qualificato, per quanto riguarda il rischio da radiazioni ionizzanti, e in generale quelle indicate sul documento di valutazione dei rischi.

Obblighi dei lavoratori

Se il D.Lgs. 626 dedica l'intero Capo V "consultazione e partecipazione dei lavoratori" per definire appunto le nuove possibilità di partecipazione dei lavoratori e/o loro rappresentanti alla gestione aziendale delle problematiche inerenti la sicurezza e la salute dei lavoratori sul luogo di lavoro, è ricorrente in altri Capi il paragrafo "obblighi dei lavoratori". Ad esempio per quanto concerne l'uso delle attrezzature di lavoro e dei dispositivi di protezione individuale.

Questa introduzione modifica in parte la concezione del lavoratore come essere tutelato e da tutelare, rendendolo partecipante attivo in quanto direttamente responsabile come cita la legge: *"ciascun lavoratore deve prendersi cura della propria sicurezza e della propria salute e di quella delle altre persone presenti sul luogo di lavoro" tutto ciò ... "conformemente alla sua formazione ed alle istruzioni impartite dal datore di lavoro"*.

Riportiamo, visti i soggetti a cui la presente è rivolta l'intero articolo 68 del D.Lgs. 230/95 e s.m.i.:

1. I lavoratori devono:

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

2. I lavoratori che svolgono, per più datori di lavoro, attività che li espongano al rischio da radiazioni ionizzanti, devono rendere edotto ciascun datore di lavoro delle attività svolte presso gli altri..... I lavoratori esterni sono tenuti ad esibire il libretto personale di radioprotezione all' esercente le zone controllate prima di effettuare le prestazioni per le quali sono stati chiamati

Sorveglianza fisica della radioprotezione

valutazione dei rischi

Il datore di lavoro, a norma dell'art. 61 comma 2 del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. fornisce all'esperto qualificato (E.Q.) i dati, gli elementi e le informazioni inerenti l'attività del lavoratore con utilizzo di radiazioni ionizzanti.

Le informazioni raccolte sulle sorgenti utilizzate, sulle modalità di lavoro ed i tempi di permanenza, unitamente alla mappatura delle dosi ambientali, permettono all'E.Q. di stimare la dose che il lavoratore è suscettibile di assorbire e di valutare quindi il rischio connesso.

radiologia

Vediamo alcuni esempi di valori di dose misurati in aria su fascio RX diretto e su fascio RX diffuso per impianti radiologici tipici:

Tipo di impianto RX	kVp	mA	s	mAs	DFP cm (*)	Dose su fascio diretto (mSv -mSv/h)	Dose diffusa ad 1 m (µSv-µS/h)	Rapporto fra dosi su fascio diretto e diffuso
a) Radiologia convenzionale: telecomandato	80	1			75	170 mSv/h	160 µSv/h	1060
b) Portatile per corsia	80			20	75	1.40 mSv	1.20 µSv	1165
c) Mobile con I.B. per sala operatoria	80	1.7			50	800 mSv/h	145 µSv/h	5515
d) Mammografo	27			30	58	5.45 mSv	0.75 µSv	7265
e) Endorale	70	8	1	8	20	6.50 mSv	0.55 µSv	11800

(*) DFP = Distanza-Fuoco-Paziente

Il rapporto fra dose su fascio diretto e dose su fascio diffuso ad 1 m dal diffusore in direzione perpendicolare a quella del fascio utile, varia da circa 1000 per gli impianti RX di radiologia convenzionale (telecomandato, pensile, ecc...) a circa 10000-20000 per gli apparecchi endorali.

La dose inoltre varia secondo l'inverso del quadrato della distanza dalla sorgente puntiforme di radiazione: se la distanza raddoppia la dose si riduce ad un quarto, se triplica si riduce ad un nono, ecc...

Il rischio è massimo nel caso di esposizione diretta al fascio utile RX, a breve distanza dalla sorgente e per tempi prolungati.

Per gli impianti RX esaminati in tabella tranne l'apparecchio mobile per sala operatoria, il rischio di esposizione al fascio diretto è praticamente nullo.

