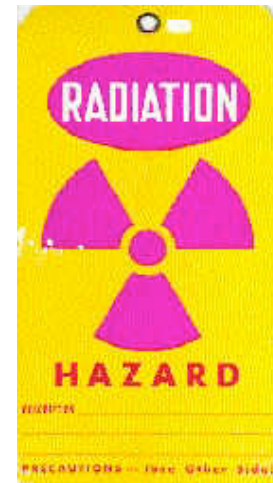


Corso di formazione

ASPETTI FISICI DELLA RADIOPROTEZIONE



ICRP



Dr. Roberto Bedogni
Esperto Qualificato dei L.N.F.

Argomenti

Cenni storici sulla radioattività
Natura ed origine delle radiazioni
Energia delle radiazioni
Attenuazione delle radiazioni
Grandezze fisiche ed unità di misura
Alcune leggi fisiche importanti
Gli effetti biologici e sanitari
Gli obiettivi della radioprotezione
I tre principi della R.P.
Le grandezze limite ed operazionali
Il rischio radiologico

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

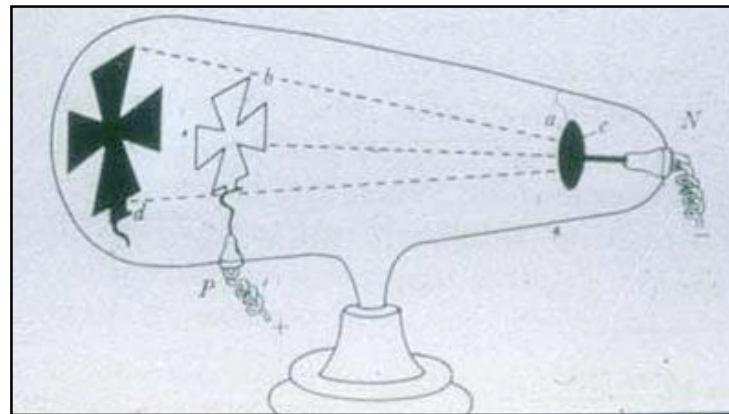
limiti

monitoraggio

rischio

I raggi X

Nel 1895 W. C. Roentgen (1845-1923) studiava i fenomeni luminosi associati alle scariche ad alta tensione in ampole di vetro a vuoto (tubi di Crookes). Si accorse, lavorando con uno schermo fluorescente attorno al tubo in funzione, che l'ombra delle ossa della sua mano era proiettata sullo schermo.



storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La radioattività naturale

“Nel 1896 il fisico francese Henri Becquerel si accorse casualmente che i sali di uranio, posti in vicinanza di una lastra fotografica, anche racchiusa in un involucro opaco, la impressionano, mostrando così di emettere radiazioni capaci di attraversare anche i corpi che non sono attraversati dalla luce. Questa osservazione aprì un nuovo capitolo della fisica, quello della radioattività”.

(E. Persico Gli atomi e la loro energia)

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Le osservazioni di Becquerel

Insensibilità ai legami chimici: la radiazione emessa da 1 g di *bromuro di radio*, che contiene il 59% di Radio, è identica a quella emessa da 0.59 g di Radio puro.

Insensibilità alla temperatura, alla pressione, ai campi elettrici e magnetici.

Diversi isotopi di uno stesso elemento, nonostante presentino le stesse proprietà chimiche, non presentano la stessa *radioattività*. Per questo si può parlare delle proprietà radioattive di un *nuclide* (o *radionuclide*, o *radioisotopo*) ma non di un elemento.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

1897: J.J. Thompson scopre l'elettrone.

1898: Marie Curie scopre il Polonio ed il Radio

Proseguendo gli studi iniziati da Becquerel, M. Curie scoprì che anche altre sostanze godevano della stessa proprietà (radioattive, radium = raggio) Notò che la pechblenda (contenente piccole quantità di sali di uranio) manifestava più radioattività dei sali di uranio: ne dedusse la presenza di una specie chimica ignota. Riuscì a separare il polonio e il radio. Utilizzando il radio, con un semplice esperimento riuscì a stabilire la natura dei raggi emessi scoprendo che trattava di 3 tipi di radiazioni: la prima elettricamente carica positivamente, la seconda negativamente e la terza neutra. Associò a tali raggi le prime tre lettere dell'alfabeto greco α (alfa), β (beta), γ (gamma).

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

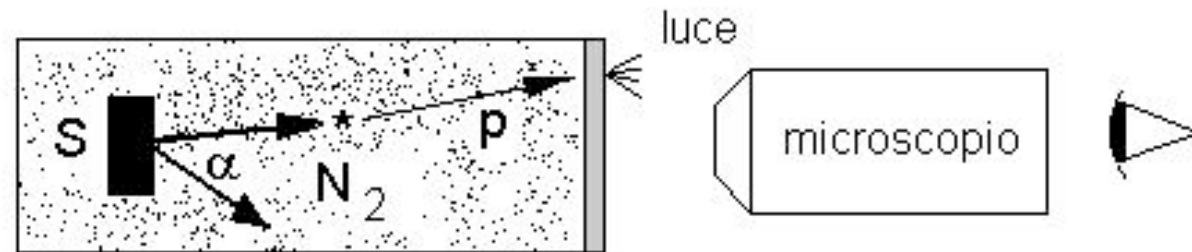
limiti

monitoraggio

rischio

Le trasmutazioni artificiali

Rutherford osservò la prima trasmutazione nucleare artificiale (1919) con un semplice dispositivo: una sorgente di particelle alfa (α) in un contenitore riempito di azoto (N_2) chiuso con uno schermo fluorescente. Lo schermo era posto ad una distanza dalla sorgente tale che nessuna particella alfa lo potesse raggiungere. Tuttavia sullo schermo osservò delle scintillazioni, dovute ai protoni (p) uscenti dalle reazioni nucleari tra le particella alfa e i nuclei di azoto: $^{14}\text{N} + \alpha = ^{17}\text{O} + p$.



storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Le trasmutazioni artificiali

In generale una trasmutazione artificiale avviene quando una particella proiettile colpisce un nucleo bersaglio con energia sufficiente per cambiarne la struttura interna e mutarlo in un altro nuclide. La trasformazione può essere accompagnata dall'emissione di radiazione particolata e fotonica.

Dal 1919 al 1932 gli unici proiettili disponibili erano le particelle alfa, che permettevano di produrre reazioni solo con nuclei leggeri.

Il *neutrone* venne scoperto nel 1932 in seguito ad un'esperienza condotta da I. Curie e F. Joliot ed interpretata da Chadwick.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La radioattività artificiale

Nel 1934 I. Curie e F. Joliot si accorsero che il Magnesio, bombardato con particelle alfa, diventa radioattivo, e precisamente emette radiazione beta con un tempo di dimezzamento caratteristico.

Si era cioè scoperto che le reazioni nucleari possono produrre nuclidi non esistenti in natura, *i radioisotopi artificiali*.

Poco dopo questa esperienza, Fermi scopriva che anche un bombardamento con neutroni poteva produrre radioattività artificiale (*attivazione neutronica*).

Il dispositivo era molto semplice: una sostanza veniva esposta ai neutroni emessi da un miscuglio di Radio e Berillio (ancora oggi usato come sorgente di neutroni), poi veniva misurata con un contatore Geiger: dall'andamento temporale del numero di conteggi si ricavava il tempo di dimezzamento tipico del radionuclide prodotto.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La struttura dell'atomo

I decadimenti α e β

La radiazione γ

La radiazione neutronica

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

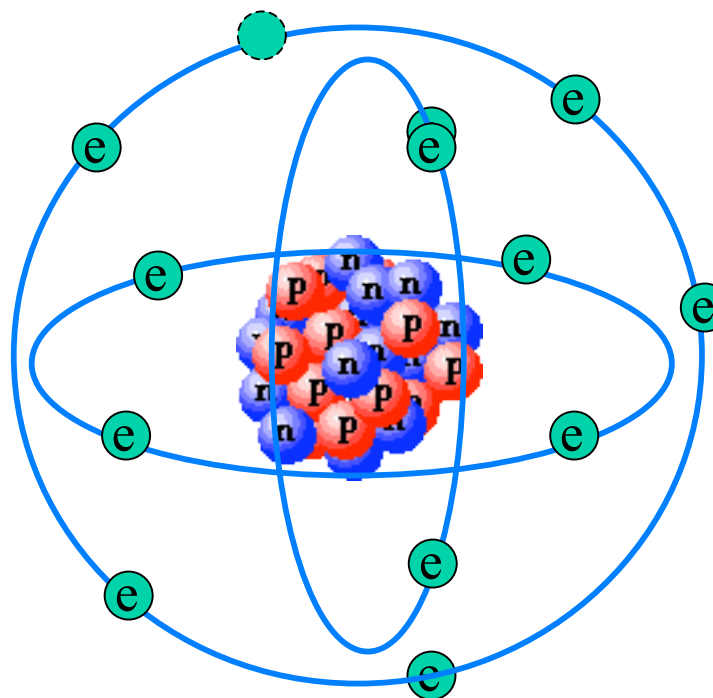
principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La struttura dell'atomo



L'atomo viene simbolicamente rappresentato con



X = Specie fisica

A = Numero di massa = Numero di nucleoni

Z = Numero di protoni $N = A - Z$ = Numero di neutroni

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

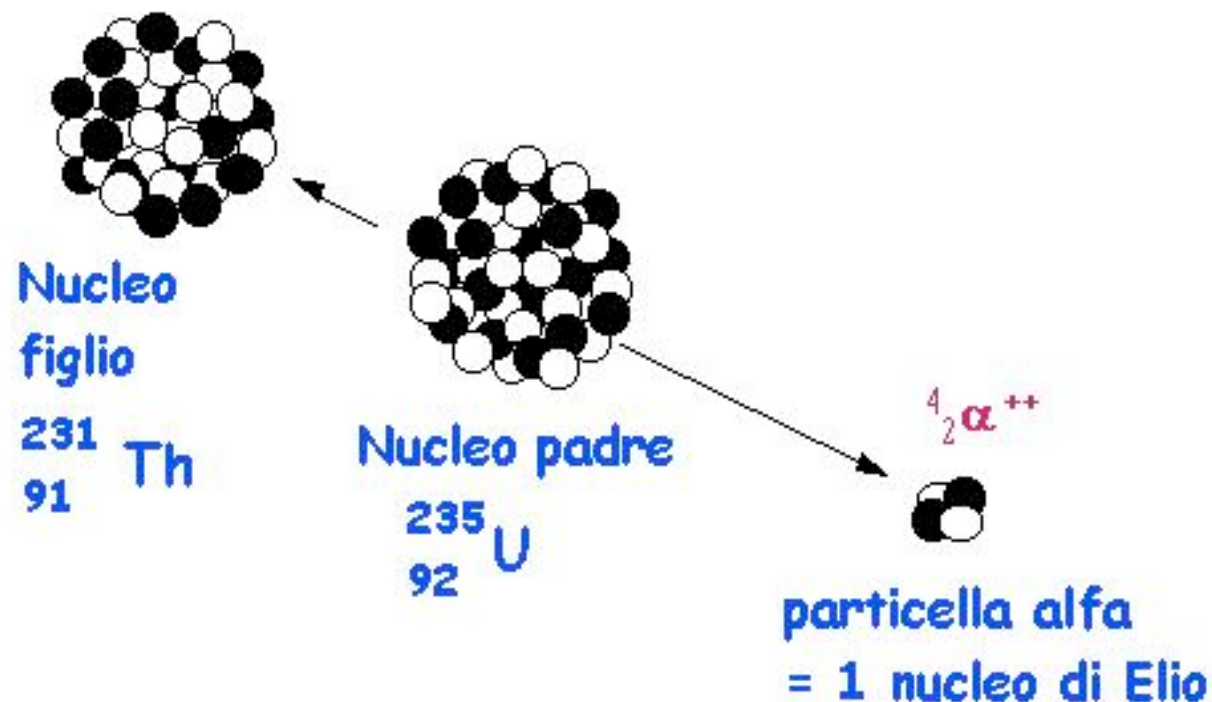
principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Il decadimento alfa



