

Lezioni Lincee di Fisica

Energia nucleare e nuove tecnologie:
riflessioni su sicurezza ed ambiente

Dose, rischio ed effetti biologici delle radiazioni

Monica Sisti

Università degli Studi di Milano-Bicocca

Milano, 20 maggio 2011



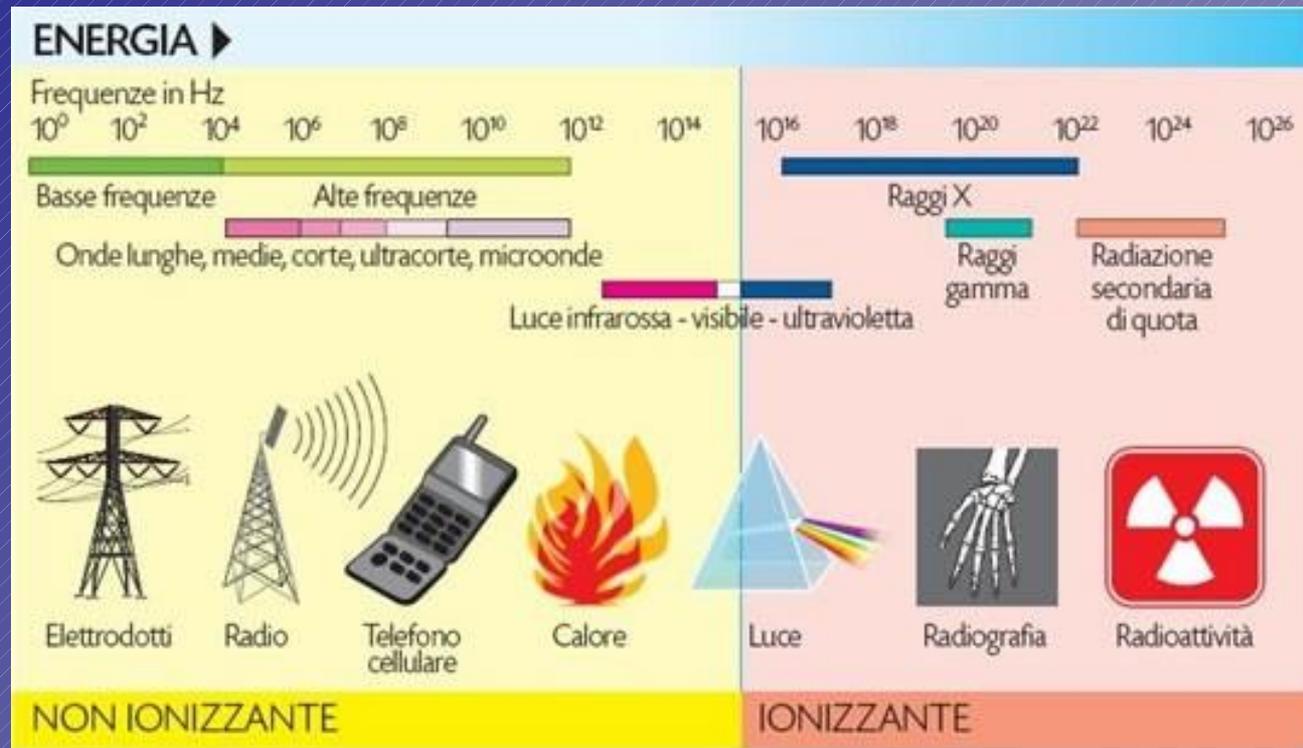
Sommario

- Introduzione alle radiazioni ionizzanti
- Sorgenti di radiazioni ionizzanti
- Interazione delle radiazioni con la materia vivente
- Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti
- La radioprotezione e i suoi principi fondamentali

Radiazione

termine generalmente usato per descrivere fenomeni fisici apparentemente assai diversi tra loro, quali l'emissione di luce da una lampada, di calore da una fiamma, di particelle elementari da una sorgente radioattiva, etc.

□ trasporto di energia nello spazio



spettro della
radiazione
elettromagnetica

□ siamo interessati alle radiazioni
ionizzanti

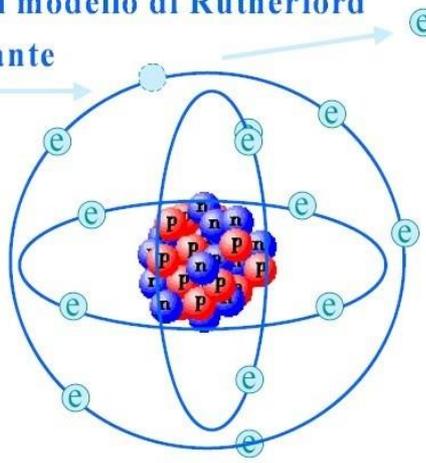
Radiazioni ionizzanti

“Ionizzare” un atomo significa strappare uno o più elettroni dalla propria orbita intorno al nucleo: l'atomo non è più neutro ma diventa carico positivamente e si chiama ione.

Atomo secondo il modello di Rutherford

Particella ionizzante →

→ Ione negativo



L'atomo viene simbolicamente rappresentato con $\begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}$

X = Specie fisica
A = Numero di massa = Numero di nucleoni
Z = Numero di protoni A - Z = Numero di neutroni

- p** protoni
- n** neutroni
- e** elettroni

■ Radiazioni direttamente ionizzanti

- ★ particelle alfa (\square): due protoni e due neutroni
- ★ particelle beta (\square^+ , \square^-): positroni ed elettroni
- ★ altre particelle cariche (**protoni, ioni, etc.**)

