

**PID@LNS Programma INFN Docenti  
ai Laboratori Nazionali del Sud (Catania) 6–10 Nov 2023**

## **Radioattività Ambientale**

**Giuseppe Gabriele Rapisarda  
Università di Catania & INFN – LNS**

# *La Radioattività*

# *Radioattività*

## Prima definizione fisica

Proprietà: alcuni atomi emettono spontaneamente particelle elementari (particelle alfa e beta) e raggi gamma a causa di un'instabilità interna dei loro nuclei. Il risultato è un cambiamento in altre specie atomiche.

## Seconda definizione fisica

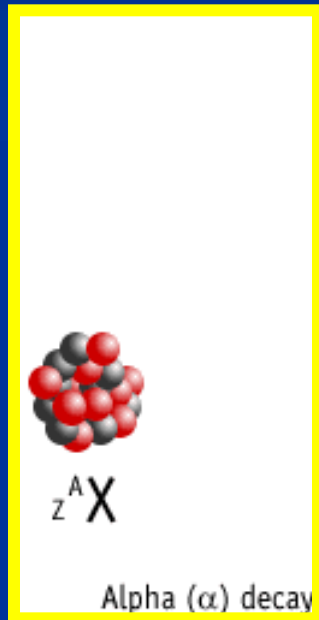
La radioattività è il numero di decadimenti al secondo per un dato isotopo. Questo definisce l'attività e la sua unità di misura, il Becquerel (Bq).



# Decadimenti Radioattivi

## Alfa

**radiazioni alfa ( $\alpha$ ):** sono nuclei di elio  ${}_2\text{He}^4$  carichi positivamente con  $Z$  (numero atomico) = 2 e  $A$  (numero di massa) = 4; le particelle alfa hanno scarso potere penetrante (sono facilmente fermate da un foglio di carta oppure dallo strato esterno della pelle) e sono di solito emesse da nuclei di metalli pesanti (con elevato numero di massa). Ad esempio:

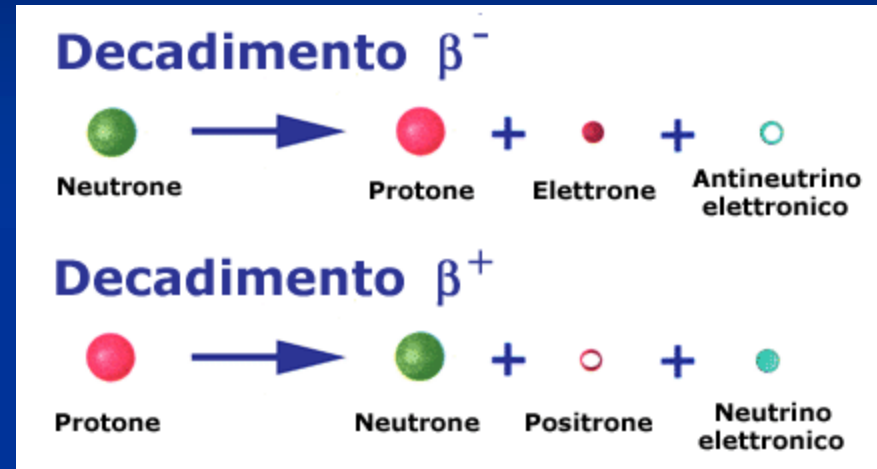
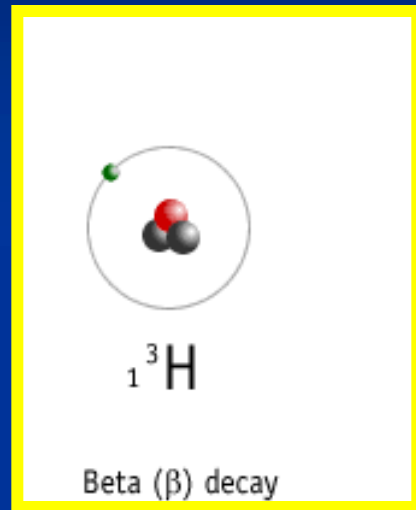


Generalizzando:



# Decadimenti Radioattivi

## Beta

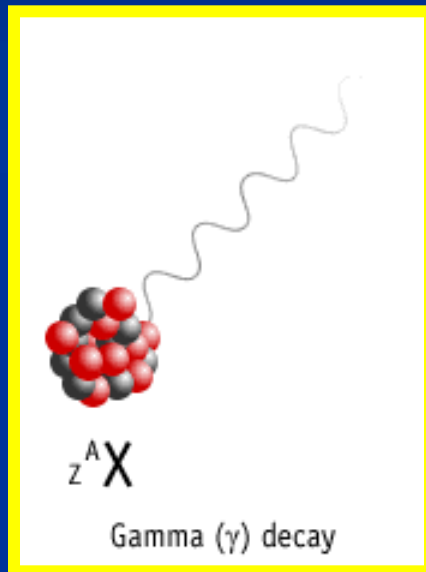


**radiazioni beta ( $\beta^-$ ):** sono costituite da elettroni a carica negativa o positroni a carica positiva che derivano dalla trasformazione di un protone o di un neutrone in un neutrone o in un protone, rispettivamente. E' stato dimostrato che le particelle beta sono elettroni emessi dal nucleo dell'atomo a seguito di questa trasformazione:



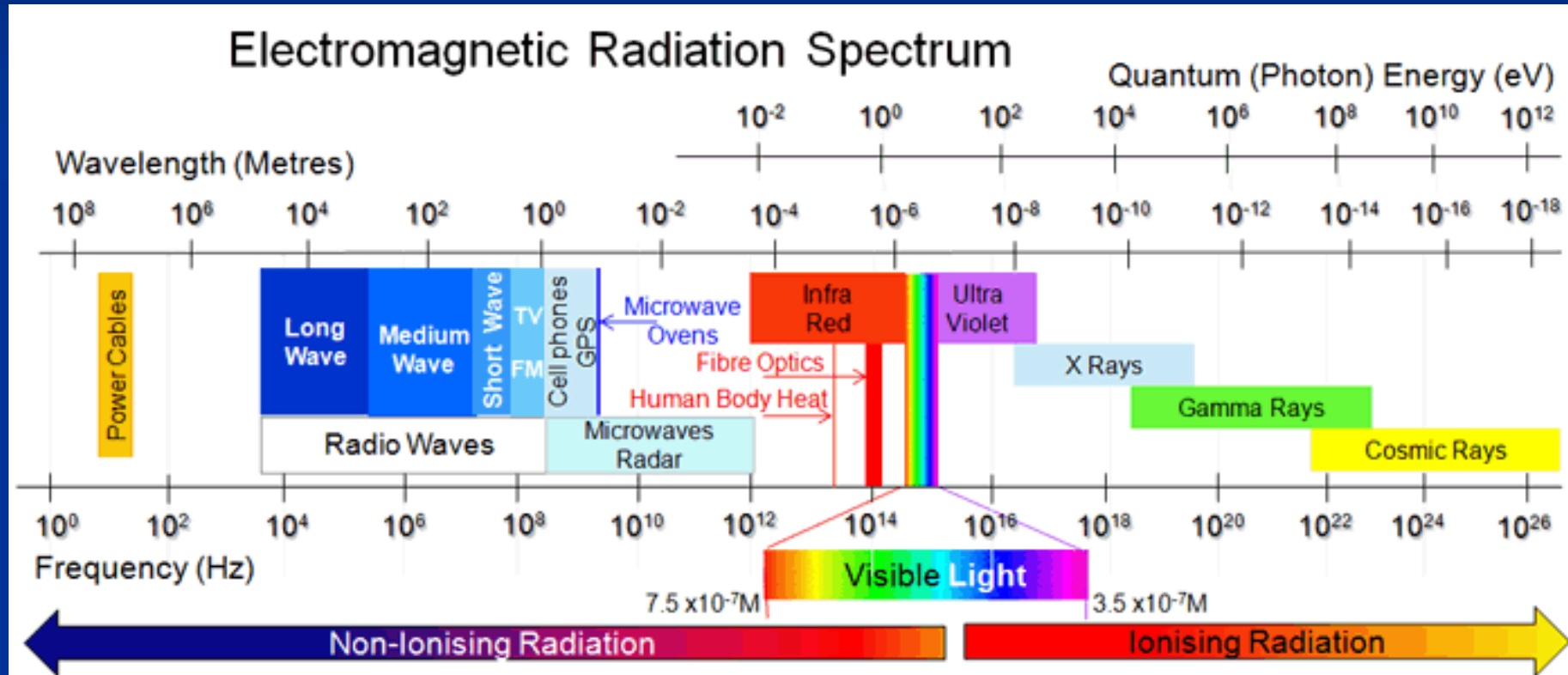
# Decadimenti Radioattivi

## Gamma

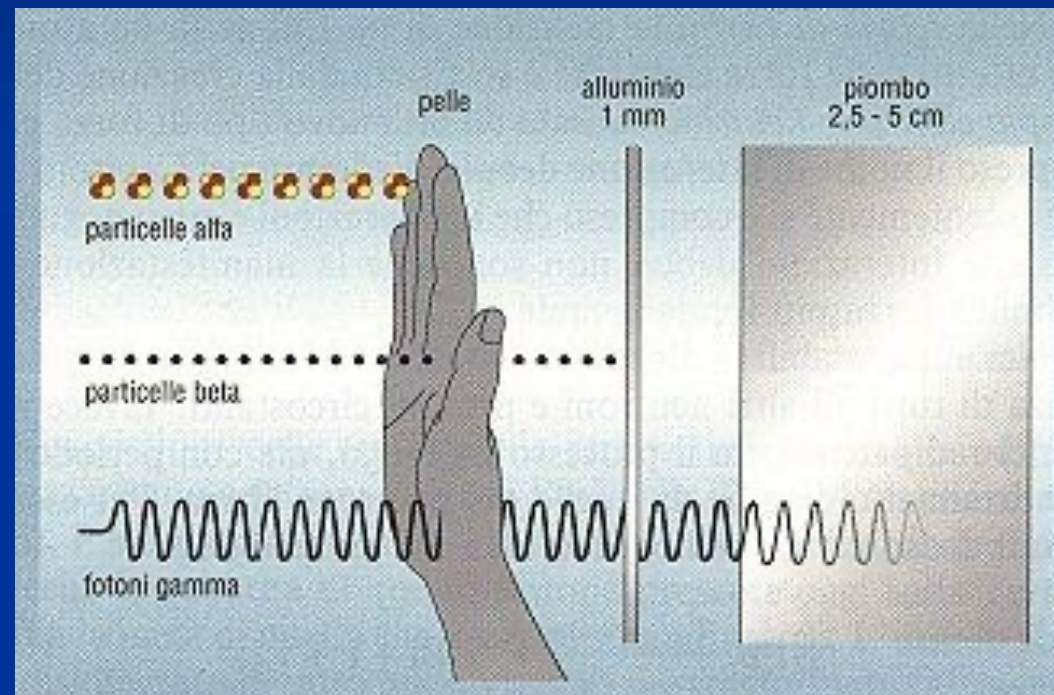


**radiazioni gamma ( $\gamma$ ):** non hanno natura corpuscolare ma sono radiazioni elettromagnetiche il cui potere penetrante è di gran lunga maggiore delle altre radiazioni (soltanto materiali ad alta densità quali il piombo sono in grado di fermarli). Esse hanno la capacità di distruggere i legami chimici pertanto costituiscono il principale pericolo quando si lavora con i materiali radioattivi.

