



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

TESI DI LAUREA

**“RADIOPROTEZIONE: NORMATIVA NAZIONALE
ED INTERNAZIONALE”**

Relatore: Prof. Antonio-Daniele Capobianco

Laureando:

Massimiliano Prosser

1218044

ANNO ACCADEMICO 2022 - 2023

Data di laurea 13/03/2023

“Nel moto la vita, nella vita il moto”

– G.G.

INDICE

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1: RADIAZIONI IONIZZANTI E NON IONIZZANTI	4
1.1 RADIAZIONI.....	4
1.2 RADIAZIONI IONIZZANTI.....	5
1.3 RADIAZIONI NON IONIZZANTI	13
CAPITOLO 2: PROPAGAZIONE DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO E GRADO DI PENETRAZIONE NEI TESSUTI BIOLOGICI	17
2.1 ONDE ELETTROMAGNETICHE NELLO SPAZIO.....	17
2.2 PROPAGAZIONE E ASSORBIMENTO DI RADIAZIONI NON IONIZZANTI NEI TESSUTI BIOLOGICI	18
2.3 IMPIEGHI DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE IN CAMPO BIOMEDICO	20
2.4 CAMPI ELETTROMAGNETICI IN DIAGNOSTICA CLINICA ED IN TERAPIA	21
CAPITOLO 3: SORGENTI DI RADIAZIONI IONIZZANTI (RADIOATTIVITA' NATURALE E SORGENTI RADIOGENE ARTIFICIALI)	24
3.1 SORGENTI DI RADIAZIONI IONIZZANTI	24
3.3 RADIOATTIVITÀ NATURALE.....	25
3.4 SORGENTI RADIOGENE ARTIFICIALI	29
CAPITOLO 4: SORGENTI DI RADIAZIONI NON IONIZZANTI	31
4.1 ESEMPI DI SORGENTI DI RADIAZIONI NON IONIZZANTI	31
CAPITOLO 5: DOSIMETRIA, GRANDEZZE ED UNITA' DI MISURA (DOSE ASSORBITA, DOSE EQUIVALENTE, DOSE EFFICACE)	34
5.1 GRANDEZZE ED UNITÀ DI MISURA	34
CAPITOLO 6: EFFETTI BIOLOGICI E DANNI PER LA SALUTE (SAR, EQUAZIONE DEL BIOCALORE, DANNI DETERMINISTICI E DANNI STOCASTICI)	38
6.1 EFFETTI DELLE RADIAZIONI NON IONIZZANTI	38
6.2 EFFETTI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI.....	39
6.3 DANNI DI TIPO DETERMINISTICO.....	41
6.4 DANNI DI TIPO STOCASTICO.....	43
6.5 FATTORI CHE INFLUENZANO LA RISPOSTA BIOLOGICA.....	44
CAPITOLO 7: NORMATIVA NAZIONALE E INTERNAZIONALE IN TEMA DI RADIAZIONI IONIZZANTI E SICUREZZA DEI LAVORATORI (I 3 PRINCIPI CARDINE: GIUSTIFICAZIONE, OTTIMIZZAZIONE E LIMITAZIONE DELLA DOSE)	46
7.1 NORMATIVA NAZIONALE IN TEMA DI RADIAZIONI IONIZZANTI E SICUREZZA DEI LAVORATORI	46
7.2 ORGANIZZAZIONI INTERNAZIONALI COINVOLTE, DIRETTAMENTE OD IN MODO INDIRETTO, NELLA PROTEZIONE RADIOLOGICA	51
7.3 SISTEMA TRACCIABILITÀ RIFIUTI MATERIALI E SORGENTI - STRIMS.....	51
CAPITOLO 8: LIMITI DI DOSE (D. LGS. 230/1995 E SUCCESSIVE MODIFICHE, SORVEGLIANZA FISICA E SANITARIA, CLASSIFICAZIONE ZONE); CLASSIFICAZIONE POPOLAZIONE, LAVORATORI ESPOSTI CATEGORIE "A" E "B" E DOSIMETRIA PERSONALE)	53
8.1 LIMITI DI DOSE PREVISTI DAL D. LGS. 101/2020.....	53
8.2 SORVEGLIANZA FISICA E SANITARIA.....	55
8.3 CLASSIFICAZIONE DEI LAVORATORI	56
8.4 CLASSIFICAZIONE DELLE ZONE.....	59
8.5 SEGNALETICA SPECIFICA	61

8.6	ORGANIZZAZIONE E LA SICUREZZA DEL LAVORO	65
8.7	ESPOSIZIONE A RADIAZIONI IONIZZANTI E SORVEGLIANZA SANITARIA	68
CAPITOLO 9: NORMATIVA NAZIONALE ED INTERNAZIONALE IN TEMA DI RADIAZIONI NON IONIZZANTI		72
CAPITOLO 10: DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE (DPI).....		77
10.1	DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE (DPI)	77
10.2	DISPOSITIVI DI PROTEZIONE DA RADIAZIONI IONIZZANTI PER L'OPERATORE SANITARIO.....	80
10.3	DISPOSITIVI PERSONALI DI MISURA DELLA DOSE ALL'OPERATORE SANITARIO	80
CAPITOLO 11: CONSIDERAZIONI FINALI E PROSPETTIVE FUTURE		83
BIBLIOGRAFIA	85
SITOGRAFIA	86
RINGRAZIAMENTI	87

ABSTRACT

L'elaborato si incentra sulla radioprotezione, la quale può essere definita come la disciplina che tenta di prevenire gli effetti dannosi causati dall'esposizione a radiazioni (ionizzanti e non) sull'organismo umano. Una sempre più profonda conoscenza della natura delle radiazioni e della loro interazione con i tessuti biologici, l'applicazione della dosimetria e quindi la misurazione ed il calcolo della dose assorbita, ci permettono oggi di rendere estremamente efficace la protezione dalle suddette radiazioni. Questo elaborato esaminerà lo stato dell'arte a livello normativo in tema di radiazioni ionizzanti e non ionizzanti e sicurezza dei lavoratori, sia a livello nazionale che internazionale.

Il lavoro di Tesi prevede un approfondimento nel dettaglio degli aspetti fisici e biologici correlati all'utilizzo delle radiazioni ionizzanti e non ionizzanti. Vengono descritti i principali campi di impiego delle radiazioni originate spontaneamente da sorgenti naturali oppure sfruttate dall'uomo tramite l'ausilio di macchinari specifici. Indispensabile per poter affrontare l'argomento radioprotezionistico è stato affrontare il concetto di dosimetria e quindi la valutazione della quantità di dose (dose assorbita, dose equivalente, dose efficace) e dei meccanismi di assorbimento da parte dei tessuti biologici.

Enunciati i 3 principi cardine inerenti all'esposizione alle radiazioni ionizzanti (giustificazione, ottimizzazione e limitazione della dose) si è dedicato ampio spazio al quadro legislativo vigente ed alla sua evoluzione.

Il fulcro del lavoro di Tesi ha riguardato infatti il panorama normativo nazionale ed internazionale in tema di radiazioni ionizzanti e non ionizzanti, con particolare riferimento agli aspetti di sicurezza dei lavoratori. Partendo dal D. Lgs. 230/1995, abrogato il 27 agosto 2020 con l'entrata in vigore del D. Lgs. 101/2020 che ha recepito la Direttiva 2013/59/Euratom, sono stati descritti i limiti di dose per la popolazione e per i lavoratori esposti (categoria A e B), nonché la classificazione delle zone, la sorveglianza fisica e sanitaria ed infine la dosimetria personale ed i DPI (dispositivi di protezione individuale).

Similmente a quanto approfondito per le radiazioni ionizzanti, ci si è soffermati sulla normativa nazionale ed internazionale in tema di radiazioni non ionizzanti.

INTRODUZIONE

La radioprotezione, o protezione sanitaria contro le radiazioni ionizzanti, vede come suo obiettivo primario il preservare lo stato di salute ed il benessere dei lavoratori, di tutti gli individui componenti la popolazione e dei cittadini nella loro totalità. Si persegue questa finalità riducendo i rischi derivati dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti e non ionizzanti, presenti naturalmente o connesse a quelle attività umane per le quali si ricorre all'impiego delle relative sorgenti di radiazioni per ottenere specifici benefici per la società e le persone. Essa si occupa inoltre della protezione dell'ambiente per quanto attiene le conseguenze sull'essere umano.

L'Italia attualmente non produce energia attraverso processi di fissione nucleare e non ha per ora in programma la costruzione di centrali nucleari. Tuttavia, materie radioattive in grado di esporre alle radiazioni ionizzanti sono comunque presenti nei rifiuti radioattivi prodotti dal pregresso programma nucleare, nonché nelle strutture e nei sistemi degli impianti nucleari sottoposti a decommissioning.

L'uso di sorgenti di radiazioni ionizzanti continua poi, come nel resto del mondo, ad essere effettuato in medicina, nell'industria e nella ricerca, con la conseguente produzione delle cosiddette scorie radioattive di basso e medio livello.

Nessuna esposizione alle radiazioni ionizzanti, per quanto modesta, può essere considerata esente da rischi. Per tale motivo, per ogni attività che comporti rischi legati alle radiazioni ionizzanti è necessario garantire un appropriato sistema di protezione dei soggetti coinvolti, anche tramite specifiche disposizioni normative.

Grande attenzione suscitano anche le crescenti esposizioni a radiazioni non ionizzanti connesse allo sviluppo tecnologico dei mezzi di comunicazione.

Le radiazioni non ionizzanti annoverano al loro interno i campi elettromagnetici (dai campi statici alle radiofrequenze), le radiazioni ottiche (ad es. UV e laser) e gli ultrasuoni.

Sul suolo italiano l'attività di ricerca, consulenza, controllo e formazione sulla protezione della salute umana dalle radiazioni non ionizzanti è svolta dall'Istituto Superiore di Sanità (ISS).

Le sue competenze spaziano dalla valutazione dei livelli di esposizione ambientali ed in campo lavorativo alla dosimetria personale; dallo studio sperimentale degli effetti biologici in vitro agli studi epidemiologici, per analizzare e porre a valutazione i potenziali effetti sulla salute delle persone; dalla disamina dei rischi

per la salute in contesti specifici alla stesura e analisi critica delle normative di protezione.

Un altro ente di rilievo a livello nazionale in materia di radioprotezione è l'Associazione Italiana di Radioprotezione (AIRP). Essa è promotrice di azioni scientifiche e culturali nel campo della protezione contro le radiazioni ionizzanti e non ionizzanti (radioattività ambientale: monitoraggio relativo a campioni ambientali, alimentari e biologici, artificiali, livelli di presenza di radon, materiali con elevato contenuto di radioattività naturale (NORM - Naturally Occurring Radioactive Materials), radiazioni in ambito sanitario, impianti nucleari, eventi incidentali e loro conseguenze, radiazioni ultraviolette (UV), campi elettromagnetici, qualità delle misure e nuove richieste normative).

L'AIRP, fondata ufficialmente nel 1958, è affiliata alla International Radiation Protection Association (IRPA), voce internazionale della radioprotezione, associazione che riunisce professionisti esperti (fisici, biologi, medici, ecc.) che lavorano di pari passo attraverso le Società di protezione dalle radiazioni nazionali e regionali. Tramite la loro attività promuovono il miglioramento a livello mondiale della competenza professionale, della cultura della radioprotezione e della pratica, fornendo benchmark di buone pratiche che fungono da riferimento e incoraggiando la messa in campo dei più alti standard di condotta professionale, abilità e conoscenza a beneficio degli individui e della società nel suo complesso.

CAPITOLO 1: RADIAZIONI IONIZZANTI E NON IONIZZANTI

1.1 Radiazioni

Il termine “radiazione” viene abitualmente impiegato per descrivere una varietà molto ampia di fenomeni all’apparenza molto diversi fra loro, quali l’emissione di luce da una lampadina, di calore diffuso da una fiamma, di particelle elementari da una sorgente radioattiva, ecc.

Fattore che accomuna tutti questi tipi di emissione è il trasporto di energia nello spazio. Tale energia irradiata viene ceduta quando la radiazione è assorbita nella materia.

Per “radiazioni” si intende, infatti, il trasferimento di energia da un mezzo che la produce (radiante) ad un mezzo che la riceve (irradiato), processo che avviene per mezzo del moto di particelle corpuscolari o di onde elettromagnetiche.

Nel caso di radiazioni elettromagnetiche la trasmissione avviene tramite fotoni (caratterizzati da proprie frequenza e lunghezza d’onda), nel caso di radiazioni corpuscolari tramite particelle (caratterizzate da massa, carica e velocità).

Tutti i tipi di radiazione interagiscono con la materia, inclusi i tessuti biologici come il corpo umano, trasferendo tutta, o parte, della loro energia.

Si configurano due grandi categorie di radiazioni, a seconda della loro capacità di ionizzare la materia biologica, cioè di modificare il numero di elettroni di un atomo o di una molecola. Da questa caratteristica fondamentale dipende la natura e l’entità dei possibili danni inferti agli organismi esposti:

- **radiazioni ionizzanti** (raggi X, α e γ , i cui fotoni sono ad alta energia, e particelle subatomiche ad alta energia);
- **radiazioni non ionizzanti** (onde elettromagnetiche i cui fotoni sono a bassa energia, luce visibile, quasi tutti i laser, infrarossi, microonde ed onde radio).

In media più di tre quarti dell’esposizione della popolazione a radiazioni ionizzanti è dovuta a sorgenti di origine naturale, nella fattispecie raggi cosmici emessi dal Sole e radon (gas radioattivo prodotto dal decadimento degli atomi di uranio e di torio presenti nelle rocce).

Questo tipo di esposizione, pur essendo ubiquitaria, a seconda del luogo in cui ci si trova può subire notevoli fluttuazioni nella sua entità.

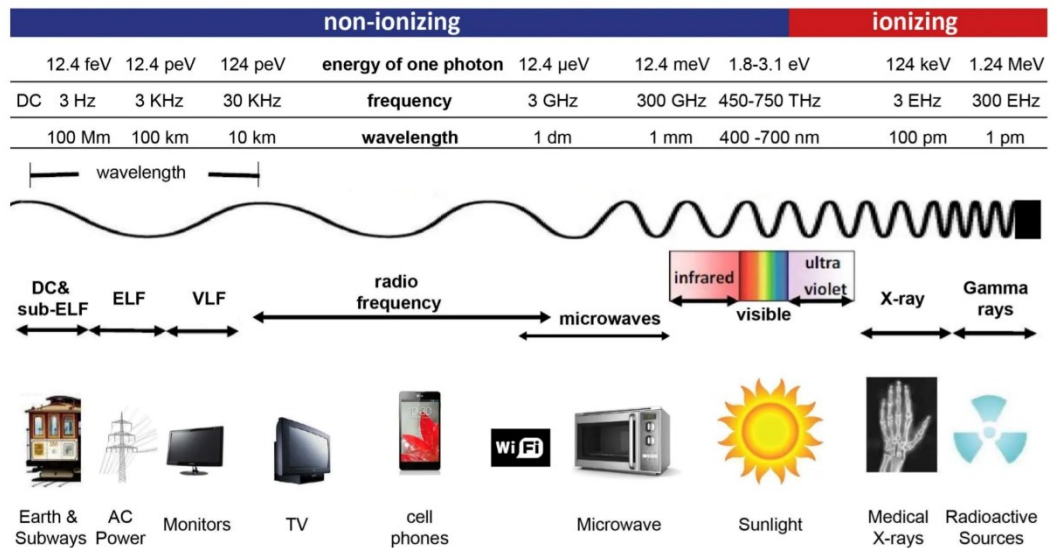


Figura 1.1 – Spettro radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

1.2 Radiazioni Ionizzanti

Le radiazioni sono dette ionizzanti quando sono in grado di trasferire una quantità di energia sufficiente a liberare degli elettroni dagli atomi presenti nel mezzo irradiato e quindi indurre ionizzazione.

Tale fenomeno determina la formazione di ioni, i quali sono atomi elettricamente carichi. La loro carica è determinata dal numero di elettroni persi o acquisiti nel processo di ionizzazione.

Una caratteristica rilevante delle radiazioni ionizzanti è l'energia, che si misura in Joule o, più comunemente, in fisica delle radiazioni, in elettronvolt (eV). Un elettronvolt è l'energia che una carica elementare (protone o elettrone) acquisisce quando attraversa un campo elettrico con differenza di potenziale pari ad 1 Volt.

Esistono numerosi elementi in natura, ed altri prodotti artificialmente mediante reazioni nucleari, costituiti da atomi i cui nuclei sono energeticamente instabili. Essi tendono a modificare la propria natura ed a raggiungere stati energeticamente più stabili. Il ritorno alla stabilità avviene attraverso l'emissione di radiazioni corpuscolari (α o β), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi γ). I nuclei instabili si dicono radioattivi ed il processo di emissione di radiazioni viene definito decadimento radioattivo o radioattività.

Il fenomeno è regolato dalla legge fondamentale del decadimento radioattivo, la quale ha natura esponenziale ed è caratterizzata da una costante di decadimento, legata al concetto di vita media e tempo di dimezzamento.

La costante di decadimento, di solito indicata con λ , è specifica per ciascun radionuclide, rappresenta il rapporto tra i nuclei che si disintegrano in un secondo ed il numero di nuclidi presenti. Essa esprime inoltre la probabilità per unità di tempo che un nucleo qualsiasi si disintegri. L'unità di misura della costante di decadimento è l'inverso del tempo.

Il tempo di dimezzamento, proprio di ogni radionuclide, costituisce il tempo necessario affinché il numero di nuclidi radioattivi presenti si dimezzi; esso può essere compreso tra frazioni di secondo e milioni di anni.

La vita media, che è il reciproco della costante di decadimento, rappresenta il tempo necessario a ridurre del 37% l'attività della sorgente.

Il numero di disintegrazioni che avvengono nell'unità di tempo in una data quantità di materiale radioattivo costituisce la sua attività. L'unità di misura dell'attività attualmente adottata è il becquerel (Bq); 1 Bq equivale ad una disintegrazione al secondo. A livello storico l'unità di misura precedente era il curie (Ci), che fu adottata come unità di misura della radioattività durante il Congresso Internazionale di Radiologia, il quale si tenne a Bruxelles nel 1910, presieduto dalla stessa Marie Curie. Negli ambiti di ricerca e sanitario il curie viene ancora spesso tenuto in considerazione come riferimento. La conversione è la seguente: $1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$.

Ciascun radionuclide si differenzia per il tipo di particelle (alfa, beta, gamma, neutroni), per l'energia delle radiazioni emesse e per il proprio tempo di dimezzamento.

Le radiazioni ionizzanti possono essere costituite da particelle sub-atomiche caratterizzate da velocità elevate, che spesso si avvicinano alla velocità della luce (radiazioni corpuscolari), o da radiazioni elettromagnetiche, costituite da fotoni che si propagano alla velocità della luce (raggi X e raggi γ).

La ionizzazione del mezzo irradiato può avvenire per via diretta o indiretta e questa distinzione porta tali radiazioni ad essere classificate come direttamente ionizzanti o indirettamente ionizzanti.

Sono definite direttamente ionizzanti le particelle cariche elettricamente (elettroni, particelle β , particelle α , etc.); sono invece dette indirettamente ionizzanti i fotoni (raggi X, raggi γ), i neutroni e le particelle sub-atomiche prive di carica elettrica in generale.

Le particelle α , emesse nei decadimenti radioattivi, sono costituite da due neutroni e due protoni, sono perciò atomi di elio doppiamente ionizzati. Queste particelle

vengono emesse con velocità dell'ordine di un ventesimo di quella della luce e hanno quindi energie cinetiche molto elevate, in genere comprese tra 4 e 9 MeV. Quando la radiazione collide con la materia questa energia viene perduta per ionizzazione e per eccitazione degli atomi della sostanza attraversata.

L'interazione delle particelle α con la materia non gassosa è estremamente limitata e ciò è determinato da due diverse componenti:

- **elettrostatica**: dovuta alla carica positiva doppia;
- **meccanica**: dovuta alla massa considerevole su scala atomica.

Ne consegue che una particella α è in grado di formare un numero elevato di coppie di ioni per unità di percorso.

Le particelle β sono elettroni o positroni, quest'ultimi di natura del tutto simile agli elettroni ma dotati di carica elettrica positiva.

Al contrario di quanto avviene per le particelle α , le particelle β non sono emesse con energia ben determinata, ma con uno spettro continuo fino ad un valore massimo di energia caratteristico per ogni radioisotopo.

Gli elettroni interagiscono con la materia fino ad esaurire tutta la loro energia cinetica con due meccanismi:

- a) urto con gli elettroni orbitali che porta a una perdita di energia per eccitazione e ionizzazione;
- b) interazione con i nuclei che porta all'emissione di raggi X (quest'ultimo processo è prevalente quando i raggi β hanno energia elevata).

Poiché le particelle β hanno una massa molto minore rispetto a quelle α , il verificarsi di interazioni è meno probabile e quindi risultano meno frequenti, a parità di altre condizioni. La ionizzazione specifica dei raggi β è più bassa di quella delle particelle α .

Il potere frenante degli elettroni è tanto minore quanto maggiore si presenta il numero atomico della sostanza assorbente, in conseguenza al fatto che le sostanze ad elevato numero atomico hanno una densità di elettroni più bassa. Inoltre, questi elettroni sono legati più strettamente al nucleo. Tuttavia, al crescere del numero atomico, aumenta anche la diffusione multipla degli elettroni, la quale comporta un aumento del loro percorso effettivo nella sostanza irradiata.

L'assorbimento delle particelle β da parte della materia segue una legge con decadimento esponenziale caratterizzata dal coefficiente di assorbimento di massa μ .

I raggi β possono determinare un rischio di danno biologico per quanto concerne sia l'irradiazione esterna sia la contaminazione interna.

Le radiazioni γ sono, al contrario di quelle precedentemente presentate, neutre e si propagano con velocità pari a quella della luce ($c = 3,00 \times 10^8$ m/s). Esse presentano un'alta capacità di penetrazione, tale da rendere necessari diversi centimetri di piombo per assorbirle.

I raggi γ , per la loro specifica natura (fotoni generati nei fenomeni di rilassamento del nucleo), non subiscono deviazioni per effetto del campo magnetico, in quanto si tratta di radiazioni non di natura corpuscolare ma elettromagnetica, come i raggi X. Così come quest'ultimi, i raggi γ vengono anche denominati "fotoni" proprio in quanto portatori di un "quanto" di radiazione elettromagnetica o di luce.

I rischi di danno biologico e genetico dovuti all'assorbimento di radiazioni X e γ , sono strettamente legati all'elevata capacità di penetrazione che esse hanno in aria e nel tessuto vivente.

Le radiazioni ionizzanti propagandosi nello spazio possono incontrare materia biologica e non, con la quale interagiscono. I meccanismi di interazione sono diversi a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche del materiale attraversato.

