

# **RADIAZIONI IONIZZANTI**

# D.Lvo 230/95

## DEFINIZIONI

**Radiazioni ionizzanti:** radiazioni costituite da fotoni o da particelle aventi la capacità di determinare, direttamente o indirettamente, la formazione di ioni.

**Attività (A):** quoziente di  $dN$  (numero di trasformazioni nucleari spontanee di un radionuclide) diviso per  $dt$  (tempo).

**Sorgente di radiazioni:** apparecchio generatore di radiazioni ionizzanti o materia radioattiva.

# D.Lvo 230/95

## DEFINIZIONI

**Esposizione:** qualsiasi esposizione di persone a radiazioni ionizzanti. Esterna prodotta da sorgenti esterne, Interna prodotta da sorgenti interne e Totale come combinazione delle due.

**Esposizione globale:** esposizione omogenea del corpo intero.

**Esposizione parziale:** esposizione che colpisce una parte dell'organismo o uno o più organi o tessuti, oppure esposizione del corpo intero considerata non omogenea.

# D.Lvo 230/95

## DEFINIZIONI

**Dose (H):** grandezza radioprotezionistica ottenuta moltiplicando la dose assorbita (D) per fattori di modifica al fine di qualificare il significato della dose assorbita stessa per gli scopi della radioprotezione.

**Dose impegnata:** dose ricevuta da un organo o da un tessuto, in un determinato periodo di tempo, in seguito all'introduzione di uno o più radionuclidi.

**Contaminazione radioattiva:** contaminazione di una matrice, di una superficie, di un ambiente di vita o di lavoro o di un individuo, prodotta da sostanze radioattive

# D.Lvo 230/95

## DEFINIZIONI

**Limiti di dose:** limiti fissati per dosi riguardanti l'esposizione dei lavoratori. I limiti di dose si applicano alla somma delle dosi ricevute per esposizione esterna nel periodo considerato e delle dosi impegnate derivanti dall'introduzione di radionuclidi nello stesso periodo.

**Introduzione:** attività introdotta nell'organismo dall'ambiente esterno.

**Radiotossicità:** tossicità dovuta alle radiazioni emesse da un radionuclide introdotto e dai suoi prodotti di decadimento.

# D.Lvo 230/95

## DEFINIZIONI

**Zona controllata:** è un ambiente di lavoro nel quale sussiste il rischio di superamento di a) valori di 6 mSv per esposizione globale o di equivalente di dose efficace o b) tre decimi di uno qualsiasi dei limiti di dose: 150 mSv per il cristallino, 500 mSv per la cute, 500 mSv per mani, avambracci, piedi, caviglie.

**Zona sorvegliata:** è un ambiente di lavoro in cui può essere superato in anno solare uno dei pertinenti limiti fissati e non è zona controllata.

# D.Lvo 230/95

## DEFINIZIONI

**Medico autorizzato:** medico responsabile della sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti, la cui qualificazione e specializzazione sono riconosciute secondo le procedure e le modalità stabilite nel presente decreto

# D.Lvo 230/95

## DEFINIZIONI

**Esperto qualificato:** persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari sia per effettuare misurazioni, esami, verifiche o valutazioni di carattere fisico, tecnico o radiotossicologico, sia per assicurare il corretto funzionamento dei dispositivi di protezione, sia per fornire tutte le altre indicazioni e formulare provvedimenti atti a garantire la sorveglianza fisica della protezione dei lavoratori e della popolazione. La sua qualificazione è riconosciuta secondo le procedure stabilite nel presente decreto

# RADIAZIONI IONIZZANTI

L'unità di misura convenzionale dell'energia è l'elettronvolt (eV) o multipli quali il kiloelettronvolt (keV) e il millionelettronvolt (MeV).