# Spettro Elettromagnetico







# *Legge del decadimento radioattivo*

Il decadimento radioattivo è un processo statistico.

A causa della natura statistica del processo, l'identificazione dell'isotopo che decadrà non è possibile.

La probabilità di sopravvivenza dal decadimento alfa o beta degli isotopi è una costante, indipendentemente dal passato.

La vita umana risente anche di proprietà statistiche, ma la probabilità di vita di una persona dipende in qualche modo dal passato (vedi compagnia di assicurazioni!).

La vita media può fornire informazioni sulla diminuzione degli isotopi.

# Legge del decadimento radioattivo

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$N$  = numero di atomi presenti all'istante  $t$

$\lambda$  = costante di decadimento: la probabilità nell'unità di tempo di decadimento di un atomo

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

$N(t)$  = numero degli atomi al tempo  $t$  (che non hanno subito decadimento)

$N_0$  = numero di nuclei al tempo  $t=0$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

vita media  
di un nucleo instabile  
in una popolazione

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

tempo di dimezzamento  
(o emivita)

# Definizione di Attività

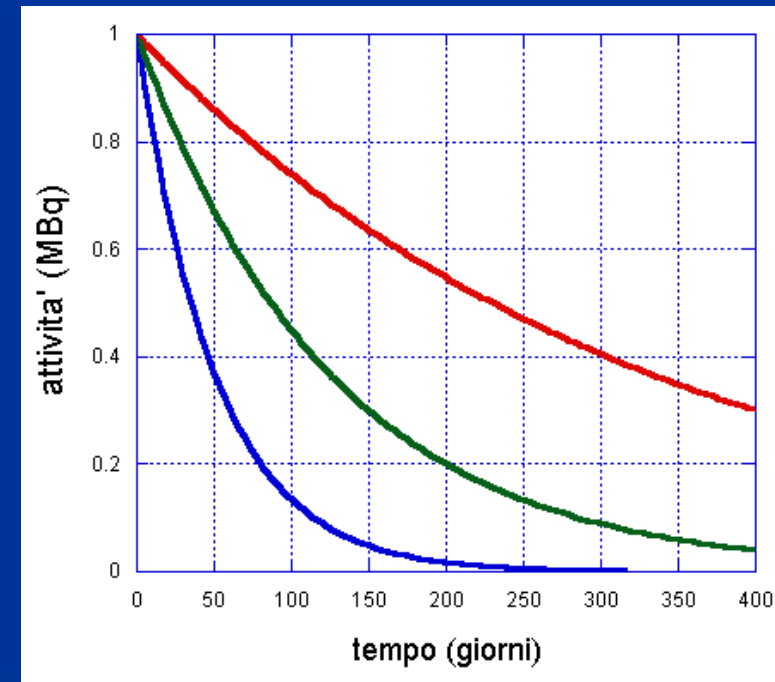
• **Attività:** numero di disintegrazioni (decadimenti) che avvengono, nell'unità di tempo, in una certa quantità di un radionuclide.

Unita di misura (SI)

**Bequerel (Bq)** dove  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ decadimento al secondo}$ .

In passato veniva utilizzato il **Curie (Ci)** che equivale a 37 GBq e corrisponde al numero di disintegrazione al secondo che avvengono in un grammo di  $^{226}\text{Ra}$ .

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



$T_{1/2} = 25 \text{ days}$

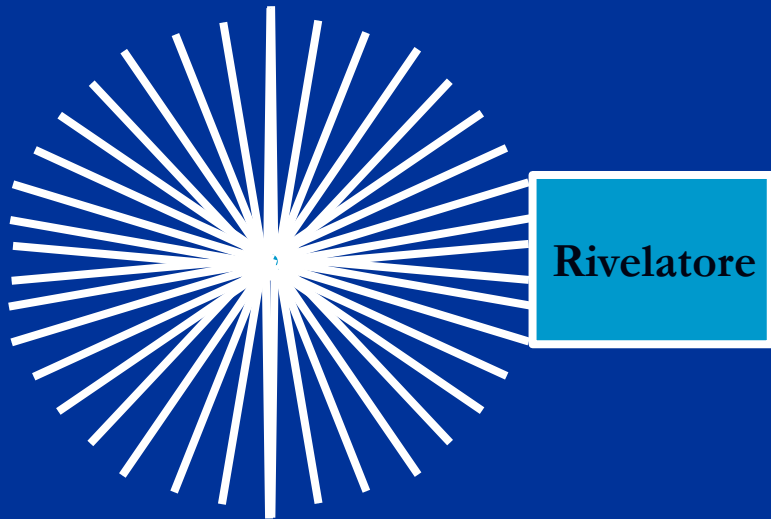
$T_{1/2} = 80 \text{ days}$

$T_{1/2} = 220 \text{ days}$

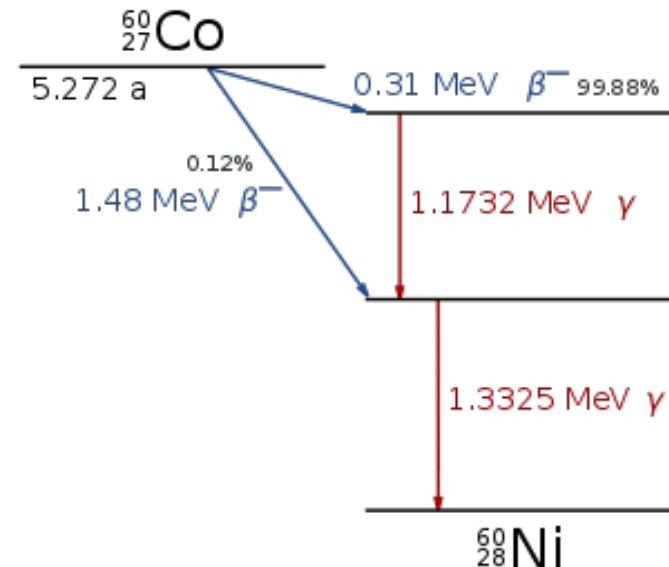
# Come misurare l'attività di un nucleo instabile?

Rivelatore che ci permette di contare il numero di decadimenti nell'unità di tempo rivelando i prodotti di decadimento

Alfa, Beta, **Gamma**



$^{60}\text{Co}$   $T_{1/2} = 1925.28 \text{ d}$   $\beta^-$ : 100 %

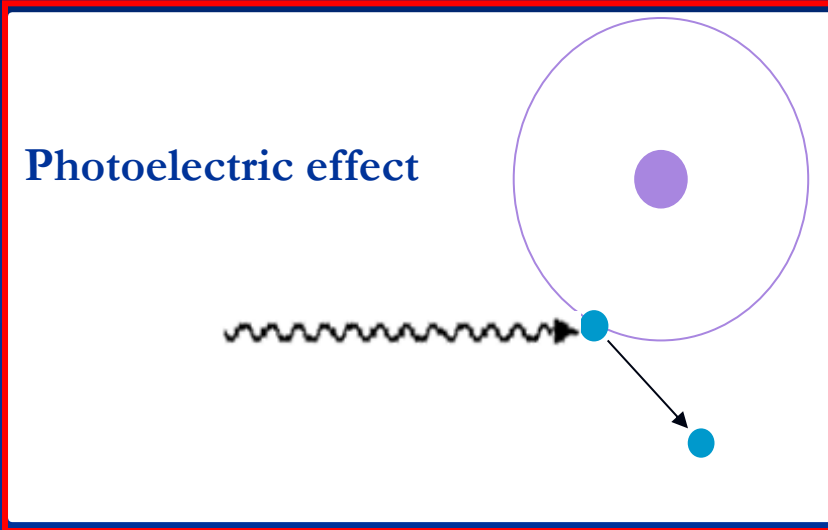


[https://it.wikipedia.org/wiki/Raggi\\_gamma](https://it.wikipedia.org/wiki/Raggi_gamma)

# *Interazione dei raggi gamma $\gamma$ con la materia*

- L'assorbimento delle radiazioni  $\gamma$  (e X) nella materia è sostanzialmente diverso da quello degli elettroni e delle particelle cariche, che rallentano gradualmente attraverso molte interazioni simultanee con gli atomi del mezzo e hanno percorsi ben definiti.
- I raggi  $\gamma$  non interagiscono in modo sistematico, ma con meccanismi probabilistici.
- I processi fondamentali di interazione con la materia per i raggi  $\gamma$  sono:
  - Effetto fotoelettrico
  - Effetto Compton
  - Produzione di coppia

# Effetto fotoelettrico



Il fotone viene totalmente assorbito e trasferisce tutta la sua energia all'elettrone detto "fotoelettrone" che viene espulso dall'atomo

$$\text{Energia elettrone } E = h\nu - E_b$$

$h\nu$  -> energia fotone

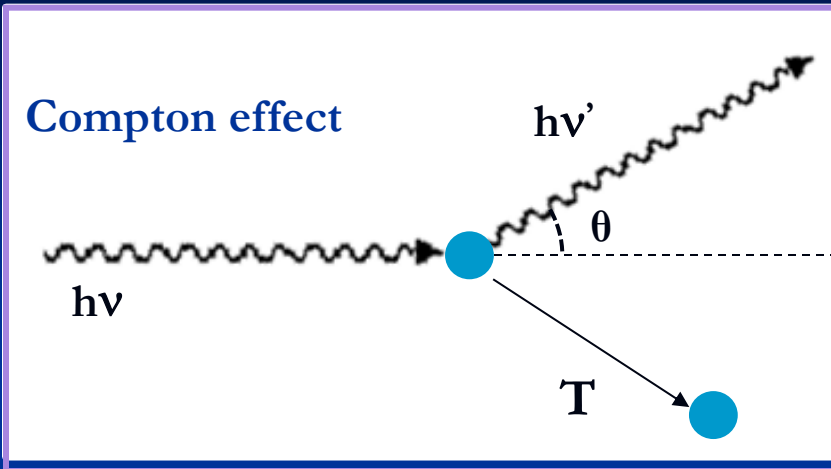
$E_b$  -> energia di legame



L'emissione del fotoelettrone crea uno ione con "buco di elettroni" in uno degli orbitali. Questa vacanza viene ripristinata attraverso riarrangiamento elettronico con emissione di raggi X. I raggi X possono a loro volta subire effetto foto elettrico creando altri fotoelettroni.

