

# Fondamenti di Dosimetria

[www.fisicaxscuola.altervista.org](http://www.fisicaxscuola.altervista.org)

# Fondamenti di Dosimetria

---

- Grandezze Radiometriche
- Grandezze Dosimetriche
  - Esposizione (X)
  - Intensità di Esposizione ( $\dot{X}$ )
  - Dose assorbita (D);
  - Intensità di dose assorbita ( $\dot{D}$ );
  - Dose equivalente (H);
  - Dose efficace (E);
- Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti
- Principi di radioprotezione

# Grandezze Radiometriche

---

Per descrivere le fasi del processo di interazione tra radiazione e materia si definiscono e si utilizzano le seguenti grandezze fisiche:

- **Grandezze Radiometriche:** grandezze fisiche relative alla radiazione legata ai campi elettromagnetici. Tra queste grandezze ci sono:
  - **Attività:** numero di disintegrazioni per unità di tempo ( $\text{Bq}=\text{s}^{-1}$ );
  - **Attività Specifica:** numero di disintegrazioni per unità di tempo e unità di massa ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}=\text{s}^{-1}$ );
  - **Flusso di Radiazione:** numero di particelle che attraversa una sezione unitaria ( $\text{m}^{-2}$ );
  - **Intensità di Flusso di Radiazione:** numero di particelle che attraversa una sezione unitaria nell'unità di tempo ( $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ );
  - **Flusso di Energia:** energia che attraversa una sezione unitaria ( $\text{Jm}^{-2}$ );
  - **Intensità di Flusso di Energia:** energia che attraversa una sezione unitaria nell'unità di tempo ( $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1} = \text{Wm}^{-2}$ );

Inoltre è fondamentale conoscere la **tipologia della radiazione** ( $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ ), in quanto ciò determina la maggiore o minore penetrazione della radiazione, quindi il volume di materiale interessato.

# Grandezze Dosimetriche

---

Poiché tutti gli effetti fisici, chimici e biologici indotti dalle radiazioni si manifestano soltanto quando avviene una cessione di energia alla materia, è fondamentale "misurare" la dose assorbita e la relativa potenzialità di danno indotto. Per tale motivo sono state introdotte le:

- Grandezze Dosimetriche: caratterizzano sia il procedimento di cessione dell'energia sia il legame tra l'energia ceduta e la potenzialità di danno indotto. Tra queste ci sono:
  - **Esposizione (X)**;
  - **Intensità di esposizione ( $\dot{X}$ )**;
  - **Dose assorbita (D)**;
  - **Intensità di dose assorbita ( $\dot{D}$ )**;
  - **Dose equivalente (H)**;
  - **Dose efficace (E)**;

# Esposizione (X)

---

È legata alla capacità dei raggi X di produrre ionizzazione in aria. Descrive, in maniera quantitativa, la **capacità che ha un fascio di fotoni di produrre coppie di ioni in aria.**

**Esposizione:** rapporto tra la carica totale degli ioni di uno stesso segno prodotti in aria quando tutti gli elettroni liberati dai fotoni nell'elemento di massa sono completamente fermati in aria e la massa.

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

L'unità di misura è  $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ , però spesso si usa il Roentgen (R), la vecchia u.d.m., con:

$$1\text{R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**N.B.:** È definita solo per fotoni, non per particelle cariche o neutroni.

# Intensità di Esposizione ( $\dot{X}$ )

---

Rappresenta la rapidità con la quale viene generata la ionizzazione dell'aria.

**Intensità di Esposizione:** rapporto tra l'esposizione  $X$  e l'intervallo di tempo in cui si ha tale esposizione:

$$\dot{X} = \frac{X}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta m \cdot \Delta t}$$

L'unità di misura è  $C \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1} = A \cdot kg^{-1}$  o, usando il Roentgen,  $R \cdot s^{-1}$ .

