

La Radioprotezione aspetti Fisici, Biologici e Legislativi

Giorgio Russo
Esperto Qualificato di III Grado

Mail: giorgiorusso@lns.infn.it





The **Radium Ore Revigator** was a pseudoscientific medical device consisting of a ceramic water crock lined with radioactive materials. It was patented in 1912 by R. W. Thomas, an invalid in California, and manufactured by the Radium Ore Revigator Co., which sold thousands of the devices in the 1920s and '30s.



The set originally sold for \$49.50 (\$461.43 in 2014 US dollars) and contained the following:

- Geiger-Müller counter Electroscopes
- Spintharoscope
- Wilson cloud chamber
- Low-level radiation sources:
 - Alpha particles (Pb-210 and Po-210)
 - Beta particles (Ru-106)
 - Gamma particles (possibly Zn-65)

In vendita dal 1950 al 1951

Nota storica...

Primi effetti delle radiazioni



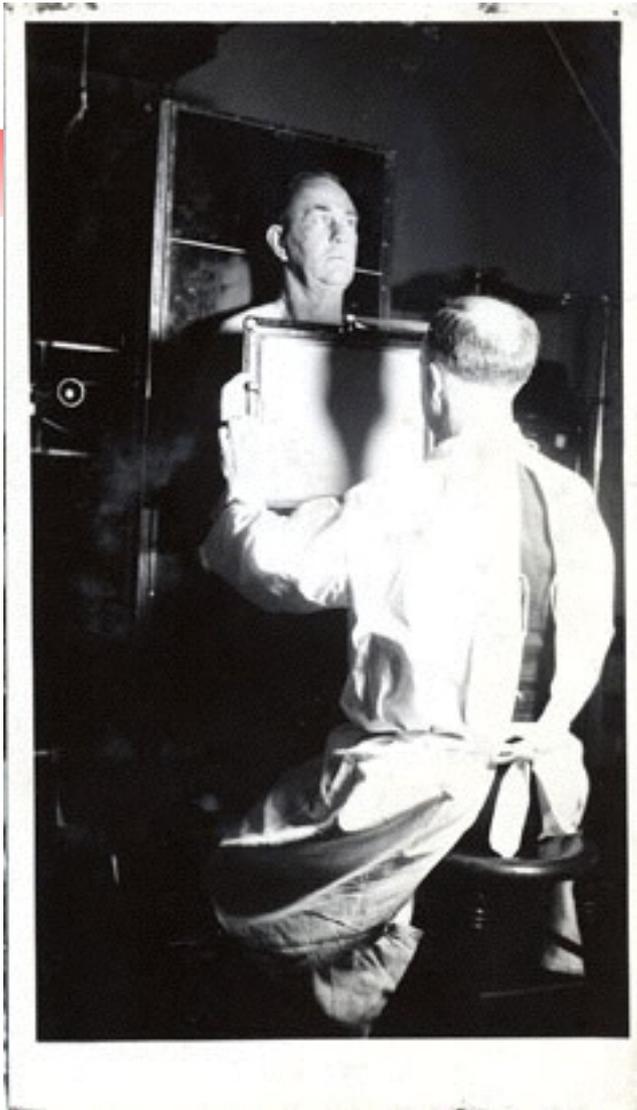
Solo un mese dopo dall'annuncio della scoperta dei raggi X, Novembre **1895**, da parte di Roentgen un costruttore e sperimentatore di tubi sotto vuoto mostrò lesioni alla cute e alle mani che oggi indichiamo come dermatite subacuta da raggi X.

1897: E' riconosciuta per la prima volta una esposizione acuta sull'uomo

1899: Primo trattamento oncologico (Stenbeck)

L'impiego dei raggi X a scopo diagnostico risale ai primi anni del 1900

Fluorescent Screens



The next development involved the use of fluorescent screens and special glasses so the doctor could see x-ray images in real time. This caused the doctor to stare directly into the x-ray beam, creating unwanted exposure to radiation.



Film Cassettes

For the first **fifty years** of radiology, the primary examination involved creating an image by focusing x-rays through the body part of interest and directly onto a single piece of film inside a special cassette. In the earliest days, a head x-ray could require up to **11 minutes of exposure time**. Now, modern x-rays images are made in milliseconds and the x-ray dose currently used is as little as 2% of what was used for that 11 minute head exam.

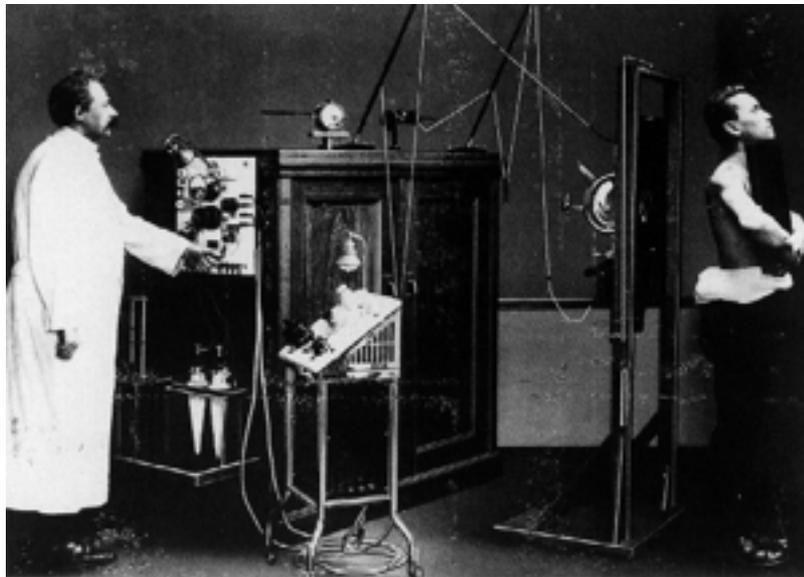
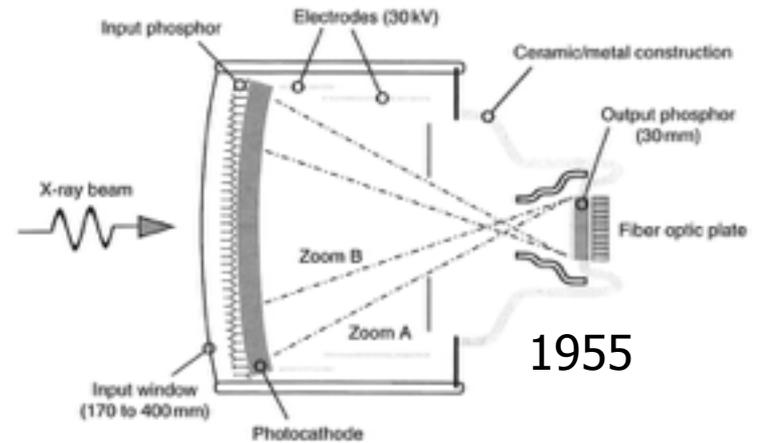
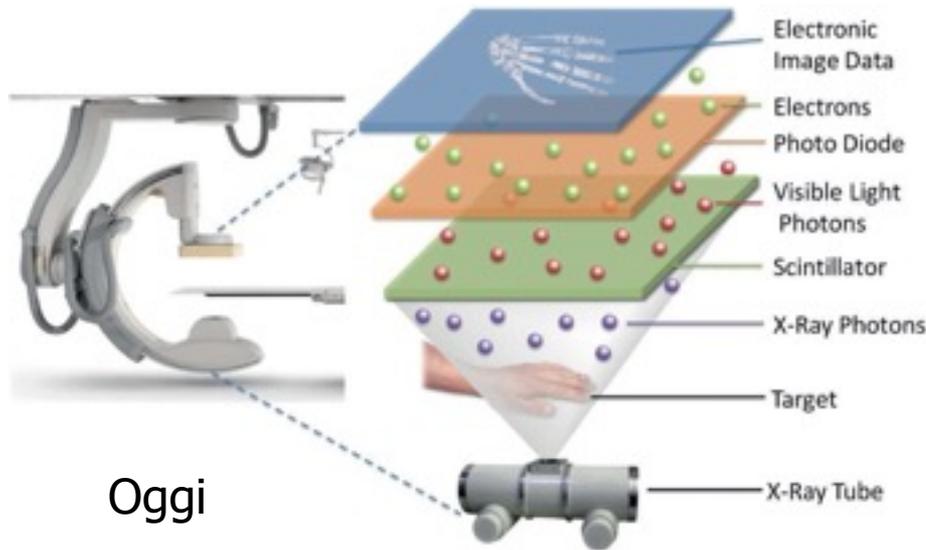


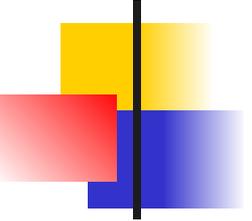
Image Intensifier

In 1955, the x-ray image intensifier (also called I.I.) was developed and allowed the pick up and display of the x-ray movie using a TV (television) camera and monitor. By the 1960's, the fluorescent system (which had become quite complex with mirror optic systems to minimize patient and radiologist dose) was largely replaced by the image intensifier/ TV combination.



Nota storica...

Primi effetti delle radiazioni



Nel 1901 Bequerel mostrò eritema della cute in corrispondenza della tasca del vestito nella quale aveva tenuto per qualche tempo una fiala di vetro contenente sali di Radio. Poco dopo Pierre Curie si provocò intenzionalmente un eritema da Radio sulla cute del braccio ed ebbe l'idea che le radiazioni potessero avere proprietà terapeutiche.

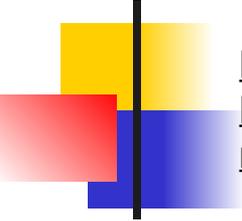
Nel 1902 è riconosciuto per la prima volta nell'uomo un cancro indotto da radiazioni

Nel 1903 fu scoperto che l'esposizione ai raggi X poteva indurre sterilità negli animali da laboratorio; pochi anni dopo fu annunciato che gli embrioni di uova di rospo fertilizzate con sperma irradiato con raggi X presentavano anomalie di tipo genetico.

Nel 1904 furono segnalate le prime anemie e le prime leucemie indotte da raggi X e si constatò che un carcinoma cutaneo si era sviluppato su precedente dermatite da raggi.

Nota storica...

Viene fondato l'ICRP



Nel 1911 furono messi in evidenza 94 casi di tumori indotti da raggi X, 50 dei quali in radiologi. Nel 1922 fu stimato che almeno 100 radiologi morirono come risultato di cancro indotto da radiazioni.

Le lesioni da ingestione di sostanze radioattive furono scoperte più tardi, attorno agli anni '20 quando si manifestarono necrosi e tumori ossei al mascellare di operaie che durante la prima guerra mondiale erano state addette a dipingere le lancette ed il quadrante di orologi luminescenti con vernici contenenti sali di Radio: esse avevano ingerito le vernici facendo la punta ai piccoli pennelli inumidendoli con le labbra, gesto frequentemente ripetuto durante il lavoro.

Inoltre si notò che i minatori che lavoravano nelle miniere di cobalto della Sassonia e nelle miniere di pechblenda di Joachimsthal (Sudeti), 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** (emettitore α) ed ai suoi figli, prodotti di decadimento dell'uranio: la concentrazione di Radon emesso dalle pareti dei tunnel nell'aria respirata, soprattutto a causa della scarsa ventilazione, è estremamente elevata in miniera. Oggi per legge è imposta una ventilazione forzata delle miniere e turni di lavoro limitati per i minatori.