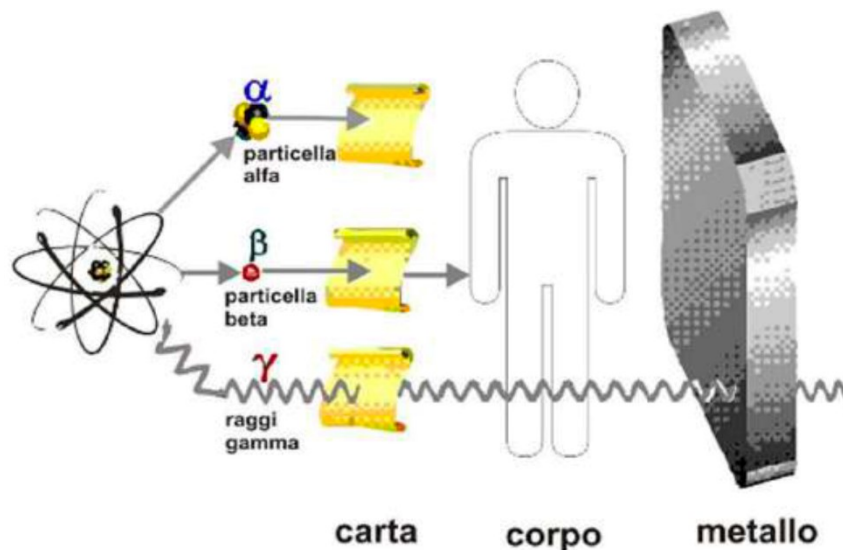


Figura 1.2 – Radiazioni ionizzanti e capacità di penetrazione

Le particelle α si caratterizzano per la produzione di una elevata densità di ionizzazione lungo le loro tracce. Il percorso nella materia di queste particelle è quindi sempre molto limitato. Esse possono essere arrestate in meno di 10 cm di aria oppure da un semplice foglio di carta. Le particelle α possono quindi

raggiungere lo strato germinativo della cute solo se possiedono un'energia maggiore di circa 7 MeV, soglia minima che permetterebbe loro di superare lo spessore di 70 μm di tessuto biologico. Non hanno grande pericolosità finché la sorgente resta al di fuori dell'organismo umano (irradiazione esterna), in quanto poco penetranti e facilmente schermabili. Diventano invece estremamente pericolose, una volta introdotte nell'organismo (irradiazione interna), poiché in questo caso tutta la loro energia viene ceduta agli organi ed ai tessuti interni del corpo umano.

È utile sottolineare che materiali isolanti come le plastiche, quando sono colpiti da radiazioni densamente ionizzanti come le particelle α , tendono nel tempo a divenire più fragili e pulverulenti (danno da radiazioni nei materiali). Questo problema è da tenere in considerazione, ad esempio, riguardo le sorgenti α emittenti da laboratorio, le quali devono essere sostituite periodicamente, a causa del danneggiamento accusato dal sottile strato di plastica con il quale vengono sigillate.

Anche le particelle β e gli elettroni hanno una capacità di penetrazione nella materia poco elevata, tuttavia i loro percorsi sono comunque largamente maggiori di quelli delle particelle cariche pesanti. Elettroni da 1 MeV sono arrestati in 4 metri di aria o in 4 mm di acqua.

Ai fini della schermatura delle sorgenti di elettroni, conviene in genere introdurre un primo strato di materiale leggero, con lo scopo di ridurre l'intensità dei raggi X di frenamento che queste particelle producono, e successivamente apporre uno strato di materiale pesante per ridurre i raggi X prodotti. Per gli elettroni positivi (positroni) bisogna inoltre tenere in debita considerazione la produzione di fotoni da 0,511 MeV che ha luogo nei processi di annichilazione.

Nel caso delle radiazioni indirettamente ionizzanti (le principali sono i raggi X, raggi γ e i neutroni), la cui penetrazione nella materia è considerevolmente maggiore rispetto alle particelle cariche, in considerazione della tipologia delle loro interazioni, non ha senso parlare di percorso nella materia. Con i raggi X e γ si fa piuttosto riferimento agli spessori emivalenti (SEV), i quali descrivono la porzione attraversata di materia entro la quale si dimezza l'intensità primaria della radiazione incidente. Tali spessori, quando espressi in $\text{g}\cdot\text{cm}^2$, cioè come prodotto dello spessore espresso in cm per la densità in g/cm^3 , risultano pressoché indipendenti dal tipo di materiale preso in considerazione, almeno per energie dei fotoni non troppo contenute. Ad esempio, a 1 MeV gli spessori di dimezzamento, si attestano

rispettivamente a 10 cm in acqua, 4,5 cm nel calcestruzzo e 0,9 cm nel piombo, mentre valutati in g/cm^2 risultano tra loro confrontabili (circa 10 g/cm^2).

Per schermare in maniera efficace le radiazioni X e γ si devono utilizzare materiali pesanti con elevato numero atomico, che presentano cioè alta densità elettronica, come ad esempio piombo, tungsteno, calcestruzzo baritico etc.

I neutroni, infine, perdono energia tramite le interazioni con i nuclei degli atomi dei materiali attraversati. In un ampio intervallo di energia, tra circa 10 keV e 10 MeV, il principale meccanismo di interazione con la materia biologica è la diffusione elastica con la messa in moto di nuclei di rinculo, principalmente i protoni dell'idrogeno. Ad energie molto basse, inferiori a 0,5 eV, vi è una prevalenza invece delle reazioni di cattura da parte dei nuclei, con conseguente emissione di raggi γ e di altre particelle.

Poiché si tratta di radiazioni indirettamente ionizzanti, anche per i neutroni si può tentare di introdurre lo spessore di dimezzamento, sebbene molto meno significativo rispetto al caso dei fotoni.

Come esempio generale, si può menzionare che in acqua, a neutroni da 3 MeV e 10 MeV, corrispondono SEV dell'ordine di 3 cm e 14 cm rispettivamente.

Per la schermatura di fasci di neutroni i materiali migliori sono quelli caratterizzati da elevato contenuto di protoni e nuclei leggeri, come acqua, paraffina, calcestruzzo.

L'azione di danneggiamento delle particelle ionizzanti sull'organismo dipende direttamente dai processi fisici di eccitazione e di ionizzazione degli atomi e delle molecole dei tessuti biologici dovuti agli urti delle particelle, che sono dette appunto particelle ionizzanti oppure anche radiazioni ionizzanti (nel caso in cui abbiano energia sufficiente per produrre questi processi).

Le radiazioni ionizzanti, come già affrontato, possono essere: raggi X emessi dagli atomi ed i raggi γ emessi dai nuclei (onde elettromagnetiche), le particelle alfa, beta, neutroni e protoni (particelle corpuscolari).



Figura 1.3 – Radiazioni ionizzanti

Il meccanismo, per mezzo del quale avviene la cessione d'energia, è noto come interazione tra radiazione e materia. Se il materiale irradiato in questione è tessuto biologico, è possibile assistere a danni biologici, di varia entità e grado.

I raggi X e raggi γ rappresentano la fonte di rischio principale da radiazioni ionizzanti per i lavoratori del settore sanitario. Essi vengono prodotti da macchine (apparecchiature radiogene) e da sorgenti di isotopi radioattivi e vengono sfruttati in medicina, nella diagnostica (radiodiagnostica, medicina nucleare, densitometria ossea) e nella terapia (radioterapia, terapia metabolica).

Il potere di penetrazione, ovvero la frazione di radiazione incidente che riesce a superare il materiale stesso, dipende da vari fattori fra cui la tipologia delle radiazioni (raggi X, elettroni, ecc.), la loro energia, il tipo e le caratteristiche del materiale assorbente.

Come trattato in precedenza, la penetrazione delle particelle α è molto ridotta (vengono facilmente “bloccate” da un singolo strato di carta).

La penetrazione delle particelle β (elettroni) è maggiore e si spinge fino a qualche centimetro di acqua per le alte energie impiegate tipicamente in radioterapia (>10 MeV).

I raggi X, invece, non vengono mai completamente attenuati (vale la legge dell'attenuazione esponenziale). Come visto, viene infatti utilizzato un parametro differente, lo spessore emivalente (SEV), cioè lo spessore entro il quale l'intensità si riduce alla metà).

Tutti i processi di decadimento evolvono nel tempo secondo uno stesso schema, descritto da una curva con andamento esponenziale decrescente, detta “curva di decadimento”.

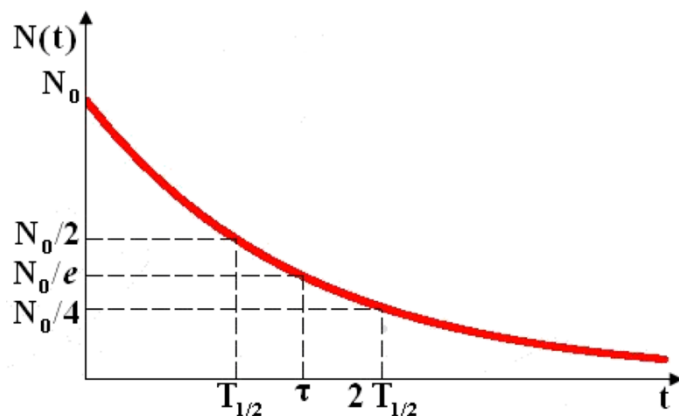


Figura 1.4 – Curva di decadimento radioattivo

La legge che descrive l'andamento del decadimento radioattivo è la seguente:

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

N_0 = numero di nuclei all'istante t_0

$N(t)$: numero di nuclei non ancora decaduti all'istante t

Si definisce tempo di dimezzamento ($t_{1/2}$) il tempo in cui il numero di radionuclidi si dimezza, cioè $N(t_{1/2}) = 0.5 N_0$

La legge del decadimento radioattivo afferma in sostanza che il numero di nuclei non ancora disintegrati decresce esponenzialmente nel tempo.

URANIO 238 (U238) DECADIMENTO RADIOATTIVO			URANIO 235 (U235) DECADIMENTO RADIOATTIVO			TORIO 232 (Th232) DECADIMENTO RADIOATTIVO		
tipo di radiazione	nuclide	tempo di dimezzamento	tipo di radiazione	nuclide	tempo di dimezzamento	tipo di radiazione	nuclide	tempo di dimezzamento
α	uranio-238	447 miliardi di anni	α	uranio-235	703.8 milioni di anni	α	torio-232	14.05 miliardi di anni
β	torio-234	24.1 giorni	β	torio-231	25.52 ore	β	radio-228	5.75 anni
β	protattinio-234m	1.17 minuti	α	protoattinio231	32800 anni	β	attinio-228	6.15 ore
α	uranio-234	245000 anni	α	attinio-227	21.77 anni	α	torio-228	1913 anni
α	torio-230	75200 anni	β	torio-227	18.72 giorni	α	radio-224	3.66 giorni
α	radio-226	1600 anni	α	radio-223	11.43 giorni	α	radon-220	55.6 secondi
α	radon-222 (*)	3.823 giorni	α	radon-219	3.96 secondi	α	polonio-216	0.145 secondi
α	polonio-218	3.05 minuti	α	polonio-215	0.00178 secondi	α	piombo-212	10.64 ore
β	piombo-214	26.8 minuti	α	piombo-211	36.1 minuti	β	bismuto-212	60.6 minuti
β	bismuto-214	19.7 minuti	β	bismuto211	2.14 minuti	β	polonio-212	0.299 microsecondi
β	polonio-214	0.000164 secondi	α	tallio-207	4.77 minuti	α	tallio-208	3.05 minuti
α	piombo-210	22.3 anni	β	piombo-207	stabile	β	piombo 208	stabile
β	bismuto-210	5.01 giorni						
α	polonio-210	138.4 giorni						
α	piombo-206	stabile						

Figura 1.5 – Serie di decadimento di Uranio e Torio

L'utilizzo delle radiazioni ionizzanti, nonostante rappresenti una fonte di rischio per gli operatori, il paziente e la popolazione è ormai diffuso in larga scala in tutto il mondo, in virtù del beneficio netto (diagnosi di malattie, terapie) che tale pratica offre.

Indipendentemente da ciò, ogni essere umano è continuamente esposto alla radiazione di fondo (naturale ed artificiale) dovuta ai raggi cosmici, alle sostanze radioattive presenti naturalmente sulla Terra ed ai materiali radioattivi prodotti dall'uomo ed immessi nell'ambiente. Il contributo di dose dovuto a questa radiazione varia da luogo a luogo, dall'altitudine, dalla composizione del suolo ecc. Mediamente in Italia si assorbe una dose annuale di circa 1 – 3 mGy.

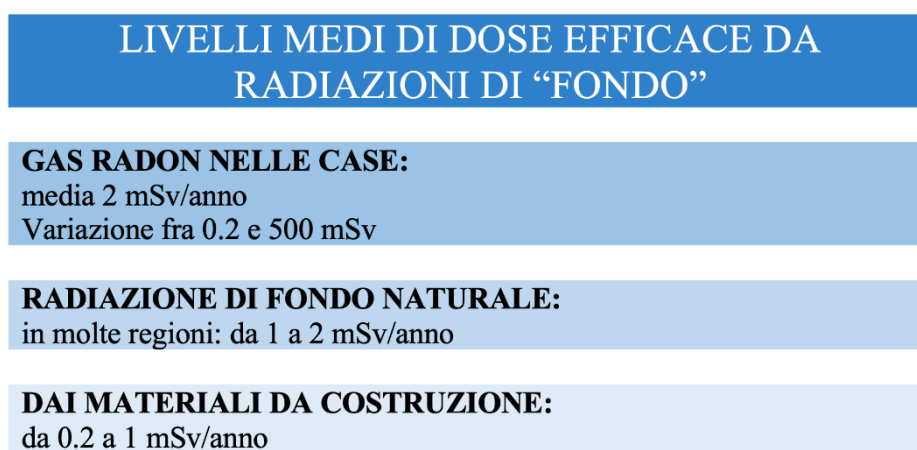


Figura 1.6 – Livelli medi di dose efficace da radiazioni di "fondo"

1.3 Radiazioni Non Ionizzanti

Le radiazioni non ionizzanti (NIR) sono forme di radiazioni elettromagnetiche (comunemente chiamate campi elettromagnetici) che, contrariamente alle radiazioni ionizzanti, sono composte da fotoni la cui energia non è sufficiente per indurre il fenomeno di ionizzazione. Non sono in grado quindi di modificare in maniera nociva le componenti della materia e degli esseri viventi (atomi, molecole). Hanno frequenza inferiore a 10^{15} Hz e comprendono i campi delle basse frequenze, radiofrequenze, microonde e infrarosso. La quantità di energia trasportata, e quindi trasferita ai tessuti biologici quando questi vengono irradiati, non è sufficiente a rompere i legami chimici delle molecole. Nonostante ciò, sulla loro innocuità il dibattito e la ricerca sono ancora ferventi.

Possono essere suddivise in:

- campi elettromagnetici a frequenze estremamente basse (ELF)
- radiofrequenze (RF)
- microonde (MO)
- infrarosso (IR)
- luce visibile

L'essere umano è sempre stato immerso in un fondo elettromagnetico naturale: le onde elettromagnetiche hanno molteplici origini naturali come il Sole, le stelle, alcuni fenomeni meteorologici come le scariche elettrostatiche, il campo magnetico terrestre. A partire dall'epoca della rivoluzione industriale, a questi campi elettromagnetici di origine naturale si sono sommati quelli artificiali, strettamente legati allo sviluppo di scienza e tecnologia. Fra questi ci sono i radar, gli elettrodotti, ma anche oggetti di uso quotidiano e domestico come apparecchi televisivi, forni a microonde e telefoni cellulari.

Negli ultimi anni, con una sempre maggiore consapevolezza, e talvolta timore, sono aumentati gli interrogativi relativi ai possibili effetti sulla salute legati all'inquinamento elettromagnetico anche detto elettrosmog; perplessità e paure senza dubbio alimentate dall'utilizzo quotidiano che i mass media fanno di questi termini, nella maggioranza dei casi senza affrontare l'argomento con chiarezza e perseguendo rigore scientifico. L'inquinamento elettromagnetico o elettrosmog è prodotto da radiazioni non ionizzanti con frequenza inferiore a quella della luce infrarossa.

Le istituzioni preposte dei vari paesi hanno tentato di applicare a questa materia d'interesse una normativa adeguata ed efficiente, mentre le agenzie ambientali esercitano una sistematica attività di controllo sugli impianti e sui siti coinvolti.

I campi elettromagnetici (CEM) hanno origine dalle cariche elettriche e dal loro movimento (corrente elettrica). L'oscillazione delle cariche elettriche, ad esempio in un'antenna o in un conduttore percorso da corrente, produce campi elettrici e magnetici che si propagano nello spazio sotto forma di onde.

Le onde elettromagnetiche sono una forma di propagazione dell'energia nello spazio e, caratteristica peculiare di cui non godono le onde meccaniche, si possono propagare anche nel vuoto. Il campo elettrico (E) ed il campo magnetico (H) oscillano perpendicolarmente alla direzione dell'onda.

La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è di circa 300.000 Km/s (chilometri per secondo).

Ogni onda elettromagnetica è definita dalla sua frequenza, cioè il numero di oscillazioni compiute in un secondo, e si misura in cicli al secondo o Hertz (Hz); maggiore è la frequenza di un'onda, maggiore è l'energia che essa trasporta.

L'onda elettromagnetica è caratterizzata, inoltre, da altre tre grandezze fisiche:

- l'intensità del **campo elettrico** misurata in volt/metro (V/m);
- l'intensità del **campo magnetico** misurata in ampere/metro (A/m);
- l'intensità dell'**energia trasportata** misurata in Joule (J).

L'insieme di tutte le onde elettromagnetiche, classificate in base alla loro frequenza, costituisce lo spettro elettromagnetico.

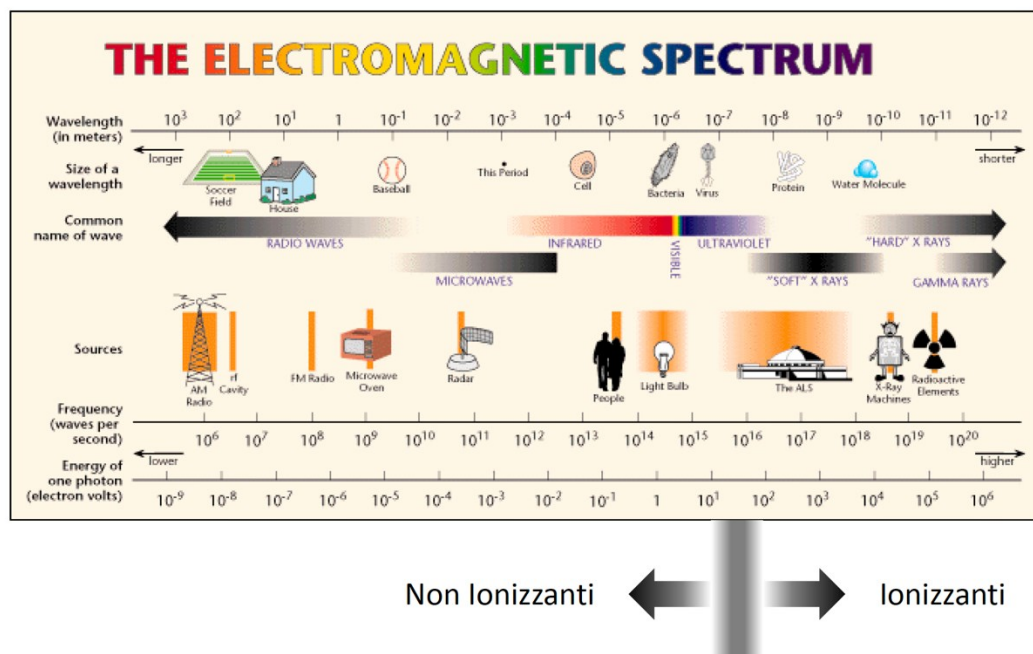


Figura 1.7 – Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro può essere suddiviso in due sezioni, a seconda che le onde siano dotate o meno di energia sufficiente a ionizzare gli atomi della materia con la quale interagiscono:

- radiazioni non ionizzanti (NIR = Non Ionizing Radiations), comprendono le radiazioni fino alla luce visibile;
- radiazioni ionizzanti (IR = Ionizing Radiations), coprono la parte dello spettro dalla luce ultravioletta ai raggi gamma.

Le radiazioni non ionizzanti si dividono in radiazioni a bassa e alta frequenza. La classificazione si fonda sulla differente interazione che i due gruppi di onde hanno con gli organismi viventi ed i diversi rischi che potrebbero causare alla salute umana.

La normativa nazionale e regionale inerente alla tutela della popolazione dagli effetti dei campi elettromagnetici, disciplina separatamente le basse frequenze (elettrodotti) e alte frequenze (impianti radiotelevisivi, ponti radio, stazioni radio base per la telefonia mobile ecc.).

Ai fini radioprotezionistici vengono prese in considerazione NIR prodotte dall'uomo (fino ai 300 GHz).

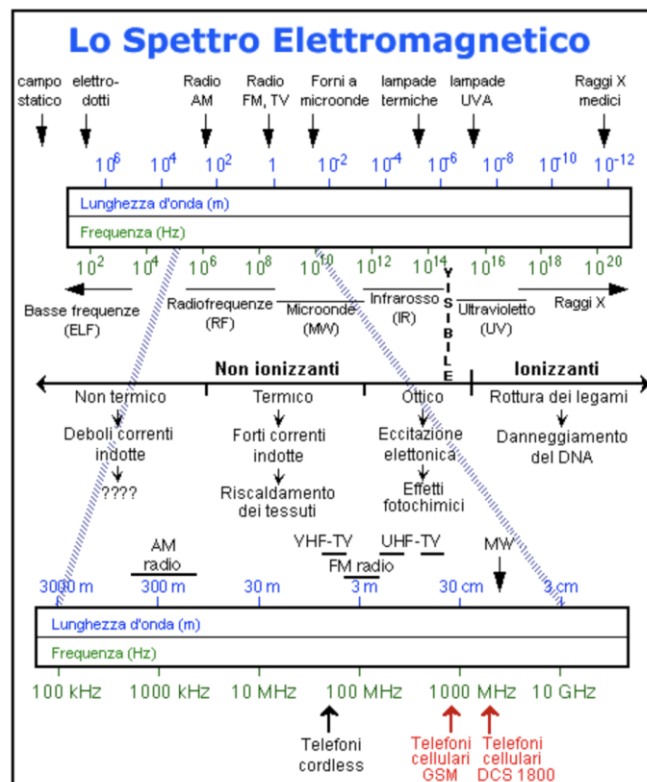


Figura 1.8 – Lo spettro elettromagnetico

CAPITOLO 2: PROPAGAZIONE DEL CAMPO ELETTRO-MAGNETICO E GRADO DI PENETRAZIONE NEI TESSUTI BIOLOGICI

2.1 Onde elettromagnetiche nello spazio

Le onde elettromagnetiche sono una combinazione di campi elettrici e campi magnetici variabili, che si propagano nello spazio seguendo un moto ondulatorio. Esse sono generate da cariche che subiscono delle accelerazioni.

A differenza delle onde elastiche ed acustiche, le onde elettromagnetiche sono in grado di propagarsi anche nel vuoto oltre che nell'aria, nell'acqua ed in altri materiali ad esse trasparenti.

Non sussiste la necessità di un mezzo materiale nel quale propagarsi: i campi elettrico e magnetico si generano infatti per mutua induzione anche nel vuoto dove la velocità di propagazione è massima pari $3,00 \times 10^8$ m/s.

Esse sono soggette a fenomeni come la riflessione, la rifrazione, la diffrazione e l'interferenza. Non comportano trasporto di materia ma di energia: si tratta di energia elettromagnetica o radiante, che viene trasportata in quantità proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica.

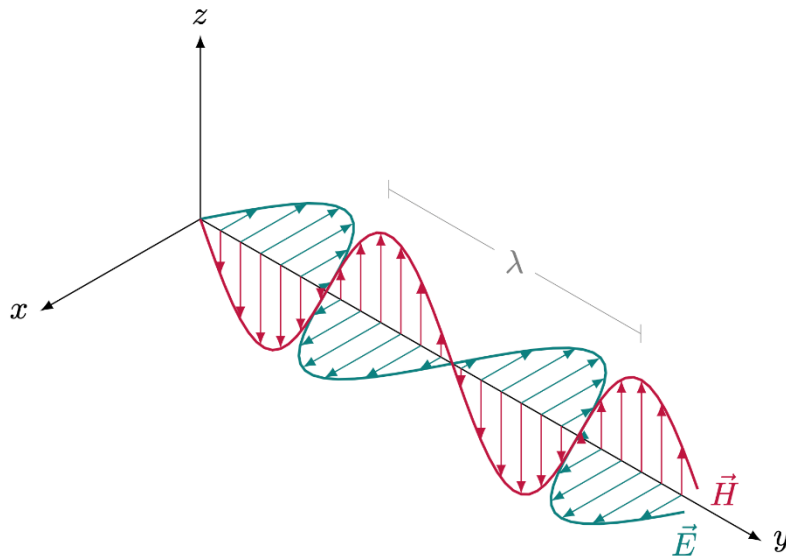


Figura 2.1 – Esempio di onda elettromagnetica nello spazio

L'onda elettromagnetica è un'onda trasversale, in quanto le due grandezze (campo elettrico E e campo magnetico B) variano ed oscillano perpendicolarmente allo spostamento dell'onda.

