Le radiazioni ionizzanti

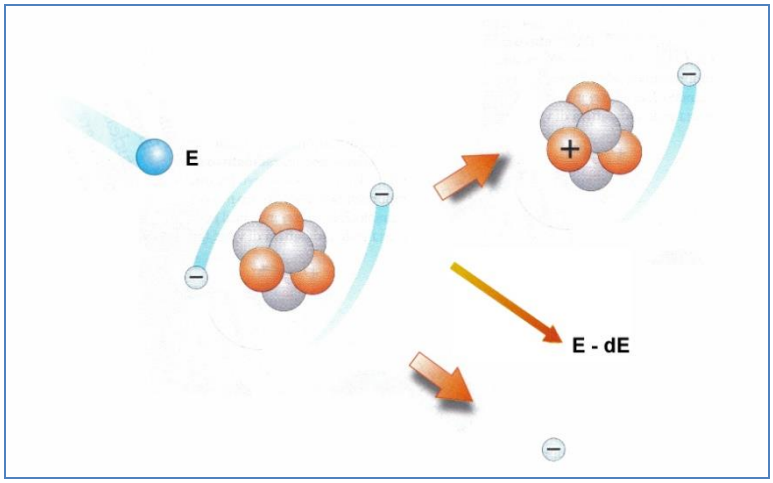
1. Generalità

Le radiazioni ionizzanti sono, per definizione, onde elettromagnetiche e particelle capaci di causare, direttamente o indirettamente, la ionizzazione degli atomi e delle molecole dei materiali che attraversano. In pratica, nell'attraversare la materia, queste radiazioni riescono a sottrarre, in virtù della loro energia, elettroni dagli atomi (o molecole) creando così una coppia di particelle cariche (nella figura 1 si è riportato uno schema esemplificativo del processo di ionizzazione da radiazione).

Le radiazioni ionizzanti possono essere di due tipi:

- *radiazioni di natura corpuscolare*, fondamentalmente particelle subatomiche o nucleari dotate di una certa massa e, spesso, di carica elettrica; secondo le leggi della fisica quantistica tali particelle, sebbene siano corpi dotati di massa e quindi di un certo "peso", possono comportarsi come onde (dando luogo a fenomeni di diffrazione e interferenza) e durante i processi di interazione con la materia possono cedere energia al mezzo attraversato;
- *radiazioni di natura ondulatoria*, chiamate "fotoni", costituite da particelle di massa nulla e sprovviste di carica elettrica.

Figura n. 1	Processo di ionizzazione da radiazione



Si usa distinguere tra "radiazioni direttamente ionizzanti" e "radiazioni indirettamente ionizzanti". Sono direttamente ionizzanti le particelle cariche (elettroni, particelle β, particelle α, ecc.); sono invece indirettamente ionizzanti i fotoni (raggi X e raggi γ), e le particelle neutre (neutroni).

Le particelle α e le particelle β sono emesse nei decadimenti radioattivi. Le prime si compongono di due neutroni e due protoni. Le seconde sono del tutto simili agli elettroni, ma contrariamente a questi possono avere carica sia negativa che positiva. I neutroni sono emessi nella disintegrazione spontanea di elementi pesanti prodotti artificialmente e nelle reazioni nucleari.

Convenzionalmente si definiscono raggi X tutte le radiazioni elettromagnetiche prodotte per frenamento (*bremsstrahlung*) di particelle cariche e le radiazioni emesse dagli elettroni orbitali di un atomo durante un processo di "riassestamento". Sebbene della stessa natura, si definiscono raggi γ tutte le radiazioni derivanti da transizioni nucleari (ad esempio le radiazioni elettromagnetiche emesse dai radioisotopi).

Una caratteristica molto importante delle radiazioni è la loro energia, che si misura in joule [J], o, più diffusamente in fisica delle radiazioni, in elettronvolt [eV]. Per definizione un elettronvolt è l'energia che una carica elementare (quella di un elettrone o di un protone) acquista attraversando una differenza di potenziale di 1 Volt ($1\ eV = 1{,}6 \times 10^{-19}\ J$). Multipli sono il keV (10^3 eV), il MeV (10^6 eV), il GeV (10^9 eV). Ad esempio, in un tubo a raggi X un elettrone, attraversando la differenza di potenziale di 100.000 Volt, acquista un'energia di 100.000 eV (100 keV). Una particella α avendo carica doppia, attraversando la stessa differenza di potenziale, acquista un'energia doppia, pari a 200 keV.

2. L'interazione con la materia

Le radiazioni ionizzanti, propagandosi nello spazio, possono incontrare materia vivente e non, con la quale possono interagire. I meccanismi di interazione sono diversi e dipendono dal tipo di radiazione, dall'energia e dalle caratteristiche del materiale attraversato. Ne segue una diversa capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazioni nei vari materiali.

2.1 Radiazioni direttamente ionizzanti

Le particelle cariche pesanti (protoni, particelle α, deutoni, ecc.) nell'attraversare la materia cedono la loro energia per lo più mediante urti elastici con gli elettroni atomici; la perdita di energia è caratterizzata da una innumerevole quantità di urti, ciascuno dei quali coinvolge tipicamente una frazione molto piccola dell'energia della particella incidente.

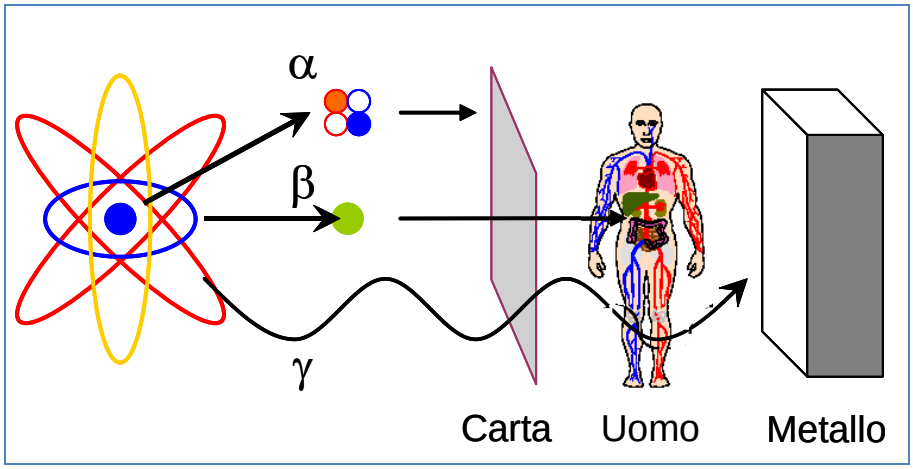
A loro volta, gli elettroni liberati dall'urto (detti anche raggi δ) acquistano energia che perdono successivamente urtando altri elettroni atomici. Questo meccanismo produce una ionizzazione a distanza dal fascio primario; in altre parole, i raggi δ possono formare gruppi di ioni in prossimità della traccia primaria stessa in funzione della loro energia.

Occasionalmente, con probabilità molto minore, la particella può urtare il nucleo di un atomo (collisione nucleare), provocandone la rottura e perdendo una frazione

consistente di energia. A titolo di esempio, particelle pesanti molto energetiche perdono mediamente 2 MeV per ogni centimetro percorso in acqua.

La perdita di energia delle particelle cariche pesanti è linearmente proporzionale alla densità della materia attraversata e il meccanismo stesso con cui avviene, caratterizzato da numerosissimi urti di cui ciascuno porta via una parte molto piccola della energia a disposizione, fa sì che la lunghezza del percorso nella materia sia quasi la stessa per ogni particella di data energia.

Figura n. 2	Schema semplificato del potere di penetrazione delle radiazioni ionizzanti nei materiali



Le particelle cariche leggere, quali gli elettroni ed i positroni (massa di quiete pari a circa 1/1836 della massa dell'atomo di idrogeno; carica elettrica positiva o negativa pari alla carica elettrica elementare, ovvero $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb), nell'attraversare la materia cedono la loro energia mediante urti con gli elettroni atomici, in modo del tutto analogo alle particelle pesanti. Tuttavia, in questo caso il percorso è meno prevedibile, in quanto per ogni urto l'energia ceduta all'elettrone atomico può arrivare fino al 50% dell'energia della particella incidente. Un secondo importante meccanismo di perdita di energia di elettroni e positroni è dovuto all'interazione con il campo elettrico nucleare, per il quale elettroni e positroni possono perdere energia anche perché frenati dall'effetto del campo elettrico dovuto al nucleo. Questo meccanismo è detto di frenamento (*bremsstrahlung*).

2.2 Radiazioni indirettamente ionizzanti

I fotoni di energia compresa tra 10 keV e 10 MeV (raggi X e raggi γ) subiscono tre tipi principali di interazione con la materia: effetto fotoelettrico, effetto Compton, produzione di coppie.

- *Effetto fotoelettrico*: il fotone viene completamente assorbito da un elettrone atomico, il quale acquista energia sufficiente per sfuggire al legame atomico.
- *Effetto Compton*: il fotone urta un elettrone delle orbite esterne dell'atomo. Ne

consegue una diffusione del fotone incidente (ad energia minore di quella originaria) e l'espulsione dell'elettrone colpito.

- *Creazione di coppie*: mentre i due precedenti processi possono essere compresi in termini quasi balistici, quest'ultimo tipo di fenomeno è complesso poiché implica la trasformazione del fotone in una coppia elettrone-positrone. La creazione della coppia da parte del fotone avviene in presenza del campo elettrico del nucleo.

In tutti e tre i casi, come risultato del processo di interazione si ha almeno una particella carica. Si può quindi intuire che man mano che si penetra nel materiale la perdita di energia dovuta ai fotoni assomiglia sempre più a quella degli elettroni.

La penetrazione delle radiazioni indirettamente ionizzanti nella materia è assai maggiore di quella delle particelle cariche. In considerazione della tipologia delle loro interazioni non ha senso parlare di percorso nella materia; con i raggi X e γ si suole piuttosto far riferimento agli spessori emivalenti (SEV), attraversando i quali si dimezza l'intensità primaria della radiazione incidente. Detti spessori hanno le dimensioni di [g/cm^2], perché sono espressi come prodotto dello spessore Δx [cm] per la densità del mezzo ρ [g/cm^3], e questo rapporto risulta grosso modo indipendente dal tipo di materiale preso in considerazione, almeno per energie dei fotoni non troppo modeste. Ad esempio, per radiazioni di energia di 1 MeV, gli spessori di dimezzamento in acqua, calcestruzzo e piombo sono, espressi in cm, rispettivamente di 10 cm, 4,5 cm e 0,9 cm, mentre, espressi in g/cm^2, risultano tra loro confrontabili (circa 10 g/cm^2).

In ragione del loro elevato potere di penetrazione, per attenuare efficacemente le radiazioni X e γ si devono usare materiali pesanti con elevato numero atomico Z, cioè ad alta densità elettronica, quali: piombo, tungsteno, calcestruzzo baritico ecc.

Le particelle neutre (neutroni) perdono la loro energia mediante collisioni con i nuclei atomici. I nuclei possono essere debolmente accelerati oppure frantumati. I frammenti (essendo costituiti da protoni e neutroni) perdono energia in modo analogo alle particelle descritte precedentemente. Trattandosi di radiazioni indirettamente ionizzanti, anche per i neutroni si può tentare di introdurre in linea di principio lo spessore di dimezzamento, sebbene molto meno significativo che nel caso dei fotoni. A titolo esemplificativo, in acqua, a neutroni di energia di 3 MeV e 10 MeV, corrispondono a SEV dell'ordine di 3 cm e 14 cm rispettivamente.

Per attenuare i fasci di neutroni i migliori materiali sono quelli con elevato contenuto di protoni e nuclei leggeri, quali: acqua, paraffina, calcestruzzo, ecc.

Bibliografia

- CONIGLIO A., D'ARIENZO M., SANDRI S., 2005. "*Classificazione delle radiazioni ionizzanti grandezze ed unità di misura*", ACTA I° corso "*Aggiornamenti su radiazioni ionizzanti e tutela sanitaria*" edito da I.S.R.A.;

- MANCINI E. (a cura di), 2002. Appunti di Radioprotezione delle lezioni del Prof. Carlo Mancini, ed. Università di Roma "La Sapienza".

Data di chiusura del documento

Febbraio 2022

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it

Le grandezze dosimetriche

1. Introduzione

Per la valutazione dell'esposizione a radiazioni ionizzanti sono state sviluppate delle grandezze speciali, dette *grandezze dosimetriche*: queste si possono schematicamente suddividere in *grandezze di dose* e *grandezze radioprotezionistiche*. Le prime sono basate sulla misura dell'energia depositata dalle radiazioni nel materiale che attraversano, mentre quelle radioprotezionistiche correlano la dose di radiazione all'effettivo rischio sanitario. Infatti, il detrimento sanitario è funzione, oltre che della dose, anche dell'effetto biologico di radiazioni di diversa qualità e della diversa sensibilità degli organi e dei tessuti alla radiazione ionizzante.

Le *grandezze di dose* sono state introdotte a partire dal 1928 dall'allora Comitato Internazionale per le grandezze sui Raggi X (IXRUC poi diventato ICRU - Commissione internazionale sulle unità e sulle misure della radiazione): quella ad oggi più utilizzata è la "dose assorbita".

Le attuali *grandezze radioprotezionistiche* sono state introdotte dall'ICRP (International commission on radiological protection) nel 1977 (Pubblicazione nr. 26) e successivamente riviste, rinominate e meglio specificate sempre dall'ICRP nel 1991 (Pubblicazione nr. 60). In particolare, l'introduzione delle grandezze radioprotezionistiche "dose equivalente" e "dose efficace" ha apportato un contributo significativo alla protezione radiologica poiché ha permesso di sommare le dosi da esposizione totale e parziale del corpo dovute a diversi generi di irradiazione esterna e interna da introduzione nel corpo di radionuclidi per ingestione o inalazione (Es. radon).

La "dose equivalente" e la "dose efficace" non possono essere misurate direttamente nei tessuti del corpo; il sistema di protezione comprende perciò anche delle *grandezze operative*, che possono essere misurate e dalle quali possono essere ricavate le grandezze radioprotezionistiche.

Nelle ultime Pubblicazioni (nr. 103 del 2007 e nr. 119 del 2012) l'ICRP ha riesaminato e chiarito alcuni aspetti del sistema di dosimetria illustrato nella Pubblicazione nr. 60.

Autore: Alessandro Rossi

Contarp

2. Grandezze usate in radioprotezione[1]

La radioprotezione si occupa del controllo delle esposizioni a radiazioni ionizzanti al fine di prevenire le reazioni tissutali e limitare il rischio di effetti stocastici a livelli accettabili[2]. Per valutare le dosi da esposizioni a radiazione sono state sviluppate speciali *grandezze dosimetriche* dall'ICRP e dall' ICRU.

Le *grandezze radioprotezionistiche* fondamentali adottate dall'ICRP sono basate sulle misure dell'energia ceduta dalla radiazione agli organi ed ai tessuti del corpo umano. Queste grandezze permettono la quantificazione dell'entità dell'esposizione alla radiazione ionizzante a seguito di irradiazione sia parziale che totale del corpo per sorgenti di radiazione esterne e da incorporazione di radionuclidi all'interno del corpo. Le dosi stimate possono poi essere paragonate con i limiti di dose raccomandati per le persone esposte per ragioni lavorative e per i membri della popolazione.

2.1 Esposizione a radiazioni ionizzanti

L'esposizione di un organismo vivente alle radiazioni ionizzanti può essere:

- **acuta**, se è prodotta in un brevissimo lasso di tempo, in altre parole con elevata intensità o rateo di dose (analogamente a quanto avviene in un infortunio);
- **cronica**, se avviene in un tempo prolungato, con bassa intensità o rateo di dose. A parità di dose, l'entità dei danni può essere differente da quella dovuta all'esposizione acuta: di questo si cerca di tener conto tramite il "fattore di efficacia di dose e di rateo di dose" (DDREF);
- **esterna**, se è prodotta da sorgenti situate all'esterno dell'organismo;
- **interna**, se è prodotta da sorgenti introdotte nell'organismo, ad esempio in seguito ad ingestione o inalazione di radionuclidi;
- **globale**, se l'esposizione, considerata omogenea, si riferisce al corpo intero;
- **parziale**, se la radiazione colpisce soprattutto una parte dell'organismo o uno o più organi o tessuti, oppure se l'esposizione del corpo intero viene considerata non omogenea.

2.2 Dose assorbita

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorché si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare, il danno subito dai tessuti biologici è in diretta relazione con l'energia assorbita per unità di massa. Di questa circostanza si tiene conto per mezzo della grandezza "dose assorbita", D, definita come il rapporto tra l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un certo elemento di volume e la massa di materia contenuta in tale elemento di volume.

[1] Verranno citate solo le grandezze maggiormente utilizzate.

[2] Per la definizione e la descrizione degli effetti sulla salute, vedere l'approfondimento sui danni da radiazioni ionizzanti.

Nelle applicazioni pratiche, le dosi assorbite sono spesso mediate su volumi maggiori di tessuto (T); si suppone così che, per basse dosi, il valore medio di dose assorbita in uno specifico organo o tessuto possa essere correlato, con la precisione sufficiente a scopi radioprotezionistici, al detrimento dovuto agli effetti stocastici in tutte le parti di quell'organo o di quel tessuto.

L'unità di misura internazionale della dose assorbita è il Gray (Gy). Un Gray corrisponde all'assorbimento di 1 joule in 1 kg di materia (1 Gy = 1 J kg^{-1}); è possibile trovare la dose assorbita espressa in rad, unità di misura usata in precedenza (1 Gy = 100 rad).

2.3 Dose equivalente

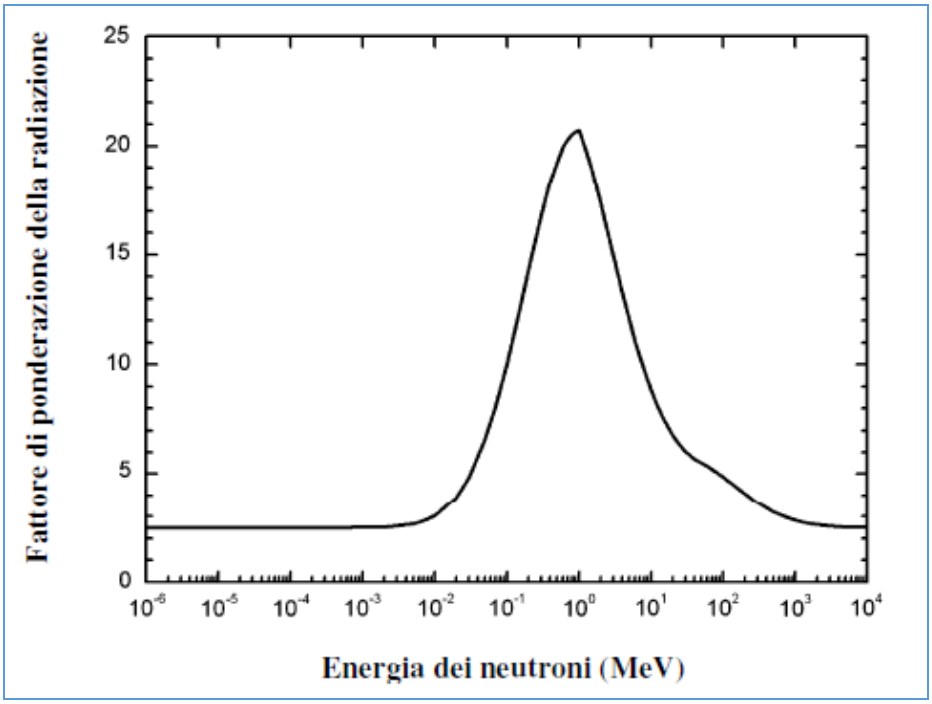
Non è sufficiente utilizzare la dose assorbita come unico termine per misurare l'esposizione in radioprotezione e per stimare il rischio associato perché gli effetti della radiazione dipendono non solo dalla dose assorbita ma anche dal tipo di radiazione, dalla distribuzione spaziale e temporale dell'energia assorbita all'interno del corpo umano e dalla radiosensibilità dei tessuti o degli organi esposti; dosi eguali impartite da tipi differenti di radiazioni producono danni biologici differenti.

