

CORSO DI RADIOPROTEZIONE FISICA

Gli studenti sono pregati di considerare queste slides come indice dettagliato degli argomenti svolti a lezione e non come un libro di testo. Lo studio dei testi consigliati a lezione e' indispensabile per il superamento dell' esame.

RADIOATTIVITA'

Si veda il corso di Fisica delle Radiazioni

Alcuni radionuclidi di interesse medico

Biagini Cap. 2

Tabella 2-I. Radionuclidi prevalentemente impiegati nella brachiterapia dei tumori

Nome	Periodo fisico		Energia m
			dei fotoni (keV)
Proseodimio-103	7	giorni	21
Samario-145	340	giorni	41
Americio-241	432	anni	60
Itterbio-169	32	giorni	93
Iodio-125	60	giorni	27
Iridio-192	74	giorni	369
Cesio-137	30	anni	662

Tabella 2-II. Caratteristiche fisiche principali di radionuclidi impiegati per via interna

Radionuclide	Periodo fisico		Energia delle emissioni (KeV)	
			beta	gamma
Tritio-H3	12,26	a	18	—
Carbonio-14	5760	a	156,1	—
Iodio-123	13	h	—	158 (84%)
Iodio-125	60	d	4 (80%)	27 (rX)74%
Iodio-131	8,5	d	608 (87%)	364 (80%)
Tecnezio-99m	6	h	—	140 (99%)

Si veda Polvani pp 86-97

30. COMMONLY USED RADIOACTIVE SOURCES

Table 30.1. Revised November 1993 by E. Browne (LBNL).

Nuclide	Half-life	Type of decay	Particle Emission		Photon Emission	
			(MeV)	prob.	(MeV)	prob.
$^{22}_{11}\text{Na}$	2.603 y	β^+ , EC	0.545	90%	0.511 1.275	Annih. 100%
$^{54}_{25}\text{Mn}$	0.855 y	EC			0.835	100% Cr K x rays 26%
$^{55}_{26}\text{Fe}$	2.73 y	EC			Mn K x rays: 0.00590 0.00649	24.4% 2.86%
$^{57}_{27}\text{Co}$	0.744 y	EC			0.014 0.122 0.136	9% 86% 11% Fe K x rays 58%
$^{60}_{27}\text{Co}$	5.271 y	β^-	0.316	100%	1.173 1.333	100% 100%
$^{68}_{32}\text{Ge}$	0.742 y	EC			Ga K x rays	44%
$\rightarrow ^{68}_{31}\text{Ga}$		β^+ , EC	1.899	90%	0.511 1.077	Annih. 3%
$^{90}_{38}\text{Sr}$	28.5 y	β^-	0.546	100%		
$\rightarrow ^{90}_{39}\text{Y}$		β^-	2.283	100%		
$^{106}_{44}\text{Ru}$	1.020 y	β^-	0.039	100%		
$\rightarrow ^{106}_{45}\text{Rh}$		β^-	3.541	79%	0.512 0.622	21% 10%
$^{109}_{48}\text{Cd}$	1.267 y	EC	0.063 e^- 0.084 e^- 0.087 e^-	41% 45% 9%	0.088	3.6% Ag K x rays 100%
$^{113}_{50}\text{Sn}$	0.315 y	EC	0.364 e^- 0.388 e^-	29% 6%	0.392	65% In K x rays 97%
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30.2 y	β^-	0.514 e^- 1.176 e^-	94% 6%	0.662	85%
$^{133}_{56}\text{Ba}$	10.54 y	EC	0.045 e^- 0.075 e^-	50% 6%	0.081 0.356	34% 62% Cs K x rays 121%
$^{207}_{83}\text{Bi}$	31.8 y	EC	0.481 e^- 0.975 e^- 1.047 e^-	2% 7% 2%	0.569 1.063 1.770	98% 75% 7% Pb K x rays 78%
$^{228}_{90}\text{Th}$	1.912 y	6α : $3\beta^-$:	5.341 to 8.785 0.334 to 2.246		0.239 0.583 2.614	44% 31% 36%
$(\rightarrow ^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{220}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{216}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{212}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{212}_{84}\text{Po})$						
$^{241}_{95}\text{Am}$	432.7 y	α	5.443 5.486	13% 85%	0.060	36% Np L x rays 38%
$^{241}_{95}\text{Am/Be}$	432.2 y	6×10^{-5} neutrons (4–8 MeV) and 4×10^{-5} γ 's (4.43 MeV) per Am decay				
$^{244}_{96}\text{Cm}$	18.11 y	α	5.763 5.805	24% 76%		Pu L x rays \sim 9%
$^{252}_{98}\text{Cf}$	2.645 y α (97%)		6.076 6.118	15% 82%		
		Fission (3.1%)				
		\approx 20 γ 's/fission; 80% < 1 MeV				
		\approx 4 neutrons/fission; $\langle E_n \rangle = 2.14$ MeV				

"Emission probability" is the probability per decay of a given emission; because of cascades these may total more than 100%. Only principal emissions are listed. EC means electron capture, and e^- means monoenergetic internal conversion (Auger) electron. The intensity of 0.511 MeV e^+e^- annihilation photons depends upon the number of stopped positrons. Endpoint β^\pm energies are listed. In some cases when energies are closely spaced, the γ -ray values are approximate weighted averages. Radiation from short-lived daughter isotopes is included where relevant.

Half-lives, energies, and intensities are from E. Browne and R.B. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes* (John Wiley & Sons, New York, 1986), recent *Nuclear Data Sheets*, and *X-ray and Gamma-ray Standards for Detector Calibration*, IAEA-TECDOC-619 (1991).

Neutron data are from *Neutron Sources for Basic Physics and Applications* (Pergamon Press, 1983).

<http://pdg.lbl.gov/>

INTERAZIONI RADIAZIONE-MATERIA

Interazioni di particelle cariche pesanti

Interazioni di elettroni/positroni

Interazioni di fotoni

(vd corso di Fisica delle Radiazioni, qui sono mostrate solo alcune figure e tabelle)

Interazioni di neutroni

Figura 21.5

Rilascio di dose per varie radiazioni in funzione della profondità in acqua. Diversamente dai protoni, tutte le radiazioni γ /X e corpuscolari rilasciano la loro energia in modo decrescente a partire dalla superficie di ingresso. Gli elettroni raggiungono un massimo di dose rilasciata poco sotto la superficie. I protoni invece rilasciano la maggior parte dell'energia quando si trovano a fine percorso e posseggono una energia molto bassa (pico di Bragg). (SSD = Source Skin Distance, distanza sorgente-superficie irradiata)

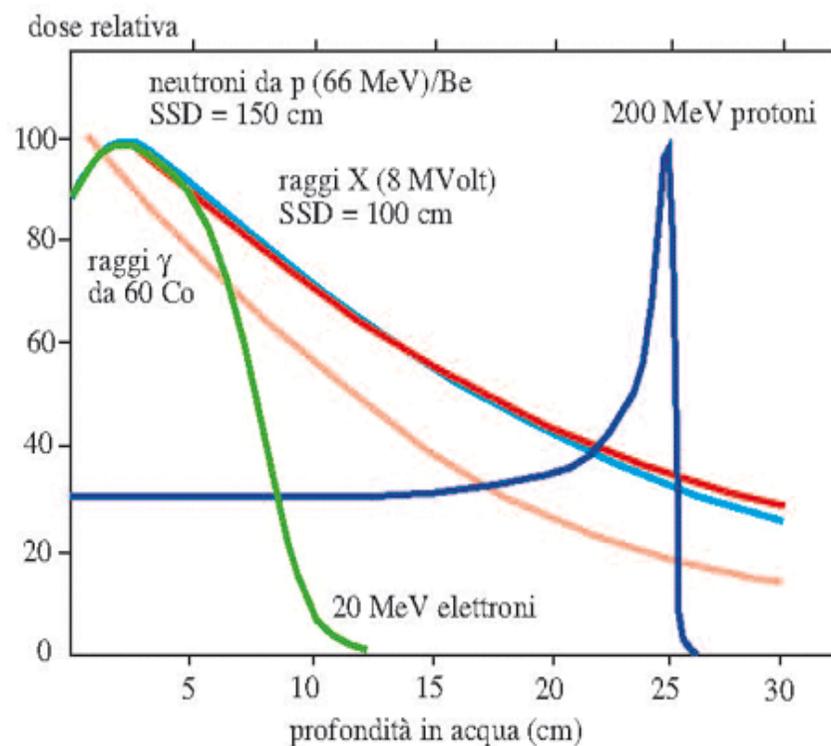
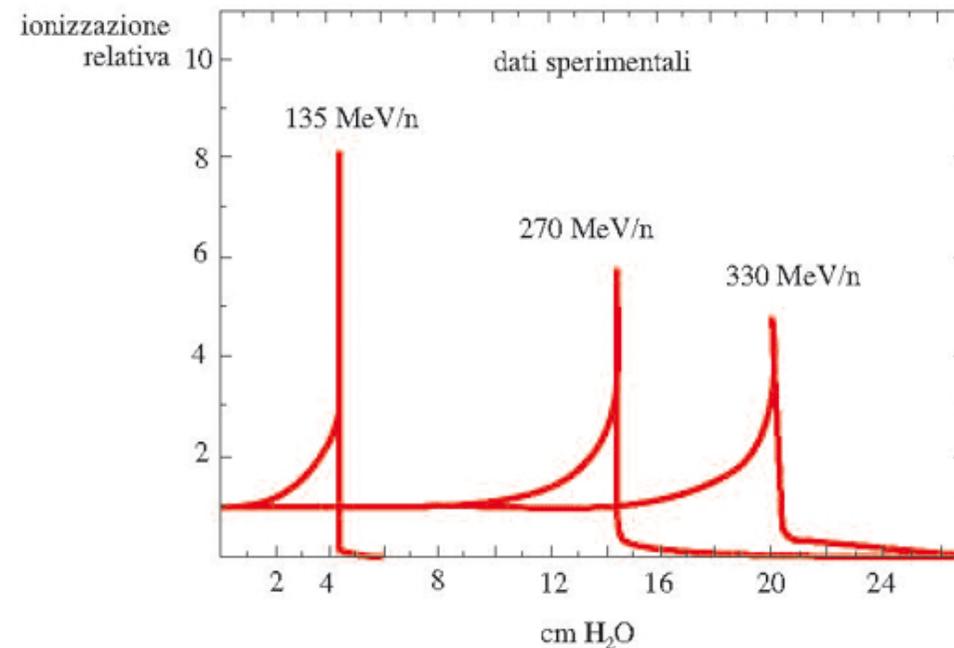