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## UNITA' DI MISURA

**Becquerel (Bq):** nome speciale dell'unità S.I. di **attività**.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} \text{ (1 attività per secondo)}$$

fattori di conversione se l'attività è espressa in **Curie (Ci)**:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7027 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

**Gray (Gy):** nome speciale dell'unità S.I. di **dose assorbita**.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$$

fattori di conversione da utilizzare se la dose assorbita è espressa in **Rad** (radiation absorbed dose):

$$1 \text{ Rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$$

# RADIAZIONI IONIZZANTI

La dose assorbita ( $D$ ) in Gy è data dall'energia media ( $e$ ) distribuita dalla radiazione ionizzante alla materia della massa ( $m$ ):

$$D = e/m$$

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## UNITA' DI MISURA

**Roentgen (R):** dose di esposizione.

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

**Coulomb (C/kg):** unità di esposizione.

$$\text{C x kg}^{-1}$$

**Sievert (Sv):** nome speciale dell'unità S.I. di dose.

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

fattori di conversione se l'equivalente di dose è espressa in **Rem** (roentgen equivalent man):

$$1 \text{ Rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem}$$

# RADIAZIONI IONIZZANTI

L'esposizione ( $X$ ) è definita solo in aria per i raggi  $\gamma$  o i fotoni ed è la carica degli ioni quando tutti gli elettroni liberati dai fotoni sono completamente fermati in aria di massa  $m$

$$X = Q/m$$

Ove  $Q$  è la carica totale di qualsiasi segno.

L'unità di misura è il Coulomb

# **RADIAZIONI IONIZZANTI**

## **EFFICACIA BIOLOGICA RELATIVA**

**è definita come il rapporto tra un determinato effetto causato da una dose di raggi  $\gamma$  e la dose della radiazione sotto studio.**

**Per normalizzare, si applica il LET (linear energy transfer), definito dal  $w_r$  e tale dose normalizzata è chiamata**

**DOSE EQUIVALENTE**

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## UNITA' DI MISURA

**Sievert (Sv)**: è il prodotto della dose assorbita da un tessuto (D) per il fattore di qualità o fattore pesato di radiazione ( $w_r$ , ex Q).

È un parametro che tiene conto della pericolosità della radiazione rispetto alla radiazione di riferimento (**fotone**) cui viene assegnato, per definizione un  $w_r = 1$ .

$$H = Dw_r$$

Ove H è la dose equivalente in Sv, D la dose in Gy.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## $w_r$ delle radiazioni

Fotoni		1
Elettroni		1
Neutroni	energia <10 KeV	5
	10-100 KeV	10
	100 KeV-2 MeV	20
	2-20 MeV	10
	>5 MeV	5
Protoni		5
Particelle $\alpha$		20

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## QUOTA DI DOSE

è la dose espressa per unità di intervallo di tempo:

$$D = D_0 \times T_{\text{eff}} / \ln 2 (0,69)$$

ove  $D_0$  è la dose al tempo 0,  $T_{\text{eff}}$  l'emivita effettiva derivante dalla formula:

$$(T_r \times T_b) / (T_r + T_b)$$

ove  $T_r$  è l'emivita radiologica e  $T_b$  quella biologica. Di conseguenza  $T_{\text{eff}}$  è generalmente più breve dell'emivita radiologica.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## QUATTRO TIPI PRINCIPALI DI RADIAZIONI:

1. Particelle  $\alpha$
2. Particelle  $\beta$  (carica -) e positroni (carica +)
3. Raggi  $\gamma$  (fotoni)
4. Raggi X (fotoni)

# RADIAZIONI IONIZZANTI

tipi	natura	massa	carica	origine
$\alpha$	corpuscolate-nuclei He	4	++	$^{232}\text{Th}$ , $^{212}\text{Pb}$
$\beta$	corpuscolate-elettroni	1/2000	- o +	$^{90}\text{Sr}$ , $^3\text{H}$
$\gamma$	elettromagnetiche	0	0	$^{60}\text{Co}$ , $^{192}\text{Ir}$
X	elettromagnetiche	0	0	tubi Roentgen
neutroni	particelle nucleari	1	0	$^{235}\text{U}$ -fissione

# RADIAZIONI IONIZZANTI

1. **Direttamente ionizzanti** → particelle cariche ( $\alpha$ ,  $\beta$ , positroni, elettroni)
2. **Indirettamente ionizzanti** → particelle prive di carica (neutroni, fotoni)

# RADIAZIONI IONIZZANTI

Un atomo può decadere per:

- a) perdita di una particella  $\alpha$  pesante (massa = 4), carica (+2), consistente di due protoni e 2 neutroni
- b) perdita di un elettrone caricato negativamente o positivamente (particelle  $\beta$ , positroni)

# RADIAZIONI IONIZZANTI

**Raggi  $\gamma$**  : si originano quando il nucleo rilascia energia in eccesso, generalmente dopo una transizione  $\alpha$ ,  $\beta$  o di positroni

**Raggi X**: si generano se un elettrone orbitale interno è rimosso con conseguente riarrangiamento degli elettroni atomici, con rilascio di energia caratteristica dell'elemento

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## ATTENUAZIONE

$\alpha$  → 10 cm in aria o un foglio di carta

$\beta$  → 4 m in aria, 4 mm in acqua

**fotoni** → il coefficiente di attenuazione varia a seconda dell'energia incidente e dipende dalla **densità** e dal **numero atomico** del materiale assorbente.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## ENERGIA

Le **particelle corpuscolate  $\alpha$**  possiedono un'energia cinetica dovuta al loro movimento e a una velocità nettamente inferiore a quella della luce per cui non è necessaria una correzione per la relatività:

$$E = \frac{1}{2} mV^2$$

ove **m** è la massa della particella e **V** è la velocità

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## ENERGIA

Le **particelle corpuscolate**  $\beta$  hanno una elevata velocità per cui è necessaria la correzione per la loro aumentata massa relativistica (l'energia a riposo di un elettrone è di 0,511 MeV):

$$E = \frac{0,511}{(1 - V^2/C^2)^{1/2}} + 0,511$$

ove **V** è la velocità della particella e **C** è la velocità della luce.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## ENERGIA

I **fotoni** (raggi  $\gamma$  e raggi X) sono radiazioni elettromagnetiche pure con:

$$E = h\nu$$

ove **h** è la costante di Plank ( $6,626 \times 10^{-34}$  J s) e **v** è la frequenza della radiazione.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## DECADIMENTO

**particelle  $\alpha$** : sono nuclei di He (2 protoni e 2 neutroni) con carica +2 proiettati dal nucleo di un atomo. Quando perdono energia rallentano ad una velocità di un atomo gassoso e acquistano due elettroni diventando parte dell'He ambientale.

Un esempio di decadimento  $\alpha$  è il radionuclide  $^{226}\text{Ra}$ :



# RADIAZIONI IONIZZANTI

## DECADIMENTO

**particelle  $\beta$** : il decadimento avviene quando un neutrone nel nucleo di un elemento è effettivamente trasformato in un protone e in un elettrone.

Un esempio di decadimento  $\beta$  è il radionuclide naturale  **$^{210}\text{Pb}$** :



# RADIAZIONI IONIZZANTI

## DECADIMENTO

**positroni:** sono simili alle particelle  $\beta$ , ma risultano da una effettiva trasformazione nucleare di un protone ad un neutrone più un elettrone caricato positivamente.

Un esempio di decadimento è dato dal radionuclide naturale  $^{64}\text{Cu}$  che decade come positrone per il 19%, come  $\beta$  per il 41% e come cattura di elettroni per il 40%:



# RADIAZIONI IONIZZANTI

## DECADIMENTO

**raggi  $\gamma$** : non è, se non raramente, un processo primario, ma avviene in concomitanza con l'emissione di particelle  $\alpha$ ,  $\beta$ , positroni e cattura di elettroni. Le particelle emesse non utilizzano tutta l'energia necessaria e il nucleo contiene un eccesso di energia ed è quindi in uno stato eccitato. L'eccesso di energia è rilasciato come **fotone**.