Per tener conto della diversa pericolosità delle radiazioni incidenti, nel 1991 sono stati introdotti i cosiddetti fattori di ponderazione delle radiazioni, w_R. Tali valori sono stati rivisti nelle ultime pubblicazioni dell'ICRP: la nr. 103 del 2007 e la nr. 119 del 2012. Si tratta di un parametro che tiene conto della pericolosità delle varie radiazioni rispetto alla radiazione di riferimento (fotoni), cui viene assegnato per definizione un w_R uguale a 1. Il prodotto della dose assorbita media in un organo o tessuto, D_T, per il fattore w_R, prende il nome di "dose equivalente" nel tessuto o organo T, H_T ($H_T = w_R * D_T$). L'unità di misura della dose equivalente prende il nome di Sievert (Sv); la vecchia unità era il rem (1 Sv=100 rem).

Tabella n. 1	Fattori di ponderazione delle radiazioni		
Radiazione	**Energia**	**w_R**	
		d.lgs. 101/2020	**ICRP 103:2007, 119:2012**
Fotoni	tutte le energie	1	1
Elettroni e muoni	tutte le energie	1	1
Protoni (escluso rinculo)	>2 MeV	5	2
Alfa Frammenti di fissione Nuclei pesanti	tutte le energie	20	20
Neutroni	< 1MeV	$2.5+18.2\ e^{-[\ln(En)]2/6}$	Stesse formule Curva continua in funzione dell'energia dei neutroni illustrata in figura 1
	1 – 50 MeV	$5{,}0+17{,}0\ e^{-[\ln(2En)]2/6}$	
	> 50 MeV	$2.5+3.25\ e^{-[\ln(0.04En)]2/6}$	

Come si può osservare dalla precedente tabella 1 e dal grafico che segue, alla dose assorbita di 1 Gy può corrispondere una dose equivalente da 1 a 20 Sv, in funzione della pericolosità del tipo di radiazione incidente.

Figura n. 1	Fattore di ponderazione della radiazione, w_R, per i neutroni in funzione della loro energia



2.4 Dose efficace

Per tener conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano per gli effetti stocastici, è stata introdotta la grandezza "dose efficace", E; questa è definita come la somma delle dosi equivalenti medie nei diversi organi e tessuti, H_T, ciascuna moltiplicata per un fattore di ponderazione, w_T, che tiene appunto conto della diversa radiosensibilità degli organi e tessuti irraggiati.

Nella tabella 2 sono elencati i valori dei fattori di ponderazione per la radiosensibilità dei vari organi assunti nel d.lgs. 101/2020 per i w_T suggeriti dall'ICRP nella pubblicazione nr. 103 del 2007.

Tabella n. 2	Fattore di ponderazione per la radiosensibilità dei vari organi
ORGANO	**w_T** **d.lgs. 101/2020** **ICRP 103:2007**
Gonadi	0,08
Midollo osseo rosso Colon Polmone Stomaco Seno Rimanenti tessuti (ghiandole surrenali, regione extratoracica, cistifellea, cuore, reni, linfonodi, muscolo, mucosa orale, pancreas, prostata, intestino tenue, milza, timo, utero)	0,12
Vescica Fegato Esofago Tiroide	0,04
Superficie dell'osso Cervello Ghiandole salivari Pelle	0,01

La dose efficace, come la dose equivalente, si esprime in Sievert; anche in questo caso, a parità di dose equivalente, può assumere valori sensibilmente differenti; per esempio confrontando l'irradiazione delle gonadi con quella della mammella, la dose efficace sarà nella prima situazione 4 volte più elevata che nella seconda.

Quando si verifica un'introduzione di radionuclidi nel corpo umano (contaminazione interna), si deve tener conto che l'irraggiamento si protrarrà fin quando il radionuclide introdotto è presente nel corpo. La dose equivalente ricevuta da un certo organo o tessuto in tale periodo prende il nome di "dose equivalente impegnata". Allo stesso modo, la dose efficace ricevuta in quel periodo prende il nome di "dose efficace impegnata". Nel caso dei lavoratori il calcolo delle dosi impegnate viene effettuato cautelativamente su un periodo di 50 anni a partire dall'introduzione.

3. Le grandezze operative

Le grandezze operative sono volte a fornire una stima o un limite superiore per il valore delle grandezze radioprotezionistiche relative ad una esposizione, o ad una esposizione potenziale, delle persone nella maggior parte delle condizioni d'irradiazione; in altre parole, la relazione tra le grandezze operative e le grandezze di protezione deve essere ragionevolmente conservativa ($H_{prot}/H_{op} \leq 1$).

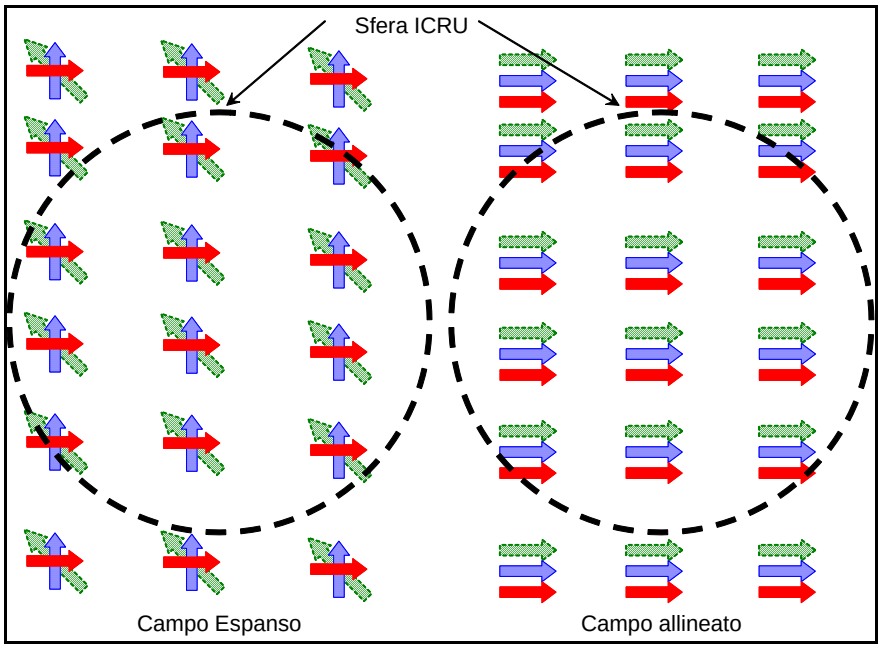
Come mostrato nello schema che segue, per il sistema di protezione radiologica per le esposizioni interne ed esterne sono utilizzati diversi tipi di grandezze operative. Nello specifico, per il monitoraggio delle esposizioni esterne, le grandezze dosimetriche operative sono state definite da ICRU (ICRU, 1985; ICRU 1988), mentre per la dosimetria interna non sono state definite grandezze dosimetriche operative che determinino direttamente una valutazione della dose equivalente o efficace. Per la valutazione della dose equivalente o efficace prodotte dai radionuclidi presenti nel corpo umano, si utilizzano diversi metodi che sono essenzialmente basati su una serie di misure di attività e sull'impiego di modelli biocinetici.

Per tutti i tipi di irradiazione esterna, le grandezze operative per il monitoraggio ambientale sono definite sulla base di un valore di equivalente di dose in un punto di un "fantoccio semplice" (cioè la "sfera ICRU", sfera del diametro 30 centimetri costituita da materiale equivalente al tessuto umano). Tali grandezze dovrebbero conservare il loro carattere di quantità puntuali e la proprietà di additività; a tale fine per l'irradiazione è stato stabilito di considerare sempre un campo di riferimento *espanso* e *allineato*.

Un campo di radiazioni espanso è un ipotetico campo di radiazioni nel quale la fluenza spettrale e angolare ha lo stesso valore in tutti i punti di un volume sufficientemente grande, uguale al valore nel campo reale nel punto d'interesse; in questa situazione l'intera sfera ICRU si può pensare come esposta ad un campo di radiazioni omogeneo, con la stessa fluenza, distribuzione energetica e direzionale che si ha nel punto d'interesse nel campo di radiazioni reale.

Se tutte le radiazioni sono allineate nel campo di radiazioni espanso, in modo da essere opposte ad un vettore radiale Ω, definito nella sfera ICRU, si ottiene il campo di radiazioni *allineato ed espanso*. In questo campo ipotetico di radiazioni, la sfera ICRU è irradiata in modo omogeneo da una direzione. Si dimostra che nel campo di radiazioni espanso ed unidirezionale, il valore di equivalente di dose in un punto qualunque nella sfera ICRU è indipendente dalla distribuzione di direzione delle radiazioni nel campo di radiazioni reale.

Figura n. 2	Schema esempio di Campo allineato ed espanso



Le grandezze operative introdotte dall'ICRU e recepite nella normativa nazionale (d.lgs. 101/2020) sono riportate di seguito[3].

Equivalente di dose ambientale H(d)*

Per il monitoraggio ambientale, la grandezza operativa per la valutazione della dose efficace è l'"equivalente di dose ambientale", H*(d); tale grandezza viene così definita:

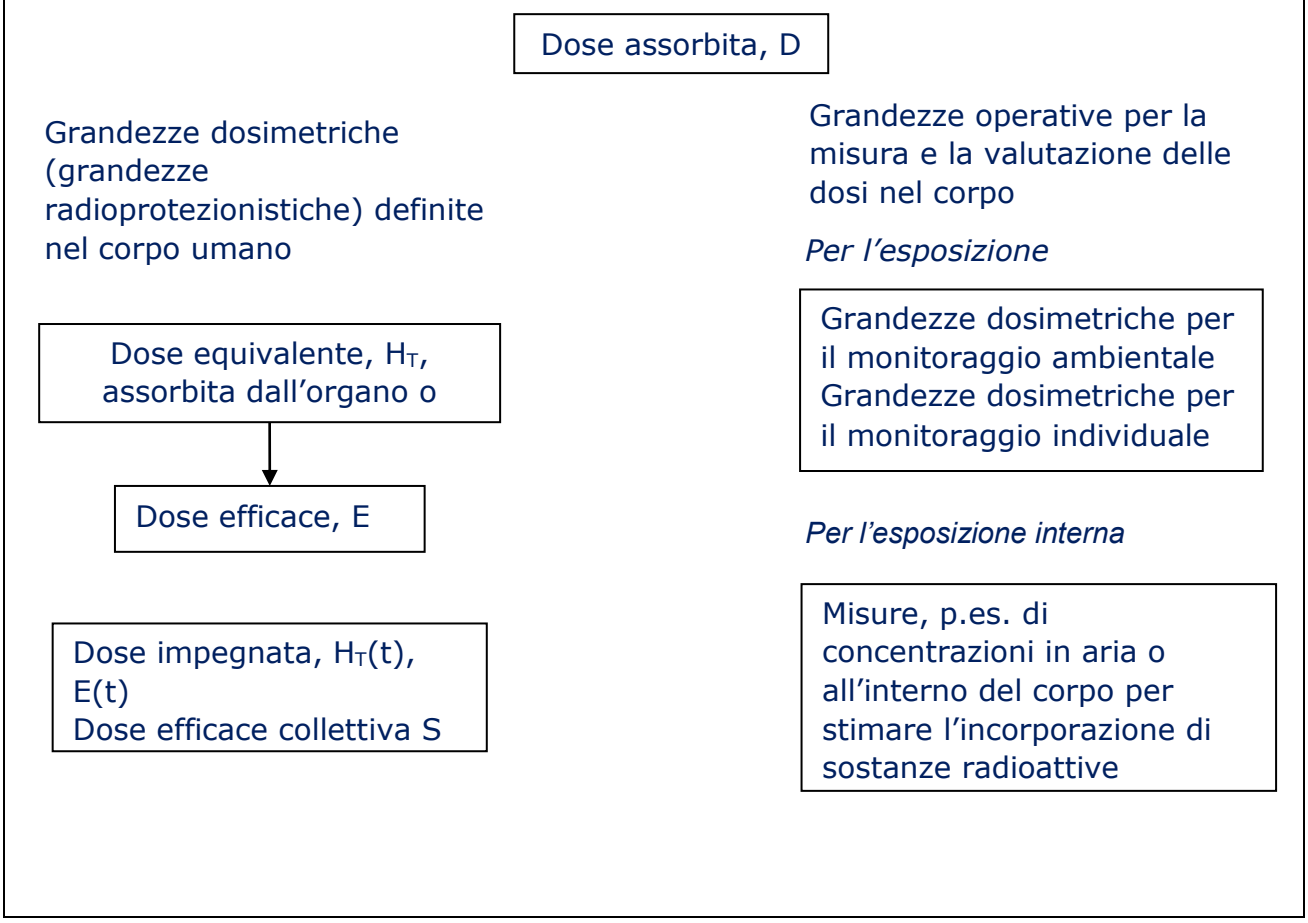
"*in un punto di un campo di radiazioni che sarebbe prodotto dal corrispondente campo espanso e unidirezionale nella sfera ICRU a una profondità d, sul raggio opposto alla direzione del campo unidirezionale; l'unità di misura dell'equivalente di dose ambientale è il sievert* ".

L'ICRP raccomanda due valori per d:

- per radiazione penetrante d=10 mm e quindi H*(10);
- per radiazione debolmente penetrante d=0.07 mm e quindi H*(0.07).

[3] Le definizioni delle grandezze operative risultano assai singolari, ma bisogna sempre tenere a mente che, da un punto di vista pratico, queste altro non sono che procedure di taratura della strumentazione che verrà poi effettivamente utilizzata per la misura delle grandezze radioprotezionistiche.

Figura n. 3	Il sistema di protezione radiologica e le grandezze operative in radioprotezione



Equivalente di dose direzionale H'(d,Ω)

La grandezza operativa per il monitoraggio ambientale di radiazioni poco penetranti è l'"equivalente di dose direzionale", H'(d, **Ω**) secondo la seguente definizione:

"*equivalente di dose in un punto di un campo di radiazioni che sarebbe prodotto dal corrispondente campo espanso, nella sfera ICRU, a una profondità d, su un raggio in una determinata direzione; l'unità di misura dell'equivalente di dose direzionale è il sievert* ".

Per le radiazioni poco penetranti si sceglie d=0,07 mm e quindi H'(d, Ω) viene scritto H'(0.07, Ω).

Nella pratica, in radioprotezione, spesso la direzione Ω non è precisata, perché ad essere importante è principalmente il valore massimo di *H'* (0,07, Ω) nel punto d'interesse. Tale valore è di solito ottenuto ruotando il dosimetro durante le misure, fino a trovare la massima lettura.

Equivalente di dose personale $H_p(d)$

È definito nel tessuto molle, ad una profondità appropriata d, al di sotto di un determinato punto del corpo; l'unità di misura dell'"equivalente di dose personale" è il

sievert. Per la valutazione della dose efficace, è raccomandata una profondità d = 10 mm, e per la valutazione della dose equivalente alla cute, alle mani e ai piedi, la profondità raccomandata è d = 0,07 mm. Nei casi speciali di monitoraggio della dose equivalente al cristallino, è stata proposta come adeguata una profondità d = 3 mm.

La grandezza in esame, a causa della diffusione (*scattering*) e dell'interazione della radiazione nel corpo, può variare da individuo a individuo oltre che con la posizione del dosimetro; con riferimento all'irraggiamento al corpo intero, l'attuale normativa non specifica la posizione del punto ove determinare l'equivalente di dose, con la conseguenza che la grandezza in parola può assumere più di un valore per lo stesso individuo oltre che a variare da individuo a individuo (*multi valued quantity*).

Il monitoraggio individuale dell'esposizione esterna è di solito eseguito per mezzo di dosimetri personali portati sul corpo e la grandezza operativa definita per questo tipo di impiego tiene conto di questa situazione. Il valore vero della grandezza operativa è determinato dalle condizioni di irradiazione in prossimità del punto dove è portato il dosimetro; per una posizione del dosimetro sulla parte anteriore del tronco, la grandezza $H_p(10)$ fornisce essenzialmente una stima conservativa di *E,* anche nei casi di incidenza laterale o isotropa delle radiazioni sul corpo. Nel caso di esposizione unicamente dalla direzione posteriore, tuttavia, un dosimetro portato sulla parte anteriore del corpo è in grado di misurare correttamente l'$H_p(10)$, ma non potrà fornire una misura adeguata di *E.*

Inoltre, nei casi di esposizione parziale del corpo, la lettura di un dosimetro personale potrebbe non fornire un valore rappresentativo per la valutazione della dose efficace.

Bibliografia

- CONIGLIO A., D'ARIENZO M., SANDRI S., 2005. "*Classificazione delle radiazioni ionizzanti grandezze ed unità di misura*", ACTA I° corso "*Aggiornamenti su radiazioni ionizzanti e tutela sanitaria*" edito da I.S.R.A;
- MANCINI E. (a cura di), 2002. Appunti di Radioprotezione delle lezioni del Prof. Carlo Mancini, ed. Università di Roma "La Sapienza";
- PINTO I., 2006. Dispense del corso di radioprotezione;
- Decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101 "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117" (Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale„ n. 201 del 12 agosto 2020);
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1;
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21;

- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37;
- Annals of the ICRP. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Volume 41 Supplement 1 2012;
- ICRU Report No. 39, 1985. Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources;
- ICRU Report No. 43, 1988. Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources--Part II.

Data di chiusura del documento

Febbraio 2022

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it

Principali impieghi delle radiazioni ionizzanti

1. Introduzione

L'obiettivo del presente approfondimento è presentare una panoramica dei settori in cui le radiazioni ionizzanti di origine artificiale vengono correntemente e deliberatamente utilizzate. In questo contesto non saranno prese in considerazione le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti.

La presente trattazione non ha la pretesa di essere esaustiva, ma piuttosto di fornire utili informazioni che permettano di orientarsi in questo campo.

L'impiego diretto o indiretto delle radiazioni ionizzanti riguarda un numero sempre crescente di settori[1], ed è in continua evoluzione, a dispetto della percezione comune che lo relega ad ambiti quali quello medico e della produzione di energia nucleare (attualmente non consentita nel nostro paese).

La capacità delle radiazioni ionizzanti di vedere attraverso la materia opaca rispetto alle radiazioni ottiche e la semplicità con cui le molecole marcate (in cui uno o più atomi sono sostituti da radionuclidi) possono essere monitorate sono proficuamente utilizzate nelle più disparate applicazioni.

L'uso delle radiazioni ionizzanti spesso risulta assai più vantaggioso di altre tecnologie disponibili e in alcuni casi è divenuto difficilmente sostituibile o addirittura insostituibile: come esempi si possono citare i processi di sterilizzazione, i controlli di qualità di molti manufatti, la produzione di materiali ad alta ingegnerizzazione, la conservazione delle opere d'arte e i controlli di sicurezza.

2. Settore medico

Nella medicina contemporanea l'utilizzo delle radiazioni ionizzanti è vastissimo[2]; i benefici per i pazienti di tali applicazioni sono stati ampiamente dimostrati, ed è difficile immaginare un sistema sanitario senza le moderne tecniche diagnostiche o interventistiche guidate dall'*imaging* radiologico.

[1] "Encyclopedia of Nuclear Energy", Editor-in-chief Ehud Greenspan, ELSEVIER, 2021: https://www.sciencedirect.com/book/9780128197325/encyclopedia-of-nuclear-energy

[2] "Application of ionising radiation in healthcare": http://icrpaedia.org/Application_of_ionising_radiation_in_healthcare.

Pertanto, non è difficile comprendere perché le radiazioni ionizzanti usate per scopo medico costituiscano la maggiore fonte di esposizione dell'uomo alle radiazioni artificiali [WHO, 2016].