Figura 21.6

Rilascio della dose per ioni carbonio (^{12}C) a varie energie in funzione della profondità. L'energia viene data in MeV/nucleone: nel nucleo vi sono 6 protoni e 6 neutroni = 12 nucleoni, per cui l'energia di 330 MeV/n (sufficiente a percorrere 20 cm in acqua) corrisponde a 3960 MeV = 3.96 GeV per lo ione ^{12}C . Si osservi che oltre la fine percorso il rilascio di dose prosegue a causa della frammentazione del nucleo di carbonio: protoni, neutroni e alfa proseguono per via della disintegrazione conseguente all'urto finale del ^{12}C con un nucleo degli atomi componenti l'acqua. Nei piani di trattamento in radioterapia (§21.6b) è indispensabile tenere conto della frammentazione che provoca danni al tessuto sano oltre il tumore.



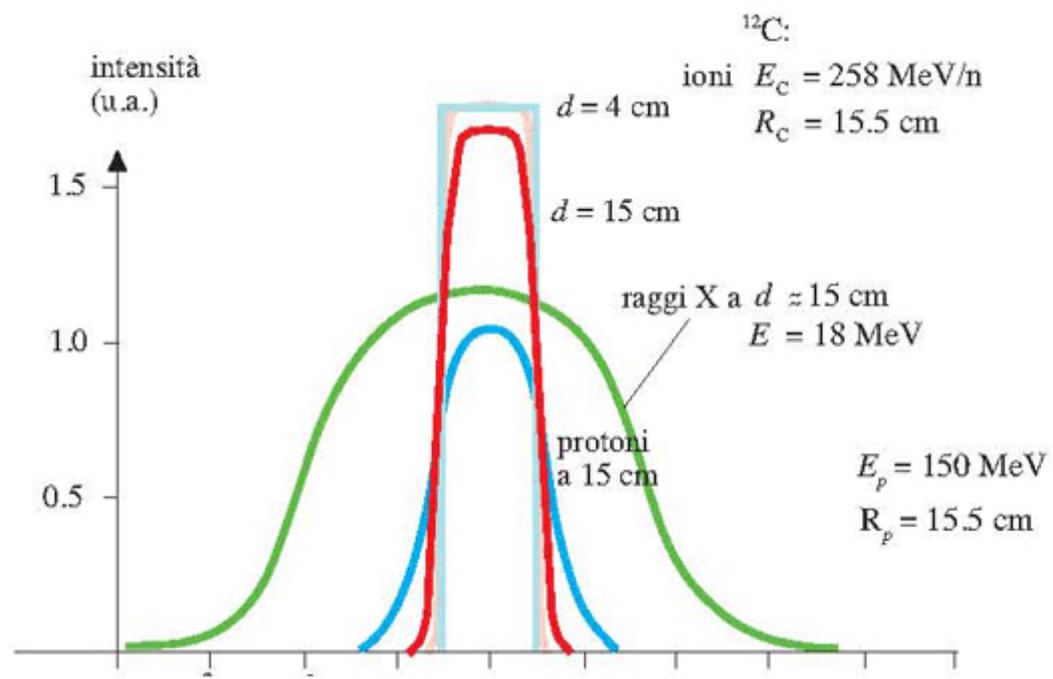


Figura 21.7

Larghezza del fascio (inizialmente all'ingresso in acqua largo 1 cm, colore azzurro) a varie profondità: per lo ione ^{12}C alle profondità di 4 cm e 15 cm. Quest'ultima è in prossimità della fine percorso $R_c = 15.5\text{ cm}$. Alla stessa profondità i protoni da 150 MeV (curva blu), con la stessa larghezza di fascio iniziale, si allargano poco più degli ioni ^{12}C , mentre i raggi γ/X da 18 MeV si allargano in quello che è chiamato lo sciame elettromagnetico (curva verde). Come si vede, protoni e ioni restano collimati nel penetrare la materia, al contrario di elettroni e raggi X.



INTERAZIONI DI PARTICELLE CARICHE PESANTI: DOSE VS PROFONDITA'

PARTICELLE PESANTI

47

Biagini p 47

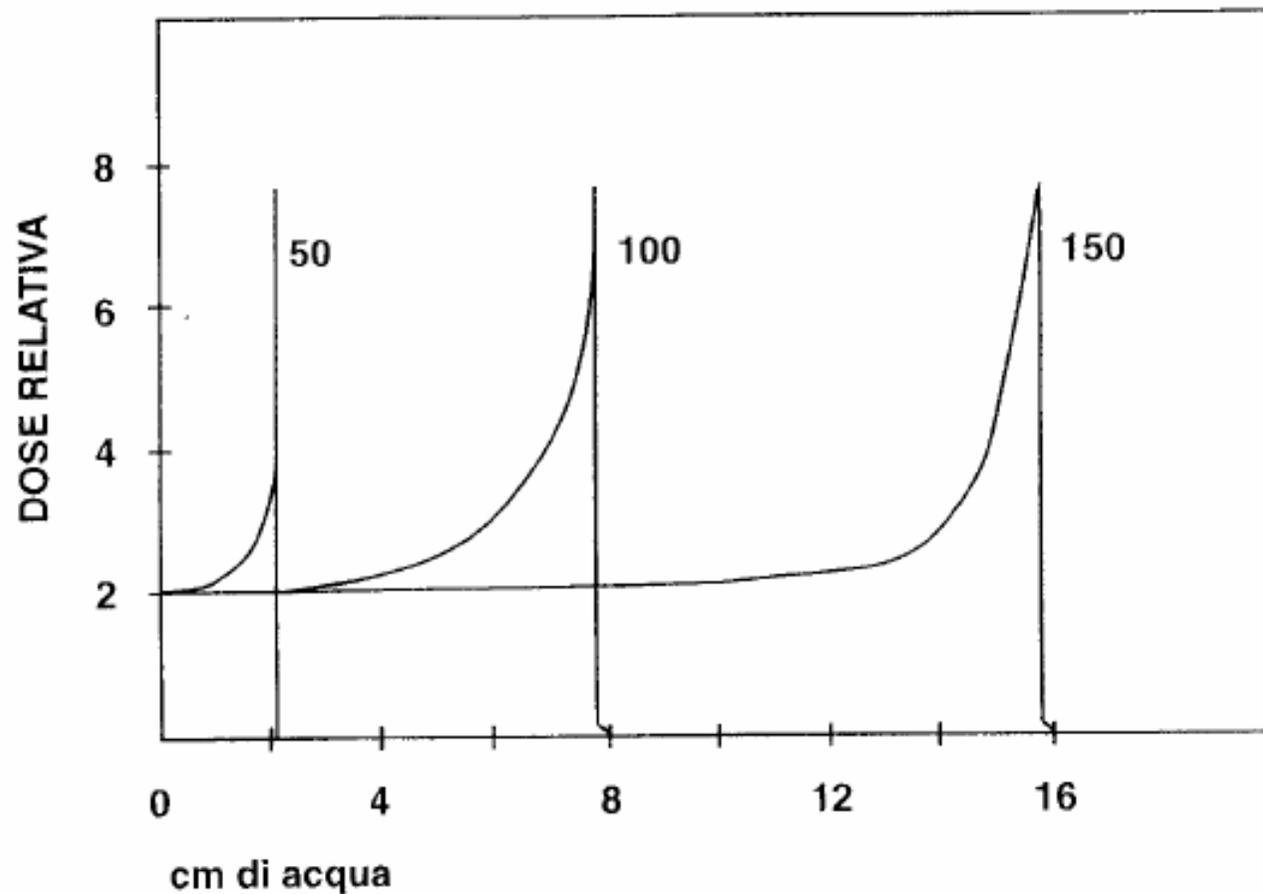


Figura 2.2. Andamento della dose relativa, in funzione dello spessore in cm di acqua, per protoni di 50, 100 e 150 MeV, con formazione del "picco di Bragg". Il picco è molto acuto ed è troppo stretto per le applicazioni cliniche, per cui deve essere allargato mediante l'impiego di filtri di picco o "ridge filters" (ridis, da AMALDI e SILARI, 1994).

