

Aspetti di fisica ambientale: la radioattività

Maria Luisa De Giorgi
16 febbraio 2018



Piano Lauree Scientifiche



RadioLab

Radioactivity Laboratory

Cagliari
Catania
Cosenza – LNF
Lecce
LNS

Milano
Napoli
Siena-PI
Torino
Trieste



Progetto triennale: 2017 - 2019

L'attività vede il **coinvolgimento attivo degli studenti**

- **in aula** per lo studio e la comprensione del problema e dei metodi per risolverlo
- **a scuola**, con l'esposizione dei dosimetri (ma anche case, edifici che appaiono particolarmente interessanti ai fini di misure di radioattività),
- **in laboratorio** per la lettura dei dosimetri e l'elaborazione dei dati acquisiti.

In totale circa 5000 studenti coinvolti ogni anno!

Finalità del Progetto

Sensibilizzazione degli insegnanti, delle istituzioni, delle famiglie su tematiche che riguardano il nucleare ed in particolare il problema Radon

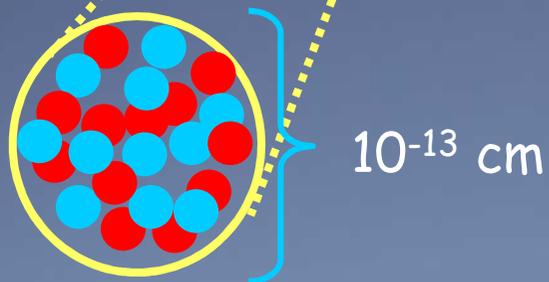
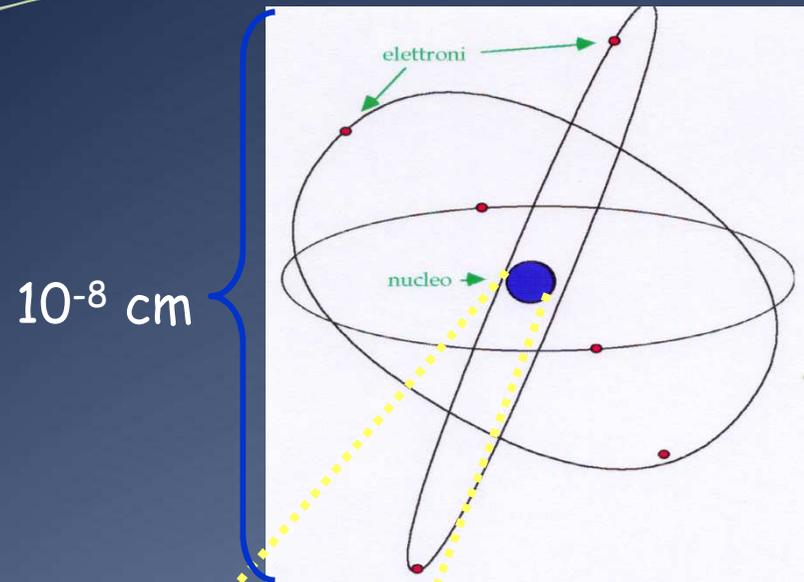
Divulgazione scientifica: gli stessi studenti partecipanti veicolano informazioni di radioattività ambientale nel loro ambiente scolastico e familiare

Conoscenza di argomenti inerenti la problematica: radioattività ambientale, origine e migrazione del Radon, tecniche di misura e percezione del rischio

Sorgenti di radiazioni e principi di radioprotezione



Gli atomi...

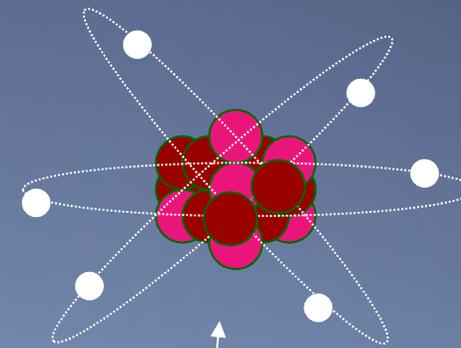
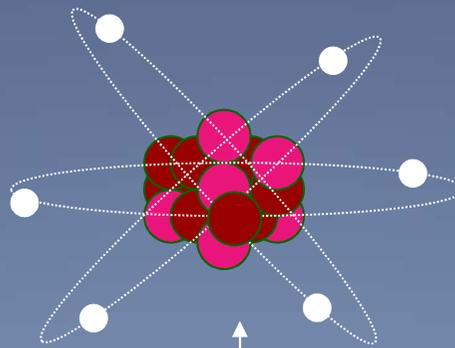
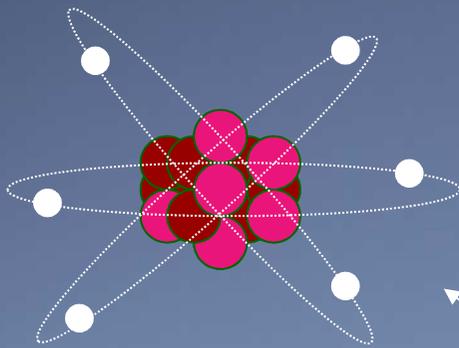


...e i nuclei

Il nucleo è composto da
protoni ● e neutroni ●
interagenti tramite le **forze nucleari**

Atomi e Isotopi

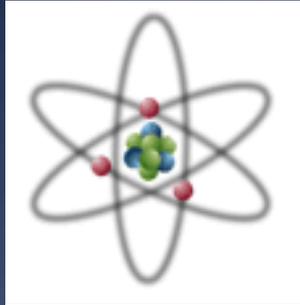
ISOTOPI: atomi dello stesso elemento, con uguale numero di protoni ma con differente numero di neutroni



- protoni (z)
- neutroni (n)
- elettroni (z)

stabile

radioattivo



La **radioattività** è il fenomeno per cui alcuni nuclei si trasformano in altri emettendo particelle.

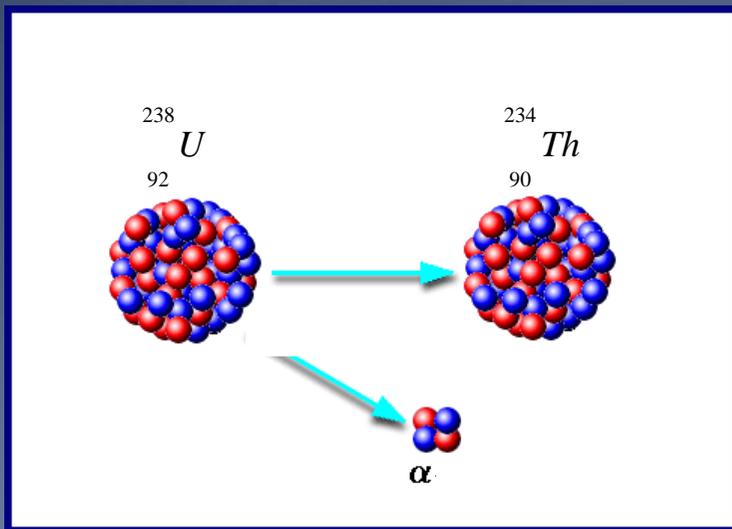
Non è stata inventata dall'uomo, ma è un fenomeno naturale, presente ovunque: nelle Stelle, nella Terra e nei nostri stessi corpi.

Gli isotopi presenti in natura sono quasi tutti stabili. Tuttavia, alcuni isotopi naturali, e quasi tutti gli isotopi artificiali, sono instabili, a causa di un eccesso di protoni e/o di neutroni. Tale instabilità provoca la trasformazione spontanea in altri isotopi accompagnata dall'emissione di particelle. Questi isotopi sono detti **isotopi radioattivi**.

La trasformazione (**decadimento radioattivo**) di un nucleo radioattivo porta alla produzione di un altro nucleo, che può essere anch'esso radioattivo oppure stabile.