*N.B. - il processo è dominante per  $E_\gamma = h\nu < 100 \text{ keV}$*

# Effetto Compton



Fotone diffuso da un elettrone “quasi-libero”  
(l’energia di legame può essere trascurata)

**produce un trasferimento parziale di energia del fotone a un elettrone del mezzo, mentre il fotone viene deviato di un certo angolo.**



**energia residua del fotone**

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta)}$$

**energia dell’elettrone**

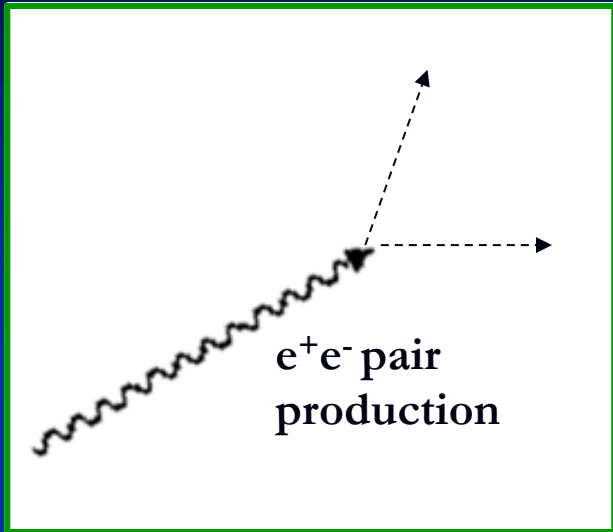
$$T = m_e c^2 \frac{1 - \cos \vartheta}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta)} \left( \frac{h\nu}{m_e c^2} \right)^2$$

le energie in uscita dipendono:  
dall’ energia del fotone incidente  $h\nu$   
dalla massa dell’elettrone  $m_e$   
dall’angolo di diffusione  $\vartheta$

*N.B.* - il processo è dominante per  $E_\gamma = h\nu \sim 1 \text{ MeV}$



# Produzione di coppia



Produzione di coppia  $e^+/e^-$  dovuto all'interazione del fotone con il campo Coulombiano di un nucleo



Se il fotone ha un'energia superiore a circa 1 MeV allora può "trasformarsi" in un elettrone e un positrone.

Nella produzione di coppia il fotone trasferisce tutta la sua energia, una parte  $\sim 1$  MeV viene impiegata per la formazione delle due particelle, la restante energia viene trasferita alle due particelle come energia cinetica

- Processo a soglia
- dominante per  $E_\gamma = h\nu > 2 \text{ MeV}$

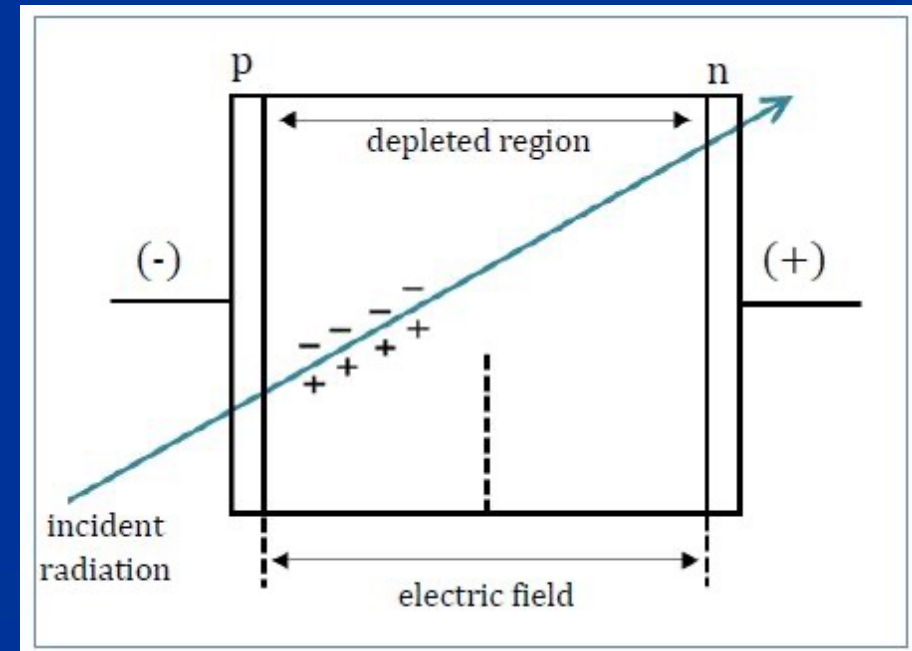
# Rivelatori per raggi gamma

Rivelatori basati su un materiale scintillatore che, colpito dai raggi gamma, emette deboli lampi di luce visibile, infrarossi o ultravioletti con intensità proporzionale all'energia raggio gamma incidente.

Rivelatori costituiti da materiali semiconduttori. Attraverso i tre meccanismi descritti i raggi gamma interagendo con il rivelatore possono generare elettroni (particelle cariche).

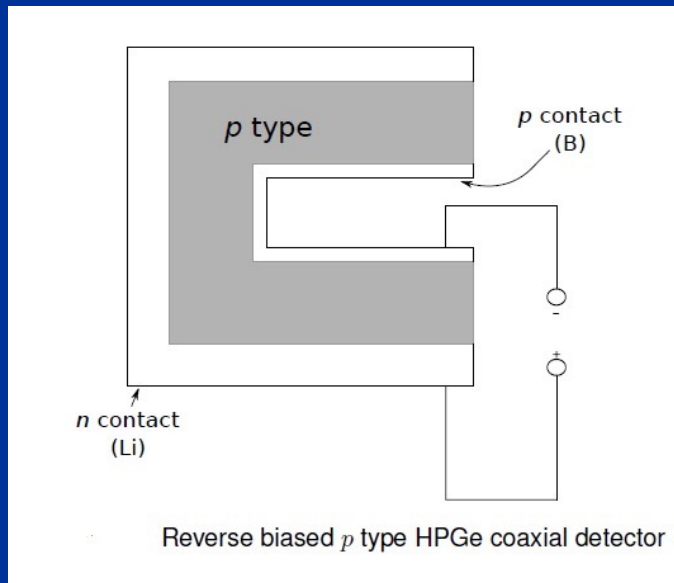
Gli elettroni ionizzano il mezzo perdendo energia e producendo coppie elettrone-lacuna (mancanza di elettrone e quindi assimilabile ad una carica positiva)

Se la particella perde tutta la sua energia nel materiale, il numero di coppie elettrone - lacuna prodotte è proporzionale all' energia iniziale della particella.



# *Rivelatore al germanio ad alta purezza (HPGe)*

Rivelatore al germanio ad alta purezza (**HPGe**) di tipo P, coassiale, ad alta risoluzione.



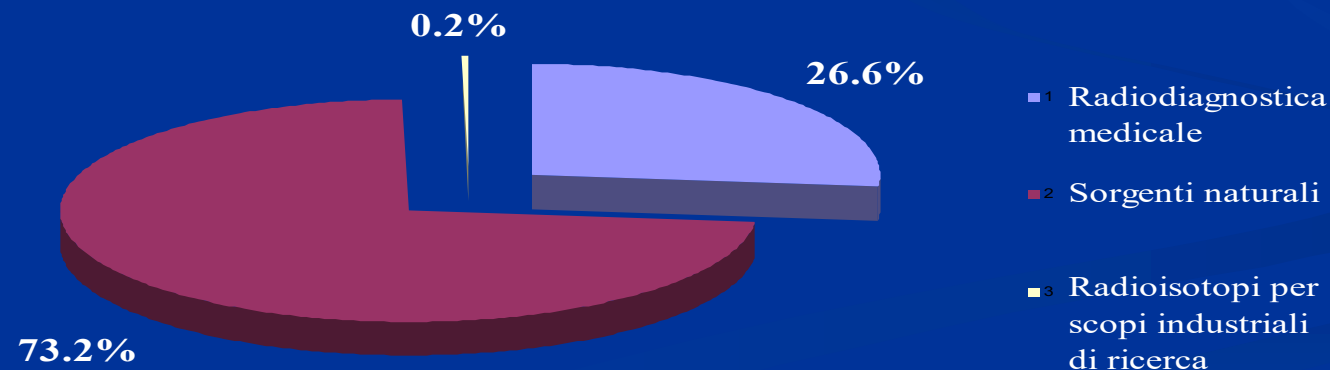
*Continua in laboratorio ...*

*La radioattività naturale  
e il caso del Radon*

# *La radioattività naturale*

Principali cause:

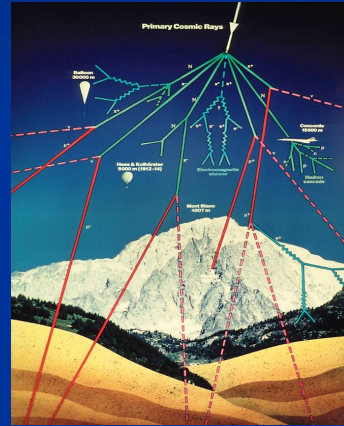
- Fondo naturale di radiazioni
- Sorgenti artificiali di radiazioni:
  - Radiodiagnostica medica
  - Impiego di radioisotopi per scopi industriali di ricerca



# Radioattività ambientale

Tipi e sorgenti di radiazioni naturali:

- Radiazione cosmica  
(raggi cosmici → protoni, alpha, nuclei pesanti)



- raggi cosmici secondari  
(, elettroni, muoni, fotoni, mesoni, neutroni e protoni)

- Radionuclidi cosmogenici



- Radiazione di origine terrestre

Dovuta ai radionuclidi primordiali presenti in varie quantità nei materiali inorganici della crosta terrestre (rocce, minerali) fin dalla sua formazione.

