

CORSO DI RADIOPROTEZIONE AA 2015/2016



Alessandra Boschi
Dipartimento di Morfologia Chirurgia e
Medicina Sperimentale
Sezione di Diagnostica per Immagini
Università di Ferrara

alessandra.boschi@unife.it

RADIOATTIVITÀ E RADIAZIONI

IL NUCLEO ATOMICO

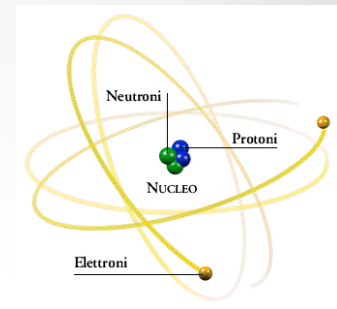


1

DECADIMENTO RADIOATTIVO

MISURA DELLA RADIOATTIVITÀ

Radioattività e radiazioni



La **radioattività** è un fenomeno fisico coinvolgente singoli nuclei che subiscono una trasformazione strutturale.

Tipi di radioattività

La r. si distingue in r. naturale e r. indotta, o artificiale, a seconda che sia una proprietà spontanea dei nuclei o sia stata provocata per mezzo di qualche reazione nucleare. Un nucleo radioattivo, al momento stesso in cui manifesta la sua r. si trasforma, in genere, in un nucleo diverso; esso cioè decade, subendo un decadimento radioattivo.

Con il termine **Radiazione** si intende il “trasferimento di energia da un punto ad un altro dello spazio senza che vi sia movimento di corpi macroscopici e senza il supporto di un mezzo materiale”.

Non si può, invece, parlare di radiazione, ad esempio, per il suono in quanto la propagazione delle vibrazioni acustiche non potrebbe avvenire senza la presenza di un mezzo materiale.

Tipi di radiazioni

Le radiazioni si distinguono in corpuscolari ed elettromagnetiche sulla base del loro comportamento prevalente:

Le radiazioni corpuscolari sono costituite da particelle sub-atomiche che si spostano con velocità assai elevate, spesso prossime alla velocità della luce. A seconda della massa e della carica possono essere classificate in tre gruppi:

particelle leggere elettricamente cariche: le più importanti sono elettroni e positroni;

particelle pesanti elettricamente cariche: nuclei di atomi di basso numero atomico (protoni, deutoni, nuclei di elio, etc.);

particelle elettricamente neutre: neutroni.

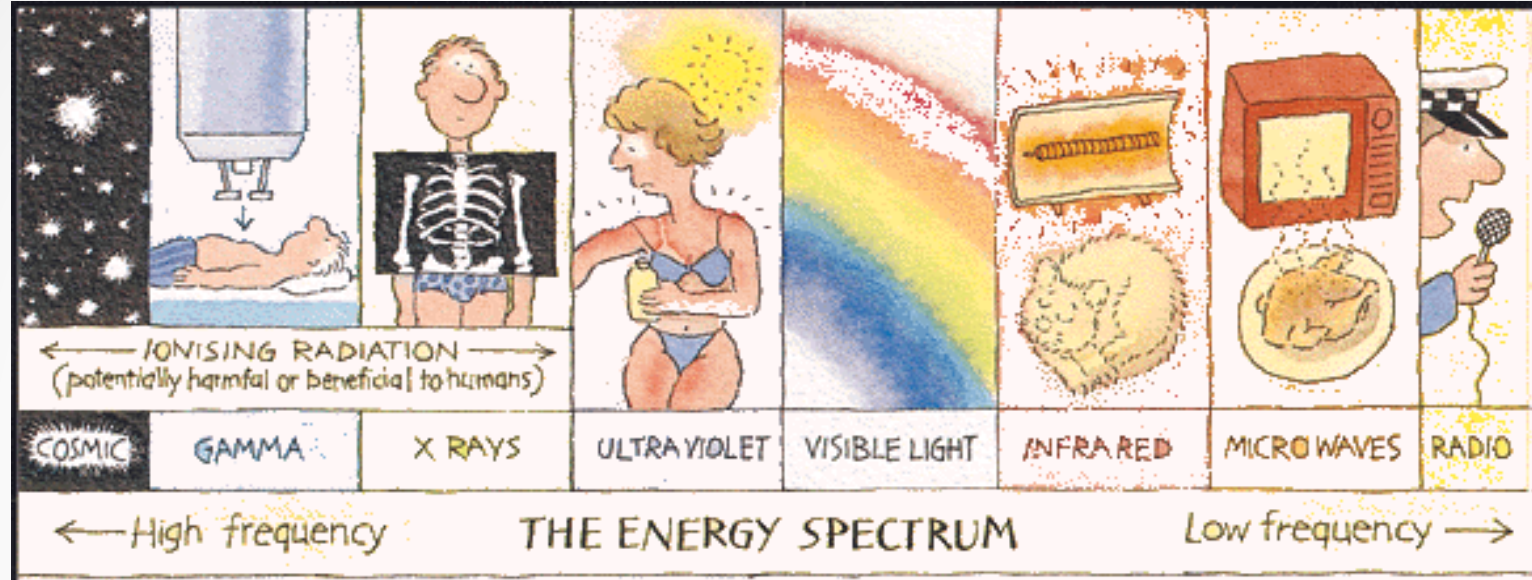
Le radiazioni elettromagnetiche si propagano con la velocità della luce e sono classificate in base alla loro energia e lunghezza d'onda; l'energia dei fotoni (E) e la lunghezza d'onda (λ) del campo elettromagnetico associato sono legate dalla relazione: $E \text{ (keV)} = 12.4/\lambda(\text{\AA})$.

$E=h\nu$

Energia associata ad una radiazione:

si intende **l'energia trasportata** singolarmente da una **particella** o da un **fotone** (quanto). Nel primo caso è l'energia cinetica della particella, mentre per un fotone l'energia è data da $E = h\nu$ (h costante di Planck, ν frequenza della radiazione).

Le Radiazioni ionizzanti

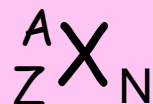


Quando una radiazione è in grado di produrre ionizzazione (rimozione di elettroni da atomi o molecole con la conseguente creazione di ioni) degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato.

Perché la radiazione sia ionizzante i quanti della radiazione devono avere energia sufficiente per strappare un elettrone dall'atomo con il quale interagiscono. Energie dell'ordine di qualche decina di eV ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) sono sufficienti per produrre ionizzazione.

IL NUCLEO ATOMICO

Il nucleo di un atomo è composto di protoni e neutroni
(chiamati nucleoni)



Z : numero atomico dell'atomo= numero di protoni nel
nucleo (\equiv numero di elettroni nell'atomo);

N = numero di neutroni nel nucleo;

A : è il numero di massa $\rightarrow A=Z+N$.

X indica l'elemento chimico;

Caratteristiche degli elettroni e nucleoni

Particle	Charge	Mass (uma)	Mass (kg)	Mass (MeV)
Electron	-1	0.000549	0.9108×10^{-30}	0.511
Proton	+1	1.00728	1.6761×10^{-27}	938.78
Neutron	0	1.00867	1.6744×10^{-27}	939.07

Nuclei che contengono un maggior numero di protoni e neutroni sono meno stabili, mentre **i nuclei che hanno lo stesso numero di protoni e neutroni sono più stabili.**

Il rapporto del numero di protoni e neutroni è un indice approssimativo della stabilità di un nuclide.

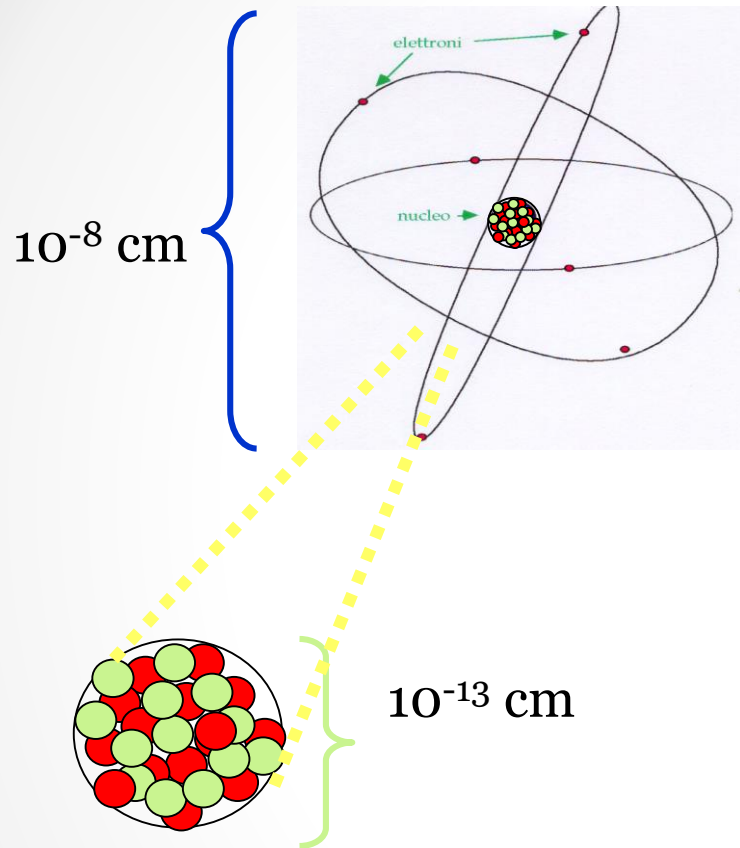
Questo rapporto è uguale a 1 nei nuclei stabili con un basso numero atomico, come C-12, O-16, N-14, e il rapporto aumenta con l'aumentare del numero atomico dei nuclidi.

In accordo con la teoria classica dell'elettrostatica, un nucleo non potrebbe esistere come entità singola a causa delle forze repulsive dei protoni nel nucleo. La sua esistenza è stata spiegata postulando una forza di legame, la forza nucleare, che è molto maggiore rispetto a quella elettrostatica, e lega egualmente protoni e neutroni nel nucleo. Le forze nucleari esistono solo nel

- nucleo e non hanno influenza al di fuori del nucleo.

$$R_{\text{atom}} = 100.000 \cdot R_{\text{nucleus}}$$

$$M_{\text{atomo}} \approx M_{\text{nucleus}}$$



Nucleus consists of protons and neutrons interacting with nuclear forces

Le forze nucleari hanno luogo in uno spazio molto piccolo e denso nel nucleo. Diversamente dalle **forze elettrostatiche coulombiane**, le **forze nucleari** sono **forze a breve raggio**, **decregono** rapidamente con la **distanza**, riducendosi a **zero** per distanze di molto inferiori al **diametro medio del nucleo**. Ne consegue che un **nucleone** (**neutrone** o **protone**) **interagisce fortemente solo** con un **piccolo numero di nucleoni vicini**.

La massa M di un nucleo risulta sempre minore rispetto alla somma delle masse dei nucleoni A nel nucleo. La differenza in massa $M-A$ è chiamata difetto di massa ed è quella che è stata usata come energia per legare tutti i nucleoni nel nucleo. Questa è l'energia di legame ed è quella che deve essere fornita per separare tutti i nucleoni completamente gli uni dagli altri.

Per rimuovere un singolo nucleone dal nucleo devono essere forniti 6 e 9 MeV .

Le energie coinvolte sono decine di milioni di volte maggiori rispetto l'energia elettronica

Isotopi

- Hanno lo stesso numero atomico Z , ma differente numero di massa A
- Hanno le stesse proprietà chimiche, ma differenti proprietà fisiche
- Alcuni isotopi di un elemento sono radioattivi
- In natura si possono trovare elementi differenti come miscele di isotopi stabili

Esempio :

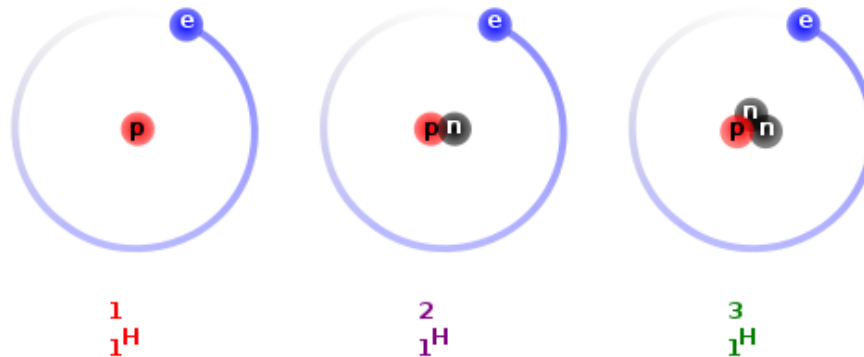
L'elemento chimico con $Z = 8$ in natura è presente come miscela di 3 isotopi stabili:

^{16}O (99.76%)

^{17}O (0.04%)

^{18}O (0.2%)

Isotopo che si può produrre artificialmente ^{15}O ($t_{1/2} = 2$ min)

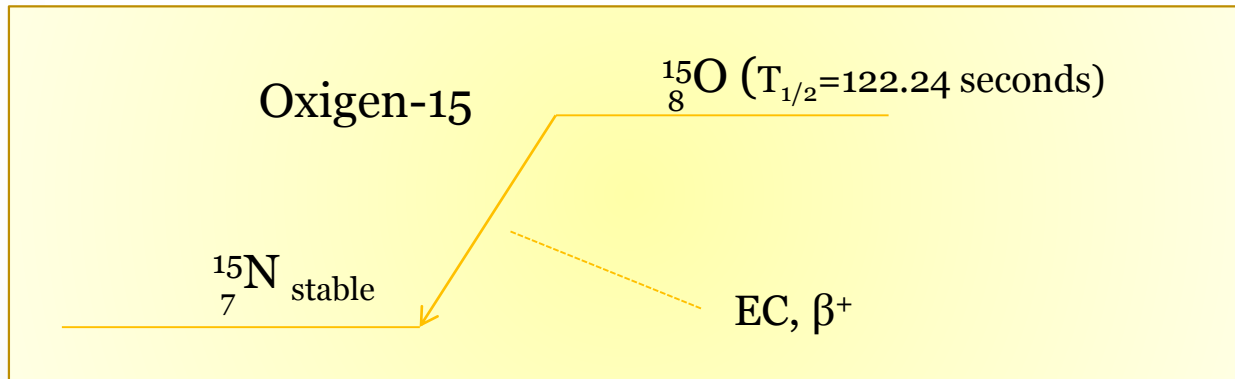


Isobari

- Hanno lo stesso numero di massa A, ma differente numero atomico Z
- Hanno differenti proprietà chimiche e fisiche
- Alcuni isotopi di un elemento sono radioattivi

Esempio: ${}^{67}_{29}\text{Cu}$, ${}^{67}_{30}\text{Zn}$, ${}^{67}_{31}\text{Ga}$ and ${}^{67}_{32}\text{Ge}$ sono isobari con lo stesso numero di massa 67

- Per lo stesso A ci sono valori di rapporto Z/A stabili e altri no, che significa che ci può essere un nuclide con differente Z più stabile rispetto a quello considerato



Isomeri

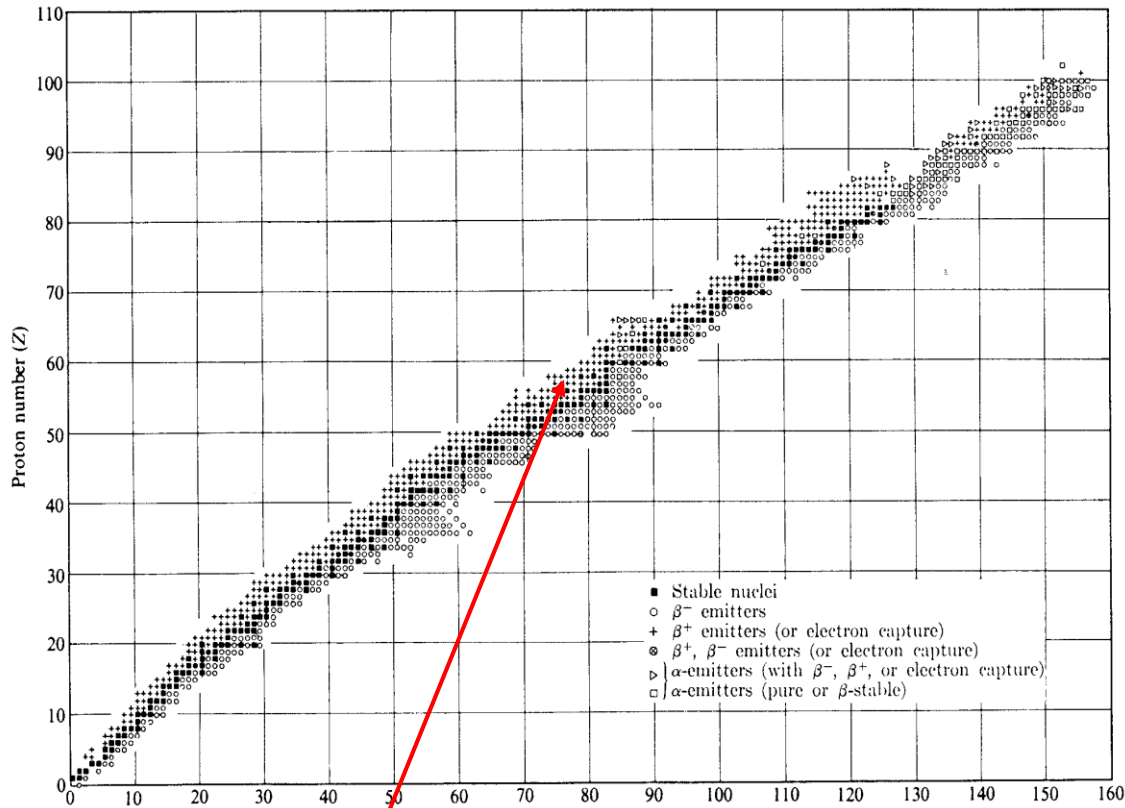
- Sono nuclidi che hanno lo stesso numero di neutroni e protoni ma differiscono in energia e spin nucleare.