In medicina le radiazioni ionizzanti sono utilizzate sia per la diagnosi che per la terapia, eventualmente associate insieme con metodiche miste. Queste due categorie possono essere ulteriormente suddivise a seconda se la radiazione ionizzante sia somministrata attraverso sorgenti esterne o interne, come di seguito schematizzato:

1. Diagnosi:
    - Sorgenti esterne a raggi X: radiografia, fluoroscopia, tomografia computerizzata. In questo caso la diagnosi è effettuata principalmente attraverso tecniche di "radiologia diagnostica", che usano macchine a raggi X per ottenere immagini di aree dell'interno dell'organismo umano;
    - Sorgenti interne non sigillate: radiofarmaci impiegati in medicina nucleare[3] diagnostica, somministrati al paziente per la visualizzazione delle immagini di organi e tessuti in scintigrafia nucleare e nella PET (Positron Emission Tomography).
2. Terapia[4]: le tecniche di radioterapia sfruttano la capacità delle radiazioni di distruggere i tessuti patologici. Molte tipologie di sorgenti di radiazioni ionizzanti sono utilizzate per il trattamento di patologie tumorali o altre malattie.
    - Sorgenti esterne: terapia con fasci di radiazione esterna (EBRT, External Beam Radiation Therapy, chiamata anche teleterapia), generati attraverso:
        - macchine a raggi X;
        - acceleratori lineari che generano raggi X ad alta energia;
        - capsule che racchiudono sorgenti radioattive sigillate (ad esempio ^{60}Co nella radiochirurgia stereotassica gamma o unità "gamma knife"[5]).
    - Sorgenti interne (radionuclidi):
        - Sigillate: brachiterapia [De Sanctis et alii, 2021] (chiamata anche radioterapia interventistica);
        - Non sigillate: radiofarmaci impiegati in medicina nucleare terapeutica.

Le sorgenti radiogene utilizzate in campo medico possono essere: tubi radiogeni a raggi X, acceleratori di particelle e radioisotopi artificiali.

I tubi radiogeni a raggi X sono prevalentemente utilizzati per:

- radiografia convenzionale;

[3] "Nuclear medicine": https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_medicine.

[4] "Radiation therapy": https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_therapy.

[5] "Gamma knife": https://it.wikipedia.org/wiki/Gamma_Knife.

- tomografia computerizzata (CT, Computerized Tomography), metodica che consente di riprodurre sezioni o strati corporei del paziente ed elaborazioni tridimensionali, con l'utilizzo dei raggi X e di elaboratori di dati;
- altre tecniche correlate – radiologia interventiva, tecniche angiografiche, procedure terapeutiche o chirurgiche sotto guida radiologica, ecc.

Gli acceleratori di particelle (tra cui gli acceleratori lineari, o LINAC, e gli acceleratori circolari, detti ciclotroni) sono macchinari molto grandi che emettono raggi X ad alta energia e fasci di elettroni. Sono i più comuni dispositivi usati in oncologia radiologica, e sono prevalentemente utilizzati per:

- trattamento in radioterapia con fasci esterni, tramite la produzione di fasci di particelle o radiazioni elettromagnetiche ad elevata energia e precisione, per il bombardamento di aree del corpo colpite da patologie (tipicamente tumorali). Alcuni esempi non esaustivi sono costituiti da:
  - adroterapia – forma particolare di radioterapia che utilizza, per trattare le patologie, particelle pesanti dette adroni, tra i quali ricordiamo gli ioni carbonio ed i protoni;
  - terapia intraoperatoria (IORT, Intra-Operative RadioTherapy) – metodica terapeutica che associa la radioterapia (utilizzando elettroni, raggi X e brachiterapia) all'intervento chirurgico;
- produzione dei radio-traccianti: ad esempio ciclotroni dedicati alla produzione di radionuclidi per le tecniche PET.

I radioisotopi artificiali sono utilizzati sia in diagnostica sia in terapia nelle tecniche di medicina nucleare. Queste differiscono dalla radiologia generale in quanto l'esposizione alle radiazioni ionizzanti avviene per somministrazione di una sostanza radioattiva, per cui il paziente diventa radioattivo per un breve periodo; in tal modo si può determinare il funzionamento degli organi, il flusso sanguigno, ecc. Alcuni esempi di usi dei radioisotopi sono:

- tomografia a emissione di positroni (PET) – tecnica diagnostica che consente di misurare in modo quantitativo le funzioni, i processi metabolici e le reazioni biochimiche che avvengono all'interno dell'organismo umano. Tali processi vengono rappresentati mediante immagini della distribuzione spaziale e temporale di un tracciante radioattivo, preventivamente somministrato al paziente, che si distribuisce nell'organismo umano. Come traccianti vengono utilizzate molecole normalmente assimilate dal corpo umano, come il glucosio, l'acqua o l'ammoniaca, marcate con isotopi radioattivi emettitori di positroni (es. ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{18}F) con un tempo di emivita particolarmente breve (minuti – ore), in modo da ridurre i problemi dosimetrici associati all'uso di sostanze radioattive. La PET è usata estensivamente in oncologia clinica, in cardiologia e neurologia;
- diagnostica in vitro – attività di laboratorio in cui vengono utilizzati come traccianti emettitori beta o gamma in piccole quantità (^{125}I, ^{51}Cr, ^{93}Tc, ecc.);
- radioterapia metabolica - tramite tecniche analoghe a quelle diagnostiche, prevede la somministrazione di radionuclidi eventualmente veicolati da farmaci, anticorpi

monoclonali, peptidi e difosfonati, allo scopo di ottenere la loro localizzazione selettiva nelle zone del corpo da sottoporre a terapia. L'azione terapeutica avviene mediante l'assorbimento della dose di radiazioni nell'organo o tessuto bersaglio. In questo caso i tempi di dimezzamento dei radionuclidi sono generalmente più lunghi rispetto a quelli utilizzati nelle tecniche diagnostiche;

- brachiterapia - consiste nel posizionamento in volumi molto piccoli all'interno del corpo umano di sorgenti radioattive (contenenti ^{192}Ir, ^{125}I, ecc.) per mezzo di speciali applicatori. Tali sorgenti sono poste all'interno o vicino un tumore, esponendolo ad un costante flusso di radiazioni finché la radioattività decade. Talvolta gli impianti sono temporanei (24-48 ore) e sono quindi rimossi, oppure possono essere posti permanentemente nel tumore;
- radiochirurgia stereotassica gamma o unità "gamma knife": tecnica di radioterapia usata per il trattamento dei tumori cerebrali (o altre patologie) per mezzo di sorgenti al ^{60}Co, posizionati in una matrice schermata. Il dispositivo produce raggi gamma ad alta intensità che vengono diretti e concentrati su punti di destinazione nel cervello del paziente, in modo da trattare selettivamente il tumore, lasciando i tessuti cerebrali circostanti relativamente risparmiati.

Infine, altre due importantissime applicazioni delle radiazioni ionizzanti in campo medico sono:

- la sterilizzazione di materiali sanitari, presidi chirurgici, farmaci, mediante impianti di sterilizzazione con sorgenti radioisotopiche o acceleratori di elettroni [Jacobs, 2022];
- lo sviluppo di nuovi farmaci, mediante l'uso di radiotraccianti [Venkatech].

3. Impianti di produzione di energia nucleare

L'energia nucleare, responsabile dei legami tra protoni e neutroni nei nuclei atomici, può essere liberata ed estratta in vari modi:

- Fissione nucleare, in cui il nucleo atomico di un elemento chimico pesante (ad esempio ^{235}U o ^{239}Pt) decade in frammenti o nuclei atomici di minori dimensioni, con emissione di una grande quantità di energia e radioattività. Può avvenire spontaneamente in natura oppure essere indotta artificialmente tramite bombardamento con neutroni. È la reazione nucleare comunemente utilizzata nei reattori nucleari per la produzione di energia (termica ed elettrica) e nei tipi più semplici di arma nucleare, quali le bombe all'uranio o al plutonio;
- Fusione nucleare, nella quale i nuclei di due o più atomi si uniscono tra loro formando il nucleo di un nuovo elemento chimico. La fusione degli elementi leggeri (fino al numero atomico 28 – nichel) è una reazione esotermica. Il processo di fusione di nuclei atomici è il meccanismo alla base della formazione delle stelle, ed è stata prodotta artificialmente per amplificare la potenza di una bomba atomica. I reattori a fusione sono ancora in corso di progettazione e di costruzione, in quanto al momento consumano complessivamente più energia elettrica di quella che producono.

- Decadimento radioattivo, insieme di processi fisici attraverso cui i nuclei atomici instabili tendono a perdere l'energia in eccesso attraverso l'emissione di radiazioni. Un'applicazione è costituita dalle batterie nucleari, che riescono a generare corrente mediante il decadimento radioattivo in esse contenute, principalmente plutonio.

In Italia tutte le installazioni nucleari realizzate nel contesto del programma nazionale nucleare durante gli anni 60-80 sono state definitivamente chiuse nel 1987, dopo tre referendum concernenti l'energia nucleare, con la sola eccezione di alcuni reattori di ricerca.

Pertanto le attività presenti nel territorio italiano sono indirizzate al *decommissioning* (cioè lo smantellamento degli impianti ed il rilascio dei siti) delle installazioni nucleari ancora presenti, con la gestione delle problematiche relative allo spegnimento del combustibile, dei rifiuti radioattivi di questi impianti, la previsione e le attività relative al collocamento e alla costruzione del deposito nazionale per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa e media intensità (LLW/ILW) e di un deposito temporaneo per lo stoccaggio dei rifiuti a media ed alta intensità (ILW/HLW)[6].

Comunque, è da notare che in numerosi paesi, anche vicini all'Italia, sono presenti impianti nucleari, pertanto le problematiche di radioprotezione della popolazione legati a questo tipo di impianti sono sempre attuali, e mettono in evidenza la necessità dell'analisi e del monitoraggio ambientale delle relative eventuali emissioni, ad esempio in caso di incidente e *fall-out* radioattivo.

Infine, non ci si può esimere dal ricordare che in Europa vi è attualmente un acceso dibattito in merito sull'energia nucleare "pulita" (cosiddetti nuovi impianti di "quarta generazione") nell'ambito della politica europea sulla decarbonizzazione e che le moderne installazioni nucleari, che offrano sufficienti garanzie di sicurezza, sono state attualmente comprese nella tassonomia verde o "green"[7].

4. Ricerca scientifica e tecnologica

Nella ricerca scientifica e tecnologica, le radiazioni ionizzanti intervengono sia come argomento di studio sia come strumento di indagine nella fisica nucleare[8], nell'astrofisica, nella chimica, nella biochimica, ecc. Le applicazioni sono innumerevoli, e di seguito di riportano alcuni argomenti non esaustivi[9].

[6] a) Governo Italiano, "Implementation of Council Directive 2009/71/EURATOM of 25 June 2009 Establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations as amended by the Council Directive 2014/87/EURATOM of 8 July 2014, Second Italian National Report", 2020: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-03/15._it_2nd_2020_report_a-nsd_0.pdf;
b) https://www.depositonazionale.it/.

[7] La tassonomia "verde" dell'Unione europea è una classificazione delle attività economiche che possono essere considerate sostenibili dal punto di vista ambientale. La Commissione europea ha incluso il gas naturale e l'energia nucleare nell'elenco delle attività che ritiene "sostenibili" per la nuova strategia finanziaria europea. Il documento introduce dei rigidi requisiti, basati su analisi scientifiche, per stabilire se un'attività possa essere considerata verde o meno. Si veda il portale "Eu taxonomy for sustainable activities": https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities_en.

[8] Istituto Nazionale di Fisica Nucleare: https://home.infn.it/it/.

[9] "Radiation Physics and Chemistry":

- Rilevazione e misura tramite radiazioni: numerosi fenomeni indotti da raggi X o da elettroni accelerati sono impiegati nella strumentazione utilizzata per l'analisi, soprattutto nel campo della struttura dei materiali. Di seguito si riportano esempi di alcune tecniche analitiche che utilizzano radiazioni ionizzanti:
  - Tecniche radiografiche (che utilizzano raggi X, raggi gamma, particelle beta, elettroni secondari, neutroni), radiografie ad emissione di elettroni, tomodensitometrie, ecc.);
  - Microscopia a scansione elettronica associata a spettrometria a raggi X;
  - Diffrazione a raggi X;
  - Fluorescenza attivata con i raggi X;
  - Analisi di attivazione, ad esempio con sorgenti neutroniche;
  - Microscopia a *ion beam*;
  - Spettroscopia Raman;
  - Spettroscopia Mössbauer;
  - Datazione con Carbonio-14;
  - Tecniche di scattering a raggi gamma.
  - Tecniche analitiche, piuttosto diffuse, che impiegano sorgenti radioattive "ausiliarie", che cioè non intervengono direttamente nel processo di misura, quali le sorgenti di 63Ni nella gascromatografia a ECD (detector a cattura di elettroni), in cui la sorgente radioattiva ha il compito di ionizzare il gas di trasporto (ad esempio azoto), in modo da produrre una corrente elettrica le cui variazioni vengono poi rivelate dal detector.
- Processi fondamentali nella fisica delle radiazioni
- Chimica/biochimica: l'uso di traccianti radioattivi consente di studiare nel dettaglio i meccanismi che presiedono ai processi chimici, chimico-fisici e biologici, seguendo strumentalmente gli spostamenti e le successive combinazioni di atomi e molecole opportunamente "marcati".

5. Applicazioni industriali

Per quanto riguarda le tecniche analitiche applicate all'industria, le radiazioni ionizzanti vengono estensivamente utilizzate per effettuare controlli non distruttivi in tutti i settori, che vanno dall'industria meccanica, a quella edile, elettronica, ecc. [IAEA, 2020]. Alcuni di questi esempi sono di seguito descritti.

Radiografie industriali [CRANE, 2018]: un'applicazione molto diffusa riguarda l'impiego di intensi fasci di raggi X o gamma per radiografare componenti industriali nelle branche più svariate (aerospaziale, motoristica, automobilistica, nautica, stampaggio, ecc.), per la determinazione di difetti nelle saldature effettuate tra i vari pezzi meccanici o nelle strutture di fusione, nelle strutture metalliche, edilizie, elettriche, ecc., al fine di assicurare la qualità e verificare l'integrità dei componenti

https://www.sciencedirect.com/journal/radiation-physics-and-chemistry.

studiati. Queste indagini radiografiche industriali in genere si effettuano tramite macchine a raggi X, sorgenti radioattive sigillate gamma (es. ^{192}Ir) telecomandate a distanza, e comportano l'impiego di radiazioni ad elevata potenza.

Misure di spessore: si ottengono sia tramite misure di trasmissione che di retrodiffusione della radiazione beta o gamma, utilizzando vari radioelementi (dal ^{60}Co all'^{241}Am), a seconda della densità superficiale del materiale in esame. Ad esempio, emettitori di particelle beta sono diffusamente utilizzati nell'industria cartaria per la misurazione dello spessore dei fogli di carta durante il processo di fabbricazione. Un'altra applicazione riguarda la centratura della foratura nei circuiti stampati professionali multistrato, e la misura degli spessori del materiale di riporto sulle schede elettroniche.

Misure di livello o di flusso: in questo caso il fascio di radiazione permette di stabilire il livello di un liquido o il rapporto tra liquido e gas all'interno di recipienti, tubazioni, ecc. con una notevole precisione su qualunque tipo di contenitore, che sia opaco o meno [Tjugum et alii, 2002; Thýn et alii, 2004].

Misure di umidità e di densità del terreno: questi tipi di misure vengono eseguite usando sorgenti neutroniche e di radiazione gamma, le prime per rivelare la presenza d'acqua o di idrocarburi nei terreni, le seconde per determinare la densità del suolo.

Inoltre, tecniche radioisotopiche sono correntemente utilizzate per quantificare in tempo reale la composizione delle ceneri nei combustibili fossili, in primo luogo il carbone (correlata al contenuto di silicio, ferro, alluminio, zolfo e calcio), onde valutare preventivamente l'emissione di inquinanti in seguito alla loro combustione [Sowerby, 2009].

Traccianti gamma dispersi nell'olio di lubrificazione dei motori di nuova progettazione e costruzione consentono, nella fase di ingegnerizzazione, di quantificarne sul banco di prova il consumo di olio attraverso la loro rilevazione nei gas di scarico. Mescolando ai combustibili piccole quantità di traccianti è possibile verificare inoltre l'efficienza dei sistemi di captazione delle ceneri e di depurazione dei fumi.

Le radiazioni ionizzanti possono essere utilizzate anche per l'identificazione e l'analisi chimica dei materiali, con le stesse metodiche accennate nel capitolo precedente: ad esempio viene misurata la percentuale dei diversi metalli presenti nelle leghe metalliche, comprese quelle di gioielleria [Marucco, 2004], negli impianti, nelle saldature industriali, ecc.

Una tecnologia molto interessante riguarda l'impiego di metodologie radio-ottiche per misurare in situ le vibrazioni e i movimenti relativi di componenti di ponti, palazzi, dighe, velivoli, satelliti [Dunn, 2004], oppure per valutare i parametri di crescita di crepe e rotture nelle pavimentazioni di asfalto [Braz et alii, 2004].

Una diversa categoria di applicazioni industriali riguarda la tecnologia dei materiali, dove intensi fasci di radiazioni ionizzanti sono impiegate per modificare opportunamente le caratteristiche dei materiali irradiati.

Le radiazioni ionizzanti sono infatti in grado di attivare reazioni chimiche indipendentemente dallo stato fisico (solido, liquido, gassoso) e dalle condizioni

termodinamiche (pressione, temperatura, ecc.) dei reagenti, e senza l'aggiunta di catalizzatori o di additivi. Ad esempio, questa proprietà è ampiamente sfruttata nella tecnologia dei polimeri [Ferry et alii, 2016], nei processi di sintesi, polimerizzazione, modifica delle proprietà, reticolazione, degradazione e sintesi di compositi. Infatti, l'irraggiamento di polimeri con radiazioni ad alta energia (come i raggi gamma, raggi X, fasci di elettroni o di ioni) genera ioni e radicali liberi, elementi molto reattivi che possono istantaneamente essere utilizzati nella formazione di nuove strutture chimiche e catene, potendo così modificare le caratteristiche del polimero finale. Anche la degradazione delle catene polimeriche può essere indotta dalle radiazioni ionizzanti: essa genera la rottura delle catene polimeriche principali e secondarie, ed anche questo trattamento viene utilizzato correntemente per la formazione di materiali dalle caratteristiche controllate.

Queste tecnologie sono già affermate o sono in rapida evoluzione, ad esempio, nei seguenti settori:

- produzione di fili, cavi, isolanti elettrici, condutture, particolari tipologie di materiali polimerici, aventi caratteristiche di elevata resistenza a solventi, invecchiamento e alte temperature;
- produzione di tessuti resistenti per uniformi, camici, ecc.;
- produzione di pellicole di confezionamento termo restringenti;
- produzione di pneumatici di automobili (processi di vulcanizzazione);
- nei materiali compositi, modificazione delle superfici di film plastici e carta con silicone a basso peso molecolare che conferisce proprietà particolari (produzione di nastri adesivi, floppy disk, lenti a contatto, ecc.);
- trattamenti per la rifinitura superficiale di rivestimenti, lacche e inchiostri;
- sintesi e trattamenti superficiali di nanomateriali [Flores-Roja et alii, 2020];
- produzione di membrane di filtrazione autopulenti e chimicamente resistenti (iontrack);
- produzione di arti artificiali;
- microlitografia - la tecnologia delle radiazioni basata sui raggi X e fasci di particelle (*e-beam* e ioni) è sempre più utilizzata nella produzione di circuiti microelettronici, micromacchine e altri dispositivi analoghi;
- produzione di semiconduttori organici (miscele di polianiline);
- degradazione della cellulosa dai residui della lavorazione della canna da zucchero tramite le radiazioni ionizzanti per ottenere etanolo e polimeri naturali.