Le PARTICELLE ALFA sono formate da due protoni e due neutroni (un nucleo di elio)

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

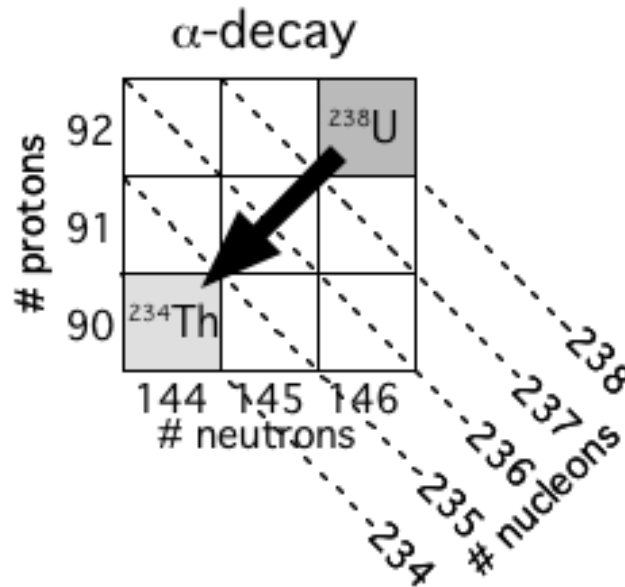
principi R.P.

limiti

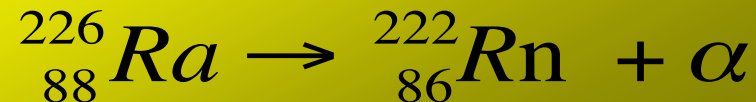
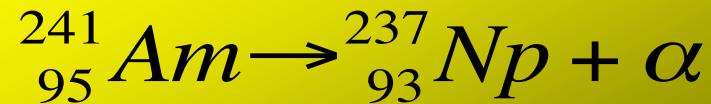
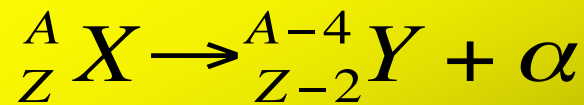
monitoraggio

rischio

Il decadimento alfa



Il decadimento alfa avviene per nuclei pesanti ($A > 209$) e le particelle vengono emesse con energia tra 4 e 8 MeV.



storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La radiazione alfa

Essendo dotate di carica elettrica, le particelle α interagiscono DIRETTAMENTE con la materia:

Cedono energia al mezzo attraversato ionizzandone gli atomi e le molecole.

L'elevata massa (circa 8000 masse elettroniche) fa sì che il loro percorso sia rettilineo.

Il percorso (range) di una particella alfa è di qualche cm in aria e di qualche μm in tessuto.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La radiazione alfa

Le PARTICELLE ALFA da sorgenti esterne al corpo NON possono penetrare lo strato corneo della pelle, ma sorgenti interne al corpo producono un notevole danno biologico. Per questo i composti alfa emettitori sono fortemente radiotossici.

La manipolazione di sorgenti alfa non sigillate è un'operazione ad elevato rischio (inalazione, ingestione, ferita), da effettuare sotto cappa in zona sorvegliata o controllata.

L' inalazione di Radon-222 comporta l'esposizione del tratto respiratorio alle radiazioni alfa del Rn e della progenie.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

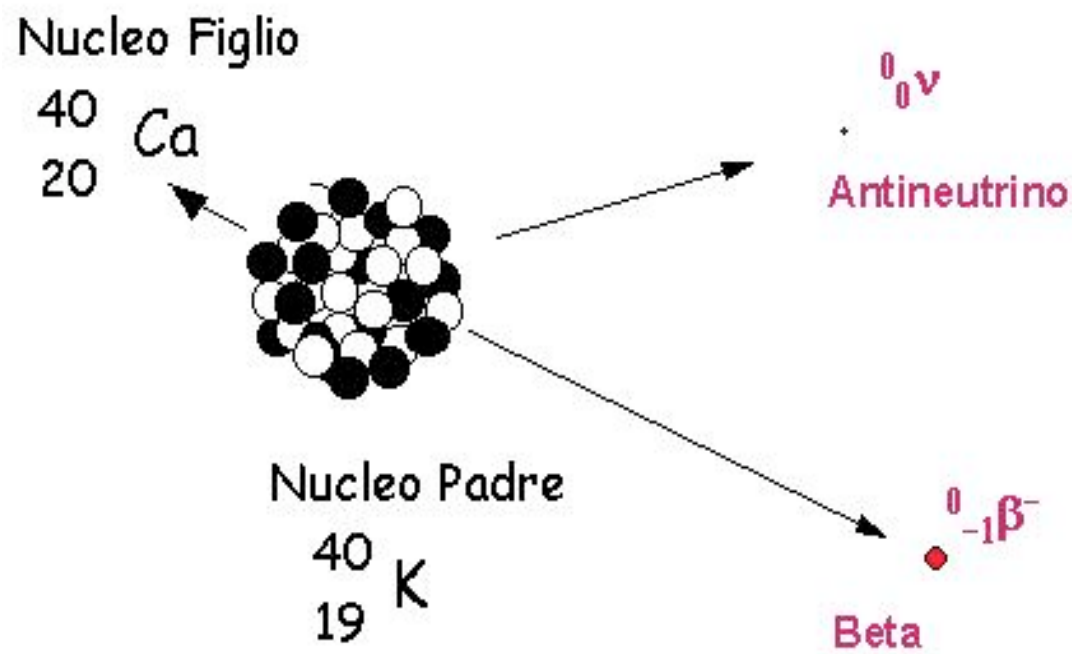
principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Il decadimento beta



Le PARTICELLE β hanno massa pari ad una massa elettronica ($9.11\text{E}-31$ kg) e carica +1 (β^+ , positroni) oppure -1 (β^- , elettroni).

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

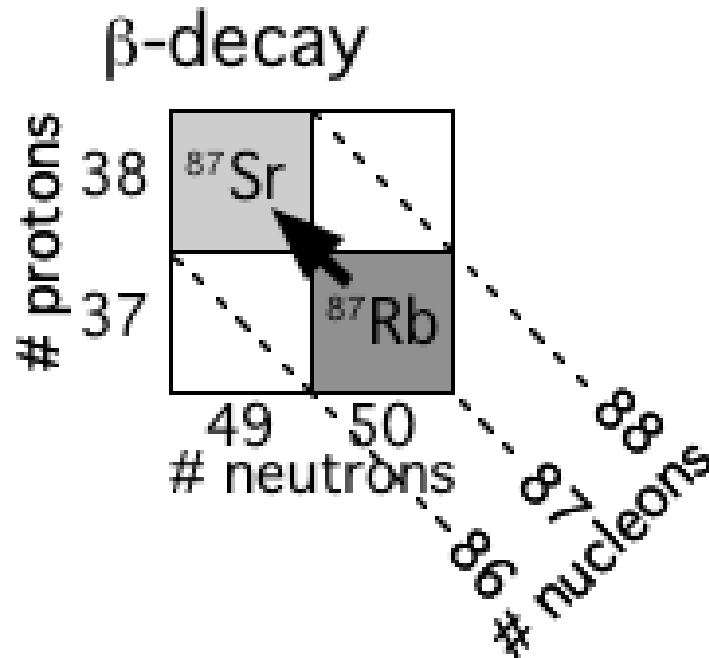
principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

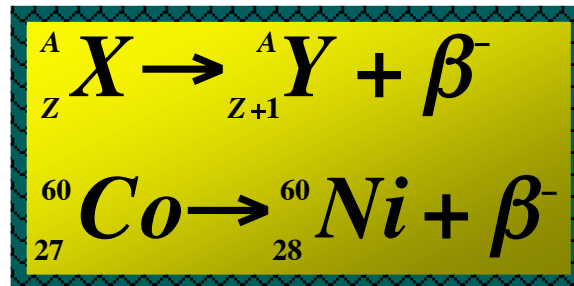
Il decadimento beta⁻



Decadono in modalità β^- i nuclei con un eccesso di neutroni

(Il decadimento β^- è il risultato di una conversione di un neutrone in un protone all'interno del nucleo).

Sono emettitori β^- : Trizio ($^3\text{H}_1$), Fosforo-32 ($^{32}\text{P}_{15}$), Zolfo-35 ($^{35}\text{P}_{16}$), Carbonio-14 ($^{14}\text{C}_6$), Stronzio-90 ($^{90}\text{Sr}_{38}$) e gran parte dei prodotti di attivazione e dei frammenti di fissione.



storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

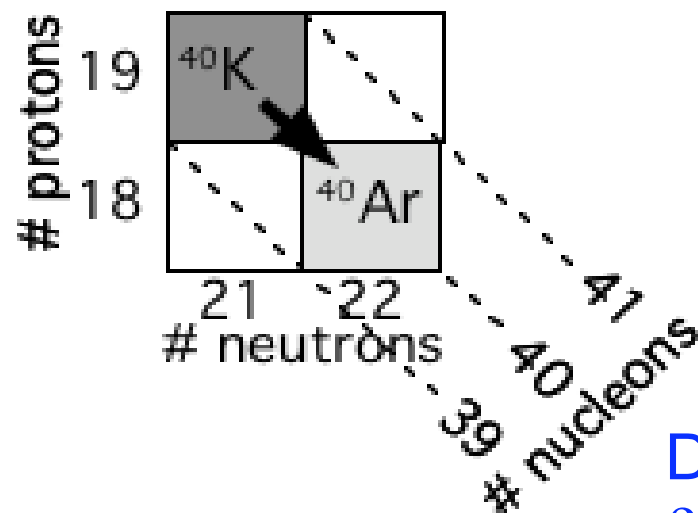
limiti

monitoraggio

rischio

Il decadimento β^+

Electron Capture



Decadono in modalità β^+ o per cattura elettronica quei nuclei che presentano un eccesso di protoni.

La radiazione beta

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Le particelle β , essendo dotate di carica elettrica, sono direttamente ionizzanti.

Il loro percorso in un mezzo è estremamente frastagliato (a zig-zag) a causa delle innumerevoli diffusioni (rimbalzi) con gli elettroni orbitali degli atomi del mezzo.

Sono molto più penetranti delle particelle α ma possono essere fermati da sottili strati di materiali (es mm ÷ cm di plastica, mm di metallo).

I beta da sorgenti esterne al corpo (Energia > 70 keV) possono essere importanti per la dose alla pelle.

L'introduzione nel corpo di materiali β - emettitori può essere pericolosa ma molto meno di quella degli α -emettitori.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La radiazione gamma

I raggi X e γ sono radiazioni elettromagnetiche simili alla luce e alle onde ma di lunghezza d'onda più corta.

I raggi X e γ sono molto più penetranti dei raggi α e β . Soltanto materiali ad alta densità quali il piombo sono in grado di fermarli.

La pericolosità dei raggi X e γ , specialmente nel caso di irraggiamento esterno, è strettamente connessa con l'elevata capacità di penetrazione che essi hanno nei vari materiali, tessuti viventi compresi.

La radiazione γ accompagna quasi sempre il decadimento beta (prodotti di attivazione).