Nel 1928 viene istituito l'International Commission on Radiological Protection (ICRP) e vengono pubblicate le sue prime raccomandazioni. [<http://www.icrp.org/>]

EFFETTI DETERMINISTICI SULLA PELLE PER ESPOSIZIONE ACUTA A RAGGI X

EFFETTO	Dose soglia Gy	Tempo di insorgenza	Tempo di picco
-Eritema precoce transitorio	2	Ore	ca. 24 ore
-Eritema importante	6	10 giorni	ca. 2 sett.
-Epilazione temporanea	3	ca. 3 sett.	
-Epilazione permanente	7	ca. 3 sett.	
-Desquamazione secca	10	ca. 4 sett.	ca. 5 sett.
-Desquamazione umida	15	ca. 4 sett.	ca. 5 sett.
-Necrosi cutanea	18	> 10 sett.	
-Necrosi cutanea tardiva	15	> 1 anno	
-Atrofia del derma (2 [^] fase)	10	> 1 anno	

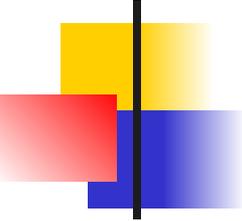
EFFETTI DETERMINISTICI

EFFETTO	DOSE SOGLIA (Gy)
Sterilità temporanea nel maschio - exp acuta	0.15
Sterilità permanente nel maschio – exp acuta	3.5-6
Sterilità permanente nella donna – exp acuta	2.5-6

Depressione dell'attività del midollo osseo	0.5
DL 50/60	3-5 Gy
DL 100	5-15 (10-20 giorni) Sindrome gastro-intestinale >15 Sistema nervoso centrale

Nota storica...

Vengono approfonditi gli effetti delle basse dosi



Un altro genere di effetti cominciò ad essere noto **verso la fine degli anni '20**: durante i suoi studi di genetica Muller mostrò che raggi X e raggi gamma producono **mutazioni genetiche e cromosomiche** nel moscerino dell'aceto, mutazioni che vengono trasmesse ai discendenti secondo le leggi dell'ereditarietà biologica.

La radioprotezione si occupò in maniera rilevante degli **effetti genetici** solo dopo la seconda guerra mondiale, quando questi furono considerati come **le più gravi ed insidiose conseguenze dell'esposizione alle radiazioni**. In questi anni venne approfondito anche il capitolo dei cosiddetti "effetti tardivi" (costituiti in gran parte da tumori maligni) che compaiono in una piccola frazione delle persone di una popolazione sottoposta a dosi anche non elevate di radiazioni. Alla International Conference on Pacific Uses of Atomic Energy (Ginevra, 1955) Tzuzuki riportò la notizia che tra i sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki erano stati osservati circa 200 casi di leucemia, un numero enormemente più alto di quello atteso in base alle caratteristiche endemiche della malattia.

Negli anni seguenti fu annunciato l'aumento di frequenza di altre forme tumorali maligne nei sopravvissuti, mentre venivano resi noti i risultati di indagini epidemiologiche sull'incremento di tumori maligni tra i pazienti curati con radiazioni per forme morbose non tumorali. **Court, Brown e Dale nel 1957 poterono dimostrare un aumento della frequenza di leucemie nelle cause di morte di pazienti trattati con roentgenterapia per dolori dovuti ad artrosi vertebrale**. A cavallo del 1960, a causa delle ricadute radioattive (fallout) conseguenti alle esplosioni nell'atmosfera di ordigni bellici nucleari di prova iniziò purtroppo anche il fenomeno di piccole dosi annue ricevute costantemente da vastissime popolazioni di interi continenti (prevalentemente per contaminazione interna) e si cominciò a parlare di "dose collettiva" ricevuta da un insieme di persone esposte. Già negli anni '50 era stato studiato un altro campo di effetti delle radiazioni: i danni riguardanti lo sviluppo embrionale e fetale. Furono soprattutto le ricerche sistematiche dei coniugi Russel che mostrarono le capacità lesive delle radiazioni sulla organogenesi che si verifica nell'embrione umano nei primi mesi dal concepimento, anche per dosi non elevate. Nasce così una speciale forma di protezione per le donne durante la gravidanza ed in generale per le donne in età fertile.

Effetti sanitari delle radiazioni ionizzanti

SOMATICI:

si manifestano sull'individuo irraggiato

DETERMINISTICI:

si manifestano su tutti gli esposti a dosi superiori ad una certa **soglia**.

- Al crescere della dose aumenta la gravità.
- L'insorgenza è generalmente precoce (giorni o settimane; in alcuni casi può essere di qualche mese o anno).
- Sono tipici delle radiazioni ionizzanti.

GENETICI:

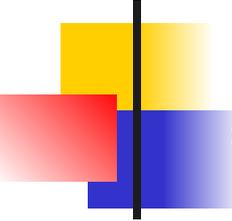
si manifestano sulla progenie degli esposti

STOCASTICI:

si manifestano in modo probabilistico e **non presentano una dose soglia**

- Al crescere della dose aumenta la probabilità di insorgenza ma non la gravità (legge del tutto o niente).
- L'insorgenza è tardiva (anni o decenni).
- Non sono tipici delle radiazioni ionizzanti.

Qual è lo stato attuale delle conoscenze in questo campo?



Esiste un'informazione ben documentata sugli effetti da esposizione acuta (cioè limitata nel tempo) ad alte dosi (effetti deterministici)

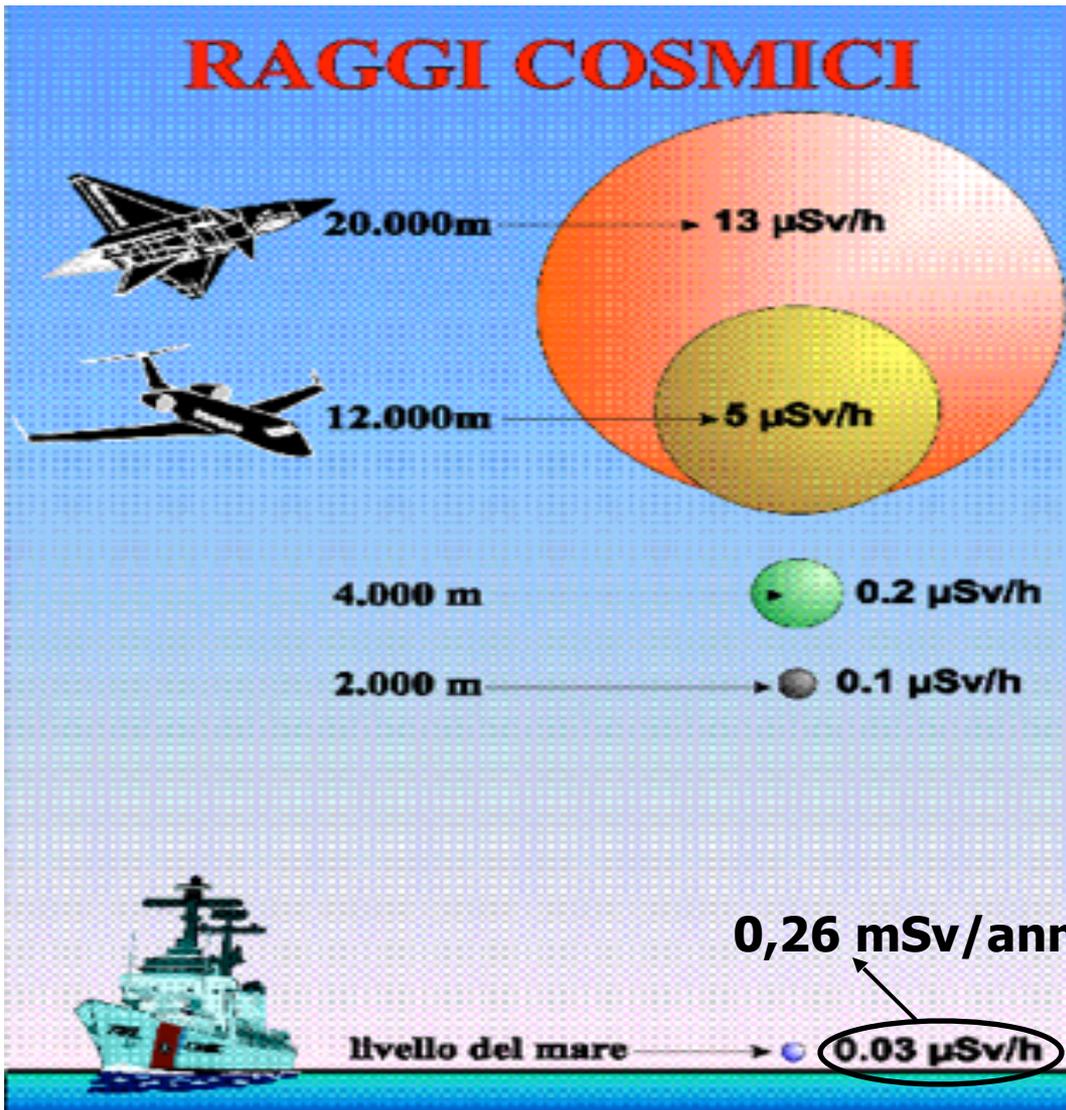
Esiste una limitata conoscenza su quanto concerne le seguenti situazioni di rischio:

- dosi acute non troppo elevate e non ripetute;
- basse dosi acute ripetute occasionalmente;
- bassissime dosi ripetute nel tempo.

In questi casi gli effetti, se davvero esistono, sono estremamente rari (effetti stocastici) ed un incremento della dose aumenta la probabilità del danno piuttosto che l'entità del danno stesso.