6. Alimenti e agricoltura

Altri due settori che utilizzano le radiazioni ionizzanti sia nelle tecniche analitiche che di trattamento sono l'agricoltura e l'industria alimentare[10].

[10] Maggiori informazioni sono reperibili al seguente link:
http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=1166&area=sicurezzaAlimentare&me

Anche in questo caso, le radiografie sono usualmente utilizzate per ispezionare gli alimenti e le piante. Prodotti agricoli, come ad esempio noci, cereali ed altri semi sono radiografati per studiarne le dimensioni, la forma e l'eventuale presenza di infestanti.

Esempi di alimenti esaminati includono burro, prosciutti, salami e formaggi [Auer et alii, 2021]: le immagini radiografiche rivelano infatti eventuali "imperfezioni" interne dei prodotti non rilevabili con altre metodiche non distruttive. Anche prodotti particolari, come gli alimenti per bambini, sono sottoposti a radiografia per evidenziare eventuali oggetti estranei.

Altre tecniche che utilizzano le radiazioni ionizzanti permettono di conoscere anche la composizione elementare delle matrici studiate: esempi includono il suolo agricolo, in cui sono ricercati i pesticidi contenenti metalli pesanti [Jørgensen et alii, 2005], la birra [Gama et alii, 2017], in cui sono ricercati i metalli pesanti ed altri elementi inorganici presenti in tracce, il miele, il polline, le api [Kump et alii, 1996], il latte [De Araújo et alii, 2019], il caffè [Cloete et alii, 2019], solo per citarne alcuni.

Infine, sempre rimanendo nel campo analitico, l'uso di traccianti radioattivi mescolati ai fertilizzanti agricoli consente di seguirne il processo di assorbimento e di metabolizzazione da parte dei vegetali e di quantificarne il rilascio, per evitare poi, nella concreta applicazione di pieno campo, l'impiego di dosi eccessive di sostanze chimiche, minimizzando in tal modo i problemi di contaminazione dell'ambiente.

Le tecniche di irradiazione con le radiazioni ionizzanti di prodotti agricoli ed alimentari in genere consistono nel trattamento con dosi ben definite di radiazioni ionizzanti, come raggi gamma, raggi X, o fasci di elettroni, e vengono estensivamente impiegate per la sterilizzazione e la conservazione di alimenti[11] e prodotti agricoli [IAEA, 2004].

Usualmente, per questa applicazione si utilizzano sorgenti di ^{60}Co o ^{137}Cs; la dose di radiazione ricevuta da un dato alimento determina l'effetto di sterilizzazione, permettendone una lunga conservazione e quindi fornendo la possibilità di immagazzinamento per lunghi periodi di tempo, ed estendendo il periodo di conservazione (*shelf life*). Questa tecnologia di conservazione migliora la sicurezza e la qualità igienica degli alimenti, riducendo il rischio di malattie provocate dal cibo. Tale trattamento quando applicato con procedure corrette è ritenuto efficace e sicuro.

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sono, in dipendenza dell'alimento e della dose di radiazione impiegata:

- decontaminazione da microrganismi patogeni e non, che possono causare tossinfezioni alimentari (tecnica utilizzata per spezie, erbe e vegetali di stagione);
- disinfestazione da insetti e parassiti vari, tipo scarafaggi, falene ed altri;
- ritardo della germogliazione e della maturazione (tecnica utilizzata per patate, cipolle, prodotti ortofrutticoli).

nu=microbiologica.

[11] Istituto Superiore di Sanità (ISS), "Alimentazione, nutrizione e sicurezza degli alimenti, Alimenti irradiati": https://www.iss.it/sicurezza-microbiologica-degli-alimenti/-/asset_publisher/3dUYTNU4YVv2/content/alimenti-irradiati.

L'irradiazione non rende gli alimenti radioattivi; è opportuno, infatti, distinguere gli alimenti irradiati da quelli radioattivi. I primi sono esposti volontariamente dall'uomo alle radiazioni, per bloccarne la germogliazione o distruggerne gli infestanti e le radiazioni cessano istantaneamente il loro effetto nello stesso momento in cui s'interrompe la sorgente che le produce. I secondi sono stati oggetto di esposizione incontrollata, non voluta dall'uomo e potenzialmente pericolosa per la salute. Tuttavia, occorre notare che le radiazioni ionizzanti, avendo la potenzialità di rompere la struttura molecolare della sostanza organica, possono formare radicali liberi, che, reagendo con il cibo, danno luogo a nuove sostanze chimiche, chiamate "prodotti radiolitici", caratteristici dei cibi irradiati.

Questa tecnologia costituisce una valida alternativa ai processi di decontaminazione tradizionali attualmente utilizzati, in particolare consente una riduzione dell'uso di prodotti chimici potenzialmente pericolosi per la salute dell'uomo e per l'ambiente (fumigazione chimica). Inoltre, non viene modificata la consistenza dei prodotti, come accadrebbe se essi venissero trattati con fonti di calore.

Oltre a quanto già detto, le radiazioni ionizzati sono state e sono tutt'ora utilizzate estensivamente per lo sviluppo di nuove varietà di piante[12]. Infatti, l'irradiazione con raggi gamma e X può indurre mutazioni e quindi accelerare considerevolmente il processo di selezione di nuove caratteristiche nelle piante interessanti ed utili dal punto di vista agronomico, mimando il processo naturale di mutazione spontanea.

Infine, l'uso delle radiazioni ha permesso lo studio e lo sviluppo di nuove tecniche antiparassitarie e di fertilizzazione che sono oggi impiegate in agricoltura e nella prevenzione sanitaria. Ad esempio, la liberazione di insetti precedentemente sterilizzati con le radiazioni (tecnica dell'insetto sterile) consente un efficace controllo delle mosche e di altri parassiti, minimizzando contemporaneamente l'uso - e l'impatto ambientale – di antiparassitari e insetticidi chimici.

7. Arte, archeologia, ambiente, geologia

Le metodiche analitiche che utilizzano radiazioni ionizzanti (analisi per attivazione neutronica, fluorescenza a raggi X, radiografia a raggi X, spettrometria a raggi gamma, ecc.) sono molto diffuse nello studio e nella caratterizzazione dei beni culturali: anche in questo caso, le grandi potenzialità delle radiazioni ionizzanti unite alla non distruttività e non invasività delle analisi consentono di avere informazioni molto dettagliate sulle opere analizzate, sulla loro elaborazione, la loro evoluzione e/o la loro degradazione nel tempo, sulla ricerca di elementi in tracce, senza distruggerle [IAEA, 2017].

Ad esempio, nel settore della pittura le tecniche radiografiche sono preziose alleate per avere informazioni sul supporto e sull'imprimitura, sul disegno preparatorio, sul colore e sui pennelli impiegati, consentendo di svelare ripensamenti dell'artista o di scoprire clamorosi falsi. Inoltre, tramite la fluorescenza a raggi X si possono determinare gli elementi presenti in un materiale e studiare la composizione dei pigmenti utilizzati: questa tecnica permette di stabilire, per esempio, se un quadro è

[12] International Atomic Energy Agency (IAEA), "Mutation breeding": https://www.iaea.org/topics/mutation-breeding.

un falso o no, basandosi appunto sugli elementi costituenti i vari colori utilizzati, elementi che variano a seconda dell'epoca della pittura.

Le applicazioni di queste tecniche allo studio di beni artistici e culturali sono innumerevoli: solo a titolo di esempio citiamo lo studio di fotografie storiche, affreschi, sculture, antichi manoscritti, icone, oggetti d'oro, monete, ecc. [Hložek et alii, 2019; Stefanik et alii, 2019; Cortella et alii, 2020] Qualsiasi tipologia di materiale può essere analizzato, tra cui:

- pietre, gemme, ceramiche, terrecotte, smalti, vetri;
- legno, carta, tessuti, ossa, avorio;
- metalli, gioielli;
- strati di pittura, tele, pigmenti, inchiostri, oli, leganti, vernici, colle, ecc.

Anche nell'archeologia e nella paleobiologia le radiazioni ionizzanti sono alla base di importanti tecniche di analisi. Le analisi radiografiche sono estensivamente impiegate per studiare mummie, tessuti organici ed altri oggetti [Rossi et alii, 2004]. Inoltre, com'è noto, l'età di un reperto di origine organica (vegetale o animale) può essere facilmente determinata misurando il suo contenuto in carbonio-14. Infine, per studiare materiali inorganici è possibile utilizzare altre tecniche di datazione basate sull'analisi di altri radioisotopi naturali.

Molte delle opere d'arte e degli oggetti ad elevato interesse culturale sono costituite da materiali organici, il che significa che sono sottoposte a un costante processo di degradazione da agenti fisici, chimici, microbici o da insetti.

In questo caso, l'uso delle radiazioni ionizzanti può aiutare a preservare e conservare queste opere nello stato in cui sono state trovate, ad esempio tramite la loro impregnazione con resine che emettono radiazioni gamma.

La geologia e la prospezione mineraria sono due settori nei quali le radiazioni ionizzanti trovano applicazioni di notevole interesse.

La presenza di radioisotopi naturali a vita lunga nei minerali consente di datare con buona approssimazione le formazioni geologiche, ricavando informazioni preziose per la ricerca di minerali.

La stratigrafia per attivazione neutronica è invece una tecnica molto utilizzata nell'industria petrolifera e del carbone per determinare la composizione degli strati geologici attraversati da una perforazione di sondaggio. Facendo scorrere lungo la perforazione una sorgente di neutroni e misurando successivamente la "risposta" dei materiali irradiati si ricavano infatti informazioni molto dettagliate sulla composizione degli strati attraversati [Borsaru et alii, 2004].

Nuove tecnologie prevedono di misurare tramite spettrometria gamma le variazioni di concentrazione di elementi radioattivi naturali nel suolo, per mappare l'eventuale presenza di giacimenti di idrocarburi [Senouci et alii, 2020].

L'uso dei traccianti radioattivi o di radionuclidi naturali o artificiali già presenti nell'ambiente consente inoltre di studiare la mappatura delle falde acquifere e delle risorse idriche sotterranee [Michel et alii, 2009], di analizzare e misurare l'accumulo

dei sedimenti sul fondo marino e in altri distretti ambientali [Bezuidenhout et alii, 2020], di seguire il corso delle correnti oceaniche e atmosferiche e di misurare il tasso di accumulo dei ghiacci nelle calotte polari.

L'uso dei traccianti radioattivi consente di monitorare la dispersione e la diffusione ambientale degli inquinanti (acque contaminate, microplastiche, ecc. [Lanctôt et alii, 2018]).

Passando alle tecnologie di trattamento impiegate nel settore ambientale, le radiazioni ionizzanti trovano impiego nella sterilizzazione dei fanghi di risulta degli impianti di depurazione, nel trattamento degli inquinanti e nel riciclo [Nakhla et alii, 2022; Folcik et alii, 2020].

Particolare attenzione viene posta alla possibilità di utilizzare i fasci elettronici (e-beam) per la depurazione delle acque, come metodo sostitutivo o integrativo alle convenzionali tecniche, nei processi di ossidazione avanzata, per eliminare, ad esempio, la contaminazione di falde con pesticidi o inquinanti di varia natura. Le industrie che per il loro normale funzionamento necessitano di grandi quantitativi di acqua (es. cartarie, tessili e conciarie) beneficerebbero dell'introduzione di tali tecnologie, rendendo altresì possibile il riutilizzo di acque di scarico che altrimenti andrebbero smaltite come rifiuti pericolosi, in quanto spesso altamente tossiche per l'uomo e l'ambiente. Questi processi di ossidazione avanzata utilizzano una combinazione di ossidanti, quali le radiazioni ultraviolette, i catalizzatori, l'elettricità, gli ultrasuoni e fasci elettronici per generare radicali idrossilici (radiolisi dell'acqua).

Infatti, l'acqua, quando viene colpita dalla radiazione, si decompone in molecole elettrizzate e ionizzate, che a loro volta producono svariate specie reattive e prodotti molecolari ($OH^{\cdot}$, $H^{\cdot}$, H_2O_2, H_2, e_{aq}^{-}), che danno luogo a tutta una serie di reazioni, spesso molto complesse, che possono anche avere effetti sugli organismi viventi presenti in acqua, con intensità e modalità diversa a seconda della dose di radiazione, arrivando anche alla distruzione degli organismi stessi.

8. Altre applicazioni

Le radiazioni ionizzanti trovano altri campi di impieghi significativi in alcune applicazioni relative alla sicurezza. Queste tecnologie utilizzano, oltre ai raggi X standard, tomografie con raggi X, radiografie gamma, e tecnologie basate sui neutroni [Gozani, 2004].

Molto diffuso è, ad esempio, il controllo del contenuto dei bagagli tramite tecniche radiografiche: l'ispezione non intrusiva di oggetti di tutte le dimensioni, dai bagagli alle borse ai pacchi postali, è diventata una componente importante della sicurezza dei voli e dei controlli ai confini, alle dogane, nelle carceri, ecc.

Varie tipologie di monitor e sensori mobili per le radiazioni [Kim et alii, 2019; Zao et alii, 2019] [13] sono stati sviluppati per l'utilizzo nei porti, negli aeroporti e nelle aree urbane per rilevare la presenza di materiali radioattivi illegali.

[13] Radiation portal monitor, https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_portal_monitor.

Altre applicazioni consentono di individuare materiali esplosivi durante le operazioni di sminamento, materiali pericolosi quali agenti chimici, materiali nucleari, merce di contrabbando, droghe, ecc. [Nebbia et alii, 2005; Ferreira et alii 2010].

Inoltre, le tecniche analitiche già citate sono state proficuamente utilizzate anche nella medicina legale.

Un'altra applicazione, molto diffusa soprattutto all'estero, è rappresentata dai rivelatori di fumo degli impianti antincendio a camera di ionizzazione, basati sull'impiego di emettitori alfa (^{241}Am).

Si citano infine, più a titolo di curiosità che altro, due applicazioni, oggi non più attuali, che però venivano ancora utilizzate in un passato non troppo lontano:

- l'impiego di polvere di torio nelle reticelle di fornelletti a gas, utilizzati per l'illuminazione d'emergenza nelle lampade da campeggio, al fine di migliorarne le caratteristiche di illuminazione;
- l'uso di trizio nei quadranti degli orologi, bussole, ed altri oggetti, al fine di renderli fosforescenti.

9. Conclusioni

Come si è cercato di evidenziare, le radiazioni ionizzanti sono oggigiorno impiegate in svariatissimi settori della vita moderna, medici, scientifici, ma anche industriali, artistici, ambientali, ecc., ed il numero delle loro applicazioni è in costante aumento.

La sempre maggiore diffusione di queste applicazioni anche in ambienti diversi da quelli scientifici o medici, tradizionalmente più controllati e preparati in merito, rende necessaria una sempre più diffusa e capillare formazione ed informazione sulle radiazioni ionizzanti, sia in merito alle grandi potenzialità che esse offrono, sia agli eventuali rischi che presentano.

Bibliografia

- J. Auer, M. Reiter, S. Senck, A. Reiter, J. Kastner, K. Mathmann, "Investigation of opening eye defects and effects of different ripening profiles on eye structure in semi-hard cheese using X-ray micro-computed tomography", Food Structure, 2021, 28: https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100190.
- J. Bezuidenhout, "The investigation of natural radionuclides as tracers for monitoring sediment processes", Journal of Applied Geophysics, 2020, 181: https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104135.
- M. Borsaru, M. Berry, M. Biggs, A. Rojc, "In situ determination of sulphur in coal seams and overburden rock by PGNAA", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 530-534: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01623-9.

- D. Braz, R. T. Lopes, L. M. G. Motta, "Research on fatigue cracking growth parameters in asphaltic mixtures using computed tomography", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 498-502: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01610-0.
- K. J. Cloete, Ž. Šmit, R. Minnis-Ndimba, P. Vavpetič, A. du Plessis, S. G. le Roux, P. Pelicon, "Physico-elemental analysis of roasted organic coffee beans from Ethiopia, Colombia, Honduras, and Mexico using X-ray micro-computed tomography and external beam particle induced X-ray emission", Food Chemistry: X, 2019, 2: https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100032.
- L. Cortella, C. Albino, Q. K. Tran, K. Froment, "50 years of French experience in using gamma rays as a tool for cultural heritage remedial conservation", Radiation Physics and Chemistry, 2020, 171: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108726.
- R. L. Crane "Radiographic Inspection of Composite Materials", Editor(s): Peter W.R. Beaumont, Carl H. Zweben, Comprehensive Composite Materials II, Elsevier, 2018, pp. 167-194: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03928-X.
- U. B. De Araújo, A. C. M. da Costa, D. F. de Oliveira, E. F. O. de Jesus, M. J. Anjos, E. Teixeira Mármy sico, C. da Silva Carneiro, R. de Oliveira Resende Ribeiro, R. T. Lopes, "Analysis of milk trace elements with a home-made portable automated total reflection x-ray fluorescence system", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 156, pp. 216-221: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.10.026.
- V. De Sanctis, G. Facondo, G. Vullo, "Principles and indications of brachytherapy", Reference Module in Biomedical Sciences, Elsevier, 2021: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822960-6.00063-6.
- W. L. Dunn, "A radio-optic method for measuring relative motion", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 481-485: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01606-9.
- F. J. O. Ferreira, V. R. Crispim, A. X. Silva, "Detection of drugs and explosives using neutron computerized tomography and artificial intelligence techniques", Applied Radiation and Isotopes, 2010, 68 (6), pp. 1012-1017: https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.01.019.
- M. Ferry, Y. Ngono-Ravache, C. Aymes-Chodur, M. C. Clochard, X. Coqueret, L. Cortella, E. Pellizzi, S. Rouif, S. Esnouf, "Ionizing Radiation Effects in Polymers", Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2016: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02095-6.
- G. G. Flores-Rojas, F. López-Saucedo, E. Bucio, "Gamma-irradiation applied in the synthesis of metallic and organic nanoparticles: A short review", Radiation Physics and Chemistry, 2020, 169: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X17313439.

- A. M. Folcik, S. D. Pillai, "A critical review of ionizing radiation technologies for the remediation of waters containing Microcystin-LR and M. aeruginosa", Radiation Physics and Chemistry, 2020, 177: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109128.
- E. M. Gama, C. C. Nascentes, R. P. Matos, G. de C. Rodrigues, G. D. Rodrigues, "A simple method for the multi-elemental analysis of beer using total reflection X-ray fluorescence", Talanta, 2017, 174, pp. 274-278: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.05.059.
- T. Gozani, "The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 460-463: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01590-8.
- M. Hložek, T. Trojek, R. Prokeš, V. Linhart, "Mediaeval metal threads and their identification using micro-XRF scanning, confocal XRF, and X-ray micro-radiography", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 155, pp. 299-303: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.04.016.
- "Irradiation as a phytosanitary treatment of food and agricultural commodities", Proceedings of a final research coordination meeting organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, IAEA, 2004: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1427_web.pdf.
- "Uses of ionizing radiation for tangible cultural heritage conservation", IAEA Radiation Technology Series N. 6, International Atomic energy agency (IAEA), Vienna, 2017: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/16-17821_PUB1747_web.pdf.
- "Industrial applications of sealed radioactive sources", International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2020: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1925web.pdf.
- G. P. Jacobs, "Irradiation of pharmaceuticals: A literature review", Radiation Physics and Chemistry, 2022, 190: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109795.
- N. Jørgensen, J. Laursen, A. Viksna, N. Pind, P. E. Holm, "Multi-elemental EDXRF mapping of polluted soil from former horticultural land", Environment International, 2005, 31 (1), pp. 43-52: https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.06.007.
- Y. Kim, M. Kim, K. T. Lim, J. Kim, G. Cho, "Inverse calibration matrix algorithm for radiation detection portal monitors", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 155, pp. 127-132: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.07.022.
- P. Kump, M. Nečemer, J. Šnajder, "Determination of trace elements in bee honey, pollen and tissue by total reflection and radioisotope X-ray fluorescence spectrometry", Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 1996, 51 (5), pp. 499-507: https://doi.org/10.1016/0584-8547(95)01435-7.

