

RADIAZIONI IONIZZANTI

Cenni di Fisica

Col termine “radiazione” si definisce la particolare modalità con cui l’energia si propaga da un punto all’altro dello spazio, in assenza di trasporto di quantità macroscopiche di materia e senza il supporto di un substrato materiale.

Le radiazioni possono essere distinte in **elettromagnetiche** e **corpuscolate**: le prime sono costituite da campi elettromagnetici oscillanti con una certa frequenza (onde elettromagnetiche) che si propagano nel vuoto con velocità pari a quella della luce ($2,998 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$); le seconde sono costituite da particelle atomiche o subatomiche dotate di elevata velocità (prossima a quella della luce nel caso di elettroni e positroni) e quindi di elevata energia cinetica.

Le radiazioni sono classificate in **ionizzanti** o **non ionizzanti** (NIR) in base alla loro capacità di produrre o meno la ionizzazione del mezzo attraversato.

Quando le radiazioni attraversano la materia, infatti, cedono ad essa, tutta o in parte, l’energia che posseggono e possono produrre lungo il loro tragitto, se dotate di energia sufficiente, alterazioni a livello atomico. E’ questo il primo evento (di tipo **fisico**) di una lunga sequenza di reazioni secondarie (di tipo **chimico**) che, nella materia vivente, possono dare luogo ad effetti biologici. In particolare, l’interazione iniziale delle radiazioni con la materia dipende, sia quantitativamente che qualitativamente, dalla natura, dalla massa, dalla carica e soprattutto dall’energia delle radiazioni considerate.

L’energia delle radiazioni, siano esse corpuscolate o elettromagnetiche, si misura in elettronVolt (eV) dove un elettronvolt é l’energia che acquista una particella elementare nell’attraversare una differenza di potenziale di 1 volt; i suoi multipli sono il KeV, il MeV ed il GeV.

Le radiazioni con energia sino a **10 eV**, poiché tale valore corrisponde all’energia di legame degli elettroni più esterni degli atomi, non riescono a produrre ionizzazione e dunque sono definite **non ionizzanti** (NIR).

Tutte le radiazioni di energia superiore a 10 eV, riescono invece ad indurre modificazioni fisiche conseguenti alla deposizione di parte o tutta la loro energia, come ad esempio fenomeni di ionizzazione e di eccitazione, e vengono definite **radiazioni ionizzanti** (IR). (Tab. 1)

Tabella 1: Energia delle radiazioni.		
Energia del fotone	Effetto	Fenomeni fisici
Inferiore a 1 eV	Termico	Oscillazioni e dislocazioni degli atomi che costituiscono le molecole mediante moti vibrazionali, rotazionali e traslazionali
Compresa tra 1 e 10 eV	Eccitante	Eccitazione degli elettroni di valenza con innesco di reazioni chimiche (fotoattivazione)
Superiore a 10 eV	Ionizzante	Eccitazione di elettroni degli orbitali più interni, transizioni nucleari con ionizzazioni atomiche e molecolari

Le radiazioni ionizzanti, a loro volta, vengono classificate in:

- I. Radiazioni direttamente ionizzanti
 II. Radiazioni indirettamente ionizzanti

Tabella 2: Radiazioni ionizzanti			
Tipo di radiazioni	Carica elettrica	Massa di riposo ($\text{g} \times 10^{-26}$)	Sorgente delle radiazioni
Radiazioni direttamente ionizzanti			
Particella α (nucleo di elio)	+2	664	Elementi radioattivi
Particella β Elettrone Positrone } leptoni	- 1 + 1	0,09 0,09	Acceleratori di particelle Elementi radioattivi
Protone (barione)	+ 1	167	Acceleratori di particelle
Deutone (nucleo di deuterio)	+ 1	334	Acceleratori di particelle
Radiazioni indirettamente ionizzanti			
Raggi γ	0	0,00	Disintegrazioni atomiche, sorgenti cosmiche
Raggi X	0	0,00	Tubi raggi X, disintegrazioni atomiche
Neutrone (barione)	0	168	Reattori nucleari, acceleratori di particelle

I) Delle radiazioni direttamente ionizzanti fanno parte:

1. I cosiddetti adroni carichi, che sono le particelle α , i protoni (H^+) e gli ioni;
2. Gli elettroni (o particelle β come essi vengono chiamati se sono il prodotto di processi di disintegrazione).

I meccanismi con cui le radiazioni direttamente ionizzanti interagiscono a livello atomico con la materia sono le **eccitazioni** e le **ionizzazioni**.

Nelle **eccitazioni**, l'energia ceduta è inferiore a quella necessaria ad espellere dall'atomo uno dei suoi elettroni dell'orbitale più esterno (elettroni di valenza), la cui energia di legame è dell'ordine di 10 eV. A causa dell'interazione di queste radiazioni a bassa energia, l'atomo passa dallo stato fondamentale ad uno stato eccitato per spostamento di orbitale di uno o più elettroni, sempre nell'ambito dello stesso atomo.

Nelle **ionizzazioni** l'energia ceduta dalle radiazioni supera quella del legame dell'elettrone di valenza che viene quindi espulso dall'atomo di appartenenza. A seguito di tale evento si crea una coppia di ioni: da una parte l'elettrone, o ione negativo, e dall'altra l'atomo, che perdendo l'elettrone ed è divenuto uno ione positivo. Una caratteristica molto importante delle radiazioni ionizzanti, ed in particolare degli adroni, è la loro curva tipica di ionizzazione; questa curva comporta il rilascio di una dose relativamente bassa di energia lungo tutto il percorso degli adroni, fatta eccezione per una regione notevolmente ridotta, dove avviene il "picco di ionizzazione di Bragg", nella quale si arrestano rilasciando tutta la loro energia.

II) Delle radiazioni indirettamente ionizzanti fanno parte:

1. Neutroni;
2. Raggi (o fotoni) X;
3. Raggi (o fotoni) γ .

Le radiazioni indirettamente ionizzanti, diversamente da quelle direttamente ionizzanti, interagiscono con la materia e determinano la ionizzazione attraverso dei meccanismi "indiretti".

L'interazione dei **neutroni** con la materia ha luogo per collisione diretta con i nuclei atomici. Queste interazioni, che dipendono dalla energia dei neutroni, dalla densità atomica e dalle masse degli atomi interessati, sono eventi rari per cui i neutroni possono penetrare profondamente nella materia. In funzione dell'energia posseduta distinguiamo i neutroni *lenti* (da 0 a 1 keV) dai neutroni *veloci* (da 0,5 a 10 MeV); esistono inoltre i neutroni *intermedi*, la cui energia è compresa fra quella dei neutroni lenti e veloci.

I neutroni lenti interagiscono principalmente penetrando nei nuclei atomici, ove sono “catturati”.

I neutroni veloci interagiscono principalmente per collisioni elastiche con i nuclei. Il massimo trasferimento di energia si ha quando l'urto è frontale e le masse delle due particelle interessate nella collisione sono uguali; in queste condizioni si verifica un trasferimento totale di energia. Per il neutrone questa condizione si verifica quando viene a collisione con un nucleo di idrogeno (cioè un protone). Poiché nei tessuti viventi vi è un'alta densità di atomi di idrogeno, questo tipo d'interazione è molto importante; infatti, essa produce i cosiddetti “**protoni di rinculo**”, aventi energia pari a quella del neutrone incidente, i quali, essendo particelle cariche pesanti (adroni), causano una intensa ionizzazione allorché rallentano la loro corsa (picco di Bragg).

I **raggi X** ed i **raggi γ** sono radiazioni elettromagnetiche e consistono in fasci di fotoni energetici, o “quantum di energia”, capaci di produrre ionizzazioni interagendo con la materia per mezzo di tre fondamentali processi:

1) Assorbimento o effetto fotoelettrico: E' la modalità prevalente di assorbimento per i fotoni di bassa energia (< 25 keV). In questo caso il fotone interagisce con un elettrone legato (orbitale) ed è assorbito totalmente, provocando l'espulsione dell'elettrone dalla sua orbita con un'energia data da:

$$E_e = h\nu - E_b$$

dove: $h\nu$ = energia di fotone E_b = energia di legame E_e = energia cinetica dell'elettrone

Dopo un breve intervallo di tempo un'altro elettrone occupa il posto rimasto libero con emissione di radiazione caratteristica.