■ Radiazioni indirettamente ionizzanti

- ★ elettromagnetiche: **raggi X, raggi \square**
- ★ **neutroni**

Interazione delle radiazioni ionizzanti con la materia

■ Particelle cariche

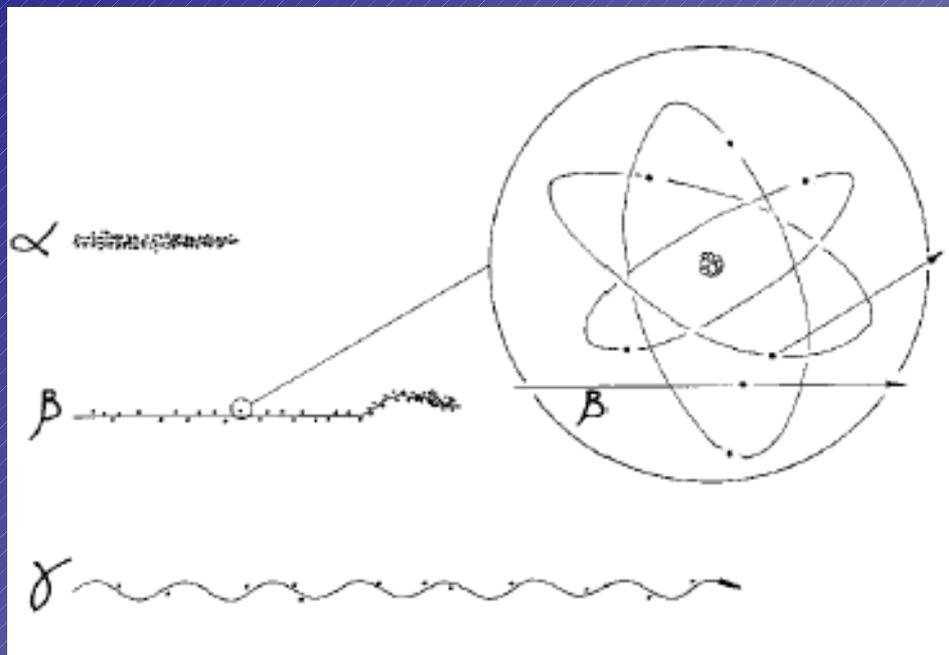
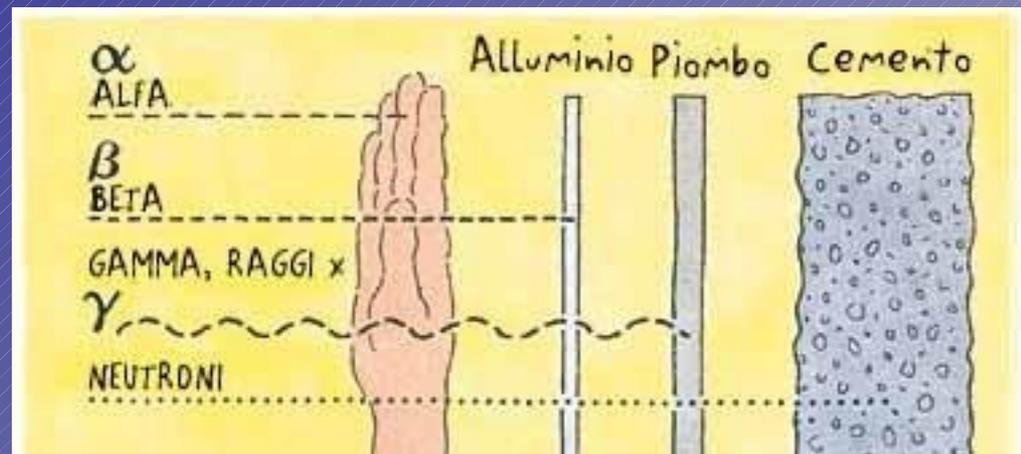
- * perdita continua di energia
- *pesanti*: percorso pressoché rettilineo
- *leggere*: percorso tortuoso

■ Particelle neutre

- * neutroni: diffusione, assorbimento

■ Radiazioni elettromagnetiche

- * perdono energia solo nel punto di interazione
- * percorso rettilineo fino al punto di interazione



**LET: Trasferimento Lineare di Energia
(densità di ionizzazione)**

particelle \square neutroni \rightarrow alto LET

particelle \square e raggi X, \square \rightarrow basso LET

Sorgenti di radiazioni ionizzanti

Sorgenti naturali

- ✓ nuclei radioattivi naturali
- ✓ radiazione cosmica



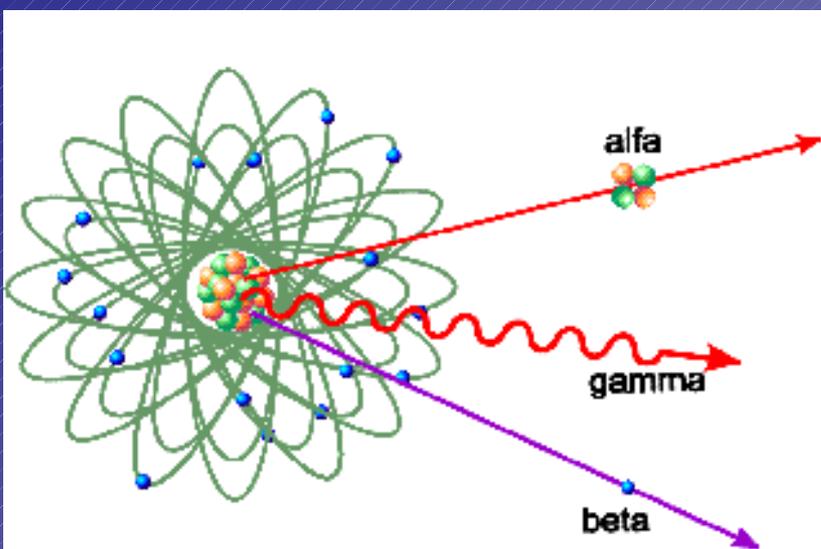
Sorgenti artificiali

- ✓ radionuclidi artificiali
- ✓ macchine radiogene
- ✓ acceleratori di particelle
- ✓ reattori nucleari
- ✓ ...

Radiazioni da nuclei radioattivi

Gli atomi e i loro nuclei sono la principale sorgente di radiazioni sia elettromagnetiche che corpuscolari.

Numerosi elementi esistenti in natura contengono atomi i cui nuclei sono energeticamente instabili. Il ritorno alla stabilità avviene con emissione di radiazione corpuscolare e/o elettromagnetica
⇒ si parla di **decadimento radioattivo**.



Radionuclide: elemento radioattivo con un determinato numero di protoni e neutroni

Isotopo: atomo di un dato elemento (cioè con un determinato numero di protoni) ma con un diverso numero di neutroni

Legge fondamentale del decadimento radioattivo:

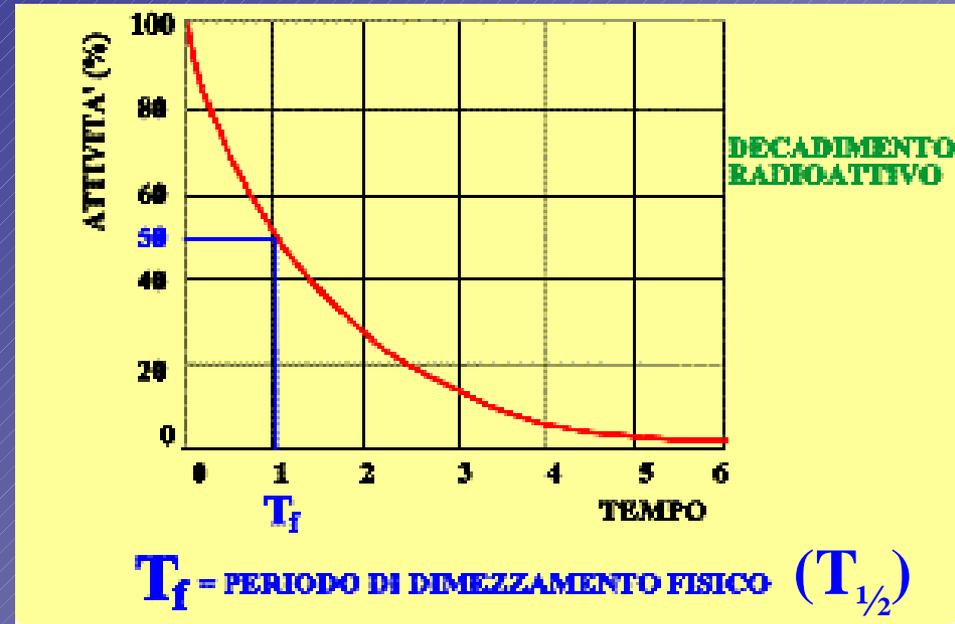
per ogni radionuclide deve trascorrere un tempo caratteristico (**tempo di dimezzamento, $T_{1/2}$**) affinché il numero di nuclei radioattivi presenti si dimezzi.