Inoltre è relativamente facile per i suddetti impianti, proteggersi anche dal fascio diffuso con barriere anti-X fisse o mobili, che riducono le dosi nella posizione dell'operatore a livello del fondo naturale.

Infatti se al paziente arriva una dose alla cute di **1 mSv**, la dose diffusa ad 1 m è ridotta di almeno mille volte, cioè a **1 µSv**.

Se la barriera anti-X da 2 mm di piombo (Pb) è posta a 2 m dall'impianto, la dose che arriva all'operatore al riparo di questa si riduce a 0.25 µSv per il raddoppio della distanza, e di un ulteriore fattore che è di alcune centinaia di volte (150-200 volte per tensioni di 120-130 kV, 1000 volte per tensioni di 80 kV), diventando dell'ordine del nSv (nanosievert), il fattore di riduzione complessivo è pertanto dell'ordine del milione .

Per gli impianti mobili per S.O. ed anche in angiografia, solitamente è richiesta la permanenza del medico e dell'infermiere vicino al paziente durante il funzionamento in scopia. In taluni casi si può verificare l'esposizione delle mani al fascio diretto, mentre la diffusa interessa il corpo intero.

Se si considera l'esposizione al fascio diffuso del medico o dell'infermiere che deve sostare a meno di 1 m di distanza dal paziente, la dose assorbita sarà proporzionale ai tempi di permanenza ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza; alcune ore/anno di attività a 0.5 m di distanza dal paziente con apparecchio funzionante in scopia, può comportare un rischio di assorbimento di dose superiore ai 6 mSv al corpo intero, per la quale è prevista la classificazione del lavoratore in "categoria A". Alcune decine di minuti o addirittura pochi minuti all'anno di esposizione delle mani al fascio diretto, sono sufficienti ad esporre il lavoratore al rischio di assorbimento di dosi superiori ai 50 o 150 mSv/anno, limiti oltre i quali è prevista la classificazione rispettivamente in categoria B o A.

In tutti i casi, per questi impianti sono obbligatori i dispositivi individuali di protezione anti-X (D.I.P.), quali grembiuli, camici, guanti, occhiali ..., che riducono la dose alle parti protette ad una frazione di quella incidente.

Consideriamo ad esempio un fascio RX generato da una tensione di 85 kV, il grembiule o camice di tipo leggero (equivalente a 0.2 mm di piombo) ha una percentuale di assorbimento del 95%, quelli di tipo pesante (0.4 mm di piombo) hanno un assorbimento di circa il 99%.

I guanti di protezione di tipo leggero per angiografia, urografia, emodinamica, microchirurgia, alla tensione di 80 kV assorbono il 30-35%, quelli medi per posizionare pacemaker, per chirurgia generale, installazione di pompe infusive ... assorbono circa il 55%, mentre quelli pesanti per traumatologia e medicina nucleare assorbono circa il 65%.

radioimmunologia

Nell'attività RIA i radioisotopi sono utilizzati in forma non sigillata, pertanto oltre al rischio di irraggiamento esterno, si presenta il rischio di irraggiamento interno dovuto ad **incorporazione** del tracciante, a causa di contaminazione radioattiva dell'ambiente e della persona.

D'altra parte l'esecuzione di analisi *in vitro* con traccianti radioattivi (ad es. mediante l'uso di kit), comporta livelli di radioattività estremamente bassi.

Ci limiteremo a considerare lo iodio 125 (I-125), il più usato fra i gamma emittenti.

Il rischio derivante da irradiazione esterna è limitato alle mani ed è minimo. Un calcolo estremamente cautelativo, per un utilizzo di 37 MBq/anno (1 mCi) di I-125, porta a valutare una dose annuale di **32 µSv al corpo intero e di 1.3 mSv alle mani**, fatte le seguenti ipotesi:

- a) assenza di contenitori schermati;
- b) massima attività presente nel laboratorio 3.7 MBq (100 µCi) concentrati in un punto per tutto l'anno;
- c) massima attività manipolata 0.37 MBq (10 µCi);
- d) permanenza dell'operatore ad 1 m di distanza dalla sorgente di 3.7 MBq e a 5 cm dal kit di 0.37 MBq con le mani per 200 ore/anno (un decimo del tempo lavorativo).

