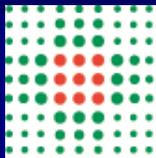


Interazione radiazione-materia

*Dott. Elisa Grassi
S.C. Fisica Medica
ASMN-IRCCS
Reggio Emilia*



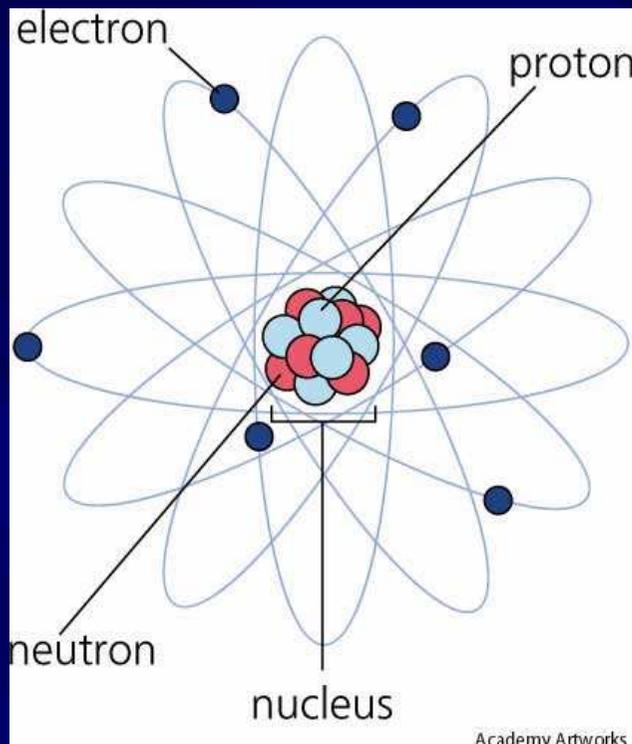
SERVIZIO SANITARIO REGIONALE
EMILIA-ROMAGNA

Azienda Ospedaliera di Reggio Emilia

Arcispedale S. Maria Nuova

Istituto in tecnologie avanzate e modelli assistenziali in oncologia
Istituto di Ricovero e Cura a Carattere Scientifico

Struttura dell'atomo

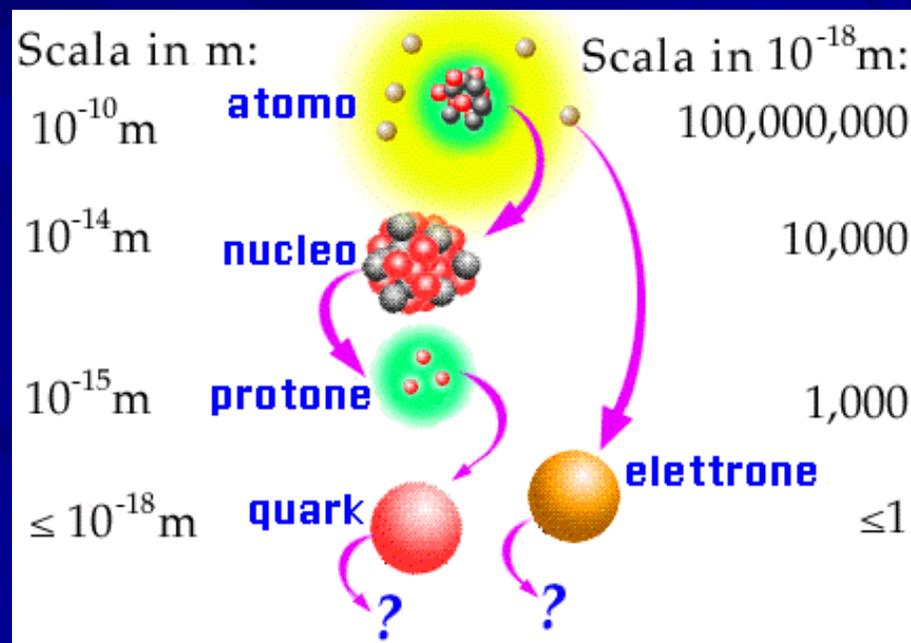


L'atomo schematicamente è costituito da un nucleo centrale e da un certo numero di elettroni che gli ruotano attorno secondo un traiettoria caratteristica dell'elemento chimico.

Il nucleo è composto da subunità:

nucleo { Protoni (carica +)
Neutroni (neutri)

Elettroni: carica -



Struttura dell'atomo

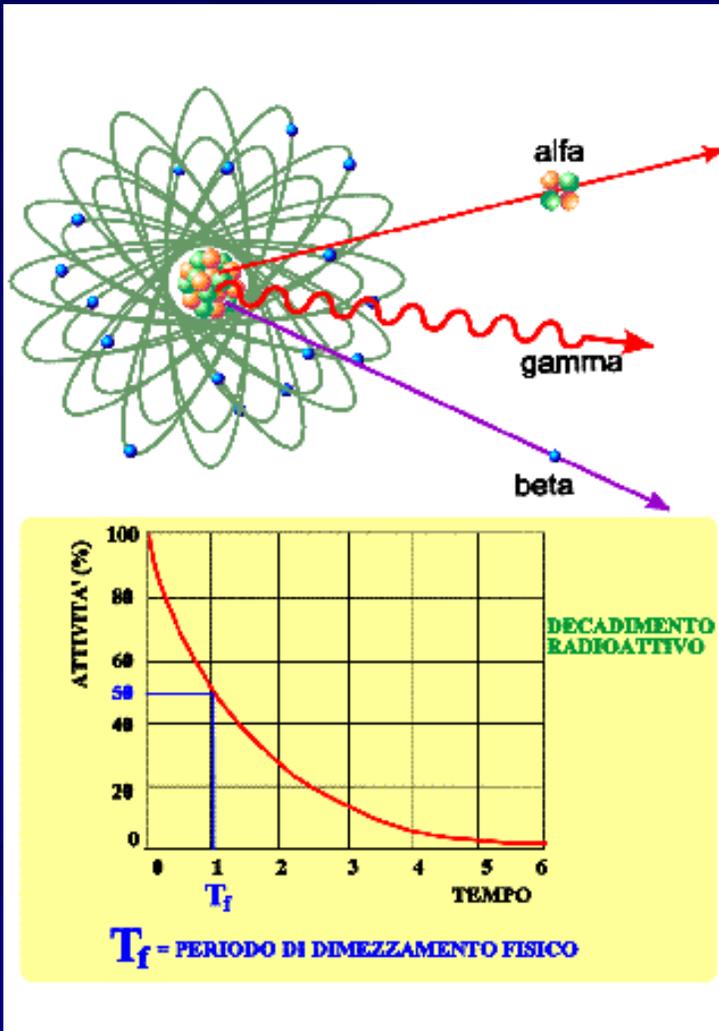
- Il numero di protoni identifica un elemento chimico sulla tavola periodica degli elementi
- Il numero di elettroni coincide con il numero di protoni e l'elemento è caricamente neutro.
- Alcuni elementi chimici sono instabili e mostrano un numero diverso di neutroni rispetto all'elemento stabile.
- Essi sono gli ISOTOPI RADIOATTIVI