Esempi:

iodio 131 (^{131}I): $T_{1/2} \sim 8$ giorni

cobalto 60 (^{60}Co): $T_{1/2} \sim 5.3$ anni

uranio 238 (^{238}U): $T_{1/2} \sim 4.5$ miliardi di anni



Si definisce **Attività** di un radionuclide il numero di disintegrazioni al secondo. Si misura in becquerel (Bq): $1 \text{ Bq} = 1 \text{ dis/sec}$

[vecchia unità: curie (Ci). $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$]

L'**Energia** delle radiazioni si misura in elettronvolt (eV) e nei suoi multipli (keV, MeV, ...): $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$

Radionuclidi primordiali (radioattività naturale):

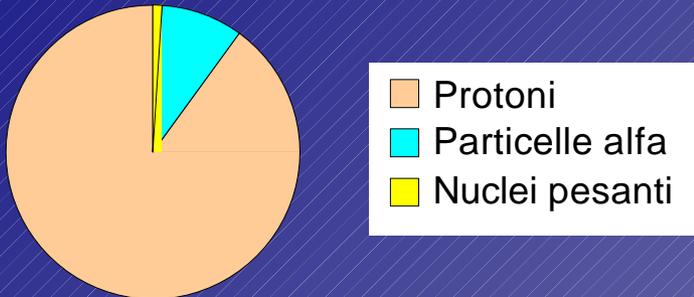
potassio 40 (^{40}K), famiglie radioattive: uranio 238 (^{238}U), torio 232 (^{232}Th)

↳ figli: radio 226 (^{226}Ra), radon (^{222}Rn), toron (^{220}Rn)

Raggi cosmici

“Bombardano” continuamente la terra

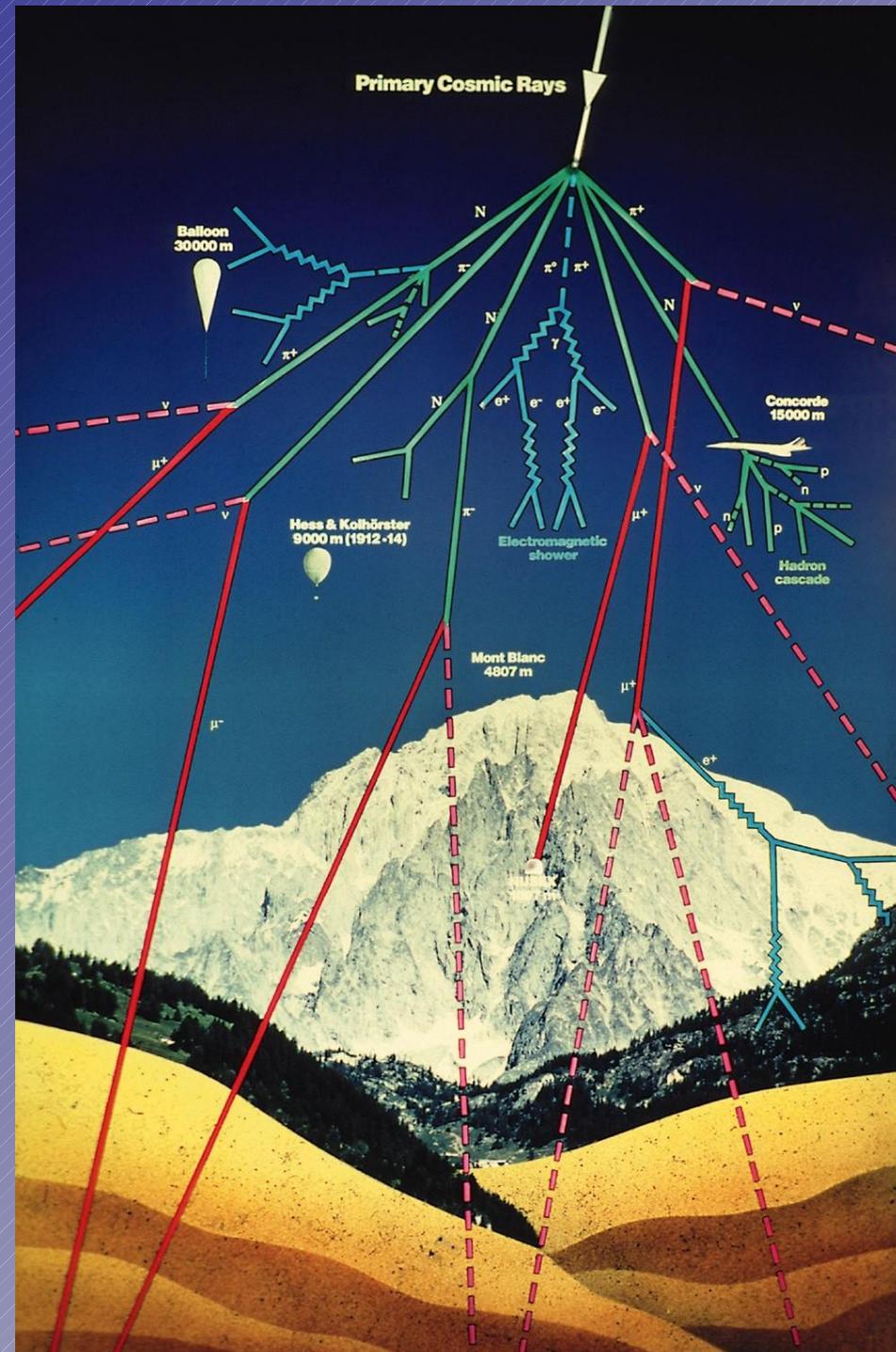
I raggi cosmici primari:



I raggi cosmici primari interagiscono con l'atmosfera terrestre dando luogo a sciame di particelle secondarie (raggi cosmici secondari), di varia natura e diversa energia, e a radionuclidi cosmogenici (per cattura di neutroni).

Flusso raggi cosmici secondari a terra:
~ 130 muoni/m²/s

Radionuclidi cosmogenici:
carbonio 14 (¹⁴C), trizio (³H)