- C. M. Lanctôt, M. Al-Sid-Cheikh, A. I. Catarino, T. Cresswell, B. Danis, H. K. Karapanagioti, T. Mincer, F. Oberhänsli, P. Swarzenski, I. Tolosa, M. Metian, "Application of nuclear techniques to environmental plastics research", Journal of Environmental Radioactivity, 2018, 192, pp. 368-375: https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.07.019.
- A. Marucco, "Low-energy ED-XRF spectrometry application in gold assaying", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 486-490: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01608-2.
- R. L. Michel, Chapter 5 "Radionuclides as Tracers and Timers in Surface and Groundwater", Editor(s): Klaus Froehlich, Radioactivity in the Environment, Elsevier, 2009, 16, pp. 139-230: https://doi.org/10.1016/S1569-4860(09)01605-2.
- S. F. Nakhla, A. Arafa, I. S. Naga, M. Mohamed, H.A. Alsherbeny, N. M. Fahmi, H. Hosny, S. Moussa, "Primary and secondary sludge treatment using ionizing radiation technology in Alexandria, Egypt", Applied Radiation and Isotopes, 2022: https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110101.
- G. Nebbia, S. Pesente, M. Lunardon, S. Moretto, G. Viesti, M. Cinausero, M. Barbui, E. Fioretto, V. Filippini, D. Sudac, K. Nađ, S. Blagus, V. Valković, "Detection of hidden explosives in different scenarios with the use of nuclear probes", Nuclear Physics A, 2005, 752, pp. 649-658: https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.091.
- M. Rossi, F. Casali, D. Romani, L. Bondioli, R. Macchiarelli, L. Rook, "MicroCT Scan in paleobiology: application to the study of dental tissues", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 747-750: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01697-5.
- M. Senouci, K. Allek, "Application of Bayesian classifier to magnetic and gamma ray spectrometry data for targeting hydrocarbon microseepages", Journal of Applied Geophysics, 2020, 181: https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104145.
- B. D. Sowerby, "Nuclear techniques for the on-line bulk analysis of carbon in coal-fired power stations", Applied Radiation and Isotopes, 2009, 67 (9), pp. 1638-1643: https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.04.007.
- M. Stefanik, L. Sklenka, O. Huml, J. Rataj, "Activation analysis of Tibetan coins and thermal neutron flux measurement at the VR-1 training reactor", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 155, 2019, pp. 304-309: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.032.
- J. Thýn, R. Žitný, "Radiotracer applications for the analysis of complex flow structure in industrial apparatuses", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, 213, pp. 339-347: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01648-3.

- S. A. Tjugum, J. Frieling, G. A. Johansen, "A compact low energy multibeam gamma-ray densitometer for pipe-flow measurements", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2002, 197 (3–4), pp. 301-309: https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01481-7.
- M. Venkatech, A. Korde, "Medicine: new drug developments", rif. 1, Volume 4, section 12, pp. 274-279.
- "Communicating radiation risks in paediatric imaging – information to support healthcare discussions about benefit and risk", World Health Organization (WHO), 2016: https://apps.who.int/iris/handle/10665/205033.
- J. Zhao, C. J. Sullivan, "Detection and parameter estimation of radioactive sources with mobile sensor networks", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 155, pp. 265-270: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.06.018.

Data di chiusura del documento

Febbraio 2022

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it

CONOSCERE IL RISCHIO

RADIAZIONI IONIZZANTI

I danni per la salute

1. Premessa

Vengono di seguito descritti i principali danni per la salute e per la progenie derivanti dalla esposizione dell'essere umano a radiazioni ionizzanti.

2. Classificazione degli effetti sull'uomo delle radiazioni ionizzanti

Le radiazioni ionizzanti, potenti strumenti di diagnostica e cura medica e di diagnostica tecnica, presentano alcuni aspetti collaterali negativi perché possono determinare l'insorgenza di varie patologie acute e/o croniche, dipendenti o meno dalla dose, dalla tipologia di radiazioni e dal tipo di esposizione.

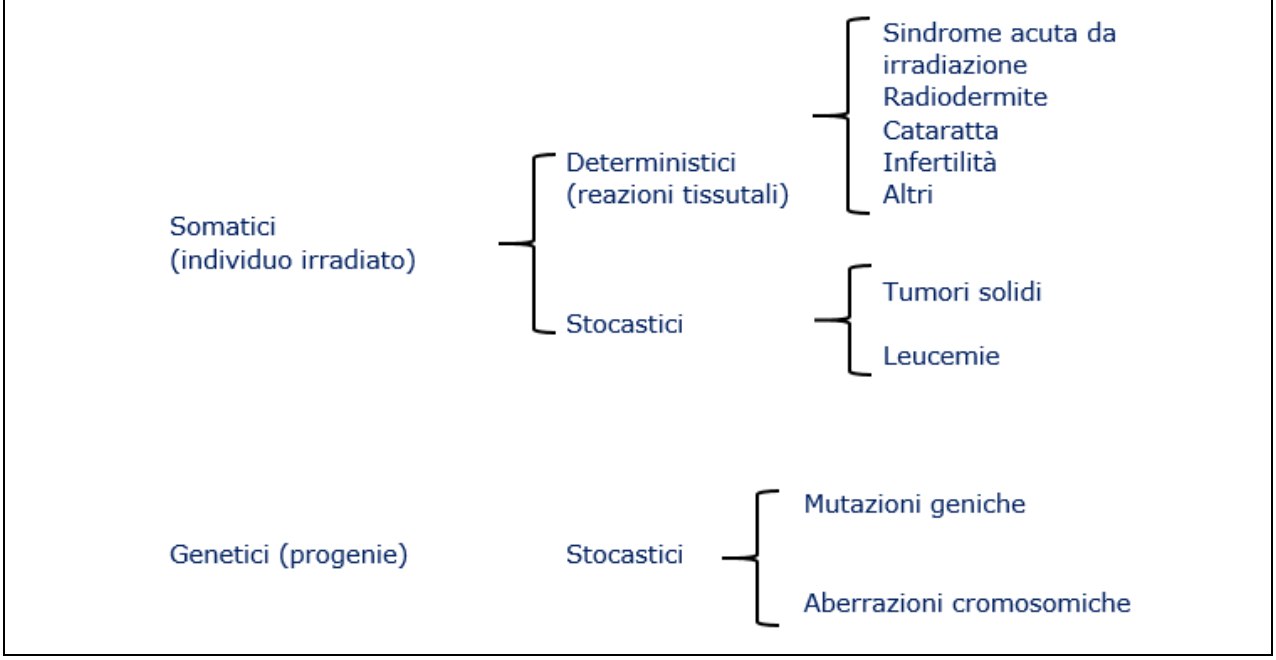
I danni fisici prodotti sull'essere umano dalle radiazioni ionizzanti possono essere distinti in tre categorie principali (vedi anche figura seguente):

- danni somatici deterministici;
- danni somatici stocastici (probabilistici);
- danni genetici stocastici.

Si dicono somatici i danni che si manifestano nell'individuo irradiato, genetici quelli che si manifestano nella sua progenie.

Autore: Silvana Di Stefano
Contarp

Figura n. 1	Classificazione dei danni da radiazioni ionizzanti



3. Danni somatici deterministici (o reazioni tissutali avverse)

Per danni deterministici (in passato denominati non stocastici/graduati) s'intendono quelli in cui la frequenza e la gravità variano con la dose e per i quali è individuabile una dose-soglia, ossia un livello di dose al di sotto del quale l'effetto non si manifesta (fino a tale livello sono sufficienti le capacità di riparazione del danno da parte dell'organismo). Sono stati definiti dall'ICRP (International commission on radiological protection) come "reazioni tissutali", da suddividere in "precoci" (da alcune ore a poche settimane dopo l'irradiazione, e che possono essere di tipo infiammatorio o da "perdita di cellule") e "tardive" (suddivise in "generiche", risultato di un danno diretto sul tessuto, e "consequenziali", esito di reazioni precoci gravi). Reazioni tissutali precoci e tardive non si escludono a vicenda ma spesso coesistono.

In particolare, le reazioni tissutali hanno in comune le seguenti caratteristiche:

- si manifestano soltanto al superamento di una dose-soglia[1] caratteristica di ogni effetto; in generale, dosi frazionate ed esposizioni croniche a basso rateo di dose sono meno nocive di quanto lo siano le dosi acute (l'effetto si manifesterà oltre una dose – soglia più alta);
- il periodo di latenza è solitamente breve (qualche giorno o qualche settimana): per questo tali effetti vengono anche definiti "effetti precoci". Solo in alcuni casi l'insorgenza è tardiva (la cataratta ad esempio può avere periodi di latenza di

[1] La dose-soglia per gli effetti deterministici è la dose stimata che determina un'incidenza di reazioni tissutali dell'1%, ovverosia la quantità di radiazione necessaria a causare uno specifico effetto osservabile soltanto nell'1% degli individui esposti alla radiazione.

anni);

- sono generalmente[2] attribuibili direttamente all'irraggiamento (relazione diretta causa - effetto);
- la gravità degli effetti aumenta al crescere della dose assorbita (da cui la precedente definizione di effetti graduati), espressa in Gy.

I danni deterministici sono effetti conseguenti a esposizioni a dosi elevate. Indicativamente la soglia di sensibilità dell'organismo "in toto" è, per un irraggiamento acuto, dell'ordine di 0,25 Gy, valore intorno al quale cominciano a manifestarsi le prime alterazioni ematologiche (un modesto, precoce e transitorio calo linfocitario), mentre la comparsa di qualche aberrazione cromosomica si verifica già per l'assorbimento di una dose di un fattore 2-3 volte più bassa.

Il valore della dose-soglia dipende oltre che dal tipo di tessuto e di effetto, anche dal tipo di radiazione e dalla distribuzione temporale dell'esposizione (generalmente la dose-soglia è più bassa per esposizioni acute rispetto a esposizioni frazionate o croniche, con qualche eccezione; ad esempio per la fertilità maschile la dose soglia tende a essere inferiore per esposizioni frazionate/protratte rispetto alle esposizioni singole – effetto inverso del frazionamento).

Secondo la valutazione dell'ICRP le dosi acute fino a circa 0,1 Gy non producono alcun danno funzionale dei tessuti. Tuttavia è stato evidenziato il rischio di reazioni tissutali avverse (effetti deterministici), a tempi molto lunghi dopo l'esposizione, principalmente per il cristallino dell'occhio e per il sistema circolatorio, nel caso di dosi accumulate superiori a 0,5 Gy.

4. Danni somatici stocastici

Gli effetti stocastici (probabilistici) si dividono in effetti somatici (che interessano l'individuo esposto) ed effetti genetici (che interessano la progenie degli esposti, trattati nel paragrafo successivo). Per gli effetti stocastici, convenzionalmente e per i fini della radioprotezione, si assume una probabilità non nulla di comparsa anche per dosi molto piccole e prossime allo zero.

I danni somatici stocastici comprendono le leucemie e i tumori solidi, su tessuti o organi dell'individuo esposto. In questo tipo di patologie soltanto la **probabilità d'accadimento**, e non la gravità, è funzione della dose. Danni di questo tipo hanno in particolare le seguenti caratteristiche:

- sono indistinguibili dai tumori indotti da altri cancerogeni;
- non richiedono il superamento di un valore-soglia di dose per la loro comparsa (ipotesi cautelativa ammessa per gli scopi preventivi della radioprotezione);
- sono a carattere probabilistico;

[2] Le cosiddette "reazioni tissutali tardive consequenziali" non sono attribuibili direttamente all'irraggiamento, ma avvengono come conseguenza di reazioni immediate dovute all'irraggiamento, per esempio la necrosi cutanea a seguito di grave ulcerazione della cute e di infezione cronica, e occlusioni intestinali causate da ulcerazione grave della mucosa.

- sono distribuiti casualmente nella popolazione esposta;
- sono dimostrati dalla sperimentazione radiobiologica e dall'evidenza epidemiologica (associazione causale statistica);
- la frequenza di comparsa è proporzionale alla dose equivalente assorbita (espressa in Sv);
- si manifestano dopo anni, talora decenni, dall'irradiazione;
- non mostrano gradualità di manifestazione con la dose ricevuta, quale che sia la dose.

Relativamente all'ultima caratteristica citata degli effetti stocastici, infatti, la gravità dell'effetto non dipende dalla dose assorbita, ma si ritiene valida la cosiddetta "legge del tutto o nulla"; invece è stato verificato che esiste una relazione[3] tra la dose e la probabilità di comparsa dell'effetto. Il rischio correlato a tali patologie non può essere esaminato con gli stessi metodi utilizzati per gli effetti deterministici (confronto dell'esposizione con la dose-soglia); d'altra parte, assumere che una dose estremamente piccola potrebbe comunque determinare la patologia è corretto, ma è necessario discriminare tra vari livelli di rischio.

Per i danni stocastici è ammessa in radioprotezione in via cautelativa, come principio di prudenza, una relazione dose-effetto di tipo lineare con estrapolazione passante per l'origine delle coordinate (ipotesi dell'estrapolazione lineare senza soglia, modello LNT – linear-no-threshold). L'elaborazione della relazione dose-effetto è avvenuta nel corso degli anni sulla base di osservazioni epidemiologiche che riguardano esposizioni a dosi medio-alte (sopravvissuti giapponesi alle esplosioni atomiche, pazienti sottoposti ad irradiazioni per scopi medici, esposizioni lavorative). I dati epidemiologici sono abbastanza numerosi per le alte dosi, sono piuttosto rari per le dosi medie e mancano per le piccole dosi.

L'assenza di evidenza epidemiologica alle basse dosi può essere correlata alla possibile inesistenza degli effetti radioindotti, oppure al "mascheramento" degli stessi che, pur presenti, non sono evidenziabili sul piano epidemiologico perché compresi nelle fluttuazioni statistiche dell'incidenza "naturale" o "spontanea" dei tumori. Pertanto, la stima del rischio di contrarre una leucemia o un tumore radioindotti viene abitualmente effettuata estrapolando alle basse dosi i dati delle alte dosi.

La stessa ICRP ritiene che il modello LNT sia una base prudente di riferimento per la radioprotezione a basse dosi (e a bassi ratei di dose), e costituisca al momento il miglior approccio per gestire il rischio derivante dall'esposizione alle radiazioni, adeguato al principio di precauzione.

5. Danni genetici stocastici

Per effetti genetici si intendono le manifestazioni patologiche che si presentano nella discendenza a seguito del danno indotto dalle radiazioni ionizzanti sulle cellule della

[3] A dosi inferiori a 100 mSv è plausibile assumere ai fini radioprotezionistici che tale relazione sia lineare (modello dose-risposta LNT "Lineare senza soglia").

linea germinale dei genitori e che possono estrinsecarsi sia in malformazioni sull'embrione e sul feto che in malattie ereditarie.

Anche nel caso degli effetti genetici va evidenziato che quelli radioindotti non hanno una specificità che consenta di distinguerli da quelli che si manifestano in modo apparentemente spontaneo e dovuto ad altre svariate ragioni.

Inoltre l'induzione da parte delle radiazioni ionizzanti di effetti genetici nella discendenza non è stata dimostrata epidemiologicamente: gli studi riportano associazioni negative tra esposizione a radiazioni ionizzanti e danni genetici nella progenie, relativamente ai discendenti delle popolazioni esposte all'incidente di Chernobyl, così come nei discendenti dei sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki.

Esistono tuttavia studi sperimentali su animali da laboratorio, che indicano prove certe di danni genetici sulla progenie di esposti a radiazioni ionizzanti; quindi, in via cautelativa, vengono considerati anche questi rischi sulla specie umana per estrapolazione dalle sperimentazioni su animali, ai fini radioprotezionistici.

Il meccanismo di induzione degli effetti genetici stocastici è analogo a quello che sta alla base degli effetti stocastici somatici, con la differenza che per questi effetti le aberrazioni cromosomiche o le mutazioni genetiche riguardano le cellule riproduttive anziché somatiche. L'evidenziazione delle alterazioni del patrimonio genetico è visivamente possibile nel caso che l'alterazione consista in una modificazione numerica o morfologica dei cromosomi. Le mutazioni geniche, se dominanti, compaiono in prima generazione; se recessive, nelle successive o mai. Le aberrazioni cromosomiche (in genere traslazione) vengono eliminate in poche generazioni.

Bibliografia

- ICRP, 2012. ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41;
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37;
- Scienza e ambiente - Conoscenze scientifiche e priorità ambientali, cap.2 "Radiazioni ionizzanti: gli effetti, il rischio, l'informazione e le norme", Comitato Scientifico ANPA, Documenti 1/2002.

Data di chiusura del documento

Febbraio 2022

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it

La normativa prevenzionale

1. Premessa

Vengono di seguito introdotte e brevemente descritte le principali norme riguardanti la protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione dagli effetti dannosi delle radiazioni ionizzanti.

2. La normativa pregressa

L'impostazione della normativa di protezione dalle radiazioni ionizzanti ha seguito un criterio di privilegio e di maggior rigore nei confronti di altre *noxae* lavorative ed ambientali.

Il legislatore ha elaborato a tal proposito una serie di leggi, prima delle quali la **l. 3/12/1922, n. 1636** recante *"Provvedimenti per la ricerca e la utilizzazione delle sostanze radioattive"*, che si occupava solo dei relativi problemi dell'amministrazione mineraria. Uno dei punti salienti di questa legge è il riconoscimento dei pieni poteri alla "Commissione delle sostanze radioattive", già istituita con decreto luogotenenziale 30/03/1919, n. 472, che sostituisce, per la specifica materia, il Consiglio superiore delle miniere.

Seguirono altri provvedimenti legislativi fino ad un inquadramento più organico del settore nel **r.d. 29/07/1927, n. 1443**, recante norme per la disciplina della ricerca e della coltivazione delle miniere; i profili sanitari connessi all'impiego sempre più intenso delle sostanze radioattive a scopo terapeutico trovarono un assetto più organico nel T.U. sanitario approvato con **r.d. 27/7/1934, n. 1265** (artt. 194-198 e 386-387) e nel relativo regolamento di applicazione per la disciplina degli impianti di radiologia e di *radiumterapia* approvato con **r.d. 28/1/1935, n. 145**. Le radiazioni ionizzanti iniziarono ad essere considerate anche nell'ottica della protezione della salute dei lavoratori e pertanto furono dettate apposite disposizioni all'interno delle leggi sulle malattie professionali e sugli infortuni sul lavoro, sulla tutela del lavoro delle donne e dei fanciulli, sull'igiene del lavoro in generale e sulle lavorazioni minerarie.

Con la ratifica, da parte dell'Italia, del Trattato istitutivo della Comunità Europea dell'energia atomica (CEAA o *Euratom*), -con competenze esclusivamente nel settore dell'energia nucleare e pacifica- (Euratom - l. 14/10/1957, n. 1203) e firmato a Roma il 25 marzo 1957, il nostro legislatore cominciò ad assolvere agli obblighi comunitari con la pubblicazione della **l. 31/12/1962, n. 1860**, *"Impiego pacifico dell'energia nucleare"*

introducendo un regime giuridico per il quale la detenzione, il commercio, l'impiego ed il trasporto di materie radioattive erano assoggettati ad un complesso di adempimenti in fatto di denunce e di autorizzazioni, con competenze plurime e di non sempre agevole coordinamento pratico, anche nel campo della vigilanza ispettiva. Il trattato della CEAA è rimasto praticamente invariato dalla data di entrata in vigore, anche dopo quello di Lisbona del 2007, entrato in vigore il 2009, auspicando solamente la convocazione di una conferenza di revisione del trattato CEEA.