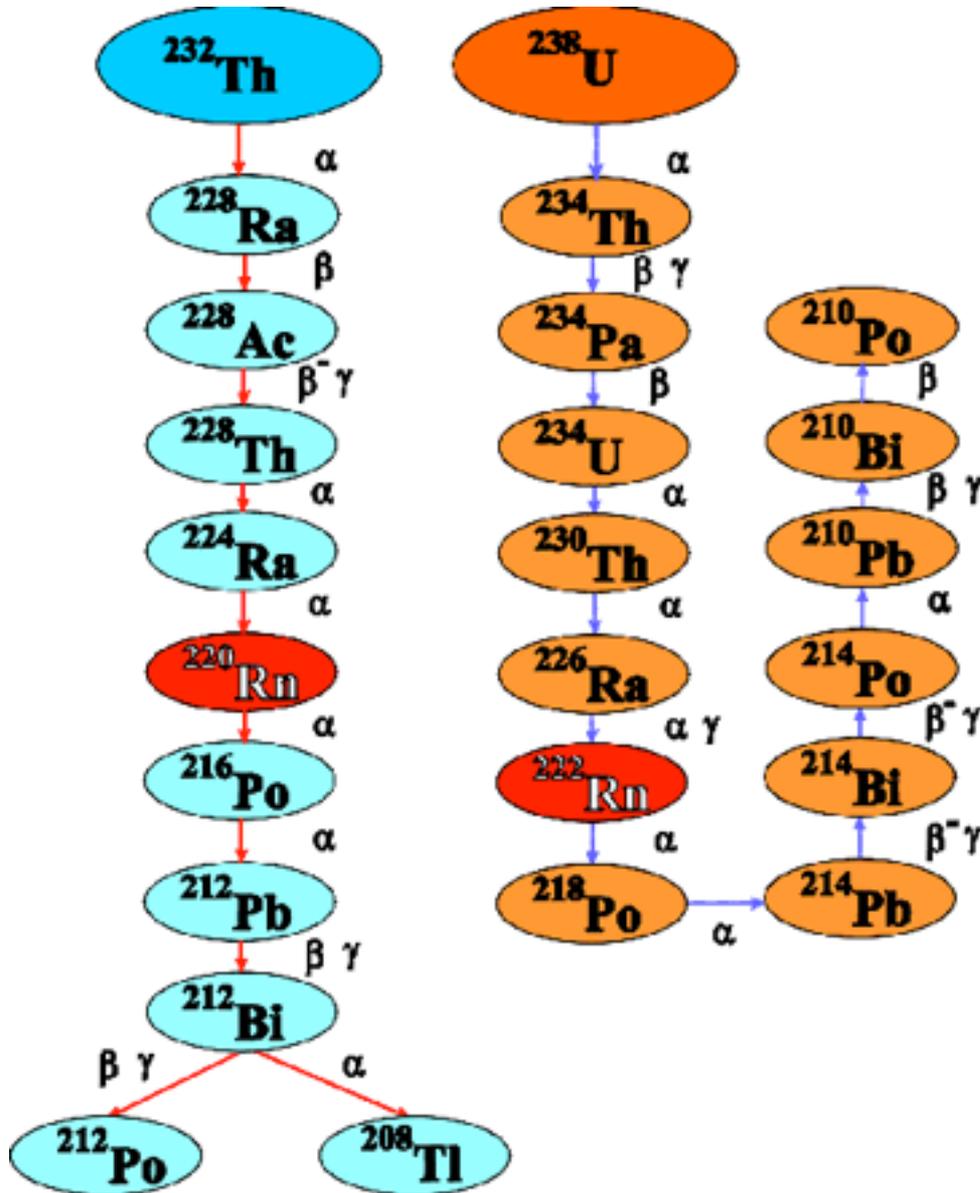
L'interesse della radioprotezione riguarda usualmente dosi tra 0,1 e 10 mGy assorbite in un anno, prossime, spesso inferiori, a quelle del fondo naturale.

Radioattività Naturale: Radiazione Cosmica



- I raggi cosmici provengono dal profondo spazio interstellare e sono costituiti principalmente da particelle cariche positivamente (protoni, alfa, nuclei pesanti)
- C'è anche una componente solare che trae origine dalle esplosioni nucleari consistente principalmente di protoni
- L'interazione con l'atmosfera terrestre comporta l'emissione di numerosi prodotti secondari, tra questi quelli che arrivano al livello del mare sono mesoni, elettroni, fotoni, neutroni e protoni
- Ai poli il contributo di dose dovuto ai raggi cosmici è maggiore rispetto alle zone equatoriali, in quanto il campo magnetico della terra devia la radiazione

Radioattività Naturale: Origine Terrestre



- I principali radionuclidi primordiali sono il K-40, il Rb-87 e gli elementi delle sue serie radioattive dell'U-238 e del Th-232.

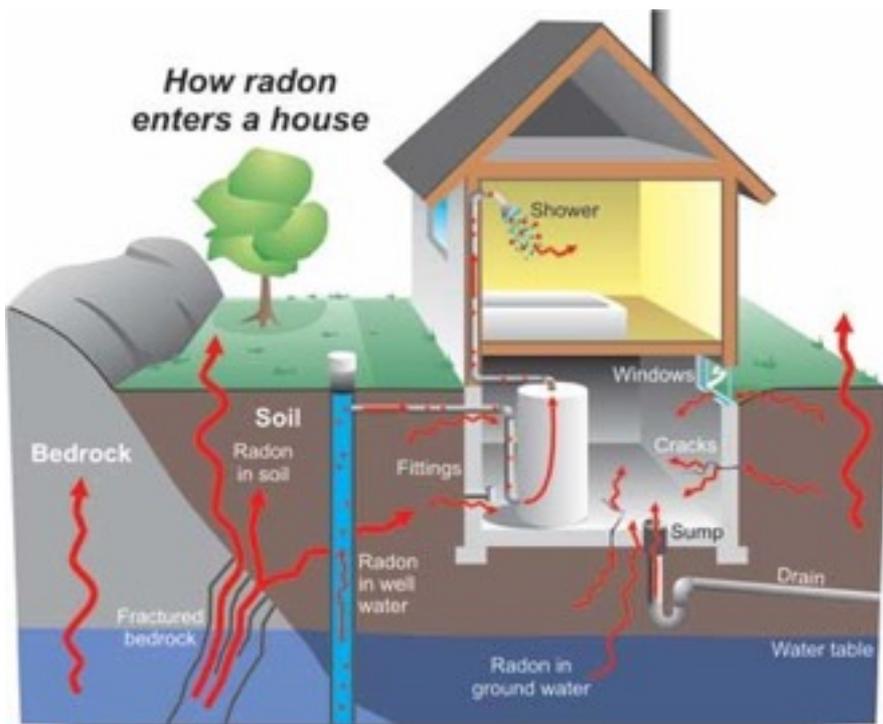
- La concentrazione dei radionuclidi naturali nel suolo e nelle rocce varia fortemente da luogo a luogo in dipendenza della conformazione geologica delle diverse aree.

- Nell'aria la radiazione naturale è dovuta principalmente alle famiglie dell'uranio e del torio, per la formazione di Radon e del Toron (Rn-220). Il radon-222 è 20 volte più importante del Toron.

- Attraverso la catena alimentare entrano nel corpo umano piccole quantità di sostanze radioattive. I principali radioisotopi presenti sono il K-40, il Ra-226, il Ra-228 e il C-14

Radioattività Naturale: Origine Terrestre

Numerosi materiali da costruzione emettono quantità relativamente modeste di radon. Tuttavia la principale sorgente di radon consiste quasi sempre nel terreno sottostante le case.



Anche le acque contengono una certa quantità di radioattività dovuta sia alle piogge che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia alle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici sostanze radioattive presenti nelle rocce e nel suolo.



Most Naturally Radioactive Places

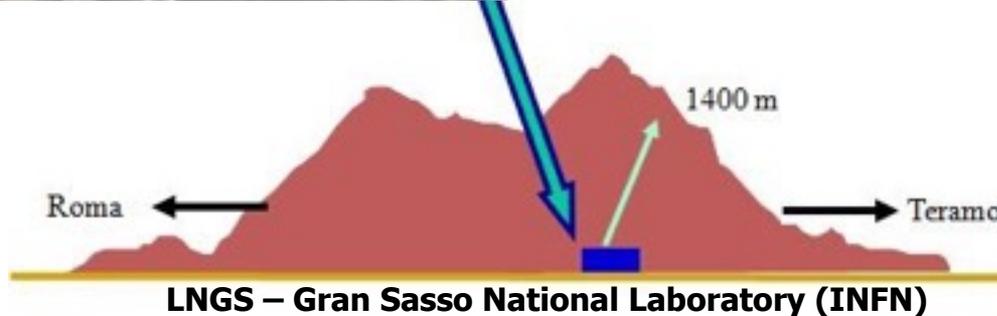
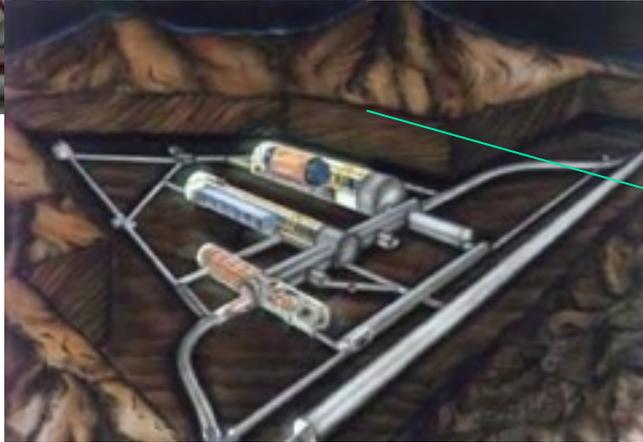
- Guarapari – Brazil
- Ramsar – Iran
- Paralana Hot Springs – Australia
- Yangjiang – Cina
- Karunagappally - India



Can ultra-low dose of environmental radiation have these peculiar effects?

Compatible with our hypothesis of environmental radiation as a conditioning agent, reduced environmental radiation conditions seem to render cells, after several months of protracted culture:

- ✓ Less tolerant to radiation-induced DNA damage
- ✓ Less efficient in scavenging reactive oxygen species



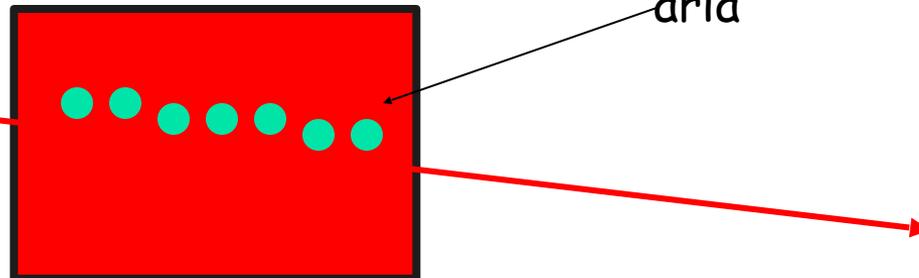
Quali sono le unità di misura delle radiazioni ?

Grandezze Dosimetriche

Esposizione X

Misura la ionizzazione che raggi X o gamma producono in aria

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



Si misura in Coulomb/kg

Molto usata e' la vecchia unita': il Roentgen [R]

$$1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$$

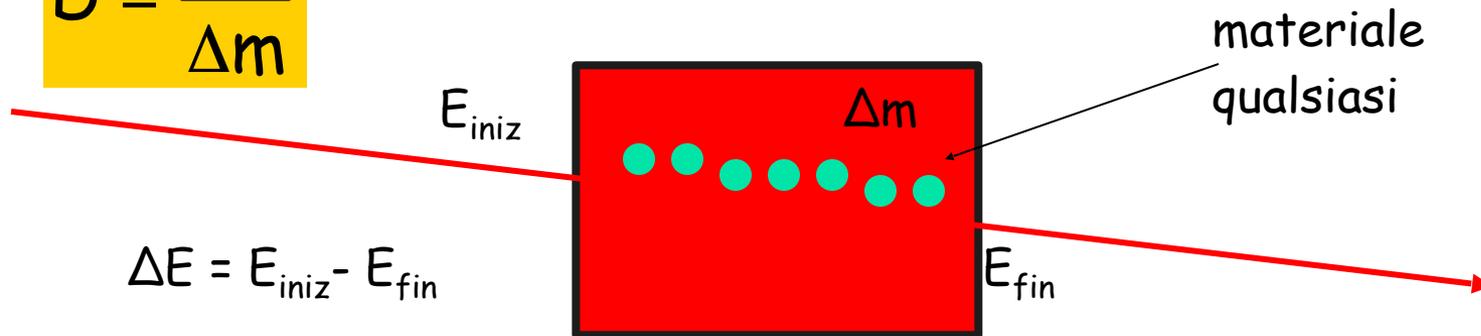
$$1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$$

Grandezze Dosimetriche

Dose assorbita D

Misura l'energia rilasciata dalla radiazione nella unita' di massa

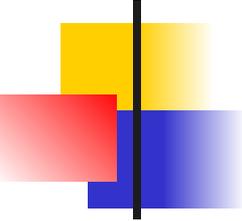
$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$



La dose assorbita D: si misura in gray (Gy), $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$
è legata all'esposizione X
è indipendente dal tipo di radiazione

Cosa succede quando la radiazione interagisce con il tessuto vivente?