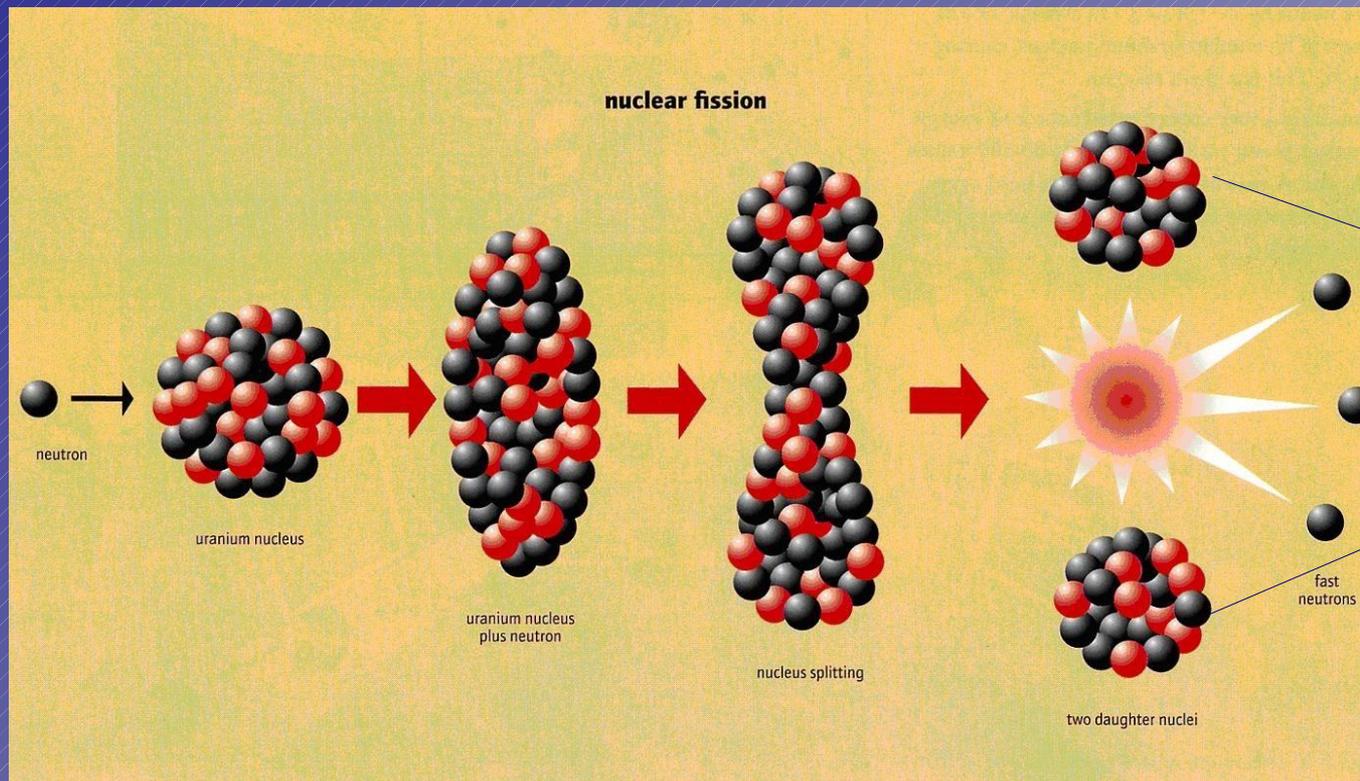


Sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti/1

- Radioattività artificiale

Il fenomeno della radioattività può essere indotto artificialmente in nuclei stabili attraverso reazioni nucleari. Una reazione nucleare consiste nell'urto di una particella (protone, neutrone, α) con un nucleo della materia: il nucleo colpito assorbe la particella incidente ed in generale ne emette un'altra o più di una, restando modificato nella sua struttura (diventa radioattivo).

Esempio:

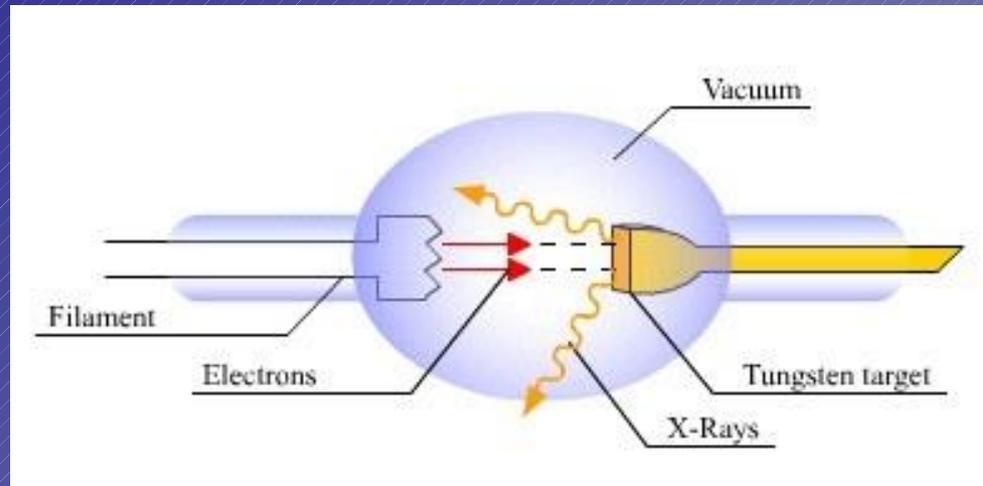


I prodotti di fissione sono altamente instabili (radioattivi)

Sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti/2

- Macchine radiogene

Sono apparecchiature in cui vengono accelerate particelle elementari che, interagendo su opportuni bersagli, producono fasci di radiazione (tubi a raggi X, acceleratori di particelle).