La l. 1860/62 conteneva, tra l'altro, anche una delega al Governo per l'emanazione di "norme per la sicurezza degli impianti e la protezione della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti" che fu adempiuta con il **d.p.r. 13/2/1964, n. 185** *"Sicurezza degli impianti e protezione sanitaria dei lavoratori e delle popolazioni contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti derivanti dall'impiego pacifico dell'energia nucleare"* con il quale, tra l'altro:

- furono istituiti organi centrali e periferici di coordinamento, di consultazione e di controllo nell'utilizzazione delle materie radioattive, stabilendone le competenze e gli strumenti giuridico-amministrativi cui potevano fare ricorso;
- furono ulteriormente disciplinate la detenzione delle materie radioattive, il loro impiego, trasporto e commercio, introducendo un articolato sistema di obblighi e di autorizzazioni preventive;
- furono dettate disposizioni per la progettazione, la costruzione, il collaudo e la gestione degli impianti nucleari, il controllo e la sicurezza degli stessi ed i piani di emergenza da attivare in caso di incidenti;
- furono stabilite ulteriori norme in materia di lavorazioni minerarie e disposizioni concernenti la sorveglianza fisica e medica, nonché norme sullo smaltimento dei rifiuti radioattivi e sul controllo della radioattività ambientale;
- fu organizzata la protezione sanitaria dei lavoratori, istituendo le figure dell'esperto qualificato e del medico autorizzato (rispettivamente, art. 71 e 76) ai quali erano attribuiti specifici compiti e attribuzioni;
- fu stabilita l'opportunità di fissare dosi e concentrazioni massime ammissibili per varie tipologie di lavoratori per irradiazione globale o parziale dell'organismo (art. 87): a questo articolo è stata data attuazione con il **d.m. 06/06/68**.

Lo sforzo legislativo che si è registrato a cavallo degli anni '70 per aggiornare e adeguare la materia continua con l'emanazione del **d.p.r. 1428/68,** dove furono stabiliti i tipi di macchine radiogene il cui impiego può determinare rischi da radiazioni ionizzanti, mentre la definizione delle dosi massime ammissibili per la popolazione, ai sensi del d.p.r. n. 185/64, fu attuata con il **d.m. 02/02/71**. Successivamente, i **dd.mm. n. 1150/72 e 15/02/74** regolamentarono le procedure di incarico e di iscrizione di esperti qualificati e medici autorizzati, riordinati con il d.lgs. 230/95 e ora con l'attuale d.lgs. 101/2020.

Anche la documentazione relativa alla sorveglianza fisica e medica fu uniformata a partire dal 1° gennaio 2001 a seguito dell'abrogazione del **d.m. 449/90**, attuata dal d.lgs. 241/00.

Con l'emanazione del **d.lgs. 17/03/1995 n. 230** che, nella versione aggiornata fino alla sua abrogazione, recepiva quattro direttive Euratom in materia di radiazioni ionizzanti, una direttiva in materia di sicurezza nucleare degli impianti nucleari e una in materia di gestione sicura del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi derivanti da attività civili, viene abrogato il d.p.r. 185/64 e si assiste al primo vero sistematico riassetto normativo, precisando che tutti i riferimenti al d.p.r., presenti in leggi, decreti, regolamenti, circolari, dovevano essere riferiti alla nuova norma.

Il testo nativo è stato integrato ed aggiornato nel corso di quasi un ventennio da 12 decreti legislativi e da 2 leggi, a partire dal 26 maggio 2000 fino all'ultima modifica del 2 gennaio 2018, oltre che da alcuni decreti ministeriali "di corredo", nell'attuazione delle condizioni di applicazione del decreto stesso, le cui disposizioni dovevano essere aggiornate in relazione agli sviluppi della tecnica e alle direttive e raccomandazioni UE, individuando specifiche modalità di applicazione per attività e situazioni particolari, come quelle finalizzate alle esposizioni a sorgenti naturali di esposizione.

Il testo del decreto è stato così applicato per tutte le pratiche comportanti un rischio di esposizione da radiazioni ionizzanti provenienti da sorgenti artificiali o naturali, alla costruzione, esercizio e disattivazione degli impianti nucleari, nelle attività lavorative condotte in particolari luoghi di lavoro, come tunnel, sottovie, catacombe, grotte, nonché in stabilimenti termali, nello svolgimento di tutte le attività estrattive, su aerei limitatamente al personale navigante e negli interventi in caso di esposizione prolungata dovuta agli effetti di qualsiasi emergenza o di una pratica o di un'attività lavorativa non più in atto. In tali contesti di esercizio sono state adottate disposizioni a tutela dell'intera popolazione oltre che di particolari categorie di lavoratori.

Ma si avvertì, quasi nell'immediatezza, la necessità di un rinnovamento dell'impianto normativo inerente la protezione del paziente nelle pratiche radiodiagnostiche, visto che non era stata sufficiente l'esperienza di un trentennio di applicazione del d.p.r. 185/64, probabilmente per la scarsa attenzione al problema, a cui il decreto aveva dedicato due soli articoli.

Il **d.lgs. 26/05/2000, n. 187** si affianca quindi al d.p.r. 230/95 abrogandone gli artt. da 109 a 114, individuando nel suo campo di applicazione i soggetti che non rientrano nel campo professionale o lavorativo, come i pazienti, i familiari che prestano assistenza, i volontari per scopi di ricerca, riservando un'attenzione particolare alle donne in stato di gravidanza o allattamento e ai bambini. Per ciascuna categoria, non sono definiti limiti di dose come per i lavoratori, ma livelli di dose di riferimento e vincoli di dose per la pianificazione della radioprotezione. Vengono infatti precisati i criteri per la valutazione della dose al paziente e i vincoli di dose per coloro che assistono e confortano persone sottoposte ad esposizioni mediche, vietando espressamente per quest'ultima categoria l'esposizione dei minori di 18 anni e delle donne con gravidanza in atto. Tutto ciò, nell'ottica del principio di giustificazione e ottimizzazione, che rimanda all'allegato III per le relative procedure, assieme ai livelli diagnostici e di riferimento da usare nei programmi di assicurazione di qualità, le cui linee guida sono riportate in allegato II.

3. La normativa vigente

Il **decreto legislativo 31 luglio 2020 n. 101**, entrato in vigore il 27 agosto 2020, recepisce la direttiva 2013/59/Euratom in tema di protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione a radiazioni ionizzanti, abrogando contestualmente le precedenti direttive recepite nel corso degli anni dal d.lgs. 230/95 e riordinando la relativa normativa di settore.

Il recepimento della direttiva non è stato immediato né agevole. Infatti, a seguito della legge di delegazione europea 2014 fu istituito un tavolo tecnico su richiesta della Direzione generale per l'approvvigionamento, l'efficienza e la competitività energetica del Ministero dello sviluppo economico che portò all'elaborazione di un documento ad aprile del 2017 in prossimità della scadenza della legge di delegazione, che però non approdò in Consiglio dei ministri. I lavori ripresero nella primavera del 2019 sotto il diretto coordinamento della Presidenza del Consiglio, per arrivare con la legge di delegazione europea 2018, ad una nuova delega al Governo con nuovi criteri di recepimento. Dopo l'approvazione in Consiglio dei ministri a gennaio 2020 ed il successivo passaggio consultivo in Conferenza Stato-Regioni e nelle Commissioni parlamentari competenti, il testo è stato approvato in CdM il 29 luglio e pubblicato in GU il 12 agosto 2020. Per questi ritardi, è stata avviata nei confronti dell'Italia la procedura d'infrazione n. 2018/2044 per il mancato recepimento entro la data di scadenza della direttiva, prevista per il 6 febbraio 2018 ed il deferimento dell'Italia alla Corte di giustizia dell'Unione europea per mancato recepimento, in quanto, come si legge nel comunicato del 25 luglio 2019, *"Le autorità italiane non hanno adottato alcuna legge di recepimento della direttiva, o comunque non la hanno notificata alla Commissione"*.

Il decreto, aggiornato all'ultima modifica con il d.l. 26 novembre 2021 n. 172, si compone di 245 articoli ripartiti in 17 titoli e 35 allegati.

Il corpo normativo è così strutturato:

- Titolo I - *Campo di applicazione e principi generali di protezione delle radiazioni ionizzanti* (artt. 1 - 6);
- Titolo II - *Definizioni* (art. 7);
- Titolo III - *Autorità competenti e funzioni di vigilanza* (artt. 8 - 9);
- Titolo IV - *Sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti* (artt. 10 - 29);
- Titolo V - *Lavorazioni minerarie* (artt.30 - 35);
- Titolo VI - *Regime giuridico per importazione, produzione, commercio trasporto e detenzione* (artt. 36 - 45);
- Titolo VII - *Regime autorizzatorio e disposizioni per i rifiuti radioattivi* (artt. 46 - 61);
- Titolo VIII - *Particolari disposizioni per le sorgenti sigillate ad alta attività e le sorgenti orfane* (artt. 62 - 75);
- Titolo IX - *Impianti* (artt. 76 - 101);

- Titolo X - *Sicurezza degli impianti nucleari e degli impianti di gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi* (artt. 102 - 105);
- Titolo XI - *Esposizione dei lavoratori* (artt. 106 - 146);
- Titolo XII - *Esposizione della popolazione* (artt. 147 - 155);
- Titolo XIII - *Esposizioni mediche* (artt. 156 - 171);
- Titolo XIV - *Preparazione e risposta alle emergenze* (artt. 172 - 197);
- Titolo XV - *Particolari situazioni di esposizione esistente* (artt. 198 - 204);
- Titolo XVI - *Apparato sanzionatorio* (artt. 205 - 231);
- Titolo XVII - *Norme transitorie e finali* (artt. 232 - 245).

3.1 Il campo di applicazione

Il campo di applicazione riguarda qualsiasi situazione di esposizione pianificata, esistente o di emergenza a radiazioni ionizzanti che non può essere trascurata sia ai fini della radioprotezione sia per quanto riguarda l'ambiente ai fini della protezione umana a lungo termine.

Le esclusioni riguardano la radiazione naturale al livello del suolo, l'esposizione cosmica e quella risultante dalla presenza di radionuclidi sia nell'organismo umano che nella crosta terrestre non perturbata; mentre nelle attività di volo o missioni nello spazio, sono esclusi per l'esposizione cosmica tutti i soggetti che non fanno parte dell'equipaggio.

Gli altri limiti di applicazione sono stabiliti in alcuni titoli sotto particolari condizioni, come ad esempio prevede l'art. 23 comma 1, che esclude dal campo di applicazione del decreto i solidi, i liquidi o gli aeriformi contenenti radionuclidi di origine naturale *(Titolo IV – Sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti)* che provengono da pratiche soggette a notifica, purché rispettino tutte le condizioni di non rilevanza radiologica previste dall'allegato II; o l'art. 54 *(Titolo VII – Regime autorizzatorio e disposizioni per i rifiuti radioattivi)*, che per gli stessi materiali rimanda all'allegato I; ed ancora, l'esenzione del nulla osta preventivo per talune pratiche (art. 59), compreso l'impiego di microscopi elettronici.

3.2 Le novità maggiormente rilevanti in materia di radioprotezione

Se si considera che all'interno del d.lgs. 101/2020 il d.lgs. 81/2008 è citato 18 volte (ad esclusione degli allegati e delle note agli articoli) contro le 7 volte del d.lgs. 230/95 nei confronti del d.lgs. 626/94, si intuisce una maggiore integrazione fra il 101 e l'81, con la naturale premessa dell'art. 2, secondo cui tutto ciò non diversamente previsto dal decreto 101, trova la sua applicazione nel decreto 81 e nell'aggiornamento attuato dall'art. 244 nei confronti dell'art. 180 del decreto 81, specificando la distinzione normativa della protezione dei lavoratori dalle radiazioni ionizzanti, rispetto alle altre tipologie di rischi lavorativi. Ovviamente, i riferimenti maggiormente ricorrenti si riscontrano nel titolo XI – *Esposizione dei lavoratori* e, in misura minore, nel titolo IV - *Sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti* e nel titolo XIII – *Esposizioni mediche*. In particolare, viene finalmente ratificata la collaborazione tra esperto di radioprotezione (già esperto qualificato per il 230/95) e RSPP, che il datore

di lavoro deve garantire ed il chiaro rimando al documento di valutazione dei rischi (DVR) degli articoli 17 e 28 del decreto 81 per misurazioni, relazioni e valutazioni in termini di rischio da radiazioni ionizzanti, che ne fanno così parte integrante. Riguardo l'esperto in radioprotezione, il decreto introduce un nuovo grado di abilitazione, che si aggiunge ai tre precedenti: abilitazione di terzo grado sanitario, per la sorveglianza fisica delle sorgenti di radiazioni diverse da quelle previste per le abilitazioni di primo e secondo grado e che siano utilizzate esclusivamente a fini medici all'interno di strutture sanitarie, con l'esclusione quindi delle sorgenti previste dal 3° grado e richiamati nelle definizioni dell'art. 7, come per esempio, impianti nucleari di potenza, di ricerca per il trattamento di combustibili irradiati (art. 7, numeri 16, 63, 66, 67, 68, 69 e 116).

Lo Specialista in fisica medica, che sostituisce l'Esperto in fisica medica, è una figura introdotta dall'art. 83 della direttiva 59/2013/Euratom, ruolo ricoperto da una professione sanitaria quale è il fisico specialista in fisica medica e a cui sono affidati specifici compiti di collaborazione con l'esercente, il responsabile dell'impianto radiologico, il medico specialista, il tecnico sanitario di radiologia medica, l'esperto in radioprotezione ed il medico autorizzato, fornendo consulenza specialistica nell'ambito delle esposizioni a scopo medico, sulle questioni riguardanti la fisica delle radiazioni in relazione al rispetto dei requisiti del titolo XIII, avendo in via esclusiva la responsabilità della misura e della valutazione delle dosi assorbite dai soggetti che a vario titolo sono esposti a radiazioni *(pazienti, lavoratori soggetti a sorveglianza sanitaria o a programmi di screening sanitario, pazienti volontari nell'ambito della ricerca, persone nell'ambito di procedure a scopo non medico, persone che assistono e confortano persone sottoposte ad esposizioni mediche)* nonché la responsabilità della scelta della strumentazione da impiegarsi nell'ambito della dosimetria sul paziente e dei controlli di qualità da effettuarsi sulle attrezzature medico-radiologiche.

Una nuova figura, introdotta non dalla direttiva, ma solo dalla normativa italiana, è l'Esperto in interventi di risanamento radon, un tecnico (geometra, ingegnere o architetto) iscritto all'albo e che abbia frequentato un corso dedicato a carattere universitario di 60 ore, per porre in atto le misure correttive per la riduzione della concentrazione di radon negli edifici.

In tema di sorveglianza sanitaria, la novità più rilevante è l'affidamento al medico autorizzato di tutti i lavoratori esposti, compresi apprendisti e studenti, sia di categoria A che di categoria B e non più suddivisa tra il medico competente per gli esposti di categoria B ed il medico autorizzato per gli esposti di categoria A. In deroga a quanto previsto dal decreto, i medici competenti che alla data della sua entrata in vigore svolgevano tale attività sui lavoratori di categoria B, possono continuare a farlo per altri 24 mesi, cioè fino al 27 agosto 2022.

Nell'ambito del titolo XIII, un'importante novità è rappresentata dalla riduzione del limite di dose equivalente al cristallino per i lavoratori esposti, che è passato da 150 mSv/anno a 20 mSv/anno. Tale riduzione si ripercuote quindi anche nelle definizioni per la classificazione dei lavoratori (art. 133): infatti sono classificati in categoria A i lavoratori esposti che in un anno solare sono suscettibili di un'esposizione superiore

ad uno dei seguenti valori: 6 mSv di dose efficace, 15 mSv di dose equivalente per il cristallino (originariamente era 45 mSv), 150 mSv per la pelle e le estremità; sono invece classificati in categoria B i lavoratori esposti che non rientrano nella categoria A e quindi quelli che in un anno solare sono suscettibili di un'esposizione compresa tra i limiti per la popolazione e i lavoratori esposti di categoria A.

La tabella 1 che segue riassume i limiti di dose attualmente in vigore.

Tabella n. 1	Limiti di dose individuale previsti per anno solare			
SOGGETTI	**Dose efficace (mSv)**	**Dose equivalente (mSv)** (a)		
		estremità	pelle	cristallino
Popolazione, lavoratori non esposti (b)	1	-	50	15
Lavoratori esposti (c) Apprendisti/studenti, età ≥ 18 (d)	20	500	500	20
Apprendisti/studenti, 16 ≤ età < 18 (d)	6	150	150	15
Apprendisti/studenti, età ≥ 16 (e) (g) Apprendisti/studenti, età < 16 (f) (g)	0,5	25	25	7,5

Fonte: art. 120 *(apprendisti e studenti)*; art. 133 *(Classificazione dei lavoratori e degli ambienti di lavoro)*; art. 146 *(limiti di dose)*.

(a) Il limite di ogni Dose equivalente si applica nel rispetto del limite della corrispondente Dose efficace.

(b) Sono considerati "lavoratori non esposti" i soggetti che non siano suscettibili di superare uno qualsiasi dei limiti fissati per gli individui della popolazione.

(c) Sono classificati "lavoratori esposti" i soggetti suscettibili di superare in un anno solare uno o più dei seguenti valori: *I)* 1 mSv di dose efficace; *II)* 15 mSv di dose equivalente per il cristallino; *III)* 150 mSv di dose equivalente per la pelle calcolato in media su 1 cm^2 qualsiasi di pelle; *IV)* 50 mSv di dose equivalente per le estremità. I lavoratori esposti possono essere di categoria "A" o "B": i primi sono suscettibili, in un anno solare, di un'esposizione superiore ad uno dei seguenti valori 6 mSv di dose efficace, 15 mSv di dose equivalente per il cristallino, 150 mSv di dose equivalente per la pelle e le estremità; i lavoratori di categoria "B" sono lavoratori esposti che non rientrano nella categoria "A".

(d) apprendisti e studenti che si avviano ad una professione nel corso della quale saranno esposti a radiazioni ionizzanti, o i cui studi implicano necessariamente l'impiego di sorgenti di radiazioni ionizzanti.

(e) apprendisti e studenti che non si trovano nelle condizioni precedenti.

(f) apprendisti e studenti di età inferiore a 16 anni.

(g) la dose ricevuta per ogni singola esposizione non può superare un ventesimo dei limiti della popolazione.

I limiti di dose individuale si riferiscono alle due possibili modalità di esposizione delle persone: irraggiamento esterno e interno. Nell'irraggiamento esterno la sorgente, apparecchiatura radiogena o materiale radioattivo, è esterna all'individuo e l'esposizione cessa confinando la sorgente ovvero allontanando il soggetto dalla zona a rischio e provvedendo ad una adeguata decontaminazione se la sostanza radioattiva ha contaminato esternamente l'interessato (pelle o abiti). L'irraggiamento interno si

ha quando il materiale radioattivo penetra nell'organismo. In questo caso, l'esposizione termina solo con la rimozione dal corpo del radionuclide contaminante, che avviene per decadimento radioattivo e attraverso i processi metabolici di escrezione corporea: urine, feci, sudore ed aria esalata. Il metabolismo della sostanza contaminante influisce sul tempo di ritenzione nell'organismo e dipende dalle proprietà fisiche e chimiche del contaminante e dalla modalità di introduzione che, di solito, avviene per ingestione, inalazione o assorbimento cutaneo o attraverso ferite. L'esposizione è proporzionale all'attività introdotta e al tempo di ritenzione della sostanza nel corpo, che può essere di alcune ore, di alcuni anni o pari alla durata della vita del soggetto contaminato.