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

La radiazione neutronica

I neutroni sono particelle neutre cioè senza carica elettrica; sono molto penetranti, non ionizzano direttamente ma la loro interazione con la materia può generare particelle α , β , γ che a loro volta producono ionizzazione. I neutroni sono fermati da materiali leggeri quali acqua, paraffina, polietilene, e calcestruzzo in spessori più o meno grandi.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

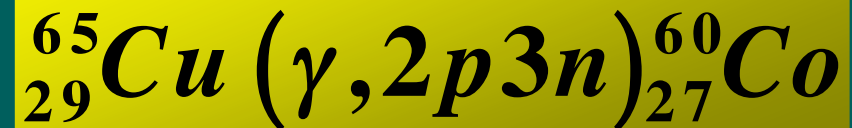
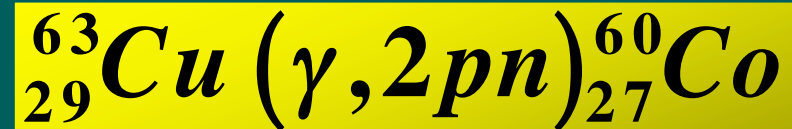
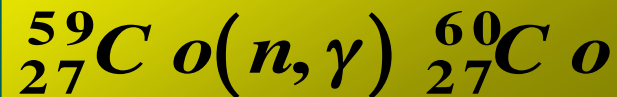
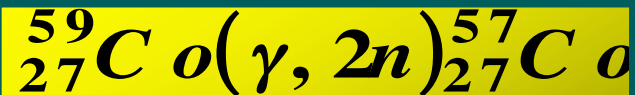
principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

I prodotti di attivazione



storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

L'energia delle radiazioni

Una radiazione viene identificata dal suo tipo (alfa, beta, gamma, neutroni) e dalla sua energia. L'energia delle radiazioni si misura in eV (multipli e sottomultipli).

(1 eV = energia acquisita da un elettrone quando viene accelerato da una d.d.p. di 1 V).

Gli effetti delle radiazioni sono dovuti alla cessione della loro energia (direttamente o indirettamente) alla materia attraversata.

Il danno subito dai tessuti biologici è relazionabile all'energia assorbita per unità di massa, chiamata DOSE (u.d.m. Gray; 1 Gy = 1 J/kg).

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

ATTENUAZIONE DELLE RADIAZIONI

La attenuazione delle radiazioni, ovvero la loro schermatura mediante materiali di tipo e spessore idonei, è uno dei TRE elementi della radioprotezione contro sorgenti ESTERNE al corpo:

SCHERMATURA

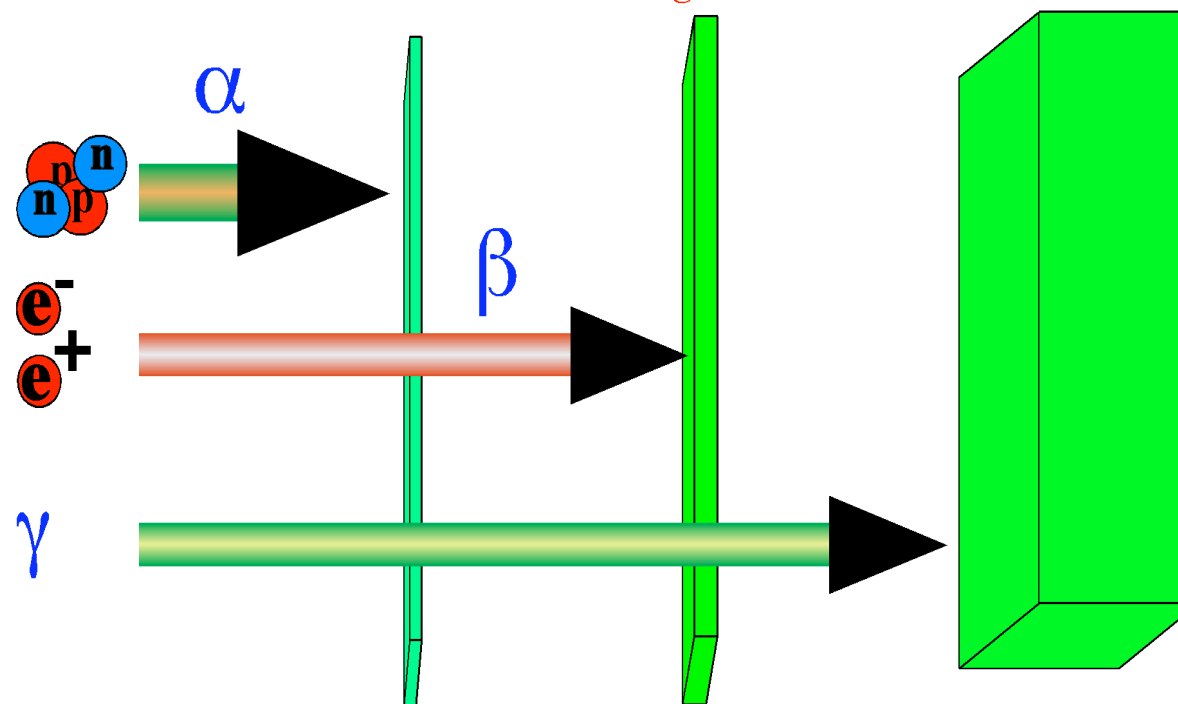
TEMPO

DISTANZA

ATTENUAZIONE DELLE RADIAZIONI

Spessori di materiale attraversato dalle radiazioni alfa , beta e gamma

Sottili fogli di metallo



Fogli di carta

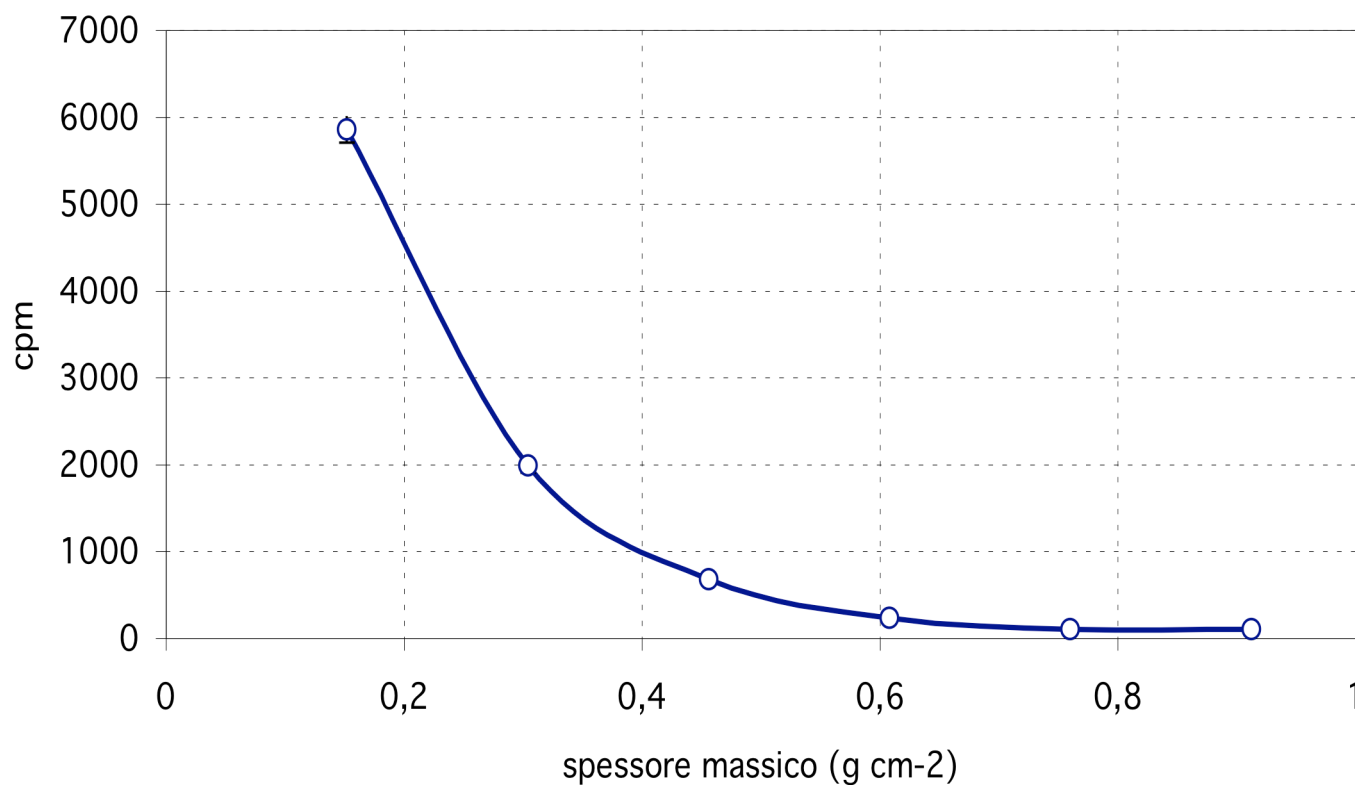
Grandi spessori di metallo

Grandi spessori di calcestruzzo

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

- storia
- natura
- energia
- attenuazione**
- grandezze
- leggi
- effetti
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

Attenuazione dei β



Attenuazione di una sorgente di $^{90}\text{Sr}+\text{Y}$ con diversi spessori di plastica da 1,5 mm.

Attenuazione dei β

storia
 natura
 energia
 attenuazione
 grandezze
 leggi
 effetti
 obiettivi R.P.
 principi R.P.
 limiti
 monitoraggio
 rischio

Il percorso dei raggi β
 aumenta all'aumentare
 della loro energia

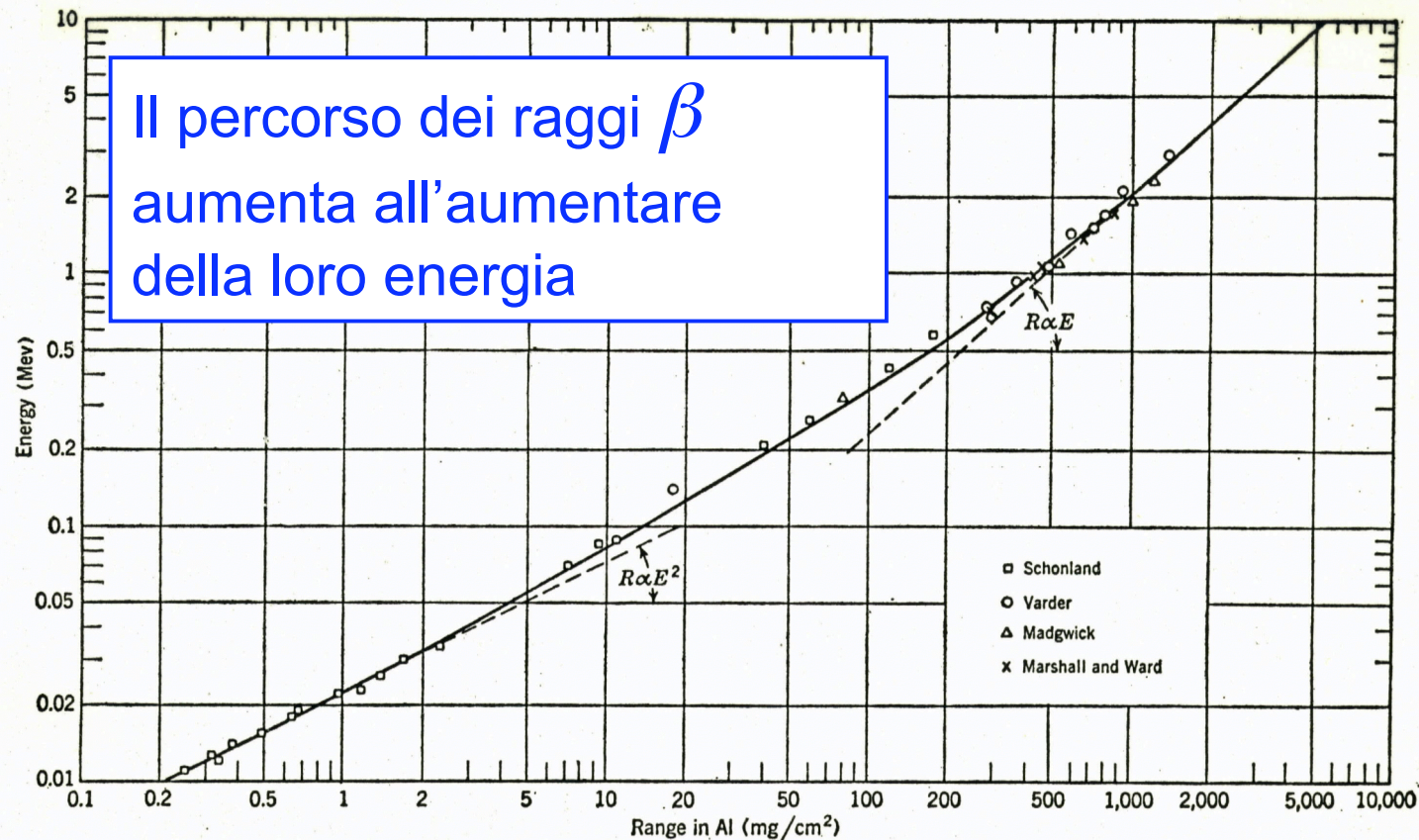


Fig. 3.3 Empirical range-energy relationship for electrons absorbed in aluminum. Experimental values by several observers (S16, V4, M4, M17) on monoenergetic electrons are shown. For monoenergetic electrons, the range coordinate refers to the extrapolated range R_0 of Fig. 3.2. For continuous β -ray spectra the energy coordinate refers to the end-point energy E_{max} , and the range coordinate becomes the maximum range R_m of Fig. 3.4. The smooth curve represents the empirical relationship, Eqs. (3.3) and (3.4), developed by Katz and Penfold (K7).