Isotopo radioattivo o radioisotopo



- **Isotopo** è ciascuno degli atomi di uno stesso elemento chimico, con lo stesso numero di protoni (e elettroni), ma con differente numero di neutroni.
- Lo stesso numero di protoni ed elettroni significa che ha proprietà chimiche uguali all'elemento chimico, ma il diverso numero di neutroni significa che ha proprietà fisiche diverse.
- Gli isotopi possono essere naturali o artificiali, stabili o instabili (detti anche **isotopi radioattivi**).
- Vengono generalmente rappresentati con il simbolo dell'elemento preceduto a esponente dalla somma del numero di protoni e neutroni del nucleo, detta **numero di massa**. (es. ${}^2\text{H}$ o deuterio, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$, ${}^{131}\text{I}$).

Il fenomeno della radioattività



■ Decadimento radioattivo: l'attività di un radioisotopo diminuisce nel tempo con legge esponenziale

■ Unità di misura → Bequerel o Curie

1 Bq = 1 disintegrazione nucleare al secondo

I loro multipli e sottomultipli:

1 kBq = 1000 Bq

1 MBq = 1000000 Bq

1 mCi = 0.001 Ci

■ Tempo di dimezzamento o emivita: l'attività dopo un tempo di dimezzamento è la metà del valore misurato all'istante iniziale di riferimento

Legge della radioattività

- Se N_0 sono i nuclei radiattivi presenti all'istante t_0 , i nuclei radiattivi presenti all'istante t sono dati da:

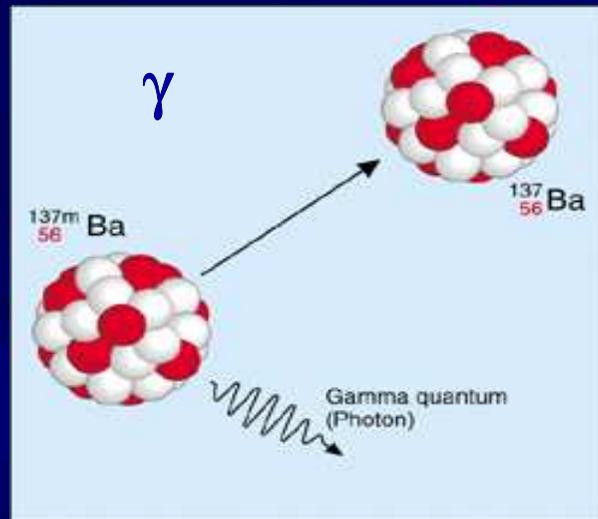
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

dove λ è la costante di decadimento specifica per ciascun radioisotopo.

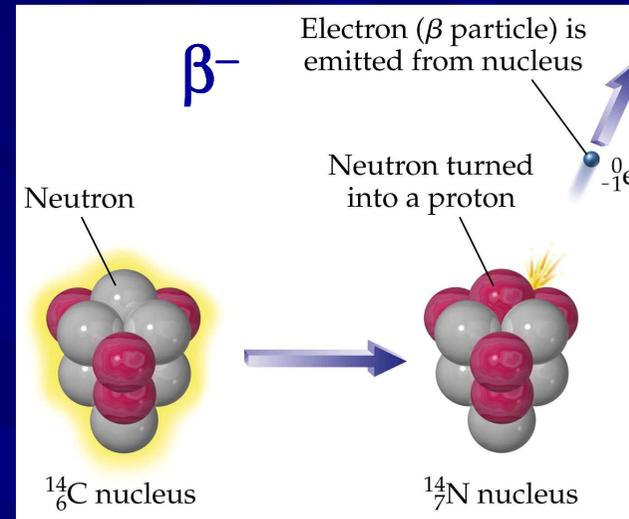
$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ dove $T_{1/2}$ è il tempo di dimezzamento, ossia:

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

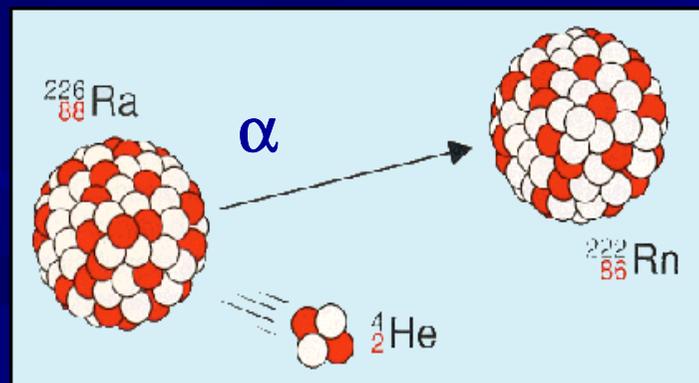
Emissioni radioattive α , β , γ



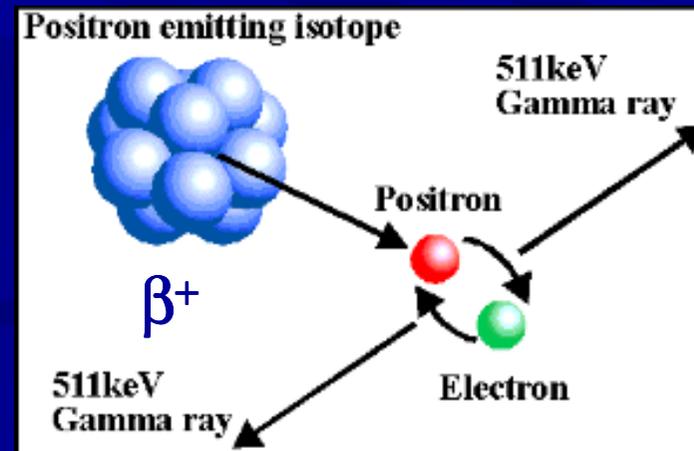
Esempio: ^{137}Cs , ^{99m}Tc



Esempio: ^{90}Y , ^{14}C



Esempio: ^{226}Ra , ^{241}Am

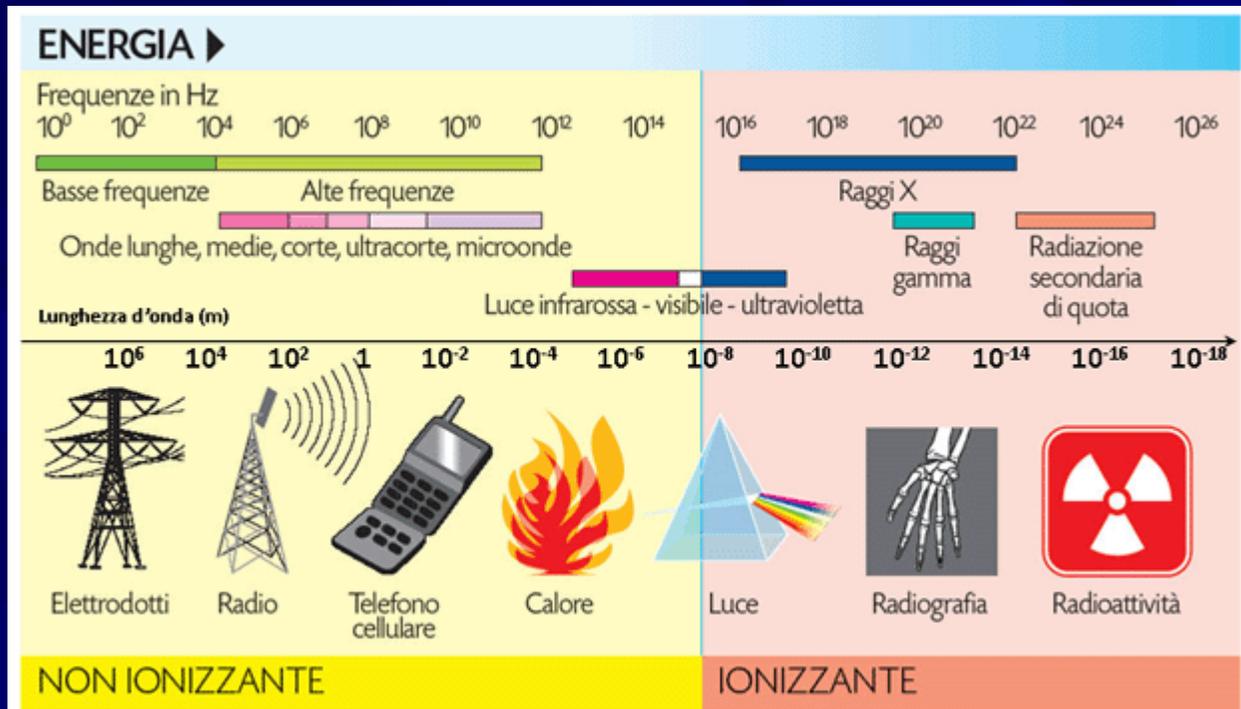


Esempio: ^{18}F , ^{68}Ga

Cos'è la radiazione?

Con radiazione si intende la propagazione di energia attraverso lo spazio o un qualunque mezzo materiale, sotto forma di onde (radiazioni elettromagnetiche) o di energia cinetica propria di alcune particelle (radiazioni corpuscolari).

Radiazioni elettromagnetiche



La suddivisione in radiazioni elettromagnetiche ionizzanti e non ionizzanti si basa sulla capacità della radiazione di ionizzare atomi e molecole, cioè di indurre dei cambiamenti nelle biomolecole.

Se la r.e. ha energia inferiore a circa 12eV (fino a 35eV a seconda delle molecole), essa non è in grado di ionizzare la materia, ma la eccita solamente, induce cioè dei movimenti elettronici nella materia, senza modifiche importanti delle biomolecole.

Le r.e. ionizzanti sono rappresentate principalmente da fotoni X e gamma, entrambi usati in medicina.

Ciò che differenzia i fotoni X da quelli gamma è la loro origine: i fotoni gamma hanno origine nel nucleo atomico, i fotoni X invece dai gusci elettronici esterni al nucleo.

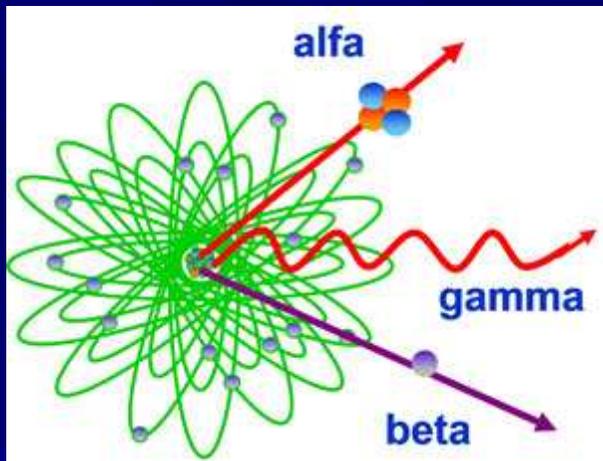
Radiazioni elettromagnetiche

In genere i fotoni X sono utilizzati principalmente per indagini radiologiche come radiografie e esami CT

I fotoni gamma hanno origine per decadimento radioattivo da atomi instabili utilizzati in Medicina Nucleare per diagnostica (scintigrafia, PET, SPECT) e terapia (per carcinoma tiroideo, malattie benigne della tiroide, NET,....).