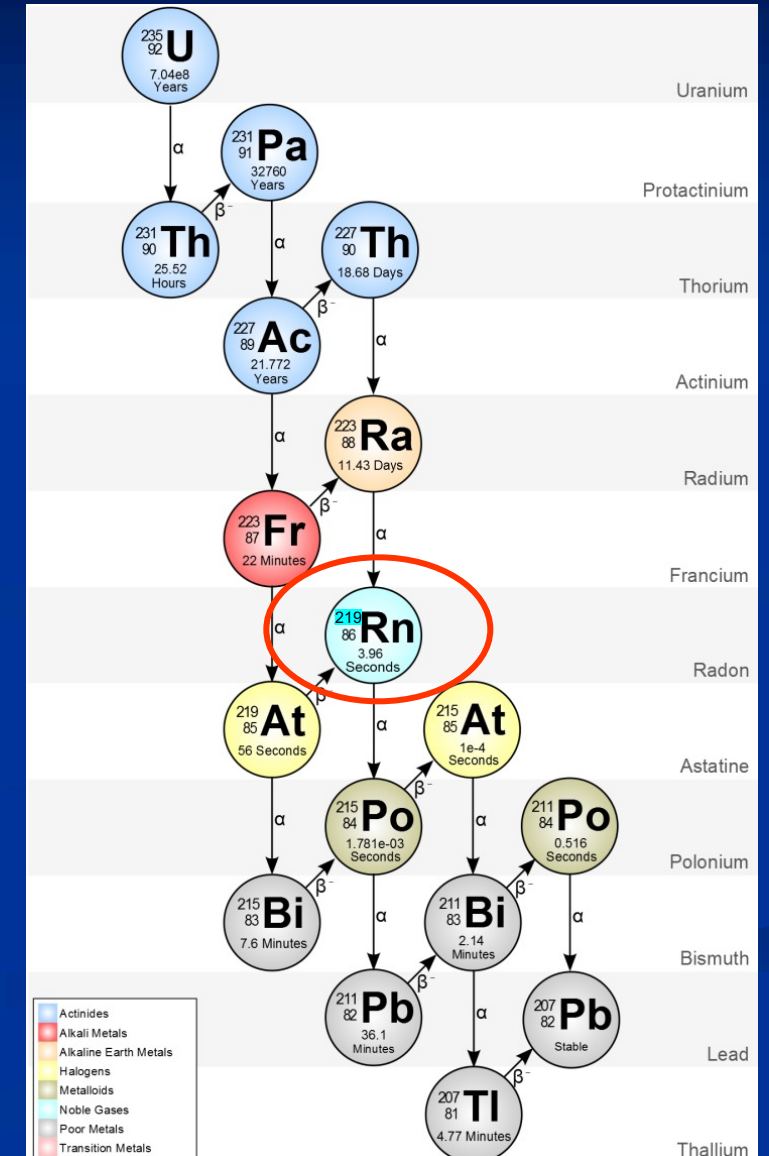
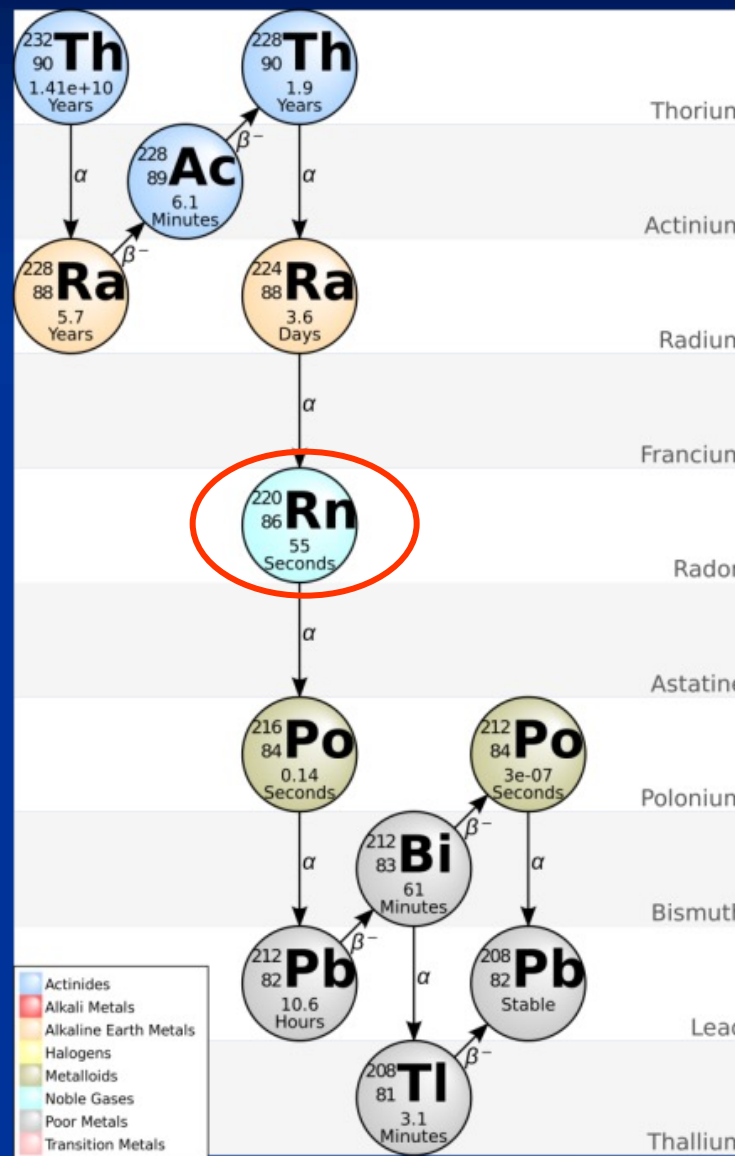
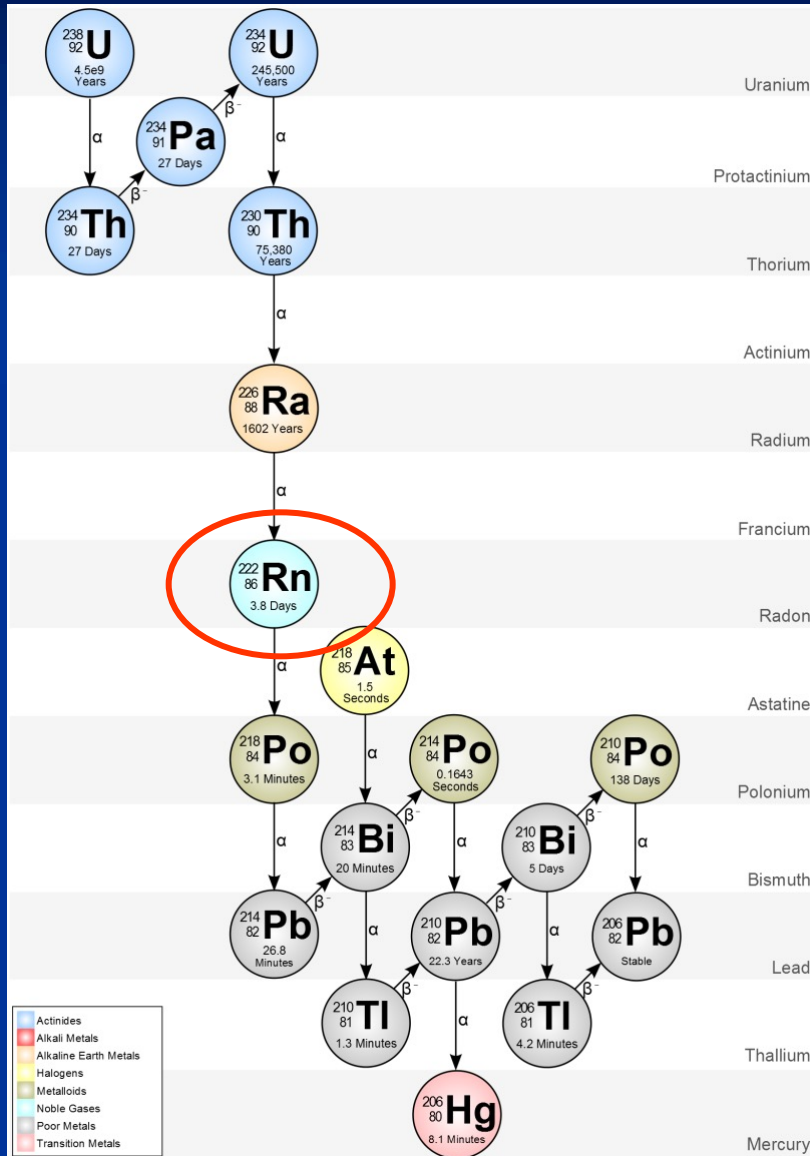
- K-40, Rb-87

- Famiglia U-238 (Rn-222)

- Famiglia Th-232 (Rn-220)