Esempio ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ and ${}^{99}\text{Tc}$ sono isomeri dello stesso nuclide

Decadimento radioattivo

Composition of the atomic nucleus: $N \approx Z$

numero di protoni Z

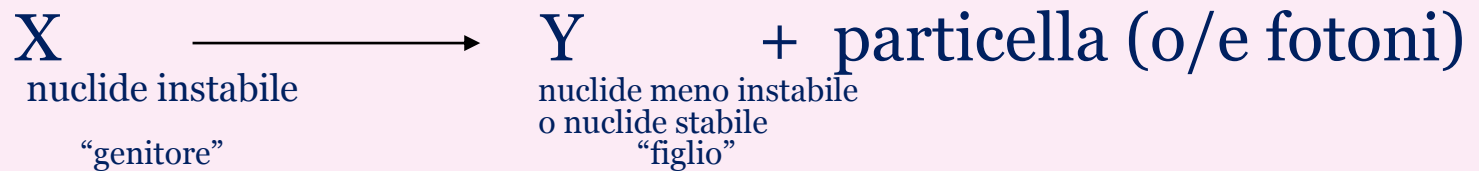


Numero di neutroni N

Valle di stabilità
Massima energia di legame

Fino ad oggi sono stati scoperti approssimativamente 3000 nuclidi e la maggior parte di questi sono instabili. Nuclei instabili decadono per fissione spontanea, emissione di particelle alfa, beta, raggi gamma o cattura elettronica al fine di raggiungere la stabilità. La stabilità di un nuclide è governata dalla disposizione strutturale e dall'energia di legame dei nucleoni nel nucleo. I radionuclidi decadono per raggiungere il rapporto N/Z neutroni/protoni del nuclide stabile più vicino possibile.

Decadimento radioattivo



Il decadimento radioattivo che avviene con emissione di una particella o con cattura elettronica, cambia il numero atomico del radionuclide, mentre il decadimento che avviene con emissione di raggi gamma, no.

I radionuclidi possono decadere mediante una o più combinazioni di sei processi: fissione spontanea, decadimento alfa, decadimento beta +, decadimento beta -, cattura elettronica e transizione isometrica.

Il decadimento radioattivo per emissione di particelle o cattura elettronica può essere seguito da transizione isomerica. In tutti i processi di decadimento, l'energia, la massa e la carica di un radionuclide si deve conservare. Brevemente vediamo i più comuni.

Decadimento alfa



Il **decadimento alfa** interessa, salvo rare eccezioni, solo gli elementi pesanti ($Z > 83$) e quindi è un processo radioattivo tipico degli **isotopi più pesanti**; se il **numero di massa** è inferiore a circa **150** ($Z \cong 60$) raramente vengono prodotte **particelle alfa**.

La particella alfa α è uno ione di elio formato da due protoni e due neutroni che si legano nel nucleo.

Nel decadimento α il numero atomico del nuclide genitore è ridotto di 2 e il numero di massa di 4. Un esempio di decadimento α è:



Una transizione α può essere seguita da emissione di raggi γ . Le particelle α sono monoenergetiche, e il loro range nella materia è molto corto.

Decadimento beta

Ogni reazione nucleare nella quale viene variato il numero atomico Z ma non il numero di massa A , viene classificata come *decadimento β* , che può essere di tre tipi:

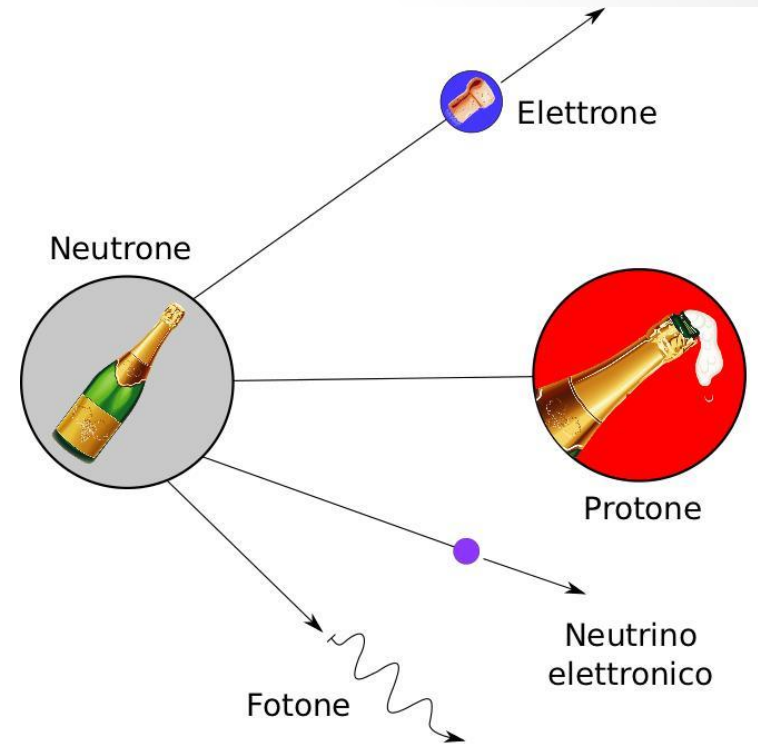
la formazione di negatroni,

la formazione di positroni,

la cattura elettronica (detta anche cattura K).

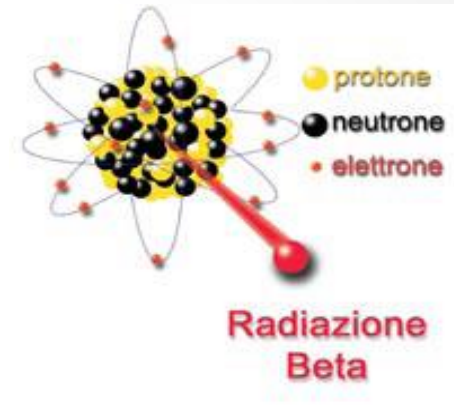
Decadimento Beta β^-

Nel decadimento β^- un neutrone (n) essenzialmente decade in un protone (p) ed una particella β^- . La particella β^- è emessa con un'energia variabile da 0 fino all'energia di decadimento (che è la differenza in energia tra il nuclide genitore e quello figlio). L'antineutrino compensa la differenza di energia tra la particella β^- e quella del decadimento.

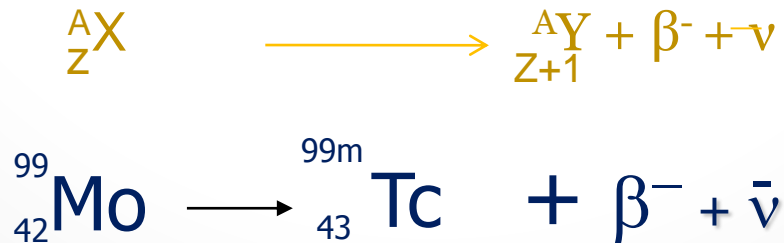


Decadimento Beta β^-

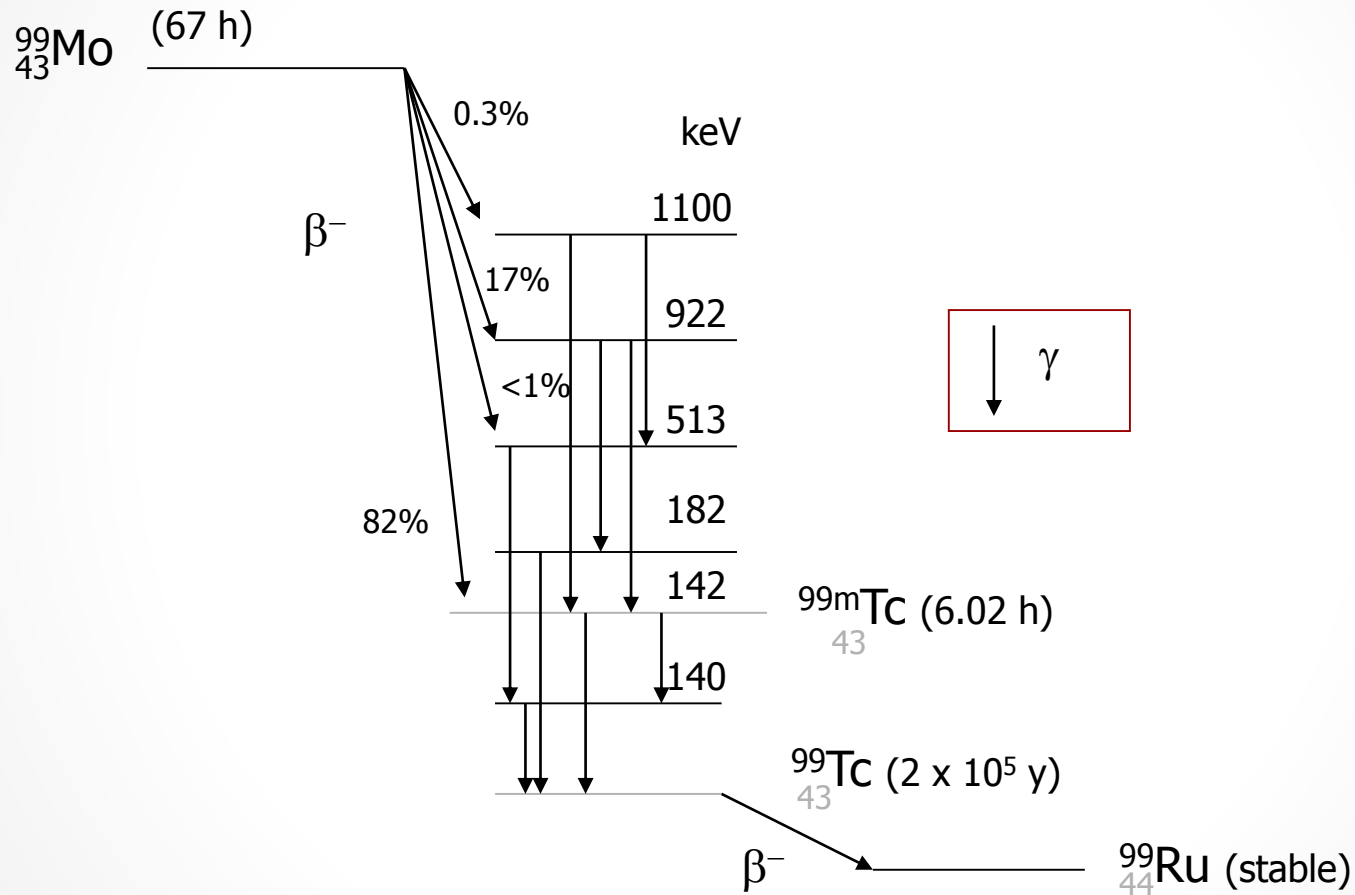
Avviene quando un nucleo è ricco di neutroni (il rapporto N/Z ratio è superiore a quello del nucleo stabile), decade attraverso l'emissione di particelle β^- insieme ad un antineutrino $\bar{\nu}$. L'antineutrino è un'entità praticamente privo di massa e carica necessaria per conservare l'energia nel decadimento.



Il decadimento β^- può essere seguito da emissione di raggi γ se il radionuclide figlio si trova in uno stato eccitato. Dopo il decadimento β^- il numero atomico del radionuclide figlio è maggiore di 1 rispetto al radionuclide genitore.



Decay scheme of Mo-99



Decay scheme of ^{99}Mo . There is a 2-keV isomeric transition from the 142-keV level to the 140-keV level, which occurs by internal conversion. Approximately 87% of the total ^{99}Mo ultimately decays to $^{99\text{m}}\text{Tc}$ and the remaining 13% decays to ^{99}Tc

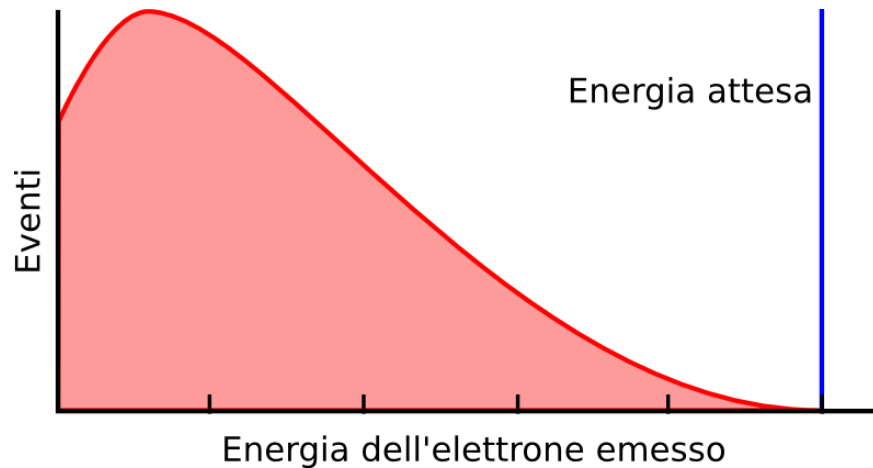
Decadimento Beta β^-

L'energia media delle β^- , E_β , varia anch'essa da un radionuclide all'altro.

Approssimativamente è data da:

$$E_\beta \cong 1/3 E_{\max}$$

I restanti 2/3 vanno agli antineutrini.

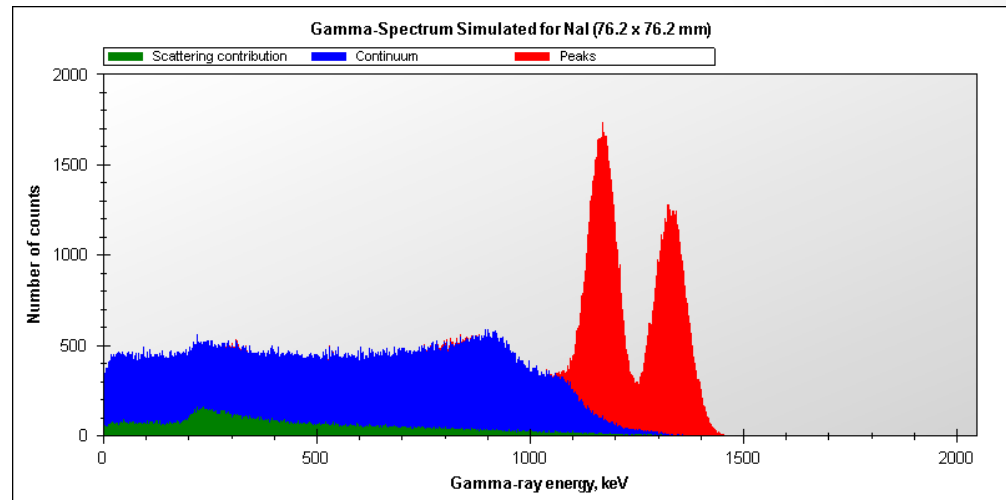
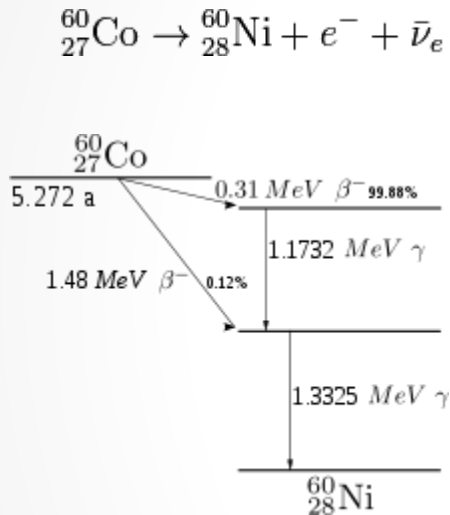


Lo spettro energetico risultante è di tipo continuo tra lo zero (caso in cui tutta l'energia cinetica è assorbita dall'antineutrino) e il valore E_{\max} o “end point”, caso in cui l'energia è assorbita dalla beta.

Lo spettro, ottenibile sperimentalmente mediante una spettrometro magnetico, è **caratteristico per ogni β^- emittente.**

Decadimento Beta β^-

Anche i decadimenti β^- possono condurre a nuclidi figli in uno stato eccitato, con conseguente emissione di radiazioni gamma. Si ha decadimento beta puro quando il nuclide figlio viene generato nel suo stato fondamentale.

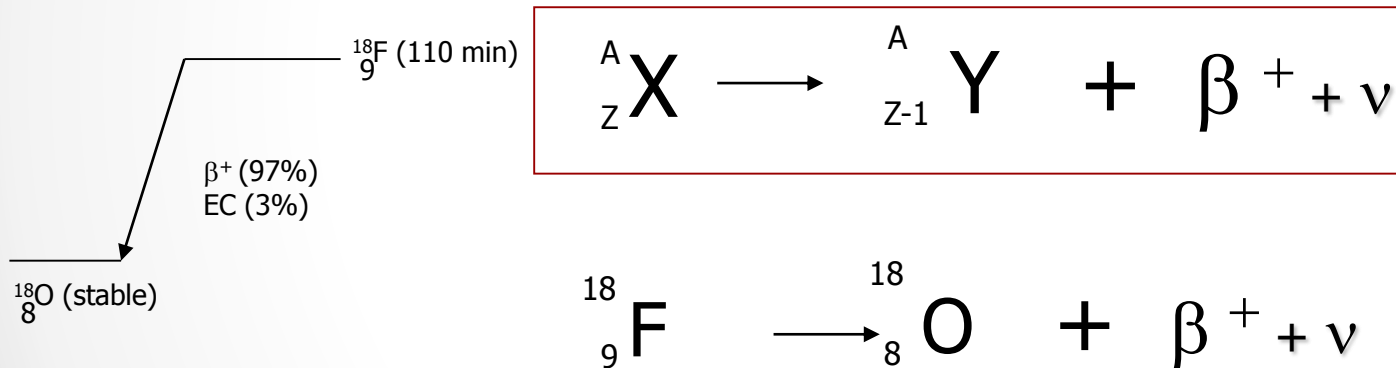


I fotoni γ di diseccitazione, conseguenti al passaggio tra i diversi stati eccitati del ${}^{60}\text{Ni}$, sono praticamente contemporanei alle transizioni β^- generatrici. Ne consegue che se si vogliono utilizzare le γ di cui sopra (largamente impiegate per scopi industriali e clinici) bisogna disporre di una sorgente costituita di nuclei di ${}^{60}\text{Co}$ i quali, generando continuamente nuclei di ${}^{60}\text{Ni}$ allo stato eccitato, costituiscono in effetti anche l'origine dei raggi γ . È accezione comune, quindi, ma impropria, indicare le γ di diseccitazione come le “ γ del ${}^{60}\text{Co}$ ”.