Nel caso di ionizzazione legata a **sorgenti gamma** (decadimento dei radionuclidi) l'**intensità di esposizione** è legata alla **distanza** dalla sorgente e all'**attività** tramite una costante detta **gamma specifica**  $\Gamma$ :

$$\dot{X} = \Gamma \cdot \frac{a}{d^2} = \Gamma \cdot \frac{\lambda \cdot N}{d^2} = \Gamma \cdot \frac{\lambda \cdot m \cdot N_A}{d^2 \cdot A}$$

La costante **gamma specifica**  $\Gamma$ , caratteristica per ogni radionuclide, si esprime in  $R \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot Bq^{-1}$  oppure in  $R \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot Ci^{-1}$ .

# Tabelle

## Costante Gamma Specifica

Radioisotopo		Numero Atomico Z	$\Gamma$ (eV m <sup>2</sup> / kg)	$\Gamma$ (C · m <sup>2</sup> /(kg · h · MBq))
Antimonio-122	<sup>122</sup> Sb	51	98.4	
Cesio-137	<sup>137</sup> Cs	55	136	$2,30 \cdot 10^{-9}$
Cromo-51	<sup>51</sup> Cr	95	65.4	$1,11 \cdot 10^{-10}$
Cobalto-60	<sup>60</sup> Co	27	542	$9,19 \cdot 10^{-9}$
Oro-198	<sup>198</sup> Au	79	94.3	
Iodio-125	<sup>125</sup> I	53	28.7	$4,87 \cdot 10^{-10}$
Iodio-131	<sup>131</sup> I	53	90.2	$1,53 \cdot 10^{-9}$
Iridio-192	<sup>192</sup> Ir	77	197	$3,34 \cdot 10^{-9}$
Mercurio-203	<sup>203</sup> Hg	80	53.3	$9,05 \cdot 10^{-10}$
Potassio-42	<sup>42</sup> K	19	81.9	$1,39 \cdot 10^{-9}$
Radio-226	<sup>226</sup> Ra	88	339	$5,75 \cdot 10^{-9}$
Sodio-22	<sup>22</sup> Na	11	493	
Sodio-24	<sup>24</sup> Na	11	755	$12,8 \cdot 10^{-9}$
Zinco-65	<sup>65</sup> Zn	30	111	

# Dose Assorbita (D)

---

È la principale **grandezza dosimetrica**.

Dose Assorbita: rapporto tra l'energia assorbita e la massa del mezzo:

$$D = \frac{E}{m}$$

L'unità di misura è il gray:  $Gy = J \cdot kg^{-1}$ .

La dose assorbita  $D$  (**in aria**) è legata all'esposizione  $X$  e si può determinare la relazione fra le due grandezze considerando che:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{IONE} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ E^{(*)} = 34 \text{ eV} \\ 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ X = \frac{Q}{\Delta m} \end{array} \right. \Rightarrow D = \frac{E}{m} = \frac{E}{\frac{Q}{X}} = X \cdot \frac{34 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = X \cdot 34 \text{ J/C}$$

(\*)  $E$  = Energia media dissipata per creare 1 ione **in aria**



# Dose Assorbita (D)

---

Dal punto di vista biologico, però, ciò che ha interesse è la **Dose Assorbita dal tessuto** e non dall'aria. Per ottenere ciò dobbiamo considerare che l'**assorbimento di energia** dipende dal numero di elettroni con cui la radiazione interagisce, quindi dalla **densità elettronica del mezzo assorbitore** (le ossa, che hanno densità superiore rispetto ai tessuti circostanti, assorbono meglio i raggi X rispetto a questi), ciò comporta che il fattore moltiplicativo visto prima avrà valori diversi.

$$D = X \cdot 37 \text{ J/C}$$

Quanto visto sino ad ora vale nel caso di assorbimento di radiazione di provenienza esterna al corpo. Nel caso di **contaminazione interna**, ipotizzando (*ipotesi di matrice infinita*) che tutta la radiazione emessa dal radionuclide sia assorbita dal mezzo (cioè il corpo), si può dimostrare che la dose assorbita è data da:

$$D = \frac{E \cdot a \cdot \Delta t}{m}$$

# Intensità di Dose Assorbita ( $\dot{D}$ )

---

Rappresenta la rapidità con la quale avviene il processo di cessione dell'energia al mezzo.