Applicazioni mediche

- radiografie, TAC
- PET
- radioterapia

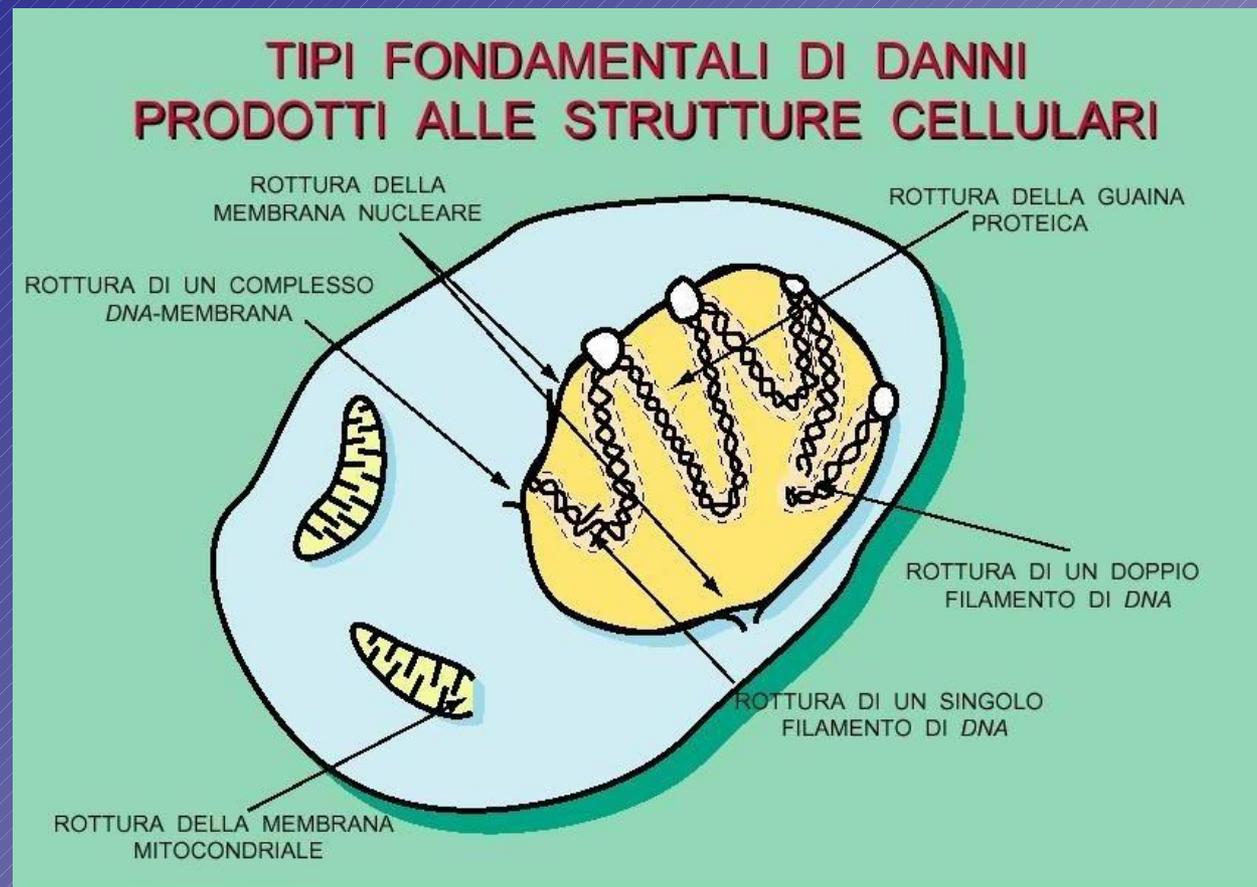
SORGENTI ARTIFICIALI

Applicazioni industriali

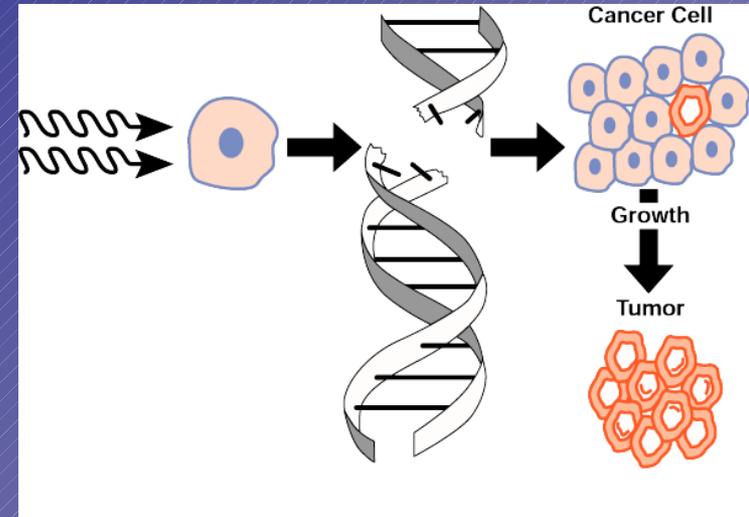
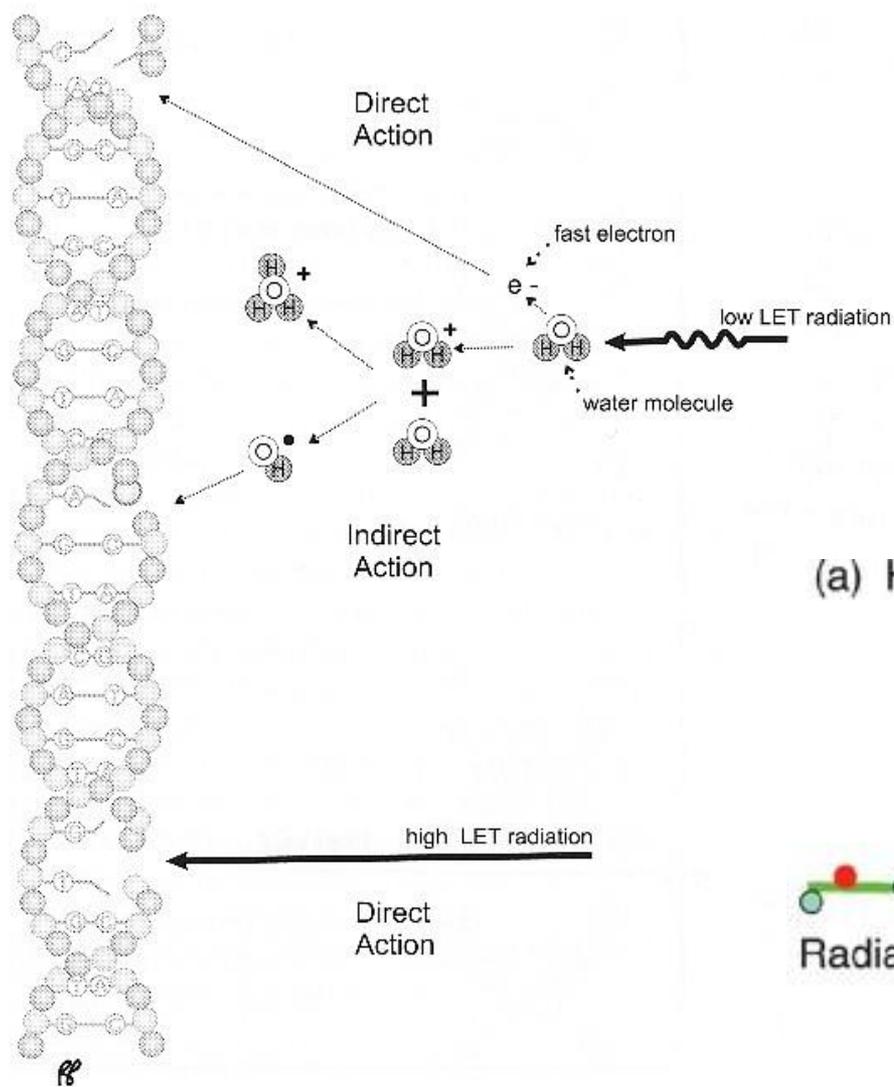
- radiografie industriali
- rivelatori di incendio
- sterilizzazione
- misuratori di spessore
-

Irradiazione del corpo umano

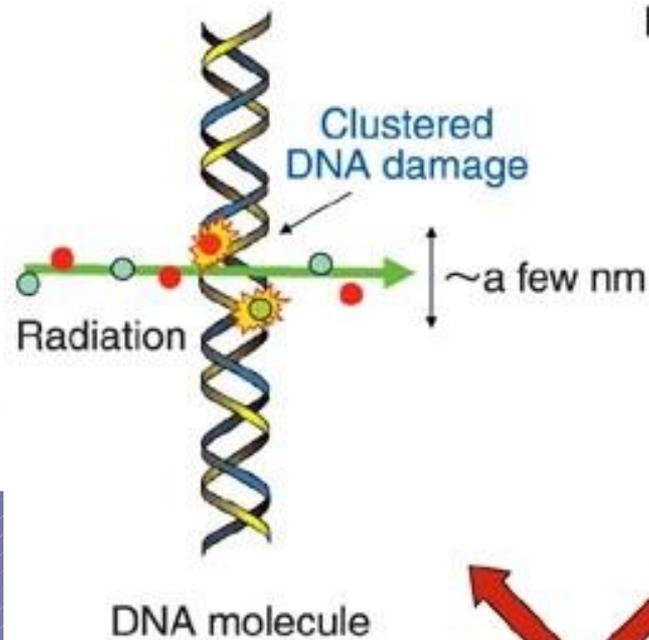
Le radiazioni, corpuscolari ed elettromagnetiche, una volta emesse, interagiscono con la materia circostante (ad es. il corpo umano). Gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti dipendono dal tipo di radiazione e dalla quantità di energia ceduta.