Decadimento β^+

Contrariamente al precedente, il decadimento beta positivo consiste nella **trasformazione** di un **protone** in un **neutrone** ed è utilizzato da **nuclidi** con **difetto neutronico**; la trasformazione avviene con **emissione** di una carica positiva, il positrone β^+ e di un neutrino:

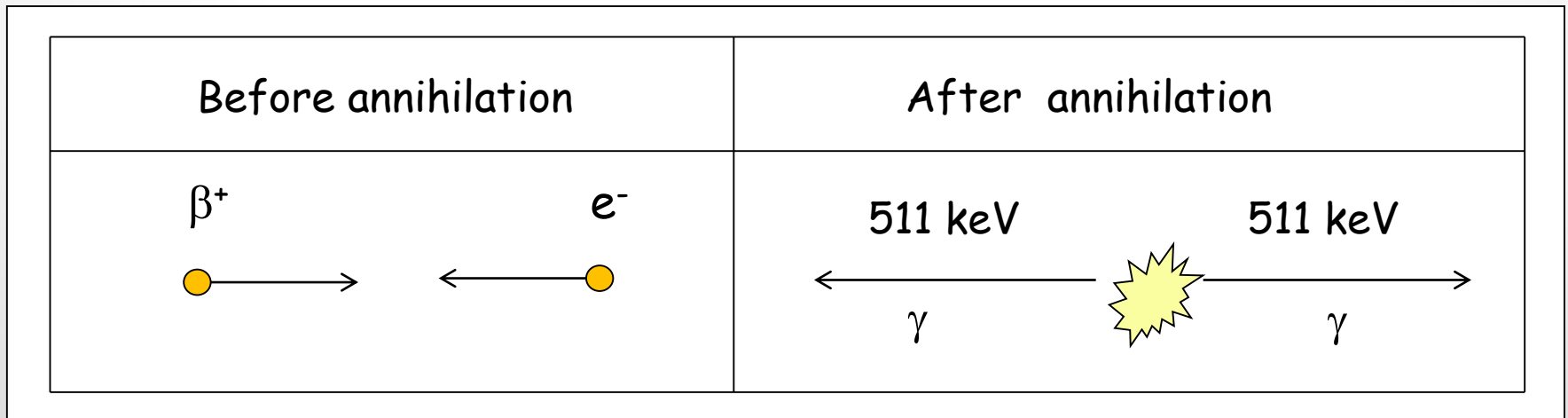
L'elemento prodotto da un decadimento beta positivo, rispetto all'elemento genitore **presenta numero di massa A uguale, numero atomico Z diminuito di un'unità, numero di neutroni N aumentato di un'unità e il numero di protoni diminuito di un'unità.**



Nel decadimento β^+ un protone (p) si trasforma in un neutrone(n) emettendo una particella β^+ e un neutrino. La particella β^+ è emessa con energia variabile da 0 all'energia di decadimento. Il neutrino possiede la differenza tra l'energia della β^+ e quella del decadimento.

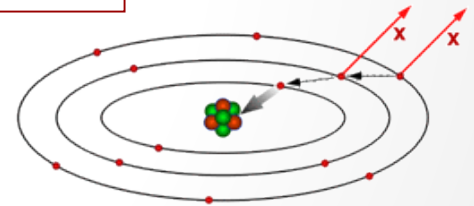
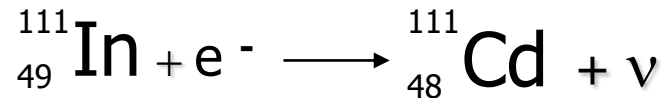
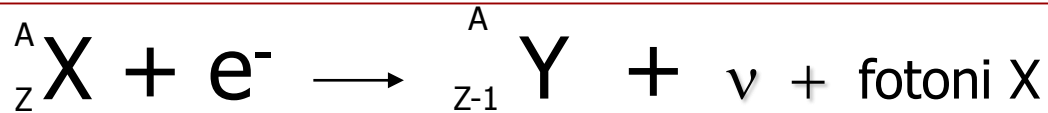
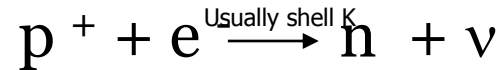
Decadimento β^+

Essendo il **positrone l'antiparticella dell'elettrone**, è necessaria la presenza del **neutrino**, che è una particella, per soddisfare la legge di conservazione dello **spin** e del numero di particelle, analogamente a quanto visto nel **decadimento beta negativo** con il **negatrone** e l'**antineutrino**. Il **positrone** ha una vita breve ed è velocemente annichilito in una reazione con un elettrone, producendo *fotoni γ* che sono emessi in direzione opposta di energia caratteristica (0,51 MeV). Anche lo stesso processo nucleare fondamentale generalmente è accompagnato dall'emissione di **radiazioni γ** .



Cattura elettronica (EC)

- Il *decadimento per cattura elettronica* (**E.C., Electronic Capture**) è del tutto **analogo** a quello beta positivo: un nuclide con difetto neutronico trasforma un protone in un neutrone. In questo caso, però, la trasformazione avviene mediante la cattura di un elettrone, di solito dal guscio più interno il guscio K e, con minore probabilità, dagli altri gusci, L, M...(spesso la cattura elettronica viene chiamata cattura K):

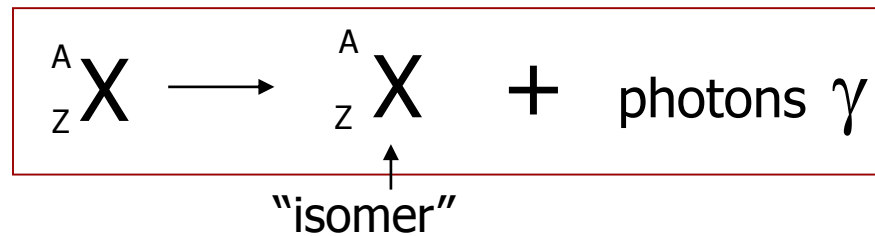


In questo processo il numero atomico del nuclide genitore è ridotto di un unità. La vacanza lasciata dalla cattura elettronica viene compensata per transizione di un elettrone da un livello energetico superiore. La differenza di energia dei livelli elettronici apparirà come raggi X caratteristici del nuclide figlio. La probabilità di EC aumenta con l'aumentare del numero atomico poiché gli elettroni sono più vicini ai nuclei.

Transizione isomerica (IT)

Spesso i decadimenti β^+ , β^- or EC portano alla produzione di nuclidi in uno stato eccitato; tali nuclidi **raggiungono** successivamente **lo stato fondamentale** **emettendo** l'**energia** in eccesso sotto forma di **radiazione elettromagnetica**, che viene detta **radiazione γ** .

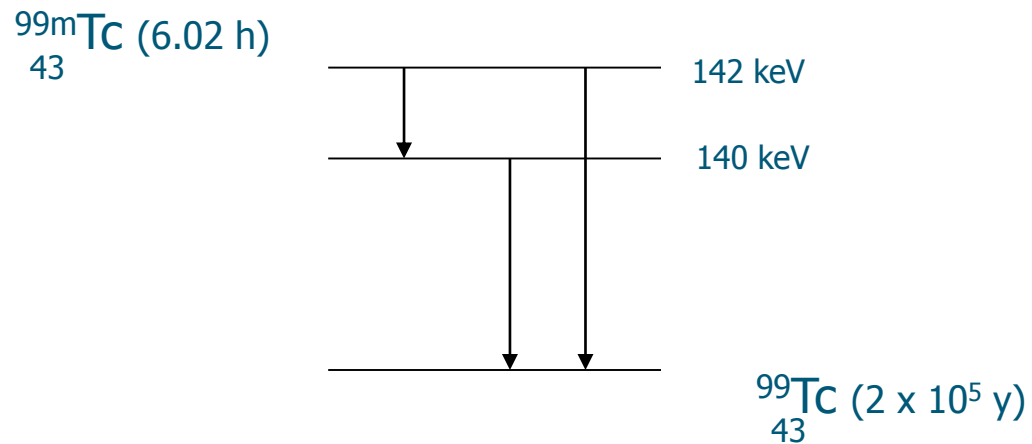
Quando gli stati di transizione isomerica sono «longed lived» vengono chiamati stati metastabili. Lo stato metastabile viene indicato con la lettera «m» in Tc-99m.



Different energy in the nucleus

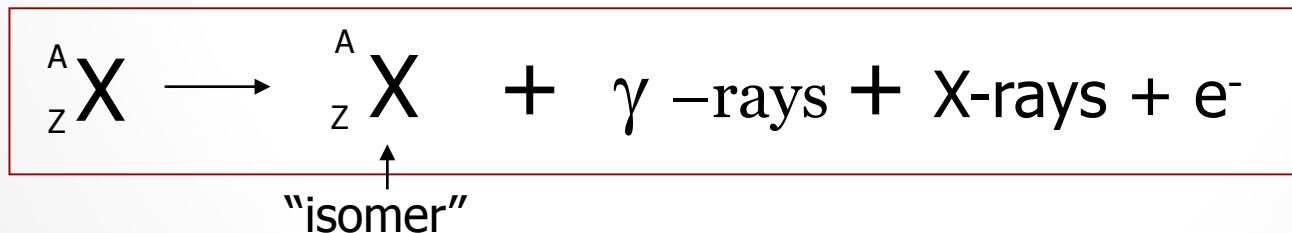
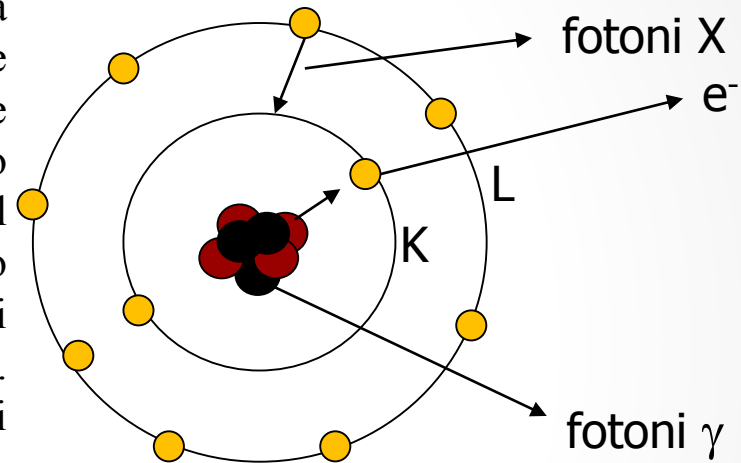
- No change A, Z and N;
- Lifetime of fraction of picoseconds to many years
- $E_{\gamma} : 0.01 - 3 \text{ MeV}$

Schema di decadimento di Tc-99m



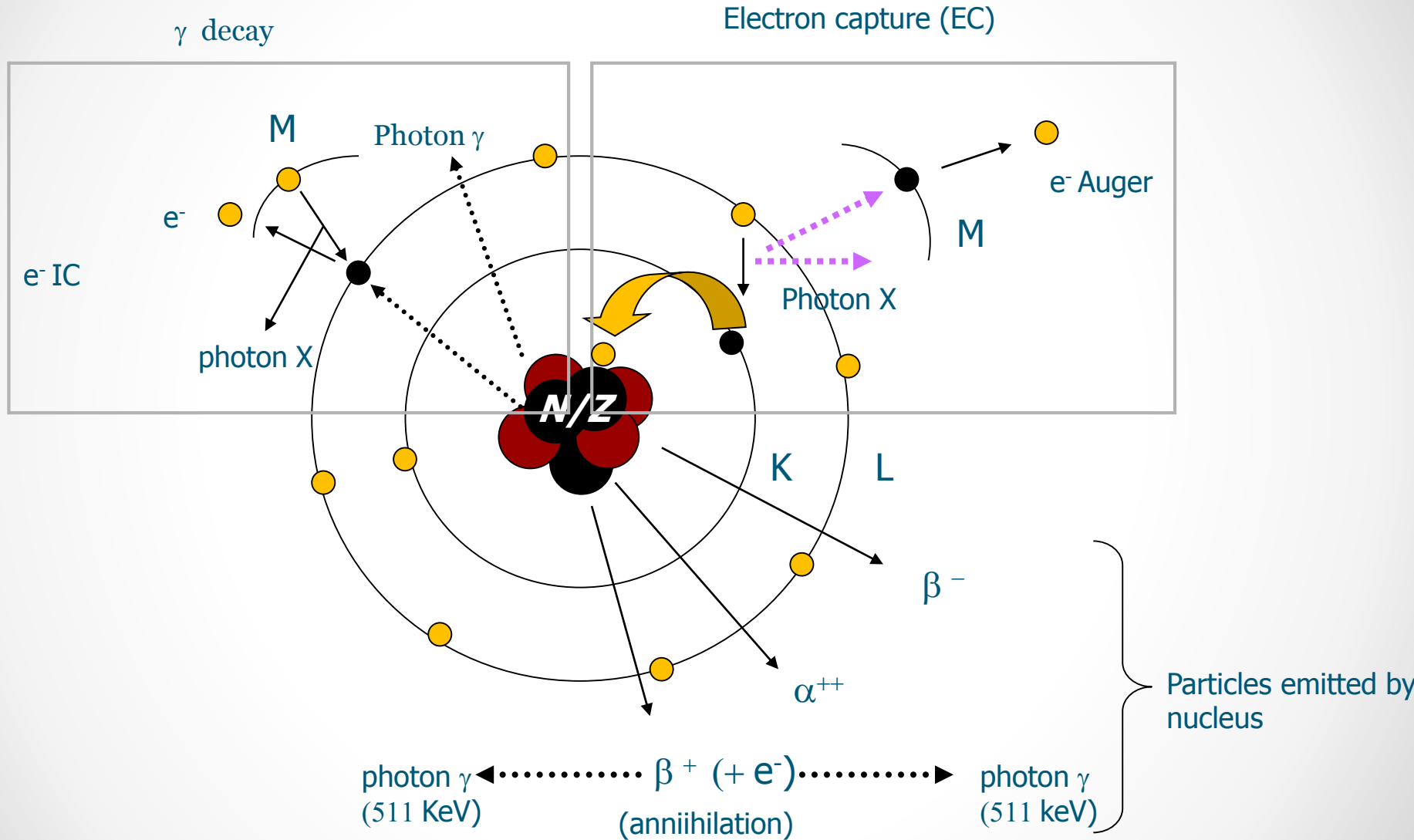
Conversione interna (I.C.)

Accade quando un fotone γ , del nucleo eccitato trasferisce energia ad un elettrone nello shell elettronico extranucleare del suo stesso atomo (di solito K), trasferendo tutta la sua energia a quest'ultimo e provocando la ionizzazione dell'atomo. L'elettrone acquista energia cinetica e può provocare altre ionizzazioni. Il cambiamento della configurazione elettronica con il riassetamento degli elettroni che si portano verso lo spazio rimasto vacante, provoca l'emissione di radiazioni X "caratteristiche". La reazione accade più frequentemente con materiali ad alto Z.



La radiazione X emessa in corrispondenza di un processo di **conversione interna** può **uscire dall'atomo**, o **entrare in collisione con un elettrone**, il quale, se l'energia della radiazione X è **maggiore** della sua energia di legame, viene **espulso dall'atomo**. Gli elettroni espulsi con questo processo vengono detti elettroni Auger

Differenti modalità di decadimento



Cinetica del decadimento radioattivo

L'attività di una sorgente radioattiva o di un campione radioattivo è definita come il **numero di nuclei che decadono per unità di tempo** e quindi ha le **dimensioni** di una **frequenza**.

L'attività di un campione radioattivo **varia** nel **tempo** e la sua variazione può essere **molto rapida**, dell'ordine del **secondo**, o **molto lenta**, dell'ordine di **anni**. La velocità di decadimento di alcuni radionuclidi è così lenta che è praticamente impossibile osservare alcuna variazione di radioattività.

Una trasmutazione: $A \longrightarrow \text{prodotti} \quad (1)$

è una reazione del **I° ordine** in quanto la velocità di trasmutazione dipende dalla concentrazione di una sola specie.

Decadimento radioattivo

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

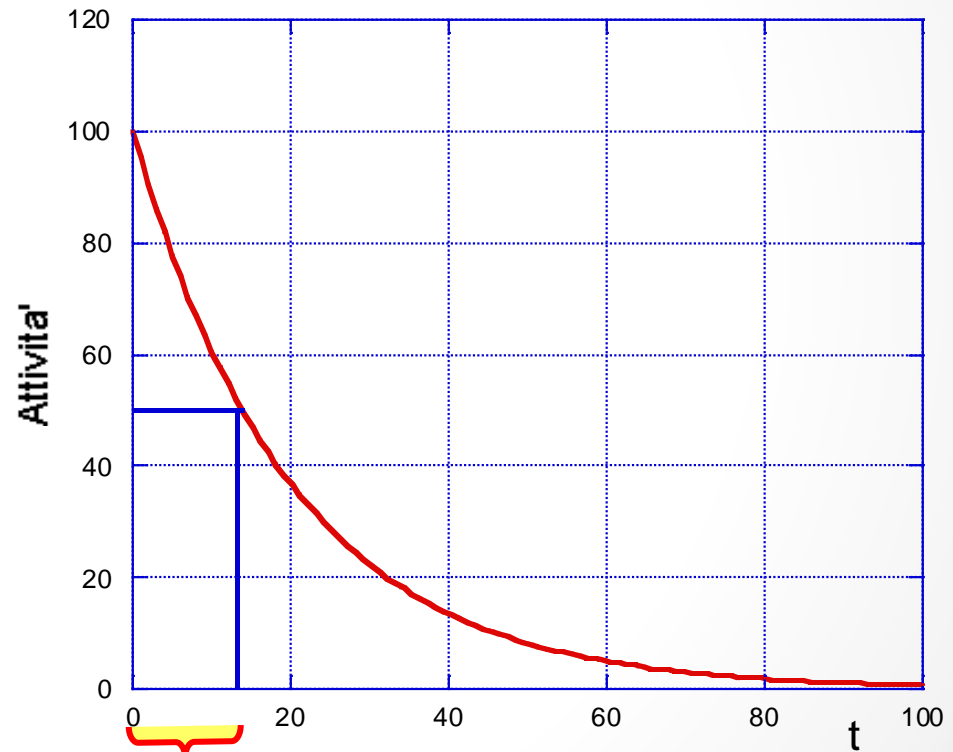
Legge di tipo esponenziale

λ = costante di decadimento rappresenta la probabilità di decadimento nell'unità di tempo

attività = numero di decadimenti subiti nell'unità di tempo

$$\tau = 1/\lambda$$

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



Misura dell'attività

L'attività si misura in Bequerel (Bq)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione/secondo}$$

Molto usata tutt'oggi la vecchia unita': il Curie (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ disintegrazioni/secondo}$$

(1 Ci \Leftrightarrow 1 g di Radio 226)

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$$

$$1 \text{ }\mu\text{Ci} = 37 \text{ kBq}$$

INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI CON LA MATERIA

Classificazione delle radiazioni ionizzanti

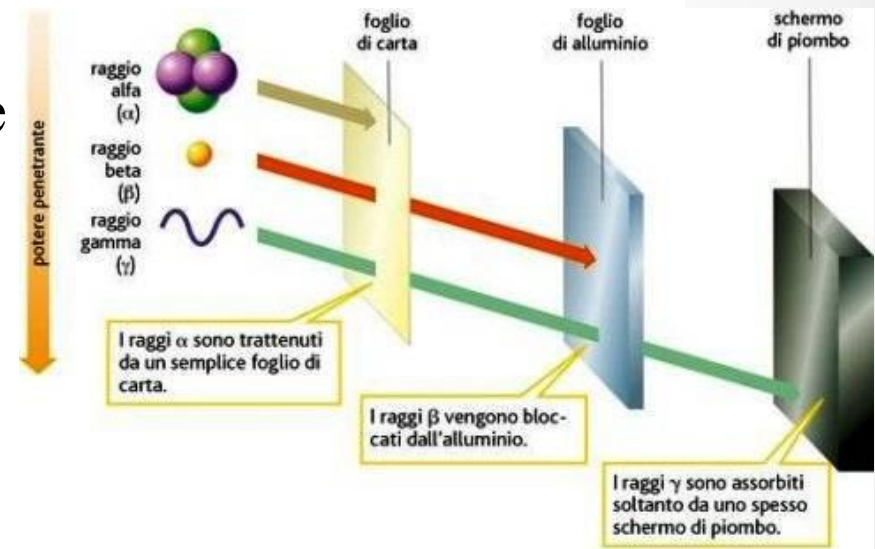
Meccanismi di interazione

Particelle cariche pesanti

Particelle cariche leggere

Interazione di fotoni con la materia

Macchine radiogene



2

Meccanismi di interazione-PREMESSA

L'assorbimento delle radiazioni nella materia è dovuto alla loro interazione, di tipo probabilistico, con gli elettroni e i nuclei degli atomi e delle molecole dell'assorbitore.