INTERAZIONI DI PARTICELLE CARICHE PESANTI: RANGE PER PROTONI

22

2 - LE INTERAZIONI DELLE RADIAZIONI DIRETTAMENTE IONIZZANTI CON LA MATERIA

Tab. 2.III. Percorso dei protoni in vari materiali ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) (dati tratti da Bi69 e Mo67).

Pelliccioni p 22

<i>Energia (MeV)</i>	<i>Be</i>	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Acqua</i>	<i>Tessuto molle</i>
1	0.0029	0.0039	0.0042	0.0061	0.0116	0.0039	0.000
2	0.0089	0.0096	0.0117	0.0165	0.0314	0.0089	0.005
3	0.0177	0.0180	0.0223	0.0307	0.0565	0.0161	0.012
4	0.0292	0.0287	0.0358	0.0484	0.0866	0.0255	0.022
5	0.0432	0.0417	0.0521	0.0694	0.1213	0.0369	0.034
6	0.0595	0.0569	0.0709	0.0934	0.1603	0.0502	0.047
7	0.0782	0.0742	0.0922	0.1205	0.2035	0.0653	0.063
8	0.0992	0.0937	0.1160	0.1504	0.2508	0.0824	0.080
9	0.1225	0.1152	0.1421	0.1831	0.3019	0.1012	0.100
10	0.1479	0.1386	0.1706	0.2186	0.3568	0.1217	0.121
15	0.3067	0.2849	0.3463	0.4351	0.6851	0.2500	0.254
20	0.5160	0.4771	0.5748	0.7135	1.0974	0.4187	0.428
25	0.7731	0.7129	0.8533	1.0499	1.5880	0.6258	0.643
30	1.0760	0.9904	1.1795	1.4418	2.1529	0.8696	0.895
35	1.4231	1.3081	1.5516	1.8867	2.7885	1.1489	1.185
40	1.8129	1.6646	1.9679	2.3827	3.4922	1.4625	1.510
45	2.2441	2.0588	2.4271	2.9282	4.2615	1.8092	-1.869
50	2.7156	2.4896	2.9278	3.5216	5.0943	2.1883	2.262
100	9.440	8.623	10.004	11.832	16.548	7.592	7.865
150	19.332	17.622	20.315	23.840	32.833	15.527	16.095
200	31.821	28.994	33.294	38.888	53.063	25.562	26.502
250	46.531	42.370	48.520	56.489	76.578	37.371	38.747
300	63.129	57.455	65.657	76.253	102.877	50.693	52.562
350	81.352	74.010	84.434	97.868	131.548	65.318	67.726
400	100.980	91.837	104.626	121.075	162.249	81.070	84.060

INTERAZIONI DI FOTONI: DOSE VS PROFONDITA'

44

BASI BIOFISICHE DELLA RADIOBIOLOGIA E DELLA RADIOPROTEZIONE

Biagini p 44

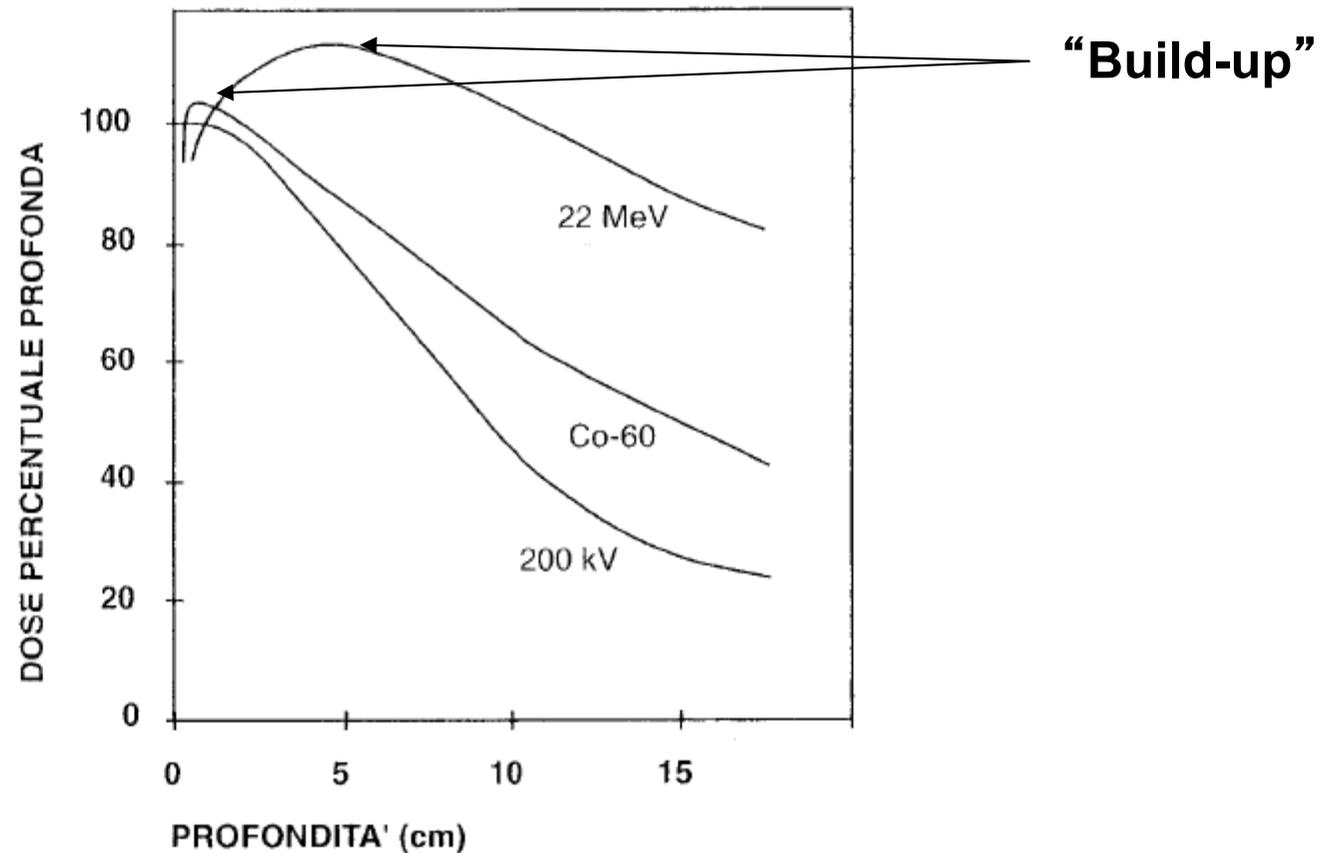


Figura 2.1. Curve di transizione o espressioni grafiche dell'andamento in mezzo omogeneo di densità media, equivalente a quella delle parti molli del corpo umano, della dose percentuale profonda in funzione dello spessore o profondità, in cm. Raggi X di energia di 200 kV_m, fotoni del cobalto-60, con l'andamento medio per le due emissioni di 1,15 e 1,33 MV e fotoni prodotti da acceleratori lineari con energia di 22 MV. A cominciare dalle radiazioni del cobalto-60, verso le energie più elevate, è evidente il fenomeno dell'incremento della dose all'apice della curva si transizione o "build up".

INTERAZIONI DI ELETTRONI: LUNGHEZZA DI RADIAZIONE ED ENERGIA CRITICA

Pelliccioni p 42

Tab. 2.X. Lunghezza di radiazione (X_0) ed energia critica (ϵ_c) per alcuni elementi (dati tratti da Do64).

Elemento	X_0 ($g \cdot cm^{-2}$)	ϵ_c (MeV)	
		$\delta = 0$	$\delta > 0$
H	62.8	350	
He	93.1	250	
C	43.3	96	79
N	38.6	85	
O	34.6	75	
Na	28.2	55.5	46.5
Al	24.3	47	40
Si	22.2	44	37.5
Ar	19.7	34	
Ca	16.3	30.4	26.7
Fe	13.9	23.3	20.7
Cu	13.0	20.9	18.8
W	6.8	8.3	8.08
Pb	6.4	7.5	7.4

Tab. 2.XI. Lunghezza di radiazione (X_0) e energia critica (ϵ_c) per alcune sostanze composte (dati tratti da Do64).