I decadimenti radioattivi

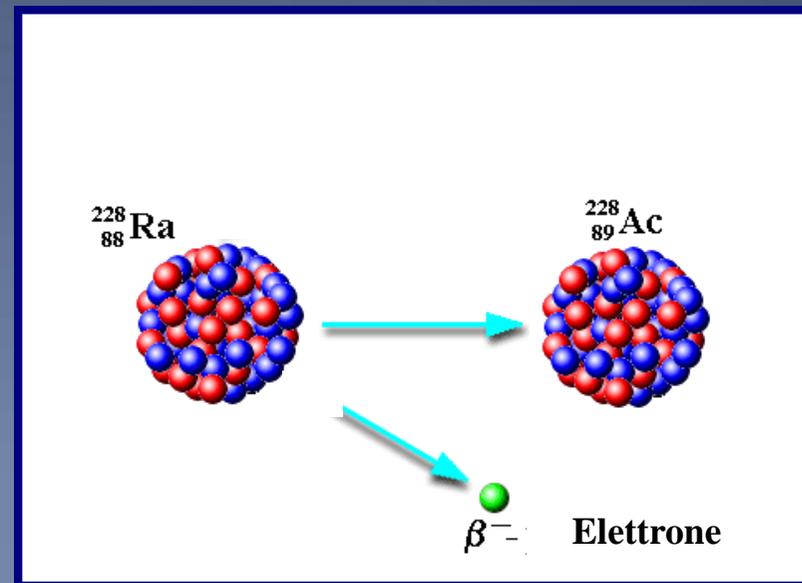
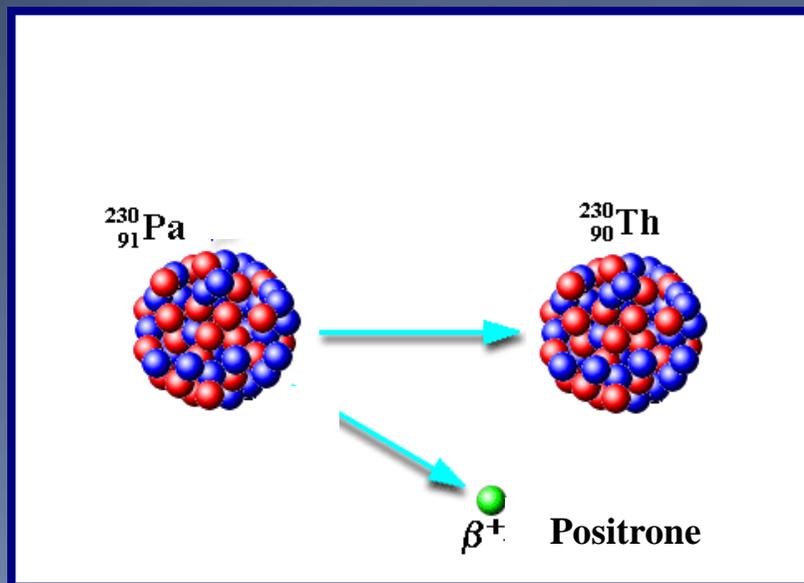
Decadimento α



Le radiazioni α sono poco penetranti e possono essere completamente bloccate da un semplice foglio di carta

I decadimenti radioattivi

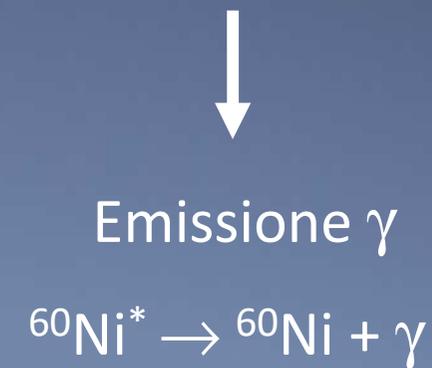
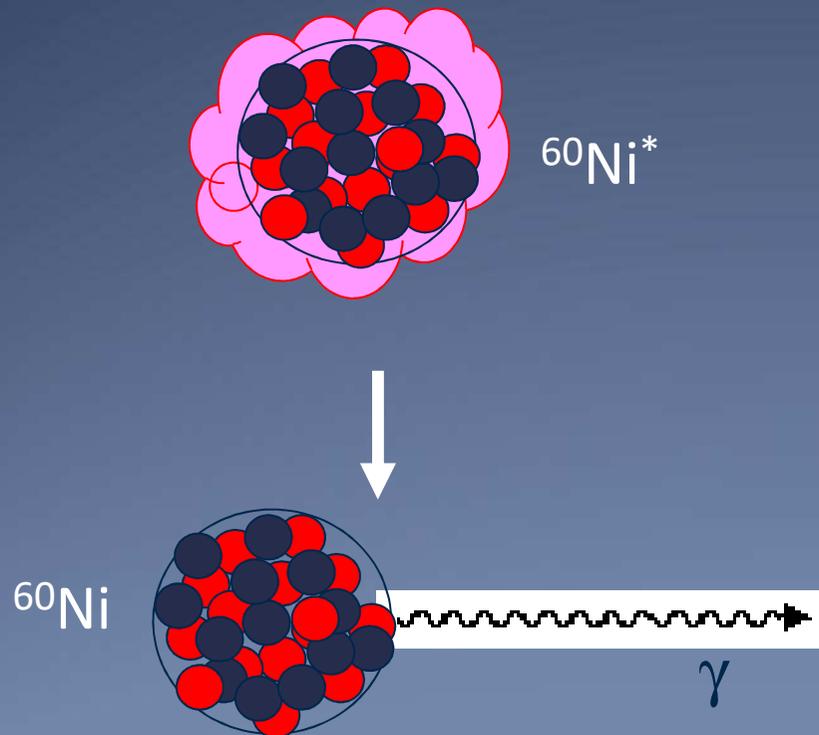
Decadimento β



Le radiazioni β sono più penetranti di quelle α , ma sono bloccate da piccoli spessori di materiali metallici

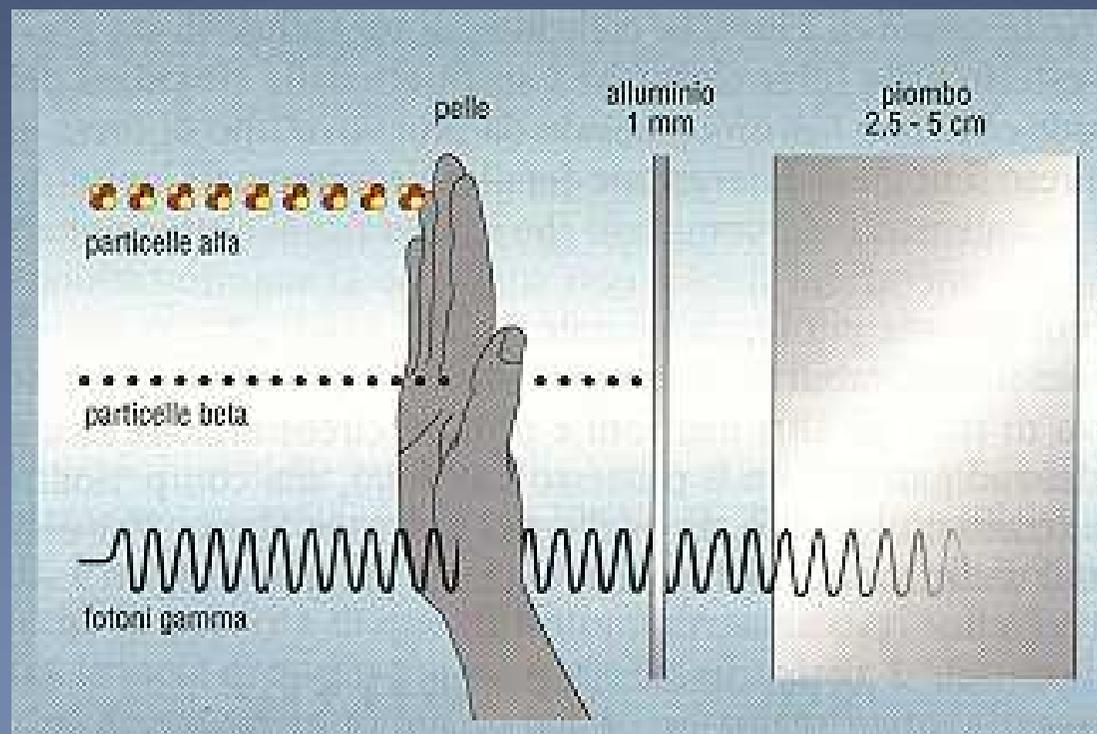
La diseccitazione gamma

Molto frequentemente il nucleo "figlio" viene creato in un stato eccitato e si diseccita emettendo radiazione gamma