Il rischio derivante da irradiazione interna attraverso l'introduzione del radionuclide nel corpo è dovuto alle seguenti due cause:

- 1) incorporazione per inalazione derivante dalla contaminazione dell'aria ambiente, se la sostanza radioattiva è volatile;
- 2) incorporazione per ingestione dovuta a contaminazione delle superfici di lavoro o/e dell'operatore stesso, ed alla frazione di contaminante che viene successivamente ingerita.

Facendo riferimento ad un'attività annuale consumata di 37 MBq, ad una frazione di radionuclide inquinante l'atmosfera presa cautelativamente di 1/1000, con 2000 ore di presenza in un laboratorio medio di 60 mc (metri cubi) di volume, si ottiene in assenza di ventilazione forzata e di cappa aspirante una dose

per inalazione di 15 µSv/anno. Per la valutazione della **dose da ingestione**, supponendo sempre in via cautelativa, che 1/1000 del radionuclide contamini il laboratorio e di questa frazione 1/100 venga ingerito, si ottiene un valore di circa **20 µSv/anno.**

Si valuta pertanto un equivalente di dose globale al corpo di circa **70 µSv/anno**, contenuta entro i **100 µSv/anno (0.1 mSv)**, ed una dose parziale alle mani contenuta entro **1.5 mSv/anno**; le dosi suddette sono ampiamente contenute nei limiti di **1 mSv** e di **50 mSv** per il corpo e le mani fissati dalla normativa vigente per i lavoratori non esposti.

classificazione delle aree

Nel D.Lgs.230/95 e s.m.i. viene definita “zona classificata: ambiente di lavoro sottoposto a regolamentazione per motivi di protezione contro le radiazioni ionizzanti”. Le zone classificate possono essere zone controllate o zone sorvegliate.

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

6 mSv/anno	Per esposizione globale (esposizione, considerata omogenea, del corpo intero) o di equivalente di dose efficace
45 mSv/anno	per il cristallino
150 mSv/anno	per la pelle, mani, avambracci, piedi e caviglie.

E' classificata zona sorvegliata ogni area di lavoro, che non debba essere classificata zona controllata, in cui sussiste per i lavoratori in essa 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 e caviglie.

Le zone controllate e sorvegliate sono segnalate mediante appositi cartelli posti in corrispondenza degli accessi.

classificazione dei lavoratori

Sulla base sempre del D.Lgs.230/95 e s.m.i. i lavoratori che operano con radiazioni ionizzanti sono classificati in:

- lavoratori esposti
- 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 fissati per le persone del pubblico.

I valori di tali limiti sono quelli sopra riportati per la classificazione della zona sorvegliata.

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

E' bene sottolineare che i soggetti classificati come lavoratori non esposti sono persone che operano con le radiazioni ionizzanti.

I lavoratori esposti sono suddivisi in due categorie: 'A' e 'B'.

Appartengono alla categoria 'A' i lavoratori esposti suscettibili di una esposizione superiore, ad uno qualsiasi dei valori sopra riportati per la classificazione della zona controllata.

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

Nell'accertamento delle condizioni relative alla classificazione delle aree e dei lavoratori, l'esperto qualificato deve tenere conto delle esposizioni conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata, ma non delle esposizioni accidentali o di emergenza.

Per i lavoratori classificati in categoria 'A' sono previste la sorveglianza dosimetrica personale e la sorveglianza medica, con frequenza semestrale dei controlli, effettuati dal Medico Autorizzato.

Per i lavoratori classificati in categoria 'B', la sorveglianza dosimetrica personale può essere sostituita con quella ambientale ed i controlli medici, effettuati dal medico autorizzato o dal medico competente hanno una frequenza minima annuale.

E' bene sottolineare che la classificazione delle aree non è strettamente legata alla classificazione dei lavoratori e viceversa, nel senso che, per esempio, possono esistere zone classificate controllate senza lavoratori classificati in categoria 'A':

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 radiazione. In esse vengono specificate le regole da seguire per l'accesso e la permanenza nelle zone classificate ovvero per la manipolazione e l'utilizzo delle sorgenti radioattive.