Sostanza	X_0 ($g \cdot cm^{-2}$)	ϵ_c (MeV)	
		$\delta = 0$	$\delta > 0$
Aria	37.1	81	
Acqua	36.4	90.0	73.0
Polistirene (C_8H_8)	44.4	110	88.0
Argilla ($Al_2SO_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)	28.8	60.9	50.6
Quarzo (SiO_2)	27.4	56.2	47.3
Calcere ($CaCO_3$)	24.2	51.2	43.4

INTERAZIONI DI NEUTRONI

Greening cap 2.4, Pelliccioni capp. 3.9-3.12

I neutroni interagiscono con i nuclei – sono sensibili solo all'interazione forte, non quella elettromagnetica.

- **Collisioni elastiche**: il nucleo emerge intatto dalla collisione. L'energia trasferita al nucleo aumenta al diminuire della massa del nucleo – massima per H. Per questo si usano materiali idrogenati per schermature (paraffina, polietilene, acqua) “moderatori”

La sezione d'urto per la reazione $n+{}^1\text{H} \rightarrow n+{}^1\text{H}$ (indicata anche ${}^1\text{H}(n,n){}^1\text{H}$) domina per $E_n < \text{ca } 1\text{-}2 \text{ MeV}$

- **Collisioni “inelastiche”**: il nucleo assorbe il neutrone incidente per un breve periodo, poi lo riemette con energia inferiore e rimane in uno stato eccitato. Si diseccita emettendo un gamma.

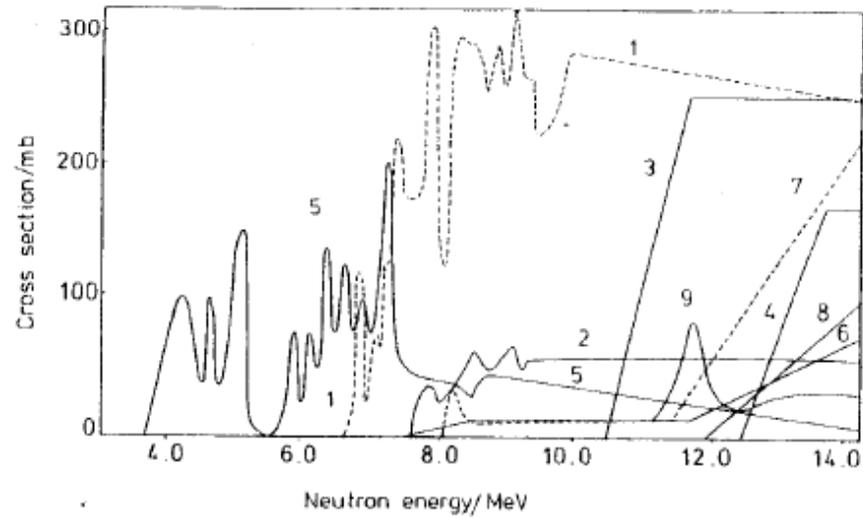
Es. ${}^{16}\text{O}(n,n){}^{16}\text{O}^*$ con ${}^{16}\text{O}^*$ che si diseccita emettendo un gamma da 6.1 MeV

- **Collisioni “non-elastiche”**: la particella che emerge dall'interazione non e' piu' un n
Es.: ${}^{16}\text{O}(n,\alpha){}^{13}\text{C}$

Collisioni inelastiche e non-elastiche in materiali di rilevanza biologica (H,C,O) hanno sezioni d'urto significative per $E_n > 4\text{-}12 \text{ MeV}$

INTERAZIONI DI NEUTRONI

Sezione d'urto inelastica e non-elastica per ^{16}O



Curve		E_{γ}/MeV
1	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	6.1
2	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	7.0
3	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	3.8
4	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$	4.8
5	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$	
6	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}^*$	3.1
7	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}^*$	3.8
8	$^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}^*$	7.0
9	$^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$	

Figure 2.10 Inelastic and nonelastic cross sections for ^{16}O for the neutron energy range 3–14 MeV (from Auxier *et al* 1968).

INTERAZIONI DI NEUTRONI

- **Processi di cattura:** neutroni “termici” (E circa 0.025 eV, ossia in equilibrio termico con la materia) possono essere catturati da un nucleo.

La sezione d'urto σ è inversamente proporzionale alla velocità

Es ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ dove il γ ha un'energia di 2.2 MeV
 ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ dove il p ha un'energia di 0.6 MeV
 ${}^{10}\text{Be}(n,\alpha){}^7\text{Li}$
 ${}^{112}\text{Cd}(n,\gamma){}^{113}\text{Cd}$ – importante nei reattori; sezione d'urto elevata per $E_n=0.3-0.4$ eV

- **Spallazione:** il neutrone determina la frammentazione del nucleo; dall'interazione emergono molte particelle e frammenti di nucleo.

La sezione d'urto σ è significativa solo per $E_n > 20$ MeV

- **Fissione:** il nucleo bersaglio si spacca in due frammenti di massa circa uguale, emettendo uno o più neutroni. Avviene con n termici in ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{233}\text{U}$.
Avviene con n veloci con diversi nuclidi pesanti.

INTERAZIONI DI NEUTRONI

- Primo passo per la deposizione di energia nel tessuto da parte di n: trasferimento di energia a particelle cariche

- Per $100 \text{ eV} < E_n < 20 \text{ MeV}$, la reazione piu' importante e' la diffusione elastica su H

Il protone di rinculo per un n di 20 MeV ha energia $< 10 \text{ MeV}$ e range $< 1.2 \text{ mm}$ in acqua.

- Solo per $E_n > 10 \text{ MeV}$ sono importanti i processi inelastici e non-elastici

Se il volume e' grande, i neutroni vengono termalizzati (ossia la loro energia ridotta a quella "termica") da molteplici successive collisioni e poi catturati da $^{14}\text{N}(n,p) ^{14}\text{C}$

2.4.7 Relative importance of neutron interaction processes in H, C, N and O

The first step in the deposition of neutron energy in matter is the transfer of neutron energy to the kinetic energy of charged particles. For this

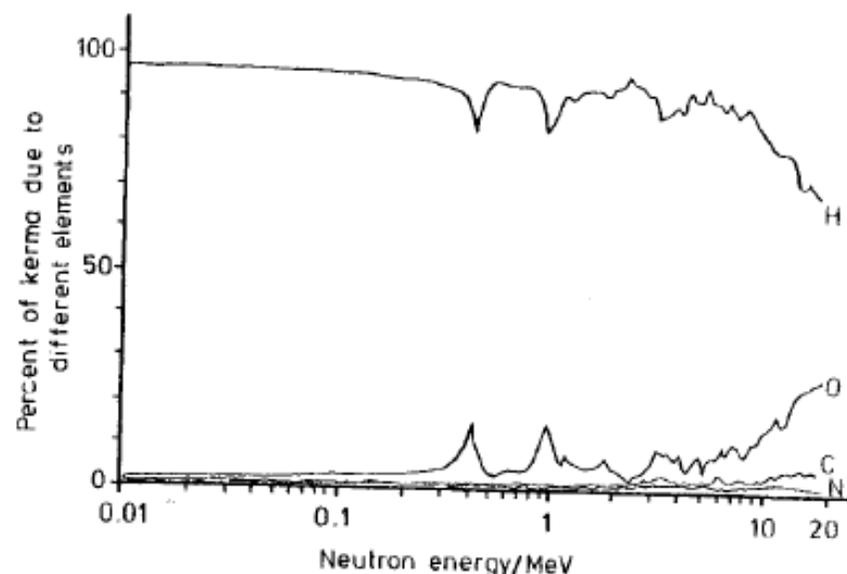


Figure 2.11 Relative contribution from interaction processes with different elements to kerma in soft tissue (R S Caswell and J J Coyne private communication).

Capacita' di penetrazione delle radiazioni nei tessuti

Polvani pp 50-57

Tessuti molli considerati in prima approssimazione come acqua

Tessuti aereati: acqua e aria

Osso: acqua e fosfato tricalcico

PARTICELLE ALFA (da decadimento radioattivo, energia dell' ordine del MeV)

Capacita' di penetrazione molto modesta:

-Arrestate in meno di 10 cm in aria o da un foglio di carta

-Solo per energie >7 MeV raggiungono 70 micron di profondita' nella pelle (strato germinativo della cute, determinando arrossamento/eritema)

ELETTRONI/POSITRONI

-A energia di 1 MeV percorso in aria < 4 m e in acqua < 4 mm

-Occorrono 70 keV per raggiungere la profondita' di 70 micron nella cute (strato germinativo)

energia (MeV)	Percorso max in mm di acqua
0.1	0.15
0.5	1.5
1.0	4
3.0	15

Capacita' di penetrazione delle radiazioni nei tessuti

Esempi:

- Sommersione in atmosfera contenente ^3H gassoso (beta, energia max di 18.6 keV) non da' dose allo strato germinativo della cute
- Sommersione in atmosfera con $^3\text{H}_2\text{O}$ (vapore d' acqua tritiata) puo' dare irradiazione esterna alla cute perche' il vapore d' acqua penetra nella cute (ma il problema qui e' l' incorporazione e l' irradiazione interna conseguente)
- Sommersione in atmosfera con $^{14}\text{CO}_2$ (^{14}C emette beta con energia max di 160 keV) Da' dose alla cute con gli elettroni di energia maggiore di 70 keV (circa la meta' di quelle emesse)
- Sommersione in atmosfera di ^{85}Kr (beta con energia max di 670 keV) da' significativa dose alla cute

La dose assorbita max si trova a profondita' via via maggiori man mano che si considerano elettroni di energia crescente. Fino a 4 MeV l' energia assorbita max si trova a profondita' < 1 cm in acqua o tessuti molli.