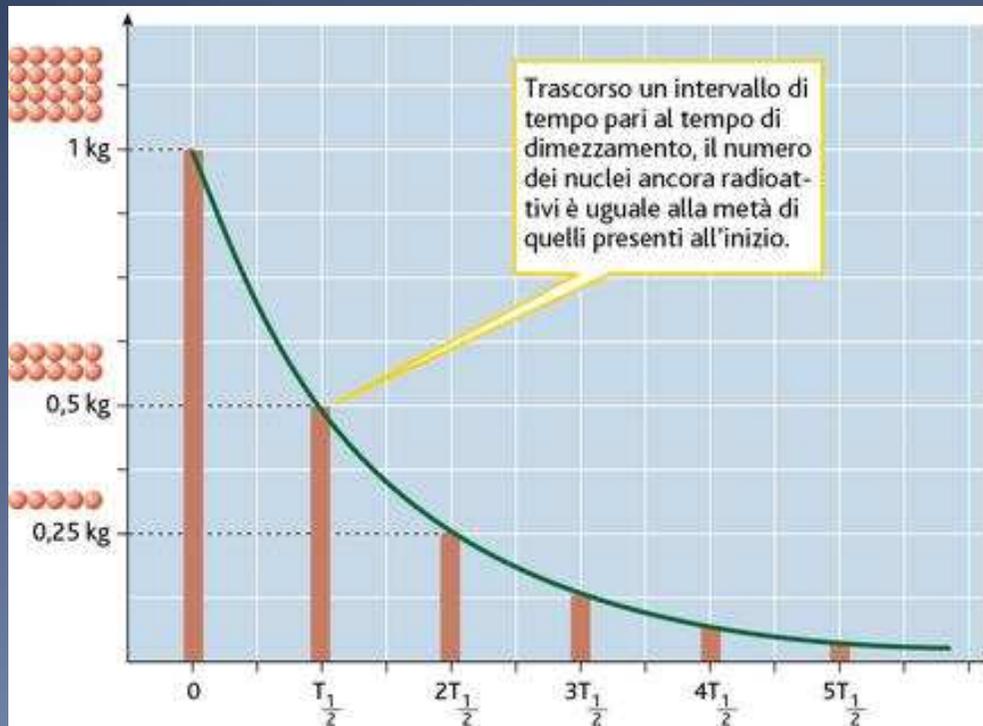
Al contrario delle radiazioni α e β , le radiazioni γ sono molto penetranti, e per bloccarle occorrono materiali ad elevata densità come il piombo.

Capacità di penetrazione



Legge del decadimento radioattivo

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}$$



Si definisce tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$) il tempo in cui il numero di nuclei instabili si dimezza, cioè

$$N(T_{1/2}) = N_0/2$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

può variare dalle migliaia di anni alle frazioni di secondo

Attività di una sorgente radioattiva

La quantità di radiazione emessa da una sorgente si misura con una grandezza chiamata **attività** (A):

A = numero di atomi che si disintegrano in un secondo

Si misura in **Bequerel**

1 Bq = 1 disintegrazione al secondo

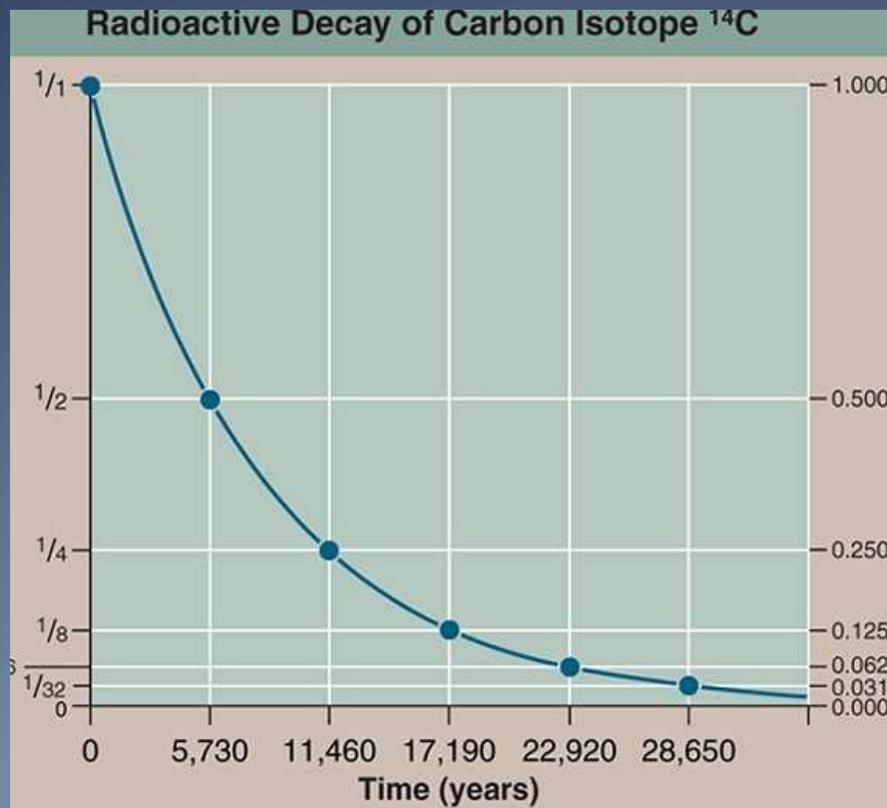
In passato si misurava in **Curie**

1 Ci = 37 miliardi ($3.7 \cdot 10^{10}$) di disintegrazioni al secondo

L'attività diminuisce nel tempo con un tempo di dimezzamento tipico per ogni sostanza radioattiva

Legge del decadimento radioattivo

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-t/\tau}$$



Si definisce tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$) il tempo in cui l'attività si dimezza, cioè

$$A(T_{1/2}) = A_0/2$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

può variare dalle migliaia di anni alle frazioni di secondo

Alcuni esempi

| ISOTOPO | RAD. EMESSA | $T_{1/2}$ |
|-------------------|-------------------|------------------------|
| ^{60}Co | elettroni e gamma | 5.27 anni |
| ^3H | elettroni | 12.3 anni |
| ^{137}Cs | elettroni e gamma | 30 anni |
| ^{15}O | elettroni e gamma | 123 secondi |
| ^{40}K | elettroni e gamma | $1.26 \cdot 10^9$ anni |
| ^{14}C | elettroni | 5730 anni |

Il tempo di dimezzamento ha importanti conseguenze sulla radioprotezione:

A parità di Attività iniziale

- *una sorgente con tempo di dimezzamento lungo emette radiazioni (ed è quindi potenzialmente pericolosa) per molto tempo*
- *una sorgente con tempo di dimezzamento breve si esaurisce rapidamente, ma “concentra” l’emissione di radiazione in un tempo breve con possibilità di produrre danni rilevanti anche per esposizioni limitate nel tempo*

CALCOLIAMO!!!!

Radioattività nel corpo umano (70 kg)

| Elemento | Percentuale nel corpo umano | Radioisotopo | Abbondanza isotopica |
|----------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|
| Carbonio | 23 % | ^{14}C | $1.5 \cdot 10^{-10} \%$ |
| Potassio | 0.23 % | ^{40}K | 0.01 % |

Radioattività in una banana (150 g)

| Elemento | Percentuale | Radioisotopo | Abbondanza isotopica |
|----------|-------------|-----------------|----------------------|
| Potassio | 0.35 % | ^{40}K | 0.01 % |




$$M(\text{C}) = 70 \times 0.23 = 16 \text{ kg (carbonio)}$$

$$M(^{14}\text{C}) = 16 \times 1.5 \cdot 10^{-12} = 24 \cdot 10^{-12} \text{ kg} = 24 \cdot 10^{-9} \text{ g}$$

$$N(^{14}\text{C}) = (M(^{14}\text{C}) \times N_A) / A = (24 \cdot 10^{-9} \times 6.02 \cdot 10^{23}) / 14 = 10.32 \cdot 10^{14}$$

$$A = \lambda N$$

$$\lambda = 0.693 / T_{1/2}(\text{s})$$

$$T_{1/2}(\text{s}) = 5730 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 1.8 \cdot 10^{11} \text{ s}$$

$$A = 0.693 \times 10.32 \cdot 10^{14} / 1.8 \cdot 10^{11} = 3.97 \cdot 10^3 \text{ dis/s} = 4000 \text{ Bq}$$


$$M(\text{K}) = 70 \times 0.0023 = 0.16 \text{ kg} = 160 \text{ g (potassio)}$$

$$M(^{40}\text{K}) = 160 \times 0.0001 = 160 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

$$N(^{40}\text{K}) = (M(^{40}\text{K}) \times N_A) / A = (160 \cdot 10^{-4} \times 6.02 \cdot 10^{23}) / 40 = 24 \cdot 10^{19}$$

$$A = \lambda N$$

$$\lambda = 0.693 / T_{1/2}(\text{s})$$

$$T_{1/2}(\text{s}) = 1.26 \cdot 10^9 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 4 \cdot 10^{16} \text{ s}$$

$$A = 0.693 \times 24 \cdot 10^{19} / 4 \cdot 10^{16} = 4 \cdot 10^3 \text{ dis/s} = 4000 \text{ Bq}$$


$$M (\text{K}) = 150 \times 0.0035 = 0.525 \text{ g (potassio)}$$

$$M (^{40}\text{K}) = 0.525 \times 0.0001 = 0.525 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

$$N (^{40}\text{K}) = (M (^{40}\text{K}) \times N_A) / A = (0.525 \cdot 10^{-4} \times 6.02 \cdot 10^{23}) / 40 = 8 \cdot 10^{17}$$

$$A = \lambda N$$

$$\lambda = 0.693 / T_{1/2}(\text{s})$$

$$T_{1/2}(\text{s}) = 1.26 \cdot 10^9 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 4 \cdot 10^{16} \text{ s}$$

$$A = 0.693 \times 8 \cdot 10^{17} / 4 \cdot 10^{16} = 1.4 \cdot 10 \text{ dis/s} = 14 \text{ Bq}$$

Radiazioni ionizzanti

“*ionizzare*” un atomo significa strappare uno o più elettroni dalla loro orbita intorno al nucleo:

l'atomo non è più “*neutro*” ma diventa carico positivamente e si chiama “*ione*”.