Effetto Indiretto



Poiché la materia biologica è costituita per il **70-90 % da acqua** il tipo di reazioni che si producono al seguito del rilascio di energia da parte della radiazione elettromagnetica, sono in generale:

1) La radiazione ionizza la molecola di acqua stacca cioè un elettrone dalla molecola



2) L'elettrone (e^-) procede nell'acqua sino a quando viene catturato da un'altra molecola d'acqua, trasformandola in una molecola a carica negativa.



3) Né l' H_2O^+ , né l' H_2O^- sono stabili e ciascuno si dissocia a formare uno ione e un radicale libero.



Gli ioni H^+ e OH^- si ricombinano per formare una molecola di acqua mentre i radicali liberi agiscono sulle altre molecole che si trovano nella soluzione acquosa creando composti chimici non presenti in precedenza.

Molti dei **composti chimici** che si vengono così a creare sono biologicamente dannosi o sono il presupposto di reazioni a catena dannose.

Cosa succede quando la radiazione interagisce con il tessuto vivente?

Effetto Diretto -> Danno al DNA

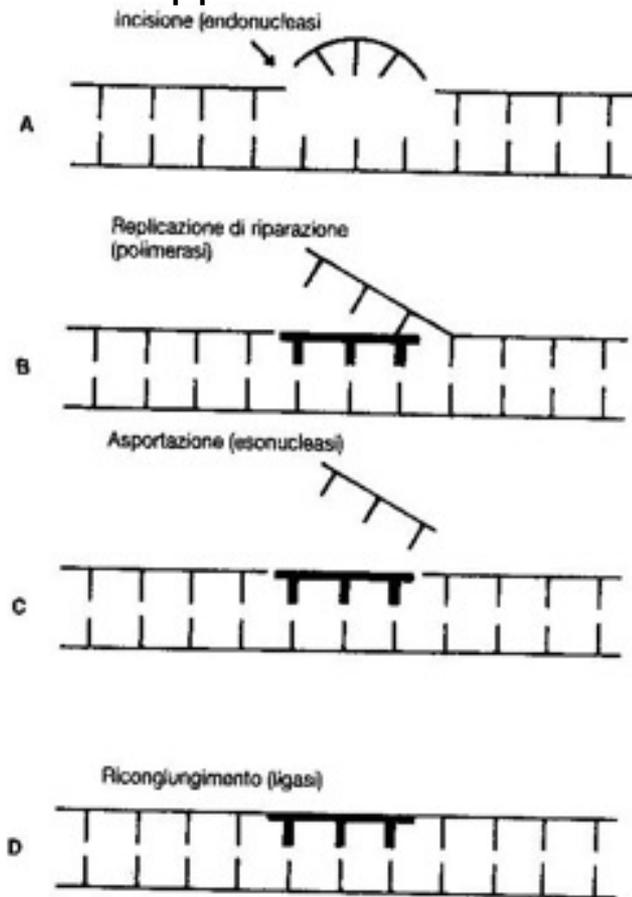
Le radiazioni colpiscono il DNA a tre livelli:

- **Nella cellula già differenziata di tipo somatico**: quando una cellula sana si trasforma in una di un tipo canceroso provocando l'effetto oncogenico oppure l'alterazione interessa le generazioni cellulari successive, determinando il cosiddetto effetto mutagenico.
- **Nella cellula embrionale**: quando le alterazioni genetiche delle cellule embrionali, possono provocare malformazioni, aborti, neonati con gravi deformazioni, si manifesta il cosiddetto effetto teragenico.
- **Nella cellula germinale sessuale**: in questo caso i danni possono provocare sterilità sessuale, malattie ereditarie più o meno gravi, morte del feto nei primissimi stadi di vita.

Le cellule possiedono particolari enzimi che svolgono la funzione di autoriparazione per limitare i danni che si possono verificare durante la duplicazione del DNA. Queste funzioni sono in grado di ripristinare quasi sempre la sequenza originale dei nucleotidi tranne quando gli errori causati dalle radiazioni sono stati troppo elevati; in questo caso si verifica la morte della cellula oppure alterazioni di tipo mutagenico od oncogenico.

Danno al DNA (2) – Rottura della Singola Catena

Si ha una rottura di una singola catena quando ad un danno delle due catene corrisponde la catena complementare intatta nella parte opposta.



E' stata dimostrata la correlazione lineare tra le rotture di una singola catena e la dose di radiazioni nell'intervallo 0,2 – 60000 Gy; questo significa che **non esiste una dose soglia all'effetto delle radiazioni ionizzanti** ma, per quanto piccola, qualsiasi dose può dare un danno.

Questo tipo di danno può essere riparato senza ulteriori conseguenze. Il meccanismo di riparazione è piuttosto semplice: viene asportato il tratto di catena contenente la rottura e viene ricostruito impiegando la catena integra come riferimento ed infine ricollegato con un enzima denominato ligasi.

Effetti Stocastici:

Modello della Linearità Senza Soglia

Il modello della linearità senza soglia si basa sull'assunzione che l'effetto cancerogeno delle radiazioni ionizzanti sia dovuto principalmente al **danneggiamento diretto del DNA** nucleare ed in particolare all'induzione di cluster di rotture di doppia catena.

Ipotizza che:

- la probabilità che una lesione del DNA induca il cancro è indipendente dalla presenza di altre lesioni nella stessa cellula o in cellule vicine

- Questo comporta che **tanto più piccolo è il numero di nuclei irraggiati tanto minore sarà il numero di lesioni indotte e la frequenza dell'effetto cancerogeno (linearità)**

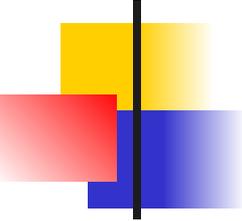
- esiste una probabilità non nulla che una rottura di doppia catena venga mal riparata e possa indurre il cancro

- le lesioni complesse radioindotte sono molto meno riparabili di quelle indotte dal metabolismo cellulare

Mancanza di
una soglia

Il modello è compatibile con i dati epidemiologici e fornisce il vantaggio di consentire la **somma delle dosi** relative a sorgenti diverse, non vi è alcun meccanismo di recupero o riparo biologico alla radiazioni. (Assunzioni Conservative)

Danno al DNA (3) - Rotture di doppia catena



Si ha rottura di doppia catena quando due rotture su singole catene adiacenti provocano il distacco di una parte del DNA.

Una doppia rottura si può avere per un singolo evento ionizzante, che interessa due catene contemporaneamente o per la concomitanza di due diversi eventi che, casualmente, interessano due punti prossimi di due catene della stessa macromolecola.

La rottura contemporanea si ha soprattutto con le radiazioni ad alta densità di ionizzazione; infatti l'elevata densità di rilascio della dose rende estremamente probabile un evento a doppia rottura.

La doppia rottura casuale si ha quando una radiazione produce la seconda rottura prima che la prima sia stata riparata. Questo avviene con maggiore probabilità in presenza di alte dosi ad alta intensità.

Il rapporto tra dose e numero di doppie rotture indotte è descritto dal modello lineare quadratico.

E' possibile una riparazione "tendente all'errore", esistono dei meccanismi che permettono di mantenere la stessa lunghezza della catena, ma non il codice genetico originario eccetto che il frammento distaccato si ricombini spontaneamente.

I diversi tipi di radiazioni presentano gli stessi effetti biologici ?

La probabilità di danno non dipende soltanto dalla dose assorbita ma anche dalla qualità della radiazione, pertanto si fa riferimento ad una particolare grandezza fisica :

Linear Energy Transfer (LET) = dE / dl

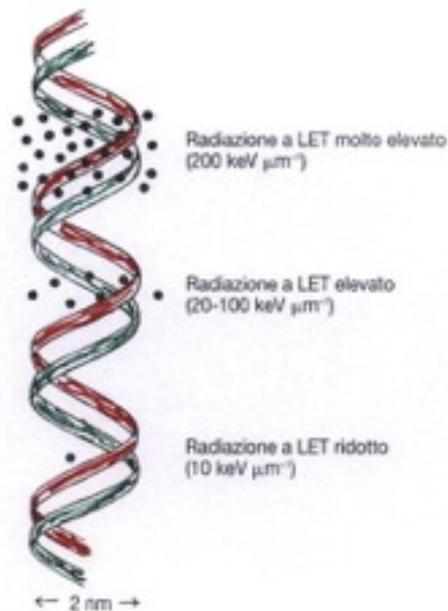
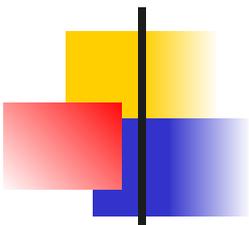
definita come l'energia media persa, dE , nel tratto dl .

Il LET dipende dalla Massa, Carica ed Energia delle particelle ionizzanti

Le radiazioni a basso LET sono: raggi X, gamma e gli elettroni

Le radiazioni ad alto LET sono: i protoni, le particelle cariche pesanti (alpha e carbonio) e i neutroni

Il motivo per cui le radiazioni ad alto LET producono maggiori danni biologici è che una maggiore densità di ionizzazione può provocare più rotture contemporanee sulla molecola del DNA



A parità di dose media assorbita in un tessuto, la distribuzione di energia assorbita da radiazioni ad alto LET è fortemente localizzata, mentre quella assorbita da radiazioni a basso LET è quasi uniforme.