Capacita' di penetrazione delle radiazioni nei tessuti

FOTONI (raggi X, gamma)

Capacita' di penetrazione modesta per fotoni di bassa energia ("mollini"), cresce al crescere dell' energia (fotoni "duri")

Vale la legge $I=I_0 e^{-\mu x}$ μ dipende dall' energia dei fotoni, dalla densita' e dal numero atomico del materiale attraversato.

Si definisce lo STRATO EMIVALENTE (SEV): spessore del materiale considerato che riduce a meta' il rateo di esposizione o di dose assorbita del fascio incidente

MeV	acqua		cemento		piombo	
	cm	g/cm2	cm	g/cm2	cm	g/cm2
0.1	4	4	2	5	0.01	0.11
0.5	7	7	3.5	8	0.4	4.5
1.0	10	10	4.5	11	0.9	10
3.0	18	18	9	22	1.6	18

Pb e' conveniente (in g/cm2) con fotoni molli. Per fotoni duri, barriere in cemento sono convenienti (salvo il minore ingombro in cm del Pb)

Capacita' di penetrazione delle radiazioni nei tessuti

Capacita' di penetrazione dei fotoni nei tessuti (cf tabella precedente per acqua)

- Il numero di fotoni di 100 keV che raggiungono 4 cm di profondita' (visceri, organi interni) e' la meta' dei fotoni incidenti
- Fotoni da 1 MeV danno un "bagno" quasi uniforme a tutti gli organi del torace e dell' addome se la sorgente ruota intorno al corpo

Capacita' di penetrazione delle radiazioni nei tessuti

- I raggi X generati da un tubo a raggi X sono “policromatici”, ossia con diverse energie (spettro continuo + righe caratteristiche), con energia max pari a $e\Delta V$, ed energia media pari a $1/2 - 2/3$ di quella max

Per i raggi X la filtrazione/schermatura comportano un “indurimento” del fascio: il fascio emergente ha lo spettro dominato dalle componenti piu' energetiche.

→ il secondo SEV e' piu' spesso del primo SEV

Raggi X di 120 kV di picco hanno primo SEV di ca 3 cm di acqua

- Radiazione X monocromatica, una volta penetrata in un mezzo assorbente, da' luogo a fotoni secondari di energia piu' bassa, generando uno spettro continuo
→ Radiazione policromatica in media meno “dura” della radiazione monocromatica incidente.

Capacita' di penetrazione delle radiazioni nei tessuti

- Polvani, Fig 1, p 55: andamento della dose da fotoni nei primi strati cutanei:
 - (i) la dose dovuta alla radiazione primaria decresce esponenzialmente con la profondita'
 - (ii) la dose dovuta alla radiazione secondaria (fotoni e elettroni) dapprima cresce e poi decresce esponenzialmente

La dose max si ha per profondita' crescente all' aumentare dell' energia dei fotoni.

- A 1 MeV il max si trova al di sotto dello strato germinativo della cute
- A 2 MeV il max si trova a ca 1 cm di profondita'
- Per raggi X di 200 keV (picco), massimo in corrispondenza dello strato germinativo
- Per raggi gamma e.g. da ^{60}Co (ca 1.2 MeV) o da acceleratori: queste radiazioni "risparmiano" la cute ma danno dosi elevate a profondita' maggiori – questo e' alla base della radioterapia.

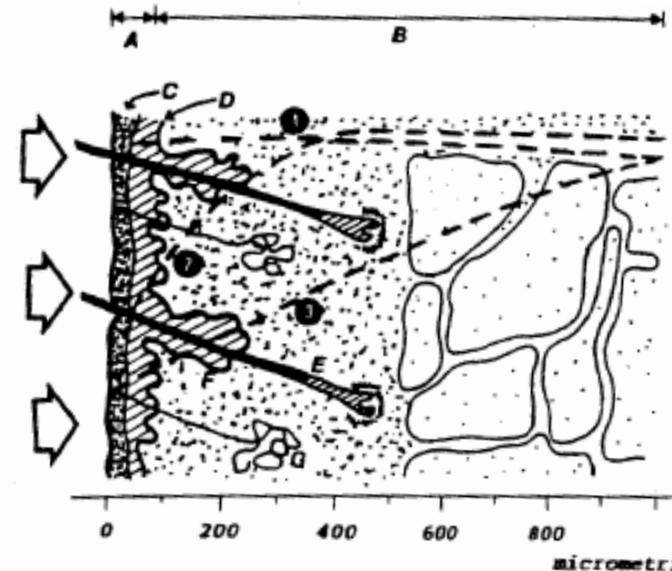


Figura 1. Uomo: cute dell'avambraccio; epidermide (A) e derma (B). Strato corneo (C), strato germinativo (D), peli (E), ghiandole sebacee (F), ghiandole sudoripare (G). Andamento della dose nella cute, a seconda dell'energia dei fotoni incidenti, fatta uguale a 100 la dose massima riscontrabile entro i tessuti per ogni energia dei fotoni: 1, raggi X di 200 kV di energia massima; 2, raggi gamma del ^{60}Co ; 3, fotoni di energia massima di 8 MV.

Capacita' di penetrazione delle radiazioni nei tessuti

NEUTRONI VELOCI (10 keV- 10 MeV)

Meccanismo principale di interazione: diffusione elastica su nuclei di idrogeno

La dose assorbita e' dovuta alle ionizzazioni causate dai nuclei di idrogeno che rinculano.

Si puo' usare il concetto di SEV: In acqua, SEV = 14 cm circa per neutroni di 10 MeV

SEV = 3 cm circa per neutroni di 1 MeV

NEUTRONI DI FISSIONE (distribuzione continua con max per ca 1 MeV)

Situazione complicata: la penetrazione varia con l' energia dei neutroni

In acqua, SEV = 7 cm circa

NEUTRONI LENTI (< 0.5 eV)

Il grosso della dose dovuto a cattura neutronica

$n+H \rightarrow D+\text{gamma}$ [$H(n,\text{gamma})D$] con energia del gamma ca 2.2 MeV

$n+^{14}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{C}+p$ [$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$] con energia del protone ca 0.6 MeV

Neutroni termici in acqua: SEV di alcuni cm

Verso la dosimetria

Polvani pp 15-48

Grandezze di campo

- **FLUENZA**

$$\Phi = \Delta N / \Delta A \text{ (particelle/m}^2\text{)}$$

- **INTENSITA' (o RATEO) di FLUENZA**

$$\phi = \Delta \Phi / \Delta t = \Delta N / (\Delta A \Delta t) \text{ (particelle/(m}^2\text{s))}$$

- **FLUENZA DI ENERGIA**

$$\psi = \Delta R / \Delta A \text{ (J/m}^2\text{)} \quad \Delta R = \text{energia irradiata} + \text{somma energie di tutte le particelle attraverso } \Delta A$$

- **INTENSITA' (o RATEO) di FLUENZA DI ENERGIA o DENSITA' di FLUENZA di ENERGIA**

$$\Psi = \Delta \phi / \Delta t = \Delta \psi / \Delta t = \Delta R / (\Delta A \Delta t) \text{ (J/(m}^2\text{s)} = \text{W/m}^2\text{)}$$

Grandezze caratteristiche delle interazioni tra radiazioni e materia

- **PARTICELLE DIRETTAMENTE IONIZZANTI:**

- Potere frenante $\Delta E/\Delta l$

- LET (raggi delta)

- Energia media necessaria per creare una coppia di ioni:

$$W=E/N$$

E=energia cinetica di una particella carica che si arresta in un mezzo

N=numero di coppie di ioni creati

	e	p	alfa (1 MeV)	alfa(10 MeV)
Aria	34 eV			
Tessuto equivalente	29 eV	31 eV	33 eV	31 eV

Grandezze dosimetriche

- **Grandezze stocastiche:**

i processi di cessione di energia sono discreti e le grandezze usate per descriverli sono quindi soggette a fluttuazioni statistiche, in particolare quando si trattano elementi di materia di piccole dimensioni, o piccolo numero di particelle → grandezze fisiche definite in termini statistici (“stocastiche”) che quindi variano nel tempo e nello spazio in maniera discreta.