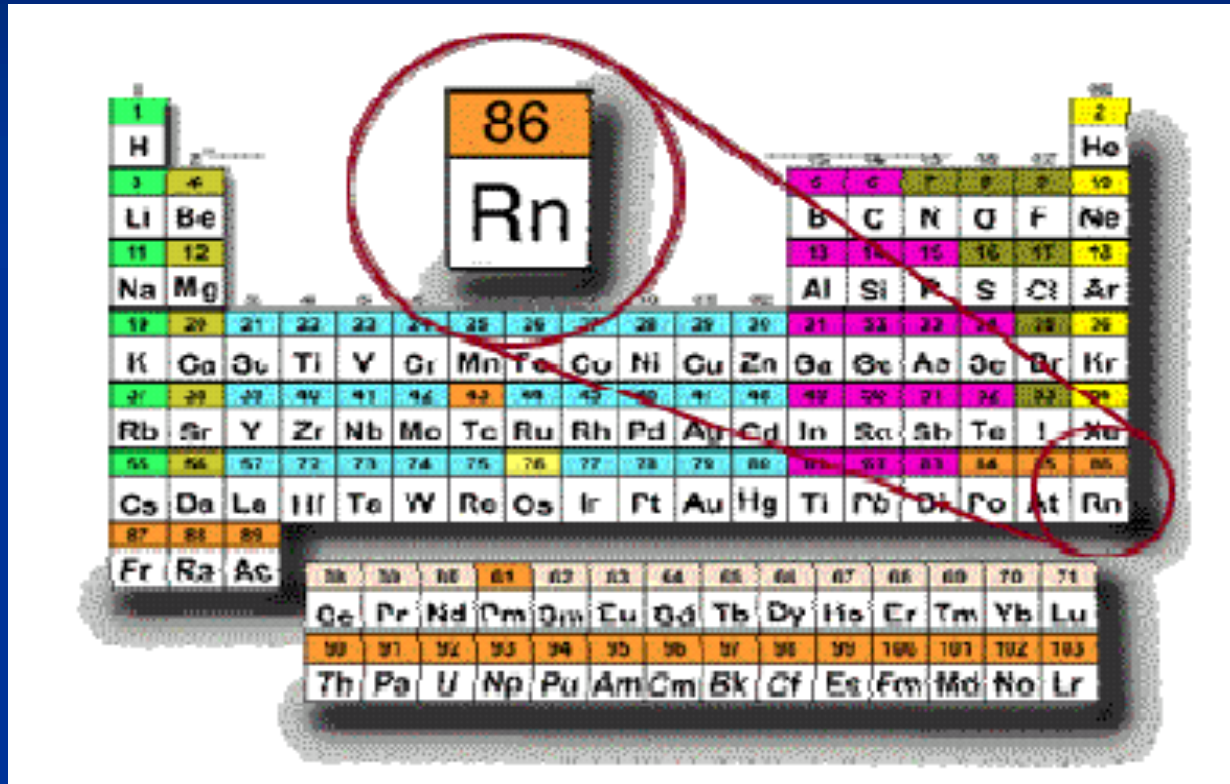
- Famiglia U-235

# Serie di decadimento radioattivo naturale





# Il Radon



The image shows a periodic table of elements. The element Radon (Rn) is highlighted with a red circle. A red line connects the circle to the text on the right. The periodic table includes the following elements:

1																	2	
H																	He	
3	4											5	6	7	8	9	10	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
11	12											13	14	15	16	17	18	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89																
Fr	Ra	Ac	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

- è un gas naturale, nobile (inerte) e radioattivo, 7,5 volte più pesante dell'aria
- è prodotto dalla serie naturale dell'  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$
- la sua diffusione non è uniforme sulla Terra
- può essere pericoloso per la salute ad alte concentrazioni
- viene utilizzato come tracciante nelle attività di ricerca

# Il Radon

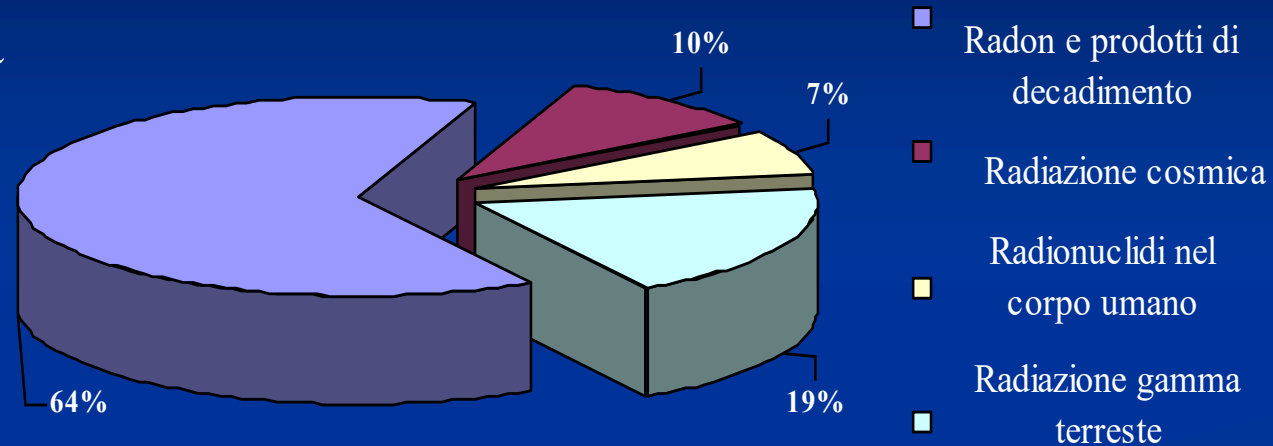
→  $^{222}\text{Rn}$ , prodotto dal decadimento  $\alpha$  del  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=1600$  y), ha un  **$T_{1/2} = 3,82$  d** ed appartiene alla famiglia radioattiva che ha per capostipite  $^{238}\text{U}$ ;

→  $^{220}\text{Rn}$ , chiamato anche Thoron, è prodotto dal decadimento  $\alpha$  del  $^{224}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=3,6$  d) ed ha un  **$T_{1/2} = 55$  sec** ed appartiene alla famiglia radioattiva che ha per capostipite  $^{232}\text{Th}$ ;

→  $^{219}\text{Rn}$ , chiamato anche Actinon, ha un  **$T_{1/2} = 4$  sec** e discende dal più raro  $^{235}\text{U}$ ;

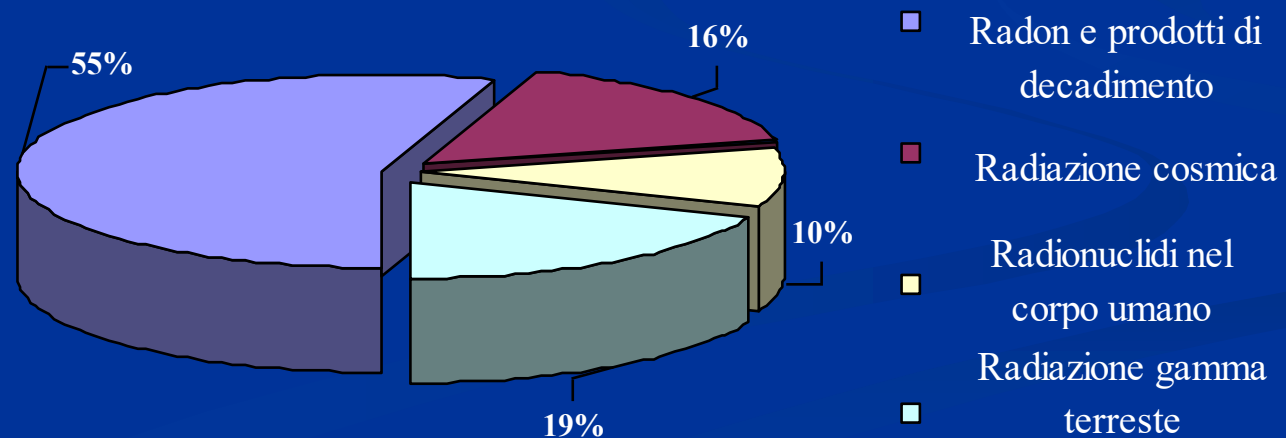
# Ripartizione percentuale delle dosi assorbite da sorgenti naturali

## Popolazione italiana

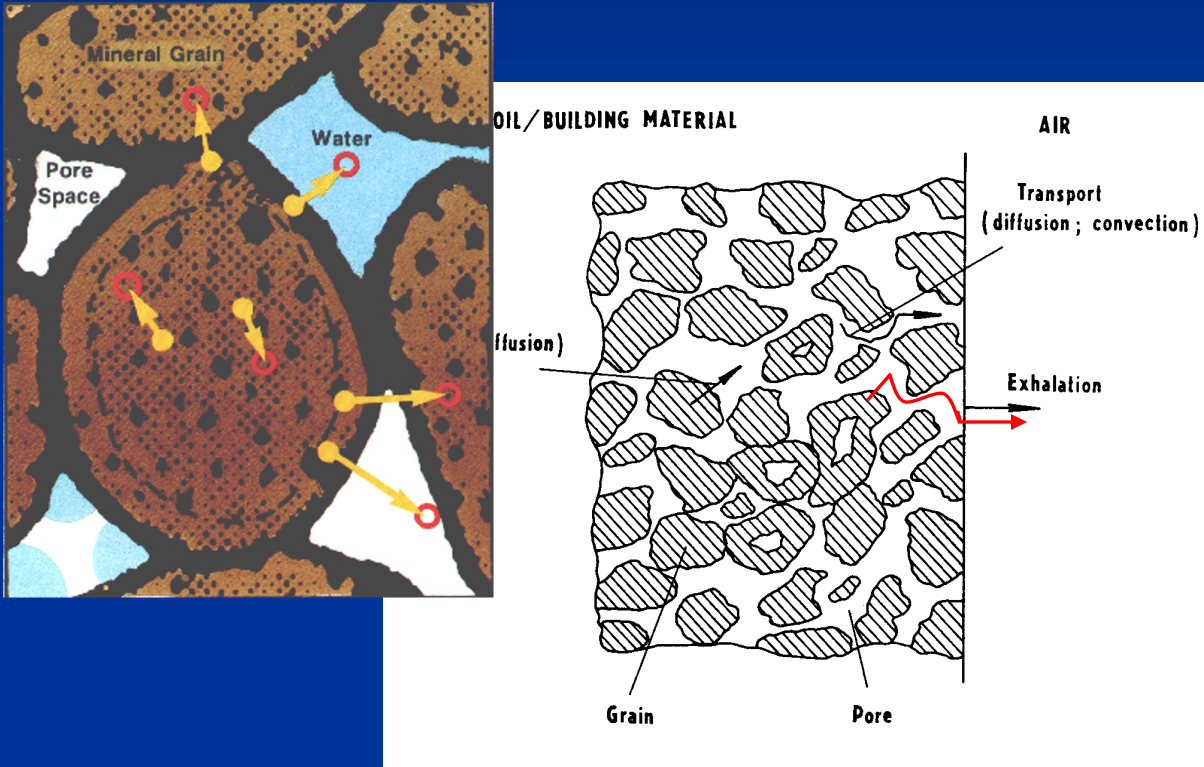


## Popolazione mondiale

Il fondo naturale sulle spiagge dello stato del Kerala in India, e di Espirito Santo in Brasile, evidenzia valori di esposizione esterna superiori anche un migliaio di volte i valori medi delle zone normali.