Tracks in chromatin fibre

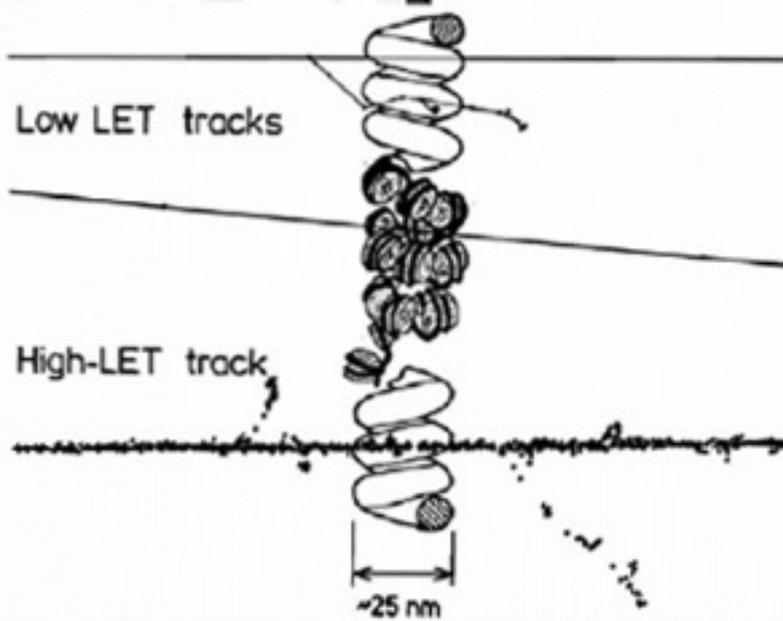
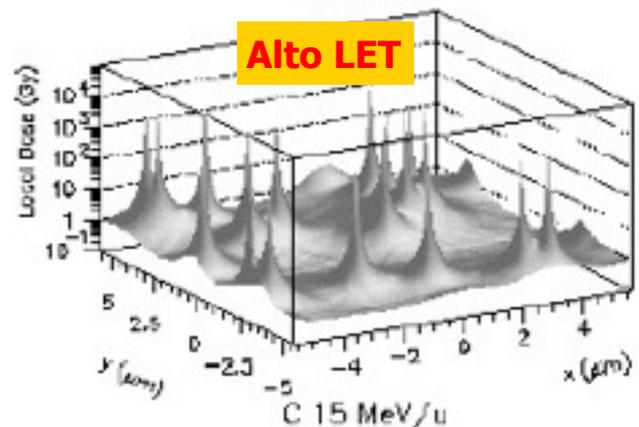
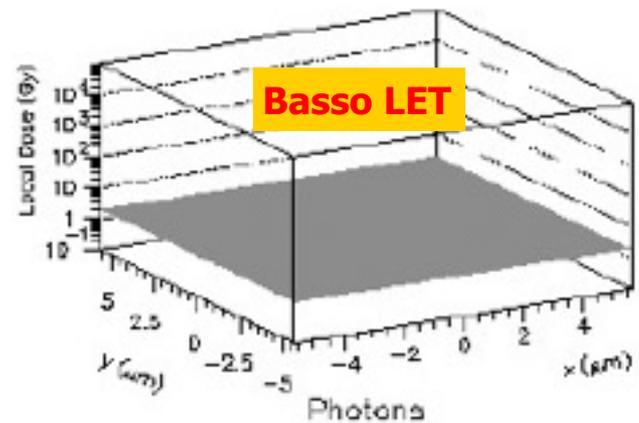


Diagram of high and low LET tracks passing through a section of chromatin (a mixture of DNA and protein).



Efficacia biologica relativa

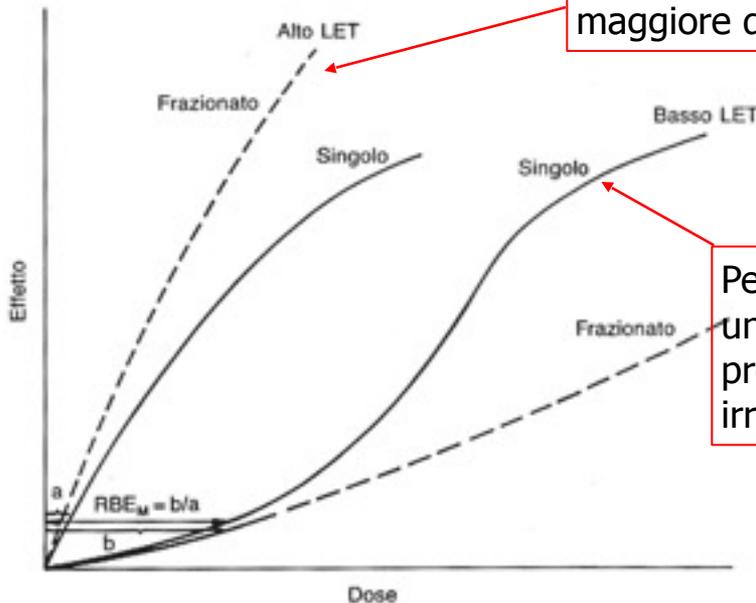
A parità di dose assorbita le radiazioni di alto LET (particelle α , protoni, neutroni) sono più lesive dei raggi X e gamma.

Si definisce la **Relative Biological Effectiveness (RBE)** come il rapporto:

$$RBE \equiv \frac{\text{dose di raggi X o } \gamma}{\text{dose di particelle}}$$

→ Che corrispondono allo stesso effetto biologico

RACCOMANDAZIONI 1990 DELLA ICRP



Per le radiazioni ad alto LET la suddivisione (frazionamento) di una dose o più frazioni separate da un intervallo di tempo, provoca un danno biologico maggiore di quello prodotto da una irradiazione in una unica dose

Per le radiazioni a basso LET la suddivisione (frazionamento) di una dose o più frazioni separate da un intervallo di tempo, provoca un danno biologico minore di quello prodotto da una irradiazione in una unica dose

La ICRP ha introdotto un fattore di peso, w_R , in modo da tenere in conto, a parità di dose, delle differenti pericolosità dei vari tipi di radiazioni.

Tabella A-2. Fattori di peso per la radiazione

Tipo ed intervallo di energia	Fattore di peso per la radiazione, w_R
Fotoni, tutte le energie	1
Elettroni e muoni, tutte le energie	1
Neutroni, energia < 10 keV	5
10 keV - 100 keV	10
> 100 keV - 2 MeV	20
> 2 MeV - 20 MeV	10
> 20 MeV	5
(vedi anche Figura 1)	
Protoni, tranne quelli di rinculo, energia > 2 MeV	5
Particelle alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

Si assume $w_R = 1$ per tutte le radiazioni a basso LET, inclusi i raggi X e γ .

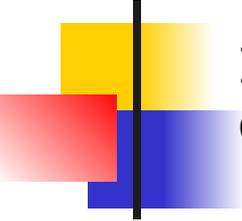
I valori di w_R scelti per le radiazioni ad alto LET si basano sui valori sperimentali della RBE per l'induzione di effetti stocastici a basse dosi.

Viene così introdotta una nuova grandezza: la dose equivalente H che si misura in Sievert (Sv)

La dose equivalente $H = w_R * Dose$

Si usa anche come unità di misura il rem, 1 rem = 0,01 Sv = 10 mSv; 1 Sv = 100 rem

Fattori che influenzano l'effetto delle radiazioni



I fattori fisici, biologici e chimici possono modificare l'entità del danno indotto dalle radiazioni

- **Fattori Fisici**

- La dose può essere somministrata come singola o frazionata
- Alto o Basso LET
- Alta o Bassa Intensità

- **Fattori Biologici**

- Importanza delle fasi del ciclo cellulare in rapporto all'efficacia delle radiazioni nel provocare la morte delle cellule
- Radiosensibilità e Radioresistenza dei tessuti

- **Fattori Chimici**

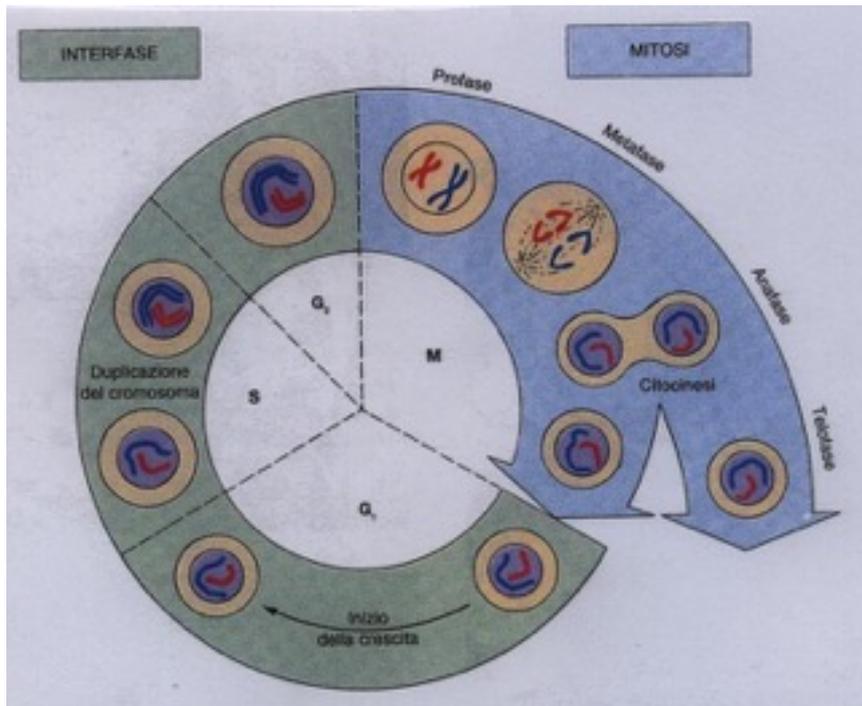
gli agenti chimici che influenzano l'effetto delle radiazioni possono essere

- Sensibilizzanti: Agenti che aumentano l'effetto di una determinata dose di radiazioni, il più importante è l'effetto ossigeno
- Protettori: Fattori che riducono l'effetto di una determinata dose di radiazioni

Fattori Biologici

Importanza delle fasi del ciclo cellulare

La sensibilità della cellula alla radiazione dipende dalla fase nella quale si trova all'interno del ciclo cellulare.



Le cellule sono più sensibili a subire un danno durante il periodo mitotico quando viene duplicato il DNA e i cromosomi. Questo comporta che gli apparati nei quali è più frequentemente la mitosi, come ad esempio il midollo osseo, i testicoli, le ovaie e le pareti interne dell'intestino, sono più sensibili alla radiazione rispetto a quelle che si duplicano più raramente, come quelle dell'apparato nervoso, del cervello, dei muscoli e delle ossa.

Questo porta alla regola generale di Bergonie e Tribondeau:

Le cellule più radiosensibili sono quelle che hanno la più alta frequenza di duplicazione.

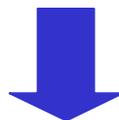
Come si tiene in conto la diversità dei vari organi e tessuti ?

Fattori peso w_T



I fattori peso per i tessuti non sono semplicemente pari ai valori di probabilità relativa di tumori letali specifici. Essi sono stati calcolati considerando anche il detrimento dovuto all'induzione di tumori curabili e alla vita perduta. Inoltre sono stati arrotondati e raggruppati in una lista di valori molto semplificata.

Dose Efficace (E)



Questa grandezza tiene conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano

Grandezza radioprotezionistica ottenuta

moltiplicando la dose equivalente (H) per il fattore di peso di ponderazione (w_T) dell'organo o tessuto irradiato.