I limiti di dose assicurano la protezione dai danni deterministici e rendono accettabili, pur non annullandoli, quelli stocastici, siano essi somatici o genetici. Di conseguenza, anche rispettando i limiti, rimangono comunque da considerare i danni stocastici per i quali, in via cautelativa, è ammessa una relazione direttamente proporzionale tra dose e probabilità di insorgenza dell'effetto. E poiché il rischio individuale deve essere ridotto al minimo, a meno di rinunciare ai benefici che le radiazioni apportano alla nostra società, si deve provvedere affinché la dose assorbita dalle persone sia la più bassa (ragionevolmente) possibile. Da questa semplice constatazione deriva il disposto dell'art. 1 del d.lgs. 101/2020 che, in continuità con quanto prevedeva il 230/95 nell'accogliere le raccomandazioni internazionali, formulati per la prima volta nella pubblicazione n. 26 del 1977 dalla Commissione internazionale per la protezione radiologica (ICRP) e ridefiniti nella Pubblicazione n. 60 del 1990, è il fondamento su cui si basa il sistema di protezione radiologica. Nelle sue Raccomandazioni 2007 (ICRP, 2007d), la Commissione ha formulato una serie di principi che si applicano in ugual misura a situazioni pianificate, di emergenza ed esistenti, e chiarisce come i principi fondamentali (giustificazione, ottimizzazione della protezione, applicazione dei limiti di dose) si applicano alle sorgenti di radiazioni e agli individui, così come i principi relativi alla sorgente (giustificazione ed ottimizzazione della protezione) si applicano a tutte le situazioni di esposizione. I due seguenti principi relativi alla sorgente definiti dalla ICRP e rimodulati nelle definizioni dell'art. 1, comma 4 lett. *a)* e *b)* si applicano in tutte le situazioni di esposizione:

- **giustificazione**: "qualsiasi decisione che modifica la situazione esistente di esposizione alle radiazioni (per esempio introducendo una nuova sorgente di radiazioni o riducendo l'esposizione esistente) dovrebbe apportare più beneficio che danno. Questo significa che, introducendo una nuova sorgente di radiazione, riducendo l'esposizione esistente, o riducendo il rischio di esposizione potenziale, si dovrebbe ottenere un beneficio individuale o per la società sufficiente a controbilanciare il detrimento causato";

- **ottimizzazione:** "la probabilità di incorrere in esposizioni, il numero di persone esposte e l'entità delle loro dosi individuali, dovrebbero essere tenute tanto basse quanto ragionevolmente ottenibile, in considerazione dei fattori economici e sociali. Questo significa che il livello di protezione dovrebbe essere il migliore ottenibile nelle circostanze considerate, massimizzando il margine di beneficio rispetto al danno. Per evitare che questo procedimento di ottimizzazione possa

determinare gravi disuguaglianze, ci dovrebbero essere restrizioni sulle dosi o sui rischi per gli individui derivanti da una specifica sorgente (vincoli di dose o di rischio e livelli di riferimento)".

La Commissione utilizza il termine "vincolo di dose" nelle situazioni di esposizione programmata e il "livello di riferimento" per le situazioni di esposizione di emergenza ed esistenti. Sebbene, però, l'esposizione medica dei pazienti sia una situazione programmata, il vincolo di dose non è applicabile e lo strumento utilizzato per l'ottimizzazione della protezione nell'esposizione medica dei pazienti è il "livello diagnostico di riferimento[1]".

Il principio relativo all'individuo si applica nelle situazioni di esposizione programmata, esclusa l'esposizione medica ai pazienti:

- **limitazione delle dosi**: "la dose totale a ogni individuo da tutte le sorgenti regolamentate nelle situazioni di esposizione programmata, all'infuori dell'esposizione medica di pazienti, non dovrebbe superare gli appropriati limiti raccomandati dalla Commissione (che il decreto definisce nei limiti fissati per l'esposizione professionale o del pubblico)".

Questa necessità rende indispensabile la registrazione delle dosi assorbite dal singolo lavoratore presso tutte le sedi lavorative e ha dato origine alla disciplina specifica per le imprese esterne. Poiché i danni da cui si devono proteggere i lavoratori sono ritardati nel tempo, l'archiviazione documentale delle esposizioni individuali (schede sanitarie e dosimetriche e documentazione di sorveglianza fisica in generale) è prevista tra le misure da predisporre nei confronti dei lavoratori tutelati.

Rispetto al passato, questo principio adesso si applica anche agli assistenti, a coloro cioè che assistono e confortano persone sottoposte ad esposizioni mediche, secondo le procedure descritte nell'allegato XXV; in particolare, i vincoli di dose efficace risultano essere i seguenti:

a) soggetti di età compresa tra 18 e 60 anni: 3 mSv/trattamento;

b) soggetti di età superiore a 60 anni: 15 mSv/trattamento.

Anche gli indici di rischio di mortalità per unità di dose efficace (tumori solidi e leucemie) e genetici (mutazioni e danni alla progenie fino alla terza generazione), sono stati rivisti e quindi aggiornati da parte della ICRP (Pubbl. n. 103), che ha calcolato in modo diverso da quelli riportati nella Pubblicazione 60 i coefficienti nominali di probabilità per le neoplasie. La stima corrente è basata sui dati di incidenza delle neoplasie, pesati per la mortalità e la qualità di vita, mentre nella Pubblicazione 60 il detrimento era basato sul rischio di neoplasia mortale pesato in modo da tenere conto delle neoplasie non letali, dell'accorciamento relativo della vita

[1] Ultimo aggiornamento: Rapporti ISTISAN 20|22 – Livelli diagnostici di riferimento per la pratica nazionale di radiologia diagnostica e interventistica e di medicina nucleare diagnostica – aggiornamento del Rapporto ISTISAN 17/33. ISS; (2020).

nel caso di neoplasie mortali e per la qualità di vita per le neoplasie non mortali. I coefficienti di rischio nominale corretti per il detrimento riferito al cancro, basati sui dati di incidenza del cancro, sono $5{,}5 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} per l'intera popolazione e $4{,}1 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} per i lavoratori adulti; i rispettivi valori nella Pubblicazione 60 erano $6{,}0 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} e $4{,}8 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1}. I coefficienti di rischio nominale corretti per il detrimento riferito alle malattie ereditarie fino alla seconda generazione *(*in considerazione dei dati disponibili e delle analisi recenti di UNSCEAR (2001) e NAS/NRC (2006), la posizione della Commissione è stata di estendere i rischi genetici fino alla seconda generazione e non più alla terza della Pubblicazione 60*)* sono $0{,}2 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} per l'intera popolazione e $0{,}1 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} per i lavoratori adulti; i rispettivi valori nella Pubblicazione 60 erano $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} e $0{,}8 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} (vedi tabella 2).

Tabella n. 2	Coefficienti di rischio nominale modificati per il detrimento per cancro ed effetti ereditari					
Soggetti esposti	Detrimento sanitario (10^{-2} Sv^{-1})					
	Cancro		Effetti ereditari		Totale	
	Attuale	ICRP 60	Attuale	ICRP 60	Attuale	ICRP 60
Intera popolazione	5,5	6,0	0,2	1,3	5,7	7,3
Lavoratori adulti	4,1	4,8	0,1	0,8	4,2	5,6

Fonte: ICRP publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" - Annals of the ICRP Volume 37/2-4, 2008.

Tali indici derivano da studi epidemiologici che si basano su livelli di dose superiori a quelli assorbiti dalla popolazione; per questi ed altri motivi la loro validità, così come la dipendenza lineare tra rischio e dose, sono messe in discussione da più parti. Gli indici di rischio sono utili (e indispensabili) per la definizione di un sistema organico di gestione della radioprotezione e per la valutazione della incidenza dei danni da radiazione su gruppi di lavoratori e sulla popolazione nel suo insieme, ma non sono appropriati per valutare il rischio individuale della singola persona esposta ad un livello di dose prestabilito. Sulla base degli indici di rischio si può stimare - ai fini della pianificazione della radioprotezione - un rischio di contrarre il cancro pari a 5,5 casi ogni 100.000 lavoratori adulti esposti a 1 mSv di dose efficace; si tenga presente che una professione è considerata sicura se il rischio è inferiore o pari a 10 decessi ogni 100.000 addetti.

L'esposizione della popolazione può essere indicativa anche per valutare il rischio di carcinoma polmonare derivante dalla esposizione al radon nelle abitazioni italiane, ove la concentrazione media è di 70-75 Bq/m^3, cui corrisponde una dose efficace > 1,9 mSv/anno (vedi tabella 3).

Tabella n. 3	Dosi assorbite dalla popolazione per esposizione a sorgenti naturali e mediche	
Fonte o origine	**Dose efficace (mSv/anno)**	
	Italiana (a)	Mondiale (b)
Gamma ambiente nei luoghi chiusi	0,5	0,4
Altre sorgenti naturali (*)	1,0	1,0
Radon indoor e prodotti di decadimento	1,9	1,0
Totale delle esposizioni al fondo naturale	3,4	2,4
Esposizioni mediche	1,8(**)	0,6

Fonte: Vergine A. L., Giroletti E. Radiazioni ionizzanti. Protezione della popolazione dei lavoratori e dei pazienti. Sistemi editoriali Esselibri – Simone. Napoli. Ed. 2005.
(*) il valore italiano è presumibilmente sottostimato per la presenza di radon 220, Toron, la cui concentrazione in aria è superiore alla media mondiale.
(**) dato medio europeo (è superiore alla media mondiale in quanto la maggior parte della popolazione mondiale non accede a trattamenti radiologici).

Nel Piano sanitario nazionale (PSN) 1998-2000 era stato evidenziato come il 5-20% dei casi di neoplasia polmonare osservati nella popolazione italiana fosse attribuibile all'esposizione al radon, equivalente a circa 1500-6000 casi l'anno. Il PSN 2001-2003 ha trattato l'argomento appena marginalmente, mentre quello del 2003-2005 è entrato nel merito su una stima di possibile riduzione dei casi di tumore polmonare a seguito di bonifica delle abitazioni italiane per il radon presente nei materiali da costruzione, aspetto ribadito nell'ultimo PSN, quello del 2006-2008. In questo senso, il dettato dell'art. 10 – Piano nazionale d'azione per il radon, rappresenta un obbligo giuridico a quanto già l'Italia aveva predisposto con il documento del 2002, previsto esplicitamente dall'"Accordo tra il Ministro della salute, le regioni e le province autonome sul documento <<Linee-guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati>> del 27 settembre 2001 e coordinato dal 2005 dall'ISS, che gestisce anche l'Archivio nazionale radon[2]. I soggetti più colpiti sono sempre i fumatori, a causa dell'effetto sinergico del fumo e sussistono sempre meno incertezze sul rischio per i non fumatori e sull'interazione tra radon e fumo passivo. I trattamenti medici, diagnostici o terapeutici con radiazioni ionizzanti dei pazienti costituiscono, dopo il radon, la principale fonte di esposizione della popolazione italiana.

Il d.lgs. 101/2020 introduce diverse novità nel sistema regolatorio della radioprotezione, rispetto a quanto già avesse fatto il d.lgs. 241/2000, per quanto concerne l'esposizione alle sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti:

1. Radon: rientrano nel campo di applicazione del decreto la protezione dall'esposizione al radon negli ambienti di vita, che era esplicitamente esclusa

[2] Piano Nazionale Radon del 2002: https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_2436_allegato.pdf. Tabelle riassuntive suddivise per regione di monitoraggio indoor: http://radon.iss.it/2019/09/03/archivio-nazionale-radon/

nella normativa precedente; nuove importanti modifiche per l'esposizione al radon negli ambienti di lavoro;

2. NORM: protezione dai radionuclidi naturali presenti nelle materie e nei residui di alcuni materiali non considerati radioattivi ma che possono contenere elevate concentrazioni di radionuclidi;
3. Materiali da costruzione: protezione dalle radiazioni gamma provenienti da radionuclidi in essi presenti.

Riguardo il radon, non si parla più di "livello di azione", al di sopra o al di sotto del quale predisporre o meno interventi di risanamento, ma "livello di riferimento" che non rappresenta un limite, ma costituisce un valore di concentrazione al di sopra del quale non è opportuno che si verifichi l'esposizione, ma che non esonera comunque di mettere in atto interventi protettivi in osservanza del principio di ottimizzazione. Con il nuovo limite introdotto per le abitazioni costruite a partire dal 2025, i valori risultano ora i seguenti (tabella 4):

Tabella n. 4	Livelli di riferimento per la concentrazione media annua di radon
Tipologia locale	**Concentrazione media annua (Bq · m^{-3})**
Abitazioni esistenti	300
Abitazioni costruite dopo il 31/12/2024	200
Luoghi di lavoro *(a)*	300

(a) Luoghi di lavoro sotterranei; semisotterranei o al piano terra localizzati in aree individuate dalle regioni entro 24 mesi dall'adozione del piano nazionale d'azione per il radon; specifiche tipologie di luoghi individuati dal PNR; stabilimenti termali.

Se, nonostante gli interventi adottati nei luoghi di lavoro, la concentrazione media annua di radon si mantiene ancora al di sopra dei 300 Bq · m^{-3}, si valuta come soglia di riferimento per l'adozione di ulteriori interventi, il valore di 6 mSv come dose efficace annua. In merito a quest'ultimo valore, il decreto recepisce il nuovo fattore convenzionale di conversione pubblicato dalla ICRP nel 2018[3] che aggiorna al rialzo di oltre il 20% il precedente, quello del 1993.

I luoghi di lavoro interessati sono elencati all'art. 16 del d.lgs. 101/2020 e riguardano sempre i locali sotterranei e gli stabilimenti termali, ma anche i locali semisotterranei e a piano terra individuati dalle Regioni e Province autonome (art. 11) e in specifiche tipologie di luoghi ubicati nelle aree identificate nel Piano d'azione nazionale per il radon (art. 10)

[3] ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4). Allegato II, sez. I, punto 6: 6,7·10-9 Sv·Bq-^{1}·h^{-1}·m^{3}. Considerando una soglia di 300 Bq·m^{-3} ed una permanenza media di 2000 ore/anno e 7000 ore/anno rispettivamente per gli ambienti di lavoro e gli ambienti domestici, le corrispondenti dosi efficaci risultano essere 4,02 e 14,07 mSv.

Cadenze e tempistiche delle misurazioni sono normate dall'art. 17 e la cui titolarità spetta ai servizi di dosimetria riconosciuti, abilitati secondo le modalità che saranno rese note con uno o più decreti del Ministero del lavoro e delle politiche sociali. Risultano considerati istituti abilitati l'INAIL e l'ISIN (Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione).

Un settore che ha subito cambiamenti particolarmente importanti rispetto alla normativa precedente è il Capo II del titolo IV, che disciplina le "Pratiche che comportano l'impiego di materiali contenenti radionuclidi di origine naturale".

Si parla ora di "Pratiche[4]" anziché di "Attività lavorative" come nel passato, per cui si applicano gli strumenti della radioprotezione: i livelli di esenzione, i livelli di allontanamento e il limite di dose.

Entro 12 mesi dall'entrata in vigore del decreto o dall'inizio della pratica, l'esercente provvede alla misurazione della concentrazione di attività sui materiali presenti nel ciclo produttivo e sui residui derivanti dall'attività lavorativa per le pratiche che si svolgono nell'ambito dei settori industriali indicati nell'allegato II (es. cementifici, centrali elettriche a carbone, produzione di energia geotermica, cartiere, produzione di gas e petrolio, ecc.) che comportano l'uso o lo stoccaggio, o la produzione di residui o di effluenti di materiali che contengono radionuclidi di origine naturale.

Considerando che, nel caso delle pratiche, gli strumenti adottati per la radioprotezione sono i livelli di esenzione, i livelli di allontanamento e il limite di dose, per misurazioni che superino i livelli di esenzione (i livelli di esenzione e di allontanamento hanno gli stessi valori e sono definiti per i lavoratori e per gli individui della popolazione sia in termini di concentrazione di attività sia in termini di dose efficace nell'allegato II), è necessaria la nomina dell'esperto in radioprotezione che adotterà gli adempimenti previsti dall'art. 22: tale relazione e i risultati delle misurazioni costituiscono parte integrante del documento di valutazione dei rischi di cui al d.lgs. 81/2008.

L'esenzione o meno dagli obblighi di notifica per una pratica, può essere riassunta nella tabella che segue (tabella 5):

[4] Pratica: un'attività umana che può aumentare l'esposizione di singole persone alle radiazioni proveniente da una sorgente di radiazioni ed è gestita come una situazione di esposizione pianificata.

Tabella n. 5	Art. 22 – Obblighi dell'esercente per le pratiche che comportano l'impiego di materiali contenente radionuclidi di origine naturale		
Livelli di esenzione		**Pratica esente/non esente**	**Note**
Conc. di attività	**Dose efficace**[(1)]		
Non superiore	-	ESENTE	*Comma 2:* ripetizione delle misurazioni con cadenza triennale o in caso di significative variazioni del ciclo produttivo
Superiore	Non superiore	ESENTE	*Comma 3:* ripetizione delle misurazioni con cadenza triennale o in caso di significative variazioni del ciclo produttivo; trasmissione dei risul-tati delle dosi all'ISS e all'INL
Superiore	Superiore	NON ESENTE	*Comma 4:* notifica di pratica
Superiore	Non superiore a seguito di modifiche correttive	ESENTE	*Comma5:* trasmissione dei risultati al MdL, all'ISIN, ai servizi del SSN, all'INL.

[(1)] per i lavoratori, il livello di esenzione di Dose efficace è 1 mSv/anno; per l'individuo rappresentativo, è fissato in 0,3 mSv/anno.

La valutazione delle radiazioni gamma emesse da materiali da costruzione è un'altra novità introdotta dalla direttiva. Questi nuovi aspetti integrano il regolamento (UE) n. 305/2011 riguardante la marcatura CE sui materiali da costruzione per la loro commercializzazione e costituiscono parte integrante della dichiarazione di prestazione di cui allo stesso regolamento.

Si tratta di individuare, come oggetto di attenzione dal punto di vista della radioprotezione, alcuni materiali da costruzione prima della loro immissione sul mercato da parte del soggetto responsabile. I materiali che rientrano nel campo di applicazione del decreto sono quelli elencati nell'allegato II, di seguito riportati:

1) Materiali naturali
   a) Alum-shale (cemento contenente scisti alluminosi);
   b) Materiali da costruzione o additivi di origine naturale ignea tra cui:
      - granitoidi (quali graniti, sieniti e ortogneiss);
      - porfidi;
      - tufo;
      - pozzolana;
      - lava;
      - derivati dalle sabbie zirconifere.
2) Materiali che incorporano residui dalle industrie che lavorano materiali radioattivi naturali tra cui:

- ceneri volanti;
- fosfogesso;
- scorie di fosforo;
- scorie di stagno;
- scorie di rame;
- fanghi rossi (residui della produzione dell'alluminio);
- residui della protezione di acciaio.

Per essi è necessario effettuare una misura delle concentrazioni di attività di Ra-226, Th-232 (o il suo prodotto di decadimento Ra-228) e K-40, al fine di determinare l'Indice di concentrazione di attività -I-, che deve risultare non superiore a 1. In caso di superamento di tale indice, il fabbricante effettua valutazioni di dose secondo le indicazioni riportate nell'allegato II. In questo caso, se viene superato il livello di riferimento, che è posto pari a 1 mSv/anno, il materiale non può essere utilizzato per edifici di ingegneria civile, come abitazioni ed edifici ad elevato fattore di occupazione.

4. Elenco cronologico della principale normativa di settore

Si elencano di seguito in ordine cronologico le principali norme riguardanti la protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione dagli effetti dannosi delle radiazioni ionizzanti.