Radiazione corpuscolare

Le radiazioni corpuscolari sono costituite da particelle subatomiche (elettroni, positroni, nuclei atomici, neutroni). Tra queste vi sono le radiazioni α , β , n (alfa, beta, neutroni). Per loro natura sono in genere ionizzanti.



Particella alfa: nucleo di elio ${}^4_2\text{He}$ con doppia carica positiva

Particella beta: può essere un elettrone con carico negativa (β^-) oppure un elettrone con carica positiva (β^+). Mentre β^- può essere già presente nell'atomo, β^+ viene prodotto da specifiche trasformazioni nucleari.

Neutrone: particella nucleare neutra

α , β , n sono espulse dagli atomi solo a seguito di decadimento radioattivo o di determinate reazioni nucleari indotte artificialmente

Riassumendo: radiazioni ionizzanti.....

Ogni radiazione, interagendo con la materia, **cede energia** alla struttura atomica/molecolare del materiale attraversato.

Se l'energia ceduta è sufficiente (**radiazioni ionizzanti: $E \geq 13.5 \text{ eV}$**), si verificano nel materiale effetti distruttivi (frammentazioni, rotture di legami, ionizzazione, ...).

Radiazioni ionizzanti:

- **elettromagnetiche** ($m=0, E=h\nu$) → raggi X e γ
- **corpuscolari** ($m>0, T$) → particelle $\alpha, \beta^\pm, p, n, \dots$

Particelle cariche: α, β^\pm, p

→ ionizzazione diretta degli atomi del mezzo

Particelle neutre: n, X, γ

→ ionizzazione indiretta tramite produzione di particelle cariche secondarie

Per ionizzare una molecola sono tipicamente necessarie energie da 1 a 35 eV

Ionizzazione della materia

Interazione di particelle cariche :

range (percorso nella materia)
perdita di energia per ionizzazione
perdita di energia per radiazione



ionizzazione diretta
degli atomi del
mezzo

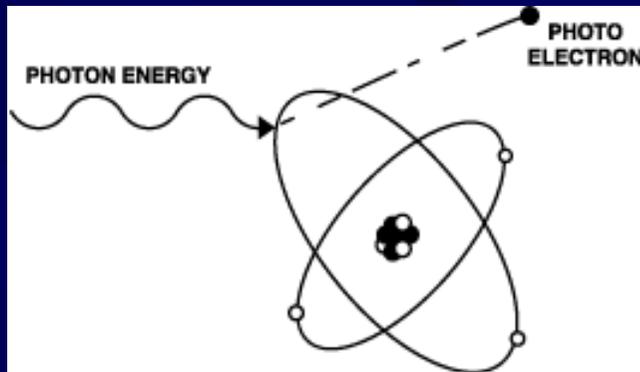
Interazione di particelle neutre:

neutroni

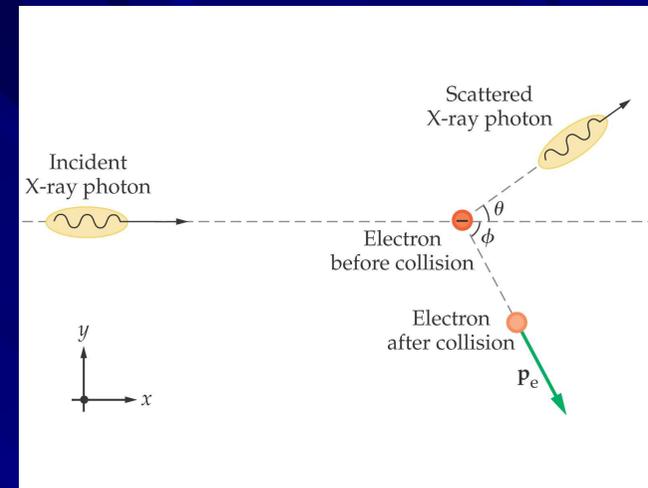
fotoni: effetto fotoelettrico
effetto Compton
produzione di coppie



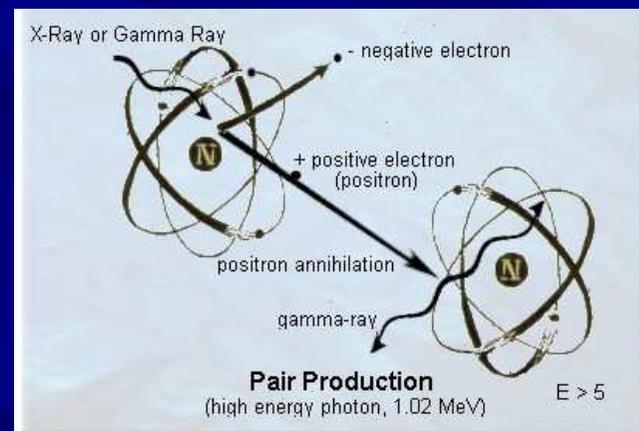
ionizzazione
indiretta tramite
produzione di
particelle cariche
secondarie



Effetto fotoelettrico



Effetto Compton



Produzione di coppie e fotoni di annichilazione

Tipi di sorgenti di radiazioni ionizzanti

- **Macchine radiogene:** sono apparecchiature nelle quali sono accelerate particelle elementari cariche, che interagendo su opportuni bersagli producono i fasci di radiazione da utilizzare. L'esempio più noto è quello dei tubi a raggi X, utilizzati nella radiologia medica, ove fasci di raggi X sono appunto prodotti per interazione degli elettroni accelerati con idonei bersagli di elevato numero atomico.
- **Sorgenti sigillate:** sono quelle in cui l'elemento radioattivo o un suo composto è incorporato in un involucro metallico ermeticamente chiuso atto ad evitare qualsiasi dispersione o contatto diretto con la sorgente stessa.
- **Sorgenti non sigillate:** qualsiasi sorgente che non corrisponde alle caratteristiche o ai requisiti della sorgente "sigillata".

Come proteggersi dalle radiazioni prodotte da sorgenti artificiali?