Nella materia, anche allo stato solido, il volume vuoto è fortemente prevalente su quello occupato, cosicché una radiazione incidente può percorrere distanze diverse tra un nucleo e l'altro.

Le interazioni sono, quindi, regolate da valori di probabilità dipendenti dai parametri della radiazione incidente e del bersaglio quali: energia, carica, massa e dimensioni.

Per interazione tra una particella carica e un elettrone non si deve necessariamente intendere un "urto materiale", ossia si ha interazione anche quando il parametro d'urto è superiore alla somma dei raggi delle particelle interagenti. **La misura di questa probabilità si ha tramite il concetto di "sezione d'urto" (δ); Unità di misura: barn = 10^{-24} cm².**

Interazioni delle particelle α con la materia

Le particelle α interagiscono intensamente con la materia a causa della doppia carica positiva.

Il “potere frenante” nella materia viene definito dall’energia ceduta dalla radiazione (dE) in un dato percorso (dx) :

potere frenante = dE/dx ;

energia persa per unità di percorso = $-dE/dx$;

**Nell’intervallo di E di
emissione da parte dei
radionuclidi ($E < 10$
MeV):**

Eq. Di Bethe:

$$-\frac{\Delta E}{\Delta x} \propto \frac{z^2}{v^2} \frac{Z}{A} \rho$$

Z: numero atomico del mezzo assorbente;

z: numero di cariche della particella incidente;

v: velocità della particella incidente;

ρ : densità del mezzo.

Interazioni delle particelle α con la materia

Le particelle alfa in quanto particelle cariche interagiscono tramite collisioni Coulombiane con gli atomi del mezzo che attraversano.

Essendo particelle di grosse dimensioni non subiscono grosse deviazioni quando attraversano la materia per cui la loro traiettoria è pressoché lineare.

Nella parte iniziale del loro percorso la quantità di energia persa (e quindi il numero di ioni prodotti) è praticamente costante e solo verso la fine del loro percorso trasferiscono più energia al mezzo.

Per particelle alfa di una determinata energia, in un determinato materiale la distanza massima percorsa (Range) è una quantità ben definita

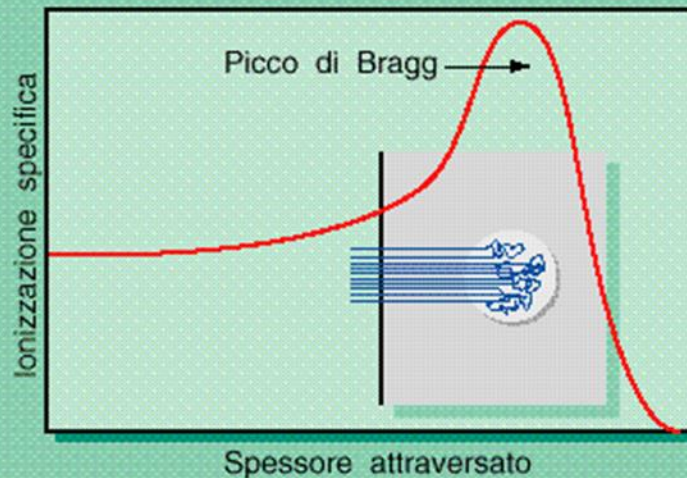


Curva di Bragg (qualitativa) della deposizione di energia in funzione dello spessore attraversato

INTERAZIONE DELLE PARTICELLE CARICHE PESANTI

La quasi esclusiva causa di perdita di energia sono le collisioni anelastiche (ionizzazione, eccitazione).

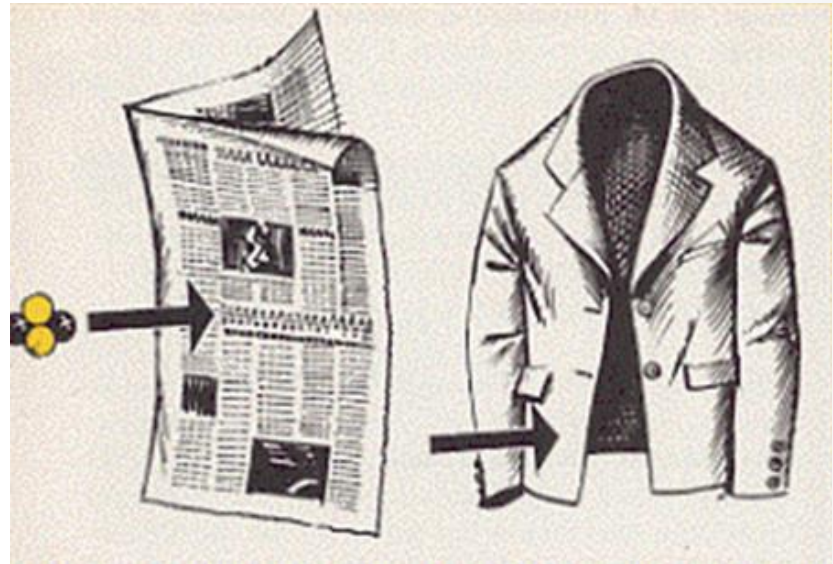
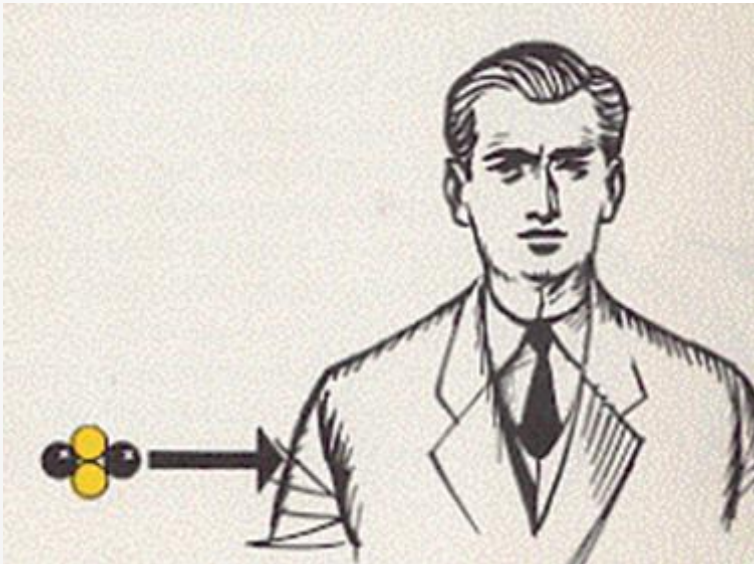
La ionizzazione specifica si mantiene quasi costante sino in prossimità del punto di arresto della particella, dove dà origine al cosiddetto "picco di Bragg".



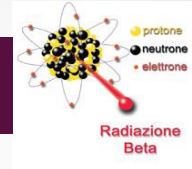
La ionizzazione aumenta al diminuire della velocità

Particelle α da ~ 5 MeV hanno un range di ~ 3.5 cm in aria a STP, equivalente a 35μ di tessuto (strato protettivo delle cellule morte della pelle è di $\sim 70\mu$)

Sorgenti di particelle α esterne non costituiscono un pericolo biologico; il discorso cambia se la sorgente è interna al corpo.



Interazione delle particelle β^- con la



La loro massa è pari a $\sim 1/7300$ della massa della particella α .

A causa della piccola massa, la velocità degli elettroni è grande anche a basse energie ed è confrontabile con quelle della luce;

Le interazioni degli elettroni con la materia avvengono per cessioni di piccole quantità di energia in conseguenza alla ridotta carica elettrica.

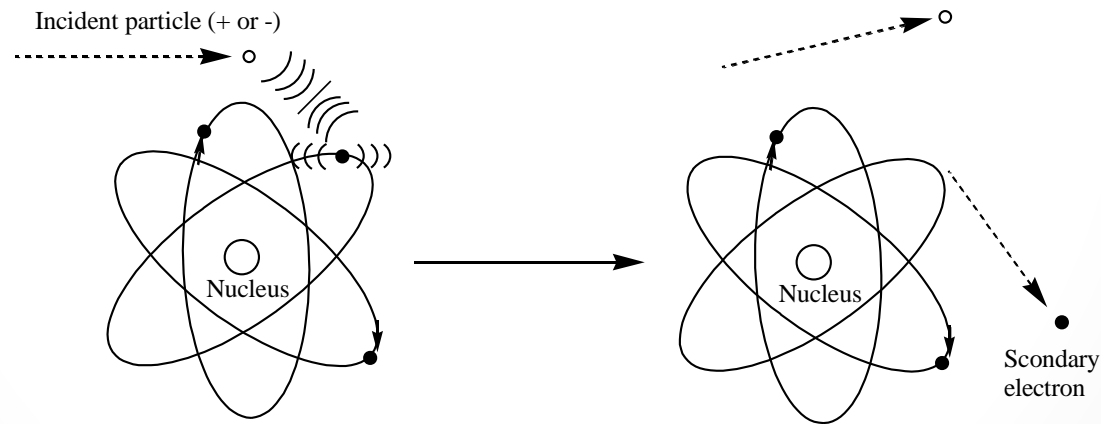
Non hanno un tragitto lineare, ma tortuoso nel loro cammino del mezzo assorbente . Di conseguenza il range è molto diverso dalla traiettoria e a parità di E iniziale è diverso da particella a particella.

Per elettroni monocromatici

$$R = 0.526 \times E - 0,094 \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

Ionizzazione. Se l'intensità dell'interazione è sufficiente, l'elettrone "colpito" si separa dall'atomo e si ha la ionizzazione.

Le interazioni avvengono prevalentemente con gli elettroni dell'assorbitore. Il meccanismo dell'interazione è basato sulla perdita di energia che subisce la particella incidente quando il campo elettrico ad essa associato interagisce con quello di un elettrone orbitale di un atomo.



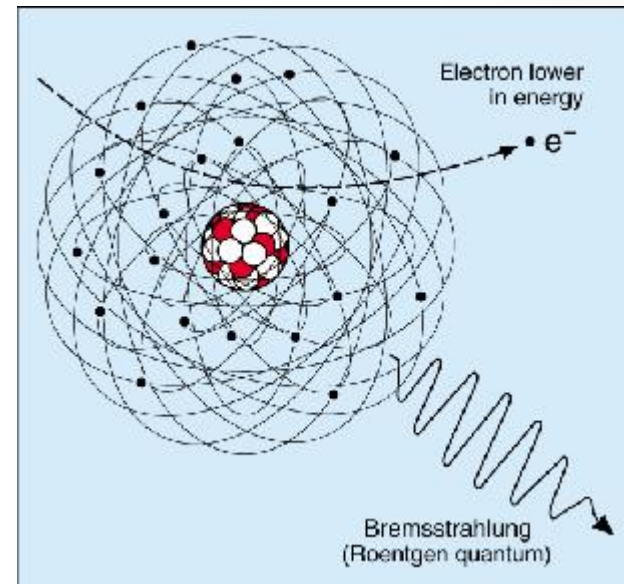
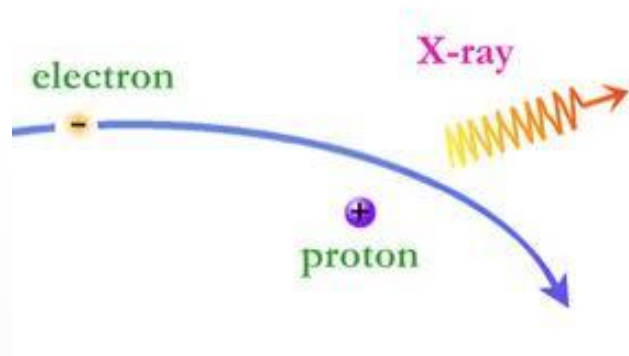
Interazione e conseguente ionizzazione

Bremsstrahlung

Quando un **elettrone veloce** si avvicina ad un nucleo è attratto dal campo positivo del nucleo, la sua traiettoria viene deviata, con **emissione** di radiazioni X (radiazioni di frenamento o di bremsstrahlung, con uno spettro continuo).

Radiazione di frenamento: collisione anelastica.

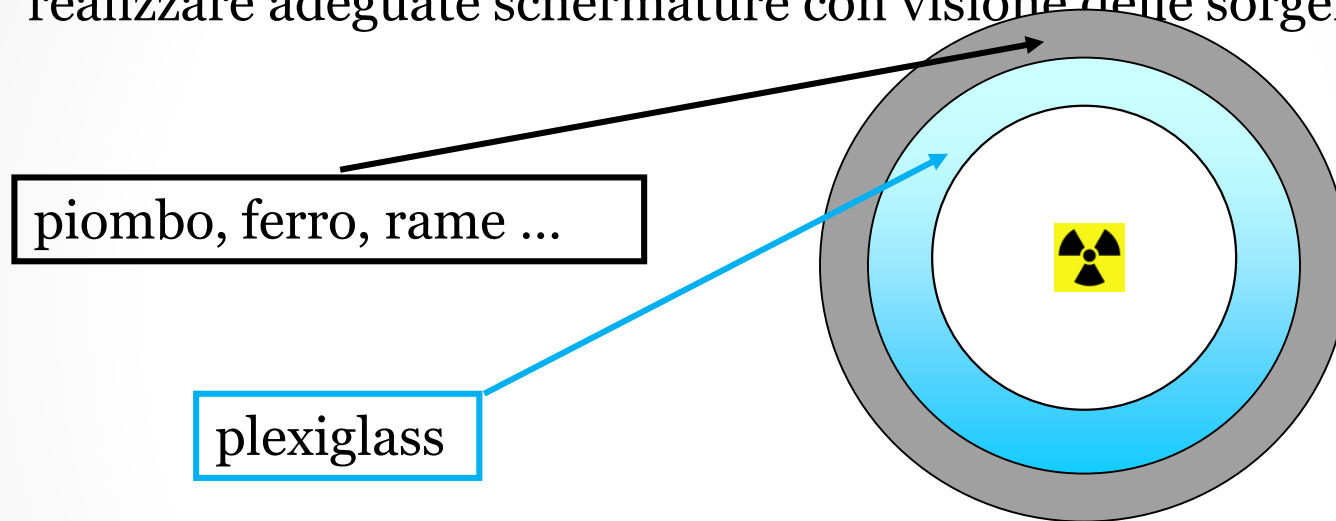
Modello schematico
di bremsstrahlung



Questo modo di interagire con la materia riguarda solo le particelle cariche leggere (elettroni). Infatti, l'entità del bremsstrahlung è inversamente proporzionale al quadrato della massa della particella incidente.

Schermature particelle

Conviene usare materiali leggeri (plastica, alluminio). Usando materiali plastici trasparenti, plexiglass e metacrilato si possono realizzare adeguate schermature con visione delle sorgenti.



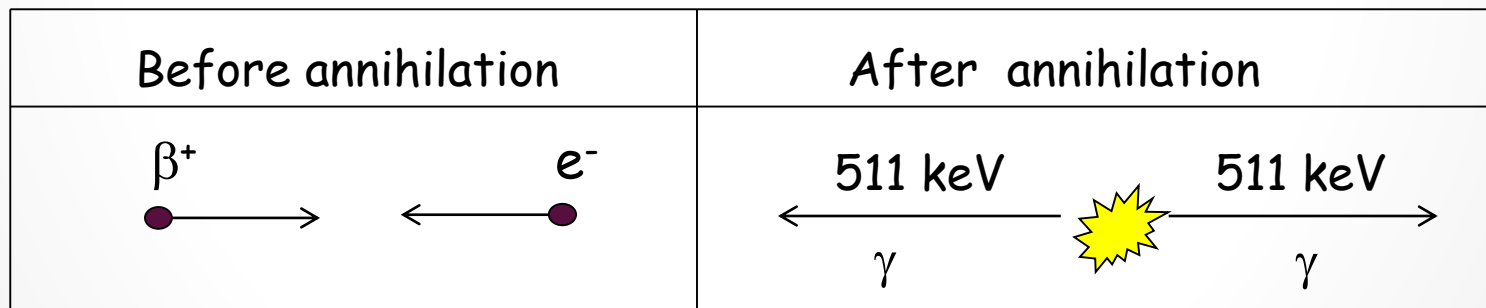
Nel caso di un emettitore β^- di elevata energia è consigliabile utilizzare un contenitore fatto con materiale di basso Z (es. plastica), come schermatura primaria delle β^- , inserito in un secondo contenitore di Z più elevato (es. Pb), come schermatura del bremsstrahlung.