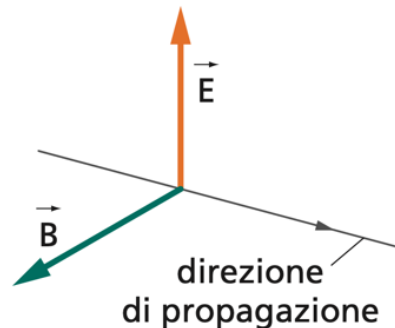


Figura 2.2 – Direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica

Quando un'onda elettromagnetica incontra un mezzo materiale, la sua energia può essere assorbita dal mezzo o può venire trasmessa.

L'interazione delle onde elettromagnetiche con la materia è strettamente legata alla loro frequenza.

La frequenza “ f ” e la lunghezza d'onda “ λ ” di un'onda elettromagnetica sono legate dalla relazione $f\lambda = v$ dove “ v ” è la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica, che nel vuoto è uguale alla velocità della luce.

2.2 Propagazione e assorbimento di radiazioni non ionizzanti nei tessuti biologici

L'analisi dell'effetto della radiazione elettromagnetica sui tessuti biologici consiste nella valutazione di come un campo interagisca con il corpo e, nel caso in cui dell'energia penetri e venga assorbita dal tessuto, di quali fenomeni fisio-patologici possono prendere piede, con accelerazioni di processi naturali o insorgenza di alterazioni.

L'impatto viene valutato assumendo per prima cosa di essere in presenza di un'onda piana uniforme in aria che incide sul tessuto biologico.

Questa premessa costituisce un'approssimazione, valida in modo rigoroso solo nei casi in cui la geometria del tessuto biologico con cui l'onda elettromagnetica interagisce è tale da avere raggi di curvatura grandi rispetto alla lunghezza d'onda λ (in pratica per frequenze superiori a qualche GHz).

A livello di impiego pratico il modello basato su questa approssimazione continua ad essere spesso utilizzato anche a frequenze più basse per ricavare comunque dei valori indicativi. Come presentato in precedenza, le onde elettromagnetiche che interagiscono con porzioni di materiale, sia biologico che non biologico, sono soggette a fenomeni come la riflessione, la rifrazione, la diffrazione e l'interferenza. Inoltre, un altro tema cruciale a livello di analisi radioprotezionistica si configura nella profondità di penetrazione di tali onde.

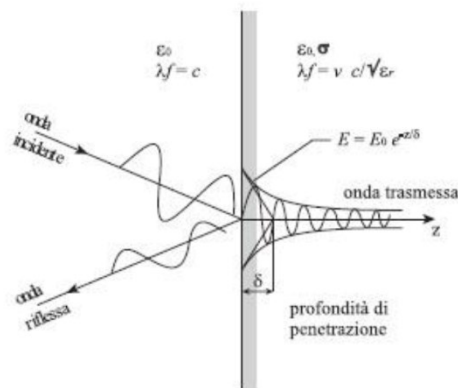


Figura 2.3 – Profondità di penetrazione delle onde

La profondità, o spessore di penetrazione, in incidenza normale, si può calcolare analiticamente grazie alla teoria della riflessione/rifrazione di onda piana.

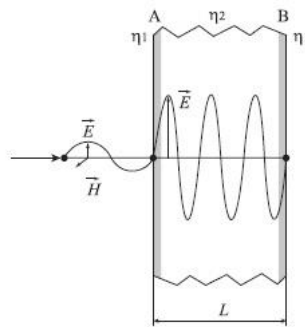
$$\delta = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r} \right)^2} - 1 \right)}}$$

I tessuti biologici sotto i 10 KHz sono classificabili come buoni conduttori e l'espressione di cui sopra si semplifica:

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi \mu_0 \sigma f}$$

Tuttavia, a queste frequenze la lunghezza d'onda λ è così grande che il modello di incidenza di onda piana su superficie piana infinita non vale più.

Se le frequenze delle NIR non superano i 10 GHz, e perciò lo spessore di penetrazione non scende sotto la soglia di 1 cm, l'onda elettromagnetica che prosegue nei tessuti biologici di vario tipo (tessuto adiposo, muscolare, osseo) incontra di fatto superfici di discontinuità fra materiali diversi che danno origine a riflessioni interne multiple e di conseguenza anche concentrazioni di campo elettromagnetico rilevabili, creando di fatto zone «di assorbimento di energia concentrate».



Nel caso in cui le frequenze dell'onda elettromagnetica irradiata dalla sorgente (ad esempio un'antenna) sono basse, oltre a non valere più il modello di rifrazione dell'onda piana nei tessuti biologici, è possibile non trovarsi più nella regione di campo lontano dell'antenna, ed è quindi necessario abbandonare anche l'ipotesi di propagazione del campo elettromagnetico in onde piane uniformi.

Se questa eventualità si verifica, necessariamente lo studio si complica sensibilmente e bisogna introdurre nuove grandezze dosimetriche.

2.3 Impieghi delle radiazioni elettromagnetiche in campo biomedico

Le radiazioni elettromagnetiche appartenenti a differenti bande di frequenza trovano diverse tipologie di impieghi in campo biomedico.

Alcuni esempi sono i seguenti:

- **Raggi γ** : data la loro alta frequenza, sono le radiazioni più energetiche tra quelle usate in medicina e si prestano per la sterilizzazione di strumenti e per scopi terapeutici, soprattutto in oncologia, dove si sfruttano per bombardare selettivamente e con elevata precisione tessuti tumorali. Hanno anche impieghi diagnostici nel campo della medicina nucleare. Infatti, utilizzando isotopi radioattivi è possibile eseguire indagini metaboliche. Ad esempio, a tale scopo

si impiegano γ -camere e scintillatori capaci di convertire in immagine la radiazione γ così che possa essere oggetto di analisi;

- **Raggi X:** sono usati in diagnostica per ottenere immagini radiografiche, oltre a rappresentazioni di sezioni corporee mediante sistemi TAC (Tomografia Assiale Computerizzata);
- **Radiazione ottica:** un uso diffuso di tale radiazione è quello analitico negli spettrofotometri. Inoltre, ognuno dei tre gruppi costituenti la radiazione ottica ha impieghi specifici. L'ultravioletto annovera tra le sue applicazioni quelle in ambito terapeutico, ad esempio in laser medici o in trattamenti di precisione. Nel secondo caso, si usano molecole fotolabili all'UV come vettori di trasporto di sostanze chimiche (ad esempio farmaci) su piste metaboliche. Una volta giunte a destinazione, le molecole sono irradiate con UV per liberarne il contenuto. L'ultravioletto è inoltre usato per la sterilizzazione in quanto possiede energia sufficiente per rompere i legami chimici e danneggiare così i microorganismi potenzialmente dannosi.

La banda di frequenza del visibile ha rappresentato una delle fonti di informazione principali per la diagnostica medica fino a pochi decenni fa.

Attraverso un'analisi cromatica di porzioni del corpo umano, come ad esempio la pelle (melanina), il sangue (emoglobina) o l'urina, si possono ricavare numerose informazioni utili.

L'infrarosso è ampiamente usato sia per fini diagnostici, ad esempio nella termografia ad infrarosso o nell'ossimetria ottica, sia per scopi terapeutici, ad esempio per la fotocoagulazione.

- **Radiazione a radiofrequenza:** tali radiazioni sono utilizzate per fini terapeutici, ad esempio per ablazione a radiofrequenza.

2.4 Campi elettromagnetici in diagnostica clinica ed in terapia

Il principale effetto dei campi elettromagnetici (specialmente quelli a radiofrequenza) sul corpo umano è il riscaldamento: il medesimo principio sfruttato nei forni a microonde per riscaldare i cibi.

Nel campo delle tecnologie dell'elettromagnetismo, da molti anni uno dei settori più ferventi nella ricerca fondamentale ed applicata consiste nello studio dell'interazione tra i campi elettromagnetici ed i sistemi biologici, quali il corpo umano.

Se in passato tali ricerche si sono concentrate verso lo studio dei possibili effetti dannosi dell'interazione tra campi e sistemi biologici ed alla valutazione dosimetrica, recentemente ha preso piede un approccio innovativo che tende alle ampie possibilità offerte dall'impiego di tali processi di interazione per produrre uno specifico effetto desiderato. Evidentemente questo suscita considerevole interesse in ambito medico, dove la natura non ionizzante dei campi elettromagnetici, la loro capacità di penetrare la materia e la specificità delle proprietà elettromagnetiche dei diversi tessuti umani (anche in dipendenza del loro stato patologico) hanno dato l'impulso allo studio ed allo sviluppo di nuove metodologie diagnostiche e terapeutiche, per migliorare ed affiancare quelle correntemente in uso, con l'obiettivo di migliorare la qualità e la precocità delle diagnosi o contribuire al più efficace trattamento di determinate patologie.

Un possibile esempio di applicazione in campo terapeutico è l'ipertermia a microonde, processo dove il riscaldamento di specifici target costituiti da tessuti affetti da tumore, mediante la focalizzazione dell'energia del campo a microonde nella regione d'interesse, è sfruttato per indurre l'apoptosi (termoablazione) delle cellule malate, oppure per incrementare localmente l'efficacia dei farmaci chemio e radioterapici. Nel settore diagnostico, un esempio è lo screening morfologico e funzionale per la diagnostica precoce del tumore al seno. Esso sfrutta la differente risposta a microonde espressa dai tessuti sani rispetto a quelli malati, con lo scopo di ottenere preziose informazioni diagnostiche dalla misura dei campi diffusi dai tessuti in esame.

In questa prospettiva, l'attività di ricerca riguarda anche lo sviluppo di tecnologie innovative di diagnostica e terapia basate sull'impiego di campi elettromagnetici aventi frequenze proprie delle microonde. In particolare, si tenta di definire delle condizioni di irradiazione necessarie ad indurre l'effetto desiderato, si tende verso la sintesi e la messa a punto dei relativi sistemi radianti e lo sviluppo di metodi di elaborazione dati per l'estrapolazione delle informazioni utili alle diagnosi.

In ambito diagnostico, l'attenzione si concentra su due tematiche. La prima consiste nello sviluppo di una tecnica innovativa per la diagnostica precoce del tumore al seno, che impiega agenti di contrasto nanomagnetici, i quali sono in grado di concentrarsi in maniera selettiva nei tessuti malati. Grazie alla natura non magnetica del corpo umano, utilizzare un simile agente di contrasto, già approvato per altri

impieghi biomedicali, permette di ridurre l'incidenza statistica di falsi positivi e negativi, con un evidente beneficio in termini di affidabilità e qualità della diagnosi. La seconda tematica coinvolge la messa in campo di tecniche di imaging differenziale a microonde per il monitoraggio dell'evoluzione di una patologia nel suo decorso o nell'arco temporale di una terapia. In particolare, l'attenzione è incentrata sul monitoraggio dei cambiamenti fisiologici dei tessuti cerebrali determinati da alterazioni del normale flusso sanguigno (ischemie, emorragie) o da eventi traumatici (ematomi). In entrambi i casi, le attività di ricerca mirano alla progettazione di dispositivi in grado di ottimizzare l'interazione fra campi elettromagnetici e tessuti umani, oltre a sviluppare approcci di imaging capaci di delineare, dal punto di vista delle proprietà elettromagnetiche, ambienti biologici di alta complessità.

Per quanto concerne gli aspetti terapeutici, l'attività di ricerca affronta lo sviluppo di nuove metodologie per l'ipertermia a microonde, ed in particolare la progettazione e realizzazione di applicatori capaci di focalizzare l'energia elettromagnetica nei tessuti malati, minimizzando allo stesso tempo il riscaldamento dei tessuti circostanti, al fine di evitare effetti collaterali indesiderati. L'utilizzo di opportune tecniche di ottimizzazione per la sintesi di campo e l'accurata modellizzazione numerica della propagazione del segnale elettromagnetico e della sua interazione con le strutture biologiche esposte sono cruciali per l'attività, che, oltre a ciò, fornisce anche gli strumenti necessari all'opportuna pianificazione di trattamenti terapeutici specifici.

Un'ulteriore frontiera, infine, lavora sulla possibilità di utilizzare in sinergia la natura duale (diagnostico/terapeutica) delle microonde, unendo l'insieme dei metodi e degli strumenti sviluppati, per la messa a punto di sistemi "teranostici". In particolare, il fine ultimo è la progettazione di un sistema che integri un dispositivo per la terapia termica con un dispositivo diagnostico, in grado di ottenere le informazioni necessarie alla pianificazione ad hoc del trattamento terapeutico specifico e verificare in corso d'opera l'evoluzione e l'efficacia dello stesso.

CAPITOLO 3: SORGENTI DI RADIAZIONI IONIZZANTI (RADIOATTIVITA' NATURALE E SORGENTI RADIOGENE ARTIFICIALI)

3.1 Sorgenti di radiazione ionizzanti

Le sorgenti di radiazioni si possono suddividere in due grandi categorie:

- **sorgenti radioattive;**
- **sorgenti radiogene.**

Le **sorgenti radioattive** sono delle fonti, naturali o artificiali, che a causa della loro natura caratterizzata da nuclei atomici instabili tendono a stabilizzarsi, emettendo energia sotto forma di radiazione (alfa, beta, gamma...).

In natura esistono diversi materiali radioattivi (discendenti dell'uranio e del torio) che si trovano nelle rocce della crosta terrestre (a concentrazioni tipiche di attività di 10 – 50 Bq/Kg) o il Potassio radioattivo (K-40) che si trova anche nei sistemi biologici (a concentrazioni di 100 – 700 Bq/Kg).

Grazie al progresso tecnologico al giorno d'oggi è possibile sintetizzare anche altri materiali aventi proprietà radioattive: si parla per esempio di sostanze di scarto derivate dai processi di reattori nucleari, acceleratori, ecc.

Le **sorgenti radiogene** sono delle apparecchiature che sfruttano l'accelerazione delle particelle cariche (elettroni, protoni, ecc.) con lo scopo di produrre una radiazione ad alta intensità. Un fascio di elettroni accelerati, quando interagisce con materiale ad alto numero atomico (es. tungsteno) genera un fascio di onde elettromagnetiche dette raggi X.

Per irradiazione si intende, per un dato corpo o organismo, la quantità di energia radiante che l'unità di superficie dello stesso riceve (o emette) nell'unità di tempo.

L'irradiazione può essere di due tipologie:

- **irradiazione esterna**
- **contaminazione interna**

Si parla di **irradiazione esterna** quando l'organismo è irradiato da sorgenti di radiazioni situate al di fuori di esso (es. radiodiagnostica, teleradioterapia).

Nel caso in cui invece la sorgente si trovi all'interno dell'organismo, con conseguente messa in circolo di sostanze radioattive (es. esami di medicina nucleare

o inalazione/ingestione accidentale di radionuclidi) si parla di **contaminazione interna**.

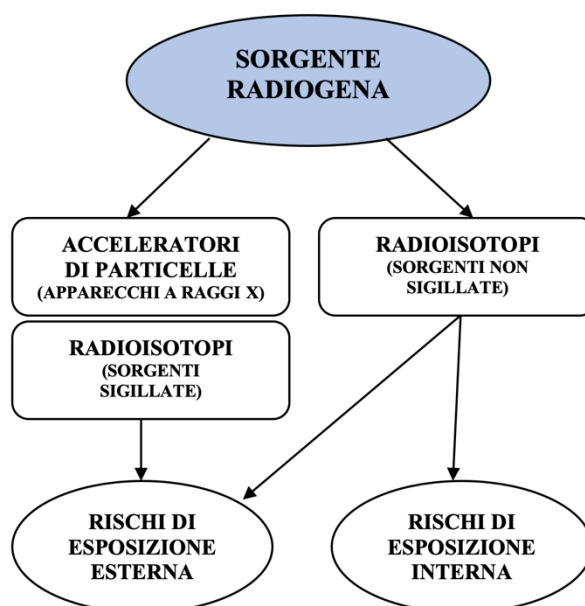


Figura 3.1 – Sorgente radioattiva e possibili tipi di irradiazione

3.3 Radioattività naturale

Il termine radioattività naturale racchiude quell'insieme di radiazioni che vengono generate da fonti che si trovano in natura. Un primo esempio sono le radiazioni cosmiche che giungono sulla Terra attraversando l'atmosfera.

Gli elementi radioattivi (radionuclidi) presenti nella crosta terrestre sono molti, così come quelli rintracciabili nel corpo umano ed anche all'interno degli alimenti che consumiamo. Esempi principali di radionuclidi naturali sono l'uranio, presente in numerose formazioni geologiche, il radon (elemento gassoso derivante da una famiglia radioattiva dell'uranio e presente in molti ambienti domestici) ed il potassio, che si può trovare, oltre che nella crosta terrestre, nel corpo umano.

Elementi radioattivi possono trovarsi in materiali di uso comune (ad esempio granito, tufo, materiali da costruzione, fertilizzanti, petrolio e derivati, ecc.).

La radioattività naturale varia a livello geografico, dipendentemente dalle caratteristiche geologiche e dell'altitudine, oltre che urbanistico.

Come mostrato nella Figura 3.2, le famiglie radioattive naturali sono tre, ciascuna avente un capostipite con vita media nell'ordine di 10^9 anni. Ogni serie termina con un isotopo stabile del piombo e comprende un elemento gassoso.

Uranio 238: l'elemento gassoso è il radon ($^{222}\text{Rn}_{86}$) la serie è nota come 4n+2
Torio 232 : l'elemento gassoso è il toron ($^{220}\text{Rn}_{86}$) la serie è nota come 4n
Uranio 235: l'elemento gassoso è l'actinon ($^{219}\text{Rn}_{86}$) la serie è nota come 4n+3

Figura 3.2 – Famiglie radioattive naturali

Il campo di radiazioni dovuto a sorgenti naturali, presente ovunque, viene indicato come radiazione di fondo naturale e comprende tre componenti fondamentali:

1. **i raggi cosmici**, costituiti da radiazioni primarie, emesse dai corpi stellari e, in minor misura, dal Sole, accompagnate dalle radiazioni secondarie prodotte da tali corpi celesti nella stessa atmosfera, a seguito di reazioni nucleari ad alta energia;
2. **i radioisotopi cosmogenici**, isotopi radioattivi che si producono per effetto dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera e con la superficie terrestre;
3. **i radioisotopi primordiali**, isotopi radioattivi presenti nel pianeta, in concentrazioni variabili che dipendono dagli eventi geochimici risalenti all'epoca di formazione del Sistema Solare e non ancora decaduti in forme stabili.

Nell'aria le radiazioni naturali sono dovute principalmente alla presenza di radon e toron, cioè di gas (il cui peso è 7,5 volte maggiore di quello dell'aria) appartenenti alle famiglie dell'uranio e del torio. Il radon ricopre un ruolo di sensibilmente maggiore impatto rispetto al toron a causa della sua vita media (3,82 giorni contro soli 55 secondi del toron), che comporta una maggiore probabilità di giungere all'esterno prima di decadere.

Il radon ed i suoi prodotti di decadimento emettono radiazioni ionizzanti (radiazioni α) che sono in grado di danneggiare il DNA. Se questi danni non vengono riparati, possono indurre la morte delle cellule, o, in casi peggiori, la trasformazione delle stesse in cellule tumorali. Data la sua natura gassosa, il radon viene inalato e penetra nei polmoni. Inoltre, i prodotti di decadimento del radon sono carichi elettricamente e aderiscono unendosi al particolato dell'aria; le particelle inalate si depositano nell'albero respiratorio, dove continuano ad emettere radiazioni, molto più pericolose in quanto fonte di irradiazione interna.

Secondo uno studio dell'Istituto Superiore di Sanità, il radon è responsabile di ben il 10% dei 31.000 tumori al polmone che si registrano in Italia ogni anno, dato assolutamente degno di considerazione, ma tuttora sconosciuto ai più (questo dato comprende per la maggior parte fumatori, a causa della sinergia tra radon e fumo che ne moltiplica gli effetti).

La concentrazione del radon viene misurata in Becquerel per metro cubo (Bq/m³). Studi effettuati in 11 Paesi europei, tra cui l'Italia, hanno evidenziato un aumento dell'incidenza di tumore polmonare pari a circa il 16% ogni 100 Bq/m³ di concentrazione di radon per un periodo di esposizione di 25-35 anni. Se invece si è esposti ad una concentrazione di circa 600 Bq/m³, il rischio di tumore del polmone è pari al doppio rispetto ad una persona non esposta.

Per quanto concerne l'esposizione al radon, non è possibile azzerare totalmente la presenza di gas radon dagli ambienti chiusi, ma si può ridurre la concentrazione. Anche la semplice azione di areare e ventilare con attenzione i locali può essere molto utile.

Per abbattere la presenza di radon si possono far effettuare diversi interventi di risanamento, condotti da una figura professionale delineata nel D. Lgs.101/2020, l'Esperto di risanamento radon. Alcuni esempi di tali procedure consistono nell'aumentare la pressione atmosferica nell'abitazione per contrastare la risalita del gas dal suolo oppure aspirare l'aria dal suolo per poi espellerla all'esterno, possibilmente sigillando le vie d'ingresso. Per le nuove costruzioni vanno utilizzati criteri anti-radon con un'attenta progettazione dell'edificio con lo scopo di impermeabilizzare l'edificio al suddetto gas e favorire la ventilazione naturale del suolo.

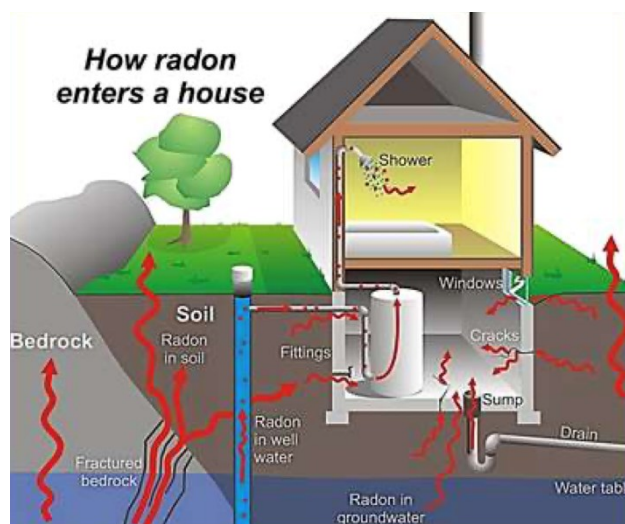


Figura 3.3 Meccanismi d'ingresso nel radon nelle case

Il nuovo D. Lgs. 101/2020 pubblicato il 31/07/2020 ed entrato in vigore dal 27/08/2020 tratta l'esposizione al gas radon nel titolo IV: "Sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti".

Con l'art. 12 di questo Decreto Legislativo vengono introdotte tre grandi novità rispetto alla normativa precedente:

- 1) nella precedente normativa si considerava il "livello di azione" mentre nella nuova normativa si parla di "livello di riferimento". Ciò è dettato dal fatto che in passato se non fosse stato superato il livello di azione non vi sarebbero state azioni previste. Ora invece il legislatore prevede che, anche qualora il livello di concentrazione di gas radon risulti inferiore al livello di riferimento, dovranno comunque essere intraprese azioni nell'ottica dell'applicazione del principio di ottimizzazione;
- 2) il precedente livello di azione per le attività lavorative era la concentrazione media annua di radon pari a 500 Bq/m³, mentre il nuovo livello di riferimento è stato abbassato a 300 Bq/m³ medi annui;
- 3) sono stati introdotti livelli di riferimento per le abitazioni, fattore non contemplato nella precedente normativa che si concentrava esclusivamente su luoghi in cui si svolgevano attività lavorative. È prevista l'istituzione di una sezione radon all'interno della banca dati della rete nazionale di sorveglianza della radioattività ambientale, nella quale vengono inseriti i dati di concentrazione di gas radon relativi alle abitazioni ed ai luoghi di lavoro (art. 13). L'accesso ai dati, assicurato dall'Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione (ISIN), è riservato alle amministrazioni e agli enti statali che ne facciano richiesta e all'Istituto Superiore di Sanità (ISS). La trasmissione dei dati radon in questa apposita sezione sarà compito delle agenzie regionali e provinciali per la protezione dell'ambiente (ARPA/APPA), delle Aziende Sanitarie Locali e dei servizi dosimetrici riconosciuti. È inoltre previsto che ISIN e l'ISS definiscano il protocollo tecnico per il reciproco scambio di informazioni tra le due banche dati.