Uno dei rari esempi di emissione  $\gamma$  primaria è il Tc:



# RADIAZIONI IONIZZANTI

## RADIOISOTOPI $\beta$ -EMITTENTI

radioisotopo	prodotto decadimento	t1/2	tossicità
$^3\text{H}$	$^3\text{He}$	12,35 aa	debole
$^{14}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	5730 aa	moderata
$^{32}\text{P}$	$^{32}\text{S}$	14,29 gg	moderata
$^{33}\text{P}$	$^{33}\text{S}$	25,4 gg	moderata
$^{35}\text{S}$	$^{35}\text{Cl}$	87,44 gg	moderata
$^{45}\text{Ca}$	$^{45}\text{Sr}$	163 gg	moderata
$^{63}\text{Ni}$	$^{63}\text{Cu}$	96 aa	moderata

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## RADIOISOTOPI $\gamma$ -EMITTENTI

radioisotopo	prodotto decadimento	t1/2	tossicità
$^{51}\text{Cr}$	$^{51}\text{V}$	27,7 gg	debole
$^{125}\text{I}$	$^{125}\text{Tc}$	60 gg	elevata
$^{238}\text{U}$ (U-naturale)	$^{234}\text{Th}$ $^{206}\text{Pb}$	$4,5 \times 10^9$ aa	debole
$^{232}\text{Th}$ (Th-naturale)	$^{228}\text{Ra}$ $^{208}\text{Pb}$	$1,4 \times 10^{10}$ aa	elevata

# **RADIAZIONI IONIZZANTI**

## **LAVORAZIONI A RISCHIO**

- 1. Estrazione di minerali radioattivi naturali**
- 2. Produzione di vernici fluorescenti**
- 3. Attività nei reattori nucleari**
- 4. Preparazione di combustibili radioattivi**
- 5. Rxgrafia e  $\gamma$ grafia industriale**
- 6. Produzione di radioelementi**
- 7. Trasporto e smaltimento di prodotti/rifiuti nucleari**

**A causa del fondo naturale, ogni persona assorbe mediamente 1-20 mSv.**

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## categorie esposti

1. Categoria A            limite 20 mSv/anno
2. Categoria B            limite 6 mSv/anno
3. Non esposti            limite 1 mSv/anno

**0,01 mSv è il valore al di sotto del quale si è considerati non radioesposti**

**2-3 mSv è il fondo naturale**

# **RADIAZIONI IONIZZANTI**

## **EFFETTI SULL'UOMO**

- 1. Effetti somatici precoci (dose-dipendenti)**
- 2. Effetti somatici tardivi (stocastici)**
- 3. Effetti genetici (stocastici)**

# **RADIAZIONI IONIZZANTI**

## **EFFETTI SULL'UOMO**

**La sensibilità della cellula animale alle radiazioni ionizzanti è:**

- 1. direttamente proporzionale alla capacità riproduttiva**
- 2. inversamente proporzionale al grado di differenziazione biologica e morfologica**

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'UOMO

Sono quindi più sensibili i tessuti ad un più basso livello di differenziazione e che si riproducono più attivamente:

1. **Tessuto emopoietico** (è il più radiosensibile): nell'ordine: linfociti > granulociti > piastrine > eritrociti
2. **Cute**: la prima manifestazione è l'**eritema** dovuto ad un danno arteriolare con conseguenti alterazioni della permeabilità della parete, del tono della contrattilità vasale e della velocità di circolo:

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'UOMO

### 2. Cute:

- a) **eritema semplice** (6-8 Gy di Rx o  $\gamma$  in un campo di 10 cm<sup>2</sup>);
- b) **eritema bolloso** (dosi intermedie)
- c) **eritema ulceroso** (dosi molto elevate)

La **triade di Wolbach** è costituita da: **discheratosi, atrofia cutanea e teleangectasie.**

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'UOMO

3. **Gonadi:** i tessuti germinali sono altamente radiosensibili, soprattutto nello stadio di spermatogoni e oociti.

0,15-1 Gy

ipozoospermia transitoria

2-3 Gy

sterilità temporanea

5-8 Gy

sterilità permanente

4. **Occhio:** la manifestazione clinica caratteristica è la **cataratta**. Inizia con opacità al polo posteriore della lente e compare per dosi >5 Gy (in unica dose).

## EFFETTO *BYSTANDER*:

Effetto delle radiazioni anche a livello di cellule non direttamente attraversate dall'energia radiante.

Tale effetto può essere rilevante alle basse dosi (anche pochi mGy) e sembra persistere nel tempo.