Schermo mobile anti beta-



Interazione delle particelle β^+ con la

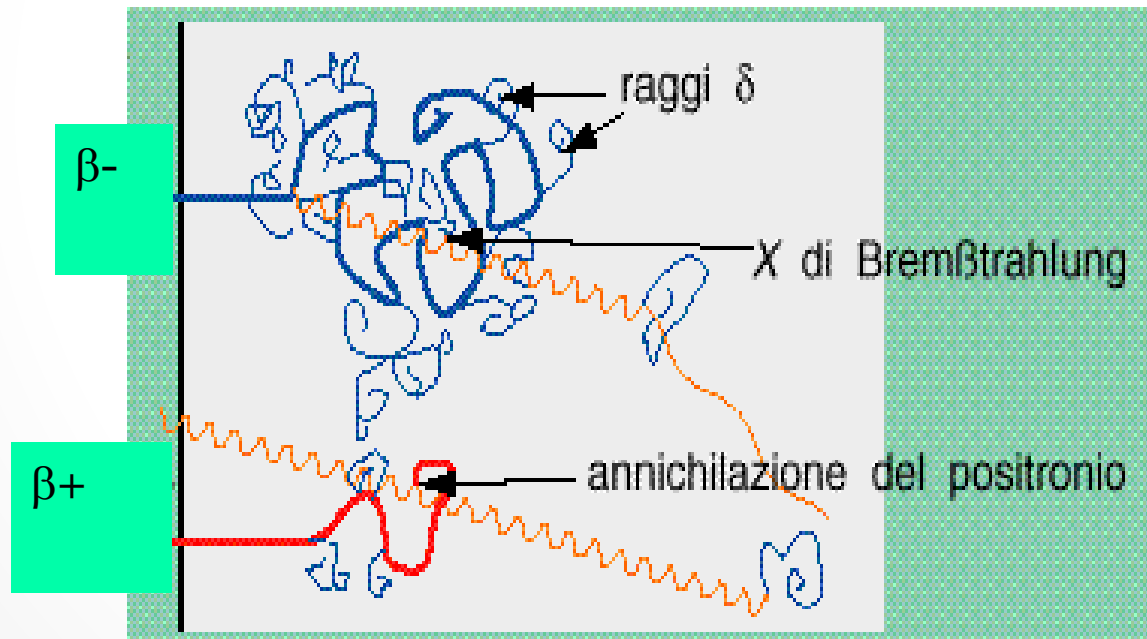
Quanto detto fino a questo punto è valido sia per gli elettroni che per i positroni. Ogni positrone cede progressivamente energia cinetica nelle interazioni, rallenta, e termina il proprio percorso nella materia **catturando un elettrone e subendo “annichilazione”**, cioè **la massa della coppia “positrone-elettrone” viene completamente trasformata in energia elettromagnetica** (“radiazioni di annichilazione”)



Annichilazione

Anche per le particelle Beta è possibile definire il Range, tenendo conto però che la definizione non è precisa come per le particelle alfa per due motivi:

- 1) il percorso degli elettroni monoenergetici non è ben definito, in quanto essendo particelle leggere vengono diffuse in tutte le direzioni.
- 2) Le particelle beta hanno uno spettro energetico continuo ed il range dipende dall'energia delle particelle



Fotoni Interazione con la materia

Le **radiazioni elettromagnetiche**, non possiedono carica e **massa**, interagiscono **molto debolmente** con la **materia**, con conseguente **elevato potere penetrante**.

Interagendo con la materia i raggi X e gamma producono **ionizzazione indiretta o secondaria**. **Gli elettroni secondari prodotti dalla interazione** fotonica primaria sono i maggiori responsabili della ionizzazione della materia.

Ci sono diverse modalità di interazione la cui probabilità dipende dal numero atomico del mezzo assorbente e dall'energia del fotone incidente:

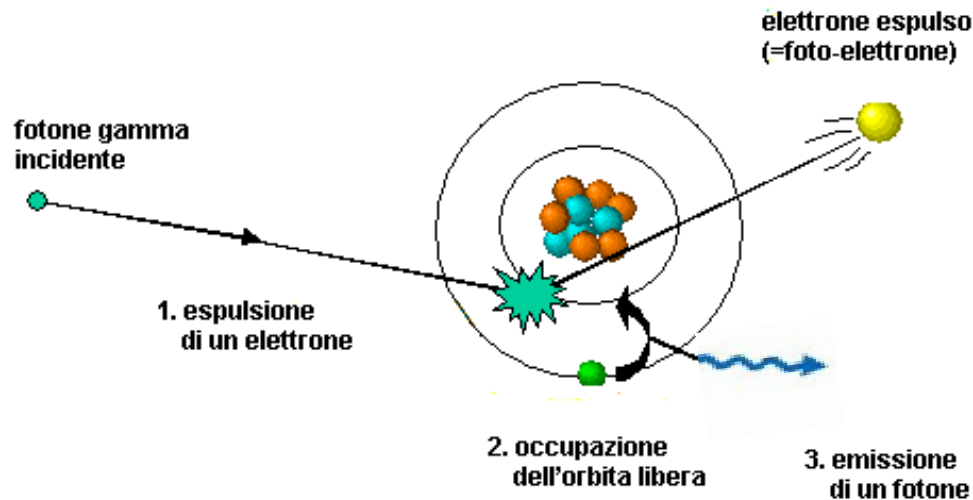
- **effetto Fotoelettrico**
- **effetto Compton**
- **Produzione di coppie**

Effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico avviene quando un fotone X o gamma, interagisce con un elettrone legato, cede completamente la sua energia e l'elettrone viene espulso.

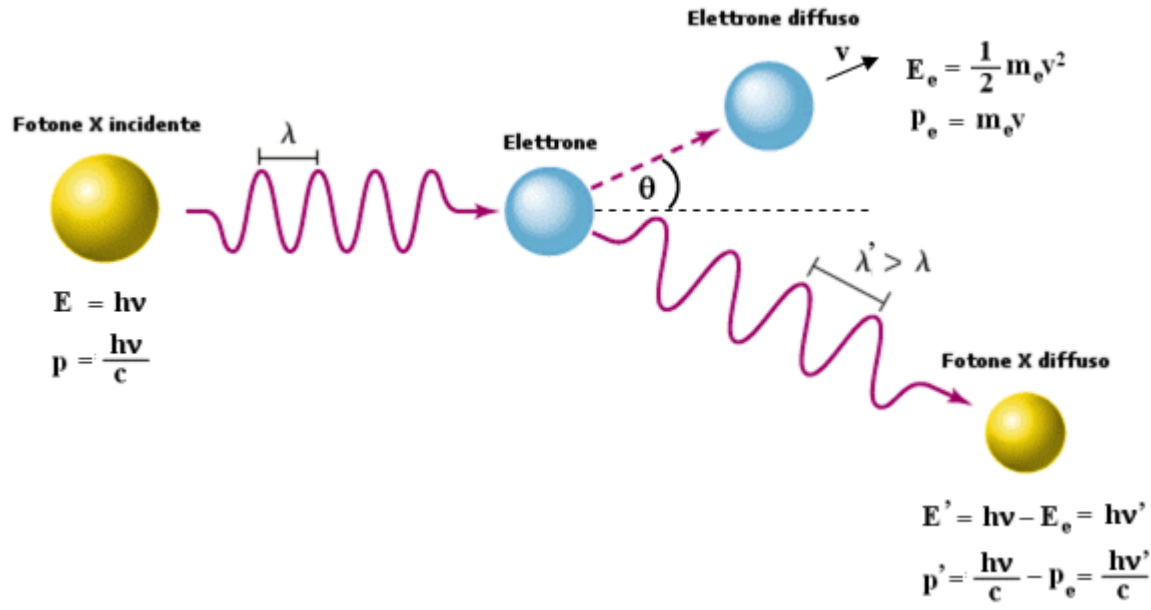
Il fotoelettrone acquista un'energia cinetica E_c uguale alla differenza tra l'energia del fotone incidente e la sua energia di legame

L'effetto fotoelettrico in acqua prevale ad energie inferiori a 50 KeV. In generale predomina alle basse energie e in materiali ad alto Z.



Effetto Compton

Il fenomeno può essere descritto dalla meccanica classica come un urto elastico tra due particelle. Si verifica quando un fotone interagendo con un elettrone cede ad esso solo una parte della sua energia: l'elettrone viene diffuso con un certo angolo rispetto alla direzione iniziale del fotone e quest'ultimo viene diffuso con un certo angolo e con una energia minore di quella iniziale.



L'effetto Compton risulta predominante per energie comprese fra circa 100 KeV e 2 MeV e nelle sostanze con Z intermedio

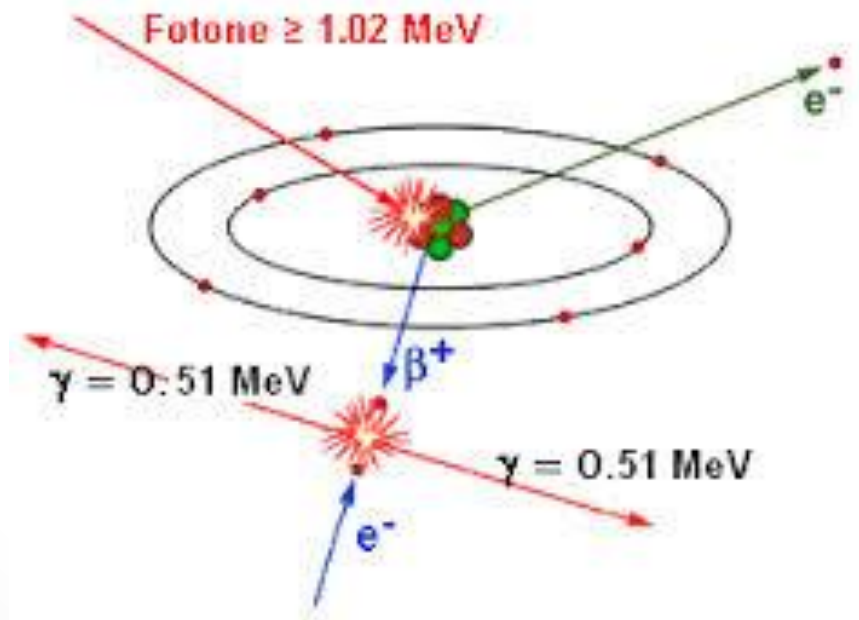
Produzione di coppie

Si verifica solo se l'energia dei fotoni incidenti è > 1.02 MeV (energia a riposo dell'elettrone).

È predominante solo per raggi gamma di elevata energia

Il fotone scompare e al suo posto appare una coppia elettrone positrone.

Il positrone si annichila nel mezzo e al suo posto vengono prodotti due fotoni.

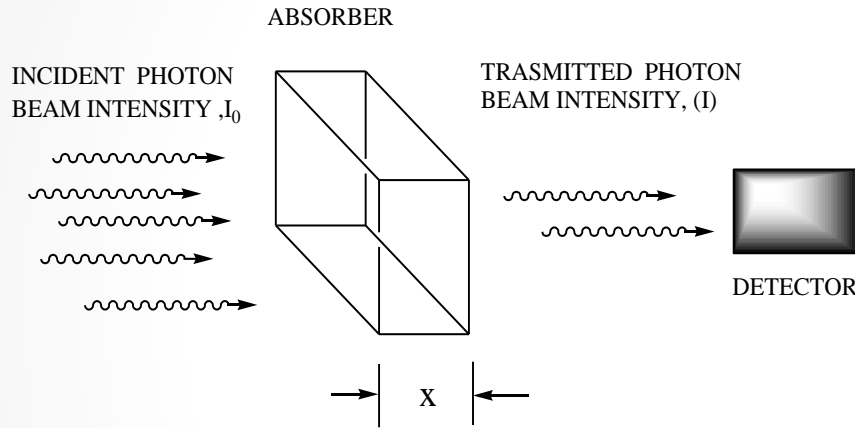


Interazione dei fotoni nella materia: la legge dell'assorbimento

Condizioni

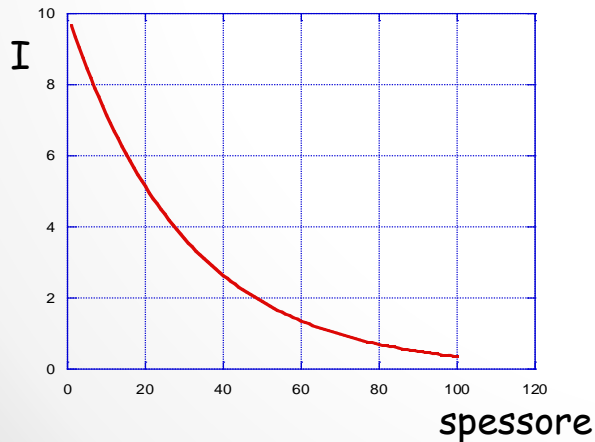
Fascio monoenergetico

Fascio sottile e collimato



$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

μ :coefficiente di attenuazione lineare
(cm^{-1} , dipende da Z e dalla densità del materiale ed è funzione dell'energia dei fotoni)

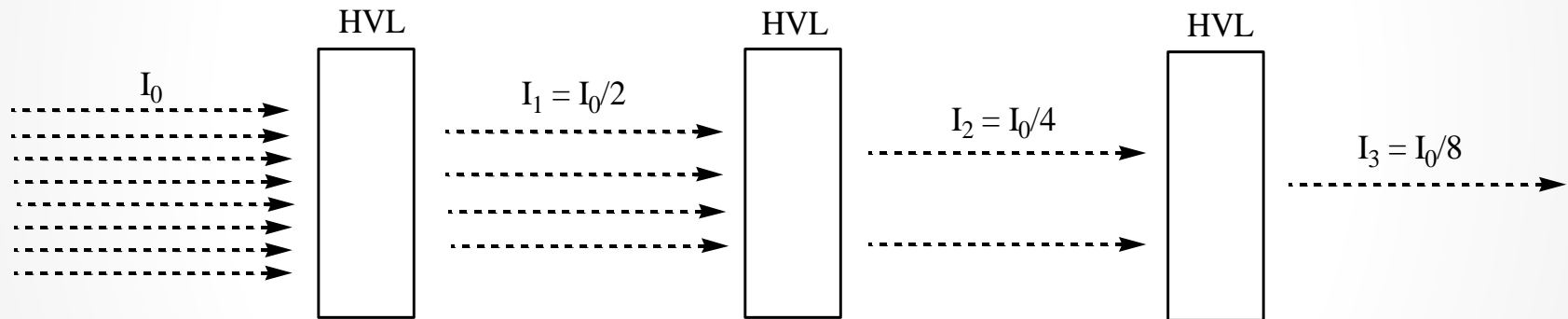


Legge esponenzialenon è possibile attenuare completamente un fascio!!

Half-Value Layer (HVL): spessore di assorbitore che riduce l'intensità del fascio fotonico della metà: $I = I_0/2$

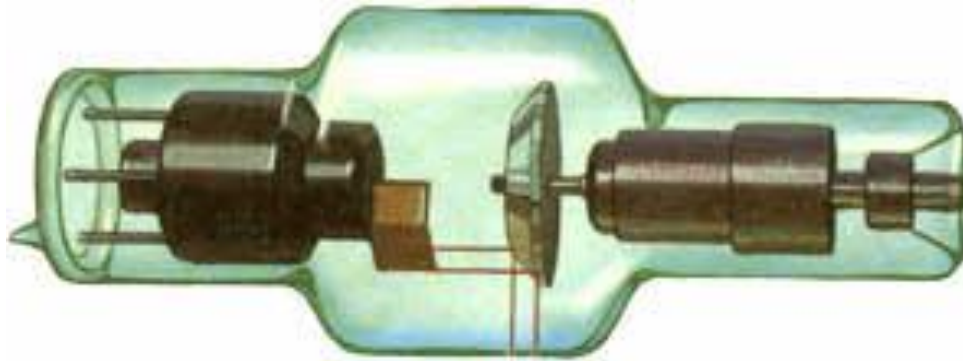
Per cui, ponendo $x = \text{HVL}$

$$I = I_0/2 = I_0 \cdot e^{-\mu \text{HVL}}$$



Rappresentazione dell'effetto dovuto all'HVL.

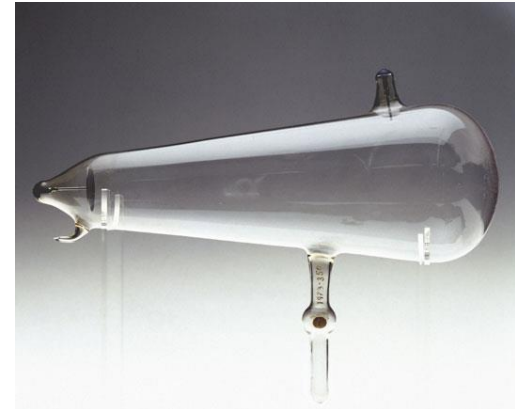
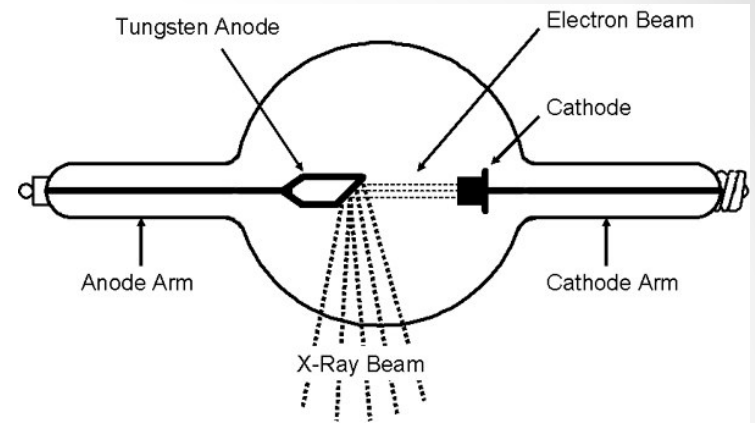
Macchine radiogene



Il funzionamento dei tubi a raggi X si basa sul fenomeno del Bremsstrahlung dovuto al frenamento che subiscono gli elettroni di elevata energia quando interagiscono con una sostanza . Come già sappiamo, tale fenomeno si ha quando, passando vicino a un nucleo, l'elettrone subisce l'attrazione coulombiana fra cariche di segno opposto (elettrone e nucleo), viene deviato dalla sua traiettoria ed emette radiazioni. Questo processo può essere provocato e controllato utilizzando un tubo all'interno del quale gli elettroni vengono accelerati e poi fatti incidere su un "bersaglio" metallico, provocando appunto l'emissione di raggi X.