Il Ministero della Salute, il Ministero del Lavoro, ISIN, INAIL, Regioni e Province autonome renderanno disponibili le informazioni su:

- livelli di esposizione al radon in ambienti chiusi;
- rischi sulla salute che derivano dal radon;

- l'importanza di effettuare le misure radon;
- i mezzi tecnici per il risanamento.

La nuova figura professionale dell'Esperto di risanamento radon introdotta dal D. Lgs. 101/2020 deve possedere i seguenti requisiti:

- essere abilitato alla professione di geometra, ingegnere o architetto;
- aver seguito uno specifico corso di 60 ore, organizzato da enti pubblici, associazioni, ordini professionali;
- essere iscritto all'albo professionale.

Questa figura è stata introdotta solo dalla normativa italiana in quanto non presente nella Direttiva Europea di recepimento 2013/59/Euratom.

3.4 Sorgenti radiogene artificiali

Per radioattività artificiale si intende quell'insieme di radiazioni prodotte a seguito di attività umane in cui vengono impiegati materiali radioattivi: produzione di energia nucleare, apparecchiature mediche a scopo diagnostico e terapeutico, apparecchiature industriali, attività di ricerca.

L'impiego di radiazioni ionizzanti è diventato ormai indispensabile su larga scala ed in molte attività umane. Infatti, i settori strettamente legati all'impiego di radionuclidi artificiali e di macchine radiogene sono in particolare quello industriale, sanitario e della ricerca scientifica.

Esiste inoltre un mondo tecnologico ormai entrato nella nostra vita quotidiana contenente prodotti che al loro interno ospitano sorgenti di radiazioni ionizzanti. Esempi ne sono i rivelatori di fumo, i misuratori di livello di fluidi, i rivelatori di umidità, i quadranti di strumentazioni, i sistemi antistatici, alcuni tipi di insegne luminose etc.

Altri apparati, ad esempio i parafulmini, contenenti ^{226}Ra o ^{241}Am , sono stati per lungo tempo utilizzati, ma ora vengono progressivamente sostituiti sempre più frequentemente da strutture prive di radionuclidi.

Vengono inoltre ampiamente impiegati dispositivi a raggi X e γ , nel settore industriale per esempio in un fondamentale campo tecnologico come quello dei controlli non distruttivi, in modo particolare nella determinazione di eventuali difetti nelle saldature e nelle strutture di fusione.

Le radiazioni ionizzanti possono garantire con il loro impiego vantaggi considerevoli anche in campi e processi appartenenti ad altri settori meno

prevedibili. Molto interessante è la sterilizzazione tramite irraggiamento, ottenuta utilizzando sia radionuclidi (^{60}Co , ^{137}Cs), sia macchine acceleratrici, delle derrate alimentari e dei prodotti medicali, che permette di eliminare la presenza di microrganismi indesiderati o potenzialmente nocivi.

Relativamente al settore medico, è diffusissimo l'impiego delle sorgenti di radiazioni sia in diagnostica sia in terapia. Ad oggi, le applicazioni in questo settore costituiscono la seconda causa di esposizione della popolazione alle radiazioni ionizzanti e la principale fonte di esposizione alle radiazioni artificiali.

In tutti i settori scientifici, inoltre, si fa uso di strumenti ed apparecchiature che molto spesso contengono sorgenti di radiazioni ionizzanti: da alcuni tipi di rilevatori in gascromatografia, ai diffrattometri, fino alle grandi macchine acceleratrici.

Queste sorgenti, però, utilizzate dall'uomo per alcune sue attività, sono ben note e studiate a fondo, poste sotto la responsabilità di esperti e sfruttate per le loro proprietà radiologiche secondo precise procedure, in altre parole sono "gestite" e quindi l'esposizione alle radiazioni derivanti dalla loro presenza e dal loro uso è completamente controllabile ed ottimizzabile.

CAPITOLO 4: SORGENTI DI RADIAZIONI NON IONIZZANTI

4.1 Esempi di sorgenti di radiazioni non ionizzanti

Le radiazioni non ionizzanti possono provenire da fonti naturali e artificiali.

Le sorgenti naturali di radiazioni non ionizzanti includono ad esempio:

- campi elettrici e magnetici naturali della Terra;
- onde elettromagnetiche provenienti dal Sole e dalle altre stelle;
- fenomeni naturali come fulmini.

Le fonti artificiali di radiazioni non ionizzanti includono oggetti e/o dispositivi di uso quotidiano come ad esempio:

- dispositivi wireless come: telefono cellulare;
- ripetitori di telefoni cellulari;
- dotazioni Wi-Fi;
- antenne per trasmissioni radiofoniche, televisive e telematiche in genere;
- forni a microonde;
- linee elettriche e cablaggi domestici;
- prodotti per l'illuminazione come luci a LED, lampadine ad incandescenza, lampadine fluorescenti compatte;
- laser portatili e puntatori laser;
- lettini abbronzanti.

I campi elettromagnetici variabili nel tempo originati dagli apparecchi elettrici sono un esempio di campi a frequenza estremamente bassa (ELF - Extremely Low Frequency) ed hanno in genere frequenze fino a 300 Hz.

Altre tecnologie producono campi a frequenza intermedia (IF - Intermediate Frequency) con frequenze da 300 Hz a 10 MHz e campi ad alta frequenza, radiofrequenza (RF), con frequenze da 10 MHz a 300 GHz.

TIPO DI RADIAZIONI	FREQUENZA	CHI LE PRODUCE
ELF (Extremely Low Frequency campi a bassa frequenza)	fino a 300 Hz	Elettrodotti ed apparecchi elettrodomestici in genere
IF (Intermediate Frequency campi frequenze intermedie)	da 300 Hz a 10 MHz	Monitor PC, dispositivi antitaccheggio, sistemi di allarme ecc....
RF (Radiofrequenze campi ad alta frequenza)	da 10 MHz a 300 GHz	Ripetitori radio e tv, stazioni radio base per telefonia mobile, cellulari, forni a microonde ecc....

Figura 4.1 – Tipi di radiazioni – frequenza – sorgenti

All'interno dell'ambiente domestico sono molti gli apparecchi che funzionano ad energia elettrica e ciascuno di questi genera un campo elettrico ed un campo magnetico a bassissima frequenza ogni volta che è in funzione.

È interessante e facilmente rilevabile come in ambiente domestico negli ultimi anni è cresciuto sempre più anche l'utilizzo di apparecchi emettitori di onde ad alta frequenza. Questi sono gli elettrodomestici di uso molto comune quali forni a microonde, telefoni cellulari, telefoni cordless, router wi-fi, baby-call, lampadine a basso consumo, sistemi di allarme ed antifurto.

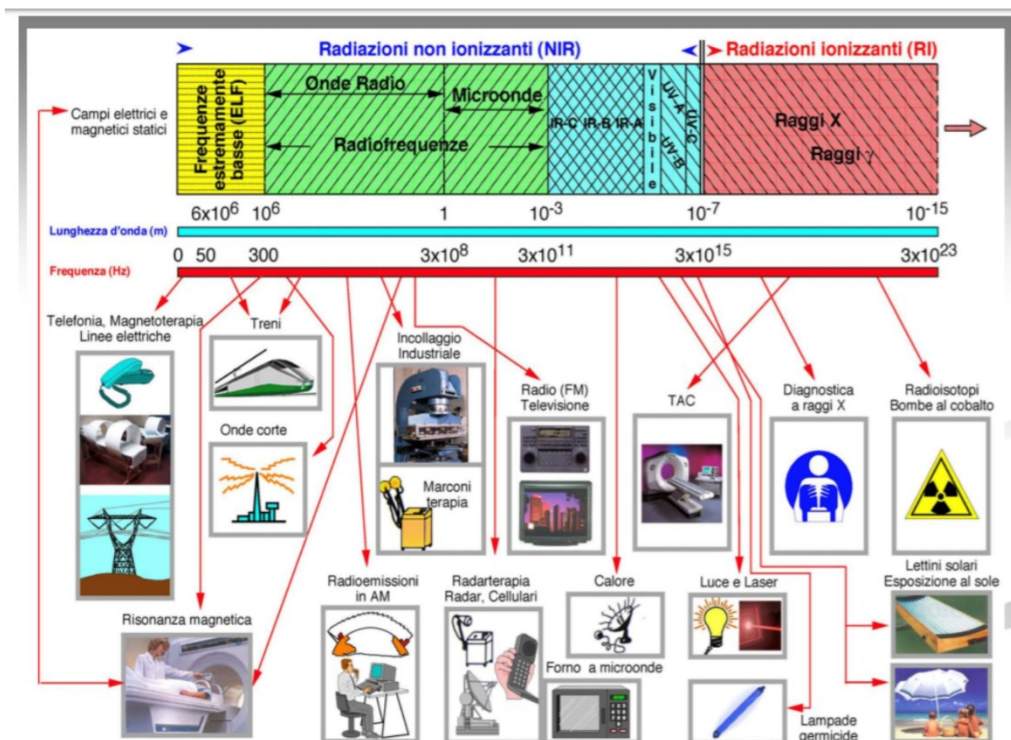


Figura 4.2 – Sorgenti di radiazioni

RADIAZIONI NON IONIZZANTI	UV	STERILIZZAZIONE	300 GHz – 30.000 THz	0.1 μm – 1 mm	
	VISIBILE	LASER LAMPADINE			
	INFRAROSSO	TELECOMANDI			
	RADIOFREQUENZE (RF)	MICROONDE (MW)	IMPIANTI RADAR RADAR TERAPIA ANTENNE PER LA TELEFONIA CELLULARE FORNI A MICROONDE PONTI RADIO	1 GHz – 300 GHz	1 mm – 30 cm
			ANTENNE RADIOTELEVISIVE APPARECCHI PER MARCONI TERAPIA ANTENNE PER RADIOAMATORI	100 kHz – 1 GHz	30 cm – 3 km
BASSE FREQUENZE (ELF)		VIDEOTERMINALI APPARECCHI PER MAGNETOTERAPIA ELETTRODOMESTICI ELETTRODOTTI	>0 Hz – 100 kHz	3 km – <∞	

Figura 4.3 – Sorgenti di radiazioni non ionizzanti

ELETTRODOMESTICI	CAMPO MAGNETICO (μT) alla distanza di		
	3 cm	30 cm	100 cm
Lavatrice	0.8-50	0.15-3	0.01-0.15
Lampada da tavolo	40-400	0.5-2	0.02-0.25
Asciugacapelli	6-2000	<0.01-1	<0.01-0.3
Ferro da stiro	8-30	0.12-0.3	0.01-0.03
Forno elettrico	1-50	0.15-0.5	0.04-0.09
Frigorifero	0.5-1.7	0.01-0.25	<0.01
Rasoio elettrico	15-1500	0.08-7	<0.01-0.3
Televisore	25-50	0.04-2	<0.01-0.15

Figura 4.4 Livelli di esposizione al campo magnetico per i più comuni elettrodomestici

CAPITOLO 5: DOSIMETRIA, GRANDEZZE ED UNITA' DI MISURA (DOSE ASSORBITA, DOSE EQUIVALENTE, DOSE EFFICACE)

5.1 Grandezze e unità di misura

La quantità di energia assorbita dall'organismo per unità di massa viene chiamata **dose assorbita** o semplicemente **dose** e si misura con una unità chiamata Gray (Gy).

$$\text{Dose} = \frac{\text{Energia Assorbita}}{\text{Massa}} = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$
$$[\text{Gy}] = [\text{J/Kg}]$$

La vecchia unità di misura della dose assorbita era il Rad. Un Rad corrisponde a 0.01 Gy.

L'irraggiamento di 1 litro (= 1 Kg) di acqua con una dose di 1 Gy porta ad un innalzamento di 0.00024 °C, ovvero 0.24 millesimi di grado. Sebbene sembri qualcosa di molto limitato, questa energia è in realtà sufficiente per sollevare questa quantità di acqua di 10 cm.

Poiché i vari tipi di radiazioni ionizzanti hanno una capacità intrinseca di provocare effetti biologici diversi agli organismi, a parità di dose si è introdotta una nuova grandezza detta **dose equivalente**, la quale viene misurata con un'unità di misura chiamata Sievert (Sv) e che tiene in considerazione la differente capacità di provocare effetti biologici (fattore di qualità specifica di ogni tipo di radiazioni ionizzanti).

Nell'uso clinico delle radiazioni ionizzanti tale fattore di qualità vale numericamente 1, perciò si può indifferentemente parlare di dose assorbita (in Gray) o di dose equivalente in (Sievert).

I rischi, a parità di dose assorbita (o dose equivalente), differiscono a seconda dell'organismo interessato.

È stato quindi introdotto il concetto di **dose efficace** (la cui unità di misura è il Sievert) che rappresenta la somma delle dosi equivalenti ponderate, ovvero pesate per i vari rischi relativi, nei tessuti ed organi del corpo.

Il concetto di dose efficace è stato implementato sulla base della necessità di standardizzare la dose equivalente ai vari organi in relazione alla dose come se fosse assunta al corpo intero. Infatti, i fattori di rischio si riferiscono ad un'irradiazione

uniforme del corpo intero (dati ottenuti dalle esplosioni di Nagasaki e Hiroshima congiuntamente ad altre esposizioni collettive).

$$\text{DOSE EFFICACE} = E = \sum_T w_T H_T$$

Dove:

H_T = DOSE EQUIVALENTE ALL'ORGANO O TESSUTO T

w_T = FATTORE DI PONDERAZIONE PER I VARI ORGANI

I fattori di ponderazione w_T (espressi come Sv/Gy) stabiliti dal D. Lgs. 101/2020 in attuazione della Direttiva 2013/59/Euratom sono riportati nella seguente tabella:

ORGANO	D. Lgs. 101/2020
Gonadi	0.08
Midollo osseo (rosso)	0.12
Colon	0.12
Polmone (vie respiratorie toraciche)	0.12
Stomaco	0.12
Mammelle	0.12
Vescica	0.04
Fegato	0.04
Esofago	0.04
Tiroide	0.04
Pelle	0.01
Superficie ossea	0.01
Cervello	0.01
Ghiandole salivari	0.01
Rimanenti organi o tessuti (ghiandole surrenali, regione extratoracica, vescichetta biliare, cuore, reni, linfonodi, muscolo, mucosa orale, pancreas, prostata (uomini), intestino tenue, milza, timo, utero/collo dell'utero (donne))	0.12

I fattori di ponderazione sono in costante aggiornamento e sono stati variati rispetto alle normative nazionali ed internazionali precedenti, le quali prevedevano i valori riportati nella seguente tabella:

ORGANO	D. Lgs 241 e ICRP-60	ICRP – 103 2007
Gonadi	0.20	0.08
Mammelle	0.05	0.12
Midollo osseo rosso	0.12	0.12
Polmoni	0.12	0.12
Tiroide	0.05	0.04
Ossa (superfici ossee)	0.01	0.01
Pelle	0.01	0.01
Colon	0.12	0.12
Stomaco	0.12	0.12
Vescica	0.05	0.04
Fegato	0.05	0.04
Esofago	0.05	0.04
Rimanti organi e tessuti	0.05	0.12
Reni – ghiandole salivari - cervello	-	0.02

La grandezza radioprotezionistica **dose efficace** è ritenuta correlabile in modo appropriato all'insorgenza di fenomeni stocastici a carico dei soggetti irradiati. Ovvero:

Probabilità (INSORGENZA EFFETTI STOCASTICI) \approx DOSE EFFICACE

La probabilità d'insorgenza di effetti stocastici è tanto più elevata quanto più elevata è la dose efficace. Tuttavia, poiché la correlazione con gli effetti stocastici è ritenuta nulla solo in presenza di $E = 0$, cioè in assenza di irradiazione, la Commissione ICRP ritiene che la dose efficace debba essere mantenuta quanto più bassa ragionevolmente possibile tramite l'ottimizzazione della Radioprotezione.

L'ICRP 60 (1990) ha fornito la seguente tabella dei coefficienti nominali di rischio per effetti stocastici (usabili per il calcolo del **detrimento**):

Popolazione Esposta	Cancri Fatali	Cancri NON Fatali	Effetti ereditari severi	Totale
LAVORATORI ADULTI	$4.0 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$	$0.8 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$	$0.8 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$	$5.6 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$
POPOLAZIONE GLOBALE	$5.0 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$	$1.0 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$	$7.3 \cdot 10^{-2} Sv^{-1}$

L'ICRP 103 (2007) ha aggiornato al ribasso questi dati fornendo la seguente tabella (Tabella A.4.4 dell'allegato A pag. 164 versione italiana):

Popolazione Esposta	Cancri Fatali e NON Fatali	Effetti ereditari severi	Totale
LAVORATORI ADULTI	$4.1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$0.1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$4.2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$
POPOLAZIONE GLOBALE	$5.5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$0.2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$5.7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

Le differenze di probabilità sono dovute alle differenti distribuzioni di età.

La probabilità di induzione di cancro fatali o non fatali ed effetti ereditari severi per un lavoratore adulto è 0.042 Sv^{-1} ($0.000\ 042 \text{ mSv}^{-1}$).

Questo significa che un lavoratore che per 50 anni ha assorbito 20 mSv/anno (pari al limite annuale previsto dalla legge per i lavoratori), ovvero una dose vita di $20 \text{ mSv/anno} \cdot 50 \text{ anni} = 1 \text{ Sv}$, ha una probabilità di: $0.042 \text{ Sv}^{-1} \cdot 1 \text{ Sv} = 0.042 \%$ di danni gravi.

Un lavoratore che per 50 anni ha assorbito 1 mSv/anno (pari al limite previsto dalla legge per la popolazione) ovvero una dose vita di 50 mSv , ha una probabilità di: $0.042 \text{ Sv}^{-1} \cdot 50 \text{ anni} \cdot 0.001 \text{ Sv/anno} = 0.0021 = 0.2 \%$ di danni gravi.

La seguente tabella confronta i nuovi valori con i precedenti:

Popolazione esposta	Cancro		Effetti ereditari		Totale	
	Stima attuale	Pub. 60	Stima attuale	Pub. 60	Stima attuale	Pub. 60
Intera popolazione	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
Adulti	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

CAPITOLO 6: EFFETTI BIOLOGICI E DANNI PER LA SALUTE (SAR, EQUAZIONE DEL BIOCALORE, DANNI DETERMINISTICI E DANNI STOCASTICI)

6.1 Effetti delle radiazioni non ionizzanti

L'esposizione ai campi elettromagnetici non ionizzanti può dare origine a due categorie di effetti:

1) Fisici

È noto come l'esposizione al campo elettromagnetico, attraverso una relazione causa/effetto, induca altri effetti fisici misurabili.

La ricerca in questo campo è tuttora viva, ma gli unici effetti fisici ad oggi comprovati sono:

- l'induzione di correnti spurie che interferiscono con il sistema nervoso centrale e periferico;
- l'innalzamento della temperatura corporea per assorbimento di energia elettromagnetica (effetto Joule nel tessuto biologico).

2) Biologici

L'interazione di un campo elettromagnetico con tessuti biologici non provoca necessariamente un effetto biologico apprezzabile o addirittura un danno per la salute.

Un effetto biologico ha luogo quando l'esposizione al campo causa una variazione fisiologica degna di nota o rilevabile nel soggetto esposto.

L'organismo è naturalmente in grado di compensare variazioni ottenute in questo modo fino ad un certo grado, tramite meccanismi di riparazione e di adattamento. Per questo motivo un effetto biologico non comporta necessariamente conseguenze nocive per la salute, se le variazioni provocate sono confrontabili con quelle legate ai normali processi fisiologici. Tuttavia, altri effetti possono portare invece all'insorgenza di patologie, mentre altri ancora verso conseguenze benefiche.

Gli effetti di disturbo o di disagio possono non avere natura patologica di per sé ma, se accertati, possono compromettere il benessere fisico e mentale di una persona e l'effetto complessivo al netto di queste valutazioni deve essere classificato come un potenziale danno per la salute dell'individuo.

Sussiste una relazione fra l'esposizione al campo elettromagnetico ed il verificarsi di effetti biologici, come ad esempio distorsione sensoriale (uditiva), alterazione dei meccanismi cellulari, danneggiamento dei tessuti (cataratta) stimolazione di meccanismi di termoregolazione (ipotalamo) ecc.

Tuttavia, non sempre il meccanismo fisico che scatena l'effetto biologico è noto. Ad oggi non vi sono effetti biologici conclamati per i quali non si conosca (verosimilmente) il meccanismo fisico.

Come detto, uno dei due effetti biologici comprovati relativamente alle radiazioni non ionizzanti è l'innalzamento della temperatura del tessuto assorbente le radiazioni. Fondamentale è dunque presentare la legge che descrive questo fenomeno, il cui nome è legge del bio-calore. Essa afferma che il calore complessivo accumulato per unità di volume di tessuto nell'unità di tempo, pari alla variazione di temperatura nell'unità di tempo moltiplicata per la capacità termica di un metro cubo di tessuto, è dato dal contributo di 4 termini:

$$C(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\mathbf{r})\nabla T) + A_0(\mathbf{r}) - B_0(\mathbf{r})(T - T_B) + Q_V(\mathbf{r})$$

dove:

T = temperatura del tessuto [K]

$C(\mathbf{r})$ = calore specifico [J/(K·kg)]

$K(\mathbf{r})$ = conducibilità termica [W/(K·m)]

$\nabla \cdot (K(\mathbf{r})\nabla T)$ = calore/(s m³) che giunge per conduzione dai tessuti circostanti

$A_0(\mathbf{r})$ = calore/(s m³) sviluppato dai processi metabolici

$B_0(\mathbf{r})(T - T_B)$ = calore/(s m³) scambiato con il sangue (T_B = temperatura del sangue)

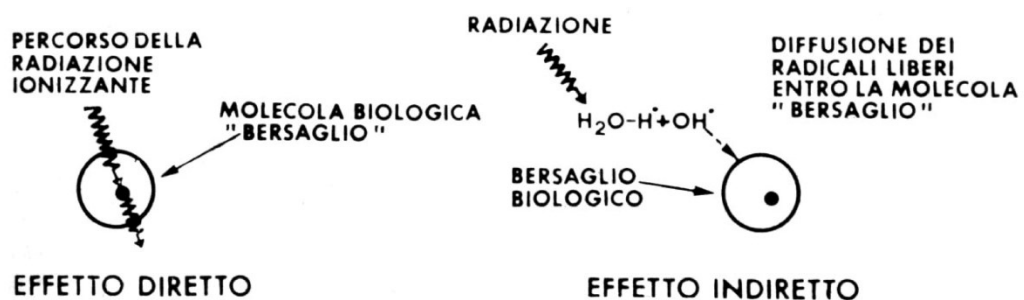
$Q_V(\mathbf{r}) = 1/2 \sigma |\mathbf{E}|^2$ = calore/(s m³) esogeno dovuto all'assorbimento di potenza EM

6.2 Effetti delle radiazioni ionizzanti

Come già presentato in precedenza, è noto che l'esposizione alle radiazioni ionizzanti può provocare danni biologici di varia entità e grado all'organismo.