Per es energia depositata in un certo volume.

I valori medi di queste grandezze sono non-stocastiche (funzioni continue di spazio e tempo).

Grandezze dosimetriche relative al deposito di energia

• ENERGIA CEDUTA IN UN CERTO VOLUME

$$\varepsilon = R_{in} - R_{out} + \Sigma Q$$

R_{in} = energia incidente nel volume

R_{out} = energia uscente dal volume

ΣQ = (somma di tutte le energie liberate) –
(somma di tutte le energie consumate) nelle
eventuali reazioni nucleari avvenute

E' una grandezza stocastica, ma il suo valore medio non lo e' .
Nel seguito ε indica il valore medio.

• DOSE ASSORBITA

$$D = \Delta\varepsilon / \Delta m$$

$$[D] = \text{J/kg} = \text{Gray (Gy)} = 100 \text{ rad}$$

• INTENSITA' (o RATEO) DI DOSE ASSORBITA

$$\Delta D / \Delta t$$

$$[\Delta D / \Delta t] = \text{Gy/s} = 100 \text{ rad/s}$$

Grandezze dosimetriche relative al trasferimento di energia

- **KERMA (“Kinetic Energy Released per Unit Mass”)**

Fotoni e neutroni perdono energia in due stadi:

- (i) Energia viene ceduta alle particelle secondarie sotto forma di energia cinetica
- (ii) Le particelle secondarie rilasciano energia alla materia

Il kerma quantifica (i)

$$K = \Delta E_{tr} / \Delta m$$

ΔE_{tr} e' la somma delle energie cinetiche iniziali di tutte le particelle cariche prodotte da particelle indirettamente ionizzanti in un volume di massa Δm

$$[K] = \text{Gy}$$

NB Kerma e fluenza sono legate: $K = (\mu_{tr} / \rho) \Psi$

In condizioni di equilibrio di radiazione (vd oltre) $K = D$

- **INTENSITA' (o RATEO) DI KERMA**

$$\Delta K / \Delta t$$

$$[\Delta K / \Delta t] = \text{Gy/s}$$

Grandezze dosimetriche relative al trasferimento di energia

- **ESPOSIZIONE**

Descrive la capacità della radiazione elettromagnetica di produrre ionizzazione in aria

$$X = \Delta Q / \Delta m$$

ΔQ = valore assoluto della carica totale degli ioni di un segno prodotti in aria quando tutti gli elettroni e positroni liberati dai fotoni nell'elemento di volume di massa Δm sono completamente fermati in aria (e' esclusa la ionizzazione prodotta dall'assorbimento di radiazione di frenamento emessa dagli elettroni secondari liberati nel volume d'interesse)

$$[X] = \text{C/kg}; \quad \text{Roentgen: } 1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

- **Unit of exposure**, A measure of photon fluence at a certain point in space integrated over time, in terms of ion charge of either sign produced by secondary electrons in a small volume of air about the point:

$$= 1 \text{ C kg}^{-1} \text{ of air (roentgen; } 1 \text{ R} = 1 \text{ esu cm}^{-3} \text{ in air} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1})$$

Implicit in the definition is the assumption that the small test volume is embedded in a sufficiently large uniformly irradiated volume that the number of secondary electrons entering the volume equals the number leaving (so-called charged particle equilibrium).

This unit is somewhat historical, but appears on many measuring instruments.

- **INTENSITA' (o RATEO) DI ESPOSIZIONE**

$$\Delta X / \Delta t$$

$$[\Delta X / \Delta t] = \text{A/kg}; \quad \text{R/s}$$

Grandezze dosimetriche relative al trasferimento di energia

- **ESPOSIZIONE vs DOSE ASSORBITA**

$X = \Delta Q / \Delta m = e \Delta N / \Delta m$ con ΔN numero di coppie di ioni con carica e prodotti dai fotoni primari

$D = \Delta \varepsilon / \Delta m = (\Delta N W) / \Delta m$ con W energia media per creare una coppia di ioni

$$\rightarrow D = (W/e)X$$

NB questa relazione vale solo in condizioni di **equilibrio di particelle cariche**, quando:

L'energia persa al di fuori di un piccolo volume sferico da particelle secondarie cariche in esso prodotte e' uguale all'energia persa al suo interno da particelle secondarie cariche prodotte al di fuori.

In questo caso vale anche **D=K**

Grandezze dosimetriche relative al trasferimento di energia

- **RELAZIONE TRA ATTIVITA' DI UNA SORGENTE PUNTIFORME E INTENSITA' DI ESPOSIZIONE A UNA DATA DISTANZA**

$\Gamma = (I^2/A) \Delta X/\Delta t$ dove I e' la distanza dalla sorgente e X e' l'esposizione e A l'attività

ossia: $\Delta X/\Delta t = \Gamma (A/I^2)$

Tabella 1, p 41 Polvani

	semivita	Energia dei fotoni	Probabilita' di emissione	Γ
^{60}Co	5.2 anni	1.17 e 1.33 MeV	100%	1.30 Rm ² /(hCi)
^{85}Kr	10 anni	0.51 MeV	86%	0.0012 Rm ² /(hCi)
^{137}Cs	30 anni	0.66 MeV	0.41%	0.32 Rm ² /(hCi)

ICRP e ICRU

La radioprotezione ha lo scopo di assicurare la protezione degli individui (e della loro progenie) dai rischi connessi alla esposizione a radiazioni ionizzanti.

Le raccomandazioni su tale tema sono fornite da due organismi internazionali.

1) L'**ICRP** (International Commission on Radiological Protection), nata nel 1928, formula i principi generali su cui si fonda la radioprotezione. Questi principi sono poi recepiti nella legislazione dei vari paesi. La legislazione sulla Radioprotezione nell'Unione Europea è "armonizzata", cioè si fonda su Direttive Euratom che traducono in principi normativi le raccomandazioni ICRP. Le Direttive Euratom pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale della Unione Europea, vengono poi recepite nella legislazione nazionale entro termini prefissati.

2) L'**ICRU** (International Commission on Radiation Units and Measurements) sviluppa raccomandazioni per le unità di misura operative nel campo della radioprotezione, caratterizzandole in relazione agli aspetti fisici del campo di radiazione

DOSE EQUIVALENTE

Da: summary of recommendations ICRP 1990, p 67-70

- La radiazione ionizzante causa effetti deterministici e stocastici. Scopo della radioprotezione e' di evitare gli effetti deterministici e limitare quelli stocastici. Gli effetti stocastici avvengono, pur a bassa frequenza, anche alle dosi piu' basse.
- Gli effetti deterministici hanno origine dall' uccisione di cellule; se la dose e' grande a sufficienza, la perdita di cellule e' tale che il tessuto perde la sua funzionalita' .
Dosi ~ alcuni Gy.
- Gli effetti stocastici possono risultare quando una cellula e' modificata invece che uccisa. Questo puo' portare a cancro. E' probabile che non ci sia soglia.

Se il danno avviene al DNA, si possono provocare effetti ereditari

ICRP 103 2007:

- Si assume che a dosi inferiori a 100 mSv un dato incremento della dose produca un incremento direttamente proporzionale della probabilita' di insorgenza di una neoplasia o di effetti ereditari attribuibili alle radiazioni (**modello lineare senza soglia: "linear no threshold", LNT**)

LNT - Modello lineare senza soglia

Le assunzioni conservative che vengono fatte nel campo della radioprotezione sono le seguenti:

- Esiste una relazione lineare dose-effetto per qualsiasi esposizione, da quelle acute a quelle croniche, indipendentemente dalla intensità della dose ricevuta: il danno è proporzionale alla dose integrale assorbita;
- Non vi è alcuna soglia sulla dose da radiazione, al di sopra della quale l'effetto si manifesta, ma al di sotto no;
- Tutte le dosi assorbite da un organo sono completamente additive, indipendentemente dal ritmo di assunzione e dagli intervalli temporali tra una assunzione e le successive;
- Non vi è alcun meccanismo di recupero o riparo biologico alle radiazioni.

Nessuna delle affermazioni precedenti è strettamente corretta, ma esse tuttavia formano una base conservativa su cui stabilire degli standard di radioprotezione.

DOSE EQUIVALENTE

La dose assorbita non permette di tenere conto della diversità degli effetti indotti da radiazioni incidenti diverse.

Dose equivalente nel tessuto o nell'organo T dovuta alla radiazione R:

$$H_{T,R} = D_{T,R} w_R$$

$D_{T,R}$ = Dose assorbita nel tessuto o nell'organo T dovuta alla radiazione R,
 w_R = fattore di ponderazione per la radiazione R (dipende dal tipo e qualità delle radiazioni)

Vd allegato 4 del Decreto legislativo 17 marzo 1995, n 230 e successive modifiche, p69
http://www.roma1.infn.it/lasezione/pdf/DLgs_230_modificato.pdf

ICRP Publication 60 (1990)

ICRP Publication 103 (2007): http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf

Direttiva 2013/59/EURATOM: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:IT:PDF>

Pelliccioni p 471 e segg

DOSE EQUIVALENTE

ICRP 103 2007

http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf

Table 29.1: Radiation weighting factors, w_R .