X-Ray tube

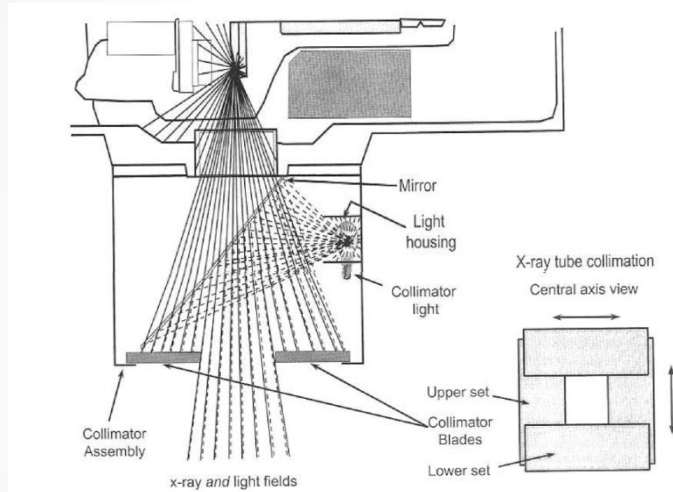
Il tubo radiogeno, ideato come detto da Coolidge (1912), consiste in una coppia di elettrodi (anodo e catodo) contenuta in un involucro di vetro al cui interno vi è il vuoto, al fine di evitare le interazioni con le molecole d'aria. Il catodo è un filamento metallico (in generale tungsteno), che, riscaldato elettricamente a temperature di qualche migliaio di gradi ($2200^{\circ} \div 2500^{\circ} \text{C}$), emette elettroni per effetto termoionico.



X-Ray tube

il tubo radiogeno emette isotropicamente, per cui si rende necessario usare una schermatura che assorba i fotoni aventi direzioni diverse da quella utile ai fini dell'esame radiologico. Questa si realizza con una guaina di piombo che lascia libera solo una "finestra" del tubo, dalla quale i raggi, a causa del vetro e di uno strato di olio, escono privati della loro componente meno energetica. Il tutto (il tubo di vetro avvolto nel suo schermo di piombo) è in genere alloggiato entro un contenitore metallico.

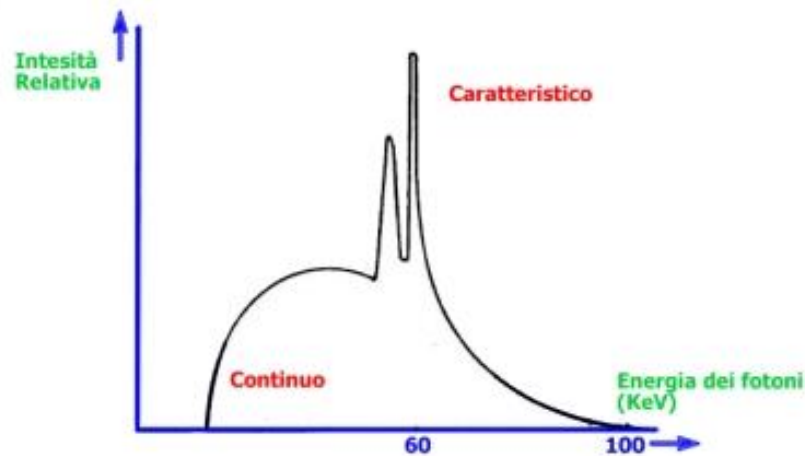


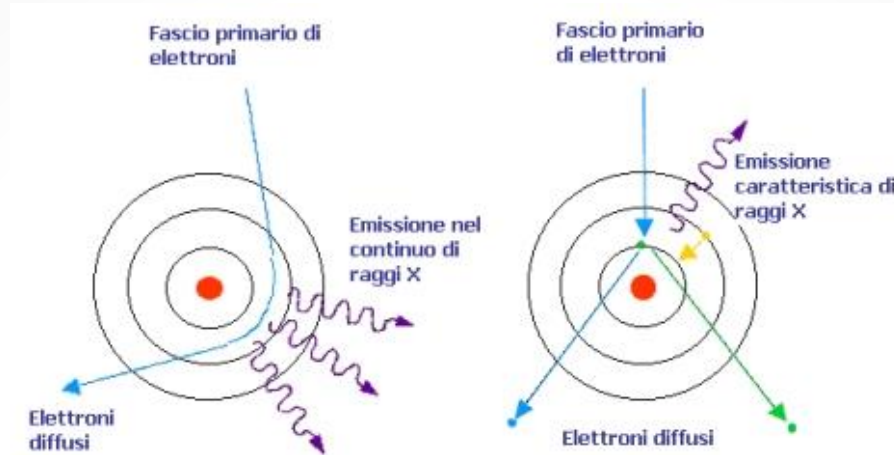


Infine, è in genere desiderabile poter intervenire sulla dimensione del fascio (spesso chiamato “cono”), in modo da irraggiare solo la zona prescelta, ad esempio la lastra radiografica, senza conferire dose inutile a quanto si trova fuori dalla zona in questione. Per fare questo si usano dei collimatori, che sono dei diaframmi mobili in piombo, che possono venire avvicinati o allontanati per ottenere appunto le dimensioni volute del fascio.

Spettro dei raggi X

All'interno del bersaglio ogni elettrone può subire molteplici interazioni (ogni e- ha una storia a se) producendo fotoni di diverse energie con valore massimo uguale all'energia cinetica dell'elettrone incidente, corrispondente alla perdita di tutta l'energia in una collisione. E' evidente che non è possibile avere un fascio monocromatico





Oltre all'emissione di raggi X per frenamento si ha l'emissione **CARATTERISTICA**. Questo processo si verifica quando l'elettrone colpendo il bersaglio interagisce con un elettrone orbitale del bersaglio stesso, ionizzandolo. Viene a crearsi così una lacuna che viene riempita da un elettrone di un orbitale più esterno con l'emissione dell'energia eccedente sotto forma di radiazione.

Questi due processi non sono molto efficienti, nell'intervallo di energie usato in diagnostica, l'energia cinetica degli elettroni incidenti sul bersaglio viene convertita per la maggior parte in calore (il bersaglio deve essere raffreddato) e solo per l'1% circa in radiazione.

RIVELATORI DI PARTICELLE NUCLEARI E FOTONI

Generalità

Rivelazione delle radiazioni

Tipi di interazioni.

Rivelatori a gas

Rivelatori a semiconduzione

Emulsioni fotografiche

Dosimetri a termoluminescenza (TLD)



3

Generalità- Cos'è un Rivelatore di Particelle

Un **rivelatore di particelle** o **rivelatore di radiazione** è uno strumento usato per *rivelare, tracciare e identificare* particelle, come quelle prodotte per esempio da un **decadimento nucleare**, dalla **radiazione cosmica**, o dalle interazioni in un **acceleratore di particelle**.

Quando una particella attraversa un mezzo rilascia una certa dose di energia per la cosiddetta **Interazione Radiazione-Materia**.

I **rivelatori di particelle** sono strumenti che producono un *segnale osservabile* quando il loro **elemento attivo** viene colpito dalla radiazione.

Nella maggior parte dei casi, la sola rivelazione delle radiazioni non è sufficiente; ciò che si richiede in più è la loro misura, cioè una sorta di valutazione quantitativa della loro intensità e di qualche altro parametro dipendente, in qualche modo, dalla loro intensità.

un rivelatore accoppiato con un apparato di misura costituisce un “sistema di rivelazione”.

Caratteristiche dei Rivelatori

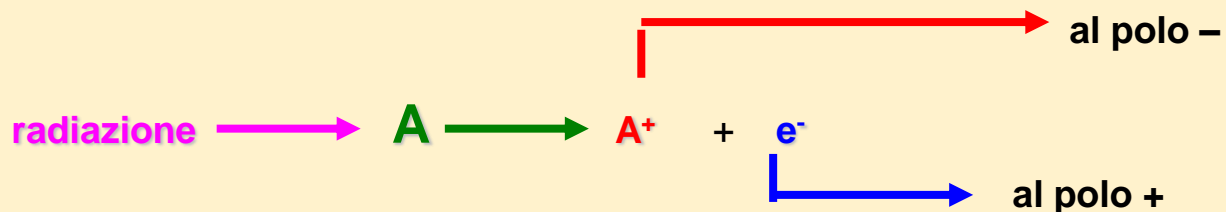
- **Sensibilità**: capacità di produrre un *segnale utile* per un certo tipo di *radiazione e di energia*.
- **Risposta**: tipo di segnale prodotto. Spesso è un *impulso di corrente* la cui ampiezza è *proporzionale all'energia* rilasciata dalla particella.
- **Risoluzione**: capacità di distinzione tra due misure vicine di una grandezza fisica misurata. Si esprime in termini di *deviazione standard* della distribuzione della grandezza misurata.
- **Efficienza**: frazione di particelle rivelate rispetto a quelle incidenti.
- **Tempo morto**: tempo necessario al rivelatore per essere di nuovo attivo dopo la rivelazione di una particella e la formazione del segnale.

Tipi di interazioni

Rivelazione di particelle cariche

La radiazione produce coppie di ioni, nel volume sensibile del rivelatore. Le **coppie ioniche, elettrone-ione**, formate dalla radiazione, **si separano** sotto l'azione del campo e vengono raccolte rispettivamente **all'anodo** e al **catodo**. La **rivelazione** si basa sulla **misura delle cariche raccolte agli elettrodi**

A questo gruppo di rivelatori appartengono gli **elettroscopi**, i **contatori proporzionali**, i **contatori di Geiger-Müller (G.M.)**, i **rivelatori a semiconduttore**.



Meccanismo relativo a rivelatori con campo elettrico applicato

Tipi di interazioni

Eccitazione

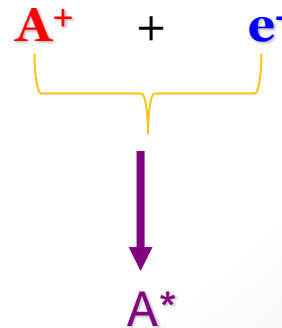
La radiazione provoca l'eccitazione di molecole e disturbi in reticoli cristallini di materiali particolari (**scintillatori**). Quando le molecole tornano allo stato energetico fondamentale e le cariche dei reticoli si riassistono vengono emessi lampi di luce di fluorescenza (scintillazioni) che possono essere “visti” e contati direttamente mediante speciali dispositivi elettronici in grado di convertirli in impulsi elettrici misurabili.

A questo gruppo di rivelatori appartengono i sistemi di scintillazione in fase solida (SFS) e in fase liquida (SFL).

non essendovi alcun campo elettrico applicato, l'evento più probabile è la **ricombinazione** della **coppia ionica**, con formazione di un **atomo in uno stato eccitato**.

La **rivelazione** si basa sulla **misura** degli **stati eccitati**.

Radiazione



Meccanismo relativo a rivelatori senza campo elettrico applicato

atomo in uno stato eccitato

Tipi di interazioni

Reazioni chimiche

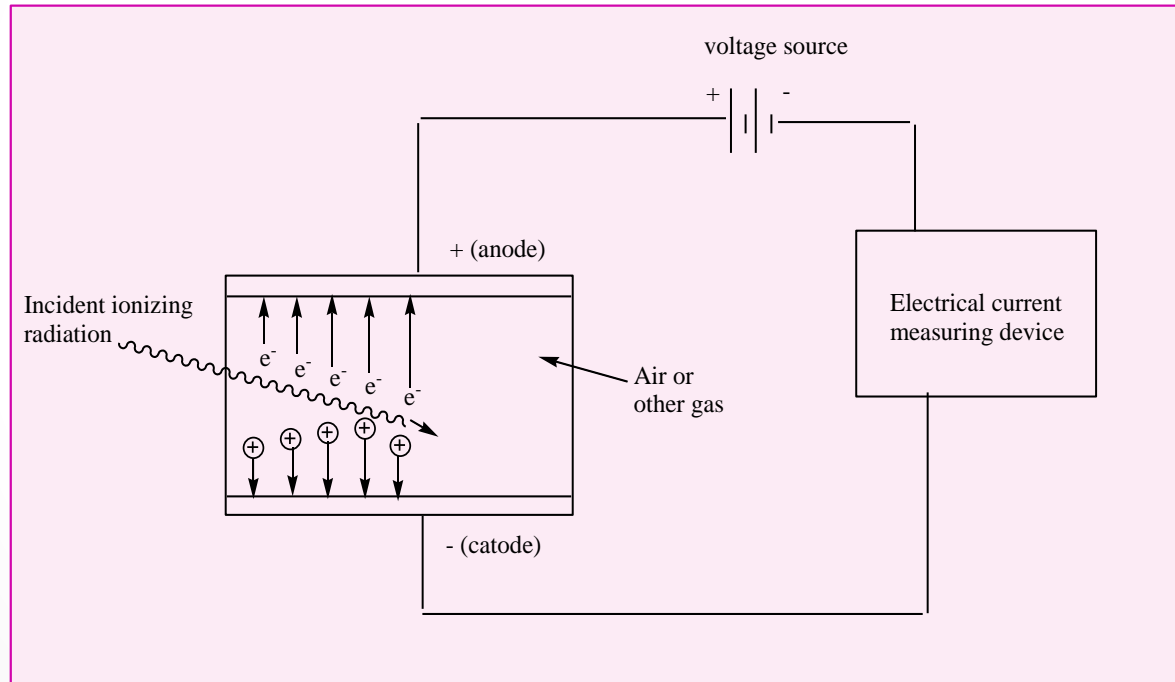
La radiazione induce specifiche reazioni chimiche nelle **emulsioni fotografiche** simili a quelle indotte dalla luce visibile. Dopo lo sviluppo ed il fissaggio dell'emulsione, l'area interessata dalla radiazione ionizzante risulterà annerita. Le tecniche di rivelazione **radiografica** e **autoradiografica** si basano su questo tipo di interazione.

Esempi di Rivelatori

- **Rivelatori a Gas**
 - **Rivelatori a Semiconduttore**
 - **Scintillatori**

Rivelatori a gas

Strumenti il cui funzionamento **si basa sulla ionizzazione prodotta dalle radiazioni stesse quando attraversano una fase gassosa** (detta di riempimento) contenuta nel volume sensibile del rivelatore.

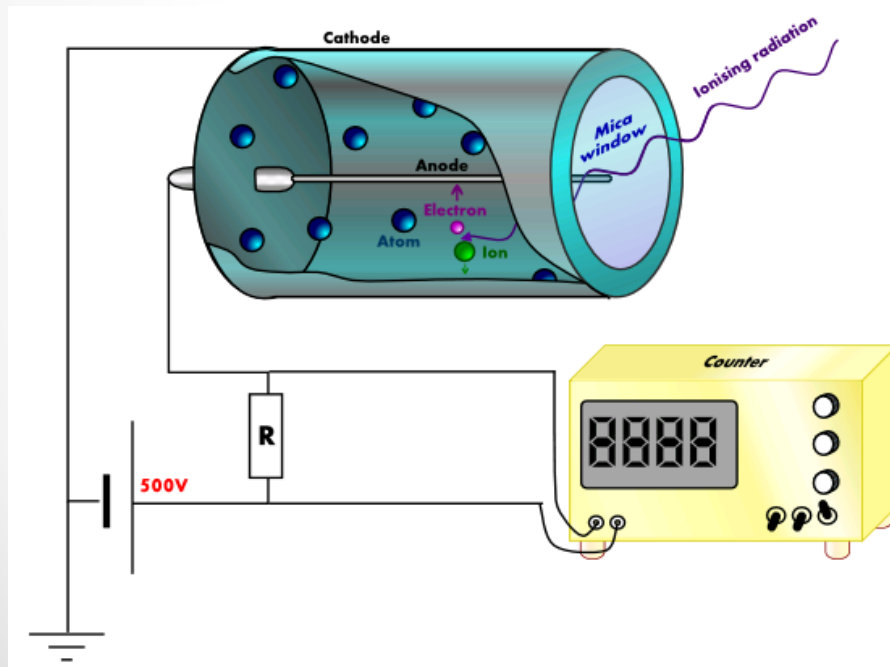


Rivelatori a gas

Se il passaggio di radiazioni produce coppie di ioni, in assenza di un campo elettrico questi sono soggetti soltanto all'agitazione termica e si ricombinano velocemente, a causa dell'attrazione elettrostatica.

Se, invece, le coppie di ioni si producono tra due elettrodi mantenuti a potenziali elettrici diversi, un moto orientato prevale su quello termico e gli ioni migrano agli elettrodi, accelerati dalla differenza di potenziale (V) del campo applicato.

L'alimentatore fornisce una differenza di potenziale tra i due elettrodi. **La scarica degli ioni ai rispettivi elettrodi produce una corrente elettrica** che può essere misurata con l'uso di un amplificatore e un amperometro.