Attenuazione dei β

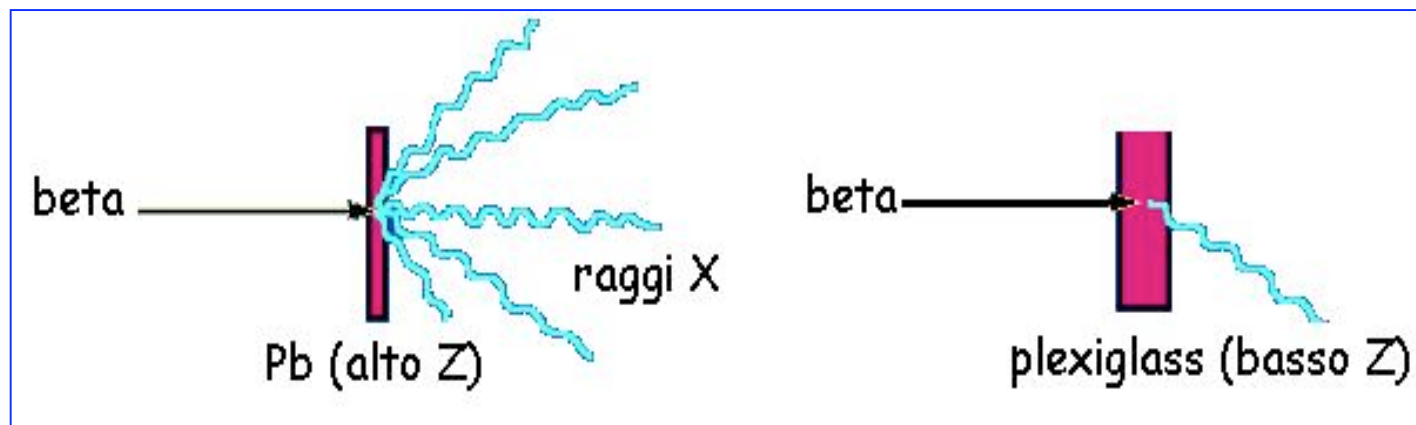
storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

nuclide	Energia massima dei β (keV)	Percorso in aria (mm)	Percorso in tessuto (mm)
^3H	18,6	6	0,006
^{14}C	158	200	0,5
^{32}P	1710	4500	8
$^{90}\text{Sr}+\text{Y}$	2280	5200	9,2

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Il *bremsstrahlung*

- La perdita di energia collisionale non è l'unico fenomeno che sottrae energia agli elettroni in un mezzo.
- La rimanente parte di energia viene trasformata in radiazione fotonica (X), con energia da zero fino all'energia iniziale degli elettroni (*bremsstrahlung*).
- L'importanza di questo fenomeno aumenta all'aumentare dello Z dell'assorbitore e dell'energia degli elettroni (tubi a raggi X).



- storia
- natura
- energia
- attenuazione
- grandezze
- leggi
- effetti
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

Il *bremsstrahlung*

- Il *bremsstrahlung* “converte” una radiazione poco penetrante (elettroni) in una fortemente penetrante (fotoni).

- La schermatura di sorgenti beta deve essere fatta minimizzando questo processo. Pertanto i beta vanno schermati con materiali a basso numero atomico, ad esempio plastici.

- Frazione di energia convertita in raggi X

Sr-90 (0.8 MeV) con Pb ($Z=82$) $f = 10\%$

Sr-90 (0.8 MeV) con plastica ($Z=7$) $f = 0,6\%$

- storia
- natura
- energia
- attenuazione**
- grandezze
- leggi
- effetti
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

La radiazione X e γ

- La radiazione fotonica è **INDIRETTAMENTE IONIZZANTE**, cioè produce ionizzazione nel mezzo tramite i secondari carichi (elettroni) che mette in moto. Il tipo di materiale e lo spessore delle schermature vengono scelti in funzione dell'energia.
- Tubo RX da 100 kV: Uno schermo di cemento è spesso 80 volte e pesante 17 volte rispetto all'equivalente in Pb.
- 1 MV: ...spesso 6 volte e pesante 1,25 volte rispetto all'equivalente in Pb (molto più economico).

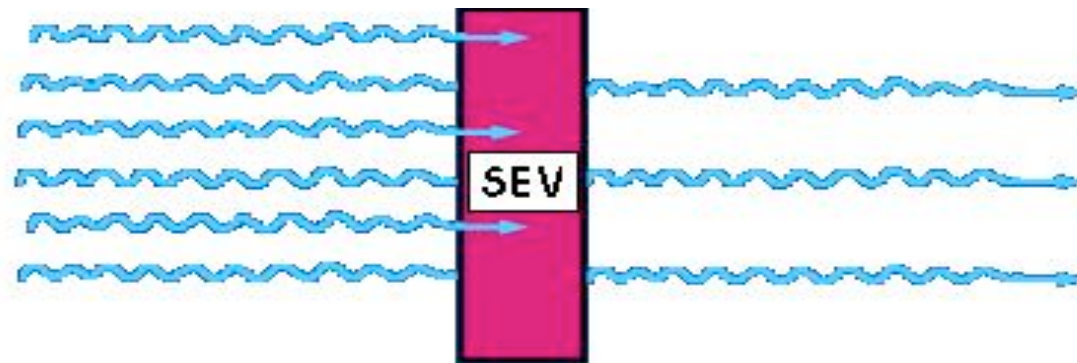
Pb $\Rightarrow$ < 300 kV

Cemento, terra.... $\Rightarrow$ > 300 kV

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Spessore decivalente (SDV)

E' lo spessore necessario per ridurre la dose al 10%



Nota: Per ridurre l'intensità al 1% servono 2 SDV
(il 10% del 10% è l' 1%).

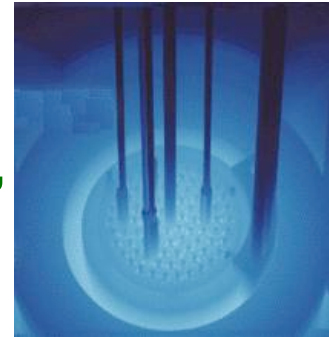
storia				
natura				
energia				
attenuazione				
grandezze				
leggi				
effetti				
obiettivi R.P.				
principi R.P.				
limiti				
monitoraggio				
rischio				
	Sorgente	E	SDV _{Pb} (cm)	SDV _{cemento} (cm)
	Tubo RX	75 kV	0.05	1.3
	Tubo RX	100 kV	0.08	5.5
	Tubo Rx	250 kV	0.29	9.0
	Au-198	411 keV	3.6	13.5
	Cs-137	662 keV	2.2	16.3
	Linac	1000 kV	2.52	15
	Co-60	1,25 MeV	4.0	20.3
	Linac	10 MV	6	38
	Accel.	100 MV	-	50

- storia
- natura
- energia
- attenuazione**
- grandezze
- leggi
- effetti
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

La radiazione neutronica

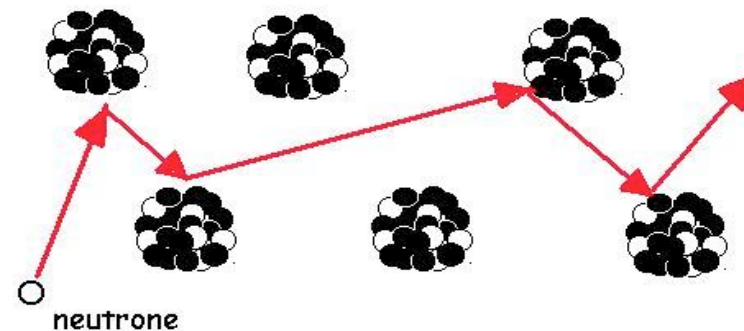
I NEUTRONI sono particelle prive di carica elettrica e dotate di massa. Interagiscono in modo ELASTICO o INELASTICO, con i NUCLEI del mezzo attraversato. L'assenza di carica li rende infatti insensibili ai campi elettromagnetici degli elettroni orbitali. I neutroni sono prodotti da:

Fissione e fusione nucleare,
sorgenti radionuclidiche ($^{241}\text{Am-Be}$, ^{252}Cf),
Interazione con la materia di elettroni
e gamma di alta energia ($> 10 \text{ MeV}$)



Attenuazione dei neutroni

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio



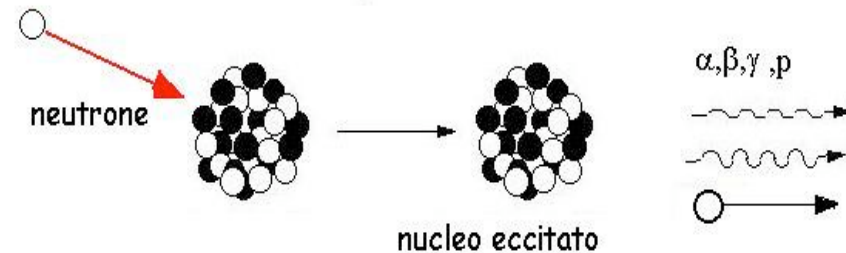
Energia trasferita in media da un urto:

37%(H)

14%(C)

3% (Fe)

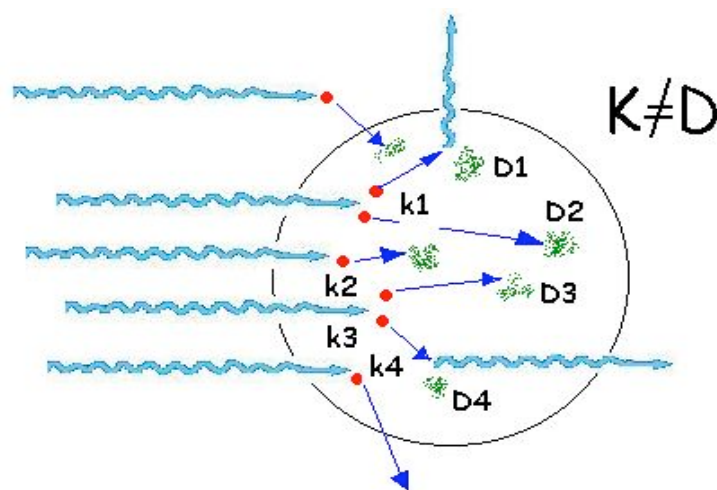
Cattura nucleare
(con attivazione)



Esempio di schermatura composta per neutroni fino a circa 20 MeV: Ferro - polietilene - cadmio - piombo

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Le Grandezze Fisiche



storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Attività (A)

unità di misura S.I. = Becquerel (Bq)

Rappresenta il numero di disintegrazioni nell'unità di tempo.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione al secondo}$$

L'unità di misura tradizionale è il Curie (Ci), così legato al Bq:

$$1 \text{ Ci} = 3.7\text{E}+10 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ mCi} = 3.7\text{E}+7 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 3.7\text{E}+4 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ nCi} = 37 \text{ Bq}$$

$$A(\text{GBq}) = A(\text{Ci}) \times 37$$

$$A(\text{MBq}) = A(\text{mCi}) \times 37$$

$$A(\text{kBq}) = A(\text{ } \mu\text{Ci}) \times 37$$

$$A(\text{Bq}) = A(\text{nCi}) \times 37$$

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Dose assorbita (D)

unità di misura S.I. = Gray (Gy)

Rappresenta l'energia assorbita dall'unità di massa di un materiale ad opera della radiazione che lo attraversa.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$$

L'unità di misura tradizionale è il rad, così legato al Gy:

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

$$1 \text{ mGy} = 0.1 \text{ rad}$$

$$1 \text{ mGy} = 0.1 \text{ mrad}$$

$$D(\text{Gy}) = D(\text{rad}) \times 0.01$$

$$D(\text{mGy}) = D(\text{rad}) \times 10$$

$$D(\text{mGy}) = D(\text{mrad}) \times 10$$

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Kerma (K)

unità di misura S.I. = Gray (Gy)

Rappresenta l'energia ceduta alle particelle secondarie per unità di massa di un materiale.