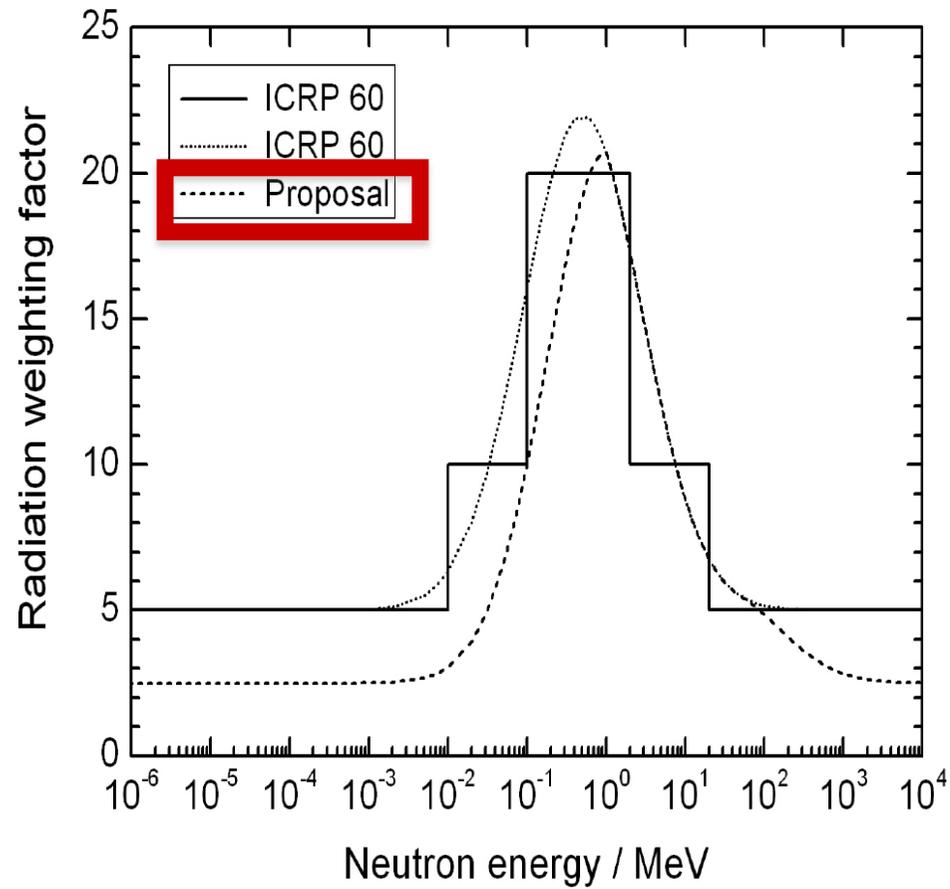
Radiation type	w_R	
Photons	1	
Electrons and muons	1	
Neutrons, $E_n < 1$ MeV	$2.5 + 18.2 \times \exp[-(\ln E_n)^2/6]$	} 5–20
1 MeV $\leq E_n \leq$ 50 MeV	$5.0 + 17.0 \times \exp[-(\ln(2E_n))^2/6]$	
$E_n > 50$ MeV	$2.5 + 3.25 \times \exp[-(\ln(0.04E_n))^2/6]$	
Protons and charged pions	2	
Alpha particles, fission fragments, heavy ions	20	

Radiation Weighting Factors, w_R

Type and energy range	Publication 60	2007
Photons, all energies	1	1
Electrons and muons, all energies	1	1
Protons	5	2
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20	20
Neutrons	Stepwise function	Continuous function <10 keV, 2.5

ICRP 103 2007

http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf



ICRP 103 2007

http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf p 27

Efficacia biologica relativa (EBR) – Relative Biological Effectiveness (RBE)

Rapporto tra la dose di una radiazione di riferimento a basso LET e la dose della radiazione considerata che produce un effetto biologico identico. I valori dell'EBR variano in funzione della dose, del rateo di dose e del risultato biologico finale (endpoint biologico) considerati. Nella radioprotezione risulta di particolare interesse l'EBR per effetti stocastici a dosi basse (EBR_M).

ICRP 103 2007

http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf p 238

(B 74) Il concetto di fattore di ponderazione per la radiazione è basato soprattutto su una valutazione dell'efficacia biologica relativa (RBE) dei diversi tipi di radiazioni con riferimento alla probabilità di insorgenza di effetti stocastici. Il concetto di RBE è utilizzato in radiobiologia per caratterizzare la diversa efficacia biologica di radiazioni di diverso tipo. I valori di RBE sono dati come il rapporto delle dosi assorbite dovute a due tipi di radiazione che producono lo stesso effetto biologico in condizioni identiche d'irradiazione (valore della dose somministrata da una radiazione di riferimento divisa per il valore corrispondente della dose della radiazione considerata che causa lo stesso effetto).

(B 75) I valori RBE per una specifica radiazione dipendono dalle condizioni d'esposizione ivi compreso l'effetto biologico studiato, il tipo di tessuto o di cellule coinvolte, la dose ed il rateo di dose, e lo schema di frazionamento della dose; dunque, per un dato tipo ed una data energia di radiazione, ci sarà un range di valori di RBE. L'RBE raggiunge un valore massimo (RBE_M) a basse dosi ed a bassi ratei di dose. Il valore di RBE_M è dunque d'interesse particolare per definire i fattori di ponderazione per la radiazione a scopo radioprotezionistico. I fattori di ponderazione adottati sono indipendenti dalla dose e dal rateo di dose nella regione delle basse dosi.

(B 76) I concetti di fattore di qualità e di fattore di ponderazione per la radiazione sono basati sulle differenze nell'efficacia biologica dei diversi tipi di radiazione che trovano origine nelle differenze del deposito di energia lungo le tracce delle particelle cariche. Per scopi radioprotezionistici, la struttura complessa delle tracce delle particelle cariche in un tessuto è caratterizzata da un unico parametro, il trasferimento lineare infinito, L_∞ , (spesso denominato trasferimento lineare di energia, LET o L) e dal fattore di qualità Q definito da una funzione di L come indicato in diverse pubblicazioni di ICRP e di ICRU (ICRP, 1963..1977, 1991b, ICRU, 1970..1986). Per maggiori dettagli, vedi Sezione B.4.2.

ICRP 103 2007

http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf p 239

(B 84) *Radiazione di riferimento*. I valori di RBE ottenuti sperimentalmente dipendono dalla radiazione di riferimento scelta. In generale, viene presa come riferimento radiazione a basso LET e, nelle indagini sperimentali, sono stati utilizzati principalmente i fotoni gamma emessi dal ^{60}Co o dal ^{137}Cs o fotoni ad alta energia prodotti con potenziali di accelerazione > 200 kV. Non c'è, tuttavia, un accordo internazionalmente riconosciuto sulla scelta di un tipo o di una energia specifica dei fotoni come radiazione generale di riferimento. Pertanto, per tutti gli studi relativi all'RBE, sono necessarie anche le informazioni sulla radiazione di riferimento utilizzata.

DOSE EFFICACE

The sum of the equivalent doses, weighted by the tissue weighting factors w_T of several organs and tissues of the body that are considered to be most sensitive [1], is called “effective dose” E :

$$E = \sum_T w_T \times H_T \quad (29.1)$$

Table S-2. Tissue weighting factors¹

Tissue or organ	Tissue weighting factor, w_T
Gonads	0.20
Bone marrow (red)	0.12
Colon	0.12
Lung	0.12
Stomach	0.12
Bladder	0.05
Breast	0.05
Liver	0.05
Oesophagus	0.05
Thyroid	0.05
Skin	0.01
Bone surface	0.01
Remainder	0.05 ^{2,3}

**VALORI
OBSOLETI!**

Non una vera grandezza dosimetrica, ma un indicatore del rischio stocastico

FATTORI DI PONDERAZIONE w_T

ICRP 103 2007

http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf

Tissue Weighting Factors, w_T

Tissue	w_T	Σw_T
Bone-marrow, breast , colon, lung, stomach, remainder tissues (13/14)	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, oesophagus, liver, thyroid	0.04	0.16
Bone surface, brain, salivary glands, skin	0.01	0.04

FATTORI DI PONDERAZIONE w_T

ICRP 103 2007

http://www.icrp.org/docs/P103_Italian.pdf

Remainder Tissues

Adrenals, Extrathoracic region, Gall bladder,
Heart wall, Kidneys, Lymphatic nodes, Muscle,
Oral mucosa, Pancreas, Prostate, Small intestine,
Spleen, Thymus, Uterus/cervix.