Quando le radiazioni ionizzanti interagiscono con la materia vivente, gli atomi ionizzati provocano una destabilizzazione che va a minare la struttura delle molecole attraverso due tipologie di azioni:

- **interazione diretta:** provoca la rottura diretta di una struttura o del DNA di una macromolecola;
- **interazione indiretta:** la radiazione interagisce con l'acqua della molecola producendo radicali liberi quali i radicali OH^+ , radicali OH^- ed il radicale H, i quali hanno tutti un elettrone spaiato e risultano quindi molto reattivi, poiché tentano di raggiungere l'ottetto il più rapidamente possibile. A causa della scarsa stabilità, i radicali interagiscono con le molecole, distruggendole e producendo altri radicali in cascata, andando anche in questo caso ad intaccare la struttura del DNA. La catena di reazione che si viene a generare è così descritta:



La cellula, successivamente alla rottura di macromolecole fondamentali come il DNA, muore o subisce mutazioni considerevoli nel tentativo di ripararsi attraverso processi chimici o enzimatici. A livello cellulare, infatti, vi è un tentativo continuo di restaurazione, ma a seguito del danneggiamento e della probabile perdita di informazioni, sia lei sia le cellule figlie possono andare incontro a varie sorti, dipendentemente dal tipo di danno subito. Nel caso in cui si verifichi la rottura di solo una delle due eliche costituenti il DNA, la riparazione può avvenire con successo poiché la parte di filamento integro funge da modello guida per la ricostruzione del tratto danneggiato. È il caso del danneggiamento SSB (Less Error Prone): si assiste alla rottura di un'elica e la parte di pattern che la conteneva viene isolato ed eliminato. Successivamente avviene un processo di polimerizzazione durante il quale l'intera parte viene ricostruita servendosi dei pattern adiacenti come esempio. Infine, è riconnessa alla struttura e la riparazione può dirsi ultimata. In caso di rottura di entrambe le eliche (DSB, Double Strand Break) vengono perse le informazioni necessarie alla ricostituzione della cellula e la riproduzione potrebbe portare a fenomeni di mutazione, così come il caso della rottura di un'intera base o di un certo numero di ponti tra le eliche. Se invece si assiste ad un danno ingente, la cellula andrà incontro a morte al momento della riproduzione.

Nel caso della radioterapia, la distruzione cellulare dei tessuti tumorali è un effetto desiderato; in questo caso il danno dei tessuti tumorali è perseguito con ogni mezzo disponibile. Per quanto riguarda invece l'esposizione di pazienti a scopo diagnostico, i danni biologici sono senz'altro indesiderati e quindi devono essere limitati alla minima entità possibile, compatibilmente con l'ottenimento di un referto ricco di contenuti diagnostici e caratterizzati dalla più alta accuratezza ottenibile.

I danni da irraggiamento sono divisibili in due categorie:

- danni di tipo "**deterministico**"
- danni di tipo "**stocastico**"

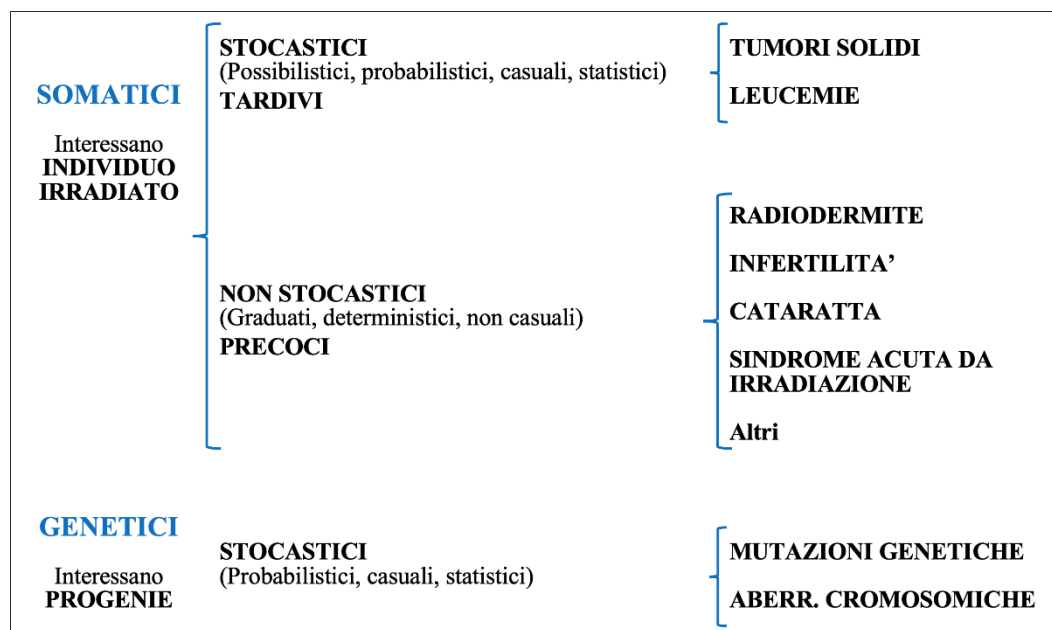


Figura 6.1 – Classificazione dei danni da radiazioni ionizzanti

6.3 Danni di tipo deterministico

I danni di tipo **deterministico** sono danni prevedibili, e con ciò si intende che ad una certa dose di esposizione a radiazioni ionizzanti corrisponde sicuramente l'insorgenza di un certo numero di effetti nell'individuo esposto, con una gravità direttamente legata alla dose assorbita durante l'esposizione.

In tal caso è possibile prevedere quali conseguenze potranno avere luogo nell'organismo dell'individuo sottoposto ad irradiazione ed in che lasso temporale a partire dal momento dell'irraggiamento. Allo stesso modo è possibile calcolare la dose necessaria per alcune procedure terapeutiche in maniera ottimizzata, o

prevedere gli effetti dovuti ad esposizioni accidentali. Sono comunque necessarie dosi relativamente elevate.

Ad esempio, le alterazioni acute del midollo osseo e del cristallino si registrano per esposizioni di breve durata dell'ordine di 500 mSv; il cristallino può manifestare deficit visivo (cataratta) nel caso di esposizioni prolungate che comportino una dose accumulata di circa 8000 mSv; l'ovaio può andare incontro a sterilità nel caso di esposizioni protratte di circa 6000 mSv.

Possono inoltre manifestarsi una serie di patologie dovute all'esposizione frazionata per anni a basse dosi come le radiodermiti croniche (cute del radiologo) e le anemie croniche (sangue del radiologo).

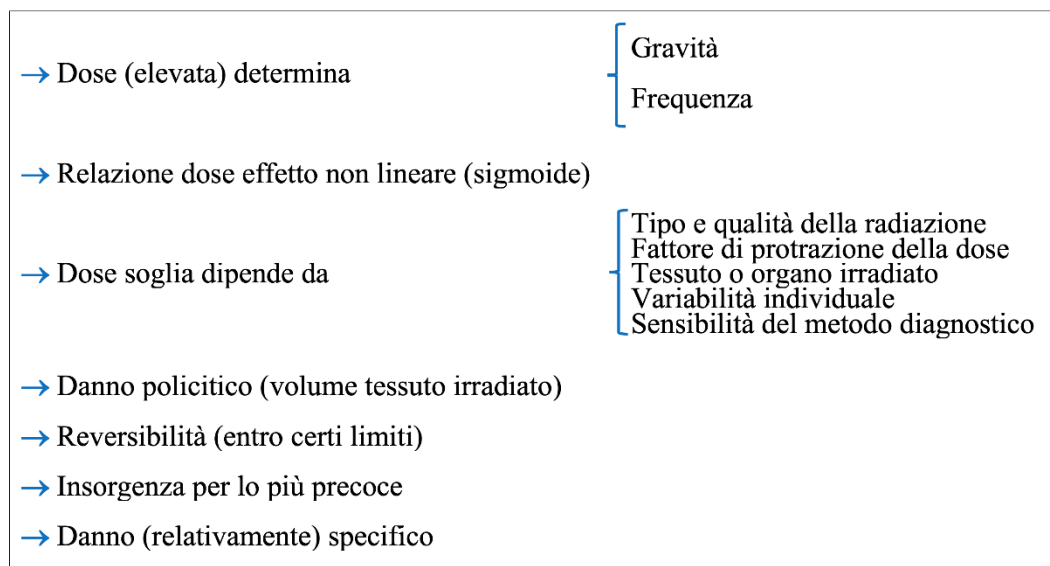


Figura 6.2 – Carattere dei danni deterministici

DOSE SOGLIA (Gy)	EFFETTO
0.10	danni embrionali
0.25	manifestazioni ematologiche
0.3	sterilità transitoria
0.75	malattia da raggi
1.00	sindrome emopoietica (panirradiazione)
1.0-2.0	cataratta
3.00	eritema semplice
4.00	dose letale media al 50%
5.00	sindrome gastroenterica (panirradiazione)
20.00	sindrome cerebrale

Figura 6.3 – Dose soglia indicativa per alcuni effetti deterministici

Per quanto concerne l'irradiazione localizzata alla cute, la gradualità e quindi la gravità delle lesioni è riportata nella seguente tabella:

DOSE SOGLIA (Gy)	MANIFESTAZIONI CUTANEE
0-3	nessuna manifestazione
3-6	eritema semplice
6	eritema bolloso
12	dermatite ulcerosa
32	dermatite necrotica

Figura 6.4 – Correlazione tra gravità e dose nel caso di esposizione della cute

Nella tabella sopra riportata la dose soglia è riferita a raggi X di 100 KeV. Le soglie aumentano per radiazioni più penetranti, ma in quel caso vengono interessati anche i tessuti più profondi. In ogni caso, anche per radiazioni elettromagnetiche dal potere penetrante maggiore, gli effetti descritti precedentemente si verificano in corrispondenza di una dose assorbita dallo strato basale della cute pari a quella sopra indicata.

Il danno di tipo precoce è connesso alla possibilità di situazioni incidentali e non fa parte della routine giornaliera del lavoratore del comparto sanità, mentre il danno di tipo tardivo (leucemie e tumori maligni), poiché può manifestarsi anche per esposizioni a basse dosi, rappresenta di certo l'oggetto d'interesse principale della sorveglianza medica della radioprotezione.

6.4 Danni di tipo stocastico

Per quanto concerne i danni di tipo **stocastico**, non vi è certezza ma solo probabilità che compaiano a seguito di esposizione a radiazioni ionizzanti. Questa probabilità è interconnessa all'entità della dose ed è legata alla frequenza di accadimento del danno, ma non alla sua gravità. Sono danni (leucemie e tumori maligni) che si manifestano solamente in una limitata percentuale dei soggetti irradiati nel corso degli anni o dei decenni.

Il comportamento di tali effetti si descrive con un andamento di tipo **lineare senza soglia**.

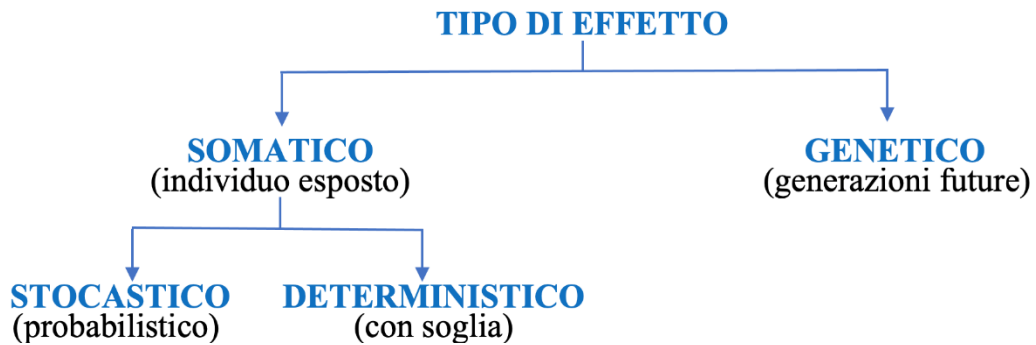


Figura 6.5 – Tipi di effetto

6.5 Fattori che influenzano la risposta biologica

I fattori che influenzano la risposta biologica alle radiazioni sono:

- **fattori fisici**

- tipo di energia delle radiazioni ionizzanti;
- entità della dose assorbita;
- distribuzione della dose assorbita nello spazio e nel tempo.

- **fattori biologici**

- caratteristiche intrinseche alla natura delle strutture biologiche irradiate: suscettibilità di danno, numero di unità esposte al rischio, cinetica del sistema, attività metabolica, capacità di recupero e di riparazione;
- caratteristiche dell'ambiente biologico locale e generale: stato di nutrizione e di ossigenazione, vascolarizzazione, competitività biologica, meccanismi di controllo omeostatici, reattività del sistema immunitario.

I fattori di rischio sono normalmente espressi come probabilità di contrarre un cancro per un'esposizione di 1000 mSv.

La percezione del rischio varia notevolmente in gruppi di persone diversi.

La modalità più suggestiva per confrontare i rischi consiste nell'utilizzare come termine di confronto la stima della "perdita di vita attesa" (espressa in giorni su 70 anni).

RISCHIO	PERDITA DI VITA (giorni)	PERDITA DI VITA
Fumare più di 20 sigarette al giorno	2.441	6 – 7 anni
Sovrappeso del 15 %	777	2 – 3 anni
Abuso di alcool	365	1 anno
Incidente automobilistico	205	7 mesi
Viaggi aerei (400.000 km nella vita)	64	2 mesi
Fumo passivo	50	2 mesi
Essere colpito da fulmine	-	1 giorno
Esame medico (dose efficace 5 mSv)	-	1 giorno

Figura 6.6 Carattere dei danni deterministici

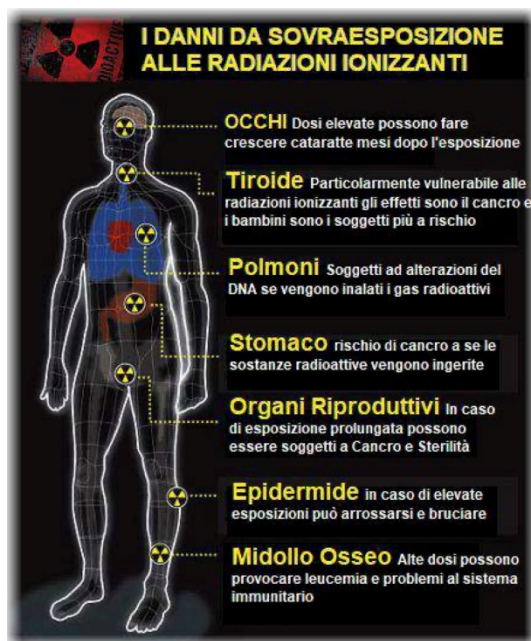


Figura 6.7 Danni da sovraesposizione alle radiazioni ionizzanti

CAPITOLO 7: NORMATIVA NAZIONALE E INTERNAZIONALE IN TEMA DI RADIAZIONI IONIZZANTI E SICUREZZA DEI LAVORATORI (I 3 PRINCIPI CARDINE: GIUSTIFICAZIONE, OTTIMIZZAZIONE E LIMITAZIONE DELLA DOSE)

7.1 Normativa nazionale in tema di radiazioni ionizzanti e sicurezza dei lavoratori

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

In Italia il testo fondamentale in materia di protezione sanitaria contro il rischio derivante dall'impiego di sorgenti di radiazioni ionizzanti è stato fino all'anno 2020 il Decreto Legislativo n. 230 del 17 marzo 1995.

Esso è però stato abrogato il 27 agosto 2020 con l'entrata in vigore del D. Lgs. 101/2020, pubblicato in Gazzetta Ufficiale il 31/07/2020, che ha recepito la Direttiva 2013/59/Euratom. In un unico dispositivo legislativo sono state fatte confluire tutte le norme fondamentali di sicurezza contro i pericoli causati dall'esposizione a radiazioni ionizzanti.

Il D. Lgs. 101/2020 disciplina, perciò, sia le esposizioni in campo medico che le esposizioni professionali e della popolazione.

Esso norma in modo complessivo ed organico tutti i diversi campi di applicazione delle radiazioni ionizzanti, regolamentando sia la protezione sanitaria delle persone soggette a qualsiasi tipo di esposizione alle radiazioni (esposizioni professionali, esposizioni per finalità mediche, esposizioni ambientali), sia la sicurezza degli impianti, delle installazioni nucleari e delle materie radioattive, che la gestione del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi.

Le disposizioni specifiche sulle esposizioni mediche contenute nel Titolo VII della Direttiva 2013/59/Euratom sono del tutto coerenti nella struttura e nel contenuto con le previgenti disposizioni della direttiva 97/43/Euratom (oggetto della medesima materia e recepita in Italia tramite il D. Lgs. 187 del 26 maggio 2000), della quale numerosi passi costituiscono la riproduzione testuale. Sono però presenti alcune innovazioni, principalmente con lo scopo di porre maggiore attenzione sui seguenti aspetti:

- la giustificazione nei programmi di screening;
- l'informazione preventiva al paziente su rischi e benefici dell'esposizione;
- le responsabilità riguardo l'ottimizzazione;
- la definizione di ruoli e responsabilità delle figure professionali, in particolare lo specialista in fisica medica;
- la qualità e sicurezza delle attrezzature;
- il sistema di registrazione delle dosi;
- l'obbligo di inserire le informazioni relative all'esposizione radiologica e medico nucleare all'interno del referto;
- la regolamentazione dell'esposizione di persone nell'ambito di procedure a scopo non medico condotte con attrezzature medico-radiologiche;
- l'obbligo, per le nuove apparecchiature per radiologia interventistica e TC, impiantate a partire dalla data di entrata in vigore della normativa, di essere provviste di sistemi di ottimizzazione della dose e di dispositivi utili alla valutazione della stessa.

Il D. Lgs. 101/2020 si applica:

- alla costruzione, all'esercizio e alla disattivazione degli impianti nucleari;
- a tutte le pratiche che implicano un rischio dovuto a radiazioni ionizzanti provenienti da una sorgente artificiale o naturale;
- nei casi in cui i radionuclidi naturali siano stati trattati per le loro proprietà radioattive fissili o fertili e cioè:
 - 1) alla produzione, trattamento, manipolazione, detenzione, deposito, trasporto, importazione, esportazione, impiego, commercio, cessazione della detenzione, raccolta e smaltimento di materie radioattive;
 - 2) al funzionamento di macchine radiogene;
 - 3) alle lavorazioni minerarie;
 - 4) alle attività lavorative diverse dalle pratiche di cui ai punti 1, 2, 3 e che implicano la presenza di sorgenti naturali di radiazioni;
 - 5) agli interventi in caso di emergenza radiologica o nucleare, o in caso di esposizione prolungata dovuta ad effetti di un'emergenza, oppure di una pratica o di un'attività lavorativa non più in atto.

All'interno del D. Lgs. 101/2020 sono forniti i principi pertinenti la pratica, le definizioni delle principali grandezze utilizzate in materia di radioprotezione, la

classificazione delle zone e dei lavoratori esposti, oltre alla radioprotezione del paziente.

Quando infatti si parla esclusivamente di radioprotezione del paziente, essa fa invece riferimento al Decreto Legislativo n. 187 del 26 maggio 2000.

La radioprotezione si basa su **tre principi fondamentali** che originariamente vennero presentati nella pubblicazione n. 26 dell'ICRP (International Commission on Radiological Protection) nel 1977 e sono stati poi recepiti nei D. Lgs. 230/95, D. Lgs. 241/2000, nel D. Lgs. 187/2000 ed infine nel D. Lgs. 101/2020.

Tali principi sono:

- **giustificazione della pratica:** Il principio di giustificazione della pratica sancisce la necessità di attuare una rigorosa analisi di vantaggi e svantaggi che caratterizzano una certa pratica comportante rischio da radiazioni ionizzanti, prima che questa venga intrapresa. L'obiettivo prefissato è quello di assicurare che il detrimento sia sufficientemente contenuto rispetto ai benefici attesi. Lo strumento adottato è generalmente l'analisi costi/benefici. Nessuna attività umana che esponga a radiazioni ionizzanti deve essere accolta favorevolmente o portata avanti a meno che la sua introduzione o prosecuzione produca un effetto benefico netto e dimostrabile;
- **ottimizzazione della protezione:** questo principio stabilisce gli obiettivi di radioprotezione da rispettare nelle varie attività ed i valori massimi delle dosi che i lavoratori e la categoria popolazione riceveranno. Le esposizioni a radiazioni ionizzanti, nel caso in cui l'impiego risulti giustificato, devono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenendo conto dei fattori sanitari, economici e sociali;
- **limitazione delle dosi individuali:** il rispetto dei limiti di dose afferma che le dosi individuali, anche se ammissibili sulla base dei principi di giustificazione e di ottimizzazione, non devono comunque eccedere specifici limiti determinati a priori in modo tale da garantire che i rischi per la salute del singolo individuo non raggiungano livelli giustificati inaccettabili. In una pratica ottimizzata in maniera appropriata, raramente le dosi ricevute dai lavoratori potranno superare una modesta frazione dei limiti individuali raccomandati.

L'importanza dei limiti di dose si configura nella necessità di rimanere al di sotto delle dosi-soglia per gli effetti deterministici e per ridurre la probabilità di comparsa degli effetti stocastici al di sotto della media naturale d'insorgenza.

GIUSTIFICAZIONE	OTTIMIZZAZIONE	LIMITAZIONE
Nessuna attività umana deve essere accolta a meno che la sua introduzione produca un beneficio netto e dimostrabile	Ogni esposizione alle radiazioni deve essere tenuta tanto bassa quanto è ragionevolmente ottenibile facendo luogo a considerazioni economiche e sociali	La dose equivalente ai singoli individui non deve superare determinati limiti appropriatamente sicuri

Figura 7.1 Principi di protezione radiologica

Per la protezione dei lavoratori sono stati delineati alcuni nuovi limiti di dose, come quello della dose equivalente al cristallino, e mantenuti la maggior parte dei precedenti (per esempio i 20 mSv/anno al corpo intero).

I lavoratori esposti a radiazioni ionizzanti (RI) vengono classificati dall'Esperto di Radioprotezione (EdR) in due categorie:

- **categoria A:** lavoratori suscettibili di un'esposizione a radiazioni ionizzanti superiore ai 6 mSv/anno e inferiore a 20 mSv /anno;
- **categoria B:** lavoratori suscettibili di un'esposizione a radiazioni ionizzanti superiore a 1 mSv/anno e inferiore a 6 mSv/ anno.

Ulteriori limiti d'esposizione sono fissati per il cristallino, la pelle, mani, avambracci, piedi e caviglie.

Particolari disposizioni sono previste per le lavoratrici esposte in età fertile (D. Lgs. 151 del 26 marzo 2001 – art. 8):

- è fatto obbligo alle lavoratrici di comunicare al Datore di Lavoro il proprio stato di gravidanza, non appena accertato;
- le donne, durante la gravidanza, non possono svolgere attività in zone classificate (controllate o sorvegliate) o, comunque ad attività che potrebbero esporre il nascituro ad una dose che ecceda 1 mSv;
- è altresì vietato adibire le donne che allattano ad attività comportanti un rischio di contaminazione;
- è proibito adibire i minori di anni 18 ad attività proprie dei lavoratori esposti;

- è necessario limitare il numero dei lavoratori esposti a rischio di radiazioni ionizzanti a coloro per i quali, per le esigenze di servizio e di assistenza ai malati, ciò si renda effettivamente indispensabile.

Il D. Lgs. 101/2020 dispone, inoltre, una nuova organizzazione per la protezione della popolazione e dei pazienti che si sottopongono a pratiche diagnostiche o terapeutiche che comportino l'impiego delle radiazioni ionizzanti.

È assolutamente vietata l'esposizione non giustificata. Le esposizioni nell'ambito diagnostico, terapeutico, della sorveglianza sanitaria professionale, di programmi di screening, di ricerca, di procedure medico-legali devono mostrare di essere sufficientemente efficaci mediante la valutazione dei potenziali vantaggi complessivi prodotti rispetto al danno possibile.

L'esposizione delle persone che assistono volontariamente il paziente in caso di necessità, (es. parenti o accompagnatori) durante gli esami radiodiagnostici, trattamenti radioterapici (es. teleradioterapia o curieterapia) oppure durante e dopo la somministrazione di radioisotopi (es. scintigrafia o trattamenti metabolici) è considerata giustificata. I lavoratori radioesposti, operanti nella struttura all'interno della quale viene effettuata la prestazione, non possono subire esposizione assistendo volontariamente i pazienti (anche se parenti). L'esposizione deve essere infatti strettamente limitata alle necessità diagnostiche o terapeutiche concernenti al loro ruolo.