Il comportamento chimico dello ione è diverso da quello di un atomo neutro e questo altera il materiale (*ad es. una cellula*) di cui lo ione fa parte.

Esposizione a sorgenti radioattive

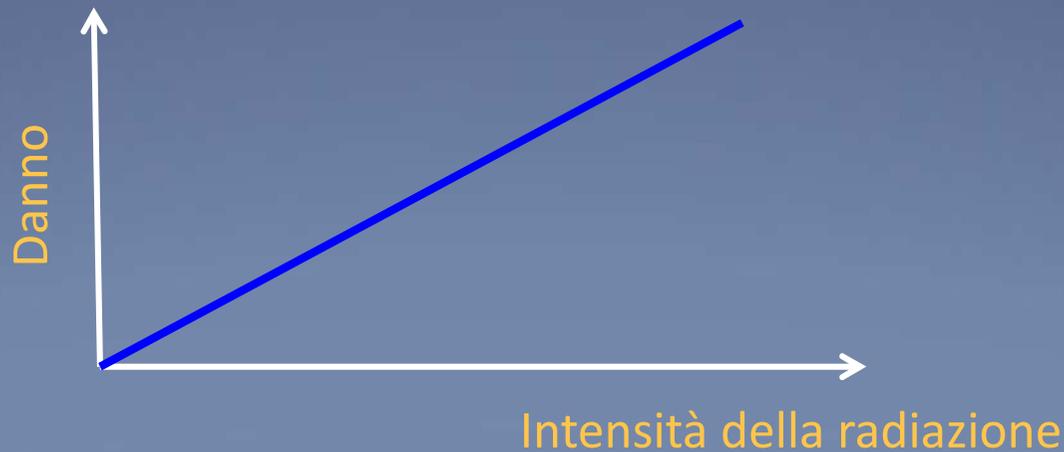
Si distingue tra:

- **irradiazione esterna** (*esposizione alle radiazioni emesse dalla sorgente senza contatto tra la persona esposta e la sorgente*)
- **contaminazione interna** (*la sostanza radioattiva può venire inalata e/o ingerita restando depositata nell'organismo*)

La dosimetria

Ogni singola radiazione che colpisce un organismo biologico provoca alterazioni a livello cellulare e quindi un danno.

Le conoscenze attuali portano a ritenere che la probabilità di insorgenza di un danno aumenti linearmente con l'intensità della radiazione che investe un organismo senza alcuna soglia minima:



La dosimetria

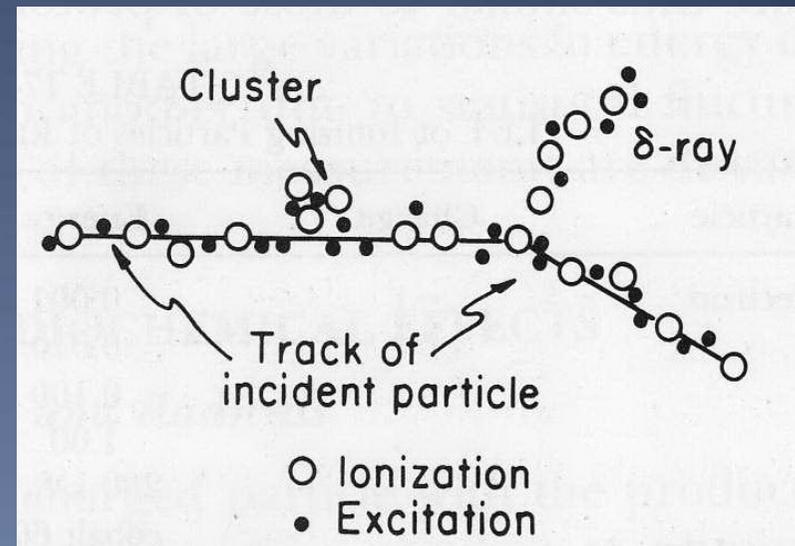
Il principio della “**linearità senza soglia**” porta a limitare, in qualunque attività, l’esposizione alle radiazioni al livello minimo possibile (principio **ALARA** as low as reasonably achievable)

La **probabilità** di insorgenza di patologie (tumori,...) aumenta con l’esposizione.

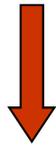
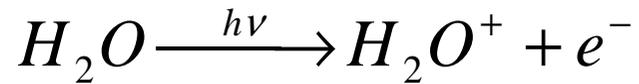
Interazione tra radiazioni ionizzanti e tessuti biologici

STADIO FISICO (10^{-13} secondi): Le interazioni delle particelle ionizzanti producono una serie di eccitazioni e ionizzazioni lungo la traiettoria .

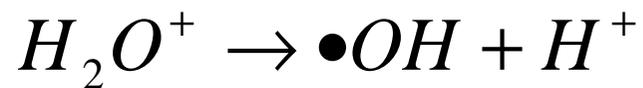
STADIO RADIOCHIMICO: (10^{-9} - 10^{-6} secondi): interazione con la molecola d'acqua (radiolisi che consiste nell'eccitazione o ionizzazione, seguita da scissione, della molecola d'acqua)



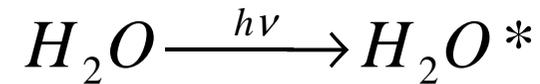
Processo di ionizzazione



**Dissociazione della
molecola d'acqua ionizzata**



Processo di eccitazione



**Dissociazione della
molecola d'acqua eccitata**



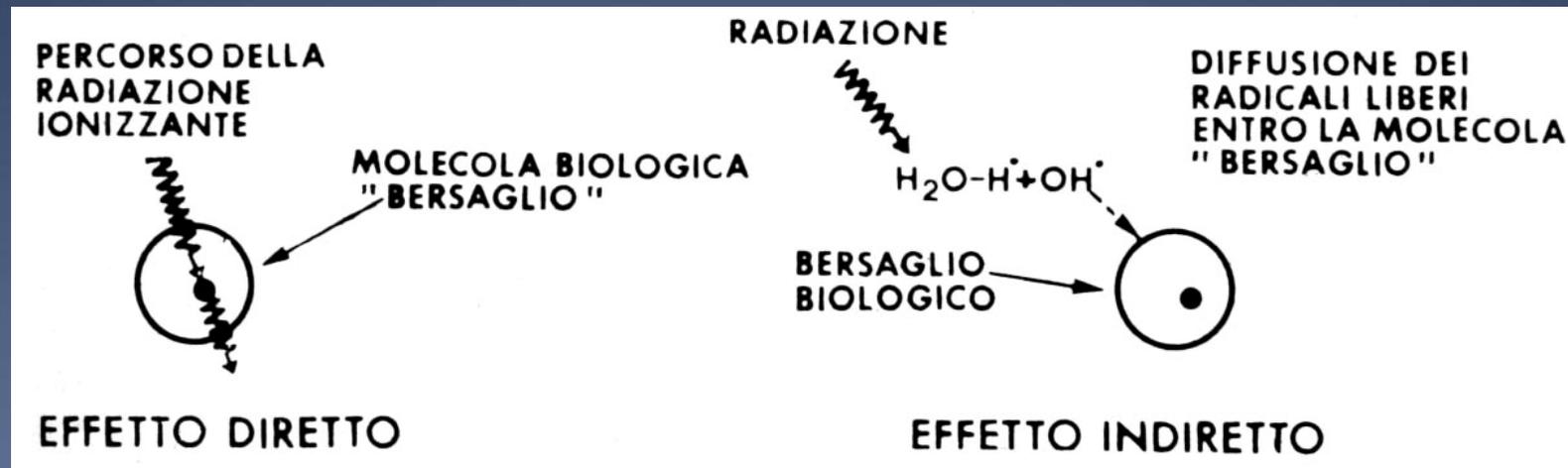
Quindi:

I processi di ionizzazione ed eccitazione danno luogo alla formazione dei *prodotti primari*



che si dissociano generando $H\bullet$ $\bullet OH$ H^+

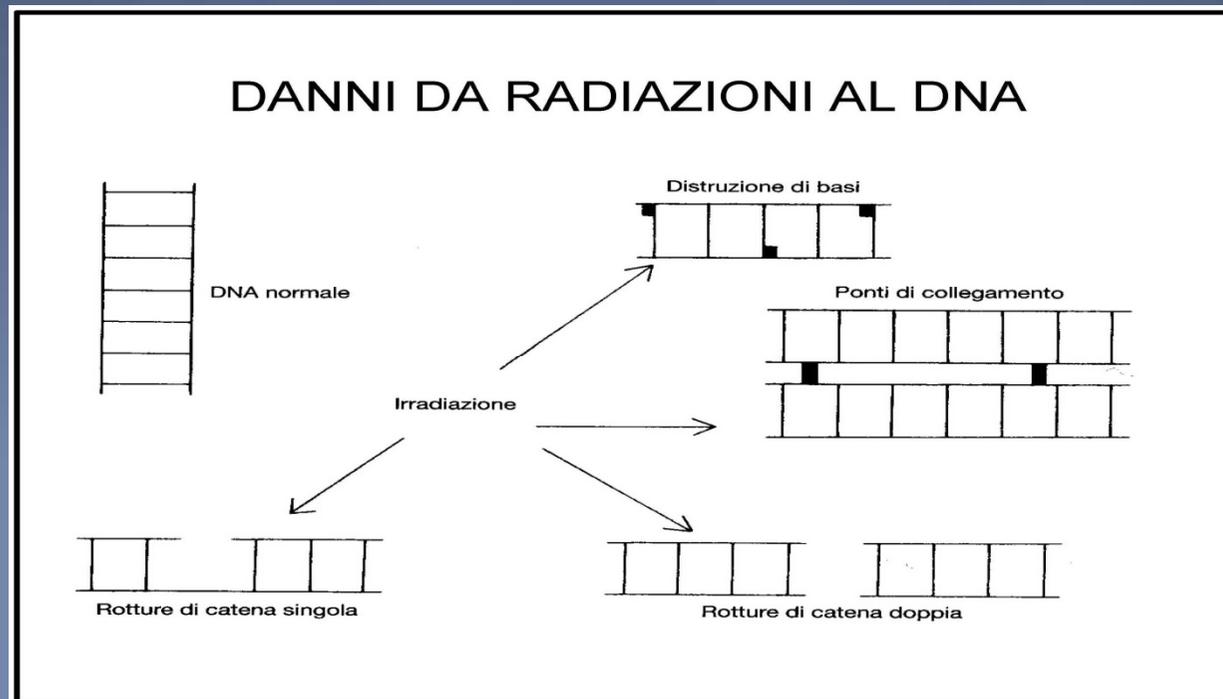
STADIO DEL DANNO BIOMOLECOLARE (frazioni di secondi-settimane): azione sia diretta che indiretta sulle macromolecole biologiche



Il danno della molecola del DNA è considerato l'evento chimico più pericoloso e responsabile della morte cellulare

Il DNA può subire, sia in maniera diretta che indiretta, differenti tipi di danno:

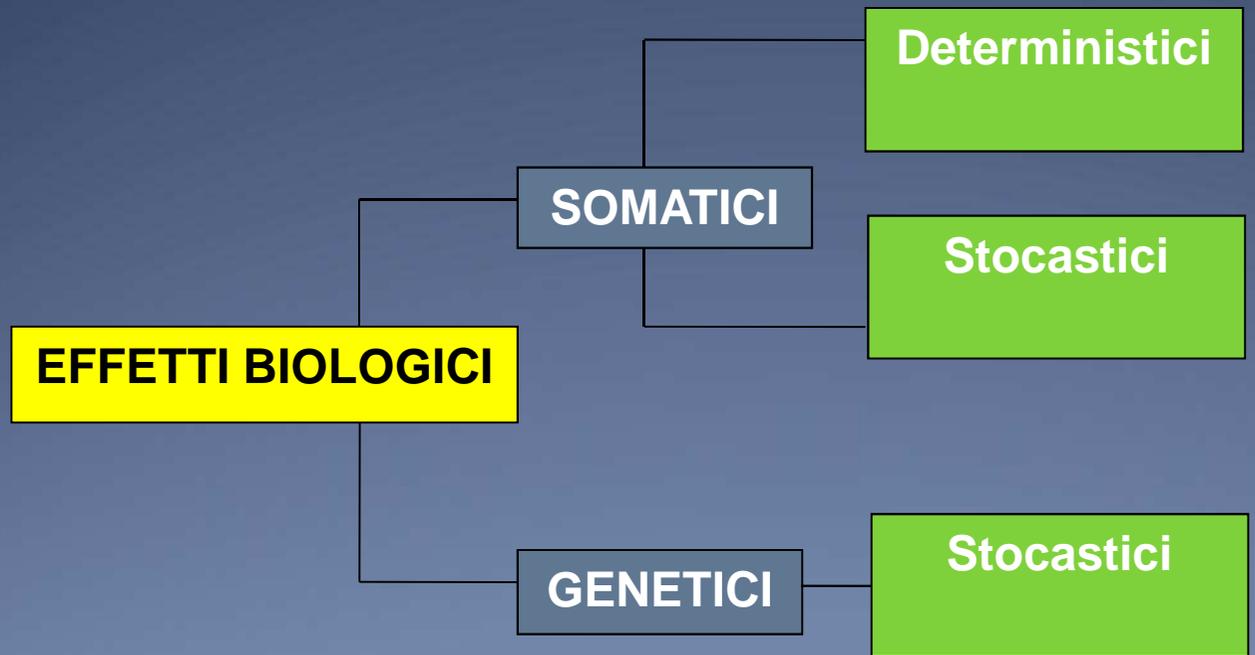
- Rottura di una singola catena,
- Rottura di una doppia catena,
- Distruzione di basi,
- Creazione di ponti di collegamento spuri



FASE BIOLOGICA (giorni-mesi-anni): La manifestazione clinica dell'effetto biologico delle radiazioni si verifica sempre ad una certa distanza dall'esposizione.

Si parla di:

- *effetti acuti* per indicare gli effetti che si manifestano a distanza di giorni da una esposizione singola,
- *effetti tardivi* per indicare quegli effetti che si manifestano a distanza di mesi o anche anni dall'irradiazione.



Come ci si protegge ?

1. Mantenendo la maggior **distanza** possibile tra sorgente radioattiva ed operatore (il numero di radiazioni incidenti sull'individuo esposto diminuisce quadraticamente con la distanza)
2. Minimizzando i **tempi** di esposizione alla sorgente radioattiva
3. Schermando le radiazioni con "pareti" (**schermature**) di materiale opportuno (es., piombo e calcestruzzo)

RADIONUCLIDI IN NATURA

- I radionuclidi prodotti al tempo della formazione del sistema solare sono sopravvissuti fino a oggi solo se la loro vita media è dell'ordine dell'età della terra (miliardi di anni): **radionuclidi primordiali**
- Radionuclidi a vita media più breve sono prodotti naturalmente per bombardamento dell'atmosfera da parte dei raggi cosmici e la loro abbondanza è (quasi) all'equilibrio: **radionuclidi cosmogenici**
- Radionuclidi a vita media breve (in misura minore anche lunga) sono prodotti artificialmente per vari scopi (produzione di energia, armamenti, controlli industriali, diagnostica e terapia medica, etc): **radionuclidi antropogenici**

URANIUM 238 (U238) RADIOACTIVE DECAY

| type of radiation | nuclide | half-life |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|
| | uranium—238 | 4.5×10^9 years |
| α | ↓ thorium—234 | 24.5 days |
| β | ↓ protactinium—234 | 1.14 minutes |
| β | ↓ uranium—234 | 2.33×10^5 years |
| α | ↓ thorium—230 | 8.3×10^4 years |
| α | ↓ radium—226 | 1590 years |
| α | ↓ radon—222 | 3.825 days |
| α | ↓ polonium—218 | 3.05 minutes |
| α | ↓ lead—214 | 26.8 minutes |
| β | ↓ bismuth—214 | 19.7 minutes |
| β | ↓ polonium—214 | 1.5×10^{-4} seconds |
| α | ↓ lead—210 | 22 years |
| β | ↓ bismuth—210 | 5 days |
| β | ↓ polonium—210 | 140 days |
| α | ↓ lead—206 | stable |