Le norme interne sono redatte dall'esperto qualificato ed emanate dal datore di lavoro.

I lavoratori sono tenuti ad osservare le disposizioni in esse contenute, i dirigenti ed i preposti oltre ad osservarle devono verificare che tutti gli addetti le rispettino.

dosimetria personale

In presenza di irradiazione esterna, la valutazione della dose individuale ricevuta dai lavoratori esposti viene comunemente effettuata mediante dosimetri individuali. Le norme interne di radioprotezione specificano le modalità d'uso di questi strumenti.

I lavoratori, nel rispetto dell'articolo 68, comma 1, lettera b) devono usare secondo le specifiche istruzioni i mezzi di sorveglianza dosimetrica messi a disposizione del datore di lavoro. Si ricorda che la violazione di tale norma è punibile, ai sensi dell'art.139, comma 3, lettera a), con l'arresto fino a quindici giorni o con l'ammenda da lire 200.000 a lire 800.000.

Conviene osservare, come è evidente, che portare il dosimetro di per sé non serve a prevenire l'esposizione alle radiazioni.

Tuttavia la conoscenza del dato dosimetrico personale consente di verificare l'efficacia dei dispositivi e delle tecniche di radioprotezione e di programmare opportunamente le successive esposizioni, in modo da mantenere la dose ricevuta da ciascun lavoratore quanto più bassa possibile e comunque al di sotto dei limiti stabiliti dalla vigente normativa.

Il limite di sensibilità, ovvero la dose minima misurabile da un dosimetro personale è attualmente molto piccola, variabile da 0.05 a 0.1 mSv.

Sorveglianza sanitaria

Effetti dannosi delle radiazioni sull'uomo

Premessa: l'energia media per produrre una coppia di ioni in aria è circa 30 eV; l'energia media del legame chimico (ionico o covalente) è circa 5-10 eV; l'energia media di una radiazione Beta del H-3 è circa 6000 eV.

Il danno può essere causato direttamente, per rottura di legami chimici in macromolecole critiche (DNA, RNA) oppure indirettamente tramite la produzione di radicali liberi fortemente reattivi che danno luogo a prodotti chimici tossici per le strutture biologiche.

Il danno alla cellula può essere prodotto a livello della membrana o del citoplasma (provocando il rallentamento dei processi di riproduzione e/o la morte della cellula), o, soprattutto nel nucleo dove

possono essere indotte delle alterazioni al patrimonio genetico (mutazioni) in modo compatibile con la vita e alla riproduzione delle cellule. Questo è l'evento più grave!

L'effetto dannoso all'organismo può essere somatico (immediato o tardivo), quando si esaurisce con la morte dell'organismo interessato; oppure genetico, quando si trasferisce ai discendenti (gonadi come organo critico).

Gli effetti sull'uomo delle radiazioni possono essere:

deterministici quando: a) compaiono soltanto al superamento di una dose-soglia caratteristica di ogni effetto (la dose-soglia è anche in funzione della distribuzione temporale dell'esposizione); b) se la soglia è superata l'effetto insorge in tutti gli esposti, c) il periodo di latenza è breve (effetti immediati), in alcuni casi può essere di qualche anno (effetti tardivi); d) la gravità del danno aumenta con l'aumentare della dose.

stocastici (leucemie e tumori solidi); quando: a) non esiste una dose-soglia per la loro comparsa; b) sono a carattere probabilistico, casualmente distribuiti nella popolazione esposta; c) all'aumentare della dose aumenta la probabilità di comparsa; d) possono manifestarsi, talora, perfino dopo decenni; e) sono indistinguibili da tumori indotti da altre cause.

Danni deterministici possono essere, dipendentemente dalla dose: inappetenza, eritema, caduta dei capelli, vomito, diarrea, ulcere, ustioni, setticemia grave, turbe nervose, morte.

La soglia per i danni somatici è 0,15-0,30 Sv (guarigione);
dose sub-letale 0,3 ÷ 3 Sv ;
dose letale media 4 ÷ 7 Sv (morte 50%);
dose letale e sopraletale 10 e oltre Sv (morte 100%).