Il livello di cautela deve essere particolarmente elevato quando si tratta di irraggiare una donna in stato di gravidanza: va curato specialmente il processo di ottimizzazione riguardante sia la madre che il nascituro.

Il D. Lgs. 230/1995, successivamente abrogato, ha introdotto per primo delle novità in ambito sanitario quali:

- il diritto dei lavoratori di accedere ai dati contenuti nel documento sanitario personale;
- la radioprotezione del paziente;
- l'inventario delle apparecchiature;
- i controlli di qualità delle apparecchiature, la valutazione della dose al paziente e una stima della dose collettiva dovuta all'impiego di radiazioni ionizzanti
- norme penali assai più severe del precedente Decreto (DPR 185/64).

7.2 Organizzazioni internazionali coinvolte, direttamente o in modo indiretto, nella protezione radiologica

A livello internazionale l'ente preposto alla promozione dei processi di miglioramento delle conoscenze nel campo della radioprotezione è l'International Commission on Radiological Protection (ICRP).

Questo organismo pubblica report e raccomandazioni che costituiscono le linee guida in campo radioprotezionistico.

In italiano essa prende il nome di Commissione Internazionale per la protezione radiologica (ICRP) ed è attiva dal 1928. È formata da fisici e medici specialisti in radiazioni e radioprotezione, biologi, biochimici e genetisti. Le raccomandazioni frutto del lavoro di questa Commissione sono di natura generale ed i vari stati possono scegliere di incorporarle nelle rispettive legislazioni. La Commissione non ha infatti il mandato di forzare i vari Stati ad adottare obbligatoriamente le sue linee guida.

Il Comitato scientifico delle Nazioni Unite (ONU) sugli effetti delle radiazioni atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR), fondato nel 1956 promuove la ricerca nel campo delle radiazioni ionizzanti e genera molteplici report incentrati per l'appunto sulle sorgenti e gli effetti di tali radiazioni.

L'organizzazione mondiale della sanità (World Health Organization - WHO), il Fondo mondiale per l'agricoltura (Food and Agriculture Organization - FAO), l'Organizzazione mondiale di meteorologia (World Meteorological Organization - WMO), l'Agenzia internazionale per l'energia atomica (International Atomic Energy Agency - IAEA), l'Organizzazione internazionale del lavoro (International Labour Organization - ILO), assistono l'UNSCEAR e l'ICRP.

7.3 Sistema Tracciabilità Rifiuti Materiali e Sorgenti - STRIMS

Il D. Lgs. 101/2020 ha inoltre introdotto l'obbligo di registrazione al portale web dell'Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione (ISIN) denominato STRIMS (Sistema di registrazione sulle sorgenti di radiazioni ionizzanti e sui rifiuti radioattivi).

In materia di radioprotezione l'ISIN svolge attività istruttoria, valutazioni tecniche, attività di controllo e vigilanza in relazione sia alle installazioni nucleari che all'utilizzo di sorgenti di radiazioni ionizzanti (radionuclidi e macchine radiogene), attività di controllo e vigilanza circa l'esposizione, dovuta ad attività lavorative, a particolari sorgenti naturali di radiazioni soggette alle disposizioni legislative di radioprotezione.

L'obbligo di registrazione a STRIMS riguarda coloro che effettuano attività di intermediazione, commercio, detenzione e trasporto di materiali radioattivi e sorgenti di radiazioni ionizzanti (ad esempio le apparecchiature a raggi X), o gestiscono operazioni di raccolta, trattamento e stoccaggio di rifiuti radioattivi.

Questi soggetti devono effettuare la registrazione al sito e quindi trasmettere le informazioni relative a ciascuna operazione effettuata, alla tipologia ed alla quantità delle sorgenti oggetto dell'operazione.



Figura 7.2 ISIN e STRIMS

CAPITOLO 8: LIMITI DI DOSE (D. LGS. 230/1995 E SUCCESSIVE MODIFICHE, SORVEGLIANZA FISICA E SANITARIA, CLASSIFICAZIONE ZONE); CLASSIFICAZIONE POPOLAZIONE, LAVORATORI ESPOSTI CATEGORIE “A” E “B” E DOSIMETRIA PERSONALE)

8.1 Limiti di dose previsti dal D. Lgs. 101/2020

I limiti di dose efficace (al corpo intero) per la popolazione sono fissati in 1 mSv/anno, per i lavoratori radioesposti in 20 mSv/anno.

I limiti di dose equivalente (alle estremità) per la popolazione sono fissati in 50 mSv/anno, per i lavoratori radioesposti in 500 mSv/anno.

I limiti dose equivalente (al cristallino) per la popolazione sono fissati in 15 mSv/anno, per i lavoratori radioesposti in 20 mSv/anno.

I lavoratori esposti a radiazioni ionizzanti vengono classificati dall'Esperto di Radioprotezione, in funzione della stima dei rischi, valutata a partire dai carichi di lavoro radiologici, secondo lo schema seguente:

LIMITI DI DOSE PER ANNO SOLARE	LAVORATORI ESPOSTI CATEGORIA A	LAVORATORI ESPOSTI CATEGORIA B	LAVORATORI NON ESPOSTI	POPOLAZIONE
dose efficace	20 mSv/anno	6 mSv/anno	1 mSv/anno	1 mSv/anno
dose equivalente				
al cristallino	20 mSv/anno	15 mSv/anno	15 mSv/anno	15 mSv/anno
alla pelle	500 mSv/anno	150 mSv/anno		
alle estremità	500 mSv/anno	150 mSv/anno	50 mSv/anno	50 mSv/anno
controllo dosimetrico	individuale	individuale	ambientale e valutazioni periodiche	valutazioni periodiche
visita medica preventiva	si con Medico Autorizzato	si con Medico Autorizzato	non prevista	non prevista
visita medica periodica	semestrale con Medico Autorizzato	annuale con Medico Autorizzato	non prevista	non prevista

20 mSv anno come media su 5 anni (non superiore a 100 mSv) con un massimo di 50 mSv per singolo anno

Figura 8.1 Classificazione e limiti di dose prefissati per lavoratori esposti a radiazioni ionizzanti

Dose assorbita (D_T): energia assorbita per ogni unità di massa (J/Kg) in un tessuto o organo T. L'unità di misura della dose assorbita è il Gray (Gy).

Dose equivalente (H_T): dose assorbita media in un tessuto o organo T, ponderata in base al tipo ed alla qualità della radiazione con la quale si è impartita la dose stessa. L'unità di misura della dose equivalente è il Sievert (Sv).

Nel caso in cui vengano impiegate radiazioni che hanno la stessa qualità (radiazione X, radiazione γ , elettroni, positroni) e che hanno lo stesso effetto biologico unitario, la **dose equivalente** coincide numericamente con la **dose assorbita** [1 Sv = 1 Gy].

Dose efficace (E): somma ponderata delle dosi equivalenti nei diversi organi o tessuti. Tiene conto dell'efficacia biologica relativa della radiazione con la quale si è impartita la dose stessa. L'unità di misura della dose efficace è il Sievert (Sv). La dose efficace è un indicatore di rischio e viene calcolata o misurata al fine della classificazione del personale, oppure con lo scopo di redigere la valutazione dei rischi sia per il personale che per il paziente.

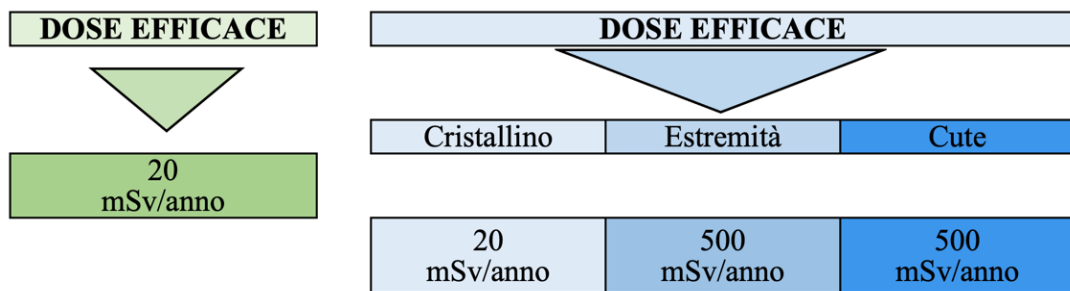


Figura 8.2 Limiti di dose per i lavoratori

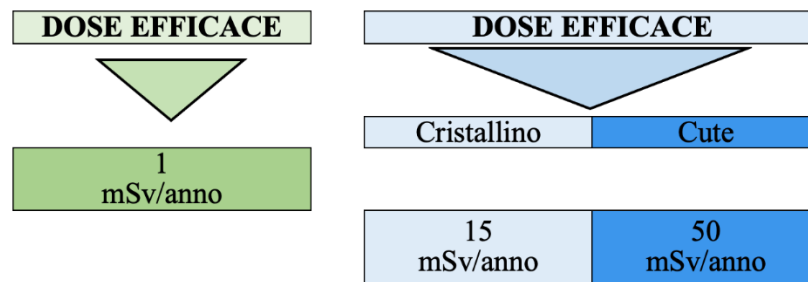


Figura 8.3 Limiti di dose per la popolazione

In questi anni un elevato numero di studi scientifici indica la prevalenza di opacità agli occhi del personale esposto alle radiazioni, anche inferiori al limite stabilito dalla International Commission Radioprotection (ICRP) nelle pubblicazioni nr. 60 del 1990 e nr. 103 del 2007.

I valori di rilevanza dell'opacità sono: 5 Sv per esposizioni prolungate (lassi di tempo lunghi) e 0.5 – 2.0 Sv per brevi esposizioni.

La stessa Commissione nel report nr. 103 del 2007 suggerisce che, vista l'incertezza concernente questa tipologia di rischio, sia opportuno prestare particolare attenzione all'ottimizzazione in situazioni ove è prevista l'esposizione degli occhi. Il limite di legge attuale (D. Lgs. 101/2020) relativo alla dose occupazionale al cristallino è di 20 mSv/anno.

Al fine di garantire la radioprotezione degli operatori, è obbligatorio per tutti i lavoratori che possono superare la dose di 20 mSv/anno agli occhi l'uso degli occhiali protettivi.

Per questo motivo, gli operatori che prestano la loro attività lavorativa presso: laboratori di emodinamica, laboratori di elettrofisiologia, sale angiografiche, sale chirurgiche vascolari, sale di endoscopia, sale operatorie di ortopedia, durante l'impiego delle radiazioni ionizzanti devono fare uso degli occhiali protettivi (DPI).

8.2 Sorveglianza fisica e sanitaria

La radioprotezione si prefissa l'obiettivo di ridurre e, laddove possibile, eliminare, i rischi biologici individuali e collettivi dovuti alle radiazioni di origine naturale o artificiale.

Il fine ultimo è quello della prevenzione totale degli effetti **deterministici** e della riduzione a livelli considerati accettabili della probabilità di manifestazione di effetti **stocastici** (limitazione delle dosi).

La sorveglianza fisica è definita come l'insieme dei dispositivi ed delle misure adottate o previste in tutte le fasi dell'attività lavorativa allo scopo di evitare o diminuire i rischi professionali nel rispetto della salute della popolazione e dell'integrità dell'ambiente esterno.

La sorveglianza fisica può considerarsi articolata in:

- **valutazione del rischio;**
- **controlli periodici;**
- **gestione dei dispositivi di protezione;**
- **dosimetria individuale;**
- **norme di comportamento.**

La **valutazione del rischio** negli ambienti di lavoro consiste nella determinazione dei rischi a cui i lavoratori possono essere sottoposti, stimando la probabilità che si verifichi un effetto dannoso e la gravità dell'evento stesso, al fine di individuare le adeguate misure di prevenzione e protezione, oltre che di ottimizzazione.

Pertanto, se con R si indica il rischio, con G la gravità e con P la Probabilità che l'evento (di gravità G) accada, la valutazione del rischio può essere descritta per mezzo della seguente formula:

$$\mathbf{R = G * P}$$

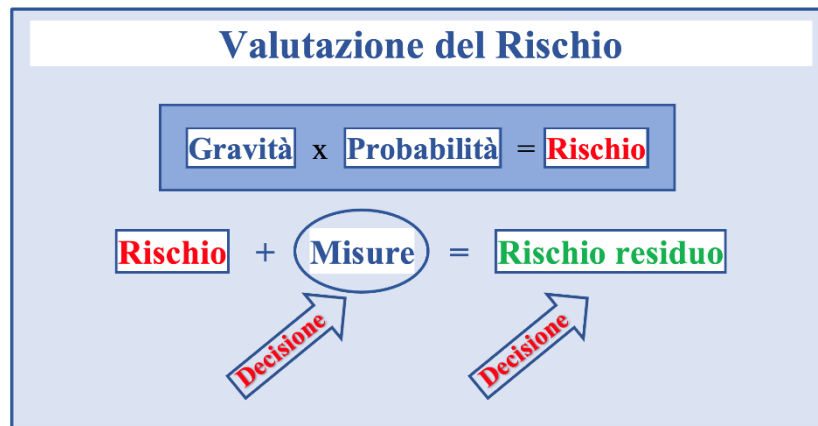


Figura 8.4 Valutazione del rischio

I **controlli periodici** sono sostanzialmente di due tipologie:

- **dosimetrici**: sono effettuati sulle apparecchiature radiologiche di scopia e grafia;
- **ambientali**: sono effettuati negli ambienti in cui vengono impiegate le apparecchiature radiologiche e prevedono anche verifiche su cartellonistica e norme interne, microswitch e interruttori di emergenza, luci di segnalazione, barriere protettive, sistemi di diaframmazione per radioscopia, radiazioni indesiderate, distanza paziente-interruttore di posa, sistemi di limitazione di campo RX.

8.3 Classificazione dei lavoratori

Il D. Lgs. 101/2020 prevede che tutti i lavoratori che, per motivi di professionali, devono essere esposti a radiazioni ionizzanti siano classificati dall'Esperto di Radioprotezione (EdR) in base al carico di lavoro radiologico comunicato dal datore di lavoro (dirigente o preposto).

Se, in base agli accertamenti ed alle valutazioni dell'EdR, il lavoratore si può considerare suscettibile di un'esposizione superiore, nell'arco di un anno solare, ai seguenti valori:

- 1 mSv/anno al corpo intero;
- 15 mSv al cristallino;
- 150 mSv alla pelle (per 1 cm²);

- 50 mSv alle mani, avambracci, piedi e caviglie, viene classificato **lavoratore esposto**.

Per tutti i lavoratori i **limiti di dose** (normati, per il cui superamento sono previste sanzioni) sono rispettivamente: 1 mSv/anno al corpo intero; 15 mSv al cristallino; 150 mSv alla pelle (per 1 cm): 50 mSv alle mani, avambracci, piedi e caviglie. I valori: 6 mSv/anno al corpo intero; 15 mSv al cristallino: 150 mSv alla pelle (per 1 cm³);

150 mSv alle mani, avambracci, piedi e caviglie sono invece dei **livelli** (il loro superamento non comporta sanzione).

Sono classificati di **categoria “A”** i lavoratori esposti, che sulla base degli accertamenti dell'EdR sono suscettibili di esposizione superiore, in un anno solare ad almeno uno dei seguenti valori:

- 6 mSv/anno di dose efficace al corpo intero;
- 15 mSv di dose equivalente per il cristallino;
- 150 mSv alla pelle (per 1 cm²);
- 150 mSv alle mani, avambracci, piedi e caviglie.

I lavoratori esposti non classificati di categoria “A”, sono classificati di **categoria “B”**.

I lavoratori che, nonostante siano esposti a rischi derivanti dall'impiego delle radiazioni ionizzanti, non sono classificati **lavoratori esposti** in quanto la stima del rischio è confrontabile con quella della popolazione generale, sono classificati **popolazione**.

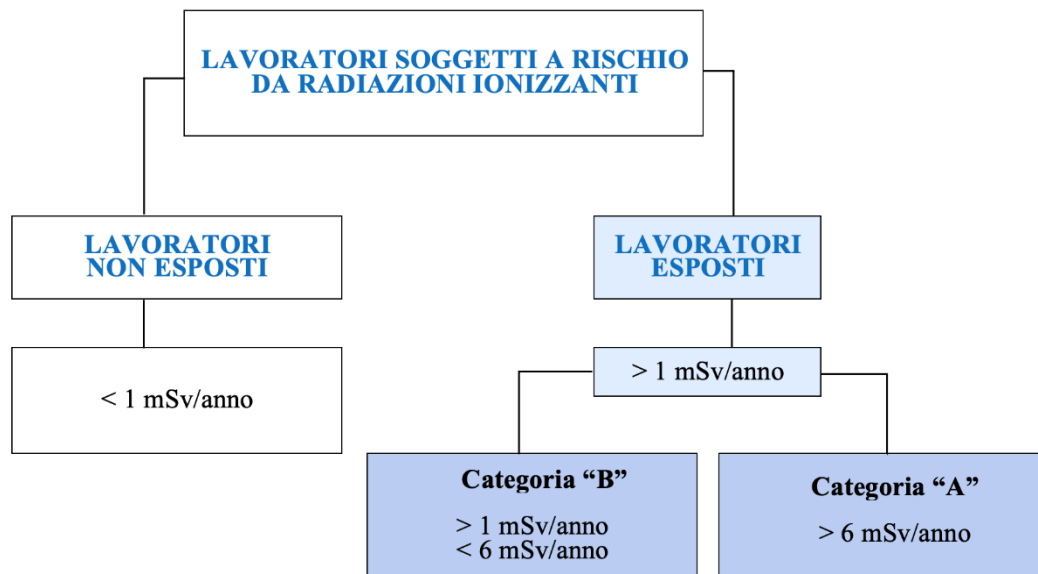


Figura 8.5 Classificazione lavoratori

L'Esperto di radioprotezione (EdR) suddivide ulteriormente i lavoratori classificati **popolazione** in due sottogruppi:

- **popolazione "P":** lavoratori non esposti che non frequentano abitualmente zone con rischio di esposizione a radiazioni ionizzanti. Non vengono forniti di dosimetro personale;
- **popolazione "N":** lavoratori non esposti che frequentano zone con rischio di esposizione a radiazioni ionizzanti. Sono dotati di dosimetro personale.

L'EdR stabilisce gli strumenti di misura individuale (dosimetri total-body, ad anello, elettronico...), che il lavoratore deve portare su di sé durante l'esposizione alle radiazioni ionizzanti.

L'EdR e/o il Medico Autorizzato (MA) stabiliscono il tipo degli eventuali dispositivi di protezione individuale (DPI) o collettivi (DPC) che il lavoratore è tenuto ad utilizzare durante lo svolgimento delle sue mansioni comportanti l'impiego delle radiazioni ionizzanti (camici piombati, occhiali con vetro al piombo, copri tiroide, ecc.).

Gli strumenti di misura ed i dispositivi di protezione devono essere forniti dal datore di lavoro.

Il lavoratore classificato di **categoria "A"** o **categoria "B"**, deve sottoporsi alla visita medica preventiva da parte del Medico Autorizzato.

In base agli esiti della visita medica preventiva il lavoratore viene dichiarato:

- **idoneo;**
- **idoneo a determinate condizioni;**
- **non idoneo.**

I lavoratori non idonei non possono lavorare esposti al rischio di radiazioni ionizzanti.

Per gli operatori classificati in categoria “A” o “B” viene istituita una cartella dosimetrica personale in cui l'EdR registra tutte le stime di dose assorbita, periodo per periodo (attualmente mensilmente), oltre alle eventuali dosi assorbite presso precedenti datori di lavoro, ed un Documento Sanitario Personale in cui il MA registra l'esito degli accertamenti effettuati.

Il lavoratore deve essere informato e formato dal dirigente e dal preposto sui rischi connessi al suo lavoro. Deve essere istruito riguardo le norme interne (uso degli apparecchi, metodiche e del dosimetro) e per quanto concerne le norme di buona tecnica.

8.4 Classificazione delle zone

Le zone dove si impiegano le radiazioni ionizzanti vengono regolamentate e classificate in:

- **zone a libero accesso**
- **zone sorvegliate:** ogni area di lavoro in cui, sulla base degli accertamenti dell'Esperto di Radioprotezione (EdR), sussiste per i lavoratori in essa operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei limiti di dose fissati per le persone del pubblico:
 - 1 mSv per esposizione globale o di equivalente di dose efficace;
 - 15 mSv cristallino, 50 mSv pelle, 50 mSv estremità.
- **zone controllate:** ogni area di lavoro in cui, sulla base degli accertamenti dell'Esperto di Radioprotezione (EdR), sussiste per i lavoratori in essa operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei valori seguenti:
 - 6 mSv per esposizione globale o di equivalente di dose efficace;

- i 3/10 dei limiti di dose per il cristallino, la pelle o le estremità: 45 mSv cristallino, 150 mSv pelle, 150 mSv estremità.

- **zone interdette**

Le zone controllate e sorvegliate sono temporalmente definite dalla possibile emissione di radiazione.

Pertanto, nonostante dipenda da una valutazione personale dell'EdR, in genere:

- nel caso di radiodiagnostica le zone regolamentate sono definite in coincidenza temporale all'emissione di raggi X;
- nel caso di diagnostica endorale le zone sorvegliate sono definite in coincidenza temporale all'emissione di raggi X;
- nel caso di radiodiagnostica interventistica (attività complementare all'esercizio clinico) le zone regolamentate sono definite in coincidenza temporale all'emissione di raggi X;
- nel caso della medicina nucleare (esami di diagnostica o di terapia metabolica) sono definite dalla presenza del radiofarmaco e/o del paziente a cui viene iniettato, dalla possibile presenza di contaminazione ambientale;
- nel caso di radioterapia con acceleratori lineari sono definite temporalmente durante l'emissione di raggi X o elettroni. Nel caso di fasci di raggi X con energia superiore ai 10 MV, sono definite temporalmente durante l'emissione di raggi X più un opportuno intervallo di tempo per permettere il decadimento dei prodotti di attivazione neutronica;
- nel caso della curieterapia sono definite dalla presenza del radioisotopo sigillato ma esterno agli appositi alloggiamenti protetti e/o del paziente impiantato, dalla possibile presenza di contaminazione ambientale.

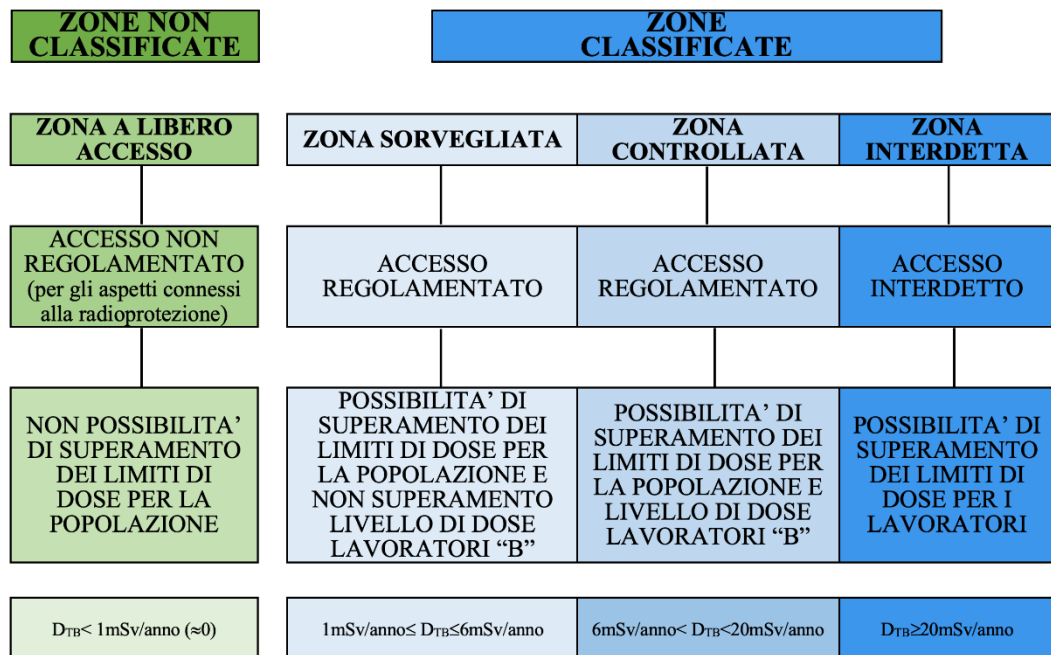


Figura 8.6 Schema riassuntivo della classificazione delle aree con rischio di esposizione a radiazioni ionizzanti

In questo schema sono riportati i limiti di dose per esposizione globale (TB = Total Body): 1 mSv/anno per la popolazione, 20 mSv/anno per i lavoratori classificati ed il livello di dose d'esposizione globale su cui si basa la suddivisione dei lavoratori in gruppo "A", e gruppo "B". Esso equivale a 6 mSv/anno e definisce anche la soglia per la classificazione in zona sorvegliata o zona controllata.