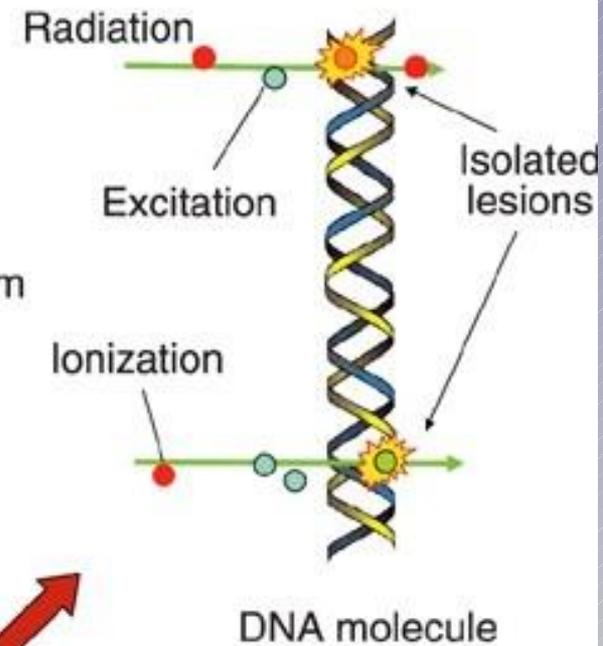
Ionizzazione e danni cellulari



(a) High LET radiation

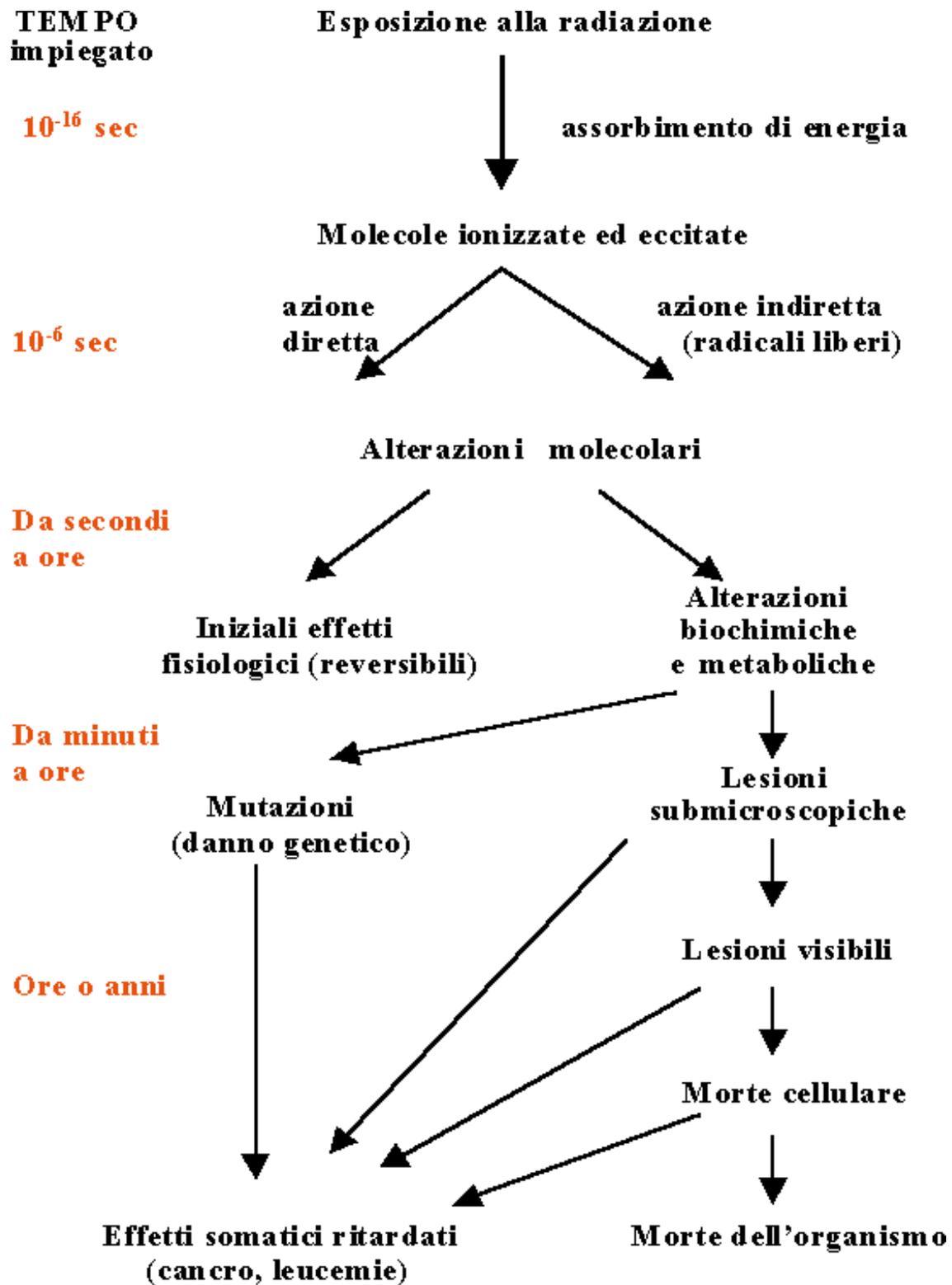


(b) Low LET radiation



La ionizzazione provoca danni a livello cellulare: il danno maggiore è a carico del DNA.

Effetti dell'esposizione



Riconoscimento degli effetti patologici delle radiazioni

- 8 Novembre 1895: Röntgen scopre i raggi X
- 2 Marzo 1896: Becquerel scopre la radioattività naturale dell'uranio

1896 – pochi mesi dopo la scoperta dei raggi X, un costruttore e sperimentatore di tubi sotto vuoto mostrò lesioni alla cute delle mani (oggi classificabili come dermatite acuta da raggi X)

1897 – H. Becquerel mostrò un eritema della cute in corrispondenza della tasca del vestito nella quale aveva tenuto per qualche tempo una fiala contenente sali di radio

fine secolo XIX – P. Curie si provoca intenzionalmente un eritema da radio sulla cute di un braccio e intuisce che le radiazioni possono avere anche effetti terapeutici

1902 – si osserva la degenerazione in carcinoma cutaneo di una precedente dermatite da raggi X

1903 – si riconosce che l'esposizione a raggi X può indurre sterilità negli animali da laboratorio; pochi anni dopo viene scoperto che gli embrioni di uova di rospo fertilizzate con sperma irradiato con raggi X presentano "anormalità"

1904 – vengono segnalate le prime anemie e le prime leucopenie da raggi X

anni '20 – si manifestano necrosi e tumori ossei alla mandibola in operai addetti a dipingere le lancette di orologi luminescenti con vernici contenenti sali di radio (utilizzando pennellini “appuntiti” con le labbra)

anni '20 – si notò che i minatori che lavoravano nelle miniere di cobalto della Sassonia e nelle miniere di peclenda in Cecoslovacchia, entrambe contenenti grosse percentuali di uranio, soffrivano di cancro ai polmoni con una percentuale trenta volte più elevata che il resto della popolazione: oggi è noto che questi lavoratori erano vittime di esposizione interna al gas Radon ed ai suoi figli, prodotti di decadimento dell'uranio

1927 – il genetista H.J.Müller mostra che l'esposizione a raggi X provoca alterazioni geniche e mutazioni cromosomiche nel moscerino dell'aceto, che sono trasmesse ai discendenti secondo le leggi dell'eredità biologica

1955 – alla International Conference on pacific uses of atomic energy tenutasi a Ginevra, viene riportata la notizia che fra i sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki erano stati osservati 200 casi di leucemia, un numero assai maggiore di quello “atteso” in base alle caratteristiche endemiche della malattia

Nascita della radioprotezione

1925: nasce l'ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements)

1928: nasce l'ICRP (International Commission on Radiological Protection)

Radioprotezione:

si occupa della valutazione dei rischi sanitari derivanti dall'esposizione del corpo umano e dei suoi organi alle radiazioni ionizzanti. E' una disciplina a forte contenuto biologico, fisico, tecnico e naturalistico. Ha l'obiettivo di preservare lo stato di salute degli individui riducendo i rischi da radiazioni ionizzanti nella realizzazione di attività umane che siano giustificate dai benefici che ne derivano alla società e ai suoi membri.