**Intensità di Dose Assorbita:** rapporto tra la dose assorbita durante l'esposizione e l'intervallo di tempo in cui si ha tale esposizione:

$$\dot{D} = \frac{D}{\Delta t}$$

L'unità di misura è  $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Considerando la relazione intercorrente tra dose assorbita  $D$  ed esposizione  $X$  e si ha che:

$$\dot{D} = \dot{X} \cdot 37 \text{ J/C}$$

Nel caso di **contaminazione interna**, nell'ipotesi di matrice infinita, si ha che:

$$\dot{D} = \frac{E \cdot a_0 \cdot e^{-\lambda t}}{m}$$

Ciò ci consente di determinare la dose assorbita:

$$D = \frac{\dot{D}_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

# Dose Equivalente (H)

---

È la più importante delle **grandezze radioprotezionistiche**.

Consente di interpretare in modo completo gli effetti provocati dal trasferimento di energia dalle radiazioni ionizzanti alla materia vivente, tenendo conto anche delle tipologie di radiazione e di materia (tessuto). Viene definita per ogni tipo di tessuto ed è ottenuta considerando i "pesi" delle diverse radiazioni. Di fatto è direttamente derivata dalla dose assorbita in funzione del peso della radiazione ( $w_r$  sono detti anche **fattori di pericolosità**).

**Dose Equivalente**: per ogni tessuto, somma pesata delle dosi assorbite relative alle singole radiazioni per il "peso" di tali radiazioni:

$$H_t = \sum_i w_{r_i} \cdot D_{t,r_i}$$

I fattori di peso ( $w_r$ ) sono adimensionali, così che l'unità di misura della dose equivalente e della dose assorbita è di fatto la stessa [ $\text{Gy} = \text{Sv} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] ma, per sottolineare la differenza tra le due grandezze, si definisce:

$$1 \text{ sievert} = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

# Dose Efficace (E)

---

È definita per l'intero corpo umano e tiene conto, oltre che di tutti i tipi di radiazione, anche del fatto che gli organi del corpo umano presentano una capacità diversa di rimanere danneggiati in conseguenza dell'assorbimento della stessa dose equivalente (radiosensibilità).

Poiché organi diversi hanno una diversa radiosensibilità ( $H_t$ ), si introducono dei "fattori di peso" dei vari tessuti  $w_t$  anche detti **fattori di sensibilità**.

**Dose Efficace:** per il corpo umano, somma pesata delle dosi equivalenti per il "peso" di tali dosi nei vari tessuti:

$$H = \sum_j w_{t_j} \cdot H_{t_j} = \sum_j \left[ w_{t_j} \sum_i w_{r_i} \cdot D_{t,r_i} \right]$$

Poiché i pesi sono adimensionali l'unità di misura è ancora il sievert:

$$1 \text{ sievert} = 1\text{Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

In sintesi 1Sv, a differenza di 1Gy, produce gli stessi effetti biologici indipendentemente dal tipo di radiazione considerata per cui non è più importante conoscere il tipo di radiazione assorbita.