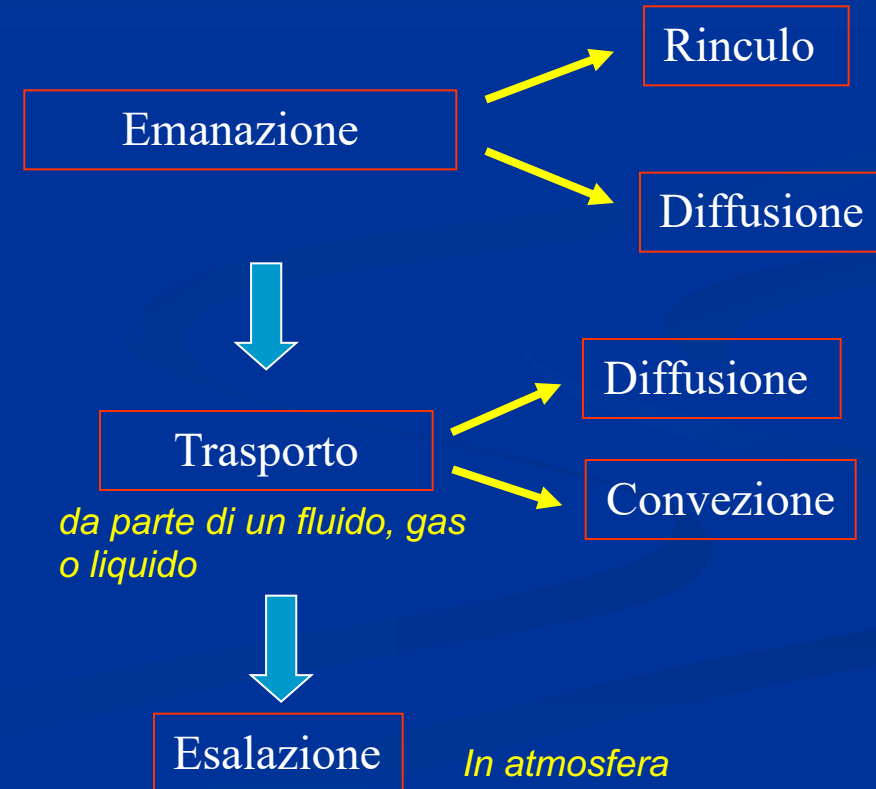


# Produzione e trasporto del Radon



Possono verificarsi tre diverse situazioni:

- l'atomo di radon rimane bloccato nel granulo;
- l'atomo di radon penetra in un granulo vicino;
- l'atomo di radon viene espulso

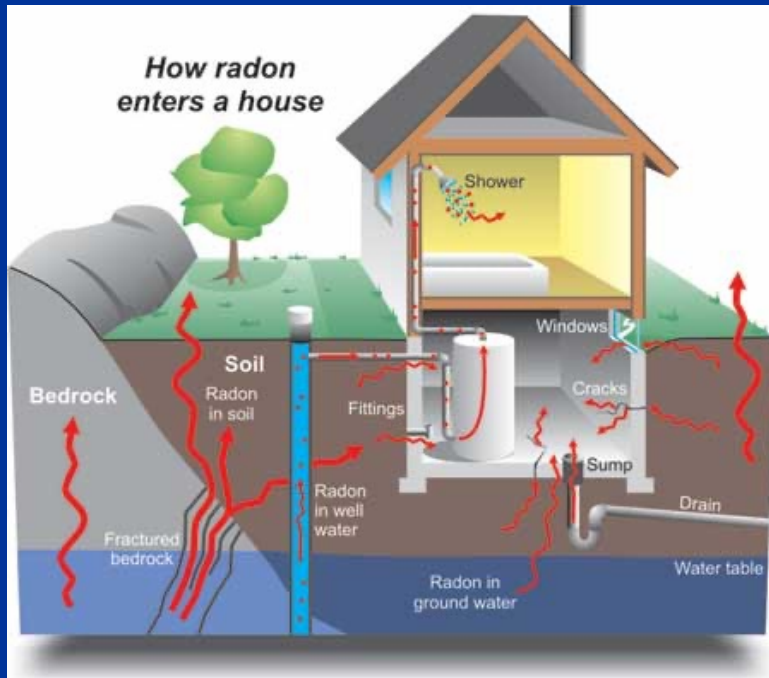


Solo una frazione del radon prodotto in un materiale poroso è in grado di fuoriuscire e trasferirsi nell'acqua o nell'aria.

# Radon indoor

Il radon viene continuamente liberato dalle rocce della crosta terrestre ma non solo .. è anche presente nei materiali da costruzione.

Non esiste luogo ove il Radon non sia presente, ma mentre all'aria aperta si disperde rapidamente e non raggiunge quasi mai concentrazioni elevate, in un ambiente chiuso può accumularsi penetrando attraverso microfrazture presenti nelle murature e nelle fondamenta fino a raggiungere alte concentrazioni. Generalmente l'interno degli edifici è in depressione rispetto all'esterno. La depressione produce un continuo flusso dall'esterno (e quindi anche dal suolo) verso l'interno.



E' proprio la ridotta ventilazione negli edifici, a seguito dei programmi di conservazione energetica iniziati negli anni '70, che ha risvegliato l'attenzione degli addetti ai lavori al problema del radon negli ambienti chiusi.

Un'altra via attraverso la quale il radon può entrare nelle abitazioni è costituita dall'acqua potabile nella quale esso si trova naturalmente disciolto.

# Concentrazioni del Radon negli ambienti chiusi

*Ampia variabilità dipendente dalla diversità geologica dei suol.*

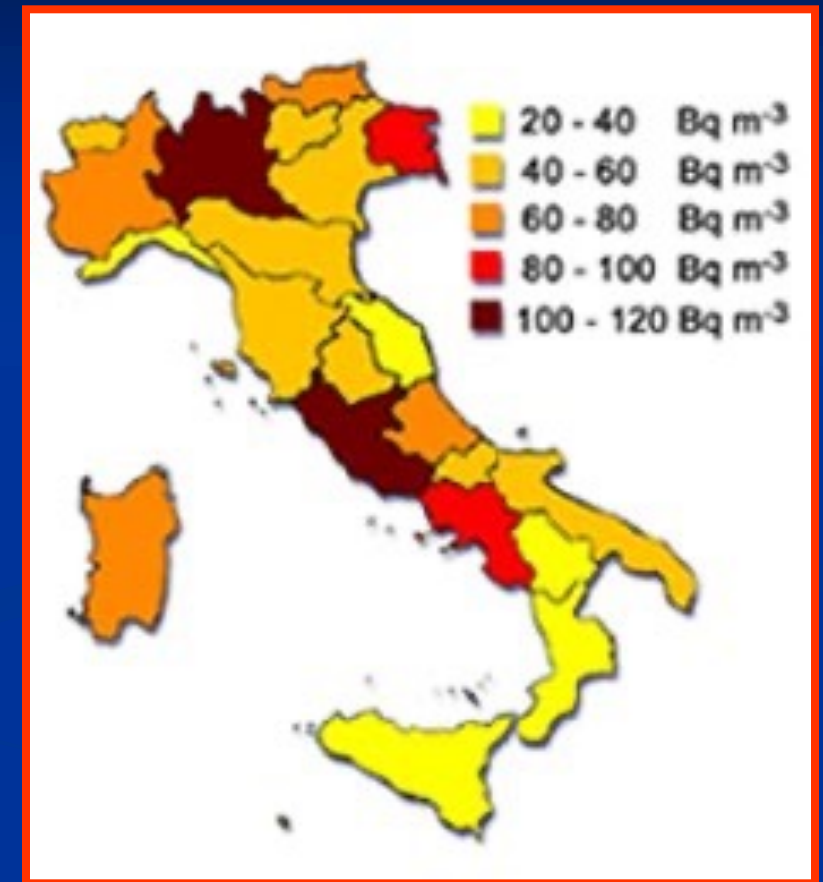
Concentrazione media italiana

70 Bq/m<sup>3</sup>

Concentrazione media mondiale

40 Bq/m<sup>3</sup>

*Il **Becquerel** (Bq) indica il numero di decadimenti di **radon** che avvengono in un secondo. Quindi, ad esempio, una concentrazione di 100 Bq/m<sup>3</sup> indica che in un metro cubo di aria ogni secondo 100 atomi di **radon** decadono emettendo radiazioni (di tipo alfa).*



APAT - [www.sinanet.apat.it](http://www.sinanet.apat.it)