2) Diffusione ed effetto Compton: Man mano che l'energia dei fotoni incidenti sale da 25 keV a circa 25 MeV, l'attenuazione e l'assorbimento del fascio avvengono prevalentemente per diffusione Compton. In questo caso il fotone interagisce con gli elettroni più esterni dell'atomo, i quali hanno bassa energia di legame e possono essere in effetti considerati come degli elettroni liberi. Ciò è particolarmente valido per gli elementi a basso numero atomico dei tessuti molli, nei quali l'energia di legame è molto bassa (< 1 keV). Con l'avvicinarsi dell'energia del fotone all'ordine di grandezza dei megavolt, anche gli elettroni dell'orbita K (che è l'orbita più vicina al nucleo di un atomo e che ha la maggior energia di legame E_b) di elementi pesanti, come per esempio il piombo ($E_b = 88$ keV), possono essere considerati come elettroni liberi. Nella collisione non vi è perdita di energia e così all'elettrone di rimbalzo viene ceduta l'energia E_1 mentre il fotone si allontana con una energia diminuita $h\nu_2$, tale che si ha:

$$h\nu_1 = h\nu_2 + E_1$$

dove: $h\nu_1$ = energia iniziale del fotone; $h\nu_2$ = energia finale del fotone; E_1 = energia cinetica dell'elettrone

Il fotone diffuso può interagire ulteriormente con la materia o per effetto Compton o per effetto fotoelettrico in rapporto alla sua energia residua.

3) Produzione di coppie (detto anche effetto fotonucleare): la massa a riposo di un elettrone (espressa in termini energetici) è pari a 0,51 MeV; per fotoni di energia superiore a 1,02 MeV si può verificare produzione di coppie, quale esempio sorprendente del principio di Einstein dell'equivalenza di massa ed energia ($E = mc^2$). Nell'intenso campo elettrico che circonda il nucleo il fotone si annulla, trasformandosi in un elettrone e in un positrone (il quale ha la stessa massa dell'elettrone ma carica positiva) così conservandosi l'equilibrio delle cariche. Tutta l'energia del fotone eccedente 1,02 MeV è ripartita tra le particelle prodotte come energia cinetica, perciò:

$$h\nu = 1,02 \text{ MeV} + E_{\text{elettrone}} + E_{\text{positrone}}$$

Questo effetto apparentemente straordinario obbedisce alle leggi della conservazione della carica, dell'energia, della massa e del momento, come pure alle più sofisticate leggi della meccanica quantistica. Il positrone, circondato com'è da una nube di elettroni quando attraversa un mezzo assorbente, ha una elevata probabilità di annichilazione ed infatti, dopo alcune interazioni (simili a quelle degli elettroni), che sottraendogli energia lo fanno rallentare, collide con un elettrone e viene annichilito. Questa annichilazione rappresenta il fenomeno inverso all'iniziale conversione di energia in massa, e, per essa, due fotoni di energia pari a 0,51 MeV, detti *radiazioni (γ) di annichilazione*, vengono emessi a 180° l'uno rispetto all'altro. In questo modo carica, momento ed energia sono di nuovo conservati. (Figura 1)

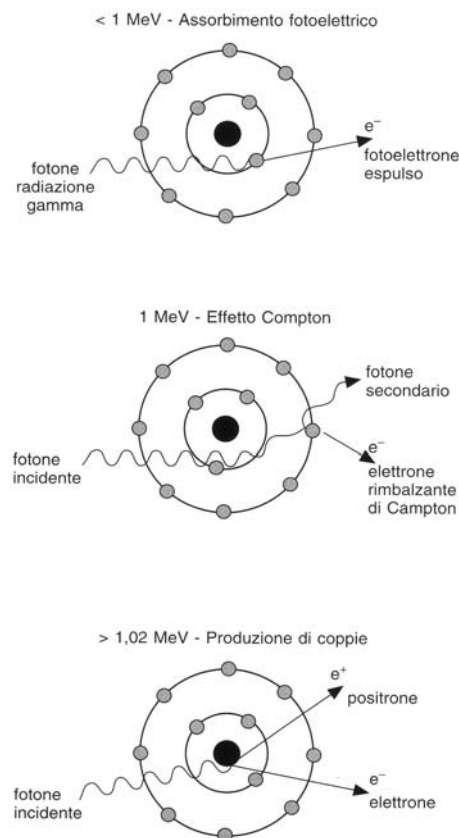


Figura 1: Modalità di interazione delle radiazioni indirettamente ionizzanti

Il concetto di LET ed EBR

Sebbene tutte le radiazioni ionizzanti interagiscano con la materia vivente in modo analogo, i diversi tipi di radiazioni differiscono nella loro efficacia, o capacità di recar danno

ad un sistema biologico. L'*efficacia biologica relativa* (**EBR**) di un certo tipo di radiazioni è sempre espresso in relazione alla dose di un tipo standard di radiazione.

Il principale fattore che influisce sull'EBR di un dato tipo di radiazioni è la distribuzione delle ionizzazioni e delle eccitazioni nel loro percorso. Allo scopo di comprendere insieme sia gli eventi di ionizzazione, sia quelli di eccitazione è stato coniato il termine di *trasferimento lineare di energia* (**LET** - linear energy transfer). Il LET è espresso in termini di energia ceduta mediamente in keV per micrometro di tessuto attraversato ($\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$). In recenti lavori il LET viene espresso in MeV cm^{-1} . Il LET dipende dalla velocità e dalla carica della particella ionizzante. Le particelle α , i neutroni e i protoni sono radiazioni ad alto LET in quanto, essendo dotate di carica o di notevole massa il trasferimento di energia avviene più facilmente; i raggi X, γ e gli elettroni veloci sono, invece, radiazioni a basso LET. Poiché l'efficacia biologica di una particella è in relazione al numero di ionizzazioni e alla loro distribuzione lungo il percorso, le particelle con alto LET sono più dannose per unità di dose che le radiazioni a basso LET. Le particelle α , i protoni e i neutroni hanno perciò una maggiore EBR che i raggi X, i raggi γ e gli elettroni. Va tuttavia sottolineato che il LET delle particelle pesanti cariche (adroni carichi) dipende non solo dalla loro carica, ma anche dalla loro velocità di accelerazione (variabile in larga misura). Si spiega così perché i *protoni ad altissima energia*, che vengono impiegati nelle terapie a fascio collimato, siano considerati radiazioni di LET inferiore o uguale a $10 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1}$ e di EBR non superiore a quella delle radiazioni convenzionali. Bisogna sottolineare però che se normalmente l'efficacia biologica relativa di una radiazione aumenta con l'aumentare del trasferimento lineare di energia, questo progressivo aumentare dell'EBR in relazione all'aumento del LET non è valido per valori molto elevati di LET. Infatti, ad elevate densità di ionizzazione, nel sistema biologico viene ceduta molta più energia di quanta sia necessaria per produrre un certo effetto e dunque, poiché un gran parte dell'energia viene "sprecata", diminuisce di conseguenza l'efficacia biologica relativa.

Per esprimere l'efficacia biologica dei diversi tipi di radiazione, soprattutto in campo radioprotezionistico, si usava in passato la "*grandezza equivalente di dose*" (H) corrispondente alla *dose assorbita* in Gy moltiplicata per il *fattore di qualità* (Q) della radiazione, fattore a sua volta correlato al LET della radiazione. Oggi il fattore Q è sostituito da opportuni *fattori di peso per la radiazione* (W_R) e la dose in Gy moltiplicata per W_R dà luogo alla "*dose equivalente*" (H_T) mediata sul tessuto od organo T dovuta alla radiazione R . Le differenze tra le due grandezze sono più fisico-matematiche che concettuali in quanto "l'equivalente di dose" si riferiva alla dose in un punto, mentre "la dose equivalente" si riferisce alla dose media assorbita da un tessuto od organo e quindi pesata per W_R . Entrambe hanno in comune l'unità sievert (Sv), pari ad 1 Joule per kg di massa.

Nell'ambito delle radiazioni di basso LET è anche utile ricordare il Fattore di Efficacia per la Dose e l'Intensità di Dose (DDREF, dall'inglese Dose and Dose Rate Efficiency Factor). Questo fattore è utilizzabile quando si debba stimare la probabilità di un effetto a basse dosi ($< 0,2 \text{ Gy}$) e bassa intensità di dose ($< 0,1 \text{ Gy ora}^{-1}$) in base ad estrapolazione (per lo stesso effetto) dei dati relativi ad una irradiazione ad alta dose e/o ad alta intensità di dose.

Danno Biologico da Radiazioni Ionizzanti

Interazione con la materia

Le radiazioni ionizzanti interagiscono con la materia che incontrano nel loro tragitto sono cioè in grado di indurre modificazioni transitorie o permanenti delle caratteristiche chimiche e fisiche dei materiali irradiati.

Per quanto riguarda la materia vivente, va ricordato che le radiazioni sono in grado di modificare le strutture biologiche delle quali la più importante è la cellula, unità biologica fondamentale organizzata in tessuti ed organi specializzati. Possono subire l'azione delle radiazioni tutti i componenti cellulari necessari alla vita della cellula stessa: i mitocondri, le membrane semipermeabili, il mezzo interno, il DNA. La ionizzazione provocata dal passaggio delle radiazioni innesca nelle cellule tutta una serie di modificazioni fisico-chimiche nelle cellule tale da determinare un'alterazione delle loro funzioni vitali.