# Tabelle

## Fattori di Sensibilità e Pericolosità

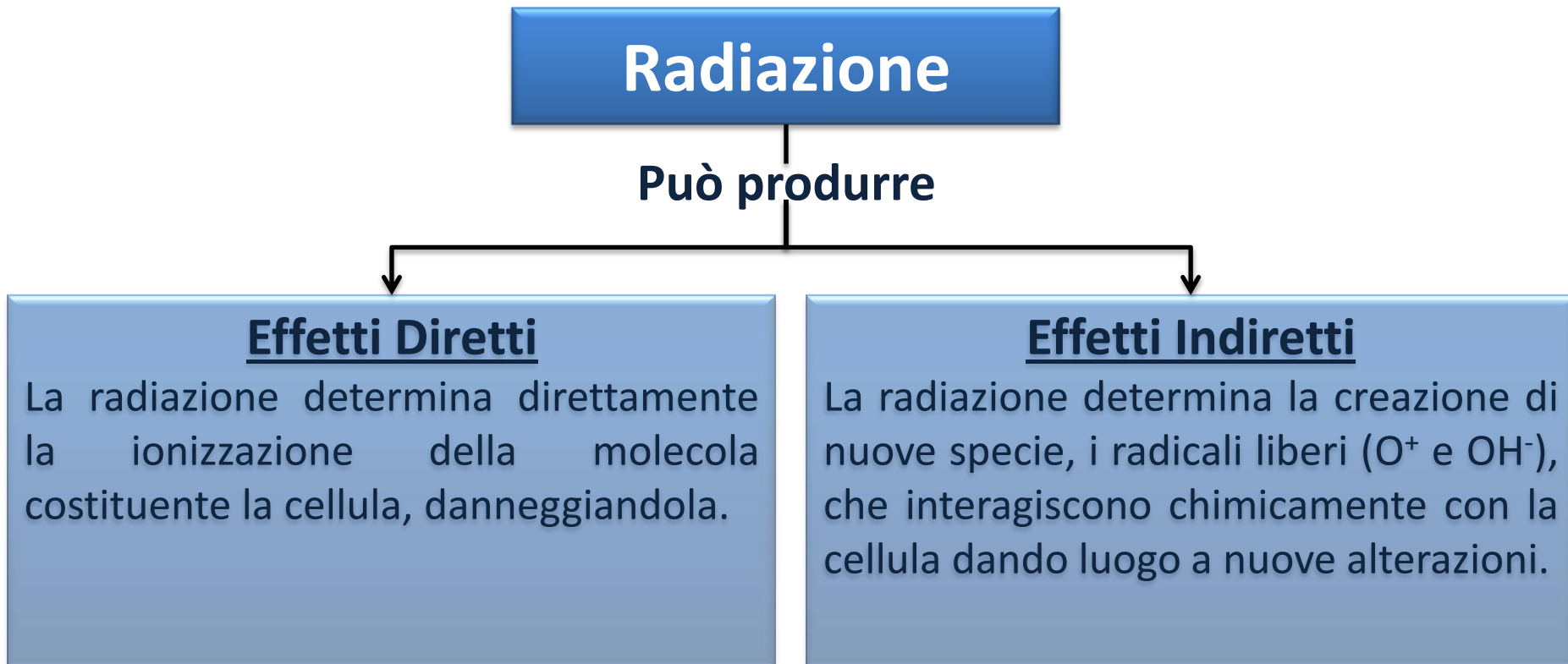
Fattore di Sensibilità $w_t$		
Organo (t)	2003	2008
Corpo Intero	1	1
Gonadi	0.20	0.08
Midollo Osseo	0.12	0.12
Colon	0.12	0.12
Polmone	0.12	0.12
Stomaco	0.12	0.12
Vescica	0.05	0.04
Mammella	0.05	0.12
Fegato	0.05	0.04
Esofago	0.05	0.04
Tiroide	0.05	0.04
Cervello	-	0.01
Cute	0.01	0.01
Ossa	0.01	0.01
Altri Tessuti	0.05	0.12

Fattore di Pericolosità $w_r$		
Tipo di Radiazione (r)		$w_r$
Fotone	$\gamma$	1
Elettrone	$\beta^-$	1
Positrone	$\beta^+$	1
Protone	p (E>2MeV)	2
Nuclei atomici	$\alpha$	20
Neutrone	n	$5 + 17e^{-\frac{(\ln \frac{2E}{MeV})^2}{6}}$

# Effetti Biologici

---

L'effetto delle radiazioni sull'organismo è dovuto all'interazione con le molecole contenute nelle cellule di cui è composto l'organismo stesso.