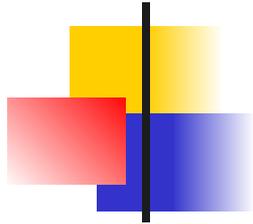
$$E \equiv \sum_T w_T H_T \equiv \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Si misura in Sievert (Sv)

Tabella A-3. Fattori di peso per i tessuti

Tessuto o organo	Fattore di peso per i tessuti, w_T
Gonadi	0,20
Midollo osseo (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
Superfici ossee	0,01
Altri tessuti	0,05

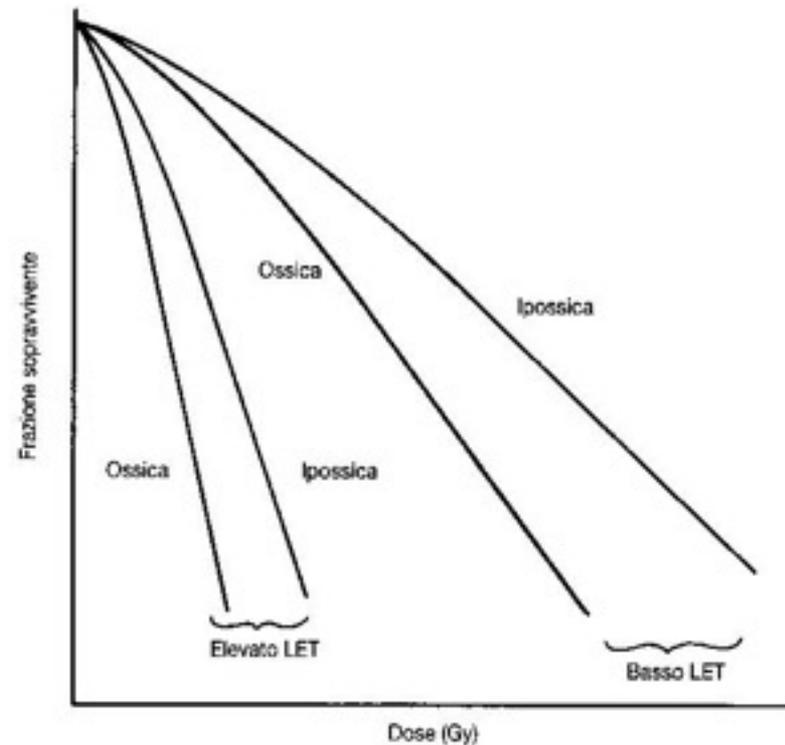
Fattori Chimici Effetto Ossigeno



In assenza di O_2 e di biomolecole, i radicali liberi (H e OH) interagiscono tra loro secondo tutte le possibili combinazioni formando "prodotti molecolari": H_2O , H_2 e H_2O_2

Se nel mezzo irradiato è presente, in sufficiente concentrazione, O_2 , questo, per l'elevata elettroaffinità, catturerà radicali H dando luogo alla formazione del radicale HO_2 che è in grado di sottrarre elettroni alle biomolecole ossidandole e di costituire con esse perossidi organici di elevata tossicità.

Ciò spiega come nei substrati biologici l'effetto indotto a parità di radiazione, sia circa 2-3 volte maggiore in presenza di O_2 .



Tutto questo porta l'ICRP alla stesura dei tre principi base della radioprotezione:

1. Nessuna attività umana che esponga a radiazioni deve essere accolta a meno che la sua introduzione non produca un **beneficio netto e dimostrabile**
2. Ogni esposizione alle radiazioni deve essere tenuta tanto bassa quanto è ragionevolmente ottenibile in base a considerazioni sociali ed economiche
 - Principio **ALARA : As Low As Reasonably Achievable** **(1965)**
3. L'equivalente di dose ai singoli individui **non deve superare i limiti** raccomandati **(1956)**

I tre principi devono essere applicati in sequenza: si passa cioè al secondo quando si sia verificato il primo, e al terzo quando si sia verificato anche il secondo.

I limiti di dose

L'ICRP distingue due categorie:

- a) Gli individui esposti per motivi professionali
- b) La popolazione nel suo insieme

Il limite per i lavoratori professionalmente esposti è:
20 mSv all'anno di Dose Efficace

Supponendo un periodo lavorativo di 50 anni, il lavoratore alla fine della attività potrà al massimo aver assorbito 1 Sv

Poichè l'indice di rischio globale = 1.65×10^{-2} eventi gravi per Sv ricevuto per questo lavoratore esisterà una probabilità dello 1.65% di contrarre una malattia grave (anche con effetti ereditari)

Questa probabilità è calcolata considerando 50 anni lavorativi ed assorbendo sempre il massimo valore di dose previsto !!

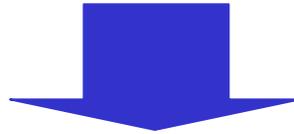
I limiti di dose

L'ICRP distingue due categorie:

- a) Gli individui esposti per motivi professionali
- b) La popolazione nel suo insieme

Il limite di dose equivalente per le persone del pubblico è 1 mSv per anno solare di Dose Efficace

Questo valore è confrontabile con la dose imputabile alla radioattività naturale (raggi cosmici, ^{222}Rn , ^{40}K , ^{14}C , ...), che è stimata tra 1,3 e 2,5 mSv/anno

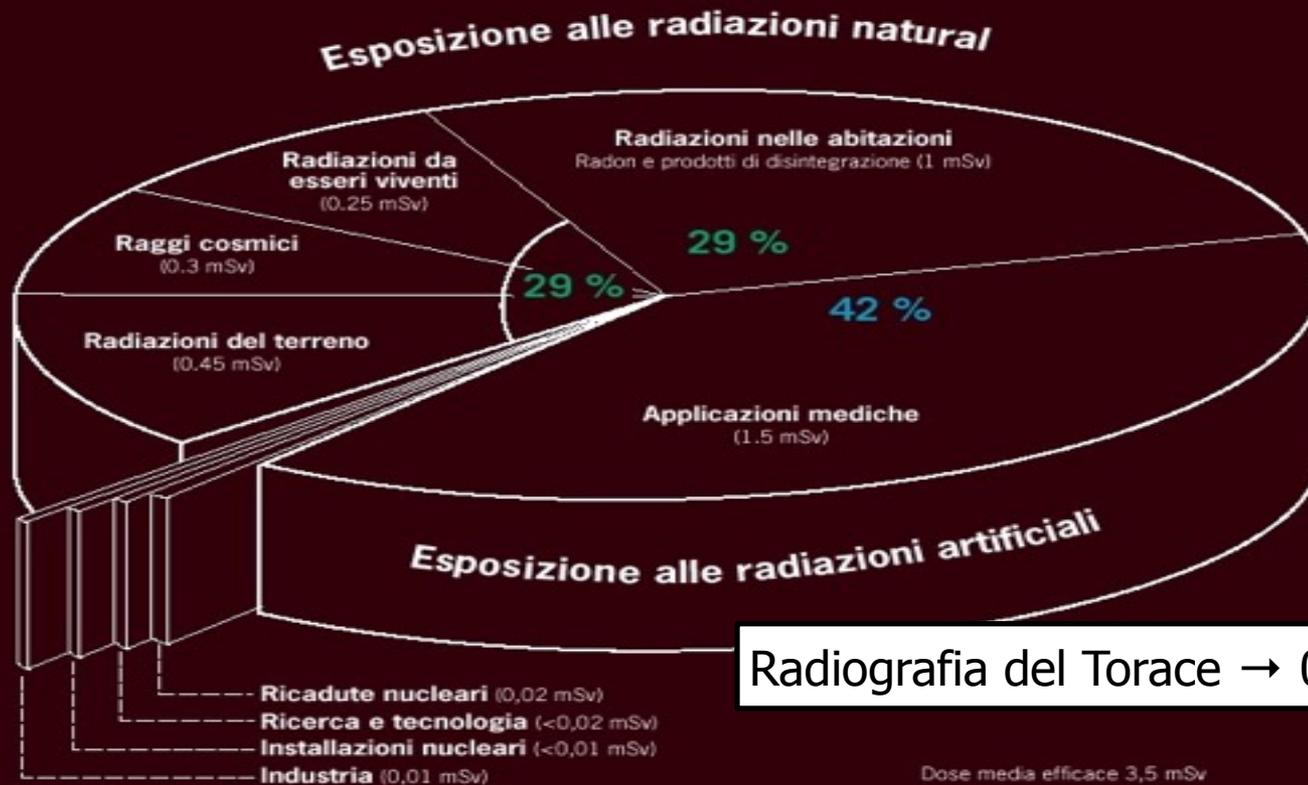


La probabilità di contrarre durante l'intera vita (70 anni) una grave malattia per esposizione naturale a dose di 1 mSv/anno è

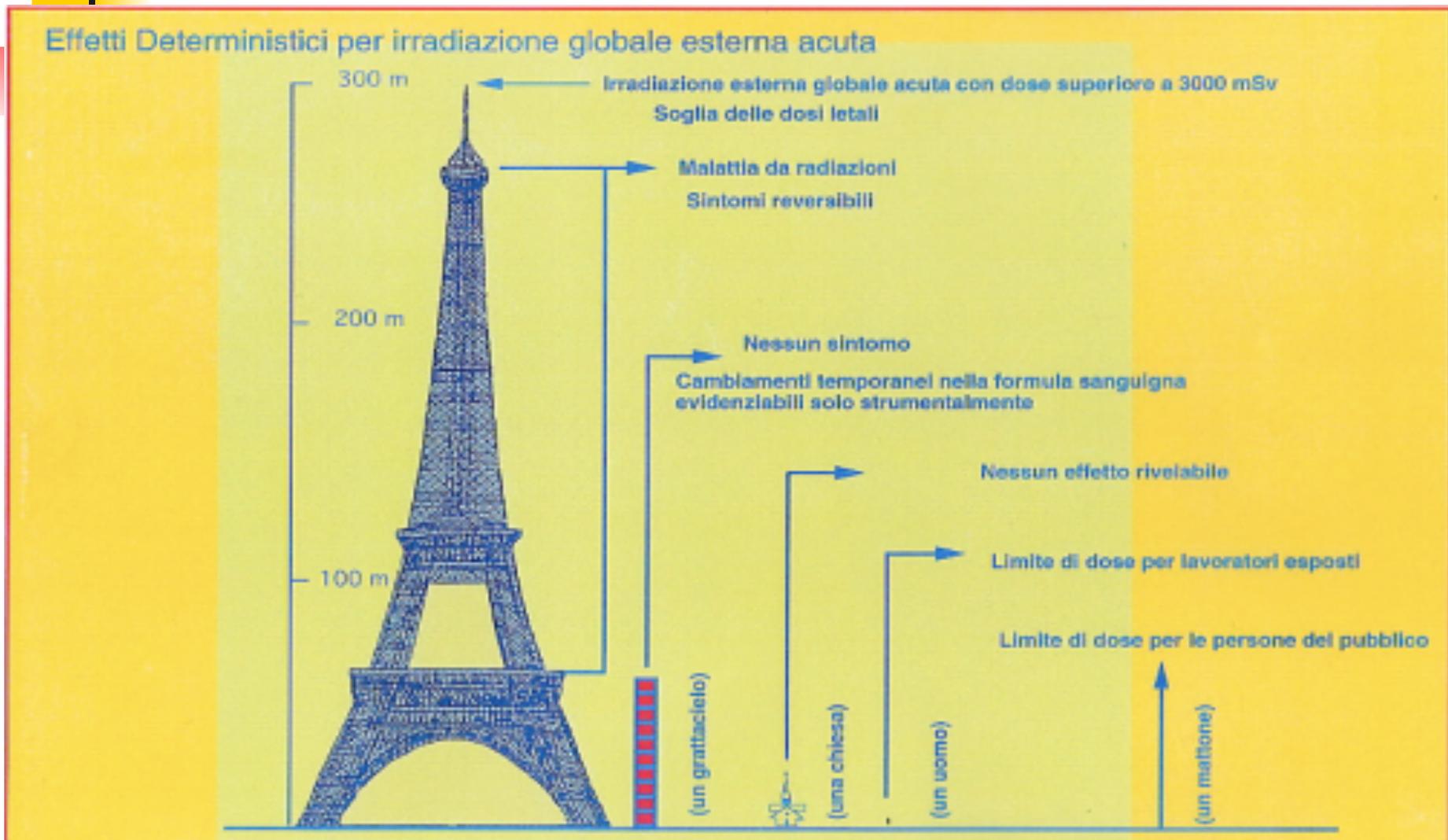
$$P = 1,25 * 10^{-2} * 10^{-3} * 70 = 8,75 * 10^{-4}$$

equivalente ad un individuo ogni 1142

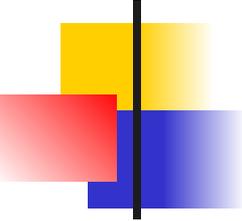
Esposizioni Naturali ed Artificiali

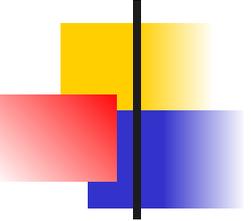


...Allora un esposto a radiazioni ionizzanti rischia più degli altri lavoratori?