*Perché tanta attenzione sul Radon?*

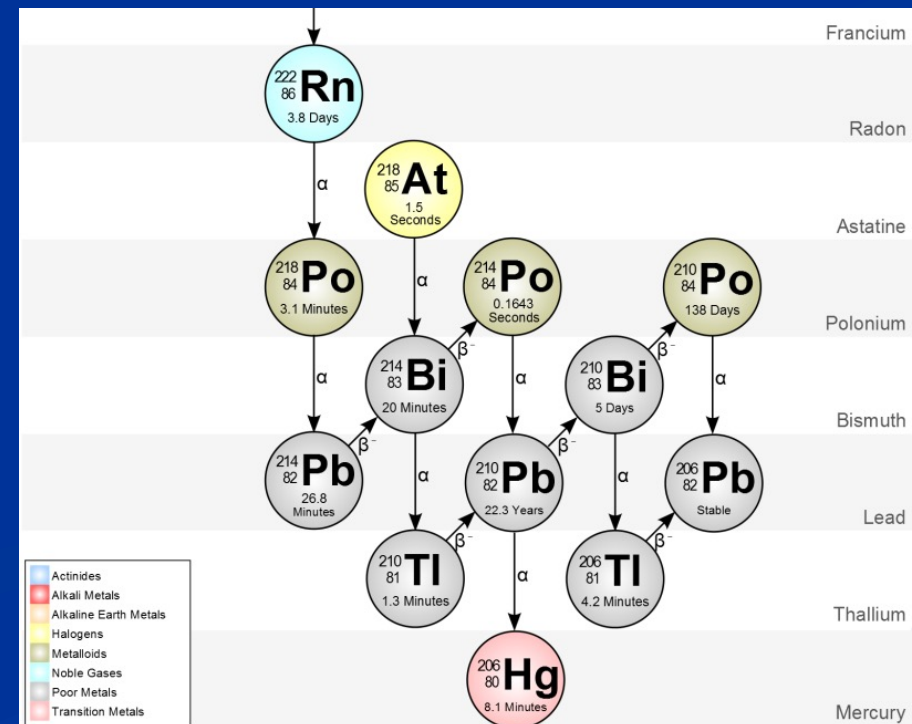
# I Rischi

- Il radon ha una elevata mobilità e si distribuisce rapidamente in tutto l'ambiente in modo piuttosto uniforme.
- Essendo un gas inerte non reagisce chimicamente o elettricamente. Una volta inalato, è prontamente esalato dall'organismo stesso e quindi, dal punto di vista sanitario, non sarebbe poi così pericoloso *ma ...*

il decadimento del Radon, produce altri nuclidi radioattivi:

$^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  ....

**Decadono** alfa (o beta) e sono **chimicamente reattivi**.





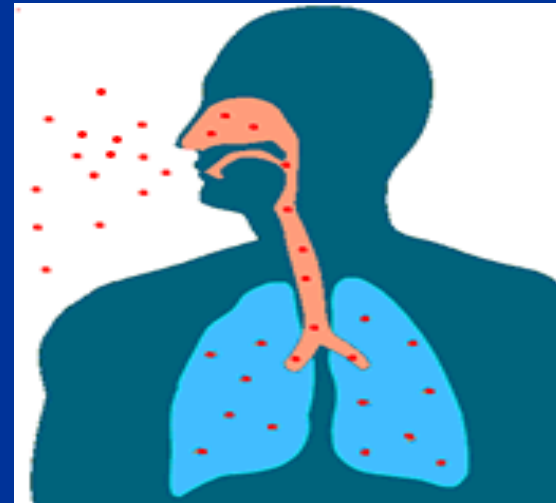
# I Rischi

Una parte dei prodotti di decadimento si fissano agli aerosol, alla polvere e ad altre particelle presenti nell'aria che respiriamo.

In questo modo questi elementi radioattivi penetrano nel nostro apparato respiratorio e si depositano sui tessuti di rivestimento delle vie aeree che vengono esposte a radiazione alfa

Il deposito delle particelle inalate nelle vie respiratorie dipende dalle dimensioni delle particelle:

- Diametro inferiore a  $0,5 \mu\text{m}$ : alveoli polmonari
- Diametro tra  $0,5 \mu\text{m}$  e  $2 \mu\text{m}$ : alveoli e tratto nasofaringeo
- Diametro tra  $2 \mu\text{m}$  e  $10 \mu\text{m}$ : tratto nasofaringeo



**Il polmone è l'organo più radiosensibile del torace**

L'esposizione al Radon anche a piccole dosi comporta una probabilità di contrarre tumore all'apparato respiratorio.

# *Il radon è un agente cancerogeno*

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) attraverso l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha classificato il Radon nel *Gruppo 1* in cui sono elencate le 75 sostanze fino ad oggi classificate come cancerogene per l'uomo.



## Il radon contribuisce al 10% dei tumori polmonari

	Popolazione	Casi/anno totali di tumori polmonari	Concentrazioni medie annuali Bq/m3	Stima di tumori polmonari attribuiti a radon
USA	220.000.000	157000	46	15000
UK	57.700.000	40000	20	2000
SVEZIA	8.700.000	3000	100	900
ITALIA	57.100.000	36000	80	4000

Per i fumatori il rischio assoluto di un tumore polmonare causato dal Radon viene considerato 15-20 volte superiore rispetto al rischio per i non fumatori.

### Problema Radon indoor

La popolazione dei paesi industrializzati trascorre l'80% del proprio tempo in ambienti chiusi (casa, uffici, luoghi di svago)

# Legislazione

**Decreto Legislativo 31 luglio 2020, n. 101, →** attuazione della Direttiva 2013/59/**Euratom** normativa in materia di protezione dalle radiazioni ionizzanti

**L'art. 12** fissa i **nuovi livelli di riferimento della concentrazione media** annua di attività di radon in aria

- a) 300 Bq/m<sup>3</sup> in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per le abitazioni esistenti;
- b) b) 200 Bq/m<sup>3</sup> in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per abitazioni costruite dopo il 31 dicembre 2024;
- c) c) 300 Bq/m<sup>3</sup> in termini di concentrazione media annua di attività di radon in aria per i luoghi di lavoro;

# *Soluzioni per la riduzione del radon*

- Eliminare le fonti (se dovute ai materiali)
- Aumentare la resistenza dell'edificio (sigillare gli ingressi)
- Trattare l'aria (sistemi di filtrazione)
- Allontanare il flusso di gas (sistemi di pressurizzazione, aspirazione e Ventilazione)



*Come possiamo misurare la  
concentrazione di Radon?*

# *Tecniche di rivelazione*

- **Misura istantanea:** tempi brevi rispetto alle variazioni di concentrazione;
- **Misura continua:** fluttuazioni sui tempi dell'ordine dell'ora;
- **Misura integrata:** concentrazioni medie in intervalli di tempo selezionati.

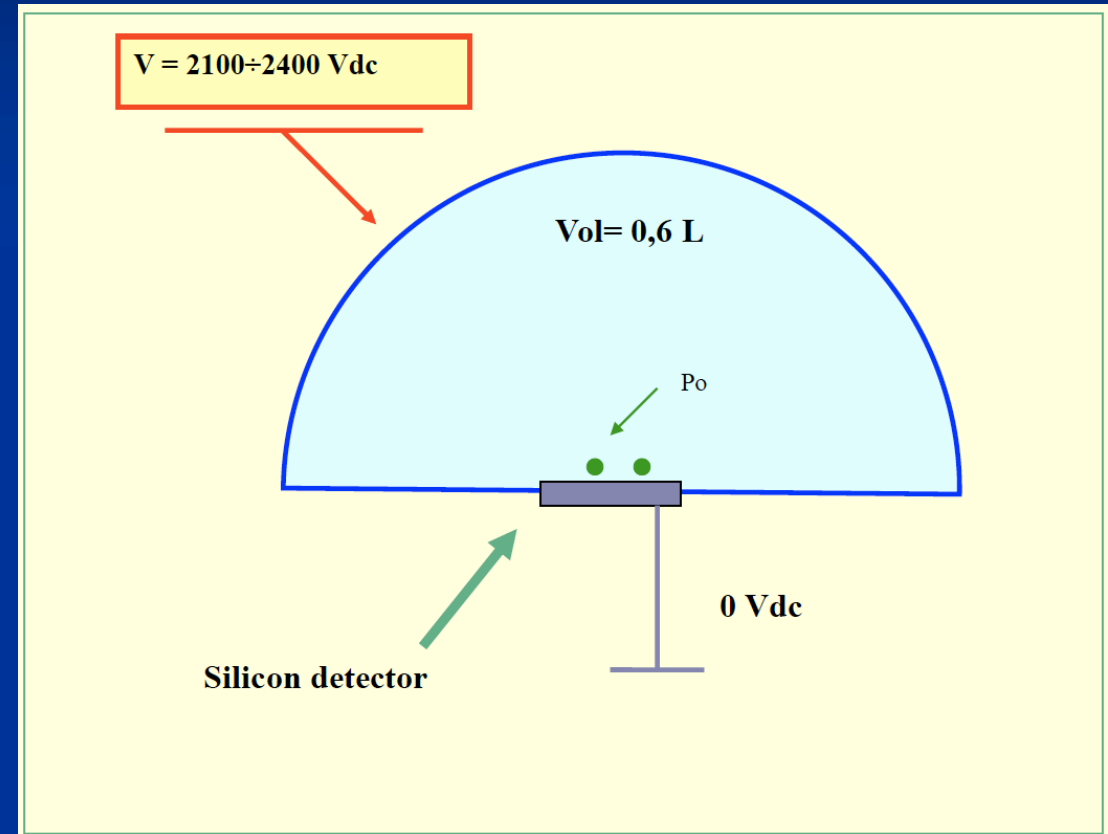
# Tecniche di rivelazione

Rivelatori basati sulla raccolta elettrostatica

sistemi di campionamento attivo

tecniche di campionamento discreto e continuo

RAD7 Radon detector





# *Tecniche di rivelazione*

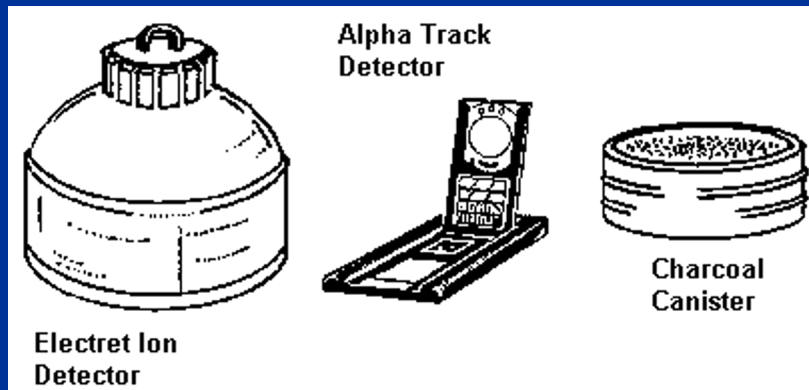
## Sistemi di misure passivi

- Il campionamento è basato sulla naturale diffusione del gas
- Misure in due fasi
  - esposizione
  - lettura in laboratorio
- Non real time