# Radiazione

Agisce su

## Cellule Somatiche

Costituiscono il corpo o soma di un organismo. Aggregati di cellule somatiche formano i vari tessuti che, in organismi complessi, vanno a costituire organi e a loro volta apparati.

## Effetti Somatici

Non si ha alcun effetto macroscopico (la cellula danneggiata non è più in grado di riprodursi e muore), **a meno che il numero di cellule danneggiate non sia elevato.**

Possono essere **deterministici** (causa e effetto) e/o **stocastici** (probabilistici).

## Cellule Germinali

Sono membri della linea differenziativa implicata nel trasferimento del proprio materiale genetico alla prole. Interessano la riproduzione della specie.

## Effetti Genetici

La cellula in genere non è più in grado di essere fertilizzata (questo è un meccanismo di autodifesa) ma, se lo è, **la mutazione si trasferisce allo zigote e alla progenie.**

Sono solo **stocastici** (probabilistici).

# Effetti Somatici

## Effetti Deterministici

- Relazione di causa/effetto tra l'agente e l'effetto provocato;
- È possibile prevedere se una persona irradiata con una data dose svilupperà questi effetti;
- Esiste una dose soglia al di sopra della quale i soggetti esposti contrarranno tale effetto; più si supera il valore soglia più i sintomi si aggravano;
- Gli effetti possono manifestarsi poco dopo l'esposizione (**effetti immediati**) o dopo mesi o anni (**effetti tardivi**);
- **Possibili danni biologici sono: radiodermiti, aplasie midollari o anemie, alterazioni degli occhi, in casi gravi morte.**

## Effetti Stocastici

- Hanno carattere probabilistico e sono distribuiti nella popolazione esposta;
- Non richiedono il superamento di un valore di soglia per la loro comparsa;
- Sono dimostrati dall'evidenza epidemiologica (confronto tra campione esposto e non esposto);
- All'aumentare della dose cresce la probabilità di contrarre la malattia, ma non la gravità della stessa;
- Si manifestano dopo anni dopo l'irradiazione e sono indistinguibili dai tumori indotti da altri agenti cancerogeni (**effetti tardivi**);
- **Possibili danni biologici sono lesioni neoplastiche (leucemie e altri tumori)**



# Principi di Radioprotezione

---

Le varie sorgenti cui l'uomo è abitualmente (o potenzialmente) esposto sono:

1. **Sorgenti naturali**: raggi cosmici, radionuclidi cosmogenici, radionuclidi primordiali (fondo naturale: 2,4 mSv/anno in media);
2. **Sorgenti naturali modificate dalla tecnologia**: materiale da costruzione, viaggi in aereo ad alta quota, combustione del carbon fossile, ecc... ;
3. **Sorgenti di alcuni prodotti di consumo**: orologi luminescenti, apparecchi televisivi, alcune protesi dentarie, alcuni vetri per lenti, ecc...;
4. **Sorgenti impiegate in medicina**: tubi a raggi X, acceleratori, radioisotopi per diagnostica, radiofarmaci, ecc... ;
5. **Sorgenti di ricadute di bombe atomiche**: fallout;
6. **Sorgenti associate con la produzione di energia nucleare**: estrazione e ritrattamento del combustibile, rilasci delle centrali, riprocessamento del combustibile, rifiuti, ecc... ;
7. **Sorgenti presenti sui luoghi di lavoro.**

# Principi di Radioprotezione

---

**Radioprotezione:** si occupa della protezione dai rischi potenzialmente derivanti dall'esposizione a sorgenti di radiazioni ionizzanti.

- ❑ Ha lo scopo di **eliminare** la possibilità di insorgenza degli **effetti deterministici** e di **limitare** la probabilità di accadimento degli **effetti stocastici**, a un livello ritenuto ragionevole.
- ❑ Viene garantita mediante l'emissione di specifiche normative tecniche.
- ❑ L'organismo internazionale di riferimento è il ICRP (International Commission on Radiological Protection).
- ❑ In Europa le raccomandazioni dell'ICRP vengono recepite dall'EURATOM (1957) che crea delle **Direttive Comunitarie** che, a loro volta, sono tradotte in **leggi** dai vari organismi legislativi nazionali.