■ **Distanza dalle sorgenti**



■ **Schermature**



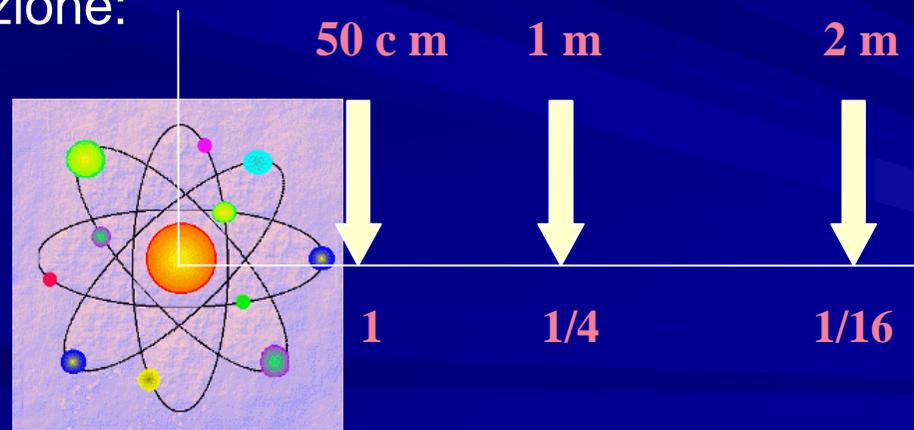
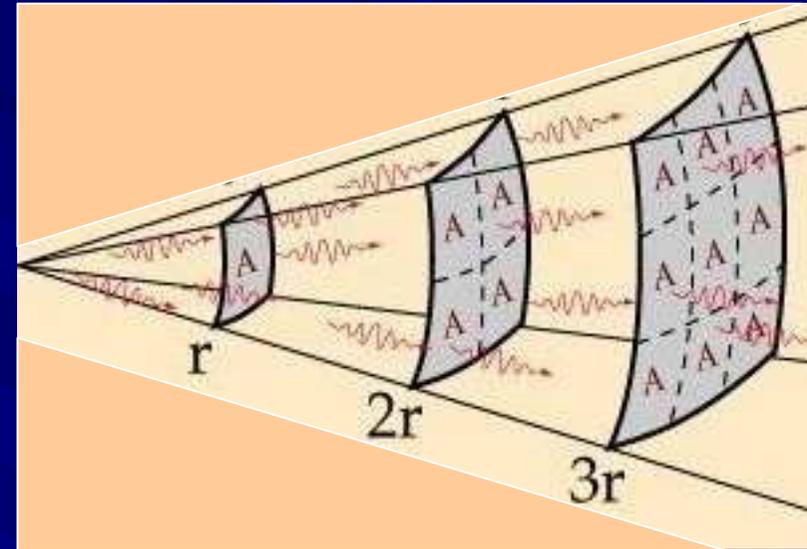
■ **Tempo di esposizione**



Mezzi di protezione: distanza

■ La dose da radiazioni ricevuta da un individuo è con buona approssimazione inversamente proporzionale al quadrato della distanza esistente tra la sorgente e l'individuo stesso

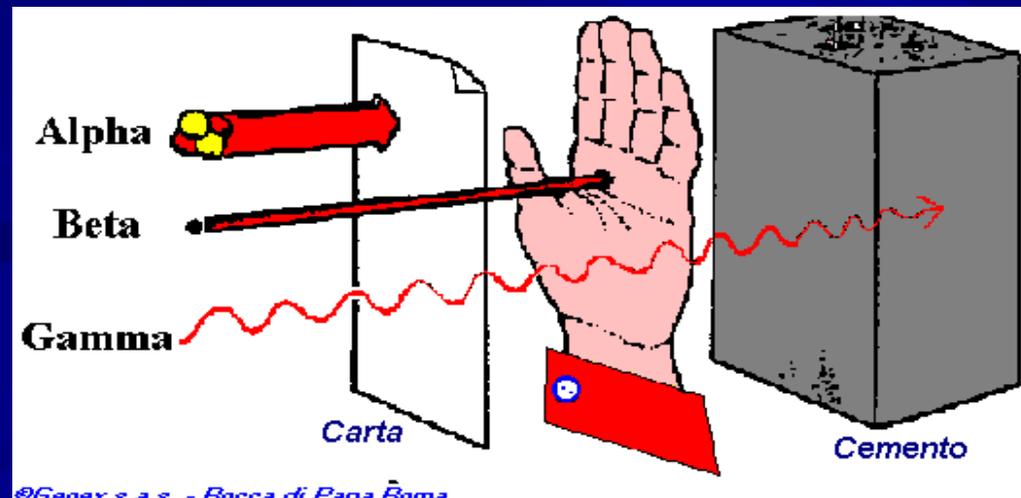
■ La distanza costituisce quindi il primo e più semplice mezzo di protezione:



raddoppiando la distanza tra individuo e sorgente la dose ricevuta si riduce a $\frac{1}{4}$

Mezzi di protezione: schermature

- Si fa uso delle schermature: schermi costruiti in idoneo materiale per “bloccare” o “attenuare” i diversi tipi di campi di radiazioni
- Ogni sorgente radioattiva richiede la sua specifica barriera per schermare ad hoc le emissioni prodotte



Mezzi di protezione: tempo di esposizione



- Intuitivamente maggiore è il tempo di permanenza nelle vicinanze di una sorgente, maggiore è la dose che si riceve.

La maggior parte delle radiazioni ionizzanti possono essere misurate...



Camera a ionizzazione



Contaminametro a larga superficie



Contaminametro mani-piedi-vesti

Scopo della radioprotezione

Prevenire l'accadimento di seri danni radioindotti (effetti deterministici acuti e cronici) nelle persone esposte.

Ridurre a valori accettabili i rischi dovuti agli effetti stocastici, in relazione con i benefici individuali e sociali derivanti dalle attività che danno luogo al rischio.



I 3 principi della Radioprotezione

- 1° **Giustificazione:** l'esposizione alle radiazioni deve essere giustificata dal beneficio che ne deriva).
- 2° **Ottimizzazione:** l'esposizione alle radiazioni deve essere ridotta al livello più basso ragionevolmente possibile.
- 3° **Limitazione:** le dosi non debbono superare i limiti previsti dalla normativa.