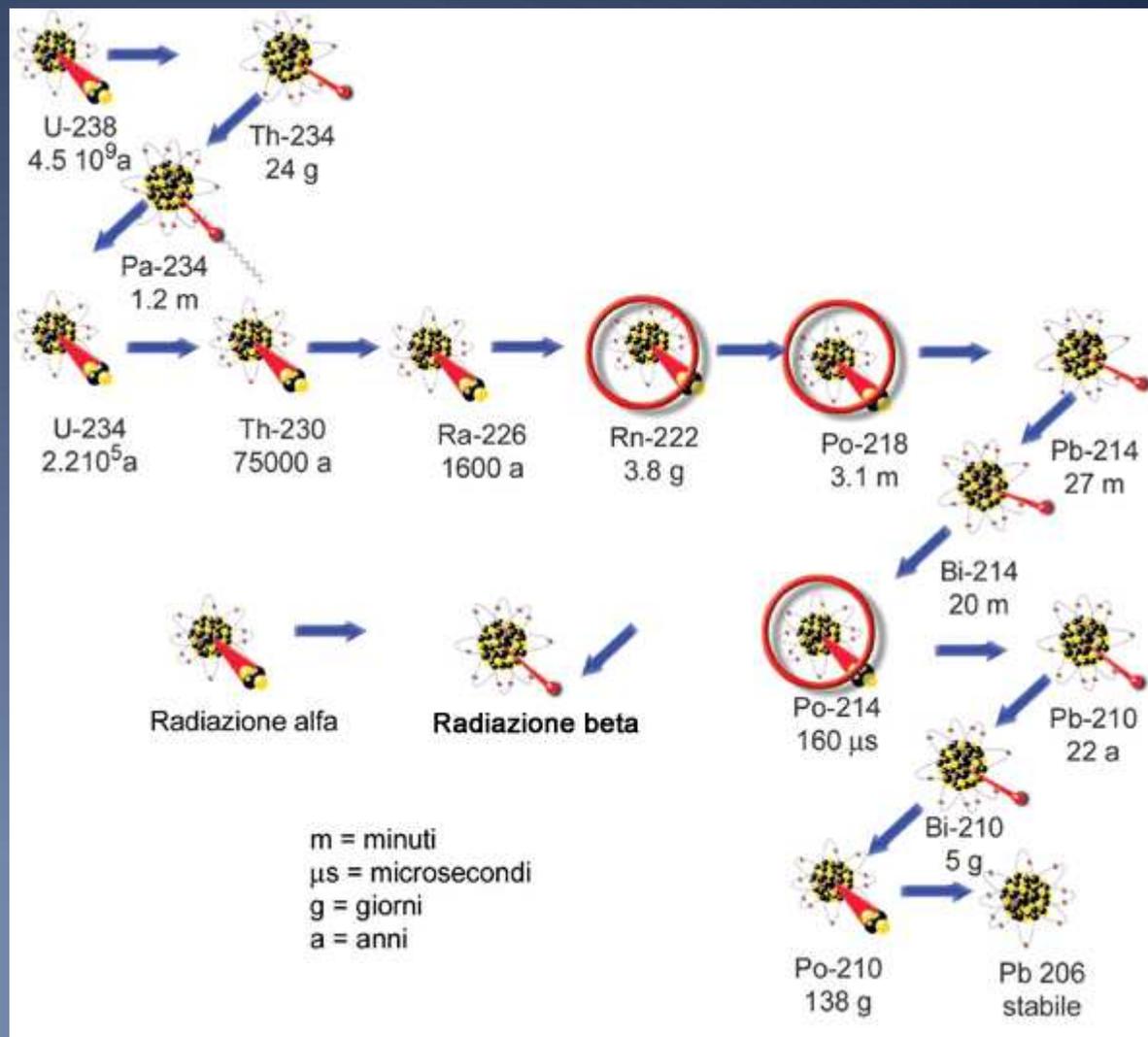


||

:

*cos'è, come si misura,
come si interviene*

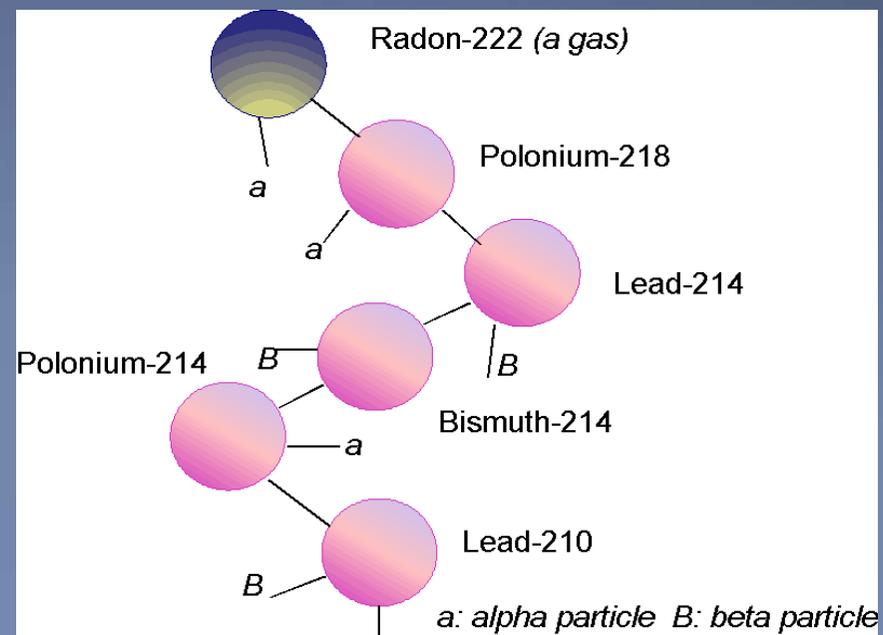
proviene dal decadimento del radioisotopo Ra-226 originato, per decadimenti successivi, dal 'capostipite' U-238 diffusamente presente nella crosta terrestre in concentrazione variabile in funzione della particolare conformazione geologica



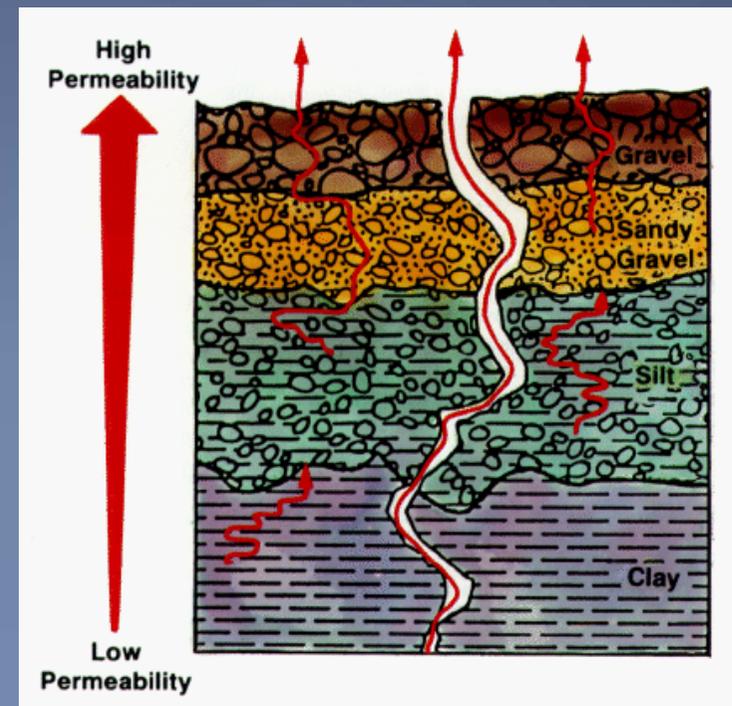
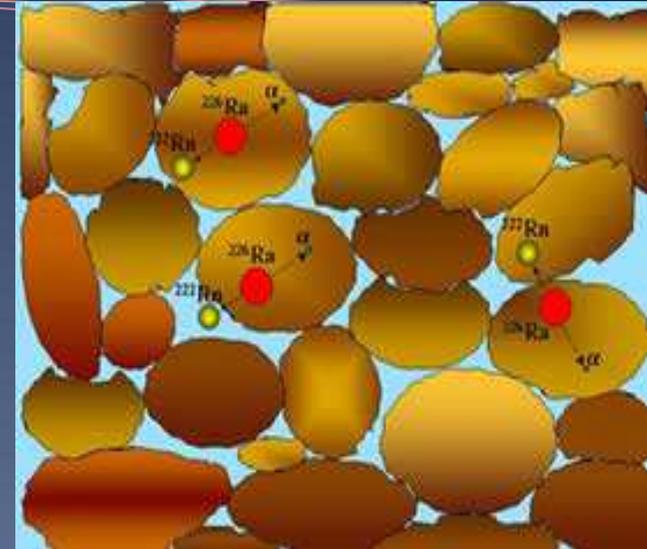
E' radioattivo con tempo di dimezzamento dell'attività pari a 3.82 giorni.