# Principi di Radioprotezione

---

Il sistema di Radioprotezione è basato su 3 principi da adottare in sequenza:

1. Principio di giustificazione: nessuna attività umana deve essere accolta a meno che la sua introduzione produca un beneficio netto e dimostrabile;
2. Principio di ottimizzazione: ogni esposizione alle radiazioni deve essere tenuta tanto bassa quanto è ragionevolmente ottenibile in base a considerazioni sociali ed economiche (principio “ALARA”, dall’inglese: As Low As Reasonably Achievable);
3. Principio di limitazione delle dosi: l’equivalente di dose ai singoli individui non deve comunque superare i limiti raccomandati<sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Questo principio non è valido in campo medico, settore in cui, specialmente per la terapia dei tumori, spesso è necessario superare i limiti di dose.

# Normativa per Radioprotezione

In Italia la radioprotezione è garantita da tre decreti legislativi e dalle loro successive modificazioni:

- **DLgs 230/1995**: attuazione delle Direttive 89/618, 90/641 e 97/3 EURATOM in materia di **radiazioni ionizzanti**;
- **DLgs 241/2000**: attuazione della Direttiva 96/29 EURATOM in materia di **protezione della popolazione e dei lavoratori** dal rischio di radiazioni ionizzanti;
- **DLgs 187/2000**: attuazione della Direttiva 97/43 EURATOM in materia di **protezione sanitaria delle persone** contro i **pericoli delle radiazioni ionizzanti connessi a esposizioni mediche**.

# Normativa per Radioprotezione

*DLgs 230/1995*

Le figure professionali individuate in questi decreti sono:

- ❑ il datore di lavoro, che assicura la sorveglianza fisica per mezzo di esperti qualificati e assicura la sorveglianza medica per mezzo dei medici competenti;
- ❑ l'esperto qualificato, costituito da un laureato in Fisica, Chimica, Chimica industriale o Ingegneria, e che abbia superato un esame di abilitazione davanti a un'apposita commissione, istituita presso il Ministero del Lavoro, che possiede le competenze necessarie per poter garantire la sorveglianza fisica, costituita dall'insieme delle pratiche necessarie all'individuazione delle corrette procedure di lavorazione, dei dispositivi di protezione individuali e alla verifica del mancato superamento dei limiti di dose;
- ❑ il medico competente, addetto alla verifica periodica, se richiesto, delle condizioni di salute del lavoratore.

# Normativa per Radioprotezione

*DLgs 230/1995*

Per quanto riguarda la **popolazione** si individuano 2 gruppi:

## Lavoratori esposti:

- Dose Efficace<sub>/Anno</sub>  $E = 20 \text{ mSv/anno}$
- Dose Equivalente<sub>/Anno</sub>
  - $H = 150 \text{ mSv/anno}$  (cristallino, organi, tessuti);
  - $H = 500 \text{ mSv/anno}$  (pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie);

## Persone del pubblico:

- Dose Efficace<sub>/Anno</sub>  $E = 1 \text{ mSv/anno}$
- Dose Equivalente<sub>/Anno</sub>
  - $H = 15 \text{ mSv/anno}$  (cristallino, organi, tessuti);
  - $H = 50 \text{ mSv/anno}$  (pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie);

# Normativa per Radioprotezione

*DLgs 230/1995*

Per quanto riguarda **gli ambienti** si individuano 2 gruppi:

- **Zona controllata**: ogni area di lavoro nella quale sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio del superamento di uno qualsiasi dei seguenti limiti
  - Dose Efficace<sub>/Anno</sub>  $E = 6 \text{ mSv/anno}$
  - Dose Equivalente<sub>/Anno</sub>
    - $H = 45 \text{ mSv/anno}$  (cristallino, organi, tessuti);
    - $H = 150 \text{ mSv/anno}$  (pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie);
- **Zona sorvegliata**: ogni area di lavoro che non debba essere classificata zona controllata, ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei pertinenti limiti fissati per le persone del pubblico.