Normativa (Storica)

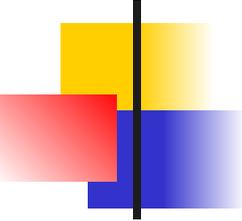
- 
- 1934-35 In Italia viene disciplinato l'esercizio della radiologia
 - Anni cinquanta: Ipotesi di linearità nella relazione dose/effetto stocastico; caduta del concetto di dose di tolleranza; ricerca di una dose a basso rischio biologico.
 - 1952 Le malattie professionali da radio, raggi X e sostanze radioattive sono incluse, in Italia, nella tabella delle lavorazioni per cui è obbligatoria l'assicurazione contro gli infortuni e le malattie professionali.
 - 1956 E' introdotto in Italia per decreto l'obbligo delle visite mediche preventive e periodiche sui lavoratori addetti a mansioni che implicano l'uso del radio, dei raggi X e delle sostanze radioattive



Normativa (Storica)

- 1956 L'ICRP definisce le dosi massime ammissibili al corpo intero per i lavoratori (50 mSv/anno) e per gli individui della popolazione (5 mSv/anno) e propugna la lotta ad ogni rischio indebito.
- 1958 E' obbligatoria l'assicurazione dei medici contro le malattie e le lesioni da raggi X e da sostanze radioattive
- 1959 La CE emana proprie Direttive di Radioprotezione
- 1964 L'Italia ha la legge di radioprotezione (**DPR 185/64**)
- 1965 Viene introdotto il principio ALARA

Normativa Italiana (Moderna)



Le indicazioni dell'ICRP hanno portato in Italia alla stesura di una normativa apposita per la radioprotezione del lavoratore composta da:

- Decreto Legislativo del 17 Marzo 1995, n.230
- Decreto Legislativo del 26 Maggio 2000, n. 241 (Aggiornamento e modifiche alla 230)
- Decreto Legislativo del 9 Maggio 2001, n. 257 (Aggiornamento e modifiche alla 230)
- Decreto Legislativo del 6 Febbraio 2007, n. 52 (Controllo delle sorgenti radioattive sigillate ad alta intensità e delle sorgenti orfane)

Per quanto riguarda in particolare la radioprotezione del paziente, la normativa di riferimento è rappresentata da:

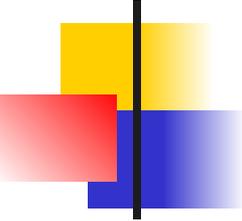
- Decreto Legislativo del 26 Maggio 2000, n. 187

2013/59/Euratom del 5 dicembre 2013 – Nuova Direttiva

Normativa Italiana (2)

L'obiettivo fondamentale del D. Lgs. 230/95 può essere riassunto dall'art. 2 che recepisce le raccomandazioni internazionali emanate dall'ICRP :

1. [**Giustificazione**] Nuovi tipi o nuove categorie di pratiche che comportano un'esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere giustificati, anteriormente alla loro prima adozione o approvazione, dai loro vantaggi economici, sociali o di altro tipo rispetto al detrimento sanitario che ne può derivare.
2. [**Ottimizzazione**] I tipi o le categorie di pratiche esistenti sono sottoposti a verifica per quanto concerne gli aspetti di giustificazione ogniqualvolta emergano nuove ed importanti prove della loro efficacia e delle loro conseguenze.
3. [**ALARA**] Qualsiasi pratica deve essere svolta in modo da mantenere l'esposizione al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali.
4. [**Limitazione**] La somma delle dosi derivanti da tutte le pratiche non deve superare i limiti di dose stabiliti per i lavoratori esposti, gli apprendisti, gli studenti e gli individui della popolazione.



Criteri di classificazione dei lavoratori e delle zone di lavoro

Lavoratore esposto: chiunque sia suscettibile, durante l'attività lavorativa, di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore a uno qualsiasi dei limiti fissati per le persone del pubblico.

I lavoratori che non sono suscettibili di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore a detti limiti sono da classificarsi **lavoratori non esposti**.

I lavoratori esposti, a loro volta, sono classificati in **categoria A** e **categoria B**.

Le donne gestanti non possono svolgere attività in zone classificate o, comunque, attività che potrebbero esporre il nascituro ad una dose che ecceda 1 mSv durante il periodo della gravidanza. E' inoltre vietato adibire le donne che allattano ad attività comportanti un rischio di contaminazione.

Normativa Italiana (4)

I **lavoratori esposti** sono classificati in **categoria A** se sono suscettibili di un'esposizione **superiore**, in un anno solare, a uno dei seguenti valori:

- . 6 mSv di dose efficace;
- . i tre decimi di uno qualsiasi dei limiti di dose equivalente:
per il cristallino (150 mSv in un anno solare),
per pelle, mani, avambracci, piedi e caviglie (500 mSv in un anno solare).

I lavoratori esposti non classificati in categoria A sono classificati in **categoria B**.

ICRP il 21/04/2011 ha pubblicato un nuovo valore di soglia, pari a 20 mSv

Dose efficace	20 mSv/anno	1 mSv/anno
Dose equivalente cristallino	150 mSv/anno	15 mSv/anno
Dose equivalente pelle e estremità	500 mSv	50 mSv

Classificazione degli ambienti di lavoro

La normativa prescrive al datore di lavoro di classificare e segnalare gli ambienti in cui è presente il rischio di esposizione alle radiazioni ionizzanti e regolamentarne l'accesso.

viene definita **Zona Controllata**:

Un ambiente di lavoro in cui sussistono per i lavoratori in essa operanti le condizioni per la classificazione di lavoratori esposti di Categoria A

viene definita **Zona Sorvegliata**:

Un ambiente di lavoro in cui può essere superato in un anno solare uno dei pertinenti limiti fissati per le persone del pubblico e che non è zona controllata.

Normativa Italiana (6)

L'accertamento delle condizioni che portino alla classificazione dei lavoratori è di competenza esclusiva dell'esperto qualificato; al datore di lavoro compete, ovviamente, solo la definizione delle attività che i lavoratori devono svolgere.

Inoltre l'esperto qualificato deve:

- fornire indicazioni al datore di lavoro affinché gli ambienti di lavoro in cui sussista un rischio da radiazioni vengano individuati, delimitati, segnalati, classificati in zone e che l'accesso ad essi sia adeguatamente regolamentato;
- fornire indicazioni al datore di lavoro affinché i lavoratori interessati siano classificati ai fini della radioprotezione;
- fornire indicazioni al datore di lavoro perché siano forniti ai lavoratori, ove necessario, i mezzi di sorveglianza dosimetrica e di protezione;
- fornire indicazioni al datore di lavoro al fine di rendere edotti i lavoratori nell'ambito di un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione.

Sorveglianza Fisica:

La legge prevede che i datori di lavoro assicurino la sorveglianza fisica per mezzo di esperti qualificati iscritti in elenchi nominativi presso l'Ispettorato medico centrale del lavoro

Sorveglianza Medica (art. 83):

Il datore di lavoro deve provvedere ad assicurare mediante uno o più medici la sorveglianza medica dei lavoratori esposti. Tale sorveglianza è basata sui principi che disciplinano la medicina del lavoro.

La sorveglianza medica dei lavoratori esposti che non sono classificati in categoria A è assicurata tramite medici competenti o medici autorizzati. La sorveglianza medica dei lavoratori di categoria A è assicurata tramite medici autorizzati. Il datore di lavoro non può assegnare le persone di cui al comma 1 ad alcuna attività che le esponga al rischio di radiazioni ionizzanti qualora le conclusioni mediche vi si oppongano.

Rischio da irraggiamento esterno



Sono 3 gli elementi fondamentali per la radioprotezione da irraggiamento esterno:

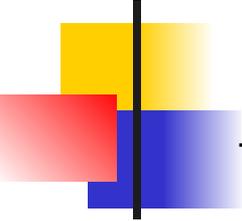
1. **Tempo** (durata dell'esposizione): determina in maniera lineare, a parità di condizioni di esposizione, l'intensità dell'esposizione e conseguentemente del rischio radiologico;

2. **Distanza**: la dose di radiazioni segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza rispetto al punto di emissione:

$$D_1 r_1^2 = D_2 r_2^2$$

dove D_1 è l'intensità di dose alla distanza r_1 dalla sorgente e D_2 è l'intensità di dose alla distanza r_2 dalla sorgente (esempio: passando dalla distanza di 1 m a quella di 2 m, l'intensità di dose si riduce di un fattore 4)

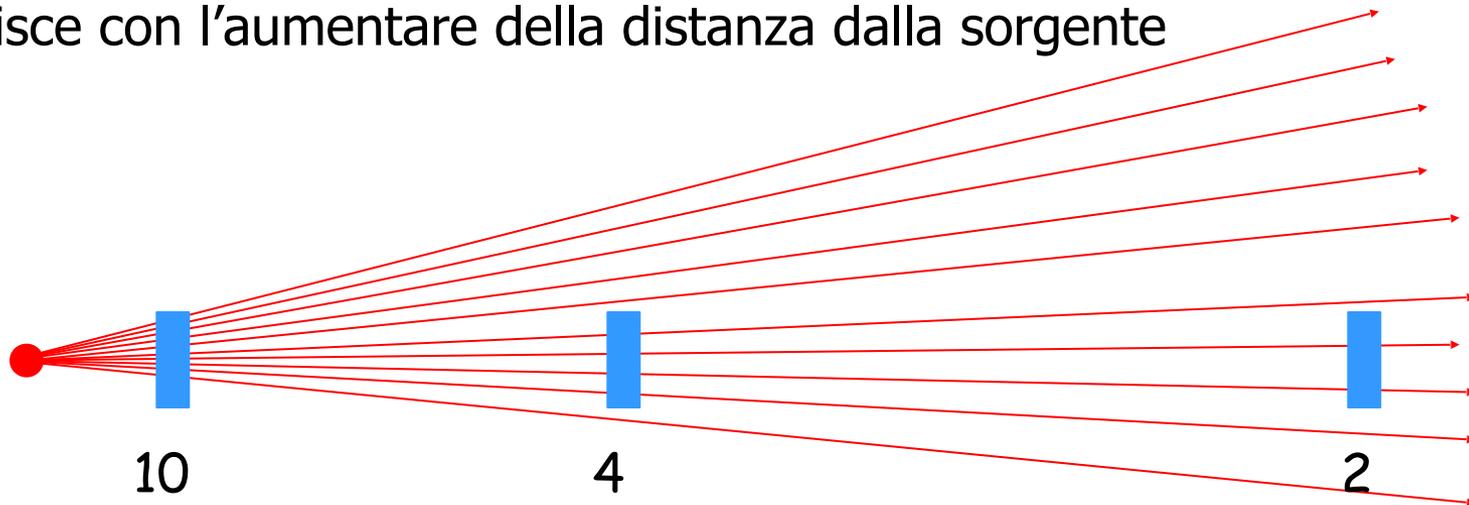
Rischio da irraggiamento esterno (2)