Grandezze usate in radioprotezione

DOSE ASSORBITA: energia assorbita per unità di massa (dE/dm).

Unità di misura: gray (1 Gy = 1 J/kg)

DOSE EQUIVALENTE : grandezza protezionistica che quantifica il rischio associato all'irradiazione di un singolo organo o tessuto, tenendo conto del tipo di radiazione. Si ottiene moltiplicando la dose assorbita per un fattore di ponderazione w_R , (dipendente dal tipo di radiazione).

Unità di misura: sievert (1 Sv = 1 J/kg)

e suoi sottomultipli: mSv (1 mSv = 10^{-3} Sv) - μ Sv (1 μ Sv = 10^{-6} Sv)

DOSE EFFICACE: grandezza protezionistica che quantifica il rischio complessivo per l'individuo combinando gli effetti di diverse dosi in diversi organi o tessuti a seconda della loro radiosensibilità.

Unità di misura: sievert (1 Sv = 1 J/kg)

Dosi efficaci medie annue (in mSv) da sorgenti naturali ed artificiali in Italia

Sorgenti naturali	3.3
Raggi cosmici	0.4
Radioisotopi cosmogenici	0.01
Radiazione terrestre	
- esposizione esterna	0.6
- esposizione interna (escluso Rn)	0.3
- esposizione interna da Rn e suoi prodotti	2.0
Sorgenti artificiali	1.2
pratiche sanitarie, radiologia	1.2
incidente di Chernobyl	0.002
fall-out di esperimenti nucleari	0.005
altre esposizioni di origine tecnologica	0.0002
TOTALE	4.5

Alcuni esempi di dosi

Fumo di 15 sigarette/giorno	: 3 mSv/anno
RX-dentale	: 0,13 mSv
RX-torace	: 0,08 mSv
Acqua bevuta	: 0,05 mSv/anno
Volo Milano New York e rit.	: 0.1 ÷ 0.2 mSv

Anche nel corpo umano sono presenti piccole quantità di sostanze radioattive, ad es. introdotte attraverso la catena alimentare o per inalazione.

Esempio:

Il corpo umano contiene circa 12 kg di carbonio.

Di questi, circa 1 parte su 10^{12} è ^{14}C , isotopo radioattivo.

Il risultato è una dose efficace annuale di 11 μSv , da confrontare con la dose annuale naturale di 3.3 mSv.

Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti

Le radiazioni interagiscono con i tessuti biologici danneggiando i costituenti cellulari in genere e tra essi il DNA.

Gli effetti biologici delle radiazioni vengono classificati in base alla loro riconducibilità alle cause iniziali in:

- **Effetti deterministici**

- **Effetti stocastici**



- Effetti somatici



- Effetti genetici

Effetti deterministici

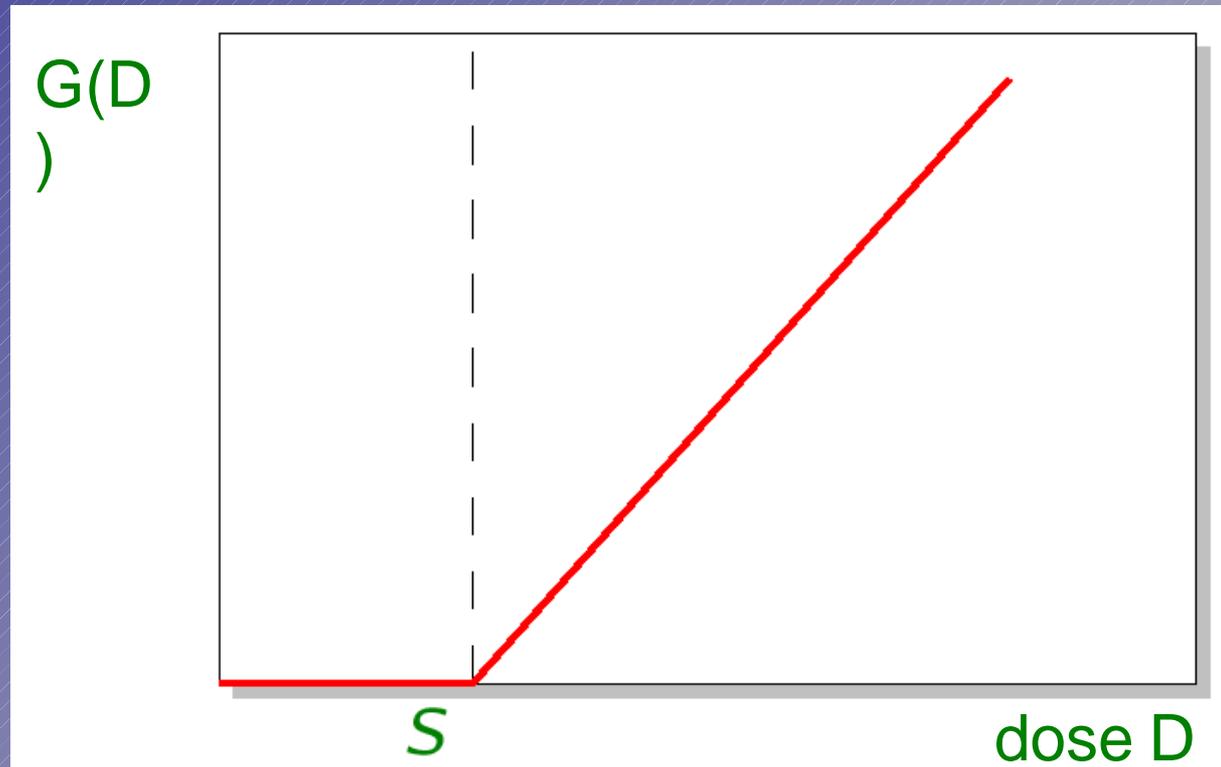
Comprendono: radiodermite, cataratta, sterilità, sindrome acuta da radiazioni, ...