Per i **fotoni in aria** il kerma è praticamente sempre identificabile con la dose.

Non è generalmente vero che $K=D$, in quanto parte dell'energia ceduta ai secondari può allontanarsi dalla porzione di mezzo considerata (ad es. tramite emissione di radiazione di frenamento).

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

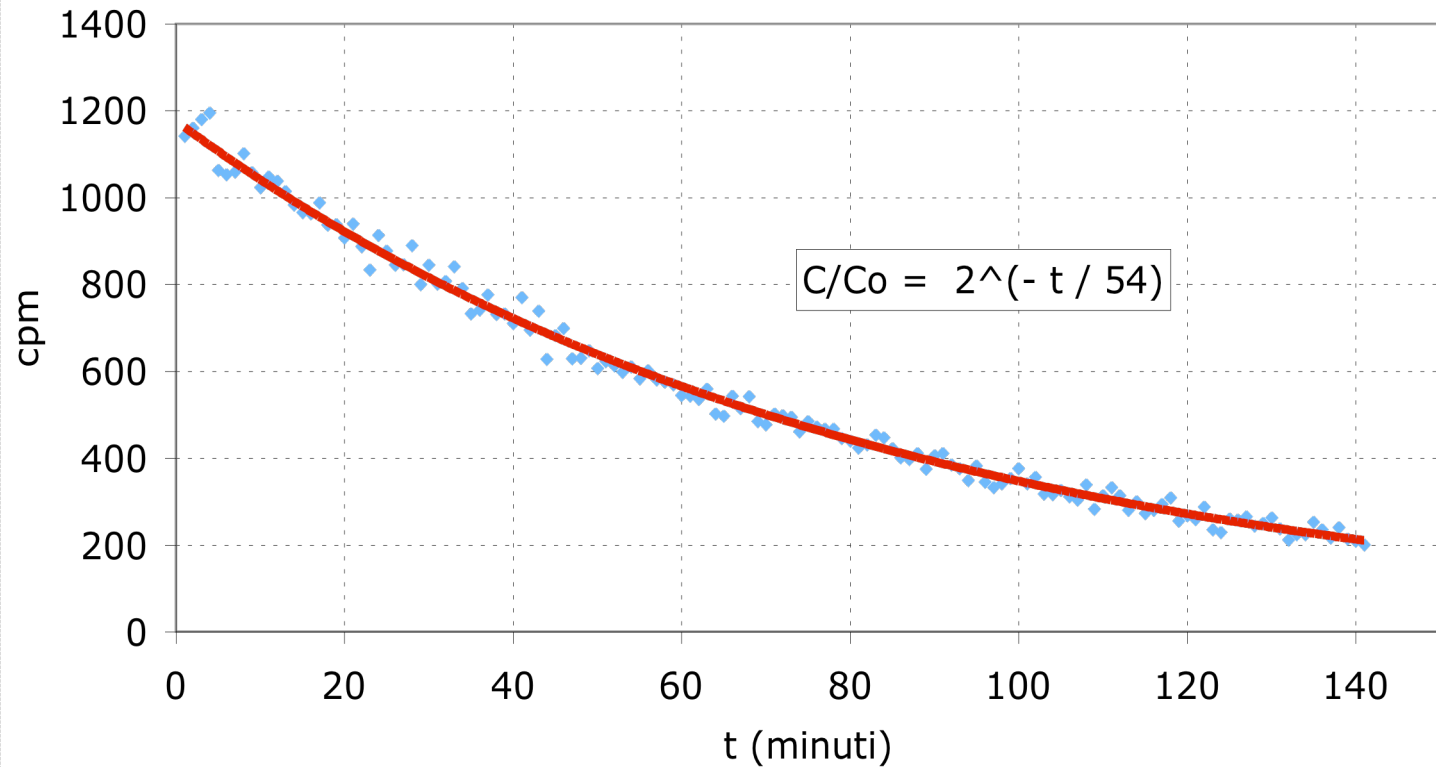
Legge del decadimento radioattivo

La attività di un radionuclide diminuisce nel tempo, in quanto ogni decadimento sottrae un nucleo alla specie “padre”.

Siccome il numero di disintegrazioni al secondo (A) è proporzionale al numero di nuclei non ancora disintegrati, la legge sarà di tipo **esponenziale**.

Ogni radionuclide è caratterizzato da un “**tempo di dimezzamento**” (da frazioni infinitesime di secondo a miliardi di anni).

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio



Una lamina di Indio è stata attivata e misurata ad intervalli di un minuto per circa 2 ore. Dalla curva di decadimento si calcola il tempo di dimezzamento dell'isotopo prodotto (^{116}In).

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

H-3	12.3 anni
C-14	5730 anni
Co-60	5.3 anni
Cs-137	30 anni
Sr-90	29.1 anni
U-238	4470000000 anni

Esempi:

Il Co-60, in 1 mese, si riduce del 1%. Infatti, 5.3
 $a = 1934$ d quindi: $1 - 2^{-30/1934} = 0.01$

Dopo 10 tempi di dimezzamento, l'attività si
riduce a 0,1%.



La dose diminuisce con la distanza

La DISTANZA è un altro dei TRE elementi della radioprotezione contro sorgenti ESTERNE al corpo:

SCHERMATURA

TEMPO

DISTANZA

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

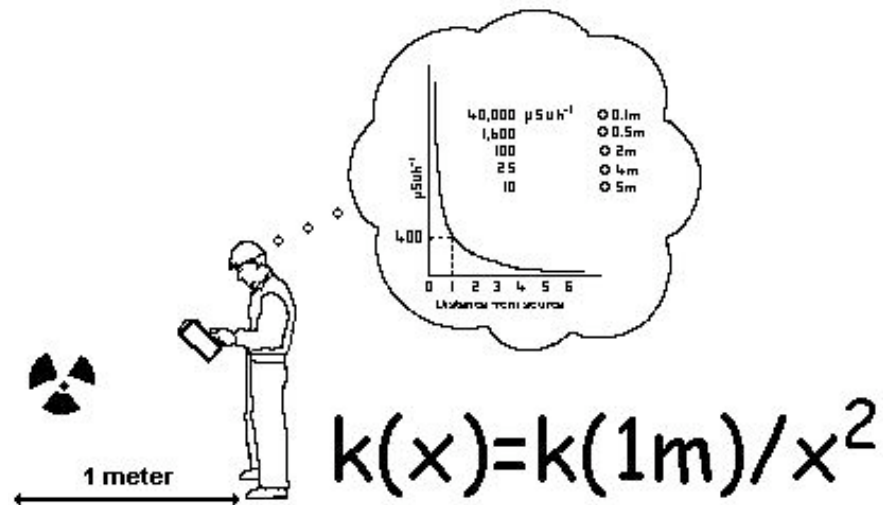
monitoraggio

rischio

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Legge dell'inverso del quadrato

La dose dovuta ad una sorgente di radiazioni gamma (considerata puntiforme) varia in modo **inversamente proporzionale** al quadrato della distanza.



- storia
- natura
- energia
- attenuazione
- grandezze
- leggi**
- effetti
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

Legge dell'inverso del quadrato

Pertanto, la dose ad una distanza x (espressa in metri) da una certa sorgente può essere semplicemente calcolata conoscendo la dose ad 1 m:

$$D(x) = D(1 \text{ m}) / x^2$$

(Nota: se la distanza raddoppia la dose diventa 1/4, se la distanza dimezza la dose diventa 4 volte tanto).

- storia
- natura
- energia
- attenuazione
- grandezze
- leggi
- effetti
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

Legge dell'inverso del quadrato

Per un dato radionuclide gamma emettitore, la dose in aria in un'ora ad un metro dovuta ad un'attività pari a 1 MBq è una costante (qui espressa in mGy/h):

Co-60	3.90
Cs-137	1.10
Au -198	0.76
I-131	0.73
U-238	0.013

La dose è proporzionale al tempo di esposizione

La riduzione del tempo di esposizione è un altro dei TRE elementi della radioprotezione contro sorgenti ESTERNE al corpo:

SCHERMATURA

TEMPO

DISTANZA

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Esercizio

Gli elementi **schermatura** - **distanza** - **tempo** devono essere combinati in modo da ottimizzare la protezione della persona.

Esempio: Un intervento in zona controllata richiede 30 minuti di lavoro ad una intensità di dose di 20 microSv/h.

Se si introduce un tele-manipolatore, l'intensità di dose diventa 10 microSv/h ma il tempo richiesto diventa 2 ore.

La situazione da preferire è la prima, perchè nei due casi la dose all'operatore sarà:

$$20 * 0,5 = 10 \text{ microSv nel primo caso}$$

$$10 * 2 = 20 \text{ microSv nel secondo caso}$$

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Effetti delle radiazioni sulla materia vivente

Dalla scoperta della radioattività, occorsero più di trenta anni perché nascesse un organo internazionale avente come obiettivo la protezione dell'uomo contro le radiazioni ionizzanti.

1897: E' riconosciuta per la prima volta un'esposizione acuta nell'uomo (Walsh)

1899: Primo trattamento oncologico (Stenbeck)

1902: E' riconosciuto per la prima volta nell'uomo un cancro indotto da radiazioni (Frieben)

1928: Nasce l'ICRP

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Danno microscopico

A livello microscopico, le radiazioni ionizzanti depositano energia che eccita e ionizza le molecole.