- Legge 31 dicembre 1962, n. 1860 "*Impiego pacifico dell'energia nucleare*" (G.U. 30 gennaio 1963, n. 27)
- Decreto del Presidente della Repubblica 13 febbraio 1964, n. 185 "*Sicurezza degli impianti e protezione sanitaria dei lavoratori e delle popolazioni contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti derivanti dall'impiego pacifico dell'energia nucleare*" (G.U. 16 aprile 1964, n. 95, suppl. ord.). Il presente decreto è stato abrogato dall'art. 163, d.lgs. 17 marzo 1995, n. 230
- Decreto ministeriale 6 giugno 1968 "*Determinazione delle dosi e delle concentrazioni massime ammissibili ai fini della protezione sanitaria dei lavoratori dalle radiazioni ionizzanti*" (G.U. 30 agosto 1968, n. 220)
- Decreto del Presidente della Repubblica 24 settembre 1968, n. 1428 "*Definizione dei tipi di macchine radiogene il cui impiego può determinare rischi di radiazioni ionizzanti per i lavoratori e la popolazione*" (G.U. 26 febbraio 1969, n. 51)
- Decreto ministeriale 2 febbraio 1971 "*Determinazione dei valori delle dosi massime ammissibili e delle concentrazioni massime ammissibili, nonché dei valori dell'efficacia biologica relativa, per la popolazione nel suo insieme e per i gruppi particolari della popolazione, ai fini della protezione contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti*" (G.U. 6 marzo 1971, n. 58)
- Decreto del Presidente della 12 dicembre 1972, n. 1150 "*Determinazione delle modalità per l'iscrizione negli elenchi degli esperti qualificati e dei medici autorizzati incaricati della sorveglianza fisica e medica della protezione dalle radiazioni ionizzanti*" (G.U. 3 maggio 1973, n. 113)

- Decreto ministeriale 15 febbraio 1974 "*Istituzione degli elenchi nominativi degli esperti qualificati e medici autorizzati alla sorveglianza fisica e medica della protezione dalle radiazioni ionizzanti"* (G.U. 5 aprile 1974, n. 91)
- Decreto ministeriale 13 luglio 1990, n. 449 "*Regolamento concernente le modalità di tenuta della documentazione relativa alla sorveglianza fisica e medica della protezione dalle radiazioni ionizzanti e la sorveglianza medica dei lavoratori esposti al rischio di tali radiazioni*" (G.U. 14 febbraio 1991, n. 38). Il presente decreto è stato abrogato dal punto 14.7 dell'allegato XI al d.lgs. 22 maggio 2000, n. 241, a decorrere dal 1° gennaio 2001
- Decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230 "*Attuazione delle direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom e 2006/117/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti*" (G.U. 13 giugno 1995, n. 136, suppl. ord.)
- Decreto legislativo 22 maggio 2000, n. 241 "*Attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*" (G.U. 31 agosto 2000, n. 203, suppl. ord.)
- Decreto legislativo 26 maggio 2000, n. 187 "*Attuazione della direttiva 97/43/Euratom in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche*" (G.U. 7 luglio 2000, n. 157, suppl. ord.)
- Decreto ministeriale 4 gennaio 2001 "*Attuazione dell'art. 62, comma 4, del decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230, modificato dal decreto legislativo 22 maggio 2000, n. 241, che stabilisce l'obbligo di notifica o di autorizzazione delle attività di datore di lavoro di imprese esterne*" (G.U. 3 aprile 2001, n. 78)
- Circolare del Ministero del lavoro 8 gennaio 2001, n. 5 "*Decreto legislativo 22 maggio 2000, n. 241: attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*"
- Decreto legislativo 26 marzo 2001, n. 151 "*Testo unico delle disposizioni legislative in materia di tutela e sostegno della maternità e della paternità, a norma dell'art. 15 della legge 8 marzo 2000, n. 53*" (G.U. 26 aprile 2001, n. 96, suppl. ord.)
- Decreto ministeriale 2 maggio 2001 "*Criteri per l'individuazione e l'uso dei dispositivi di protezione individuale D.P.I.*" (G.U. 8 settembre 2001, n. 209)
- Decreto legislativo 9 maggio 2001, n. 257 "*Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 22 maggio 2000, n. 241, recante attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*" (G.U. 4 luglio 2001, n. 153)
- Decreto ministeriale 11 giugno 2001, n. 488 "*Regolamento recante criteri indicativi per la valutazione dell'idoneità dei lavoratori all'esposizione alle radiazioni ionizzanti, ai sensi dell'articolo 84, comma 7, del decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230*" (G.U. 5 aprile 2002, n. 80)
- Legge 1° marzo 2002, n. 33 -art. 39 che modifica l'art. 108 del d.lgs. 230/95 riguardante la disciplina dell'esposizione di persone a scopo di ricerca scientifica clinica (G.U. 26 marzo 2002, n. 72)

- Decreto legislativo 6 febbraio 2007, n. 52 "*Attuazione della direttiva 2003/122/CE Euratom sul controllo delle sorgenti radioattive sigillate ad alta attività e delle sorgenti orfane*" (G.U. 24 aprile 2007, n. 95)
- Decreto legislativo 9 aprile 2008, n. *81 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro"* (G.U. 30 aprile 2008, n. 101)
- Decreto legislativo 20 febbraio 2009, n. 23 "*Attuazione della direttiva 2006/117/Euratom, relativa alla sorveglianza e al controllo delle spedizioni di rifiuti radioattivi e di combustibile nucleare esaurito*" (G.U. 23 marzo 2009, n. 68)
- Decreto legislativo 15 febbraio 2010, n. 31 "*Disciplina della localizzazione, della realizzazione e dell'esercizio nel territorio nazionale di impianti di produzione di energia elettrica nucleare, di impianti di fabbricazione del combustibile nucleare, dei sistemi di stoccaggio del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi, nonché benefici economici e campagne informative al pubblico, a norma dell'articolo 25 della legge 23 luglio 2009, n. 99*" (G.U. 8 marzo 2010, n. 55)
- Decreto legislativo 23 marzo 2011, n. 41 "*Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 15 febbraio 2010, n. 31, recante disciplina della localizzazione, della realizzazione e dell'esercizio nel territorio nazionale di impianti di produzione di energia elettrica nucleare, di impianti di fabbricazione del combustibile nucleare, dei sistemi di stoccaggio del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi, nonché benefici economici e campagne informative al pubblico, a norma dell'art. 25 della legge 23 luglio 2009, n. 99*" (G.U. 13 aprile 2011, n. 85)
- Decreto legislativo 1º giugno 2011, n. 100 "*Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 20 febbraio 2009, n. 23, recante attuazione della direttiva 2006/117/Euratom, relativa alla sorveglianza e al controllo delle spedizioni di rifiuti radioattivi e di combustibile nucleare esaurito. Sorveglianza radiometrica su materiali o prodotti semilavorati metallici*" (G.U. 7 luglio 2011, n. 156)
- Decreto legislativo 19 ottobre 2011, n. 185 "*Attuazione della direttiva 2009/71/Euratom che istituisce un quadro comunitario per la sicurezza degli impianti nucleari*" (G.U. 15 novembre 2011, n. 266)
- Decreto legislativo 4 marzo 2014, n. 45 "Attuazione della direttiva 2011/70/*Euratom*, che istituisce un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi" (G.U. 26 marzo 2014, n. 71)
- Legge 28 aprile 2015, n. 58 *"Ratifica ed esecuzione degli Emendamenti alla Convenzione sulla protezione fisica dei materiali nucleari del 3 marzo 1980, adottati a Vienna l'8 luglio 2005, e norme di adeguamento dell'ordinamento interno"* (G.U. 13 maggio 2015, n. 109)
- Decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101 *"Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117"* (G.U. 12 agosto 2020, n. 201)

Bibliografia

- Decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101 "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117 (G.U. 12 agosto 2020, n. 201);
- ICRP Publication 26, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" – Pergamon Press. 1977;
- ICRP Publication 60, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" – Pergamon Press. Annals of the ICRP. Volume 21/1-3, 1991;
- ICRP Publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" - Annals of the ICRP. Volume 37/2-4, 2008;
- ICRP Publication 137, "Occupational intakes of radionuclides: Part 3" - Annals of the ICRP. Volume 46/3-4, 2017;
- VERGINE A. L., GIROLETTI E. Radiazioni ionizzanti. Protezione della popolazione dei lavoratori e dei pazienti. Sistemi editoriali Esselibri – Simone. Napoli. Ed. 2005;
- Piano Sanitario Nazionale 1998-2000;
- Piano Sanitario Nazionale 2001-2003;
- Piano Sanitario Nazionale 2003-2005;
- Piano Sanitario Nazionale 2006-2008.

Data di chiusura del documento

Febbraio 2022

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it

INAIL

2022

CONOSCERE IL RISCHIO

RADIAZIONI IONIZZANTI

La documentazione per la sorveglianza fisica

1. Premessa

La documentazione relativa alla sorveglianza fisica della protezione dalle radiazioni ionizzanti è elencata all'art. 132 del d.lgs. 101/2020: l'esperto di radioprotezione[1], per conto del datore di lavoro, provvede ad istituirla e a tenerla aggiornata. Essa deve essere "*conservata e mantenuta disponibile presso la sede di lavoro o, se necessario per una maggiore garanzia di conservazione, presso la sede legale del datore di lavoro*"[2]. La principale documentazione è costituita dalla "*scheda personale dosimetrica*" e dal cosiddetto "*registro di sorveglianza fisica*": quest'ultimo a sua volta deve contenere diverse tipologie di documenti - esplicitamente previsti al punto 4.1 dell'allegato XXXIII del d.lgs. 101/2020[3]. In quanto documenti ufficiali, questi devono essere "*compilati con inchiostro o altra materia indelebile, senza abrasioni; le rettifiche o correzioni, siglate dal compilatore, devono essere eseguite in modo che il testo sostituito sia leggibile; gli spazi bianchi tra le annotazioni successive sono barrati*"[4]. Nell'allegato XXXIII del d.lgs. 101/2020 vengono inoltre previste dettagliate modalità sulle rilegature, sottoscrizioni del datore di lavoro e dell'esperto di radioprotezione, datazioni ecc., cui deve sottostare tale documentazione.

2. Scheda personale dosimetrica – normativa pregressa

La registrazione dei dati di esposizione per gli esposti a radiazioni ionizzanti da parte dell'esperto qualificato (ora esperto di radioprotezione) è prevista fin dal 1965; infatti l'art. 74 del d.p.r. 13.2.1964 n.185 stabilisce che:

"*Il datore di lavoro deve provvedere affinché l'esperto qualificato istituisca, tenga aggiornati e conservi i seguenti documenti:*

omissis

[1] Figura definita ai sensi del comma 39, art. 7 del d.lgs. 101/2020.

[2] d.lgs. 101/2020 allegato XXXIII punto 3.

[3] Elencati all'art. 132 comma 1, lettere a), b) e c) del d.lgs. 101/2020. I documenti di cui ai punti e) ed f) dello stesso.

[4] d.lgs. 101/2020 allegato XXXIII punto 12.1.

Autore: Piero La Pegna
Contarp

c) le schede personali sulle quali devono essere annotati i risultati delle valutazioni delle dosi individuali....."

Inoltre, lo stesso articolo stabilisce che:

"*Con decreto del Ministro per il lavoro e la previdenza sociale possono essere determinate particolari modalità di tenuta delle predette documentazioni e approvati i modelli delle stesse*". Quanto alla conservazione della documentazione: "*le schede personali devono essere conservate a cura del datore di lavoro, per almeno trenta anni dopo la cessazione del lavoro comportante un'esposizione alle radiazioni ionizzanti e comunque per tutta la durata della vita dell'interessato. In caso di cessazione dell'impresa prima del compimento dei termini di cui al comma precedente, il datore di lavoro deve consegnare i predetti documenti all'Ispettorato medico centrale del lavoro che provvede alla loro conservazione fino al compimento del periodo previsto dal comma precedente"*.

Le modalità per la tenuta delle schede dosimetriche sono state emanate dal Ministero del lavoro solo nel 1990 (decreto 449/90, pubblicato nel 1991).

In base a quanto riportato all'art. 6 del suddetto decreto "*la scheda personale dosimetrica di cui all'art. 74, primo comma, lettera c), del decreto del Presidente della Repubblica 13 febbraio 1964, n. 185, deve essere conforme al modello A allegato. Per i lavoratori esposti esclusivamente a rischio di irradiazione esterna da radiazioni elettromagnetiche può essere adottata la scheda personale dosimetrica modello B allegata*".

Per quanto riguarda le esposizioni pregresse, e quindi raccolte senza una modulistica standardizzata, lo stesso articolo prevede che "*nella scheda personale devono essere registrate le dosi accumulate, per irradiazione esterna e/o interna, durante eventuali precedenti periodi di esposizione lavorativa, da lavoro dipendente e/o autonomo. A tal fine il datore di lavoro deve richiedere a mezzo raccomandata con avviso di ricevimento, i relativi dati ai precedenti datori di lavoro, che sono tenuti a fornirli*" e che "*i dati relativi alle dosi accumulate in precedenti periodi di lavoro autonomo devono essere forniti dai lavoratori interessati*". Da notare che, come riportato nelle note dei moduli, "*l'acquisizione dei dati e notizie relativi a precedenti esposizioni professionali spetta al datore di lavoro. La firma dell'Esperto Qualificato ne attesta l'esatta trascrizione*".

In ogni caso è possibile, anche successivamente al 1991, trovare dei modelli diversi da quelli riportati nel decreto in quanto, sempre all'art. 6, è stabilito che "*il Ministero del lavoro e della previdenza sociale, per finalità o esigenze particolari, può autorizzare l'adozione di schede dosimetriche personali diverse dai modelli approvati con il presente decreto, sempreché vi siano comunque inclusi i dati e le notizie in questi indicati*".

In base al decreto 449/90, per quanto attiene alla conservazione della documentazione, valgono le indicazioni precedentemente richiamate del d.p.r. 185/64.

3. Scheda personale dosimetrica – normativa attuale

La situazione relativa alle schede dosimetriche e alla loro conservazione cambia con il d.lgs. 230/95 che all'art. 81 recita: "*con decreto del Ministro del lavoro e della previdenza sociale, sentiti l'ANPA[5] e l'ISPESL[6], sono determinate le modalità di tenuta della documentazione [relativa alla sorveglianza fisica della protezione] e sono approvati i modelli*". Le modalità per la tenuta della documentazione vengono stabilite qualche anno dopo dal d.lgs. 241/2000 (che aggiornava e integrava il d.lgs. 230/95). In questo caso si ha una "*scheda personale dosimetrica*" per l'esposizione sia esterna che interna e il "*libretto personale di radioprotezione*".

Su quest'ultimo, per l'attività di lavoratori esposti di categoria A svolta in zone controllate situate presso sedi diverse da quelle del datore di lavoro, le dosi venivano in un primo momento registrate dall'esperto qualificato dell'esercente per essere successivamente trascritte dall'esperto qualificato del datore di lavoro nella "*scheda personale dosimetrica*" del lavoratore.

Questa organizzazione della documentazione è di fatto rimasta invariata con l'entrata in vigore del d.lgs. 101/2020.

Il modello di "*scheda personale dosimetrica*" attualmente in vigore è riportato nell'allegato XXXIII al d.lgs. 101/2020 (Modello B). Comunque, la scheda effettivamente utilizzata può essere diversa da quella riportata nel decreto in quanto "*è consentita l'adozione di schede dosimetriche diverse dal modello B, sempre che vi siano comunque inclusi i dati e le notizie indicati nel modello stesso[7]*".

Per quanto riguarda la conservazione della scheda è stabilito che il datore di lavoro la conservi "*sino alla cessazione del rapporto di lavoro, o dell'attività dell'impresa comportante esposizione alle radiazioni ionizzanti, mantenendone successivamente copia per almeno cinque anni*". Inoltre, entro sei mesi dalla cessazione del rapporto di lavoro o dell'attività d'impresa comportante esposizione alle radiazioni ionizzanti, tale documentazione deve essere trasmessa al Medico Autorizzato che, unitamente ai documenti sanitari di propria competenza, provvede a trasmetterla all'Inail.

Riassumendo, anche per lo stesso lavoratore esposto, la scheda dosimetrica può apparire in una molteplicità di formati, specie qualora la sorveglianza fisica sia stata a carico di differenti esperti qualificati/esperti di radioprotezione e/o il periodo di esposizione si sia accavallato con le varie evoluzioni normative.

La "*scheda personale dosimetrica*" è necessaria per i lavoratori classificati in categoria A o B[8] e, come suggerisce il nome, è personale per ogni lavoratore esposto. I dati presenti nella scheda devono essere aggiornati con cadenza almeno semestrale per i lavoratori di categoria A e almeno annuale per quelli di categoria B.

[5] Ora ISPRA

[6] Ora INAIL

[7] Allegato XXXIII al d.lgs. 101/2020, punto 7.3.

[8] I lavoratori sono classificati, in funzione dell'esposizione, in "*non esposti*", "*esposti di categoria B*" ed "*esposti di categoria A*". Le modalità per la classificazione dei lavoratori sono riportate all'art. 133 del d.lgs. 101/2020.

4. Registro di sorveglianza fisica

Con il termine "*registro di sorveglianza fisica*" si intende una raccolta di documenti e informazioni elencati nell'allegato XXIII del d.lgs. 101/2020. Il Registro, introdotto in forma simile all'attuale dagli art. 2 e 3 del decreto 449/90, deve contenere almeno le seguenti informazioni (punto 5.1 del citato allegato):

- *la planimetria o una descrizione dei luoghi ed ambienti in cui vengono esercitate attività comportanti rischi da radiazioni ionizzanti, con l'indicazione della classificazione delle zone;*
- *l'elencazione, aggiornata in caso di variazioni, delle sorgenti sigillate e delle macchine radiogene in uso o detenute, con specificazione, per ciascuna di esse, della natura e delle caratteristiche fondamentali;*
- *l'annotazione, per le sorgenti non sigillate, dell'attività massima detenibile dei radionuclidi e di quella impiegabile annualmente ai sensi dell'art.50 del presente decreto;*
- *le modalità di valutazione delle dosi individuali per lavoratori con particolare riferimento ai criteri e alle modalità di valutazione utilizzate in caso di impiego di DPI e, nei casi applicabili, alla verifica della dose efficace impegnata, e le modalità di valutazione della dose efficace assorbita dall'individuo individuo rappresentativo, a partire dai dati di sorveglianza fisica di cui all'art. 130 del presente decreto legislativo;*
- *copia delle relazioni di cui agli articoli 109, comma 2[9], e 131, comma 1, lettere b), c), d) ed e)[10] del presente decreto, qualora l'Esperto di Radioprotezione non si avvalga della facoltà di cui al punto 4.2[11];*
- *gli esiti della sorveglianza ambientale di cui all'art. 130, comma 1, lettera c) del presente decreto[12];*
- *gli esiti delle verifiche di cui all'art. 130, comma 1, lettera b), nn. 2), 3), 4) e 5) del presente decreto[13];*
- *gli estremi di riferimento degli atti autorizzativi rilasciati ai sensi del presente decreto;*
- *l'annotazione dell'esito della prima verifica di sorveglianza fisica di cui all'articolo*

[9] Valutazione preliminare di radioprotezione. Tale relazione, munita di data certa, deve essere presente anche nel Documento di Valutazione dei Rischi di cui all'art. 28 comma 2 del d.lgs. 81/08 per gli aspetti concernenti i rischi da radiazioni ionizzanti.

[10] Classificazione dei lavoratori, frequenza di valutazione delle dosi e modalità per la sorveglianza fisica dei lavoratori e della popolazione.

[11] Allegato XXXIII, punto 4.2 "*La documentazione di cui agli articoli 109, comma 2, e 131, comma 1, può essere costituita da relazioni tecniche datate, con pagine numerate progressivamente, i cui estremi sono riportati su registro di protocollo tenuto a cura del datore di lavoro".*

[12] Sorveglianza ambientale di radioprotezione per le zone controllate e sorvegliate.

[13] Prima verifica, verifica periodica dell'efficacia dei dispositivi e delle tecniche di radioprotezione, delle buone condizioni di funzionamento degli strumenti di misurazione, verifica di conformità degli strumenti di misura.

130, comma 1, lettera b), n. 2 del presente decreto, con riferimento al relativo benestare di cui al comma 1, lettera b), n. 1), dello stesso articolo 130.

Vista la numerosità e l'eterogeneità dei documenti e delle informazioni raccolte nel registro, a differenza della "*scheda personale dosimetrica*", non viene previsto nella legge un modello a cui rifarsi.

Bibliografia

- Decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101 "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117;
- Decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro".

Data di chiusura del documento

Febbraio 2022

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it