Il processo di produzione del danno biologico passa attraverso tre stadi:

- Stadio fisico-chimico: formazione di ioni con successiva creazione di molecole reattive;
- Stadio chimico: reazione dei composti creatisi con strutture biologicamente importanti della cellula;
- Stadio biologico: produzione delle alterazioni cellulari.

L'ultima fase si può manifestare in tempi variabili: pochi minuti o decenni. Può verificarsi, infatti, la morte della cellula per gravi alterazioni incompatibili con la vita cellulare o la sua trasformazione e trasmissione alle cellule figlie della modificazione. Il momento in cui la cellula è più sensibile alle radiazioni è durante la divisione cellulare.

L'esposizione a radiazioni ionizzanti è, quindi, causa di danno biologico a livello cellulare che, a seconda della quantità di cellule interessate, può diventare anche tissutale. Il danno si verifica attraverso un duplice meccanismo:

A) Diretto, in cui le macromolecole cellulari e tissutali, essendo esse stesse bersaglio delle radiazioni, ne subiscono gli effetti ionizzanti e eccitanti;

B) Indiretto, in cui le alterazioni a carico di queste macromolecole sono dovute ai radicali liberi prodotti dall'azione delle radiazioni sulla componente molecolare maggiormente rappresentata nell'organismo, cioè l'acqua. (Figura 2)

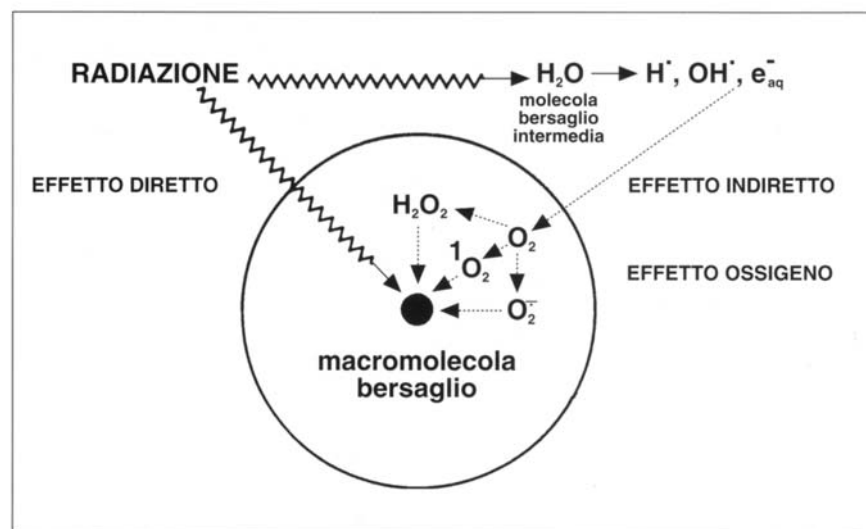


Figura 2: Meccanismi di produzione del danno

Bisogna sottolineare che le cellule differiscono l'una dall'altra per forma, per composizione ed anche per funzione; pertanto si presuppone che il loro comportamento e la loro resistenza rispetto alle radiazioni ionizzanti sia diverso da un tipo cellulare all'altro e si parla, perciò, di "radiosensibilità specifica".

La legge di Bergonié e Tribondeau afferma che la radiosensibilità di un tessuto è direttamente proporzionale alla sua attività mitotica ed inversamente proporzionale al suo

grado di differenziazione. La mitosi, essendo un processo radiosensibile, conferisce sensibilità alle popolazioni cellulari in rapida divisione, come quelle della cute, del midollo osseo e delle gonadi. Per contro, i tessuti con poche cellule capaci di dividersi, come il sistema nervoso, i muscoli, i reni ed il fegato, sono definiti “radioresistenti”, ma vanno ugualmente incontro a manifestazioni radiopatologiche, soprattutto tardive, per dosi di ordine terapeutico oncologico.

Normalmente le lesioni più ingenti ed importanti (dal punto di vista biologico), causate dalle radiazioni ionizzanti all'interno della cellula, sono rilevabili a carico del DNA, sebbene anche il danno al citoplasma può condurre a notevoli alterazioni della cellula.

I vari tipi di lesioni in molecole di DNA esposte in vitro all'azione di radiazioni ionizzanti ad alto e basso LET sono le seguenti:

1. modificazioni o perdita di basi azotate per rottura dei legami glucosidici;
2. rottura dei legami a idrogeno tra coppie di basi complementari appaiate;
3. rottura dello scheletro pentoso-fosfato di un singolo filamento o di entrambi i filamenti del DNA;
4. rottura di filamenti nucleotidici e successiva formazione di legami crociati all'interno di una stessa molecola di DNA o tra due molecole di DNA.

Gli effetti di queste alterazioni possono essere biologicamente ininfluenti, poiché la cellula è in grado di ripararne la maggior parte; se, però, la riparazione non viene completata o non è ripristinata fedelmente la sequenza nucleotidica originale prima che il DNA si replichi, l'alterazione può trasmettersi alle cellule figlie fissandosi permanentemente nel genoma (**mutazione**).

Le lesioni del DNA possono anche manifestarsi come alterazioni strutturali macroscopiche della cromatina causate dalla rottura di fibre cromosomiche. Anche in questo caso, la cellula può porvi riparo ricongiungendo le estremità dei cromosomi frammentati. Se le rotture insorgono in regioni cromosomiche contigue e in tempi ravvicinati può accadere che l'estremità di una di esse venga erroneamente congiunta all'estremità di un'altra, dando luogo a traslocazioni, inversioni e altri tipi di anomalie strutturali potenzialmente oncogene. Secondo l'interpretazione più protezionistica, la frequenza delle suddette aberrazioni cromosomiche aumenta linearmente, senza limite di soglia, in funzione della dose di radiazioni impiegata. La pendenza della curva è ripida per le radiazioni ad alto LET e più inclinata per quelle a basso LET. Ciò significa che le prime hanno una maggiore probabilità di provocare almeno due rotture nello stesso cromosoma e nello stesso tempo, quindi che i requisiti spazio-temporali perché si verifichi un anomalo riassetto strutturale sono soddisfatti da un'unica traccia radiante, mentre con le seconde sono richieste due o più tracce radianti per ottenere lo stesso effetto.

Effetti delle radiazioni sull'uomo.

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono raggrupparsi in tre classi aventi differenti caratteristiche cliniche e diverso significato sanitario generale:

1. Effetti immediati sull'individuo irradiato (effetti **somatici deterministici**);
2. Effetti tardivi sull'individuo irradiato (effetti **somatici stocastici**);
3. Effetti genetici.

La differenziazione tra effetti “**somatici**” ed effetti “**genetici**” viene posta a seconda se il danno si manifesta nell'individuo irradiato o nella sua progenie. Inoltre, mentre i danni genetici sono sempre di tipo “stocastico” (cioè probabilistico), i danni somatici possono essere sia stocastici che “deterministici” (cioè dose-dipendenti).

Effetti Deterministici

Gli effetti **immediati**, o precoci, “deterministici” sono tipici di condizioni di irradiazione forte e di breve durata, che si ritrovano, per esempio, in incidenti o infortuni. Sono conosciuti e studiati clinicamente e statisticamente da diversi decenni, osservando anche gli effetti sui sopravvissuti allo scoppio delle bombe atomiche delle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki. Infatti, conoscendo teoricamente la potenza delle bombe, la posizione esatta dei sopravvissuti e gli eventuali ostacoli interposti, è stato possibile correlare la patologia riscontrata e la sua evoluzione con l'esatta quantità di dose di radiazioni.

Gli effetti deterministici sono dose-dipendenti, la cui gravità, cioè, aumenta con l'aumentare della dose di irradiazione. Per questo tipo di effetti viene riconosciuta una “dose soglia” al di sotto della quale, cioè, la manifestazione clinica non si presenta in quanto il numero di cellule danneggiate è limitato (Tabella 3).

Tabella 3: dose soglia del danno deterministico		
Tessuto	Soglia di dose (Sv)	
	Dose totale singola esposizione <u>breve</u>	Dose totale frazionata esposizione <u>protratta</u>
Testicoli Sterilità temporanea Sterilità permanente	0.15 3.50	0.40 2.00
Ovaie Sterilità	2.5-6.0	6.0
Cristallino Piccole opacità Cataratta	0.5-2.0 5.0	5.0 >8.0
Midollo osseo Depressione emopoiesi Aplasia mortale	0.5 1.5	>0.4 >1.0

Gli effetti deterministici presentano inoltre una relazione dose-effetto che non è lineare ma di tipo sigmoide, in quanto, superata la dose soglia, l'effetto coinvolge in un range di esposizione abbastanza ristretto tutti gli individui esposti. Questi effetti presentano

un'insorgenza di solito precoce e sono reversibili se il danno cellulare non è di tali dimensioni da compromettere definitivamente la vita dei tessuti interessati e quindi la funzionalità degli organi coinvolti. I danni sono quindi prevedibili e riproducibili sperimentalmente e si manifestano in tutta la popolazione esposta.