# Normativa per Radioprotezione

*DLgs 241/2000*

Per la tutela della popolazione e dei lavoratori in presenza di sorgenti naturali di radiazioni che possono condurre a un aumento significativo dell'esposizione. Rientrano in queste categorie le attività lavorative:

1. durante le quali i lavoratori e, eventualmente, persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron o a radiazioni gamma o a ogni altra esposizione in particolari luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, grotte e, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei e non ( $500 \text{ Bq/m}^3$  per anno);
2. implicanti l'uso o lo stoccaggio di materiali abitualmente non considerati radioattivi, ma che contengono radionuclidi naturali e provocano un aumento significativo dell'esposizione dei lavoratori e, eventualmente, di persone del pubblico ( $1 \text{ mSv/anno}$  di dose efficace);
3. in stabilimenti termali ( $1 \text{ mSv/anno}$  di dose efficace);
4. su aerei per quanto riguarda il personale navigante ( $1 \text{ mSv/anno}$  di dose efficace).



# Normativa per Radioprotezione

*DLgs 187/2000*

Disciplina la radioprotezione del paziente, in conseguenza di esposizione nell'ambito della rispettiva diagnosi o trattamento medico, della sorveglianza sanitaria professionale, di programmi di screening sanitario, durante la partecipazione volontaria a programmi di ricerca medica o biomedica, in campo diagnostico o terapeutico, di procedure medico-legali.

1. È vietata l'esposizione non giustificata e le esposizioni mediche devono mostrare di essere sufficientemente efficaci mediante la valutazione dei potenziali vantaggi diagnostici o terapeutici complessivi da esse prodotti in stabilimenti termali (1 mSv/anno di dose efficace);
2. Le dosi dovute a esposizioni mediche per scopi radiologici, a eccezione delle procedure radioterapeutiche, devono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile e compatibile con il raggiungimento dell'informazione diagnostica richiesta, tenendo conto di fattori economici e sociali.

# Normativa per Radioprotezione

---

Considerazioni:

Il limite di dose equivalente per esposizione globale per i lavoratori esposti è stabilito in 20 mSv per anno solare.

Il limite di dose equivalente per le persone del pubblico è fissato per legge al valore di 1 mSv per anno solare.

Il limite di dose equivalente per esposizione globale per i lavoratori esposti, stabilito in 20 mSv per anno solare, porta ad una dose massima integrata, alla fine dell'attività lavorativa, pari a 1 Sv.

Tenendo conto dell'indice di rischio globale, pari a  $1.65 \cdot 10^{-2}$  eventi gravi per Sv ricevuto, tale lavoratore avrà una probabilità dell'ordine del 2% di contrarre un tumore a causa della sua esposizione professionale al rischio delle radiazioni ionizzanti.

Tale probabilità cala drasticamente per un membro della popolazione non soggetto a rischio professionale. All'età di 80 anni, per un individuo della popolazione, il rischio accumulato di aver contratto un tumore a causa dell'uso pacifico dell'energia nucleare è dell'ordine dello 0.13% (cioè solo un individuo su 1000 subirà un danno "grave")

Da notare che 1 mSv/anno è anche la dose dovuta al fondo radioattivo naturale.

# Bibliografia & Sitografia

---

- Mirri L- Parente M., Fisica ambientale - Energie alternative e rinnovabili, Zanichelli
- <https://www.ge.infn.it/~corvi/doc/didattica/radioattivita/lezioni/lez13.dosimetria.pdf>
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Dose assorbita](https://it.wikipedia.org/wiki/Dose_assorbita)
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Dose equivalente](https://it.wikipedia.org/wiki/Dose_equivalente)
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Dose efficace](https://it.wikipedia.org/wiki/Dose_efficace)
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Cellula somatica](https://it.wikipedia.org/wiki/Cellula_somatica)