DOSE “IMPEGNATA”

Nel caso dell' introduzione di materiale radioattivo nel corpo (contaminazione interna), l' irraggiamento si protrae finche' il materiale radioattivo e' presente nel corpo.

- La dose equivalente ricevuta da un certo organo/tessuto in questo periodo si chiama “dose equivalente impegnata” (committed equivalent dose)
- Moltiplicando per gli appropriati w_T e sommando su tutti gli organi e tessuti si ottiene la “dose efficace impegnata”

DOSE “COLLETTIVA”

- “**dose equivalente collettiva**”: somma delle dosi equivalenti ricevute da tutti gli individui del gruppo preso in esame
- Per irradiazioni disuniformi del corpo umano, si definisce la “**dose efficace collettiva**”

Unita' di misura: man Sv
(Sv persona)

TIPI DI IRRADIAZIONE ESTERNA

Sorgenti naturali

- Raggi cosmici: circa 0.3 mSv/anno al livello del mare
0.6 mSv/anno a 1500 m slm
3 μ Sv/h a 10 km (aerei di linea !)
- Materiali radioattivi naturali nel terreno – in particolare gamma dalla serie dell' ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K

Aosta: 0.09 mSv/anno

Viterbo: 2 mSv/anno (!)

Sorgenti naturali modificate da tecnologia

- Muri delle case contenenti materiali radioattivi: per es. granito, tufo litoide (^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K)

TIPI DI IRRADIAZIONE ESTERNA

Sorgenti da fallout di bombe atomiche

<1mSv

Sorgenti di impiego medico

- Radiologia diagnostica: dosi da 0.01 a 50mGy per esame
In media, in Italia, per radiologia diagnostica ca 0.8 mSv/anno al midollo osseo emopoietico e 0.5 mSv/anno alle gonadi
(paragonabili alle sorgenti naturali !)
- Radioterapia: dosi fino a 50-70 Gy

TIPI DI IRRADIAZIONE ESTERNA

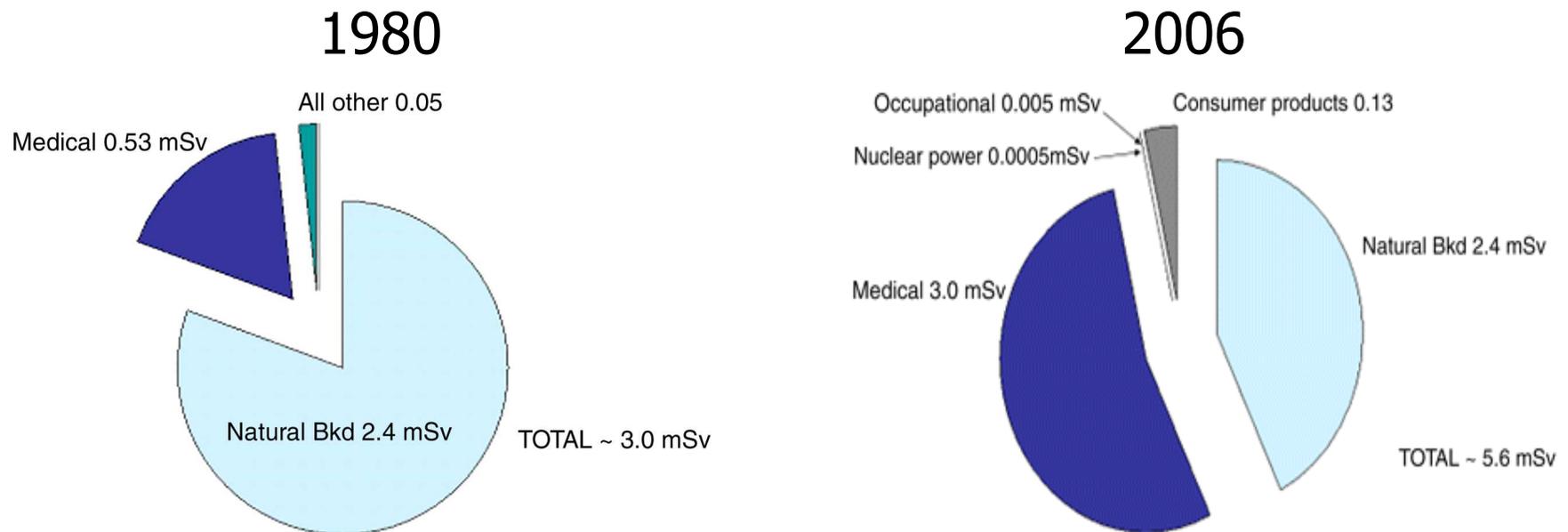
In totale

fondo “naturale”: ca 0.90 mSv/anno

Sorgenti varie: <0.09 mSv/anno

Radiologia diagnostica: ca 0.80 mSv/anno

Contributo dell'esposizione medica alla dose individuale da radiazioni negli USA



U.S. annual per-capita effective radiation dose from various sources for **(a)** 1980 and **(b)** 2006 by using UNSCEAR value of 2.4 mSv for natural background (*Bkd*) (for **a**, NCRP 1987 estimated value, 3.0 mSv; for **b**, NCRP 2009 estimated value, 3.1 mSv).

Stime del numero e della dose collettiva per esposizioni mediche negli USA 2006

Type of Procedure	No. of Procedures in Millions	Percentage of Total No. of Procedures	Collective Effective Dose (person-sievert)	Percentage of Collective Dose from Procedures	Per-Capita Dose (mSv)
Diagnostic radiographic and fluoroscopic studies*	293	74	100 000	11	0.33
Interventional procedures	17	4	128 000	14	0.43
CT scanning	67	17	440 000	49	1.47
Nuclear medicine studies	18	5	231 000	26	0.77
Total	395	100	899 000	100	3.01

Dose efficace da fondo naturale di radiazioni

Tab. 8.I. Equivalenti annuali di dose efficace dovuti al fondo naturale nelle aree «normali» (dati tratti da UNSCEAR88).

<i>Sorgente</i>	<i>Equivalente di dose efficace (mSv/anno)</i>		
	<i>Irradiazione esterna</i>	<i>Irradiazione interna</i>	<i>Totale</i>
Raggi cosmici			
Componente dirett. ionizz.	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 (arrotondato)	0.8	1.6	2.4

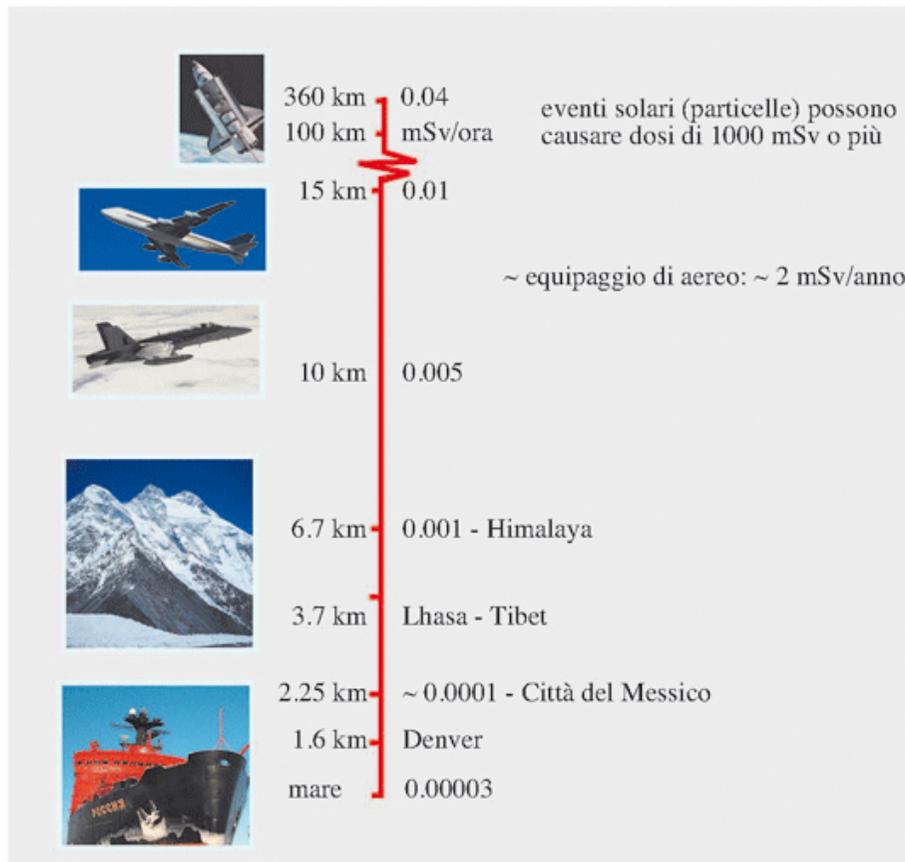


Figura 21.32

Livelli equivalenti di dose ambientale in funzione dell'altezza dal livello del mare espressa in mSv/ora.