Nel caso di panirradiazione in dose unica del corpo umano con esposizione a dosi elevate, si manifestano sindromi acute che in ordine di gravità sono (Tabella 4):

La sindrome ematologica è rappresentata da riduzione del numero delle cellule ematiche della serie bianca e rossa, la morte può avvenire in seguito a possibili infezioni per caduta delle difese immunitarie per riduzione del numero delle cellule della serie bianca ed emorragie da deficit piastrinico. Deriva dall'azione delle radiazioni ionizzanti sul midollo osseo.

La sindrome gastroenterica si manifesta con diarrea ematica, vomito, gravi turbe elettrolitiche. La sua sintomatologia scaturisce dal danno provocato alle cellule mucipare dell'intestino tenue. La morte avviene dopo circa quindici giorni dall'esposizione.

La sindrome neurologica è rappresentata da iperpiressia, edema cerebrale, convulsioni, coma e morte. La morte avviene dopo circa due giorni dalla irradiazione. La sindrome si manifesta per azione diretta delle radiazioni sulle cellule nervose e sui vasi cerebrali.

Un caso particolare di danno biologico è rappresentato dall'irradiazione in utero dell'embrione o del feto in quanto gli effetti deterministici variano a seconda del periodo della vita intrauterina in cui è avvenuta l'esposizione. Prima dell'impianto dell'embrione (sino al 9° giorno dalla fecondazione) può aversi una risposta del tipo tutto o nulla: o avviene la morte dell'embrione o non si verifica alcuna conseguenza. Ciò dipende, chiaramente, dal ridotto numero di cellule che compongono l'embrione per cui anche la distruzione di un piccolo numero di esse può compromettere la sua sopravvivenza. Durante il periodo della morfogenesi (dal 9° giorno alla fine del 2° mese), fase di differenziazione e organizzazione dei tessuti, la radiosensibilità è molto elevata e l'irradiazione può provocare un alto numero di malformazioni. In tal caso il numero di cellule esistenti può essere sufficiente a garantire la sopravvivenza dell'embrione anche se la funzionalità di alcuni organi ed apparati è compromessa. Durante la vita fetale (dal 3° mese in poi) diminuiscono frequenza e gravità delle malformazioni ma aumenta la possibilità di tumori infantili e la frequenza di incidenza di ritardo mentale poiché il cervello rimane radiosensibile sino a circa il 5° mese di gravidanza.

Tabella 4: Sindromi acute da irradiazione.		
Sindrome	Dose (Gy)	Effetto biologico
Forma ematologica	0.25 1.00 1-2 2-5 5-6	Sopravvivenza certa Soglia della sindrome Sopravvivenza probabile Sopravvivenza possibile Sopravvivenza impossibile
Forma gastrointestinale	6-7	Sopravvivenza impossibile
Forma neurologica	>10	Sopravvivenza impossibile

Effetti Stocastici

Oltre agli effetti acuti delle radiazioni, di tipo deterministico, vi sono anche manifestazioni lesive, talvolta più insidiose, note come effetti somatici **tardivi o stocastici**. Mentre gli effetti deterministici sono policitemici, gli effetti stocastici possono essere provocati anche dall'alterazione di una sola cellula. Hanno un lungo periodo di latenza e non sono reversibili; rispondono alla legge del tutto o nulla. Gli "effetti stocastici" vanno studiati su gruppi numerosi di persone esposte, tanto più vasti quanto più piccola è la dose pro-capite e la connessa frequenza di comparsa. Infatti, la dimostrazione dell'evento può avvenire solo attraverso il confronto statistico tra popolazione irradiata e gruppo di controllo e la correlazione causa ed effetto può essere attribuita solo su base probabilistica. Contrariamente agli effetti deterministici, gli effetti stocastici non sembrano avere una dose soglia, ma questa è un'ipotesi scientifica non accertata e accettata solo come ipotesi protezionistica. La difficoltà di accertare matematicamente l'esistenza di una dose soglia è rappresentata dal fatto che diminuendo la dose ai livelli ammessi come valori limite per avere una validazione statistica del fenomeno bisogna che le popolazioni di riferimento e di controllo siano di elevata entità numerica. Non solo, ma diminuendo ulteriormente la dose va incrementata sempre più la grandezza della popolazione esaminata. Poiché i tumori radioindotti a bassi livelli di dose sono numericamente irrilevanti in rapporto alla popolazione di riferimento, la loro incidenza non può essere documentata in quanto si perde nella fluttuazione statistica; non esiste, quindi, la possibilità di una evidenza epidemiologica certa. Tra gli effetti stocastici somatici tardivi, quelli che spiccano per gravità e frequenza sono sicuramente le leucemie ed i tumori solidi.

Gli effetti **genetici** delle radiazioni ionizzanti sono le aberrazioni cromosomiche, le variazioni del numero dei cromosomi e le mutazioni genetiche trasmissibili (siano esse dominanti o recessive). Queste ultime possono essere responsabili di aborti spontanei, di aumentata mortalità neonatale e di malattie genetiche e malformazioni nella discendenza. (Tabella 5)

Tabella 5: Effetti stocastici	
Somatici	Genetici
1) Leucemie (escluso la LLC) 2) Tumori solidi (tutti)	1) Mutazioni genetiche 2) Aberrazioni cromosomiche 3) Variazioni del numero dei cromosomi

Radiazioni ionizzanti e cancerogenesi

I primi casi di cancro da radiazioni si ebbero per la comparsa di tumori cutanei sulle mani di molti ricercatori che per primi lavorarono con i raggi X. Da allora, molti studi sistematici sugli animali hanno mostrato che le radiazioni provocano un aumento nell'incidenza di quasi tutti i tipi di cancro che si sviluppano "spontaneamente". Per i tempi richiesti dalle varie fasi della cancerogenesi (iniziazione, promozione e progressione) i tumori radioindotti non si manifestano a breve distanza di tempo dall'irradiazione, ma esiste un periodo di latenza più o meno lungo che comporta difficoltà nello stabilire un eventuale nesso causale.

In teoria le radiazioni ionizzanti possono essere considerate causa o concausa nella

genesì di tutti i tumori (tumori solidi e leucemie) ad eccezione della leucemia linfatica cronica, il Morbo di Hodgkin e alcuni linfomi considerati a radioinducibilità nulla o estremamente scarsa. La potenzialità cancerogena delle radiazioni ionizzanti e la variabilità individuale della risposta, infatti, non potendosi escludere totalmente il rischio alle basse dosi, inducono a ritenere possibile una oncogenesi radioindotta da basse dosi.

Le neoplasie radiogene non presentano caratteristiche peculiari rispetto a quelle di origine spontanea per cui il fenomeno può essere valutato solo su base statistica.

Considerato che i tumori rappresentano, allo stato attuale, circa il 25 % di tutte le cause di morte, per l'accertamento dell'origine professionale di una patologia collegata con l'esposizione, per fini medico-legali, esiste la necessità di trovare una correlazione tra la manifestazione clinica neoplastica e l'esposizione a basse dosi degli operatori della sanità.

I tumori radioindotti si manifestano, comunque, indipendentemente dalla dose assorbita in quanto la loro comparsa dipende anche dall'integrità dei sistemi di difesa e dal completamento dell'intera sequenza della cancerogenesi. Va considerato, inoltre, che esistono delle forme familiari di tumori per le quali è riconosciuta una predisposizione genetica per alterazione dei sistemi di riparazione del danno del DNA (sindrome di Bloom, anemia di Fanconi, xeroderma pigmentoso, atassia teleangectasia) o difetto di funzionamento dei geni oncosoppressori (sindrome di Li Fromeni, tumori della mammella-BRCA1 E BRCA2-, poliposi cronica familiare, retinoblastoma).

Un cancro (o tumore) dal punto di vista biologico è costituito da un gruppo di cellule che si dividono per dare origine ad una massa di cellule scarsamente organizzata. Le cellule tumorali in genere non mostrano specifiche funzioni fisiologiche di tessuto, benché alcune siano in grado di produrre sostanze fisiologicamente attive come gli ormoni. Le cellule di molti tumori, inoltre, sembrano possedere una membrana cellulare con caratteristiche tali da permettere loro di separarsi dalle cellule circostanti per infiltrare ed invadere altri tessuti. Tali cellule possono formare tumori secondari in una nuova sede (metastasi), se sono favorevoli le condizioni per la loro crescita. Le cellule cancerose sono anche caratterizzate dal fatto di essere relativamente indipendenti dai normali meccanismi di controllo dell'organismo. Un'adeguata definizione del cancro dovrebbe comprendere tre caratteristiche:

1. *Anomala attività proliferativa;*
2. *Capacità di metastatizzare;*
3. *Relativa autonomia dai normali meccanismi omeostatici dell'organismo.*

I casi radioindotti di leucemia ed osteosarcoma possono manifestarsi al più presto entro 2-5 anni dall'irradiazione e raggiungono il loro picco entro i primi 10 anni, mentre la maggior parte dei tumori solidi non si manifestano prima di 10 anni ed esibiscono tempi di latenza anche di 30-40 anni, durante i quali possono anche mancare alterazioni evidenti nei tessuti destinati a divenire cancerosi. Nei tumori indotti da radioterapia ad alte dosi e sviluppatasi dai tessuti compresi nel volume di trattamento, tuttavia, è possibile rilevare segni distrofici tardivi nei tessuti perifocali.