Sorgenti di radiazioni ionizzanti

- Le radiazioni ionizzanti sono presenti in natura o sono prodotte in seguito ad attività umane (sorgenti artificiali)
- Le sorgenti di radiazioni ionizzanti sono sostanzialmente di due tipi:
 - ✓ **apparecchi che producono radiazioni**
 - ✓ **isotopi radioattivi o radioisotopi**

Un po' di nomenclatura...

- L'effetto biologico delle radiazioni è correlato alla **dose assorbita** dal tessuto o dall'organo.
- La dose assorbita rappresenta l'energia assorbita per unità di massa dal tessuto irraggiato.
- L'unità di misura della dose è il Gray (**Gy**): per tenere conto del tipo di radiazione e della radiosensibilità dei tessuti irraggiati si introduce la **dose efficace** che si misura in Sievert (**Sv**).
- Per valutare se "*stiamo ricevendo tante radiazioni o poche*" facciamo riferimento alla **dose efficace** o **al rateo di dose efficace**
- **Rateo di dose** = dose assorbita nell'unità di tempo, si misura in Sv/h, Sv/anno e suoi sottomultipli

La radiazione ambientale



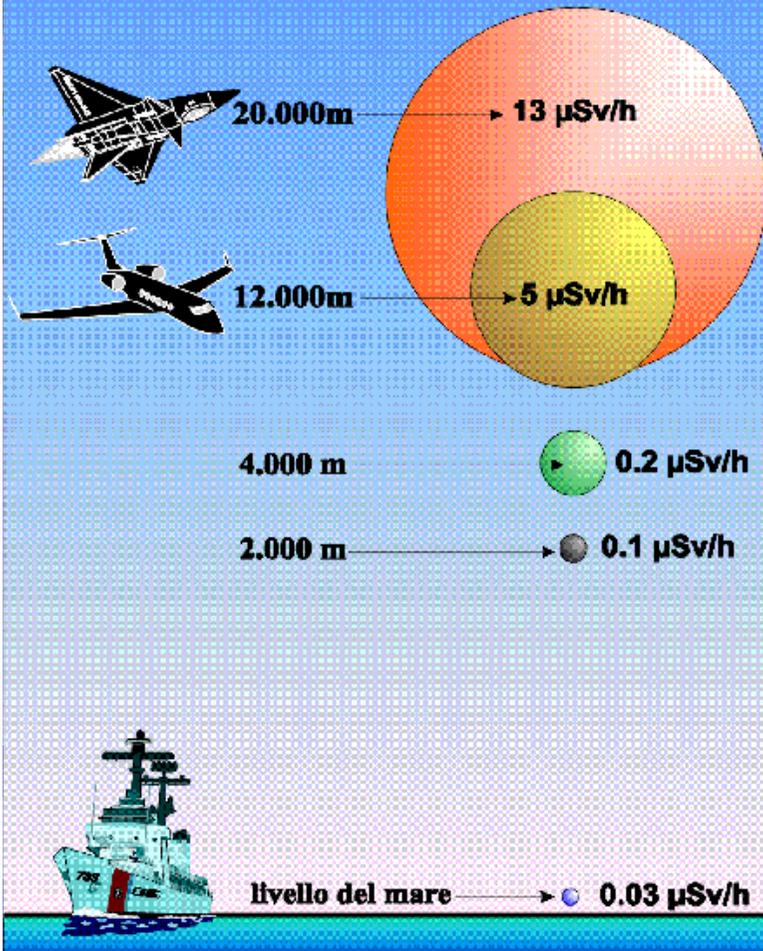
$$1 \text{ mSv} = 0.001 \text{ Sv}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Sv} = 0.000001 \text{ Sv}$$

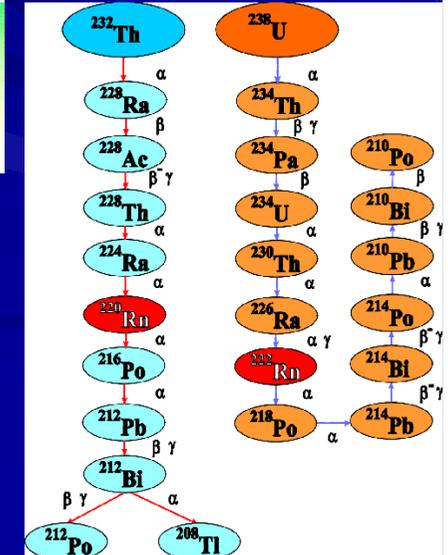
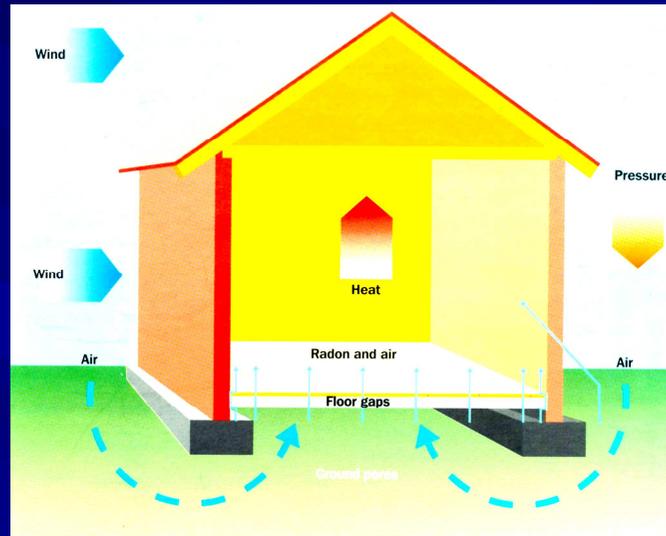
Esposizione Esterna	mSv/anno	mSv/anno
Raggi cosmici	0.4	0.3 - 1
raggi gamma terrestri	0.5	0.3 - 0.6
Esposizione interna		
Inalazione (Radon)	1.2	0.2 - 10
Ingestione	0.3	0.2 - 0.8
Totale	2.4	1 - 10