Per quanto riguarda i **danni genetici stocastici** non esistono dati Epidemiologici. Nessuna differenza è stata riscontrata esaminando 30.000 bambini figli di almeno un genitore esposto e 40.000 bambini figli di genitori non esposti.

Per gli **embrioni e feti** si possono distinguere tre periodi di esposizione:

- 1) Fino al 9° giorno dalla fecondazione Effetto del tipo "tutto o niente"; o l'embrione muore, se subisce danno, o non subisce danno. In genere nessuno si accorge di nulla.
- 2) Dal 9° giorno alla fine del 2° mese di gravidanza. Elevata radiosensibilità: può essere indotta la comparsa di malformazioni.
- 3) Dall'inizio del 3° mese fino al termine della gravidanza. Diminuisce la frequenza di malformazioni e aumentano i rischi a carico del sistema nervoso.

Recenti lavori scientifici confermano che il danno principale è il ritardo mentale, tuttavia non risulta apprezzabile alcun effetto sul quoziente di intelligenza fino a dosi dell'ordine di 0,1 Sv.

Dalla 3° settimana alla fine della gravidanza possono essere indotti effetti stocastici (aumento probabili neoplasie) in epoca post-natale, ma i dati sono incerti e non concordanti.

Stima nell'individuo adulto della soglia di dose per danni non stocastici a carico dei testicoli, delle ovaie, del cristallino e del midollo osseo.			
Tessuto	Soglia di dose breve esposizione (Sv)	Soglia di dose esposizione frazionata per molti anni (Sv/anno)	Effetto
Testicoli	0.15	0.4	Sterilità Temp.

	3.5	2	Sterilità Perm.
Ovaie	2.5 ÷ 6	> 0.2	Sterilità
Cristallino	0.5 ÷ 2 5	> 0.1 > 0.15	Opacità osserv. Cataratta
Midollo osseo	0.5 1.5	> 0.4 >1	Depress. Emop. Aplasia mort.

Si riporta, a titolo informativo, un confronto fra il rischio da radiazioni ionizzanti e quello derivante da altri agenti nocivi. Il rischio è espresso in termini di PERDITA MEDIA DI DURATA DELLA VITA (anni) e si riferisce ad uno studio svolto negli Stati Uniti:

Fumare un pacchetto di sigarette al giorno	6 anni
Essere sovrappeso del 15%	2 anni
Consumare alcool con moderazione	1 anno
Lavorare in agricoltura	320 giorni
Lavorare in edilizia	227 giorni
Lavorare in impianti nucleari (10 mSv/anno)	51 giorni
Esporsi ad una dose annuale di 3,6 mSv	18 giorni

Aspetti operativi di sorveglianza sanitaria

Qualora dalla valutazione dei rischi sia emerso che alcuni lavoratori possono essere esposti a particolari rischi, come già accennato, il datore di lavoro al fine di assicurare la sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti, nomina il medico competente. Se i lavoratori sono esposti al rischio da radiazioni ionizzanti e sono stati classificati in categoria A la sorveglianza medica è assicurata dal medico autorizzato. Le visite possono essere:

1. preventive,
2. periodiche
3. di fine rapporto.

La periodicità delle visite è fissata ogni 6 mesi per i lavoratori classificati in categoria A e ogni anno per i lavoratori classificati in categoria B.

Sulla base delle visite preventive (preassuntive) i lavoratori vengono classificati in:

1. idonei,
2. idonei a determinate condizioni,
3. non idonei.

Sulla base delle visite periodiche i lavoratori sono classificati in:

1. idonei,
2. idonei a determinate condizioni,
3. non idonei;
4. lavoratori sottoposti a sorveglianza medica dopo la cessazione del lavoro che li ha esposti alle radiazioni ionizzanti.

Il medico competente così come esplicitamente indicato nel D.Lgs.626 effettua almeno una volta all'anno un sopralluogo nei luoghi di lavoro e partecipa alle riunioni periodiche del Servizio di Prevenzione e Protezione.