Generalmente i tessuti che hanno un tasso elevato di divisione cellulare sono più predisposti all'induzione tumorale dei tessuti che mostrano una scarsa attività proliferativa.

Il fatto che le radiazioni possano indurre tumori in quasi tutti i tessuti distingue le radiazioni stesse dalla maggior parte degli agenti chimici e virali, che invece possono indurre tumori soltanto in pochi tessuti selezionati, di solito le vie di ingresso, di metabolizzazione o di escrezione. Inoltre, come è stato già spiegato in precedenza, una dose elevata è generalmente più efficace di una bassa nell'indurre tumori e le radiazioni ad elevato LET sono generalmente più efficaci delle radiazioni a bassa densità di ionizzazione.

Dosimetria

Unità di misura dosimetriche

La possibilità di misurare l'esposizione professionale a radiazioni ionizzanti (dosimetria) è molto importante per controllare il rispetto dei limiti di esposizione di un rischio non visibile direttamente e, proprio per questo, estremamente pericoloso. La dosimetria è utile, inoltre, in campo assistenziale, cioè dell'indennizzo dell'eventuale danno da radiazioni. Non bisogna dimenticare, infatti, che l'origine radiogena di una neoplasia può essere accertata solo come nesso causale probabile e quindi come dato probabilistico e non di certezza. Nel calcolo della probabilità, chiaramente, l'entità della dose rappresenta un dato estremamente importante.

Gli effetti biologici si manifestano quando avviene cessione di energia, quindi per valutare gli effetti biologici di una radiazione è necessario conoscerne la dose emessa e quella assorbita, fattori che dipendono dal tipo di radiazione interessata e dalla risposta delle strutture biologiche, diversa da tessuto a tessuto.

L'attività di un determinato materiale radioattivo si misura in bequerel ($1 \text{ Bq} = 1$ disintegrazione al secondo). Il bequerel è però un'entità generica che non ci dà l'esatta idea del possibile danno biologico che dipende, come abbiamo visto, da altri fattori.

La **dose assorbita** (D) può essere definita come il quoziente tra l'energia assorbita da un certo volume di materia e la massa in esso contenuta e si misura in Gray (Gy). Un Gy corrisponde all'assorbimento di un joule in un kg di materia ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$).

In rapporto al tipo di radiazione varia anche la pericolosità per cui, nel calcolo dell'esposizione è da considerare il cosiddetto fattore di qualità della radiazione, Q. Il prodotto della dose assorbita (D) per il fattore di qualità (Q) viene definito **dose equivalente** (H). La somma delle dosi equivalenti dei diversi organi o tessuti irradiati corrisponde alla **dose efficace** (E) che si misura in Sievert (Sv).

Tabella 6: unità di misura dosimetriche		
Attività	Becquerel	1 dis/sec.
Dose assorbita	Gray	1 Joule/kg
Dose efficace	Sievert	1 Joule/kg
Dose efficace impegnata	---	E (t)
Dose equivalente impegnata	---	Sv

La dose ricevuta da un organo o tessuto a seguito della introduzione di uno o più radionuclidi viene definita *dose impegnata*. La **dose equivalente impegnata** (Sv) indica, rispetto al tempo, l'intensità di dose equivalente in un organo o tessuto ricevuta da un individuo a seguito della introduzione di uno o più radionuclidi. La somma delle dosi equivalenti impegnate nei vari tessuti viene definita *dose efficace impegnata* (E(t)) che è quella dose derivante dalla somma delle varie dosi equivalenti impegnate dei diversi organi e tessuti $H_T(t)$, moltiplicati per un fattore di ponderazione, W_T . Il Decreto Legislativo 230/95 indica i fattori di ponderazione per gli organi più frequentemente irradiati.

Nella tabella n. 1 sono indicate le unità di misura dosimetriche universalmente riconosciute ed attualmente inserite anche nella legislazione del nostro paese.

Dosimetri

Abbiamo visto che per una corretta valutazione epidemiologica degli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo, per una efficace opera di prevenzione, è importante conoscere la misura dell'esposizione di ciascun lavoratore, cioè la sua dosimetria personale. Questa valutazione viene effettuata mediante l'uso di dosimetri personali, apparecchiature di piccole dimensioni e di basso costo che vengono posizionate sul corpo o sugli indumenti dei lavoratori.

I metodi utilizzati per la quantificazione dell'esposizione sfruttano alcune capacità delle radiazioni ionizzanti quali la capacità di annerire una lastra fotografica, di provocare fenomeni di termoluminescenza e di ionizzare l'aria attraversata.

Nel primo caso i dosimetri sono rappresentati da normali lastre per radiografie dentarie poste in contenitori che contengono spessori decrescenti di rame in serie; questi dosimetri sono detti film-badge. La dose delle radiazioni si ricava da un'analisi fotodensitometrica automatica della pellicola.

I fenomeni di termoluminescenza si verificano in vetri trattati chimicamente se questi vengono esposti alle radiazioni ionizzanti. Questi dosimetri di solito sono utilizzati per valutare l'esposizione alle estremità (dosimetri ad anello o a bracciale).

L'altro fenomeno utilizzato per la quantificazione della dosimetria personale è la ionizzazione dell'aria provocata dal passaggio delle radiazioni; questa viene misurata mediante piccole camere di ionizzazione che analizzano la variazione della differenza di potenziale applicata. Questi dosimetri sono detti, per la loro forma, penne dosimetriche.

I film-badge e le penne dosimetriche possono essere utilizzati esclusivamente per l'irradiazione esterna, mentre i cristalli a termoluminescenza possono essere utilizzati anche per misurare la contaminazione interna se introdotti nell'organismo.

Dosimetria biologica

Qualora ci sia il sospetto di superamento della dose consentita o si sia verificata una esposizione incontrollata, senza che sia possibile ottenere dati dosimetrici certi, si può ricorrere alla dosimetria biologica ricercando i cosiddetti indicatori biologici di dose. Vengono utilizzati prevalentemente gli indicatori citologici (ricerca di linfopenia, piastrinopenia, neutropenia e anemia) e quelli citogenetici (ricerca di aberrazioni cromosomiche stabili, test dei micronuclei). Tra le aberrazioni cromosomiche quelle più rappresentative sono i dicentrici in quanto questi hanno una scarsa incidenza spontanea e le sostanze in grado di provarli non sono per niente numerose. Possiamo definire il dicentrico come l'aberrazione cromosomica elettiva per la dosimetria citogenetica delle radiazioni ionizzanti. Esso si forma dalla ricongiunzione di due cromosomi che abbiano avuto una rottura di segmenti ad opera delle radiazioni nello stadio G0 o G1.

Il limite di sensibilità della dosimetria biologica è di cinquanta mSv; al di sotto di tale dose non è possibile evidenziare formazione di dicentrici in quantità sufficiente ad ottenere una correlazione statisticamente valida.

Una metodica utilizzabile come dosimetria biologica per la valutazione delle radiolesioni cellulari è quella basata sul conteggio dei micronuclei, formazioni nucleari che hanno origine da frammenti acentrici di cromosomi o da interi cromosomi sganciatisi dal fuso mitotico. La ricerca dei micronuclei è una metodica più semplice e più sensibile della semplice ricerca dei dicentrici. Inoltre, l'utilizzo di una particolare metodica consente di

poter valutare con una certa approssimazione la radiosensibilità individuale. Considerando che esistono diverse sindromi cliniche con anomalie genetiche nel prossimo futuro sarà molto utile poter prevedere la sensibilità dei vari operatori da esporre

RADIOPROTEZIONE

Disposizioni normative e limiti di esposizione

In Italia la normativa di riferimento in materia di radioprotezione è attualmente il Decreto Legislativo 230 del 17 marzo 1995, di attuazione delle direttive CEE sull'argomento, che ha recentemente sostituito il D.P.R. 185 del 13 febbraio 1964.