Raggi cosmici e famiglie radioattive

RAGGI COSMICI

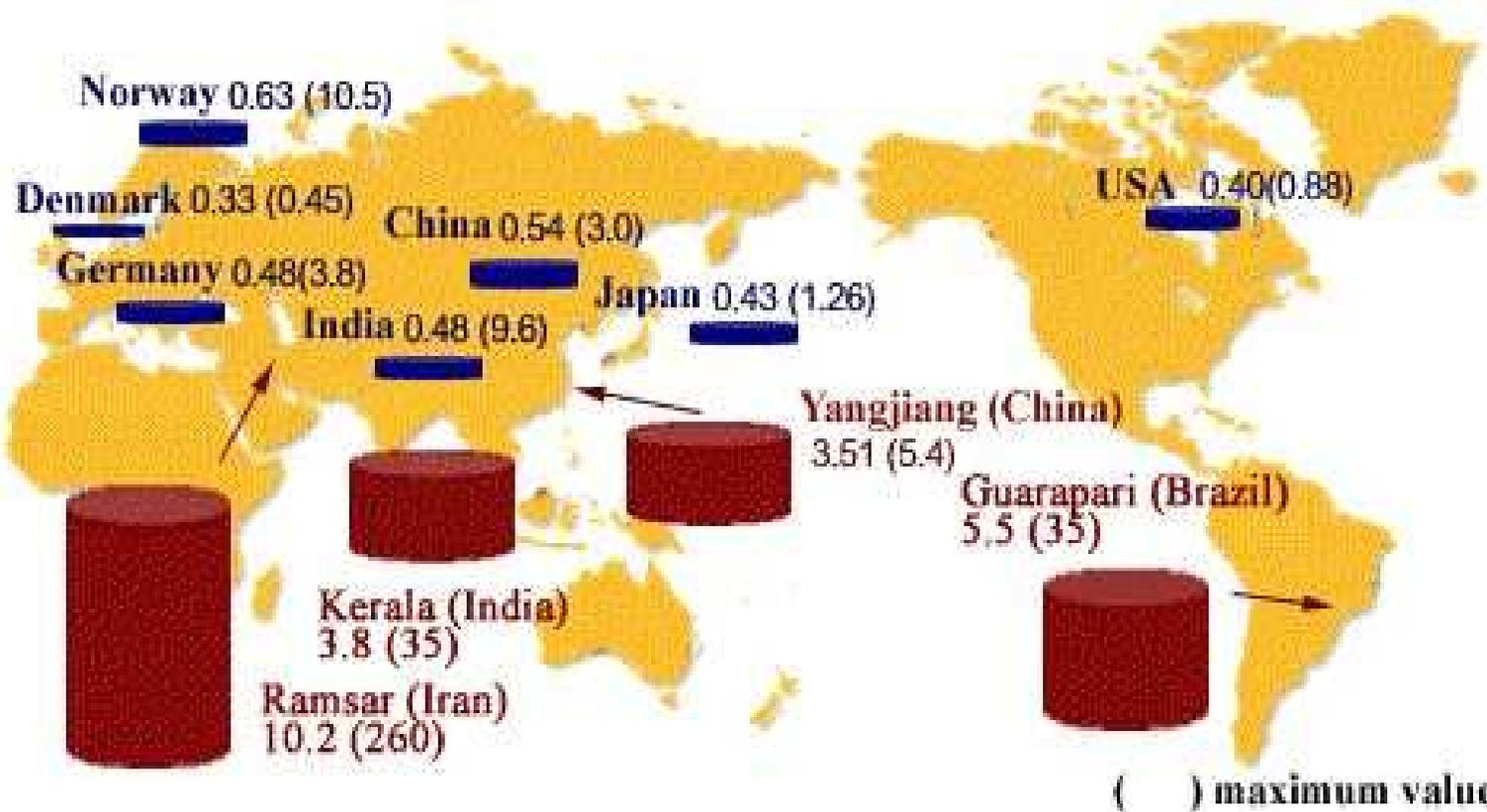


8 ore di volo a 8000 m: 21 μSv \rightarrow 0.88% del fondo
 14 gg montagna a 1200 m: 26 μSv \rightarrow 1% del fondo



Dose ambientale da irradiazione esterna

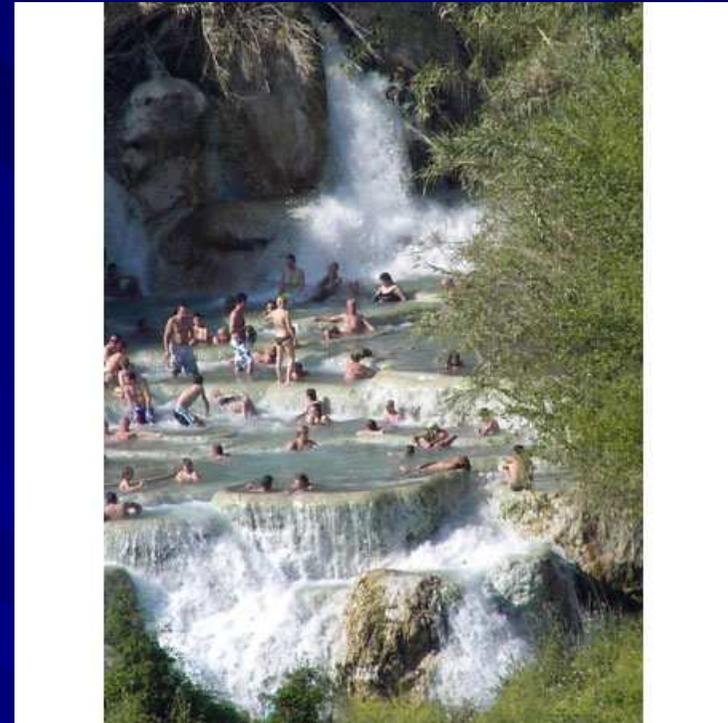
DOSI AMBIENTALI
(valori annui in mSv)



poli:

Acque radioattive curative

- ...inoltre l'acqua radioattiva ha un effetto positivo sulle vie respiratorie, in quanto rafforza le difese delle mucose respiratorie. Quest'acqua sulfurea e a contenuto salino proviene da una profondità di 2.350 metri a temperatura di 33°. Un'acqua omeotermale ricca di minerali –sodio, calcio, cloruri- e oligoelementi come boro, litio, selenio e iodio con un contenuto salino paragonabile a quello dell'acqua marina.