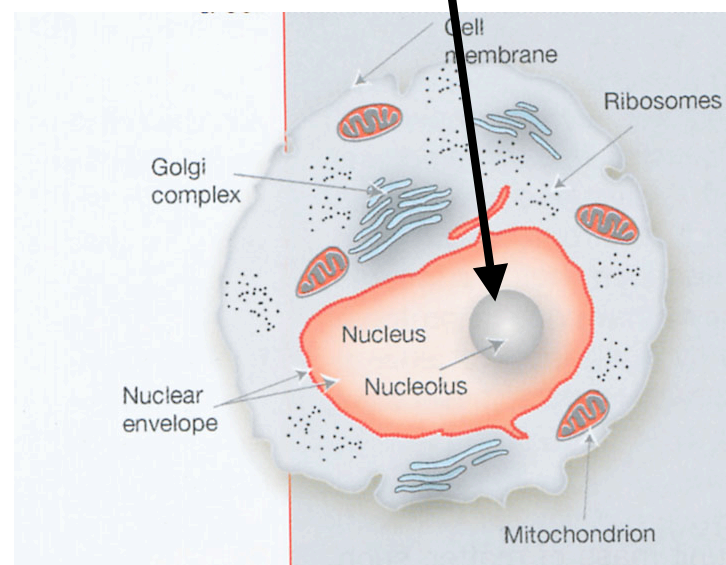
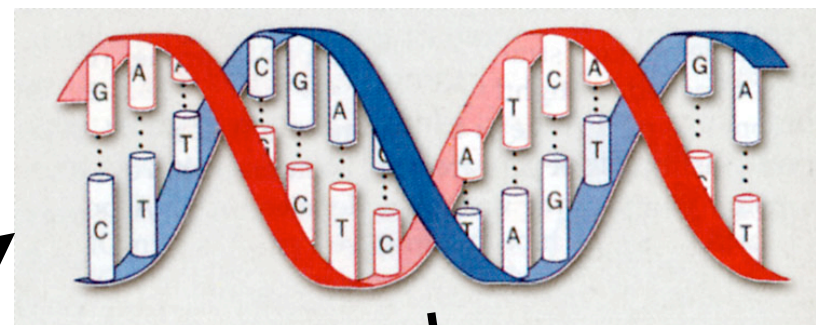
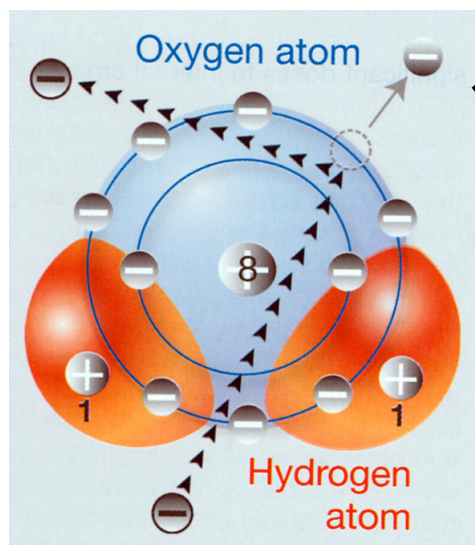
Il tessuto biologico è composto in gran parte di acqua. La ionizzazione dell'acqua produce RADICALI LIBERI, ed in particolare:



I radicali liberi, all'interno della cellula, danneggiano le BIOMOLECOLE (come il DNA) che ne governano la funzionalità.

Dalla ionizzazione al danno cellulare....

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio



Corso di formazione in Radioprotezione

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Molecolare

Subcellulare

Cellulare

Tessuto/Organo

Animale in toto

Popolazione di
animali

RNA
DNA
INTERFERENZE PROCESSI METABOLICI

MEMBRANE
NUCLEI
CROMOSOMI
MITOCONDRI
LISOSOMI

INIBIZIONE DIVISIONE CELLULARE
MORTE CELLULARE
DEGENERAZIONE MALIGNA

SISTEMA NERVOSO
MIDOLLO OSSEO
INTESTINO
INDUZIONE DI NEOPLASIE

MORTE
ACCORCIAMENTO DELLA VITA

MUTAZIONI GENETICHE
MUTAZIONI CROMOSOMICHE

Danno cellulare

EFFETTI SOMATICI NEI TESSUTI IRRADIATI

EFFETTI GENETICI NEI DISCENDENTI

Effetti acuti e tardivi

Dovuti a variazioni funzionali
e morfologiche dei tessuti

Neoplasie maligne

- Leucemie
- Tumori solidi

Difetti ereditari di diversa
gravita'

- malattie
- malformazioni
- difetti mentali

Effetti deterministici

Effetti stocastici

Effetti dannosi

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

I processi di ionizzazione ed eccitazione degli atomi e molecole dei tessuti biologici possono causare modifiche sia a lungo sia a breve termine delle cellule irradiate. Nel caso una cellula subisca un danneggiamento senza un'adeguata riparazione, essa può perdere del tutto la sua capacità riproduttiva o morire subito, ovvero rimanere vitale ma modificata. Ne conseguono implicazioni profondamente diverse per l'organismo considerato nella sua interezza.

- storia
- natura
- energia
- attenuazione
- grandezze
- leggi
- effetti**
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

Effetti deterministici (necrosi)

Il numero di cellule può diminuire anche notevolmente. Se i meccanismi di riparazione/ripristino non bastano per recuperare il tessuto perso, la funzionalità dell'organo o tessuto è compromessa. Esiste comunque un valore di soglia al di sotto del quale tale effetto non si manifesta e al di sopra del quale la gravità del danno arrecato aumenta al crescere della dose. Questo tipo di effetto è detto deterministico: esiste cioè una connessione causale fra dose ed effetto.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

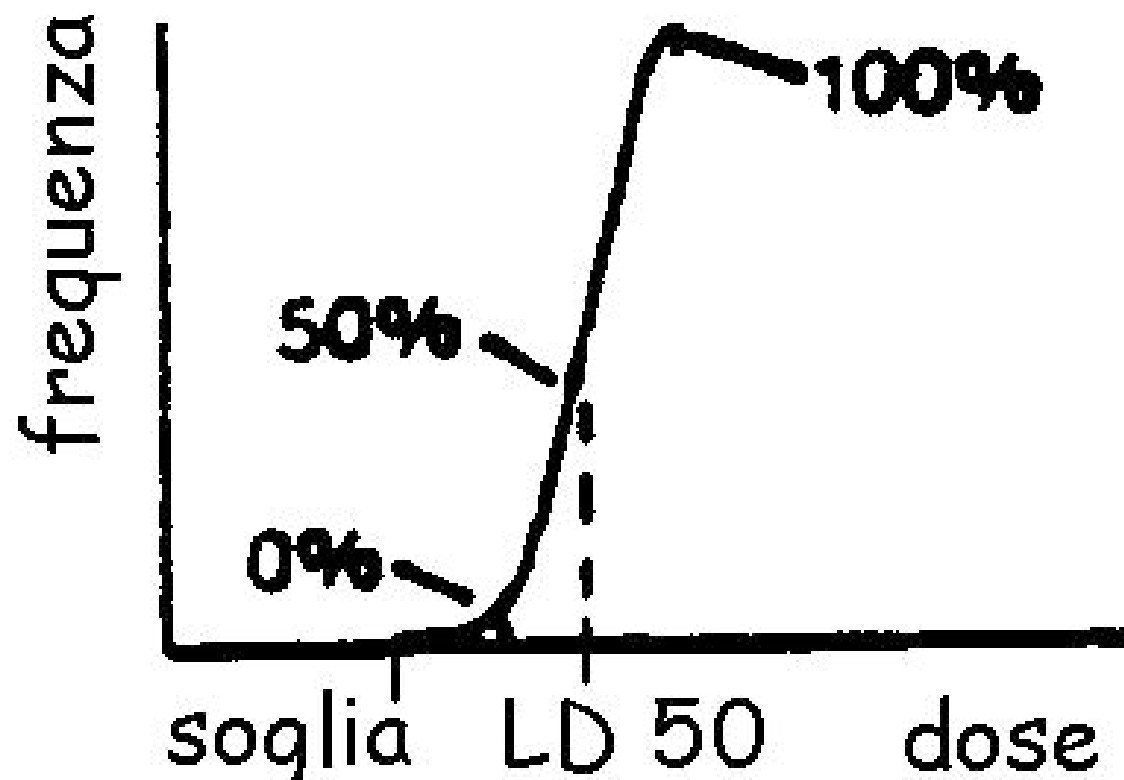
principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Effetti deterministici



sindrome acuta da radiazioni

storia
 natura
 energia
 attenuazione
 grandezze
 leggi
effetti
 obiettivi R.P.
 principi R.P.
 limiti
 monitoraggio
 rischio

Tempo dall'irradiazione	Sindrome cerebrale	Sindrome gastrointestinale	Sindrome ematologica
Primo giorno	> 50 Gy Nausea Vomito Diarrea Cefalea Eritema	5-20 Gy Nausea Vomito Diarrea	2-5 Gy Nausea Vomito Diarrea
Seconda settimana	Disorientazione Agitazione Atassia Sonnolenza Coma Convulsioni Shock Morte	Vomito Diarrea Cachessia Prostrazione Morte	
Terza e quarta settimana			Malessere Astenia Anoressia Vomito Febbre Nausea Emorragia Depilazione Recupero

$DL_{50/30} = 4-5 \text{ Gy (uomo)}$

- storia
- natura
- energia
- attenuazione
- grandezze
- leggi
- effetti**
- obiettivi R.P.
- principi R.P.
- limiti
- monitoraggio
- rischio

Effetti stocastici

Le conseguenze sono del tutto diverse nel caso le cellule irradiate sopravvivano, anche se modificate, conservando comunque la capacità di riprodursi. Le cellule generate successivamente, dopo un periodo più o meno di latenza, possono degenerare provocando l'insorgenza di tumori, con probabilità crescente in funzione della dose ricevuta, proporzionalmente alla dose stessa, senza un valore di soglia e comunque per valori molto inferiori alla soglia per effetti deterministici. Questo tipo di effetto è detto stocastico: la probabilità di comparsa di tale effetto è cioè correlabile con la dose ricevuta soltanto sulla base di considerazioni statistiche

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Per gli effetti stocastici, che possono avere tempi di latenza di anni o generazioni, si assume un modello di induzione di tipo

LINEARE SENZA SOGLIA

con pendenza $0,05 \text{ Sv}^{-1}$. Cioè:

1) si assume cautelativamente che non vi sia un valore di dose al di sotto del quale è da escludere l'induzione di questi effetti.

2) il rischio assunto è di 5% per Sv, oppure di 0,00005 per mSv. In pratica, si assume che su 100000 persone irradiate a 1 mSv, 5 svilupperanno un effetto di questo tipo (calcolato a partire da dati epidemiologici con dosi individuali dell'ordine di centinaia di mSv).

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Il coefficiente di rischio viene calcolato come sommatoria dei contributi di vari effetti:

	Detrimento (10^{-2} Sv^{-1})			
Popolazione	Tumori letali	Tumori non letali	Effetti ereditari gravi	Totale
Lavoratori adulti	4.0	0.8	0.8	5.6
Popolazione generale	5.0	1.0	1.3	7.3

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Il danno radioindotto dipende fortemente dal **tipo di radiazione**.

Il fattore W_R tiene conto dell'efficacia biologica dei diversi tipi di radiazione rispetto ai fotoni.

R A D I A Z I O N E	W R
Fotoni, elettroni	1
ALFA	20
PROTONI	5
NEUTRONI < 10 keV	5
NEUTRONI 10 - 100 keV	10
NEUTRONI 0.1 - 2 MeV	20
NEUTRONI 2 - 20 MeV	10
NEUTRONI > 20 MeV	5

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Il danno radioindotto dipende dalla risposta **dei vari organi o tessuti.**

T E S S U T O	W T
GONADI	0.2
MIDOLLO ROSSO	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
SUP. OSSEE	0.01
ALTRI TESSUTI	0.05

w_T è il fattore di ripartizione del rischio di effetti stocastici tra i vari organi rapportato alla irradiazione uniforme del corpo intero.

La somma dei w_T deve essere 1

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Gli obiettivi di un sistema di radioprotezione



Prevenire gli effetti deterministici.

Limitare il *rischi* dell'induzione di effetti stocastici ad un valore *accettabile*, tenendo conto dei fattori economici e sociali.

Nota: non è possibile lavorare a livello di rischio pari a zero, perché questo renderebbe impraticabile qualunque attività.

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

I principi della radioprotezione

- ① **Giustificazione** : nessuna pratica con radiazioni è giustificata a meno che non produca un beneficio agli individui e alla società tale da compensarne il detrimento.
- ② **Ottimizzazione** : La dose ricevuta da una pratica con radiazioni deve essere tanto più bassa quanto ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali.
- ③ **Limitazione** delle dosi individuali ai valori limiti raccomandati dalla ICRP.