Rivelatori a tracce nucleari

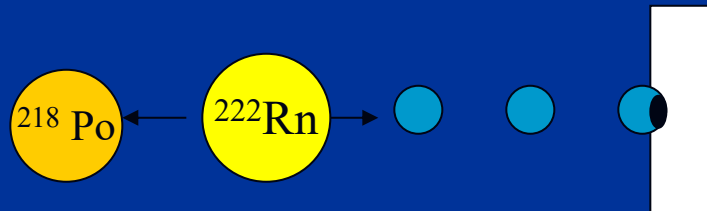
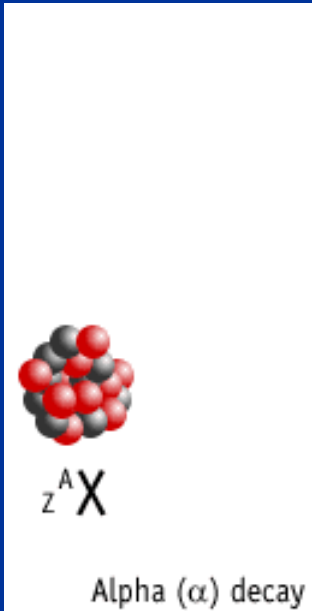
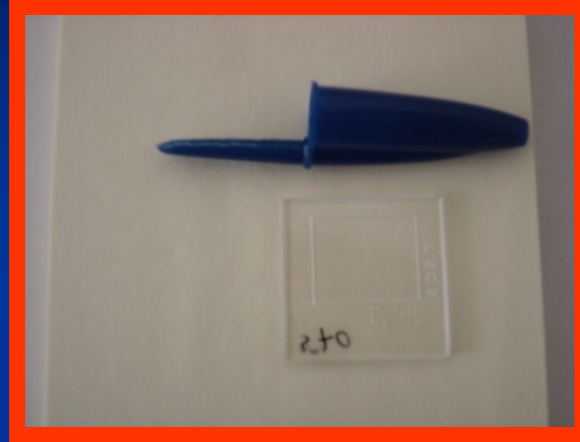
Canestri a carbone attivo

E-PERM

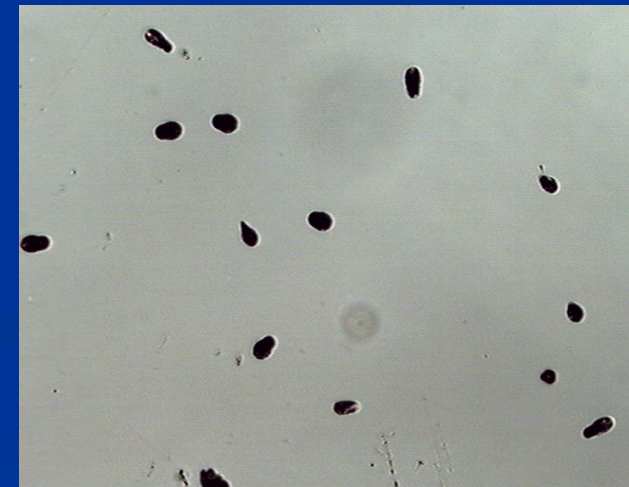


# *I rivelatori a tracce*

- Nitrato di cellulosa LR115
- Solidi inorganici (mica)
- Solidi organici (PADC, CR39)



**Conteggio automatico dei fori**



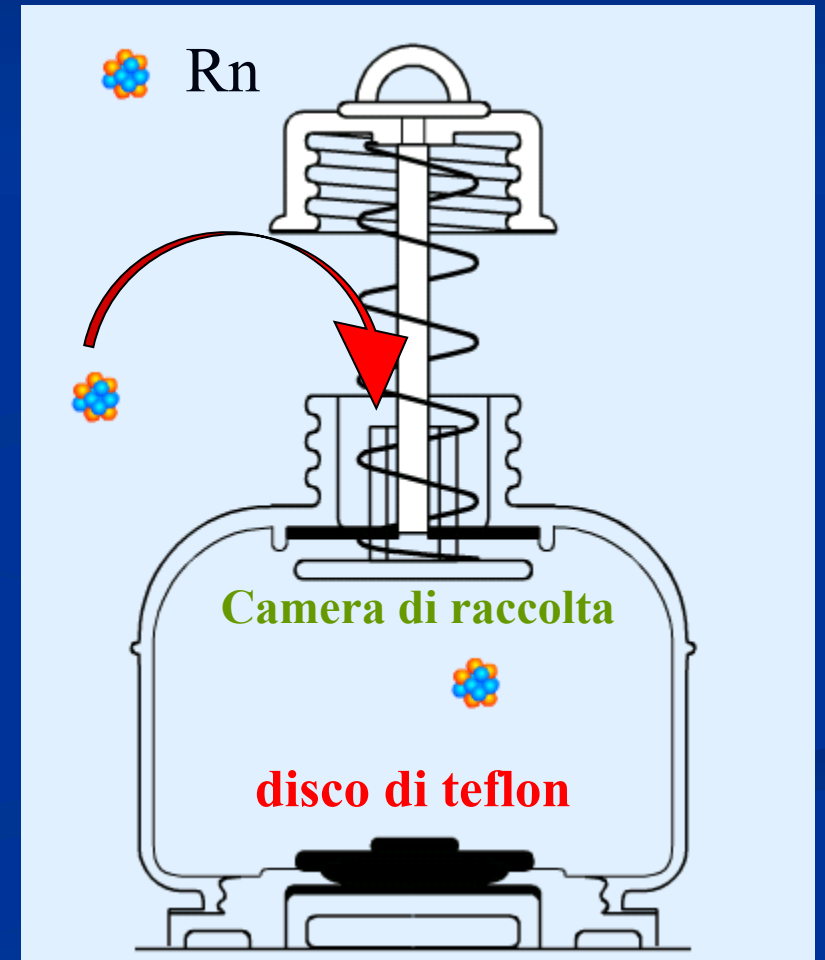
# Elettreti



L'elettrete è un disco di Teflon che mantiene un potenziale elettrostatico stabile.

Raccoglie gli ioni prodotti dalle emissioni del Radon e dei suoi discendenti, per cui il suo potenziale si riduce in modo proporzionale all'attività presente nella camera.

La variazione di carica complessiva del disco dopo l'esposizione ci dà informazioni sul valore di concentrazione di Radon.



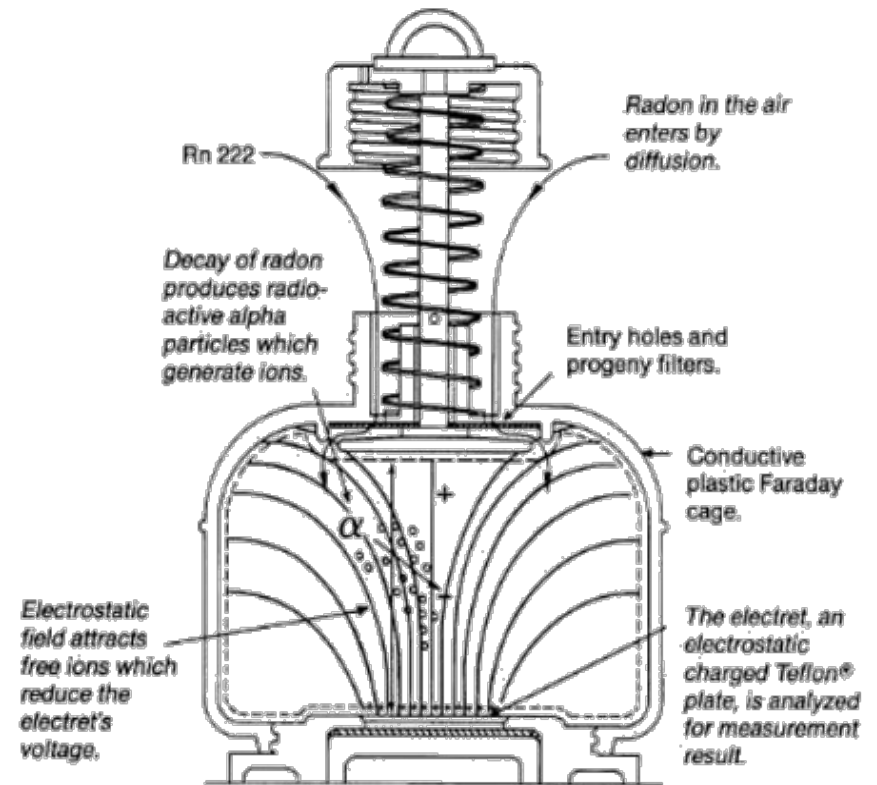
# Elettreti

## IL PRINCIPIO DI MISURA

Solo il gas radon (figli presenti in aria nell'ambiente vengono filtrati) diffonde nella camera fino a che la concentrazione interna è la stessa che nell'ambiente. Le radiazioni emesse dal radon e dai figli generati all'interno della camera ionizzano l'aria.

L'elettrete, carico positivamente, attira gli ioni negativi (elettroni) e questo produce una diminuzione della carica netta e quindi del potenziale superficiale dell'elettrete. Gli ioni positivi si neutralizzano sulla superficie della camera. La variazione di tensione dell'elettrete è proporzionale alla concentrazione radon e al tempo di esposizione.

La misura richiede quindi due letture di voltaggio: una lettura iniziale (I) prima dell'esposizione e una lettura finale (F) dopo l'esposizione. La differenza di voltaggio (I-F) e il tempo di esposizione (D), tramite fattori di calibrazione determinati sperimentalmente, permettono di calcolare la concentrazione radon per una data combinazione camera-elettrete.



Comune	Concentrazione Bq/m <sup>3</sup>
Barrafranca	<b>38,5</b> 37,9 %
Santa Venerina	<b>61,0</b> 25,6 %
Lentini	<b>46,1</b> 30,0 %
Catania	<b>80,0</b> 20,3 %
Catania	<b>57,3</b> 28,3%

Comune	Concentrazione Bq/m <sup>3</sup>
Canicattini Bagni	<b>30,9</b> 44,8 %
Palagonia	<b>67,2</b> 21,8 %
Catania	<b>76,9</b> 21,5 %
Gravina	<b>63,7</b> 23,6 %
Bronte	<b>186</b> 14%
S.G. La Punta	<b>114,2</b> 16,6%

Grazie per  
l'attenzione!