Flusso : numero di particelle per unità di superficie

Intensità di flusso : numero di particelle per unità di superficie e per unità di tempo

Diminuisce con l'aumentare della distanza dalla sorgente



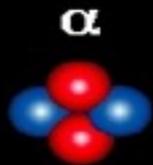
Rischio da irraggiamento esterno (3)

3. disponibilità di schermature: la radiazione viene attenuata a seguito dell'interazione con il materiale con cui interagisce; pertanto, la dose da radiazione in un punto viene ridotta interponendo del materiale tra la sorgente e il punto d'interesse. La quantità e il tipo di materiale necessario dipende dal tipo della radiazione: ad esempio le radiazioni X sono penetranti e, nel caso di energie elevate, richiedono spessori considerevoli di piombo (Pb)

Spessore in Pb	50 kV	75 kV	100 kV
0.25 mm	250	20	10
0.50 mm	10000	200	50
1 mm	>10000	3000	300
2 mm	>>10000	>>10000	5000

Fattori di attenuazione della radiazione X per diversi spessori di Pb e diverse tensioni di lavoro

Barriere in funzione della radiazione incidente



Raggi alfa: percorrono qualche centimetro in aria; vengono arrestati da un foglio di carta

β



Raggi beta: percorrono qualche metro in aria; vengono arrestati da un foglio di alluminio di qualche millimetro di spessore

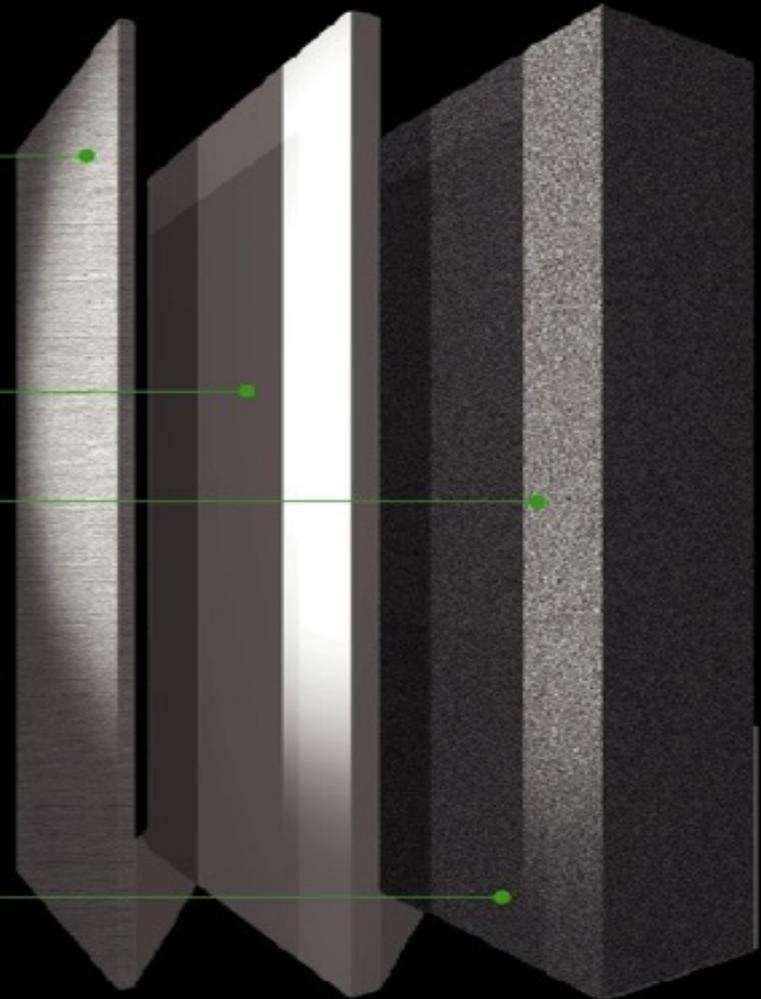


Raggi gamma: percorrono, a seconda dell'energia, fino a molte centinaia di metri in aria; per arrestarli servono notevoli spessori di cemento o di piombo

Neutroni



Neutroni: la penetrazione dipende dall'energia; per arrestarli servono notevoli spessori di cemento, di acqua o di paraffina



Sorgenti radioattive: una classificazione delle sorgenti comunemente impiegate può essere fatta in relazione alla loro forma fisica e quindi in funzione del tipo di rischio che essi presentano. Per cui possiamo distinguere:

SORGENTI SIGILLATE: formate da materie radioattive solidamente incorporate in materie solide e di fatto inattive o incapsulate in un'involucro inattivo rigido (solitamente di acciaio o materiale plastico) che presentano una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive (contaminazione).

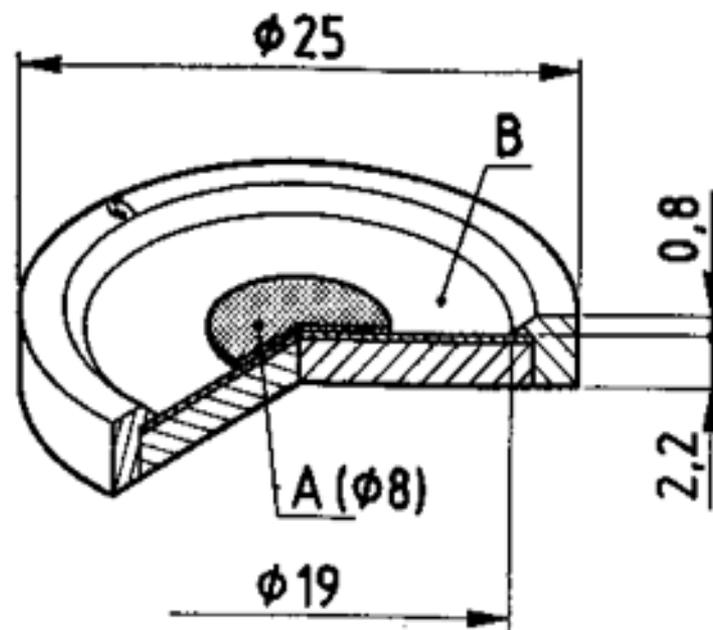
Il tipo di capsula e le prove di robustezza che vengono fatte sulle singole sorgenti sono definite da norme standardizzate e dipendono dal radionuclide, dal tipo di sorgente e dallo scopo di impiego.

SORGENTI NON SIGILLATE: : formate da materie radioattive utilizzate nello stato fisico in cui si trovano (generalmente polveri, liquidi o gas) senza nessun incapsulamento e per le quali, quindi, non può essere esclusa la dispersione.

Sorgenti α

Le radiazioni α sono poco penetranti e quindi il materiale attivo deve essere poco schermato dall'involucro o addirittura con una parte che sia a diretto contatto con l'esterno. Generalmente esse sono a forma di disco con il materiale attivo elettrodepositato su di una superficie di acciaio.

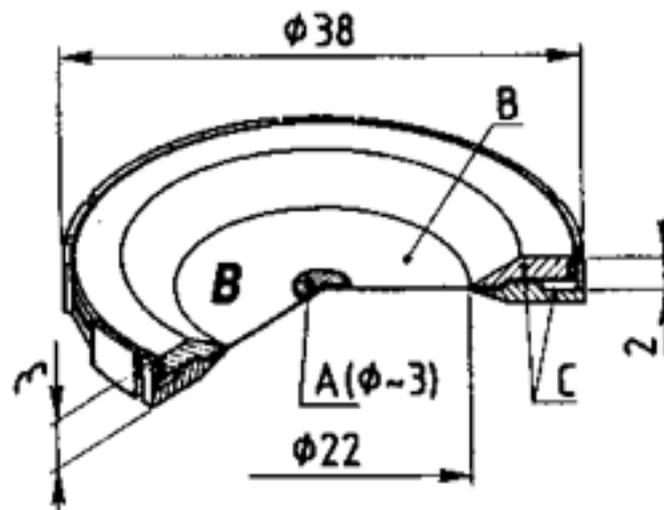
Alcune sono ricoperte da un sottilissimo strato di materiale inattivo: mylar, kapton, nichel, oro, argento, ecc...



Cortesemente fornita da Salvo Russo, LNS-INFN

Sorgenti β

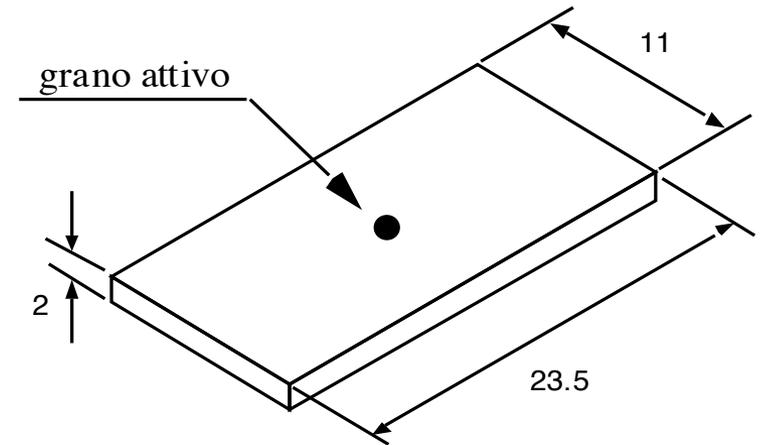
Anche queste sorgenti, essendo le radiazioni poco penetranti, hanno una finestra sottile da cui fuoriescono le radiazioni. Il materiale radioattivo è quasi sempre ricoperto da un sottile strato inattivo. Spesso il radionuclide è contenuto fra due fogli sottili per permettere la rivelazione delle radiazioni a 180° .



Sorgenti γ

le radiazioni γ sono molto penetranti e quindi il materiale attivo può essere racchiuso in capsule di plastica o di acciaio le cui caratteristiche dipendono dall'attività della sorgente e dalle condizioni operative a cui essa sarà sottoposta durante l'impiego.

Es. 1: il materiale attivo è assorbito in un grano di diametro di circa 1 mm, incorporato in una capsula di plastica trasparente. Il grano è visibile e posizionato al centro della capsula.



Cortesemente fornita da Salvo Russo, LNS-INFN

SEGNALETICA



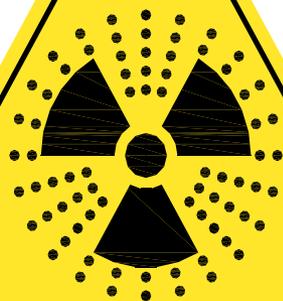
RADIAZIONI IONIZZANTI

Simbolo generico



IRRADIAZIONE

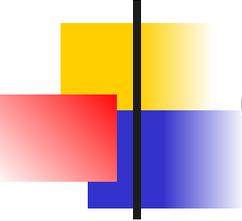
Simbolo specifico



CONTAMINAZIONE

Simbolo specifico

Cortesemente fornita da Salvo Russo, LNS-INFN



Grazie per l'attenzione