8.5 Segnaletica specifica

Le zone controllate e le zone sorvegliate sono fisicamente delimitate, hanno accesso regolamentato e sono segnalate utilizzando la segnaletica indicata dalle norme di buona tecnica, o comunque in maniera visibile e comprensibile nonché normate anche dall'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione). Sulle porte di accesso alle zone controllate e alle zone sorvegliate sono affissi i seguenti cartelli:

- **Pericolo radiazioni ionizzanti** (trifoglio nero in campo giallo);



- **Classificazione della zona** (controllata/sorvegliata);



- **Scritta “Pericolo Radiazioni”;**
- **Scritta “Durante il funzionamento dell'apparecchio radiologico”** (etichetta aggiunta ultimamente sugli accessi alle sale radiologiche con apparecchi radiogeni. Sta ad indicare che il rischio è presente solo quando l'apparecchio radiogeno è in funzione);
- **Avviso per stato di gravidanza;**



All'interno della sala interessata sono affisse obbligatoriamente:

- **le norme di protezione e sicurezza (ex “norme interne di radioprotezione”);**
- Inoltre, su eventuale indicazione dell'Esperto di radioprotezione, vengono fornite:
- **le norme d'uso del dosimetro personale;**
 - **le note informative sulle radiazioni ionizzanti.**

Sulle porte d'ingresso alla zona controllata (delle diagnostiche con apparecchi radiologici fissi) è presente, inoltre, il segnale luminoso di erogazione raggi X.

All'interno della zona controllata vi sono i pulsanti rossi di sicurezza (se premuti interrompono l'erogazione della radiazione) ed i dispositivi di protezione individuale (camici, guanti, collari tiroidei piombati, ecc. per la protezione dei lavoratori e dei pazienti, barriere mobili anti-raggi X per gli operatori).

Nel caso di impiego di apparecchiature radiologiche portatili è obbligatorio segnalarne la presenza servendosi del cavalletto (in dotazione di ogni apparecchio) con indicazione **pericolo radiazioni** posizionato all'ingresso della sala o stanza in cui viene impiegato al momento.

Nella pratica, tutte le sale all'interno delle quali vi sono posizionate delle sorgenti radiogene o del materiale radioattivo devono essere segnalate.

All'interno di queste anche la sorgente deve necessariamente essere segnalata così che possa essere facilmente identificabile.

			
Segnale di pericolo da radiazioni ionizzanti	Segnale di pericolo da irradiazione	Segnale di pericolo da contaminazione radioattiva	Segnale di pericolo da materiale fissile
Segnale generico di pericolo da radiazioni ionizzanti. Possibile presenza di sorgente di radiazione ionizzante.	Segnale di pericolo da irradiazione. Possibile presenza di sorgente radioattiva sigillata o sorgente radiogena.	Segnale di pericolo da contaminazione radioattiva. Possibile presenza di sorgente radioattiva non sigillata. Possibile contaminazione.	Segnale di pericolo da materiale fissile. Possibile presenza di materiale prodotto da reattori nucleari (non utilizzata in ospedale).

Figura 8.7 Significato delle etichette di pericolo radiazioni

L'accesso alle sale radiologiche ad apparecchiature non funzionanti non è soggetto a restrizioni connesse con la protezione contro le radiazioni ionizzanti.

Nessuno può trattenersi, di norma, nel locale durante l'esame.

Al contrario, l'accesso alle sale di medicina nucleare e di brachiterapia è soggetto a restrizioni legate alla possibilità di contaminazione da materiale radioattivo (indipendentemente dal funzionamento delle apparecchiature).

Agli accessi, pertanto la segnaletica sarà la seguente:

	
PERICOLO RADIAZIONI	PERICOLO RADIAZIONI
ZONA CONTROLLATA	ZONA SORVEGLIATA
Durante il funzionamento dell'apparecchio radiologico	Durante il funzionamento dell'apparecchio radiologico

All'ingresso delle sale radiologiche con apparecchiature fisse, sopra le porte di accesso è inoltre presente una segnalazione luminosa a due livelli di allarme:

- **primo livello:** luce bianca accesa (apparecchiatura accesa in standby – non emissione di radiazioni);
- **secondo livello:** luce rossa accesa intermittente – (emissione di radiazioni).



Il 15 febbraio 2007 l'IAEA (International Atomic Energy Agency) e l'ISO (International Organization for Standardization) hanno lanciato un nuovo simbolo indicante **pericolo di radiazioni ionizzanti** con il fine di aumentare il livello di riconoscimento da parte di persone del pubblico che non sono al corrente della segnaletica tradizionale adottata e non hanno ricevuto una formazione a riguardo.



Figura 8.8 Nuovo simbolo IAEA 2007

Il nuovo simbolo differisce dal tradizionale simbolo **pericolo di radiazioni** di colore giallo-nero a forma di trifoglio (cioè con le tre lame d'elica che si irradiano), comunemente chiamato in inglese “Radiation Warning Symbol - Trefoil/Trifolium”, e si prefigge lo scopo di essere un mezzo per ridurre le morti, le lesioni e le gravi patologie provocate da esposizione accidentali a potenti fonti radioattive in quanto intuitivamente molto più comprensibile della segnaletica tradizionale.

Il nuovo simbolo (ISO 21482) è caratterizzato da un fondo rosso e da tre immagini di colore nero: un piccolo simbolo **pericolo di radiazioni** a forma di trifoglio con cinque fulmini che si propagano verso il basso, un teschio, un uomo che scappa.

Queste immagini dovrebbero infatti essere in grado di trasmettere al meglio il messaggio di pericolo anche ad una persona poco competente.

Il nuovo simbolo vuol essere un simbolo supplementare al tradizionale simbolo a “trifoglio” e nasce sulla base di una ricerca durata ben cinque anni in 11 stati (Brasile, Messico, Marocco, Kenya, Arabia Saudita, Cina, India, Tailandia, Polonia, Ucraina, USA) ed è stato testato dal “Gallup Institute” su circa 1.650 individui di diverso sesso, età ed istruzione.

Il simbolo è relativo a quelle fonti radioattive che l’IAEA classifica come di categoria 1, 2 e 3 (fonti pericolose capaci di provocare la morte o gravi lesioni), comprendendo anche le apparecchiature per l’irradiazione degli alimenti, le macchine usate per il trattamento dei tumori e le unità di radiografia industriale.

Il simbolo deve essere posizionato sul dispositivo contenente la fonte di radiazioni ionizzanti ma non deve essere visibile durante l’uso di routine del dispositivo in quanto non deve essere applicato su porte, pacchi, contenitori. Esso deve essere invece un avviso visibile se qualcuno cerca di smontare il dispositivo stesso, al fine di mettere in guardia da tale azione o dalla troppa vicinanza fisica.

8.6 Organizzazione e sicurezza del lavoro

La sicurezza nei luoghi di lavoro fa riferimento a tutto l’insieme di attività che rende possibile ai lavoratori svolgere la propria professione in un ambiente sicuro, che non li esponga a rischi di infortunio ed incidenti, e che impedisca loro di contrarre malattie professionali. È in questo contesto che si inserisce il Testo Unico sulla Sicurezza (D. Lgs. 81/2008 e precedentemente il D. Lgs. 626/1994), il quale fornisce un elenco molto dettagliato delle misure di sicurezza che devono essere introdotte.

L'art. 15 del D. Lgs. 81/2008 (Misure generali di tutela) afferma:

1. Le misure generali per la protezione della salute e per la sicurezza dei lavoratori sono:
 - a) la valutazione dei rischi per la salute e la sicurezza;
 - b) la programmazione della prevenzione mirata ad un complesso che integri in modo coerente nella prevenzione le condizioni tecniche produttive dell'azienda nonché l'influenza dei fattori dell'ambiente e dell'organizzazione del lavoro;

- c) l'eliminazione dei rischi e, ove sia possibile, la loro riduzione al minimo in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico;
- d) il rispetto dei principi ergonomici nell'organizzazione del lavoro, nella concezione dei posti di lavoro, nella scelta delle attrezzature e nella definizione dei metodi di lavoro e produzione, in particolare al fine di ridurre gli effetti sulla salute del lavoro monotono e di quello ripetitivo;
- e) la riduzione dei rischi alla fonte;
- f) la sostituzione di ciò che è pericoloso con ciò che non lo è, o è meno pericoloso;
- g) la limitazione al minimo del numero dei lavoratori che sono, o che possono essere, esposti al rischio;
- h) l'utilizzo limitato degli agenti chimici, fisici e biologici sui luoghi di lavoro;
- i) la priorità delle misure di protezione collettiva rispetto alle misure di protezione individuale;
- l) il controllo sanitario dei lavoratori;
- m) l'allontanamento del lavoratore dall'esposizione al rischio per motivi sanitari inerenti la sua persona e l'adibizione, ove possibile, ad altra mansione;
- n) l'informazione e formazione adeguate per i lavoratori;
- o) l'informazione e formazione adeguate per dirigenti e i preposti;
- p) l'informazione e formazione adeguate per i rappresentanti dei lavoratori per la sicurezza;
- q) le istruzioni adeguate ai lavoratori;
- r) la partecipazione e consultazione dei lavoratori;
- s) la partecipazione e consultazione dei rappresentanti dei lavoratori per la sicurezza;
- t) la programmazione delle misure ritenute opportune per garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di sicurezza, anche attraverso l'adozione di codici di condotta e di buone prassi;
- u) le misure di emergenza da attuare in caso di primo soccorso, di lotta antincendio, di evacuazione dei lavoratori e di pericolo grave e immediato;
- v) l'uso di segnali di avvertimento e di sicurezza;
- z) la regolare manutenzione di ambienti, attrezzature, impianti, con particolare riguardo ai dispositivi di sicurezza in conformità alla indicazione dei fabbricanti.

2. Le misure relative alla sicurezza, all'igiene ed alla salute durante il lavoro non devono in nessun caso comportare oneri finanziari per i lavoratori.

L'art. 20 del D. Lgs. 81/2008 (Obblighi dei lavoratori) afferma:

1. Ogni lavoratore deve prendersi cura della propria salute e sicurezza e di quella delle altre persone presenti sul luogo di lavoro, su cui ricadono gli effetti delle sue azioni o omissioni, conformemente alla sua formazione, alle istruzioni e ai mezzi forniti dal datore di lavoro.
2. I lavoratori devono in particolare:
 - a) contribuire, insieme al datore di lavoro, ai dirigenti e ai preposti, all'adempimento degli obblighi previsti a tutela della salute e sicurezza sui luoghi di lavoro;
 - b) osservare le disposizioni e le istruzioni impartite dal datore di lavoro, dai dirigenti e dai preposti, ai fini della protezione collettiva ed individuale;
 - c) utilizzare correttamente le attrezzature di lavoro, le sostanze e i preparati pericolosi, i mezzi di trasporto, nonché i dispositivi di sicurezza;
 - d) utilizzare in modo appropriato i dispositivi di protezione messi a loro disposizione;
 - e) segnalare immediatamente al datore di lavoro, al dirigente o al preposto le deficienze dei mezzi e dei dispositivi di cui alle lettere c) e d), nonché qualsiasi eventuale condizione di pericolo di cui vengano a conoscenza, adoperandosi direttamente, in caso di urgenza, nell'ambito delle proprie competenze e possibilità e fatto salvo l'obbligo di cui alla lettera f) per eliminare o ridurre le situazioni di pericolo grave e incombente, dandone notizia al rappresentante dei lavoratori per la sicurezza;
 - f) non rimuovere o modificare senza autorizzazione i dispositivi di sicurezza o di segnalazione o di controllo;
 - g) non compiere di propria iniziativa operazioni o manovre che non sono di loro competenza ovvero che possono compromettere la sicurezza propria o di altri lavoratori;
 - h) partecipare ai programmi di formazione e di addestramento organizzati dal datore di lavoro;
 - i) sottoporsi ai controlli sanitari previsti dal presente Decreto Legislativo o comunque disposti dal medico competente.

3. I lavoratori di aziende che svolgono attività in regime di appalto o subappalto, devono esporre apposita tessera di riconoscimento, corredata di fotografia, contenente le generalità del lavoratore e l'indicazione del datore di lavoro. Tale obbligo grava anche in capo ai lavoratori autonomi che esercitano direttamente la propria attività nel medesimo luogo di lavoro, i quali sono tenuti a provvedervi per proprio conto.

8.7 Esposizione a radiazioni ionizzanti e sorveglianza sanitaria

La normativa vigente prevede che i lavoratori esposti a rischi lavorativi debbano essere sottoposti a sorveglianza sanitaria prima dell'esposizione e successivamente ad intervalli periodici, di modo che sia possibile valutarne lo stato di salute ed esprimere il giudizio di idoneità alla mansione assegnata.

Con il Decreto Ministeriale n. 488 del 2001 sono stati definiti i criteri indicativi per la valutazione dell'idoneità dei lavoratori all'esposizione a radiazioni ionizzanti:

- il medico addetto alla sorveglianza medica si basa sui principi che disciplinano la medicina del lavoro e provvede in particolare alla verifica dell'effettiva compatibilità tra le condizioni psicofisiche del lavoratore e gli specifici rischi individuali legati alla sua destinazione lavorativa ed alle sue mansioni;
- il medico pone particolare attenzione, ai fini della valutazione dell'idoneità al lavoro che espone alle radiazioni ionizzanti, sulle seguenti condizioni fisiopatologiche: a) condizioni suscettibili di essere attivate o aggravate dalle radiazioni ionizzanti; b) condizioni suscettibili di aumentare l'assorbimento di sostanze radioattive o di ridurre l'efficacia dei meccanismi fisiologici di depurazione o escrezione; c) condizioni che pongono problemi di ordine terapeutico in occasione di eventuale sovraesposizione, specie se limitano le possibilità di decontaminazione; d) condizioni suscettibili di essere confuse con patologie derivanti da radiazioni ionizzanti o attribuite all'azione lesiva delle radiazioni ionizzanti;
- dovranno inoltre essere tenute in considerazione le condizioni psicofisiche suscettibili di porre problemi in ordine alle condizioni di sicurezza del lavoro con radiazioni ionizzanti, oltre all'eventuale esistenza di anomalie o condizioni patologiche che possano limitare l'utilizzo di dispositivi di protezione individuale specie per le vie respiratorie.

Gli **effetti**, come da tematica affrontata in precedenza, possono essere di due tipi:

- **effetti deterministici;**
- **effetti stocastici.**

Le **conseguenze** sulla sorveglianza sanitaria:

Il D. Lgs. 101/2020 prescrive che: "qualsiasi pratica deve essere svolta in modo da mantenere l'esposizione al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali" e prevede limiti di dose che non devono essere superati. Se tali limiti di dose vengono rispettati è possibile mettere in atto una prevenzione totale per i danni deterministici, poiché non superando la soglia di dose non potranno manifestarsi i corrispettivi effetti nocivi, mentre sarà possibile soltanto la limitazione degli effetti stocastici.

Partendo da tali premesse è evidente che la sorveglianza sanitaria dovrà essere indirizzata alla prevenzione degli effetti stocastici in quanto il rispetto dei limiti di dose consente di evitare completamente la comparsa degli effetti deterministici, per i quali sarà sufficiente un inquadramento dell'organo in oggetto nel corso della visita medica o la sorveglianza di quei casi insorti a causa di esposizioni iniziate parecchi anni prima, verificando che la dosimetria non superi limiti previsti dalla normativa.

Gli screening oncologici:

Prevenzione degli effetti stocastici significa prevenzione oncologica la quale, in sede di sorveglianza sanitaria, si ottiene attraverso lo svolgimento di adeguati screening oncologici.

Le neoplasie, oggetto dello screening, saranno quelle che evidenziano una maggiore radioinducibilità, anche perché sono a livello statistico tra quelle più frequentemente osservabili nella popolazione italiana. Altro presupposto per l'esecuzione dello screening è la non invasività dell'esame ed il suo costo contenuto. La scelta che è stata reputata essere la più adeguata, nell'elaborazione delle linee guida per la sorveglianza sanitaria, consiste nell'utilizzare le raccomandazioni dell'American Cancer Society e le linee guida della Commissione oncologica nazionale per quanto riguarda i test di screening oncologico per la popolazione.

Le **linee guida** per la sorveglianza sanitaria:

Il contenuto della sorveglianza sanitaria prevede l'esecuzione di esami clinici ed indagini diagnostiche specialistiche e di laboratorio ai fini della valutazione dello

stato generale di salute del lavoratore e mirate agli specifici rischi individuali, ritenuti necessari dal medico competente.

Appare perciò giustificata sia l'esecuzione di indagini di laboratorio necessarie alla valutazione dello stato generale di salute del lavoratore (emocromo, esame urine, funzionalità epatica e renale, metabolismo di zuccheri e grassi), sia l'effettuazione di indagini integrative mirate alla prevenzione di possibili effetti (neoplasie) provocati dall'esposizione al rischio specifico (radiazioni ionizzanti).

È comunque ritenuta accettabile la rinuncia del lavoratore all'esecuzione delle indagini integrative (screening oncologici) qualora siano soddisfatti determinati criteri: corretta informazione dello stesso sui rischi specifici e sui possibili effetti, assoluta mancanza di sintomi, mancanza di familiarità per la patologia in oggetto e bassi dosi assorbite.

Il D. Lgs. 101/2020 prevede la prosecuzione della sorveglianza sanitaria nei confronti dei lavoratori trasferiti ad attività che non espongono alle radiazioni ionizzanti (ex esposti), l'idea concepita è che tale obbligo si concretizzi per esposizioni al corpo intero pregresse accumulate superiori ai 20 mSv/anno, o sia da valutarsi in caso di richiesta del lavoratore (per dosi inferiori ai 20 mSv/anno).

Svolgimento della sorveglianza sanitaria:

La sorveglianza sanitaria per i lavoratori radioesposti viene effettuata dal Medico Autorizzato.

Ogni lavoratore radioesposto è avvisato, con ragionevole anticipo, della data in cui si terranno la visita medica e gli esami di laboratorio o strumentali che dovrà eseguire.

La normativa vigente prevede che l'intervallo di tempo fra gli accertamenti sanitari debba essere tassativamente di sei mesi per i lavoratori classificati in categoria "A" e di dodici mesi per quelli di categoria "B".

È importante che l'esecuzione degli esami avvenga nel rispetto dei tempi, in modo che i referti siano pronti per la data d'effettuazione della visita medica. In caso contrario, oltre all'impossibilità di discutere con il Medico Autorizzato i risultati degli esami, sarà necessario tenere "in sospeso" la cartella sanitaria con conseguente appesantimento della mole di lavoro per l'intera équipe del Medico Autorizzato.

La sorveglianza sanitaria per i lavoratori radioesposti è obbligatoria e la mancata formulazione del giudizio di idoneità (per non aver eseguito esami o visite mediche) comporta l'impossibilità di lavorare con le radiazioni ionizzanti.

Nel caso in cui il lavoratore fosse impossibilitato ad effettuare gli esami richiesti o a presentarsi alla visita medica dovrà contattare il referente per la sorveglianza sanitaria del personale del proprio ospedale per concordare date alternative.

Il lavoratore può richiedere, al di fuori delle periodicità previste, una visita medica, qualora tale richiesta sia correlata ai rischi professionali.

Per ogni necessità relativa alla sorveglianza sanitaria, il lavoratore potrà fare riferimento al referente per la sorveglianza sanitaria del personale del proprio ospedale o direttamente al Nucleo Operativo del Medico Competente presso il quale ha sede il Medico Autorizzato.

Il giudizio di idoneità:

Al termine degli accertamenti sanitari, il Medico Autorizzato è incaricato di formulare il giudizio di idoneità al lavoro con radiazioni ionizzanti.

Il giudizio potrà essere di idoneità, di non idoneità o di idoneità con prescrizioni.

Le prescrizioni possono comportare l'obbligo di utilizzo di dispositivi di protezione individuali (es.: collare piombato per la tiroide, occhiali anti-raggi X), oppure prevedere una limitazione nell'esposizione, che si concretizza con un abbassamento del limite di esposizione annuale. Questo limite, che attualmente si attesta a 20 mSv per l'esposizione totale (corpo intero), viene proporzionalmente ridotto in base all'aumento di rischio di sviluppare neoplasie (per cause diverse dall'esposizione a radiazioni ionizzanti). Questo aumento può talvolta essere quantificato in base a familiarità, patologie pregresse, stili di vita.

CAPITOLO 9: NORMATIVA NAZIONALE ED INTERNAZIONALE IN TEMA DI RADIAZIONI NON IONIZZANTI

In Italia il principale riferimento normativo per quanto concerne di radiazioni non ionizzanti è costituito dalla Legge quadro n.36/01 “Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici”, e dai rispettivi decreti applicativi: DPCM 8 luglio 2003 “Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz” e il DPCM 8 luglio 2003 “Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti”.

Le radiazioni non ionizzanti (NIR) sono radiazioni elettromagnetiche che possiedono energia insufficiente a provocare la ionizzazione degli atomi, ma sono comunque in grado di generare variazioni termiche, meccaniche e bioelettriche (effetti biologici) nella materia costituente gli organismi viventi. Tali effetti, se non compensati dall’organismo umano, possono comportare un vero e proprio danno per la salute (effetto sanitario).

Gli effetti sanitari si differenziano in **effetti a breve termine** ed **effetti a lungo termine**.

Gli effetti a breve termine derivano da un’esposizione di breve durata, avente elevati livelli di campo, mentre i più preoccupanti effetti a lungo termine sono attribuibili ad esposizioni prolungate (si parla di lassi di tempo che superano anche gli anni) a livelli di campo molto inferiori rispetto a quelli connessi agli effetti a breve termine.

L’Italia ha deciso di adottare una linea maggiormente precauzionale per quanto concerne le politiche di protezione nell’ambito della tutela della popolazione rispetto all’approccio internazionale, ponendo profonda attenzione riguardo il rischio legato ad esposizioni prolungate nel tempo a livelli molto bassi, anche in assenza di un comprovato legame di causalità tra esposizione e patologie. Sono stati quindi definiti dei valori limite a più livelli:

- limiti di esposizione, che tutelano dagli effetti sanitari accertati (effetti acuti);

- valori di attenzione o misure di cautela, da rispettare negli ambienti adibiti a permanenze prolungate;
- obiettivi di qualità, finalizzati all'ulteriore riduzione delle esposizioni indebite, da rispettare nelle aree intensamente frequentate.

I valori di attenzione e gli obiettivi di qualità sono stati introdotti proprio al fine di tutelare la popolazione da possibili effetti a lungo termine.

Essi fungono da strumenti con lo scopo di garantire che lo sviluppo di tecnologie non contribuisca in maniera determinante ad un peggioramento delle condizioni di esposizione degli individui.

Le principali sorgenti di campi elettromagnetici oggetto di studio sono rappresentate dagli impianti radio televisivi (RTV), dalle stazioni radio base per la telefonia cellulare (SRB) e dagli impianti di produzione, trasporto, trasformazione e distribuzione dell'energia elettrica (elettrodotti).