La radioprotezione è divisa in sorveglianza fisica e sorveglianza medica. La prima è affidata all'Esperto Qualificato, un tecnico in possesso di conoscenze idonee ad eseguire misure e valutazioni di carattere fisico, tecnico e radiotossicologico per garantire la protezione fisica della popolazione lavorativa esposta. La sorveglianza medica è affidata al Medico Autorizzato, uno specialista in Medicina del Lavoro, o equiparato, che ha il compito di sottoporre a controllo sanitario i lavoratori esposti e di applicare le norme di prevenzione di sua competenza. L'Esperto Qualificato ed il Medico Autorizzato ottengono la rispettiva qualifica previo esame presso il Ministero del Lavoro e inserimento nei rispettivi elenchi nazionali.

I luoghi di lavoro dove operano esposti a radiazioni ionizzanti sono **zone classificate** in base alla possibilità di effettiva esposizione al rischio: per esposizioni a livelli di radiazioni compresi tra 1 e 6 mSv/anno si parla di zona **sorvegliata**; se i livelli superano i 6 mSv la zona è detta **controllata** (tabella 3).

Tabella 3: Classificazione dei luoghi di lavoro		
Zona controllata	Esposizione globale Cristallino Pelle ed estremità	>6 mSv/anno >45 mSv/anno >150 mSv/anno
Zona sorvegliata	Esposizione globale Cristallino Pelle ed estremità	>1 mSv/anno >15 mSv/anno >50 mSv/anno

Tutti i lavoratori che lavorano in zone classificate sono considerati esposti a radiazioni ionizzanti e sono classificati in base al livello di esposizione. Per esposizioni annue comprese tra 1 e 6 mSv sono considerati esposti di Categoria "B", mentre per esposizioni comprese tra 6 e 20 mSv sono definiti esposti di categoria "A" (Tabella 4)

I limiti di dose che non devono essere superati sono pari a 20 mSv annui come esposizione globale (dose efficace), 150 mSv/anno per il cristallino e 500 mSv/anno per la pelle e le estremità (dose equivalente). (Tabella 5).

Tabella 4: Classificazione dei lavoratori	
Popolazione generale	< 1 mSv/anno
Esposti Categoria "B"	1-6 mSv/anno
Esposti Categoria "A"	6-20 mSv/anno

Tabella 5: limiti di dose	
Esposizione a corpo intero	20 mSv/anno
Cristallino	150 mSv/anno
Pelle ed estremità	500 mSv/anno

Il Decreto Legislativo 230/95 introduce una tutela sanitaria anche per apprendisti e studenti di età superiore a diciotto anni che, in caso di avviamento ad attività con esposizione a radiazioni o i cui studi prevedano l'uso di sorgenti radioattive, vengono equiparati ai lavoratori dipendenti. Gli apprendisti e studenti di età inferiore a 18 anni non possono essere esposti professionalmente a radiazioni ionizzanti. I limiti di dose per gli apprendisti e studenti sono quelli indicati nella tabella 6.

Tabella 6: limiti di dose per apprendisti e studenti	
Esposizione a corpo intero	6 mSv/anno
Cristallino	50 mSv/anno
Pelle ed estremità	150 mSv/anno

Con il D.Lgs. 230 vengono introdotte, inoltre, norme di protezione per la popolazione generale. L'art. 98, infatti, vieta la produzione l'utilizzo e la detenzione di prodotti cosmetici, giocattoli, oggetti di uso domestico, derrate alimentari ed altro in cui siano aggiunte materie radioattive. Chiunque eserciti attività comportanti l'uso di sostanze radioattive ha l'obbligo di adottare tutte le misure necessarie ad evitare che persone del pubblico possano ricevere dosi superiori a quelle stabilite per legge.

La protezione dei pazienti viene migliorata e potenziata anche attraverso la qualificazione del personale addetto alla radiodiagnostica, radioterapia e medicina nucleare. Vengono stabilite le modalità di utilizzo delle radiazioni in ambito medico adottando sistemi di limitazione delle dosi. Lo specialista è obbligato a valutare preliminarmente la possibilità di utilizzare tecniche alternative con minore rischio per la persona, a scegliere tecniche con minore rischio e costo, ad osservare particolare cautela nell'uso delle radiazioni in età pediatrica o in donne in età fertile. L'uso delle radiazioni viene vietato nelle donne in gravidanza qualora comporti esposizione del feto se non per situazioni di urgenza o di effettiva necessità.

Per quanto riguarda il controllo preventivo della popolazione o accertamenti medico-legali, questi devono essere effettuati solo se giustificati al punto di vista sanitario e previo consenso della persona interessata.

Infine, viene vietato l'uso della schermografia e della radioscopia diretta senza amplificatore di brillantezza.

Il Decreto Legislativo 230/95 introduce anche sanzioni penali per tutti coloro che contravvengono agli obblighi previsti rappresentate, oltre che da sanzioni pecuniarie, anche dalla possibilità dell'arresto.

Personale sanitario esposto a rischio

Per attività collegate con le proprie mansioni il personale sanitario esposto a radiazioni ionizzanti è quello che lavora nei reparti di radiologia, radioterapia, medicina nucleare, ortopedia, emodinamica cardiovascolare, endoscopia digestiva ed urologica, chirurgia,

anestesia e laboratorio.

L'esposizione al rischio non riguarda, chiaramente, solo il personale medico, ma anche il personale tecnico (tecnici di radiologia, tecnici gessisti, tecnici di laboratorio), infermieristico (assistenza a medici e pazienti) e ausiliario (operazioni di trasporto di pazienti trattati con radioisotopi o pulizia delle stanze di degenza).

Con il perfezionamento delle tecniche di radioprotezione il rischio derivante da attività di radiodiagnostica è progressivamente diminuito ed oggi è raro il riscontro di dosi superiori a quelle del fondo naturale, mentre rimane elevata l'esposizione derivante dall'uso di radioscopia o di radioisotopi per diagnostica o radioterapia.

Oltre al divieto di eseguire esami schermografici la nuova normativa prevede anche quello di non eseguire radioscopici diretti senza amplificatore di brillantezza, ciò consentirà di ridurre l'esposizione anche per quegli operatori sanitari che devono operare una valutazione intraoperatoria in tempo reale dell'esito di interventi chirurgici (ortopedici e chirurgi) o che debbano controllare la corretta esecuzione di manovre invasive (endoscopisti ed emodinamisti). Questi ultimi, allo stato attuale, rappresentano due categorie di lavoratori realmente esposte a rischio in quanto l'intervento umano difficilmente può essere sostituito da tecniche automatiche.

La prevenzione del rischio radiologico

La protezione dal rischio da radiazioni ionizzanti deve essere considerata come un sistema integrato dove l'obbligo di non superare i limiti di esposizione non è che uno degli aspetti da prendere in considerazione. Altrettanto importante è, infatti, valutare la necessità di esecuzione di un esame, studiandone la sua giustificazione, e l'ottimizzazione delle norme di protezione applicate sia al paziente che all'operatore. Ciò al fine di limitare al massimo il "detrimento sanitario" che, secondo la definizione del D.Lgs. 241 è la valutazione del rischio di riduzione della durata e della qualità della vita che si verifica in una popolazione in seguito all'esposizione a radiazioni ionizzanti. Essa include le perdite derivanti da effetti somatici, cancro e gravi disfunzioni genetiche.

Il Sistema di Limitazione delle Dosi, di cui si è cominciato a discutere negli anni settanta, comporta l'applicazione di tre principi fondamentali: Giustificazione, Ottimizzazione, Limitazione.

Il primo principio, quello di **giustificazione**, è il procedimento mediante il quale viene avallata e legittimata una scelta riguardante l'adozione o l'impiego di una tecnica che comporta l'esposizione alle radiazioni ionizzanti. In pratica *"l'utilizzazione delle radiazioni deve essere giustificato dai vantaggi in ambito sanitario o sociale che ne possono derivare"*, sia per quanto riguarda l'utilità diagnostica che per quanto riguarda la terapia. La limitazione obbligatoria delle tecniche radiologiche derivante dalla loro giustificazione porta di per sé al concetto che l'esposizione a radiazioni, anche a piccole dosi, è in ogni caso un evento negativo. In quest'ottica il principio di giustificazione si identifica con quello che da sempre deve essere un imperativo categorico per la classe medica: **primum non nocere**.

Il secondo principio, quello di **ottimizzazione**, è un processo di bilanciamento tra la riduzione della dose e l'incremento forzato ed esponenziale dei costi per la riduzione della dose a limiti prossimi allo zero. L'ottimizzazione è in pratica un intervento tecnico affidato alle competenze dell'operatore della radioprotezione per far sì che: *"le esposizioni possano essere mantenute al livello più basso compatibilmente con le esigenze diagnostiche e terapeutiche"*. Questo principio di protezione radiologica ha la finalità di mettere in atto gli interventi sanitari che, migliorando la qualità del risultato producono il beneficio sanitario maggiore per la salute del paziente con il minimo rischio.