Si definiscono come deterministici gli effetti che si verificano in un organo/tessuto esposto soltanto se la dose assorbita è superiore a un valore di soglia, tipico per ogni specifico effetto, e la cui gravità è tanto maggiore quanto maggiore la dose



Gradualità dell'effetto

□ al superamento della dose-soglia l'insorgenza dell'effetto si manifesta su tutti gli irradiati



Effetto e dose soglia

EFFETTO	DOSE SOGLIA (Gy)
● Sterilità temporanea nel maschio (esposizione acuta)	0.15
● Sterilità permanente nel maschio (esposizione acuta)	3.6 - 6
● Sterilità temporanea nella donna (esposizione acuta)	2.5 - 6
● Opacità del cristallino	2 - 10 (radiazioni a basso LET*)
● Opacità del cristallino	1 - 3 (radiazioni ad alto LET)
● Depressione temporanea dell'attività del midollo osseo	0,5
● DL 50/60 **	3 - 5
● DL 100 ***	5 - 10 (entro 10-20 giorni dall'esposizione) per "sindrome gastro-intestinale" > 15 (quasi immediata) per "sindrome del sistema nervoso centrale"

* - LET: linear energy transfer (espresso in keV/(m di percorso in acqua) – i raggi X utilizzati in radiodiagnostica sono radiazioni “a basso LET” (circa 3.5 keV/m – neutroni e particelle α sono radiazioni “ad alto LET”)

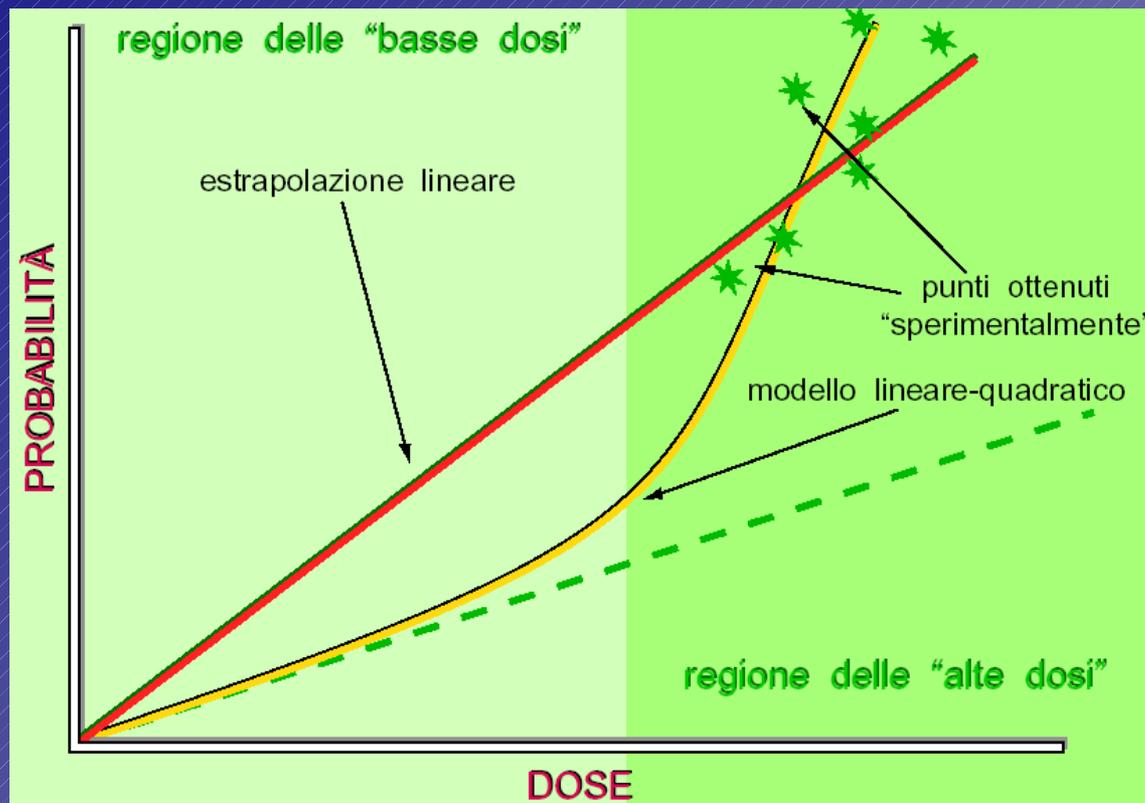
** - DL 50/60: in una “popolazione” esposta, Dose Letale per il 50% degli individui esposti entro 60 giorni dall'esposizione

*** - DL 100: in una “popolazione” esposta, Dose Letale per il 100% degli individui esposti, indipendentemente dall'adozione di provvedimenti terapeutici

Effetti stocastici o probabilistici

Comprendono: leucemie, tumori solidi, malattie ereditarie

Effetti la cui probabilità di accadimento dipende dalla dose assorbita, ovvero è tanto maggiore quanto più elevata è la dose. Per i soli scopi della radioprotezione e per le stime del rischio, si ipotizza una relazione lineare fra la dose assorbita e la probabilità dell'effetto.



Aumentando la dose aumenta la probabilità dell'effetto ma non la sua gravità

Il tempo di latenza fra l'esposizione e la manifestazione dell'effetto varia fra qualche anno e qualche decina d'anni.

Come colleghiamo il danno alla dose?

Conoscenze sui danni generati dalla radiazione sull'uomo:

- studi sui sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki
- studi sulle popolazioni esposte ai test nucleari
- conseguenze di terapie mediche
- conseguenze di incidenti nucleari
- esperimenti su animali



Coefficienti nominali di rischio per effetti stocastici (ICRP 103, 2007):

Popolazione esposta	Rischio (% Sv ⁻¹)		
	Cancro	Effetti ereditari	Totale
Intera	5.5	0.2	5.7
Adulta	4.1	0.1	4.2

→ in media, per una dose di 10 mSv, meno di 6 individui su 10.000 irraggiati corrono il rischio di contrarre un tumore nel corso della propria vita

La radioprotezione

SCOPI

PREVENZIONE degli effetti deterministici

RIDUZIONE a un livello tanto basso quanto ragionevolmente ottenibile della probabilità di accadimento di effetti stocastici

PRINCIPI

1) principio di giustificazione

Tutte le attività pacifiche che comportano esposizione dell'uomo a radiazioni ionizzanti devono essere preventivamente giustificate e periodicamente riconsiderate alla luce dei benefici che da esse derivano

2) principio di ottimizzazione

Qualsiasi pratica giustificata deve essere svolta in modo da mantenere l'esposizione al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenendo conto dei fattori economici e sociali (principio ALARA – as low as reasonably achievable)

3) il principio di limitazione della dose

Limite di dose annuale per la popolazione secondo la legislazione italiana: **1 mSv**

Esempio: incidente di Chernobyl

Dei 600 lavoratori presenti la mattina del 26 aprile 1986, 134 ricevettero dosi elevate (0.7 Gy – 13.4 Gy) e soffrirono di “radiation sickness” (nausea, vomito e danni all'intestino)

→ 28 di questi morirono entro i primi 3 mesi e altri 2 subito dopo.

200.000 operatori di primo intervento ricevettero dosi fra 0.01 Gy e 0.5 Gy: vengono monitorati per studiare eventuali insorgenze di tumori o altre malattie.

Incidenza elevata (circa 1800 casi) di tumori alla tiroide fra individui esposti nell'infanzia (tempo di latenza del tumore alla tiroide fra i due e i dieci anni). Non si sono riscontrate insorgenze anomale di altri tumori.

DOSI MEDIE per le persone più colpite dall'incidente:

100 mSv per 240.000 operatori

30 mSv per 116.000 persone evacuate

10 mSv nei dieci anni successivi all'incidente per chi è rimasto nell'area