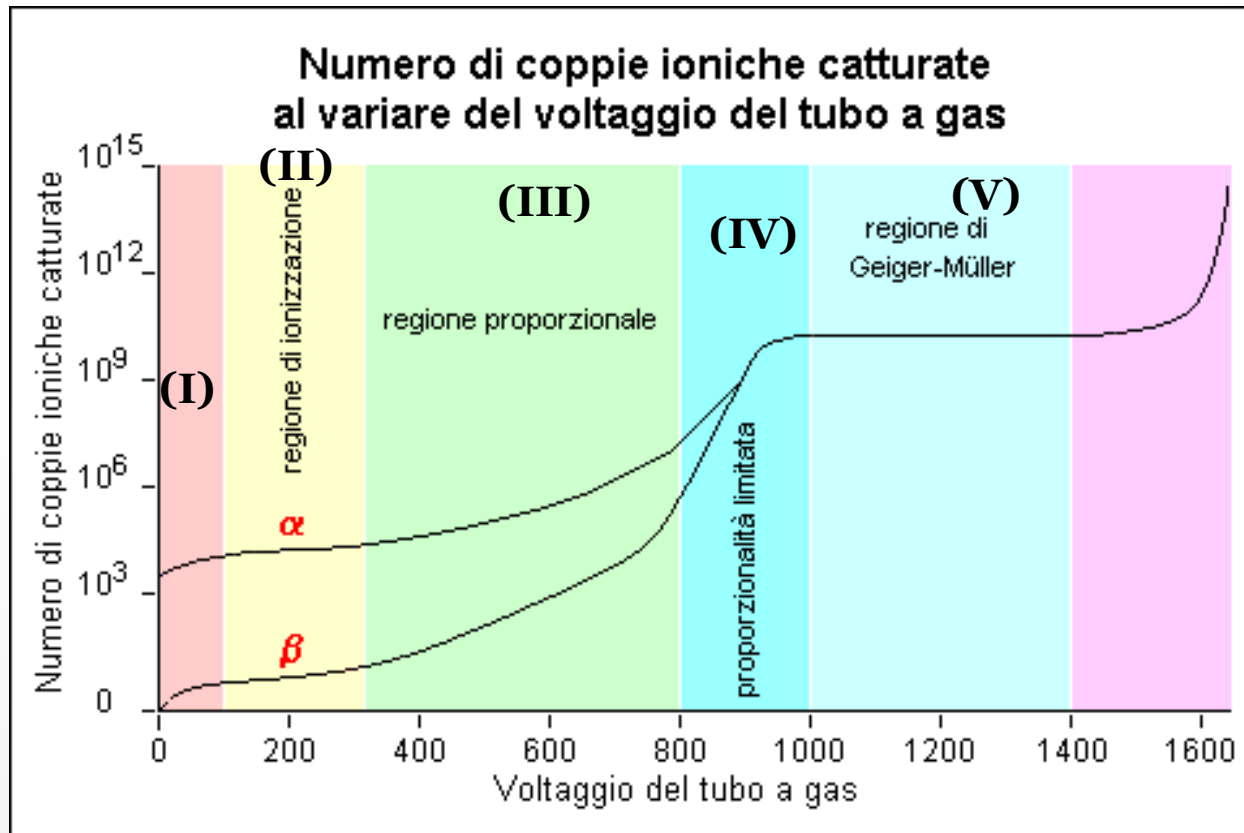


Il più semplice Rivelatore a Gas è costituito da un *condensatore cilindrico* riempito di gas (es. Argon)

Classificazione dei Rivelatori a Gas

Cambiando la **tensione applicata** si hanno 3 diversi modi di funzionamento che caratterizzano 3 tipi di Rivelatori a Gas:

- **Camera a Ionizzazione** (radioprotezione)
- **Contatore Proporzionale** (fisica sperimentale)
- **Contatore Geiger** (radioattività ambientale)





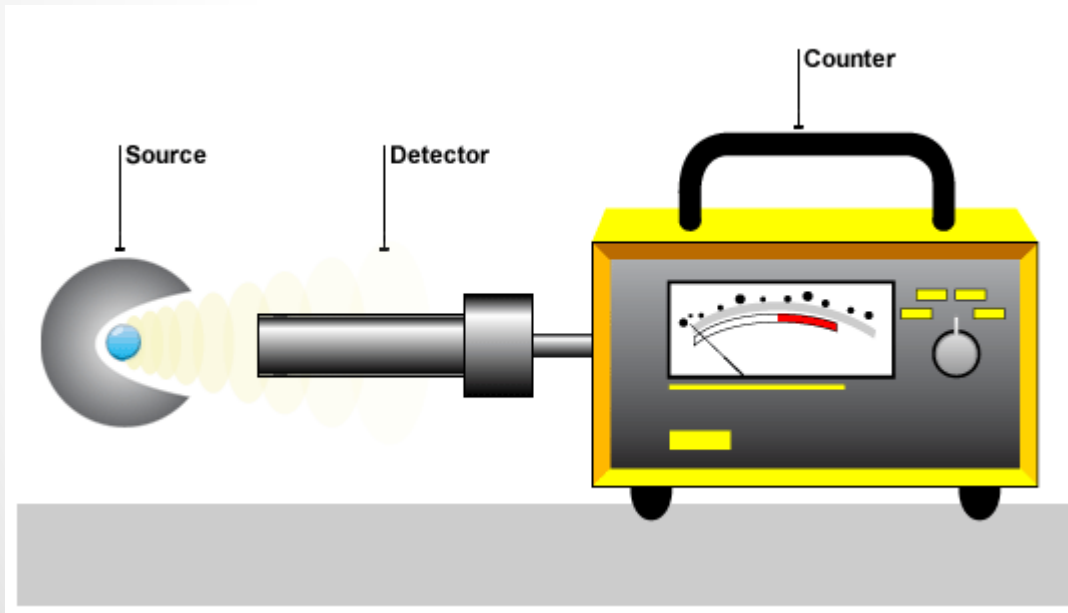
Camera a Ionizzazione



A causa delle piccole correnti prodotte, la camera di ionizzazione non può essere usata per registrare o contare singoli eventi; la corrente misurata è quella totale prodotta dall'insieme delle radiazioni incidenti. **Questi strumenti trovano impiego per misure dosimetriche.**

Regione V di Geiger-Müller

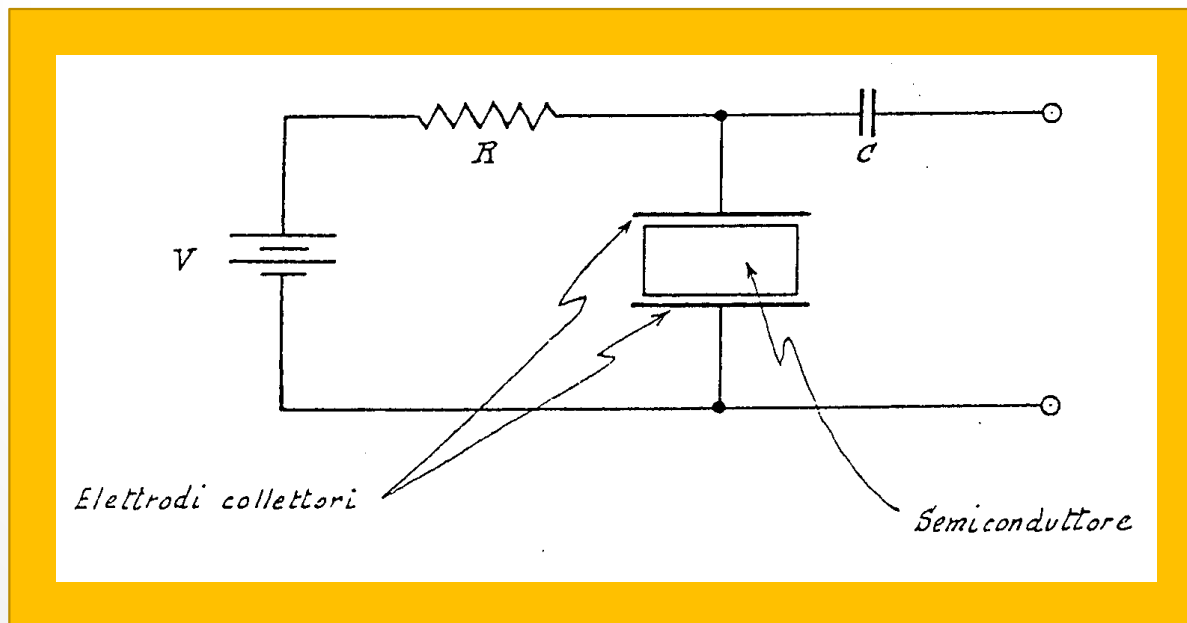
Il valore dell'impulso rimarrà costante nell'intervallo "d-e". La regione V è chiamata "regione di Geiger-Müller"; in questa regione cessa ogni discriminazione fra i diversi tipi di radiazioni ionizzanti. Inoltre si possono contare le particelle, ma non si può misurare la loro energia. La zona a proporzionalità limitata non è utilizzabile per effettuare misure.



Contatori di Geiger-Müller (G.M.)

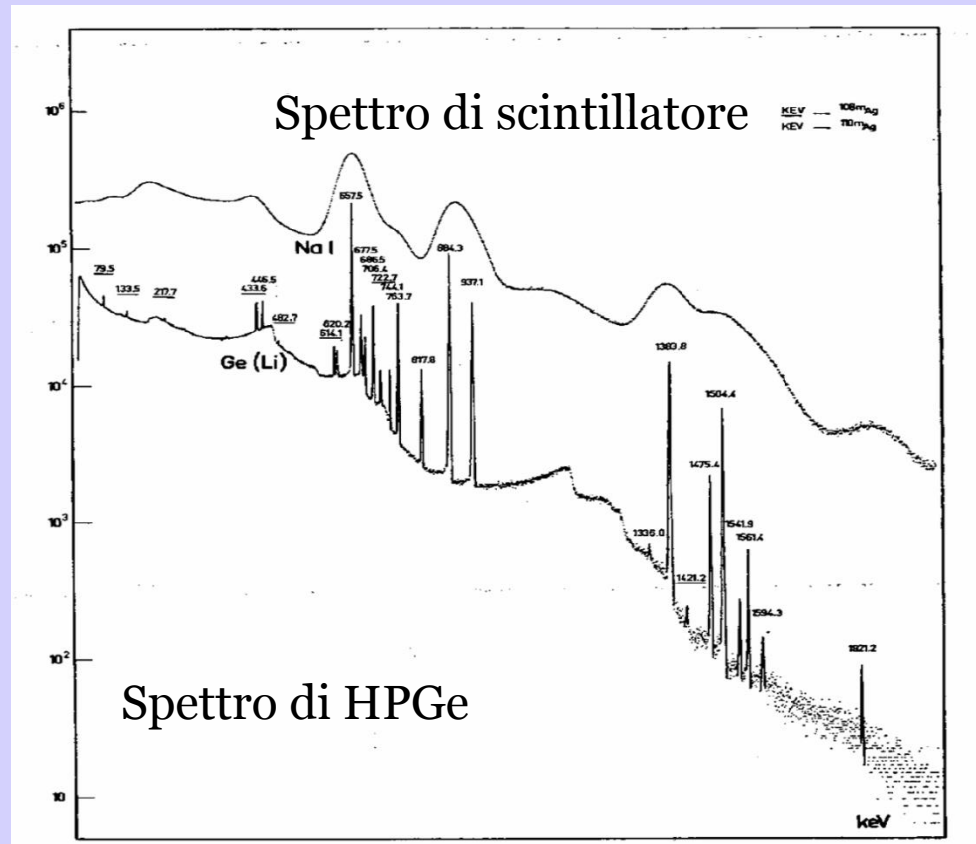
Rivelatori a semiconduttore

Questo tipo di rivelatore viene classificato nella categoria comprendente le camere di ionizzazione. In effetti, **si tratta essenzialmente di una camera di ionizzazione in cui il gas è sostituito con un solido** (da 2 a $5 \cdot 10^3$ volte più denso di un gas; quindi, di **elevata efficienza per i fotoni**). Questo solido non può essere un blocco di metallo, perché darebbe luogo a un forte passaggio di corrente anche in assenza di eventi ionizzanti. Non può neppure essere un isolante, come il vetro, perché non si avrebbe conduzione anche in presenza di eventi ionizzanti. Si tratta di un solido a bassa conducibilità (“**semiconduttore**”) nel quale, se attraversato da radiazioni ionizzanti, si producono coppie “elettrone-buca”.



Impiego dei rivelatori a semiconduttore nella spettroscopia di radiazioni ionizzanti.

I rivelatori a semiconduttore hanno trovato un vasto **campo di applicazione** soprattutto nella **spettroscopia dei raggi γ** , in quanto danno una risposta lineare con l'energia e presentano poteri risolutivi tra i migliori di tutti gli altri rivelatori





Modello 3D Monte Carlo del cristallo
HPGe

Rivelatori a scintillazione

Generalità: ottimi rivelatori proporzionali e possono presentare rendimenti di rivelazione per i raggi γ decine di volte superiori dei rivelatori G.M.

Si sfrutta la proprietà di alcuni materiali di convertire parte dell'energia assorbita in luce ("luminescenza"). Quando una radiazione ionizzante attraversa questi materiali, cede la sua energia cinetica producendo stati eccitati che generano un lampo di luce all'interno dello stesso di durata molto breve. **Il lampo è comunemente indicato come una "scintillazione" e il materiale all'interno del quale si manifesta viene anche detto "scintillatore".** La luce viene poi convertita in segnale elettrico mediante l'impiego di un fotomoltiplicatore.

Se il processo di emissione di luce ha luogo in un tempo compreso fra l'istante dell'eccitazione e 10^{-8} - 10^{-9} sec. (rappresenta l'ordine di grandezza della vita media di uno stato atomico eccitato), **la luminescenza è detta "fluorescenza" ed il materiale "fluoro".** Se, invece, il processo di emissione ha luogo dopo un tempo maggiore, la luminescenza è detta **"fosforescenza" ed il materiale "fosforo".** In quest'ultimo caso, l'emissione della luce può durare da qualche μ sec. a tempi molto lunghi.

Autoradiografia

Emulsioni fotografiche.

Una particella carica che attraversa un'emulsione fotografica impressiona i granuli di AgBr in un intorno della sua traiettoria e il successivo sviluppo mostra un annerimento in corrispondenza del passaggio della particella.

In questo modo si possono rivelare elettroni, particelle pesanti e, attraverso l'effetto dei loro elettroni secondari, fotoni x e γ .

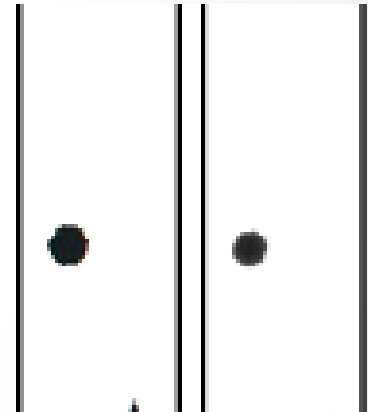
Le emulsioni fotografiche sono impiegate in tre campi: la dosimetria, l'autoradiografia e l'osservazione delle singole particelle.

Annerimenti: a seconda del tipo di radiazione si hanno annerimenti diversi:
annerimento puntiforme-fotoni X e γ : l'immagine è costituita da una macchia nera in corrispondenza dell'area contenente materiale radioattivo.

Annerimento per tracce individuali-raggi α e β : i granuli di AgBr impressionati si trovano lungo il percorso della particella (traccia):
occorrono emulsioni con elevato potere risolutore. Dall'analisi delle tracce si può risalire al tipo di particella:

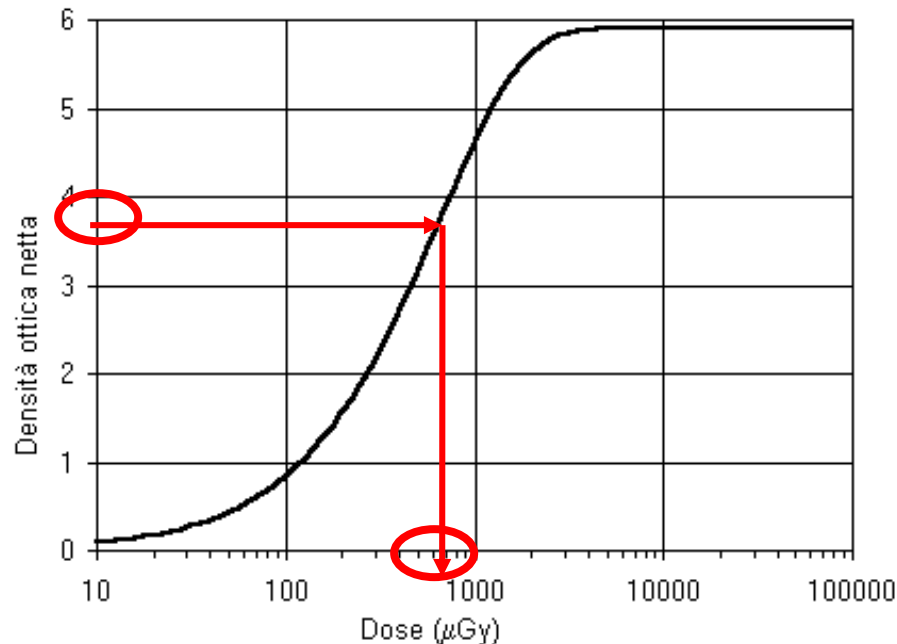
α =tracce brevi e rettilinee;

β =tracce non rettilinee e di lunghezza dipendente dalla energia delle particelle.



Emulsioni fotografiche

Una emulsione fotografica irradiata viene impressionata come nel caso della luce visibile e “annerisce”
L’annerimento e’ proporzionale alla dose



Si ottiene la misura della dose “integrale” assorbita dalla pellicola durante l’intero periodo di esposizione

Vari tipi di film-badge



Devono essere
SEMPRE
portati al seguito

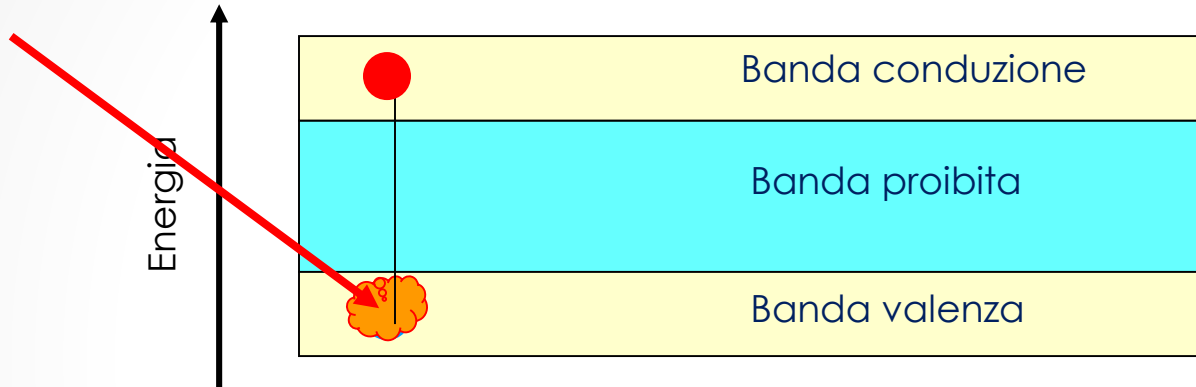
Una volta letti, costituiscono un documento
Stabile ed archiviabile della dose ricevuta

Dosimetri a termoluminescenza (TLD)

Principio fisico di funzionamento

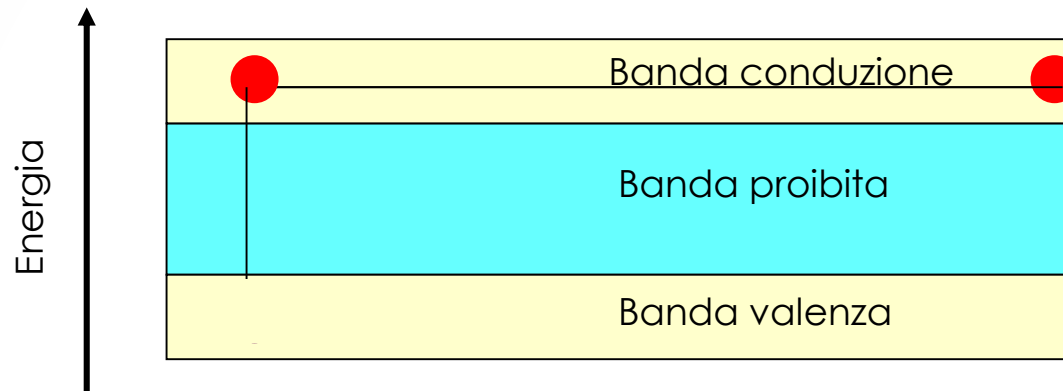
Termoluminescenza = emissione di luce, a seguito di riscaldamento da parte di alcuni materiali isolanti (CaF_2 , LiF , BeO , CaSO_4 , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) precedentemente irradiati. L'intensità della luce emessa è proporzionale alla dose assorbita.