Il terzo principio, quello di **limitazione**, prevede il rispetto del limite di dose che viene

stabilito in relazione all'accettabilità del rischio. I limiti che vengono imposti non devono provocare la comparsa di danni deterministici e ridurre al minimo la possibilità di danno stocastico.

Si tratta, quindi, di interventi di prevenzione che derivano direttamente da normali pratiche di deontologia medica. Non viene modificata, cioè, l'impostazione di base dal punto di vista dottrinario con l'introduzione formale di nuovi principi basilari, ciò che viene modificato è l'atteggiamento preventivo del radiologo che prima era affidato solo a pratiche deontologiche mentre adesso è vincolato da precise norme di legge anche se non sanzionate (la mancata applicazione dei principi sopraindicati, infatti, non comporta alcuna sanzione per gli operatori inadempienti). La normativa cerca di creare nella categoria lo sviluppo di una coscienza volta alla prevenzione non solo del danno verso sé stessi, ma anche delle possibili conseguenze negative per gli utenti del servizio, cioè per la popolazione.

Il controllo sanitario del personale esposto

La prevenzione delle malattie professionali è legata obbligatoriamente alla valutazione dello stato di salute dei lavoratori esposti a rischio, sia prima dell'avviamento al lavoro sia durante il suo svolgimento, per evidenziare patologie preesistenti o patologie correlate con l'esposizione al rischio specifico.

Ai sensi dell'art. 83 del D.Lgs. 230/95, la tutela sanitaria dei lavoratori esposti professionalmente a radiazioni ionizzanti è affidata al Medico Autorizzato o al Medico Competente (specialista in medicina del lavoro o equiparato) a cui spettano compiti di natura preventiva, diagnostica, terapeutica e medico-legale. Al Medico Competente è affidata solo la sorveglianza medica degli esposti di categoria "B", mentre al Medico Autorizzato quella degli esposti di categoria "A" e "B". Qualora il lavoratore di categoria "B" superi il limite di esposizione di 6 mSv dovrà essere sottoposto al più presto ad un controllo sanitario da parte di un medico Autorizzato.

I compiti del medico autorizzato non sono limitati solo all'esecuzione delle visite mediche ma comprendono anche il controllo e la valutazione dell'esposizione e la valutazione di eventuali altri rischi connessi con la mansione specifica al fine di programmare un protocollo comune di intervento sanitario. Nell'attuare tali disposizioni sono previsti anche sopralluoghi degli ambienti di lavoro. Il medico autorizzato ha l'obbligo di fornire consulenza al datore di lavoro in materia di sorveglianza sanitaria sia in condizioni di lavoro normale che in condizione di emergenza.

Al medico autorizzato ed al medico competente spettano anche compiti di natura medico-legale perché in caso di riconoscimento di malattia professionale, correlata o non correlata con le radiazioni ionizzanti, vige l'obbligo della denuncia all'Ispettorato del lavoro ed all'organo di vigilanza della AUSL competente per territorio e della segnalazione alla magistratura. Se la malattia professionale è una neoplasia, ai sensi dell'art. 71 del D.Lgs. 626/94 c'è l'obbligo della segnalazione all'ISPEL con invio di copia della documentazione clinica o anatomopatologica e dell'anamnesi lavorativa.

I compiti di natura preventiva e diagnostica si esplicano attraverso l'esecuzione dei controlli sanitari preventivi e periodici a seguito dei quali viene emesso un giudizio di idoneità al lavoro che può essere condizionato a determinate prescrizioni anche determinate dalla presenza di altri rischi professionali non legati obbligatoriamente alla presenza della radiazioni, da qui l'obbligo riconosciuto con la nuova normativa che il sanitario che vuole sostenere l'esame per medico autorizzato debba essere prima specialista in medicina del lavoro.

L'art. 84, comma 3, del D.Lgs. 230/95 obbliga il medico autorizzato a valutare lo stato

generale di salute del lavoratore esposto e non più, come era consuetudine, l'eventuale presenza del danno da radiazioni. Viene quindi approfondita l'impostazione preventiva data alla tutela sanitaria del personale radioesposto non più indirizzata a evidenziare solo l'eventuale danno rischio-correlato ma anche l'eventuale predisposizione a contrarre patologie la cui patogenesi può avere un nesso causale con l'esposizione.

Per tale motivo durante la visita medica preventiva deve essere effettuata una accurata raccolta dell'anamnesi e un esame clinico approfondito corredato da un adeguato protocollo di accertamenti sanitari per ricercare eventuali patologie che possono impedire lo svolgimento dell'attività o che possono essere aggravate dall'esposizione specifica, cioè l'eventuale, se dimostrabile, maggiore radiosensibilità.

Dopo l'inserimento al lavoro il personale esposto dovrà essere sottoposto ad un controllo sanitario periodico, almeno una volta l'anno per gli esposti di categoria "B" e almeno ogni semestre per quelli di categoria "A". Il medico incaricato della sorveglianza medica della radioprotezione potrà, però, effettuare le visite con periodicità diverse, sempre nel rispetto della periodicità minima sopraindicata.

Tutte le notizie relative alle visite mediche vanno trascritte in un documento sanitario personale aggiornato e conservato a cura del Medico Autorizzato, il cui modello, indicato in precedenza dal DM 13.07.90 n.449, in atto è stabilito dal D.Lgs. 241 del 26.05.2000.

Un protocollo valido di intervento sanitario è stato messo a punto dall'AIRM, Associazione Italiana di Radioprotezione Medica, in collaborazione con l'Università di Padova e con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Esami quali visite specialistiche oculistiche e dermatologiche, importanti ormai solo sul piano storico subiscono un notevole ridimensionamento. La visita oculistica viene suggerita con periodicità triennale, mentre quella dermatologica è affidata al giudizio del medico autorizzato.

Sono state presentate numerose proposte di protocollo di intervento sanitario, ma quello che viene ritenuto forse uno dei più validi è quello proposto dall'AIRM (Associazione Italiana di Radioprotezione Medica) che viene indicato di seguito, sia per quanto riguarda la visita medica preventiva, da effettuare all'atto dell'assunzione o dell'inizio dell'esposizione, che i successivi controlli periodici. La periodicità degli accertamenti complementari può essere modificata dal Medico Autorizzato, sempre rimanendo entro i limiti della sufficienza del controllo stesso.

Protocollo sanitario preventivo

➤ Protocollo diagnostico di base:

1. Visita medica generale con anamnesi guidata
2. Profilo ematologico (es. emocromocitometrico, VES, PT, PTT)
3. Profilo ematochimico (azotemia, creatininemia, uricemia, glicemia, colesterolemia, trigliceridemia, bilirubina totale e frazionata, AST, ALT, γ GT, protidogramma, es. urine)
4. Elettrocardiogramma

➤ Prevenzione e accertamento danni radioinducibili

1. Ricerca sangue occulto nelle feci (> 40 anni)
2. Markers epatite B e C
3. Visita oculistica con riferimento al cristallino
4. Radiografia standard del torace
5. Visita dermatologica
6. Visita ecoguidata per tiroide e addome superiore
7. Indagini senologiche e ginecologiche
8. Test dei Micronuclei e indice 3AB (radiosensibilità individuale)

Protocollo sanitario periodico

1. Visita medica generale con anamnesi guidata
2. Profilo ematologico (es. emocromocitometrico, VES, PT, PTT)
3. Profilo ematochimico (azotemia, creatininemia, uricemia, glicemia, colesterolemia, trigliceridemia, bilirubina totale e frazionata, AST, ALT, γ GT, protidogramma, es. urine)
4. Ricerca sangue occulto nelle feci (> 40 anni) annuale
5. Markers epatite B e C triennale
6. Visita oculistica, con riferimento al cristallino, triennale
7. Radiografia standard del torace triennale
8. Visita dermatologica su richiesta del M.A.
9. Visita ecoguidata per tiroide e addome superiore annuale >40
10. Indagini senologiche e ginecologiche secondo le raccomandazioni dell'America Cancer Society

In esito alla visita medica dovrà essere emesso il relativo giudizio di idoneità al lavoro che secondo quanto previsto dalla normativa può essere di idoneità piena, di idoneità condizionata o di non idoneità.

I criteri di non idoneità sono rappresentati dalla preesistenza di condizioni cliniche suscettibili di essere confuse o attribuibili alle radiazioni ionizzanti (anemie di tipo ipoplasico o aplasico, leucosi o leucopenie), il riscontro di patologie che possono favorire l'assorbimento e la permanenza nell'organismo di sostanze radioattive (dermatiti, bronchiti croniche), condizioni cliniche passibili di attivazione o aggravamento da parte delle radiazioni ionizzanti (sindromi mielodisplasiche primitive o secondarie, sindromi da instabilità cromosomica, adenoma tiroideo), accertata maggiore radiosensibilità individuale

L'esposizione professionale in ospedale

Le attività a rischio di esposizione a radiazioni ionizzanti del personale ospedaliero mentre sono ormai ridotte per il personale medico di radiologia, rappresentano un aspetto da valutare con attenzione per determinate categorie di medici quali ortopedici, emodinamisti ed endoscopisti e per il personale paramedico in genere. Le operazioni di assistenza ai pazienti, durante l'esecuzione di accertamenti radiodiagnostici, durante l'esecuzione di radiografie intraoperatorie o in caso di assistenza a pazienti sottoposti ad accertamenti radioisotopici o a radioterapia, rappresentano, infatti, ormai, una delle più frequenti fonti di esposizione.