Le grandezze limite (ICRP60, D.Lgs. 230/95)

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Dose equivalente a organo o tessuto, H_T

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

Tiene conto del fattore peso per i diversi tipi di radiazione; si misura in Sievert, Sv.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

Le grandezze limite (ICRP60, D.Lgs. 230/95)

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

La ICRP ha posto specifici limiti sulla dose equivalente a speciali tessuti (cristallino, pelle, mani, piedi, avambracci e caviglie) al fine di preservare gli individui da effetti di tipo deterministico localizzati in questi tessuti.

Le grandezze limite (ICRP60, D.Lgs. 230/95)

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Dose efficace, E (u.d.m. Sv)

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{TR}$$

E è ritenuta indicativa (proporzionale) al rischio di effetti stocastici, in quanto tiene conto delle dosi equivalenti ai vari organi o tessuti, pesate con i corrispondenti fattori di peso w_T .

Le grandezze limite (ICRP60, D.Lgs. 230/95)

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

La ICRP ha posto un limite sulla dose efficace E per limitare il rischio di effetti stocastici ad un valore accettabile, tenuto conto dei fattori economico e sociali.

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

I limiti (ICRP60, D.Lgs. 230/95)

	lavoratori	popolazione
E	20 mSv	1 mSv
H cristallino	150 mSv	15 mSv
H pelle	500 mSv	50 mSv
estremità	500 mSv	

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Dalle grandezze fisiche
(kerma, dose....misurabili con strumenti)

....alle grandezze limite.....
(connesse con la prevenzione/limitazione degli effetti
ma non misurabili)

....alle grandezze operazionali
(misurabili, definite in modo da
stimare conservativamente le
grandezze limite per poter vigilare
sul rispetto dei limiti)

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Le grandezze operazionali in dosimetria esterna

Essendo E ed H_T non direttamente misurabili (sono infatti definite nel corpo dell'individuo!!) , vengono stimati con la grandezza **equivalente di dose personale, $H_p(d)$** .

- 1) Idoneo per la taratura degli strumenti
- 2) Conservativa (cioè sempre $>$ di E ed H_T)

Con il D.Lgs. 230/95 (i dosimetri personali devono rispondere in termini di $H_p(d)$).



$H_p(0.07)$, $H_p(3)$ e $H_p(10)$
(u.d.m. Sievert, Sv - definite dalla ICRU)

Sono definite come l'EQUIVALENTE DI DOSE nel CORPO alla profondità 0.07, 3 e 10 mm.

Sono calcolate SIMULANDO IL CORPO UMANO con un fantoccio di tessuto equivalente di 30x30x15 cm³.

- $H_p(0.07)$ per il monitoraggio della pelle e delle estremità (H_{pelle} , $H_{\text{estremità}}$)
- $H_p(3)$ per il monitoraggio del cristallino ($H_{\text{cristallino}}$)
- $H_p(10)$ per il monitoraggio della dose efficace, E.

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

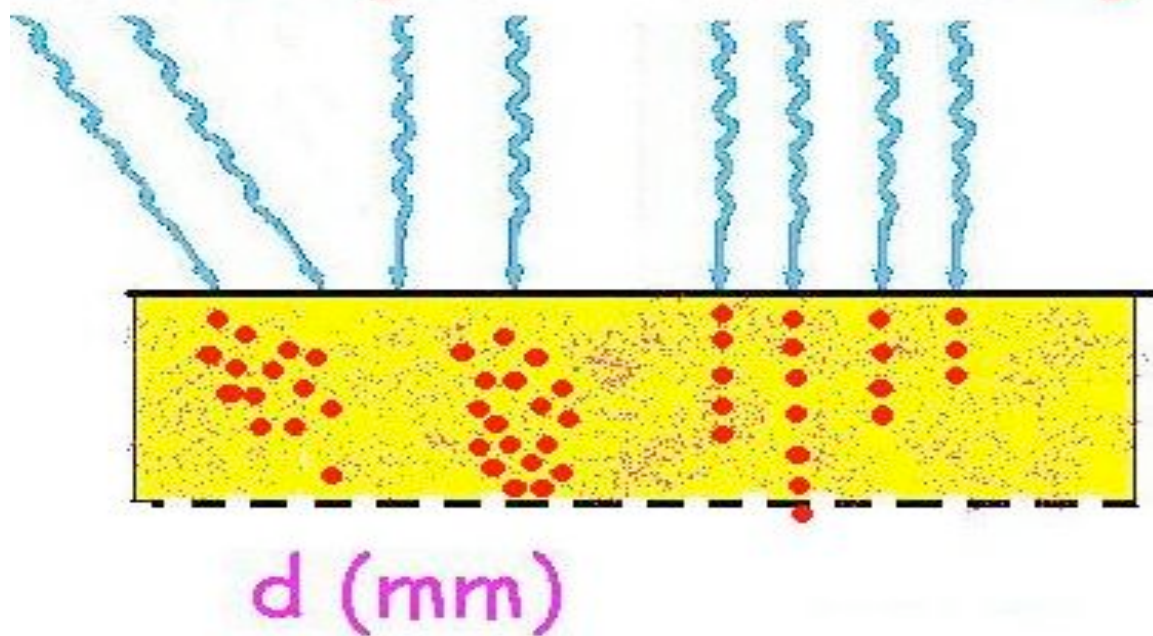
storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Perchè $H_p(d)$ è più idonea della dose o del kerma ai fini della prevenzione/limitazione degli effetti dannosi?

$H_p(d)$ tiene conto di:

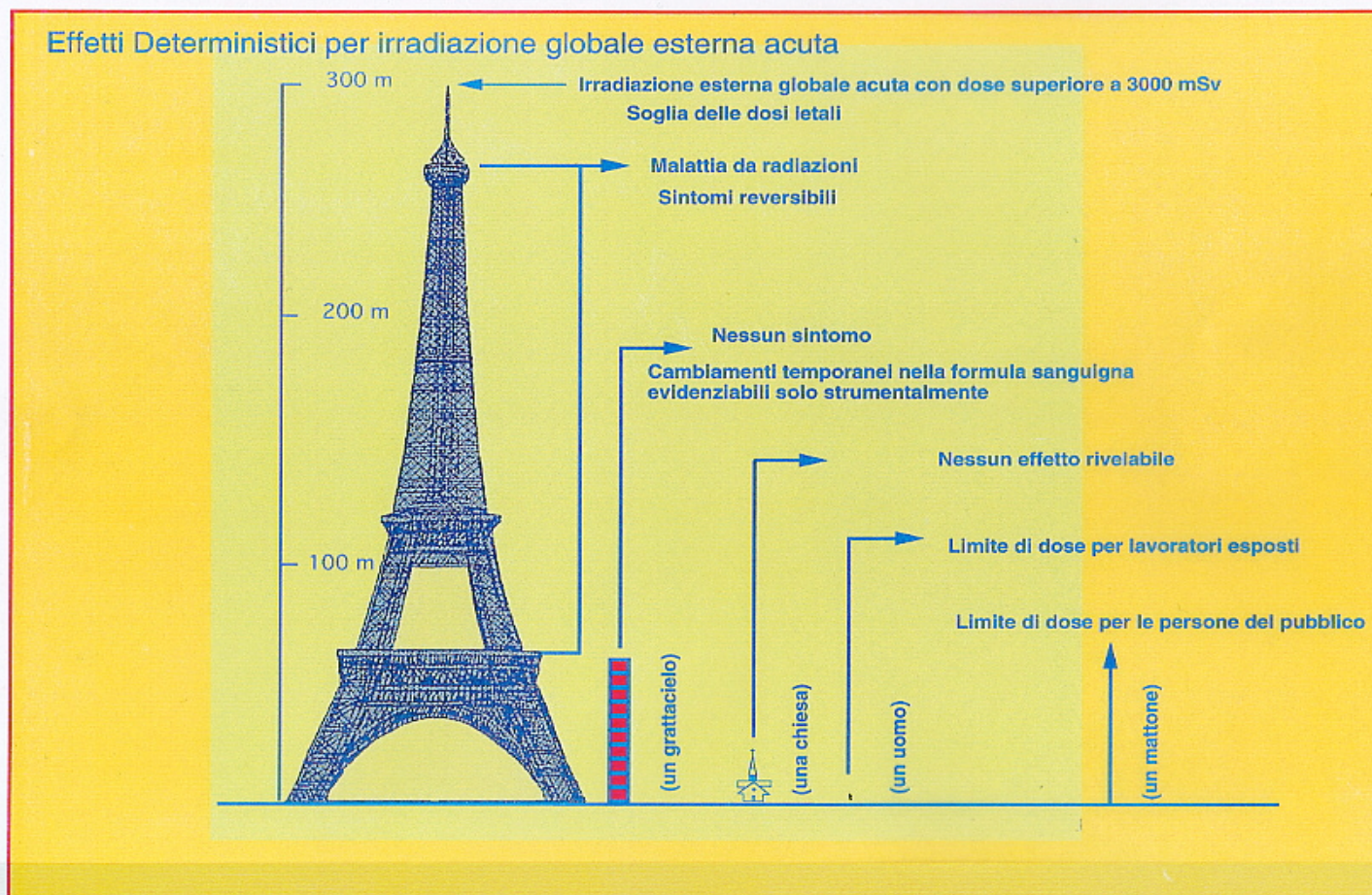
diversi angoli

diverse energie

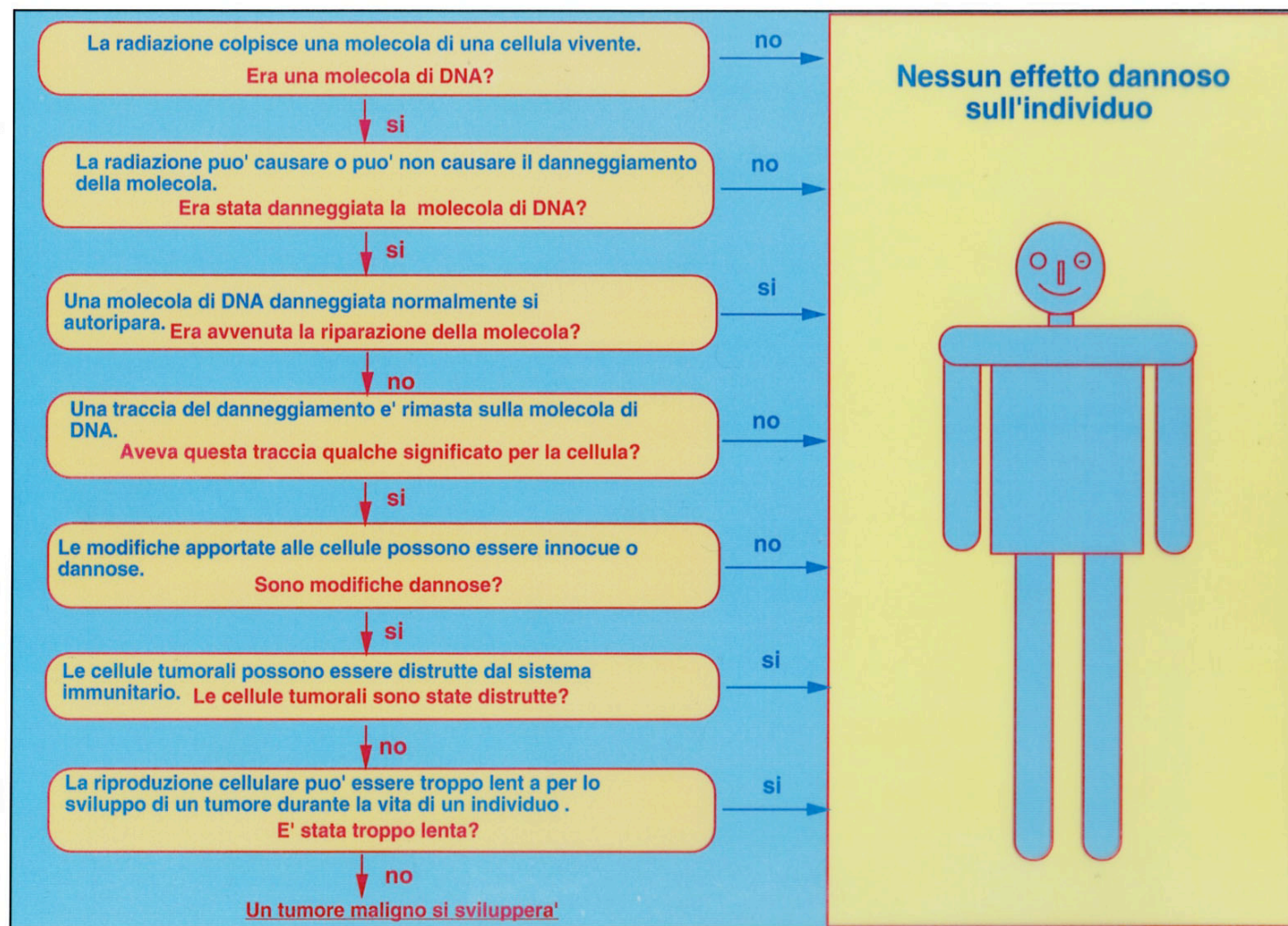


Alcuni dati per renderci conto dell'entità del rischio da radiazioni

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio



storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio



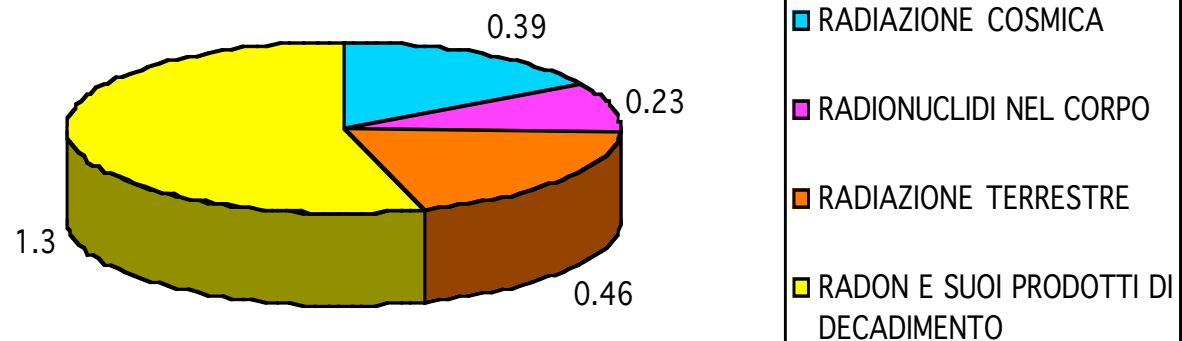
Esposizione naturale

Sorgente	IRRADIAZIONE		
	ESTERNA	INTERNA	TOTALE
Raggi cosmici			
Componente direttamente ionizzante	0.30		0.30
Neutroni	0.055		0.055
Radionuclidi cosmogenici		0.015	0.015
Radionuclidi primordiali			
K-40	0.15	0.18	0.33
Rb-87		0.006	0.006
U-238 (serie)	0.10	1.24	1.34
Th-232 (serie)	0.16	0.18	0.34
Totale	0.8	1.6	2.4

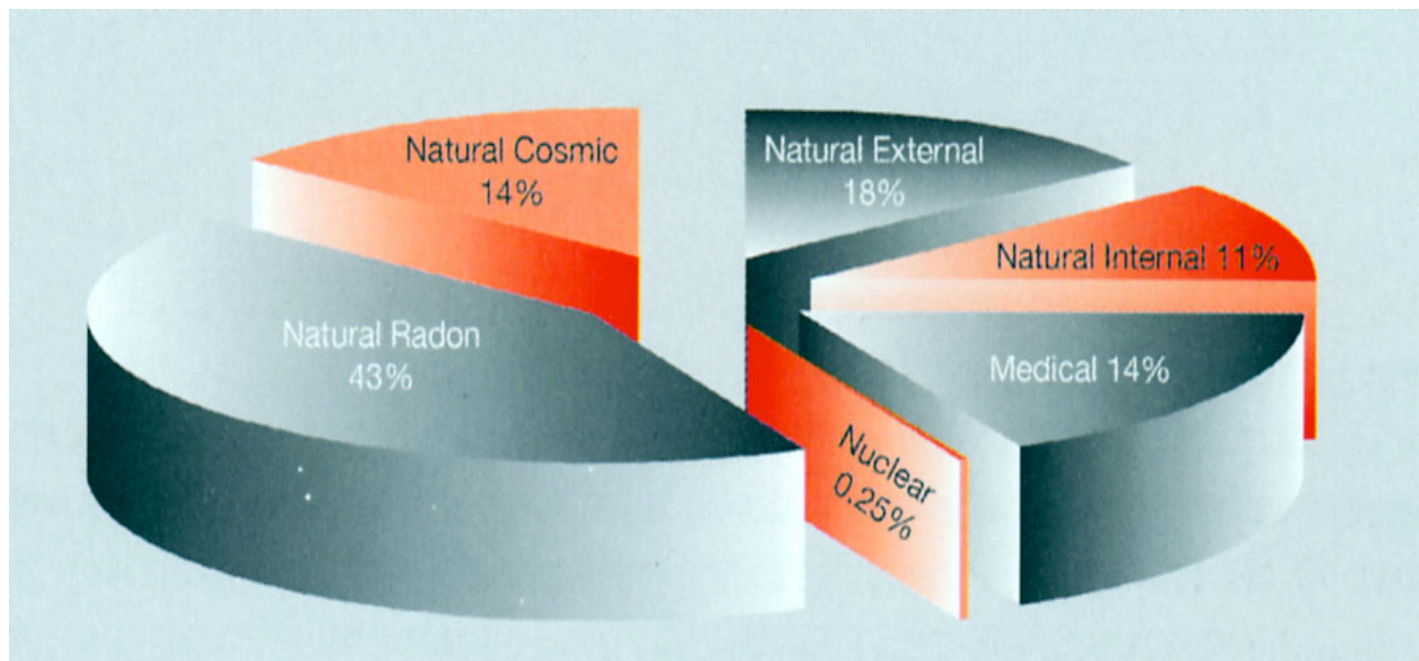
storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Esposizione naturale

DOSE EFFICACE ANNUALE ALLA POPOLAZIONE ADULTA
DOVUTA A RADIOATTIVITA' NATURALE (mSv)



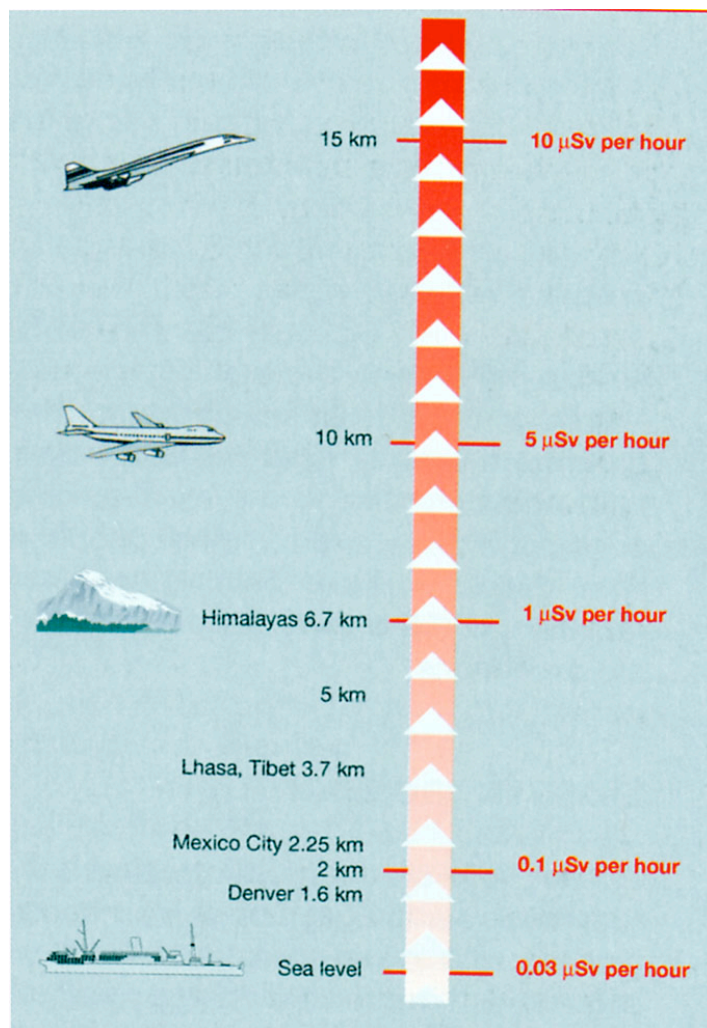
Esposizione del pubblico



storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Esposizione in quota e durante i voli aerei

storia
 natura
 energia
 attenuazione
 grandezze
 leggi
 effetti
 obiettivi R.P.
 principi R.P.
 limiti
 monitoraggio
rischio



Cities	Effective Dose (μSv)
Vancouver ➤ Honolulu	14.2
Frankfurt ➤ Dakar	16.0
Madrid ➤ Johannesburg	17.7
Madrid ➤ Santiago de Chile	27.5
Copenhagen ➤ Bangkok	30.2
Montreal ➤ London	47.8
Helsinki ➤ New York (JFK)	49.7
Frankfurt ➤ Fairbanks, Alaska	50.8
London ➤ Tokyo	67.0
Paris ➤ San Francisco	84.9

storia
natura
energia
attenuazione
grandezze
leggi
effetti
obiettivi R.P.
principi R.P.
limiti
monitoraggio
rischio

Esposizione durante gli esami clinici

<i>Examination</i>	<i>Conventional X ray dose (mSv)</i>	<i>Computed tomography dose (mSv)</i>
<i>Head</i>	0.07	2
<i>Teeth</i>	< 0.1	–
<i>Chest</i>	0.1	10
<i>Abdomen</i>	0.5	10
<i>Pelvis</i>	0.8	10
<i>Lower spine</i>	2	5
<i>Lower bowel</i>	6	–
<i>Limbs and joints</i>	0.06	--

storia
 natura
 energia
 attenuazione
 grandezze
 leggi
 effetti
 obiettivi R.P.
 principi R.P.
 limiti
 monitoraggio
rischio

Source	Dose (mSv)
<i>Artificial sources</i>	
<i>Nuclear industry</i>	
Uranium mining	4.5
Uranium milling	3.3
Enrichment	0.1
Fuel fabrication	1.0
Nuclear reactors	1.4
Reprocessing	1.5
<i>Medical uses</i>	
Radiology	0.5
Dentistry	0.06
Nuclear medicine	0.8
Radiotherapy	0.6
<i>Industrial sources</i>	
Irradiation	0.1
Radiography	1.6
Isotope production	1.9
Well-logging	0.4
Accelerators	0.8
Luminizing	0.4
<i>Natural sources</i>	
<i>Radon sources</i>	
Coal mines	0.7
Metal mines	2.7
Premises above ground (radon)	4.8
<i>Cosmic sources</i>	
Civil aircrew	3.0

storia

natura

energia

attenuazione

grandezze

leggi

effetti

obiettivi R.P.

principi R.P.

limiti

monitoraggio

rischio

Attività con ugual valore di rischio

Situazione	Causa di morte
Viaggiare 1000 Km in aereo	Incidente
Attraversare l'oceano	Tumore da raggi cosmici
Viaggiare per 90 Km in automobile	Incidente
Vivere 2 mesi in un edificio di tufo	Tumore da radioattività
Lavorare 10 giorni in una industria	Incidente
Lavorare 3 ore in una miniera	Incidente
Fumare da una a tre sigarette	Tumore, malattie cardiache e polmonari
Scalare una montagna per 15 minuti	Incidente
Vivere 20 minuti a 60 anni	Qualsiasi
Assorbire una dose di 0.10 mSv	Tumore da radioattività