- Diversi possono essere gli elementi radioattivi presenti in traccia nelle acque minerali e tra questi il radio, il radon, il torio, l'attinio, l'uranio, etc.

- L'elemento presente in quantità maggiore nelle acque radioattive è lo stesso elemento che permette alle acque radioattive di essere considerate una cura terapeutica : il **radon** (simbolo chimico ^{222}Rn con emivita di 38g).

Acque radioattive curative

- Il radon è una sostanza gassosa disciolta nell'acqua e nasce dal decadimento alfa del ^{226}Ra .

■ Il radon viene facilmente assorbito dalle mucose della cute, del sistema respiratorio e dell'apparato digerente e con la stessa facilità viene eliminato.

Per le sue caratteristiche fisiche e metaboliche il radon presente **nell'organismo dimezza in circa 4 giorni** e questo spiega perché non possa essere dannoso.



Uso di sorgenti radioattive in medicina nucleare

- Esami diagnostici e terapie basate sulla somministrazione di radiofarmaci

Radiofarmaco è un farmaco che è stato marcato con un isotopo radioattivo

Attività diagnostica

Vengono rivelate le radiazioni che escono dal paziente: la diagnosi è effettuata determinando dove si è concentrato il radiofarmaco

Si usano γ **emettitori**

Attività terapeutica

Il radiofarmaco si concentra negli organi o tessuti da colpire. La radiazione distrugge le cellule del tessuto.

Si usano β **emettitori**. Es:

- ^{131}I , $^{177}\text{Lu} \rightarrow \beta + \gamma$
- $^{90}\text{Y} \rightarrow \beta$

Proprietà dei radiofarmaci

- Gli isotopi di uno stesso elemento hanno tutti lo stesso comportamento chimico e metabolico e non possono essere distinti nell'organismo dagli altri isotopi presenti
- I farmaci radiomarcanti si comportano nello stesso modo dei farmaci non radioattivi
- L'effetto biologico in terapia e l'efficacia diagnostica sono sortite dalle particolari emissioni dei radioisotopi

Principali radionuclidi utilizzati in medicina nucleare diagnostica

	E_{γ}	$T_{1/2}$	Attività somministrate
^{99m}Tc	141 keV (89%)	6 h	80 – 1100 MBq
^{123}I	27 keV (71%), 159 keV (83%)	13,2 h	20 – 185 MBq
^{67}Ga	93 keV (39%), 185 keV (21%), 300 keV (17%)	3,26 g	110 – 370 MBq
^{111}In	23 keV (69%), 171 keV (90%), 245 keV (94%)	2,80 g	20 -185 MBq
^{201}Tl	71 keV (47%), 135 keV (3%), 167 keV (10%)	3,04 g	110 – 150 MBq

Medicina nucleare tradizionale

	$E_{\beta \text{ max}}$ (keV)	E_{γ} (keV)	$T_{1/2}$	Attività somministrate
^{18}F	634 (97%)	511 (194%)	1,83 h	250 – 555 MBq
^{11}C	960 (100%)	511 (200%)	20,4 min	\approx 400 MBq
^{13}N	1199 (100%)	511 (200%)	9,97 min	\approx 550 MBq
^{15}O	1732 (100%)	511 (200%)	2,04 min	\approx 2000 MBq

PET

Principali radionuclidi utilizzati in terapia radiometabolica

	$E_{\beta \text{ max}}$ (keV)	E_{γ} (keV)	$T_{1/2}$	Applicazione	Attività somministrate
^{89}Sr	1492 (100%)	909 (1%)	50,7 g	metastasi ossee	148 MBq
^{177}Lu	490keV	113 (3%) 210 (11%)	6,7 g	Terapia dei tumori neuroendocrini	<5550MBq
^{153}Sm	634 (35%) 703 (44%) 807 (21%)	41-47 (61%) 103 (28%)	1,95 g	metastasi ossee	3000 MBq
^{90}Y	2284 (100%)	-	2,7 g	Radioimmunoterapia Terapia dei tumori neuroendocrini	<5000 MBq
^{131}I	248 (2%)	284 (6%)	8,04 g	terapia ablativa	3000 MBq
	334 (7%)	365 (82%)		metastasi	5550 MBq
	606 (90%)	637 (7%)		ipertiroidismo	185 MBq

Esempio: caratteristiche di ^{131}I

- L'unico isotopo dello iodio esistente in natura è ^{127}I
- Il nucleo dello ^{127}I è composto da 53 protoni e 74 neutroni
- Esistono isotopi dello iodio prodotti dall'uomo per scopi industriali o medici
- ^{131}I è utilizzato per le terapie radiometaboliche dell'ipertiroidismo e dei carcinomi tiroidei

Interazione dei fotoni emessi da atomi di ^{131}I

Radiofarmaco marcato con ^{131}I

- La radiazione gamma è la principale fonte di irradiazione esterna per gli operatori sanitari addetti alle cure di un paziente trattato con farmaci radioattivi
- Viene fatto uso di schermature in piombo ed eventualmente di dosimetri a lettura diretta per controllare il rateo di dose a cui si è esposti in presenza di un paziente radioattivo (specialmente se trattato con dosi non ambulatoriali)
- Il rateo di dose ad una certa distanza dal paziente diminuisce esponenzialmente nel tempo con emivita minore o uguale a quella fisica

Lecture recommended: introductory parts of....

- “Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students”
Scaricabile @: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10368/Nuclear-Medicine-Physics-A-Handbook-for-Teachers-and-Students>
- “La radioprotezione dei pazienti in Medicina nucleare”, Associazione Italiana di Medicina Nucleare
- “ Diagnostic Radiology Physics. A Handbook for Teachers and Students”
Scaricabile @: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/8841/Diagnostic-Radiology-Physics-A-Handbook-for-Teachers-and-Students>