Decade con emissione di radiazione α producendo 'discendenti' radioattivi che emettono radiazione

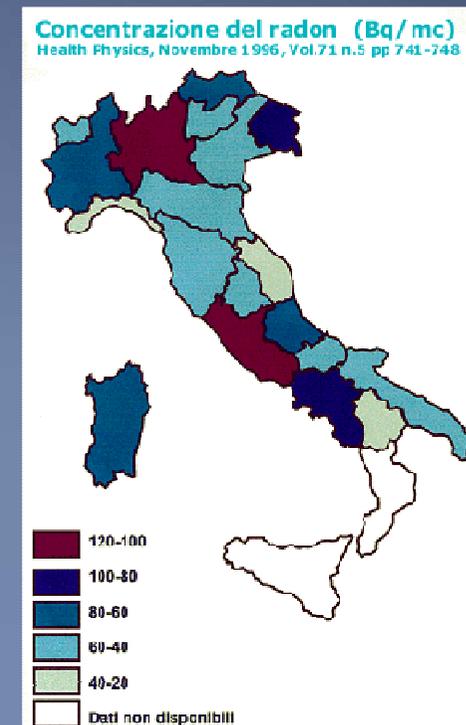


Rimane per la parte prevalente intrappolato nella matrice solida nella quale avviene il decadimento del Ra-226 e solo una piccola frazione, quella emessa dal Ra-226 posto alla periferia dei singoli elementi solidi (superfici e zone di fratture delle rocce, grani di terreno o di sabbia,), emerge dal suolo o si discioglie nelle acque e diffonde

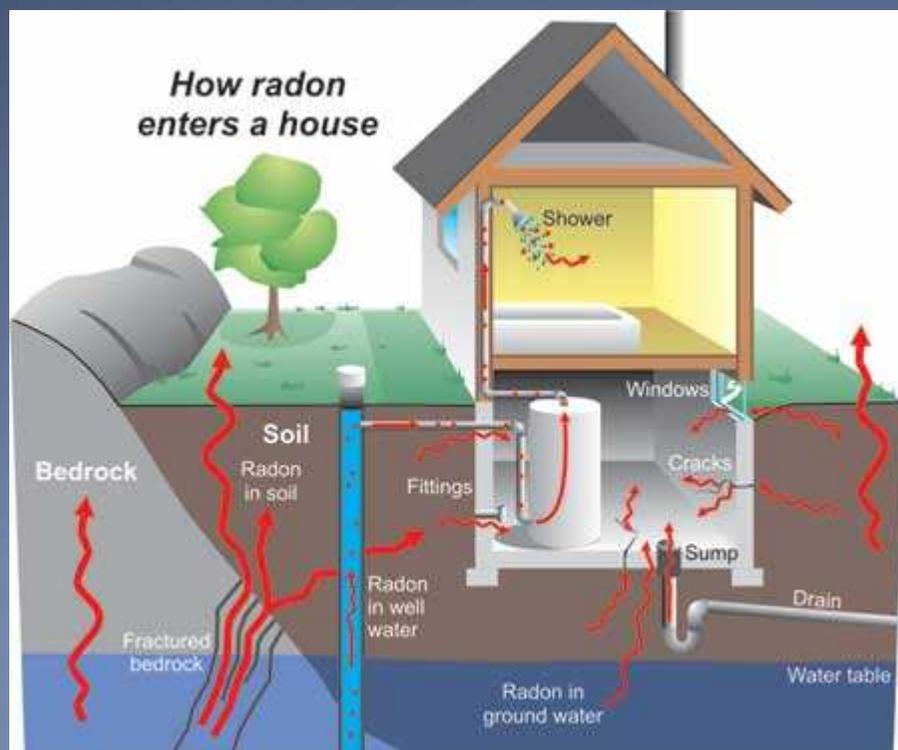


Perché il problema Radon si pone negli ambienti chiusi?

Il gas Radon emergente dal suolo o portato in superficie dalle acque terrestri si diffonde rapidamente nell'atmosfera, venendo a produrre concentrazioni molto basse nell'aria che respiriamo nei luoghi aperti, variabile da luogo a luogo e valutata mediamente pari a 8 Bq/m^3 nelle aree continentali, con valori massimi dell'ordine dei 50 Bq/m^3



Diversa è la situazione dei luoghi chiusi (edifici) o sotterranei (grotte, caverne, ...) penetrati dal gas Radon e nei quali il Radon trova ostacolo alla successiva diffusione nell'atmosfera, dove possono venire a formarsi concentrazioni anche molto elevate e, in particolare, dei locali interrati degli edifici che, da una parte costituiscono la più diretta via di penetrazione del Radon emergente dal suolo, dall'altra sono generalmente anche i locali meno aerati.



Anche i materiali usati nelle costruzioni, che contengono percentuali variabili del 'genitore' Ra-226 possono contribuire in modo significativo alla concentrazione di attività del Radon negli edifici.

Quali sono gli effetti del Radon?

Essendo un gas nobile, il Radon non è reattivo e, inalato, non si deposita nei polmoni, ma viene rapidamente espulso, con trascurabile contributo di dose ai polmoni.



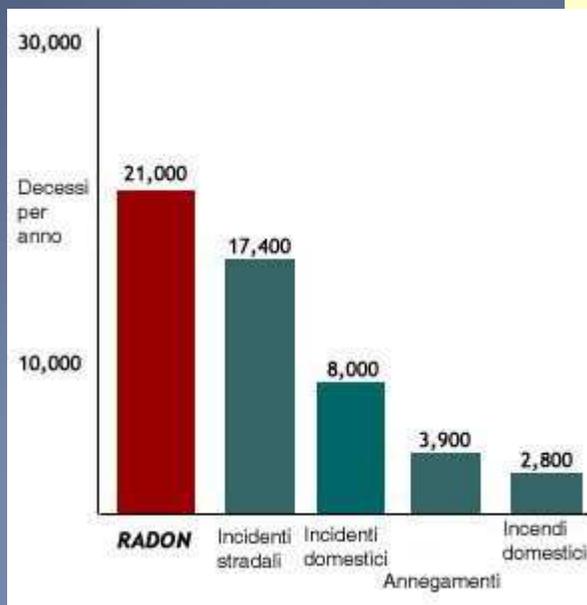
Gli effetti dannosi del Radon sono prodotti dai suoi 'discendenti' radioattivi α -emittitori solidi Po-218 e Po-214 contestualmente presenti nell'aria legati al pulviscolo atmosferico che, inalati, si depositano nell'epitelio bronchiale rilasciandovi dosi significative di radiazione che possono produrre tumori polmonari

Secondo l'Agencia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) il Radon è inserito nelle categorie di cancerogenicità al Gruppo 1 ("evidenza sufficiente di cancerogenicità per l'uomo").



Il radon è inquadrato al secondo posto, dopo il fumo, come causa per l'insorgenza di tumori polmonari.

(foto: Radon, Ufficio federale d. sanità pubblica di Berna, CH).



La probabilità dell'insorgenza di un danno conseguente all'esposizione al Radon dipende dalla

concentrazione di attività

espressa in **Bq/m³**

e **dal tempo di esposizione**

È stata osservata una correlazione tra gli effetti del fumo e del Radon: un fumatore rischia 15 volte di più rispetto ad un non fumatore esposto alla stessa concentrazione di Radon

Da quali fattori dipende la concentrazione di Radon?

Temperatura: la probabilità di emissione di Radon dalle superfici dei materiali che contengono Ra-226 aumenta con la temperatura (raddoppia passando da 10 a 35°C)

Pressione atmosferica: l'emanazione di Radon dal suolo aumenta al diminuire della pressione

Riscaldamento artificiale: nel periodo invernale aumenta la penetrazione di Radon negli edifici per "effetto camino"

Diversa modalità di uso degli infissi esterni e/o impianti di areazione, dal vento: la concentrazione di Radon diminuisce all'aumentare della ventilazione

Nella Regione Puglia, la tutela dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti generate dal radon è disciplinata oltre che dalla normativa nazionale, con il D.lgs. 230/95 e sue successive modifiche e integrazioni, le cui disposizioni si applicano a determinati attività lavorative e luoghi di lavoro, anche dalla recente **Legge Regionale n. 30 del 03/11/2016 "Norme in materia di riduzione dalle esposizioni alla radioattività naturale derivante dal gas 'radon' in ambiente confinato"**, modificata dall'art.25 della Legge Regionale n. 36 del 09/08/2017 (BURP n. 96 del 11-08-2017), che ha come campi di applicazione gli edifici destinati all'istruzione e aperti al pubblico, con esclusione dei residenziali.

La normativa vigente sia nazionale sia regionale prevede che vengano eseguite misure dirette di concentrazione media annua del gas radon in aria.

Indicazioni per misure nei luoghi di lavoro

Le misure devono essere pianificate in modo da essere rappresentative dell'esposizione del personale.