Poiché previsto dalla normativa nazionale (Legge quadro n. 36/2001), per far fronte alla necessità di un censimento delle sorgenti di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, sono stati messi a punto specifici strumenti di gestione dei dati relativi alle sorgenti di emissione (Osservatorio CEM e Catasti Elettromagnetici Regionali) con l'ulteriore finalità di supportare le attività di monitoraggio, controllo ed informazione del cittadino. L'assenza dei Catasti Elettromagnetici in diverse regioni del Paese ha portato il Ministero dell'ambiente a disporre, con il Decreto Direttoriale n.72/2016, il finanziamento di molteplici progetti regionali, tra cui la realizzazione/gestione del Catasto Elettromagnetico Regionale (CER) in coordinamento con il Catasto Elettromagnetico Nazionale (CEN).

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), istituito con la legge 133/2008 di conversione, con modificazioni, del Decreto-Legge 25 giugno 2008, n. 112 gestisce il database "Osservatorio CEM" di ISPRA. I vari indicatori contenuti al suo interno forniscono una risposta alla domanda di informazione della normativa attualmente vigente.

L'Area Agenti Fisici di ISPRA comprende tra le sue mansioni la valutazione, la prevenzione ed il controllo dell'inquinamento ambientale dovuto alla presenza di radiazioni non ionizzanti.

ISPRA collabora con numerosi organismi ed istituti ambientali scientifici e tecnici europei ed internazionali.

Una sua specifica sezione svolge attività principalmente di supporto normativo e tecnico al Ministero dell'Ambiente del Territorio e del Mare, oltre che di interfaccia tra le istituzioni ed i gestori degli impianti, ma anche di coordinamento delle Agenzie Regionali per la protezione dell'Ambiente (ARPA/APPA), in virtù del neonato Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA). La sezione cura inoltre la gestione dell'Osservatorio CEM e del Catasto Nazionale delle sorgenti di campo elettromagnetico che hanno lo scopo di supportare le attività di monitoraggio e controllo in ambito SNPA e di informare il pubblico.

Il tema del contenimento dell'esposizione dei cittadini ai campi elettromagnetici è stato affrontato dalla grande maggioranza dei paesi industrializzati in maniera abbastanza autonoma.

Esistono enti scientifici internazionali, anche a livello europeo, che hanno prodotto diversi studi, i cui risultati sono stati preziosi per ricavare dei suggerimenti che sono stati poi generalmente recepiti dai legislatori.

L'ICNIRP, acronimo di International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (in italiano Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti) è un organismo non governativo, formalmente riconosciuto dall'Organizzazione Mondiale della Sanità avente sede in Germania nel quale prestano servizio esperti scientifici indipendenti nelle discipline scientifiche relative alla radioprotezione non ionizzante (biologia, epidemiologia, fisica, biofisica, medicina). Questi esperti, nello svolgere il loro lavoro di volontariato per la Commissione, non rappresentano né i loro paesi di origine né i loro istituti.

L'ICNIRP si occupa di ricerca sul tema dei possibili effetti nocivi sul corpo umano dell'esposizione a radiazioni non ionizzanti ed i compiti più importanti consistono nel:

- fornire pareri scientifici indipendenti riguardo tutti i problemi concernenti l'interazione tra radiazioni non ionizzanti e la salute umana;
- elaborare linee guida, fondate sui più autorevoli risultati scientifici provenienti da tutto il mondo, che raccomandano quei limiti di esposizione per le grandezze elettromagnetiche che non devono essere superati affinché la popolazione esposta non subisca danni alla salute.

Le linee guida si basano principalmente sull'adozione del tasso di assorbimento specifico o SAR (Specific Absorption Rate) per frequenze superiori a 0.1 MHz fino

a 300 Ghz, ovvero il tasso d'assorbimento specifico che è la misura della percentuale di energia elettromagnetica assorbita teoricamente dal corpo umano quando questo viene esposto all'azione di un campo elettromagnetico a radiofrequenza (RF).

Allo stato attuale delle conoscenze è riconosciuto come comprovato solamente il danno da riscaldamento, ovvero quando un'onda elettromagnetica di particolare intensità e frequenza investe il corpo umano tale da provocarne l'innalzamento della temperatura di 1°C. L'ICNIRP delinea un tasso di assorbimento specifico o SAR locale, ovvero quando si ha un'esposizione che interessa una regione e non il corpo umano nella sua interezza (in base al quale vengono definiti dei limiti per telefoni cellulari, dispositivi indossabili bluetooth, ecc.) e un SAR totale quando l'esposizione riguarda l'intero corpo umano. Sulla base di questo, l'ICNIRP adotta un principio di "precauzione" per emanare le linee guida della popolazione generale basandosi su di un SAR limite per l'intero corpo umano che è di circa cinquanta volte inferiore al SAR che si sarebbe ottenuto per provocare l'innalzamento della temperatura a un corpo umano di circa 1 °C.

I valori di SAR limite sono in funzione della frequenza di utilizzo.

Relativamente alle persone cosiddette "esposte professionalmente", il valore di "precauzione" adottato è di circa dieci volte.

Sulla base di tali linee guida, aggiornate periodicamente, i singoli Stati promulgano le proprie normative interne sui valori massimi consentiti per le grandezze elettromagnetiche presentate (in particolare per il SAR totale), che valgono sul territorio nazionale. A seguito di questa facoltà di autodeterminazione legislativa, molti Stati adottano limiti più stringenti dei livelli ICNIRP.

Infatti, secondo un documento del Comitato economico e sociale europeo, almeno il 40% della popolazione mondiale possiede linee più stringenti delle raccomandazioni ICNIRP.

In futuro i paesi della Comunità Europea dovranno conformarsi ad una normativa comune prodotta dalla Commissione Europea, mentre ad oggi è garantita una certa variabilità nei limiti.

Per quanto riguarda l'esposizione della popolazione ai campi a radiofrequenza, infatti, a livello europeo vi è stata una discreta disuniformità riguardo l'adozione della Raccomandazione del Consiglio del 1999.

Come accennato in precedenza, lo Stato italiano ha scelto di basarsi su di una normativa che risulta essere tra le più restrittive.

L'Australia ha valori uguali a quelli europei, così come la Svizzera, che si avvicina molto a tali soglie, salvo però richiedere limiti più stringenti per i campi generati dalle stazioni radio-base dei sistemi di telefonia mobile.

La Cina ha adottato le linee guida di ICNIRP. La stessa decisione è stata presa in Brasile.

In Russia i limiti di esposizione in termini di densità di potenza sono più bassi di quelli europei (vengono considerati effetti biologici che i paesi occidentali in genere non ritengono abbiano effetti sanitari).

Negli USA i limiti sono in gran parte simili a quelli europei, con qualche differenza. L'esposizione da uso di telefono cellulare è regolamentata dalla FCC (Federal Communications Commission), la quale ha adottato lo standard ANSI/IEEE C95.1-1992. In particolare, il limite del SAR-Head è stato fissato a 1.6W/kg.

Frequenza (MHz)	ICNIRP Livello Riferimento	ITALIA Valore Limite	ITALIA Valore attenzione e obiettivo qualità
10-100	28 V/m	20 V/m	6 V/m
915	42 V/m		
1800	58 V/m		
2000-2700	61 V/m		

Figura 9.1 Confronto tra i limiti ambientali vigenti in Italia ed i livelli di riferimento ICNIRP per le bande di frequenza utilizzate da emittenti radiotelevisive e da impianti per le telecomunicazioni

CAPITOLO 10: DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE (DPI)

10.1 Dispositivi di Protezione Individuale (DPI)

Per Dispositivo di Protezione Individuale (DPI) si intende qualsiasi attrezzatura destinata ad essere indossata e tenuta dal lavoratore allo scopo di proteggerlo contro uno o più rischi suscettibili di minacciarne la sicurezza o la salute durante il lavoro, nonché ogni complemento o accessorio destinato a tale scopo.

I DPI sono di varia natura, sono legati all'attività svolta dal lavoratore e permettono di tutelare lo stesso da molteplici rischi intrinseci connessi alla specifica attività.

In ambito sanitario i DPI utilizzati più frequentemente sono quelli finalizzati alla protezione respiratoria, alla protezione congiuntivale, alla protezione delle mani, alla protezione del corpo, alla protezione dei piedi ed alla protezione del capo.

La tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori sui luoghi di lavoro è regolamentata dal D. Lgs. 81/2008 e ss.mm. e i. noto anche come "Testo Unico sulla Sicurezza".

Il Testo Unico è stato parzialmente corretto ed integrato dal D. Lgs. 106/2009 e da ulteriori successivi decreti che ne hanno via via perfezionato il corpus normativo.

Secondo quanto stabilito dalla normativa in questione, i lavoratori devono osservare le disposizioni e le istruzioni impartite dal datore di lavoro, dai dirigenti e dai preposti, affinché sia garantita la protezione individuale e collettiva, utilizzando correttamente le attrezzature di lavoro, le sostanze ed i preparati pericolosi, i mezzi di trasporto, oltre ai vari dispositivi di sicurezza.

I DPI devono obbligatoriamente essere messi a disposizione dal datore di lavoro ed essere utilizzati in maniera appropriata dai lavoratori, i quali sono tenuti a segnalare immediatamente al datore di lavoro, al dirigente od al preposto le deficienze o i difetti dei mezzi e dei dispositivi, nonché qualsiasi eventuale condizione di pericolo di cui vengano a conoscenza. In caso d'urgenza, nei limiti delle proprie competenze e possibilità, i lavoratori devono adoperarsi direttamente per eliminare o ridurre le situazioni di pericolo grave ed imminente, fornendone notizia al rappresentante dei lavoratori per la sicurezza.

I DPI non devono essere rimossi o modificati senza la necessaria autorizzazione.

I DPI devono:

- essere adeguati ai rischi da prevenire, senza comportare di per sé un rischio maggiore;
- essere adeguati alle condizioni esistenti sul luogo di lavoro;
- tenere conto delle esigenze ergonomiche e/o di salute del lavoratore;
- poter essere adattati all'utilizzatore secondo le sue necessità.

In caso di rischi multipli che richiedono l'uso simultaneo di più DPI, questi devono essere tra loro compatibili e tali da mantenere, anche nel caso di uso simultaneo, la propria efficacia nei confronti del rischio e dei singoli rischi corrispondenti.

Secondo l'allegato VIII del D. Lgs. n. 81/08, i DPI sono classificati in base alla parte del corpo che proteggono:

- DPI per la testa;
- DPI per l'udito;
- DPI per occhi e viso;
- DPI per le vie respiratorie;
- DPI per mani e braccia;
- DPI per piedi e gambe;
- DPI per la pelle;
- DPI per tronco e addome;
- DPI per l'intero corpo;
- indumenti di protezione.

I DPI, tenendo in considerazione il tipo e l'entità del rischio da cui proteggono il lavoratore, vengono ulteriormente suddivisi in tre categorie:

Categoria I - dispositivi ideati per proteggere i lavoratori da rischi minimi:

- lesioni meccaniche superficiali;
- lesioni da prodotti per la pulizia lievi e facilmente reversibili;
- contatto o urti con oggetti caldi fino ai 50°C;
- eventuali fenomeni atmosferici durante l'attività lavorativa;
- urti e vibrazioni lievi ma nocive per gli organi vitali;
- effetto lesivo dei raggi solari.

Categoria II:

- casco per proteggere da rischi meccanici;
- guanti per proteggere da rischi meccanici;

- gli indumenti catarifrangenti per segnalare la presenza dei lavoratori in condizioni di scarsa visibilità.

Categoria III - dispositivi volti a prevenire rischi che possono causare conseguenze molto gravi e irreversibili (infortuni gravi o anche morte):

- sostanze e miscele pericolose per la salute;
- atmosfere carenti di ossigeno;
- agenti biologici particolarmente nocivi;
- radiazioni ionizzanti;
- ambienti ad alta temperatura aventi effetti comparabili a quelli di una temperatura dell'aria di almeno 100 °C;
- ambienti a bassa temperatura aventi effetti comparabili a quelli di una temperatura dell'aria di - 50 °C o inferiore;
- cadute dall'alto;
- scosse elettriche e lavoro sotto tensione;
- annegamento;
- tagli da seghe a catena portatili;
- getti ad alta pressione;
- ferite da proiettile o da coltello;
- rumori particolarmente nocivi.

I DPI devono avere la conformità secondo le normative europee (Regolamento UE n. 2016/425).

Questa si ottiene tramite un'apposita valutazione effettuata secondo modalità diverse a seconda della Categoria di appartenenza del DPI che si possono riassumere nella seguente tabella:

Categoria DPI	Valutazione della Conformità
Categoria I	controllo interno del produttore
Categoria II	esame UE del tipo + conformità al tipo basata sul controllo interno della produzione
Categoria III	esame UE + conformità basata su controllo interno della produzione e prove del prodotto effettuate ad intervalli casuali; esame UE + conformità basata sulla garanzia di qualità del processo di produzione

Per quanto riguarda la protezione dei lavoratori dalle radiazioni ionizzanti l'art. 180 comma 3 del D. Lgs. 81/08 stabilisce che: "la protezione dei lavoratori dalle

radiazioni ionizzanti è disciplinata, nel rispetto dei principi di cui al Titolo I, dalle disposizioni speciali in materia".

Il D. Lgs. 101/2020 specifica inoltre, all'art. 2 comma 4, che in materia di tutela della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro, per quanto non espressamente previsto in tema di radiazioni ionizzanti dal decreto stesso, si applica il D. Lgs. 81/08.

10.2 Dispositivi di protezione da radiazioni ionizzanti per l'operatore sanitario

I dispositivi di protezione dalle radiazioni ionizzanti utilizzabili dall'operatore sono:

- camice piombato avvolgente;
- copritiroide (opzionale o se assegnato dal MA o EdR);
- occhiali piombati (opzionale o se assegnato dal MA o EdR);
- guanti piombati (da utilizzare esclusivamente in particolari situazioni: in fascio diretto solo con apparecchiature radiologiche funzionanti in modalità manuale).



Figura 10.1 Alcuni esempi di DPI per operatori

10.3 Dispositivi personali di misura della dose all'operatore sanitario

I dispositivi personali di misura della dose all'operatore sono:

- dosimetro "total body" (al corpo intero) a livello del torace e sotto al camice piombato, se indossato;
- dosimetro ad anello alle dita (se assegnato dall'EdR);
- dosimetro a bracciale al polso (se assegnato dall'EdR);
- dosimetro al cristallino (se assegnato dall'EdR);
- secondo dosimetro al corpo intero esterno al camice (solo se assegnato dall'EdR).

Questi strumenti sono utilizzati per:

- valutare la dose assorbita;
- monitorare l'attività a rischio di esposizione;
- proteggere indirettamente l'operatore.

I dosimetri personali devono possedere le seguenti caratteristiche:

- alta sensibilità e risoluzione;
- ampio range e bassa soglia di rivelazione;
- risposta lineare con la dose;
- indipendenza dalla qualità del fascio;
- omogeneità e riproducibilità.

Per una corretta valutazione della dose assorbita è di cruciale importanza il corretto utilizzo da parte del lavoratore. È necessario, pertanto, prestare particolare attenzione ai seguenti aspetti:

- posizionamento;
- periodo di utilizzo;
- esposizione alla luce;
- esposizione a fonti di calore;
- sterilizzazione.

I dosimetri, se sono total body, vanno portati all'altezza del petto; se sono a bracciale vanno portati al polso. Essi sono personali e pertanto non cedibili.

Non rispettare gli obblighi relativi ai DPI porta a sanzioni specifiche che variano in base all'entità della mancanza ed a chi la commette.



Figura 10.2 Strumenti per dosimetria individuale



Figura 10.3 Strumenti per dosimetria ambientale

CAPITOLO 11: CONSIDERAZIONI FINALI E PROSPETTIVE FUTURE

La Normativa europea ha visto un'evoluzione nel 2013 con la pubblicazione in Gazzetta Ufficiale e l'entrata in vigore della Direttiva 2013/59/Euratom in materia di protezione dei lavoratori e della popolazione, con l'intenzione di uniformare la situazione legislativa vigente in tutti i Paesi dell'Europa Unita.

Emanare una norma rappresenta solo il primo passo verso un cambiamento concreto, devono seguire altre azioni di diversa natura per plasmare la mentalità e la cultura delle persone.

Perseguendo l'obiettivo generale di migliorare la base scientifica e la pratica clinica della radioprotezione in medicina, l'Europa ha avviato da qualche anno il progetto di ricerca "MEDIRAD". Questo è stato finanziato da EURATOM nell'ambito del programma Horizon 2020 ed è terminato a febbraio 2022. A questo progetto hanno preso parte 35 istituzioni di 14 Paesi, tra i quali anche il nostro Istituto Superiore di Sanità, attraverso il Centro Nazionale Tecnologie Innovative in Sanità Pubblica e il Servizio Grandi Strumentazioni e Core Facilities.

In particolare, il progetto si proponeva di promuovere il miglioramento della comprensione e valutazione degli effetti sulla salute legati all'esposizione a basse dosi di radiazioni, derivanti da applicazioni diagnostiche e terapeutiche (esposizioni fuori target) oltre che di ottimizzare le pratiche per ridurre al minimo le dosi e sviluppare strumenti di valutazione della dose che potessero essere impiegati nella pratica clinica, per garantire un'adeguata e migliore protezione dalle radiazioni ionizzanti dei pazienti e degli operatori. Il progetto si è sviluppato in 4 anni di attività, articolata in 6 differenti Work Package (WP).

Di recente, il progetto ha effettivamente pubblicato delle raccomandazioni rivolte principalmente ad operatori sanitari, stakeholder europei ed internazionali, organismi istituzionali, associazioni scientifiche ed autorità competenti in materia di sanità pubblica, allo scopo di indirizzare la ricerca verso un miglioramento della radioprotezione di pazienti e operatori sanitari.

Quattro le tematiche principali:

- consolidare gli archivi di dati dei pazienti in Europa;
- ottimizzare i protocolli medici per l'uso delle radiazioni ionizzanti in diagnostica o terapia;
- ottimizzare la radioprotezione per pazienti e operatori sanitari;

- incrementare la ricerca europea in radioprotezione medica, soprattutto a livello epidemiologico.

I partner del progetto hanno indicato come obiettivo di grande importanza lo sviluppo degli strumenti d'avanguardia come l'intelligenza artificiale, per la stima della dose radiante effettivamente utilizzata e giunta alle cellule bersaglio del paziente. Si considera necessario per il futuro della disciplina anche lo sviluppo di corsi ad hoc in radioprotezione per gli operatori che lavorano in Radiologia e Radioterapia, affinché questi siano in grado di acquisire sempre maggiori e più profonde competenze riguardo la materia radioprotezionistica, con conseguente limitazione sempre più efficace ed efficiente dell'incidenza di effetti nocivi per la salute di pazienti, operatori e popolazione.

BIBLIOGRAFIA

- Decreto Ministeriale 10 settembre 1998, n. 381, GU 3 novembre 1998, n. 257, Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana
- Legge 22 febbraio 2001, n. 36, GU 7 marzo 2001, n. 55, Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003, GU 28 agosto 2003, n. 199, “Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz” e ss.mm. e i.
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003, GU 29 agosto 2003, n. 200, “Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti” e ss.mm. e i.
- Decreto Legislativo n. 259, 1 agosto 2003 “Codice delle comunicazioni elettroniche” e ss.mm. e i.
- Note informative per gli operatori esposti a Radiazioni Ionizzanti Servizio di Fisica Sanitaria - APSS – Provincia Autonoma di Trento - settembre 2013
- “La Radioprotezione in Radiologia” – Di Cesare-Gallicchi-Midiri, Edizioni Idelson Gnocchi, 2010
- “Elementi di Radiobiologia e Radioprotezione” – Guglielmi, Piccin Editore, 2022

SITOGRAFIA

- <https://www.icnirp.org>
- <https://www.icrp.org>
- <https://www.isprambiente.gov.it>
- <https://strims.isinucleare.it>
- <https://www.isinucleare.it>
- <https://www.mase.gov.it>
- <http://www.arpa.veneto.it>
- <http://www.appa.provincia.tn>
- <https://www2.lbl.gov>
- <https://www.inail.it>
- <https://www.airp-asso.it>
- <http://www.irea.cnr.it>
- <https://www.iaea.org>
- <https://www.irp.enea.it>
- <https://www.archivionucleare.com>
- <https://www.ordinemediciaq.it>
- <https://www.certifico.com>
- <https://www.issalute.it>
- <https://www.fisicamedica.it>
- <https://online.scuola.zanichelli.it>
- <https://www.fondazioneveronesi.it>
- <https://www.treccani.it>
- <https://www.agentifisici.isprambiente.it>

RINGRAZIAMENTI

Per concludere questo elaborato di tesi, e questa prima parte di percorso formativo, desidero ringraziare sentitamente un certo numero di persone, le quali hanno permesso che tutto ciò si realizzasse.

Ringrazio il professor Antonio-Daniele Capobianco, mio relatore, per la fiducia riposta nei miei confronti e la disponibilità.

Grazie alla dott.ssa Chiara Vantini per la gentilezza e la volontà di condividere con piacere le proprie competenze legate a questo mondo.

Voglio dire grazie dal profondo del cuore a mamma e papà, Sandra e Alessandro, per esserci sempre stati, al massimo delle vostre possibilità e talvolta anche oltre, togliendo qualcosa a voi affinché io potessi avere qualcos'altro di importante per me e la mia crescita. Grazie per essere stati presenti nei momenti di gioia e in quelli di difficoltà ed avermi spronato, non potrò mai sdebitarmi né esprimere a pieno quanto siete fondamentali per me, ma spero in cuor vostro lo sappiate.

Grazie a mio fratello Leonardo, compagno di percorso da tutta la vita e per tutta la vita. Sei sempre stato e sei per me un riferimento, condividiamo gli stessi valori e ci capiamo come con nessun altro. Questo per me non ha mai avuto prezzo.

Grazie ai nonni Rosanna e Francesco, Adriana e Gilberto, siete stati e siete una parte imprescindibile di questa prima fetta della mia vita. I ricordi dei pranzi dopo scuola e dei pomeriggi passati a guardare i cartoni animati distesi sulla coperta, le camminate a raccogliere i funghi, le partite a canasta, le grigliate in Bondone e il Natale sempre passato insieme non mi abbandoneranno mai.

Grazie agli zii e a tutti i parenti, ognuno ha dato qualcosa di unico.

Grazie a Ivo, Gioele, Lorenzo, e Francesco per avermi accettato tra di loro fin da subito ed essere stati di supporto e d'aiuto quando più serviva, oltre che compagni di avventure.

Grazie ai ragazzi del liceo e “dell'Inghilterra”, Samuele, Luca, Agnese, Jacopo, Maria Stella, Cecilia, Elena, Sofia; ci unisce qualcosa di bello, da tempo. Passano gli anni, ci dividono distanze sempre maggiori, ma ogni ritrovo è come il primo.

Grazie al mio coinquilino Mauro per le chiacchierate notturne, la compagnia e le sessioni di D&D.

Ed infine, grazie a chi questo percorso lo ha condiviso con me dietro quelle bancate, Anna, Mattia, Davide, Mauro, Giulia, Cecilia, Francesca. Siete stati fondamentali, ognuno a modo suo, per vivere a pieno i momenti di spensieratezza e recuperare la bussola in quelli più difficili. Chi rallegrando giornate e serate padovane, chi tendendo la mano quando ce n'era bisogno, chi riponendo la propria fiducia in me, chi facendo sì che riflettessi e mi conoscessi più in profondità, portandomi a crescere. Da quando ho percorso quei 20 minuti di camminata per riunirci per la prima volta, tutto è cambiato. E ripercorrendoli altre mille volte, a qualsiasi ora, mi sono sempre sentito come sulla strada di casa.

Grazie a tutti coloro che ho citato, spero di aver lasciato in voi un segno che sia almeno piccola parte di quello che mi avete impresso, perché siete frammenti di me.