Spesso succede che l'infermiere o l'ausiliario socio-sanitario sia costretto ad assistere pazienti incapaci di mantenere una posizione corretta durante l'esecuzione di radiografie, perché in stato di agitazione o in condizioni di incoscienza. In tal caso l'interessato potrebbe venirsi a trovare nelle immediate vicinanze del paziente e, alcune volte, oltre ad essere esposto alle radiazioni secondarie diffuse dal paziente, può essere investito direttamente dal fascio di radiazioni.

L'esposizione a radiazioni ionizzanti in caso di assistenza a pazienti sottoposti ad accertamenti radioisotopici non comporta una esposizione rilevante in quanto i radionuclidi utilizzati non hanno un'attività elevata ed hanno un'emivita molto breve. In ogni caso l'esposizione al rischio è possibile durante la raccolta di materiale biologico (feci ed urine) o in occasione di prelievi di sangue.

I pazienti sottoposti a radioterapia sono da considerare fonti di esposizione a radiazioni ionizzanti in caso di brachiterapia o somministrazione orale di radioisotopi. Il rischio è diverso in base ai diversi sistemi di terapia utilizzati. Se il radioisotopo è somministrato per via orale in sorgenti non sigillate (ad esempio I^{131} per la terapia dei tumori della tiroide) il paziente oltre ad emettere radiazioni direttamente, può eliminare il radioisotopo con sudore, feci e urine. L'esposizione a rischio avviene durante la preparazione e la somministrazione della terapia da parte dell'operatore oltre che durante l'assistenza al paziente per le sue necessità.

Durante l'esecuzione di radiografie intraoperatorie, sanitari e parasanitari corrono i maggiori rischi di esposizione a radiazioni in quanto esistono maggiori problemi di sicurezza non potendo dotare la sala operatoria delle opportune protezioni e di schermi protettivi fissi. In questo caso, però, la possibilità di dover sostenere o trattenere il paziente è estremamente ridotta in quanto questo si trova sotto anestesia ed è sufficiente allontanarsi per evitare l'esposizione.

Norme per la limitazione del rischio

Il lavoro svolto in zona controllata è, per definizione, causa di esposizione a radiazione ionizzanti per cui, qualora non sia possibile allontanarsi da tale zona, la limitazione del rischio radiologico, si ottiene adottando alcune misure di tutela generale quale la riduzione del tempo di esposizione, l'aumento della distanza dalla possibile sorgente e l'utilizzo di schermi mobili o di indumenti protettivi quali grembiuli o guanti piombati.

Nel caso di assistenza durante l'esecuzione di esami radiodiagnostici devono essere indossati indumenti protettivi piombati (grembiule o guanti) o ci si deve collocare dietro uno schermo protettivo; qualora ciò non sia possibile bisogna mantenersi il più lontano possibile dal paziente.

In caso di assistenza a pazienti che hanno assunto radioisotopi per scopi diagnostici o terapeutici bisogna ridurre al minimo i tempi di contatto e utilizzare indumenti protettivi durante la manipolazione di liquidi biologici o della biancheria. Utile può risultare la delimitazione di un'area di rispetto attorno al letto del paziente e la identificazione, mediante contrassegno, delle padelle o altri materiali utilizzati al fine di evitare scambi o contaminazioni accidentali.

Se il paziente è stato sottoposto a radioterapia con isotopi γ -emittenti l'assistenza comporta un certo grado di rischio in quanto gli indumenti protettivi potrebbero non offrire un'adeguata protezione, specie se vengono utilizzati radioisotopi ad alta energia, quali il radio, in quanto la quantità di piombo in essi contenuti è forzosamente limitata. In questi casi la protezione si attua attraverso la limitazione del tempo di intervento e la distanza dal paziente. L'accesso alle sale di degenza dovrà essere regolamentato e consentito solo al personale appositamente autorizzato.

Quando si effettua il trasporto in barella di un paziente sottoposto a radioterapia bisogna che il trasporto avvenga rapidamente e l'operatore si deve porre il più lontano possibile dalla sorgente di radiazioni.

Qualora durante la somministrazione di liquidi radioattivi si verifica una contaminazione dell'ambiente bisogna adottare immediatamente le procedure di decontaminazione e avvisare gli esperti.

Tutto il personale esposto a radiazioni ionizzanti per motivi professionali deve essere informato sui rischi e sulle misure di prevenzione.

Va tenuto presente, infine, che la riduzione del tempo di esposizione e il rispetto di una distanza di sicurezza non devono in ogni caso pregiudicare l'efficienza e la qualità del servizio.

Obblighi del datore di lavoro e dei lavoratori

Come per ogni altra attività lavorativa che esponga a rischio lavoratori dipendenti o equiparati, il datore di lavoro, in quanto titolare dell'attività dell'impresa, è il responsabile oggettivo delle condizioni di sicurezza (o di insicurezza!) dell'ambiente di lavoro. Per tale motivo in ogni normativa relativa alla tutela dei lavoratori sono inseriti obblighi ben precisi a loro carico. Il D.Lgs. 230/95 non fa eccezione alla regola ed all'art. 61 vengono elencati gli obblighi di legge per i datori di lavoro, i dirigenti ed i preposti.

In base a tale articolo di legge datori di lavoro ed i dirigenti che rispettivamente esercitano e dirigono, ed i preposti che sovrintendono ad attività dove è possibile l'esposizione professionale a radiazioni ionizzanti devono, nell'ambito delle rispettive attribuzioni e competenze, attuare le cautele di protezione e di sicurezza.

I datori di lavoro, prima dell'inizio delle attività devono acquisire da un esperto qualificato una relazione scritta contenente le valutazioni e le indicazioni di radioprotezione inerenti alle attività stesse. In base alle indicazioni fornite dalla suddetta relazione i datori di lavoro, i dirigenti e i preposti devono provvedere alla individuazione, alla classificazione ed alla limitazione di accesso degli ambienti di lavoro in cui sussista un rischio da radiazioni; devono provvedere, inoltre, alla classificazione dei lavoratori dichiarati esposti. Vanno predisposte norme interne di protezione e sicurezza adeguate al rischio di radiazioni facendo in modo che copia di dette norme sia consultabile nei luoghi frequentati dai lavoratori, ed in particolare nelle zone controllate. Ai lavoratori devono essere forniti gli adatti dispositivi di protezione individuale oltre alla sorveglianza dosimetrica.

I lavoratori devono essere sottoposti ad un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione, in relazione alle mansioni cui essi sono addetti, dei rischi specifici cui sono esposti, delle norme di protezione sanitaria, delle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche, delle modalità di esecuzione del lavoro e delle norme interne di comportamento. Il datore di lavoro deve provvedere, personalmente o attraverso suoi delegati, a controllare che i lavoratori osservino le norme interne di radioprotezione e provvedere a contrassegnare con appositi contrassegni, le sorgenti di radiazioni ionizzanti.

Il datore di lavoro nomina, infine, l'esperto qualificato, per la prevenzione tecnica delle attrezzature e dell'ambiente di lavoro, ed il medico autorizzato (od il medico competente) per il controllo sanitario dei lavoratori classificati esposti a radiazioni ionizzanti. Tutti gli oneri economici relativi alla sorveglianza fisica e medica della radioprotezione sono a carico del datore di lavoro.

Non va dimenticato, però, che se il datore di lavoro ha l'obbligo di adeguarsi alla normativa applicando le norme di sicurezza, in quanto responsabile oggettivo dell'azienda, anche i

lavoratori hanno degli obblighi ben precisi nel rispettare le norme di sicurezza predisposte.

In particolare, come previsto dall'art. 68 della normativa, i lavoratori dipendenti devono:

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

L'inosservanza delle norme di sicurezza previste dal D.Lgs. 230/95 comporta sanzioni penali sia per i datori di lavoro che per i lavoratori, chiaramente in rapporto ai rispettivi ruoli.

In particolare per quanto riguarda la protezione sanitaria le sanzioni per i datori di lavoro, dirigenti e preposti prevedono la possibilità di arresto e ammenda di entità variabile per le diverse figure previste. La possibilità di arresto va da un mese a sei mesi e le sanzioni pecuniarie variano da duecentomila lire a otto milioni di lire.

Per quanto riguarda i lavoratori è previsto l'arresto fino a 15 giorni e un'ammenda variabile da duecentomila a ottocentomila lire.