Indicazioni per misure nelle abitazioni

I locali da monitorare vanno scelti tra quelli abitualmente frequentati dagli occupanti. Nel caso specifico di abitazioni situate su due piani è preferibile misurare un locale per ogni piano.

Indicazioni per misure nelle scuole e nei luoghi aperti al pubblico

Per gli edifici strategici e destinati all'istruzione, compresi gli asili nido e le scuole materne, le misure devono essere eseguite in tutti i locali dell'immobile interessato.

Il livello limite di riferimento per concentrazione di attività di gas radon in ambiente chiuso, e in tutti i casi, non può superare 300 Bq/m³ medi in un anno misurato con strumentazione passiva

le misure della concentrazione media annua di radon in aria devono essere effettuate per un periodo complessivo di un anno suddiviso in due semestri consecutivi.

Approcci di campionamento

- Istantaneo: la misura viene eseguita in tempi brevi rispetto alla variazione di concentrazione. Sono utili in campagne di monitoraggio in ambienti in cui si pensa che siano superati i livelli critici di concentrazione
- Continuo: permette di valutare le fluttuazioni di concentrazione e di correlarle con i parametri che le inducono
- Integrato: permette di determinare concentrazioni medie in intervalli di tempo predefiniti (giorni, settimane, mesi,..) per valutare l'esposizione media alle radiazioni

Procedure di misura per il Radon

- Metodi attivi

Il campionamento del Rn e dei suoi prodotti di decadimento avviene attraverso l'aspirazione forzata e la misura viene fatta mediante strumentazione attiva (con alimentazione e sistema di amplificazione del segnale). Sono generalmente rivelatori real-time (scintillatori, semiconduttori,...)

- Metodi passivi

Il campionamento del Rn e dei suoi prodotti di decadimento è basato sulla naturale diffusione del gas. I rivelatori registrano i decadimenti radioattivi e l'elaborazione dei dati avviene successivamente in laboratorio.

Rivelatori passivi

- Rivelatori a traccia: sono costituiti da film polimerici sensibili alle particelle α che attraversando il materiale perdono energia, rompono i legami chimici lasciando delle micro tracce. Queste sono successivamente rese più visibili mediante attacco chimico
- Dosimetri a termoluminescenza: si basa sulle proprietà di alcuni cristalli di emettere radiazione luminosa per effetto di riscaldamento dopo essere stati irradiati. Dalla misura della luce emessa si risale alla concentrazione di Rn.
- Elettreti: sono dischi di teflon che mantengono un potenziale elettrostatico stabile. Posto in una cameretta contenente un certo volume d'aria, raccoglie gli ioni prodotti dalle particelle α prodotte dal decadimento del Rn e dei suoi discendenti per cui il suo potenziale si riduce proporzionalmente all'attività presente nella cameretta. Dalla misura della variazione del potenziale in un certo intervallo di tempo è possibile determinare la concentrazione ambientale di Rn
- Canestri di carbone attivo: permette di valutare la concentrazione di Rn dalla misura della radiazione γ dei suoi prodotti di decadimento adsorbiti nel carbone attivo contenuto in scatole metalliche.

I rivelatori a traccia

(CR-39 o LR-115)

sfruttano il potere ionizzante delle particelle α che danneggiano le molecole del materiale dielettrico (plastiche) lungo la loro traiettoria e lasciano delle tracce di dimensioni nanometriche

le tracce si rendono visibili ad un microscopio ottico mediante un attacco chimico con soluzione fortemente corrosiva



durante l'esposizione *dopo*
l'attacco chimico

Posizionamento e punti di misura

- Per locali separati di piccole dimensioni (inferiori a 50m²) è sufficiente una misura in ciascun locale;
- Per locali separati di medie e grandi dimensioni è consigliabile una misura ogni 100 m² di superficie.

*I rivelatori vanno posizionati ad una altezza compresa fra **circa 1 e 3 metri**, in un'area lontana da fonti di calore (stufe, termosifoni, caloriferi climatizzatori) e di ricambio d'aria (finestre e porte). Non va posizionato all'interno di armadi e contenitori chiusi. Durante tutto il periodo di misura nelle stanze vanno mantenute "normali" condizioni di uso (inclusa la ventilazione).*



I rivelatori devono essere conservati in freezer.
Il dosimetro va montato nel telaio con il lato scritto verso l'alto, lato che è esposto alle radiazione e che viene analizzato nel conteggio delle tracce

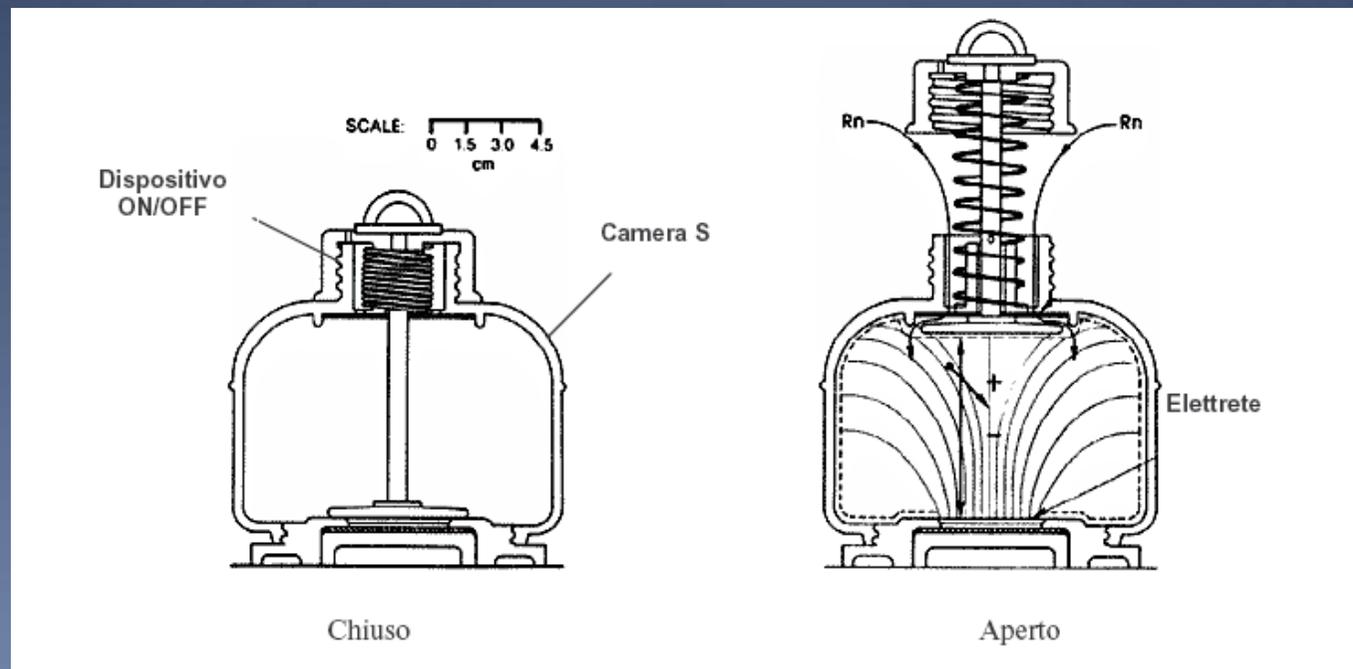


I rivelatori sono montati nel rack e inseriti nella vasca per l'attacco chimico in una soluzione di idrossido di sodio (NaOH) in acqua distillata (6.25 M) (250 grammi di NaOH solida per ogni litro di acqua) alla temperatura di 98°C.

CR-39: i vantaggi

- sensibili alle radiazioni alfa e insensibili ad altri tipi di radiazioni, in particolare alla radiazione gamma;
- forniscono un valore della concentrazione media di radon su lunghi periodi (da alcuni mesi a un anno) per cui sono gli strumenti che meglio soddisfano le richieste della normativa comunitaria e italiana, oltre che quelli prescritti dalla normativa regionale vigente;
- forniscono una risposta in genere indipendente dalle condizioni ambientali;
- consentono un conteggio automatico delle tracce, quindi permettono un notevole risparmio dei tempi di analisi;
- si possono conservare e sottoporre nuovamente a lettura anche dopo diversi anni;
- sono robusti e hanno un basso costo.

Il sistema E-Perm (ad elettreti) si basa sulla misura della variazione di potenziale indotta sull'elettrete dalla raccolta degli ioni prodotti dalla radiazione all'interno di una camera di volume noto.



Il sistema E-Perm si posiziona ad un'altezza compresa tra uno e due metri e in modo tale che sia completamente circondato dall'aria, evitando di coprirlo e/o di collocarlo a ridosso del materiale da costruzione (muri, pavimenti, ecc.).