E' mediato dalla liberazione di fattori solubili che le cellule irradiate rilasciano nell'ambiente extracellulare e/o dal passaggio di mediatori attraverso *gap junction*.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'INTERO ORGANISMO

### per irradiazioni acute

1. **Sindrome a sopravvivenza virtualmente impossibile (dose >5-6 Gy):**

**>30-40 Gy** → morte in poche ore o giorni per effetti sul SNC (**sindrome neurologica**)

**10-30 Gy** → morte entro due settimane per le gravi alterazioni a carico dell'epitelio intestinale con formazione di ulcere e conseguenti emorragie (**sindrome intestinale**)

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'INTERO ORGANISMO

per irradiazioni acute

1. **Sindrome a sopravvivenza virtualmente impossibile (dose >5-6 Gy):**

**<10 Gy** → alterazioni ematologiche con maggiore incidenza di infezioni fino alla setticemia, causate sia dalla marcata leucopenia, sia dalla compromissione del sistema immunitario (**sindrome del midollo osseo**)

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'INTERO ORGANISMO

per irradiazioni acute

### 2. **Sindrome a sopravvivenza possibile (dose 2-5 Gy):**

Il quadro è dominato da infezioni ed emorragie e la sopravvivenza è legata, oltre alla terapia, alla capacità degli organi emopoietici di rigenerare spontaneamente.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'INTERO ORGANISMO

per irradiazioni acute

### 3. **Sindrome a sopravvivenza probabile (dose 1-2 Gy):**

Dopo un periodo iniziale di nausea, vomito, astenia vi è un periodo di latenza di 2-3 settimane prima che si instaurino alterazioni ematologiche.

### 4. **Sindrome a sopravvivenza praticamente certa (dose <1 Gy):**

Può comparire nausea e si manifestano lieve leucopenia ed anemia che regrediscono spontaneamente entro 6 mesi.

# RADIAZIONI IONIZZANTI

## EFFETTI SULL'INTERO ORGANISMO

per irradiazioni croniche

Insieme di danni tardivi che sono il risultato di una esposizione protratta dell'intero organismo a piccole dosi nel tempo, col risultato di una elevata dose finale da accumulo.

I danni si distinguono in:

- **somatici** (senescenza precoce, accorciamento della durata della vita media, mielosclerosi, fibrosi polmonare, azoospermia, neoplasie)
- **genetici** (da mutazioni)

# RADIAZIONI IONIZZANTI

Anomalie fetali indotte nell'uomo da esposizioni a radiazioni ionizzanti teratogenetiche in diversi periodi della gravidanza (Dekaban, 1968)

---

## ANOMALIE

---

	nessuna	gravi	lievi	nessuna	
S.G.	0	4	16	19	25

---

# RADIAZIONI IONIZZANTI

Criteri di valutazione del rischio di una donna gravida esposta a radiazioni ionizzanti (Brent, 1977)

---

## Dose

0,01 GRAY

0,01-0,1 GRAY

>0,1 GRAY

## Effetti

Nessun aumento di rischio

Nessun aumento di rischio di malformazioni; ritardo di accrescimento; morte fetale. Non può essere escluso un piccolo aumento di neoplasie e alterazioni genetiche

aumento del rischio di malformazioni e di danno non riparabile del SNC

## DOSE EFFETTIVA E RISCHIO DI NEOPLASIE

### Esempio

La dose di 1 Sv per il polmone (parte parziale) è ritenuta causare una eccedenza di neoplasie a lungo termine (durata della vita) di 0,0064, mentre una irradiazione a tutto il corpo (sempre di 1 Sv) di 0,056 (sia neoplasie che danni genetici precoci).

Il rapporto tra tali valori, chiamato **FATTORE PESATO PER IL TESSUTO** ( $w_t$ ), è stato ricavato dall'esperienza sulle esplosioni nucleari.

## DOSE EFFETTIVA E RISCHIO DI NEOPLASIE

tessuto o organo	$w_t$
Gonadi	0,20
Midollo osseo (GR)	0,12
Colon	0,12
Polmone	0,12
Stomaco	0,12
Vescica	0,05
Mammella	0,05
Fegato	0,05
Esofago	0,05
Tiroide	0,05
Cute	0,01
Superficie ossea	0,01
Altri	0,05

Picano E, BMJ 329: 849-851, 2004