Struttura a bande di un isolante



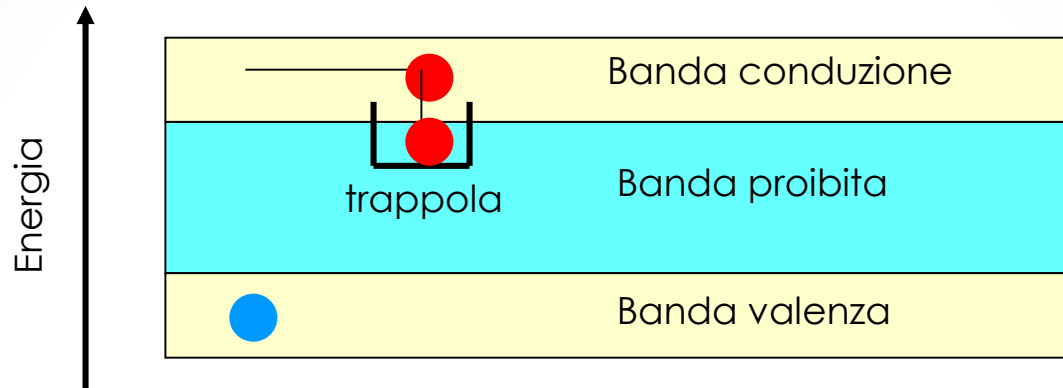
L'energia impartita dalla radiazione libera l'elettrone dal legame Atomico e lo porta nella banda di conduzione.

Struttura a bande di un isolante



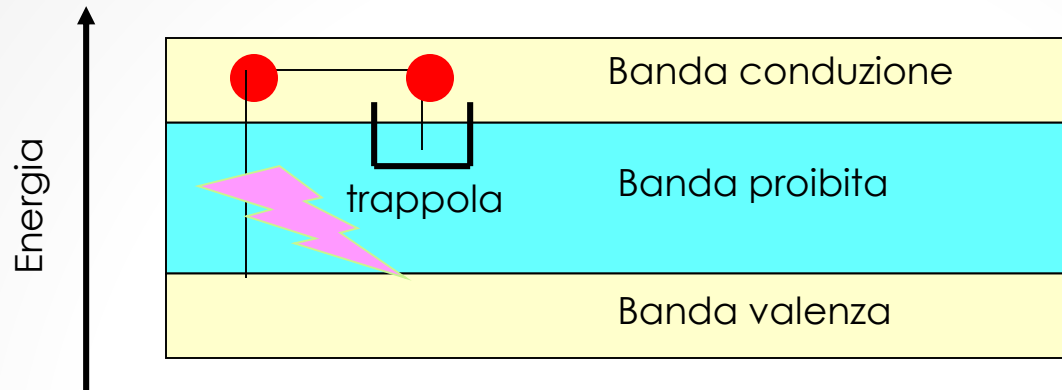
La maggior parte degli elettroni ritornano a legarsi alle lacune dopo aver migrato nel cristallo (luminescenza)

Struttura a bande di un isolante



Qualcuno resta intrappolato in livelli metastabili della banda proibita

Struttura a bande di un isolante



Finche' il cristallo non viene riscaldato (lettura). L'energia termica somministrata libera l'elettrone dalla trappola. Esso ritorna alla banda di valenza e nel processo viene emessa luce (Termoluminescenza)

La fase di lettura del dosimetro consiste quindi nel suo riscaldamento

Un fotomoltiplicatore legge la luce emessa



Proporzionale al numero di elettroni intrappolati

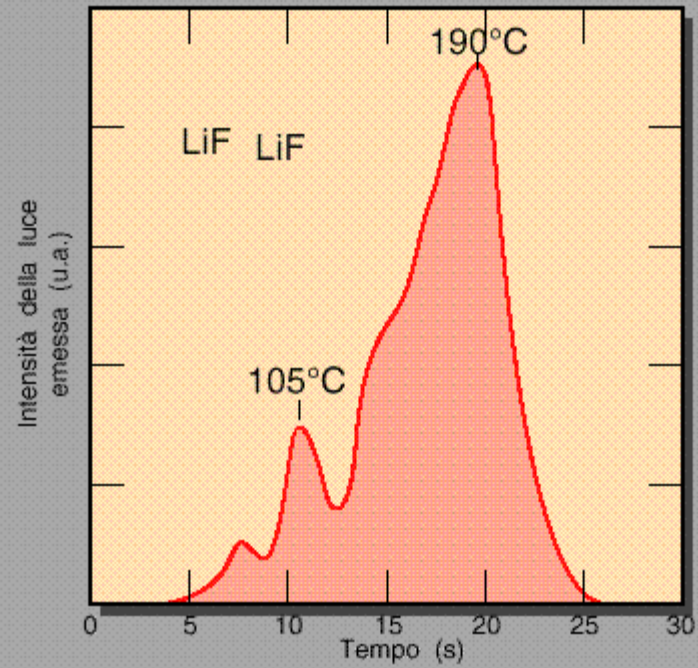


Proporzionale alla dose assorbita

Il riscaldamento del materiale, ovvero la lettura del dosimetro, cancella l'informazione.



TERMOLUMINESCENZA "GLOW CURVE"



Alcuni tipi di dosimetri TLD



Dosimetria e grandezze dosimetriche

Esposizione
Dose assorbita
Dose equivalente
Dose efficace



4

Fonti naturali e artificiali di radiazioni ionizzanti

Fonti di irradiazione
esterna
Fonti di irradiazione
interna

Esposizione X

È la più antica delle grandezze dosimetriche e fu, a suo tempo, introdotta per descrivere **la capacità dei raggi X di produrre ionizzazione in aria**. Essa è definita da:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1)$$

dove **dQ** è il valore assoluto della carica totale degli ioni di un segno prodotti in aria nell'elemento di volume di massa dm.

Unità SI: (C·Kg⁻¹);

vecchia unità roëntgen (R)

Il **rateo (o intensità) di esposizione**, Il **rateo (o intensità) di esposizione**, è a sua volta definito come:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

Il rateo di esposizione si esprime comunemente in R·s⁻¹, o nei multipli e sottomultipli di tale unità (R·min⁻¹; mR·h⁻¹; etc.).

L'esposizione è, quindi, una grandezza basata su un effetto fisico (non biologico) ed è utilizzabile correttamente in un ambito assai ristretto, fotoni X e γ solamente. Tuttavia, nell'ambito di validità della sua definizione, l'esposizione è ancora oggi largamente apprezzata per la semplicità concettuale della strumentazione con la quale se ne effettua abitualmente la misura (**camere di ionizzazione ad aria**).

Il danno biologico dovuto alle radiazioni (il cosiddetto “detrimento”) è ritenuto proporzionale alla “quantità di radiazione” ricevuta: occorre pertanto misurare in qualche modo questa quantità. Poiché si è trovato che, nelle situazioni note alla casistica, il danno dipende specificamente dalla concentrazione di energia depositata nei tessuti, si è introdotta la quantità nota come dose assorbita.

Concetti di dosimetria

Dose assorbita
Dose equivalente
Dose efficace

Dose assorbita

Energia media depositata dalla radiazione in un elemento di volume di massa unitaria.

$$D = dE/dm$$

Si misura in Gray (Gy) oppure in rad: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J Kg}^{-1}$$

$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ (vecchia unità: $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$).

Dalla definizione di “dose assorbita” risulta chiaro che **la vera dimensione del pericolo è rappresentata dall’energia assorbita.** Infatti, è l’energia assorbita che determina le modificazioni chimiche e/o biologiche nel soggetto irradiato. Il rateo (o intensità) di dose assorbita, è a sua volta definito come:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (4)$$

dove dD è l’incremento di dose assorbita nell’intervallo di tempo dt .

Si esprime in $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$, o nei multipli o sottomultipli di tale unità ($\text{Gy}\cdot\text{min}^{-1}$; $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$; etc.).

Le conseguenze di una dose assorbita non dipendono soltanto dal valore della dose, dal tipo ed energia della radiazione e dalla distribuzione della dose sul corpo, ma anche dalla distribuzione della dose in funzione del tempo (intensità di dose e protrazione dell’esposizione).

Nessuna delle grandezze dosimetriche presentate (esposizione, dose assorbita) è per sua natura idonea a interpretare in modo completo gli effetti provocati dal trasferimento di energia dalle radiazioni ionizzanti alla materia vivente.

La dose assorbita, che pur resta di fondamentale importanza nel campo della radioprotezione, **non consente in particolare di tener conto della diversità degli effetti biologici indotti da radiazioni di diversa qualità.** *In linea di principio e sotto certe condizioni in un sistema chimico, a parità di dose assorbita, non si hanno sensibili differenze negli effetti per tipi diversi di radiazione incidente; le specie chimiche che si formano sono tali da subire generalmente lo stesso destino se generate da una radiazione α , β , o γ .*

In un sistema vivente, gli effetti di cui bisogna tener conto sono più complessi: il sistema subisce delle trasformazioni a cui può successivamente reagire per riparare il danno che ne è derivato. Questa capacità di ripresa di un organismo è tanto più alta quanto meno concentrato è il danno stesso.

L'effetto delle radiazioni su un sistema biologico varia, quindi, con la densità di ionizzazione e, di conseguenza, a parità di dose l'effetto è maggiore con le radiazioni α che con le β e le γ .

Dose Equivalente

Oltre a considerare l'energia depositata tiene conto anche della diversa radiotossicità delle radiazioni (qualità delle radiazioni).

Si ottiene moltiplicando la dose assorbita per un fattore di ponderazione (fattore peso) che dipende dal tipo di radiazione:

$$H_{T,R} = W_R * D_{T,R}$$
$$H_T = \sum_R W_R * D_{T,R}$$

$W_R = 1$ fotoni, ed elettroni
 $W_R = 20$ per le particelle alfa

Esso viene scelto in base al tipo e all'energia della radiazione incidente sul corpo o, in caso di sorgenti poste all'interno del corpo, emessa dalla sorgente: w_R è **adimensionale**.

Unità di misura Sievert (Sv) o il rem: $1\text{Sv} = 100 \text{ rem}$

$D_{T,R}$ è la dose assorbita mediata sul tessuto o organo T, dovuta alla radiazione R.

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, 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
Particelle alfa, frammenti di fissione, nuclei pesanti	20

Il rateo (o intensità) di dose equivalente, è a sua volta definito come

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (6)$$

e si esprime in Sv·s⁻¹, e relativi multipli e sottomultipli. Va tenuto presente che **la dose equivalente non è una grandezza fisica, ma soltanto un mezzo per esprimere su scala comune gli effetti prodotti alle basse dosi da radiazioni di qualità diversa.**

I valori numerici del fattore di qualità sono stati empiricamente stabiliti sulla base delle attuali conoscenze radiobiologiche. È, infatti, probabile una revisione dei valori attualmente adottati in un prossimo futuro, come conseguenza di nuove acquisizioni.

Dose efficace

Tiene conto della diversa radiosensibilità dei tessuti.

Si ottiene moltiplicando la dose equivalente per un fattore di ponderazione che dipende dall'organo o tessuto.

$$E = \sum_T w_T * H_T$$

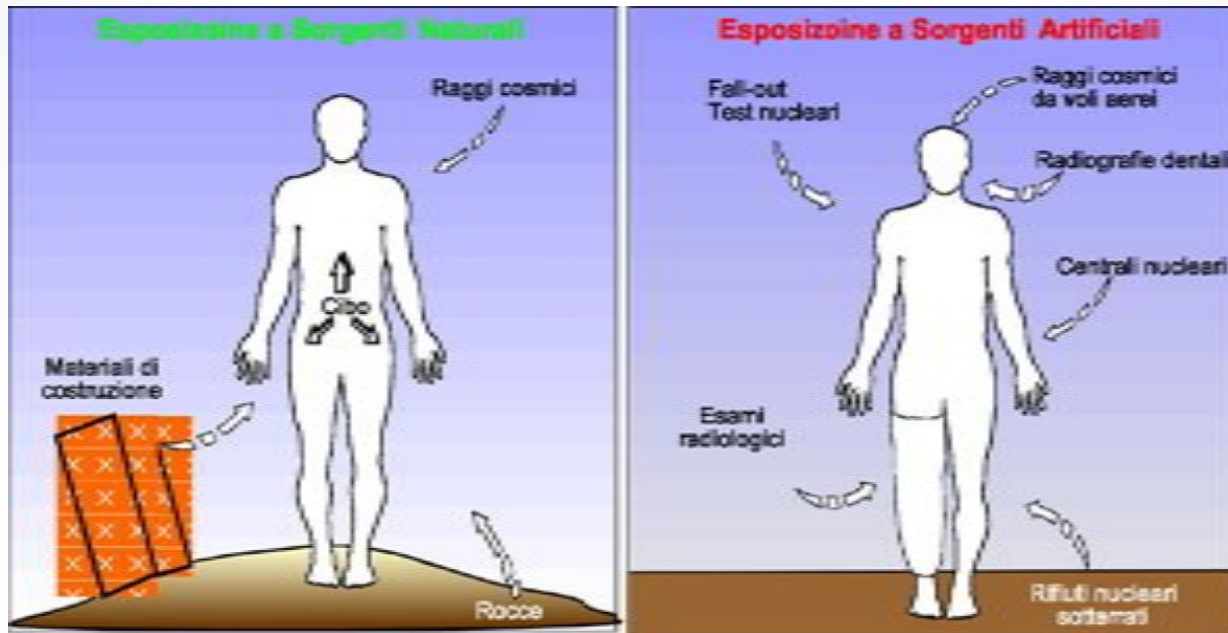
– $w_T = 0.20$ gonadi

– $w_T = 0.01$ ossa e pelle

Unità di misura Sievert (Sv) o il rem: $1\text{Sv}=100\text{ rem}$

La dose efficace è la grandezza di riferimento per la valutazione degli effetti biologici di natura stocastica ovvero sia induzioni di tumori e danni genetici.

Fonti naturali e artificiali di radiazioni ionizzanti



Tutti gli individui, nel corso della loro esistenza, sono esposti a radiazioni ionizzanti provenienti da fonti (sorgenti) naturali e artificiali. Queste fonti danno luogo a due tipi di irradiazione :esterna ed interna.

Fonti di irradiazione esterna

raggi cosmici che provengono dallo spazio esterno alla terra e che, filtrati in parte dall'atmosfera, ci raggiungono al suolo contribuendo per $\sim 0.3 \text{ mSv}$ all'anno per persona; il valore aumenta con l'altitudine;

radioattività ambientale di origine naturale: varia da paese a paese toccando un minimo di 0.03 mSv/anno in Irlanda fino a un massimo di 50 mSv/anno in Brasile ed India. La media Europea è di 0.4 mSv/anno ;

radioattività da fonti disparate e artificiali quali, ad es., orologi luminosi e schermi televisivi che contribuiscono per $\sim 0.015 \text{ mSv/anno}$;

esperimenti nucleari atmosferici degli anni '50 e '60 che nel 1963 contribuivano per $\sim 1.5 \text{ mSv/anno}$, cifra ora ridotta a 0.01 mSv/anno ;

impianti nucleari: contribuiscono "in regime di funzionamento normale" in modo irrilevante alla radioattività ambientale: circa 0.0005 mSv/anno ;
esprimere delle dosi medie nazionali pro capite.

Fonti di irradiazione interna

• **nuclidi cosmogenici** (generati dai raggi cosmici) come ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na , ma il contributo di dose è trascurabile. Importante è, invece, il radioisotopo naturale del potassio (^{40}K) presente nei tessuti viventi. Il ^{40}K dà un equivalente di dose al corpo intero di 0.18 mSv/anno;

• **radioattività dei cibi** che contribuisce per circa 0.37 mSv/anno;

• **radiazioni da radon e discendenti**: il ^{222}Rn è un gas naturale proveniente dalla disintegrazione del ^{238}U presente in natura in rocce di vario tipo quali il granito e il tufo dell'Italia meridionale. Il radon si concentra in edifici umidi e mal ventilati, entra nei polmoni e decade producendo altri radionuclidi che rimangono in sito. Questa fonte è molto importante e conta per circa 0.5-1.5 mSv/anno; per persone costantemente al chiuso nelle loro case può arrivare a circa 10 mSv/anno. In Italia sono più esposte le regioni centro-meridionali; Viterbo sarebbe la città più colpita con una media che arriva a tre volte quella torinese. L'esposizione può essere limitata con semplici misure di prevenzione.

• **Fonti impiegate in Medicina Nucleare**: la Medicina Nucleare è una disciplina che studia le funzioni dell'organismo usando traccianti radioattivi γ -emittenti. I traccianti, una volta iniettati, si distribuiscono nei vari organi come il cervello, il cuore, e altri seguendo delle vie metaboliche. Dall'esterno, mediante opportune γ -camere, è possibile seguire le vie percorse e quindi analizzare i processi metabolici degli organi. L'impiego diagnostico "in vivo" dei traccianti fornisce una dose equivalente pro capite stimata attorno a 0.05 mSv/anno sull'intera popolazione;

• **Ricadute (fall out)** dovute a test nucleari nell'atmosfera: si tratta di prodotti radioattivi inalati e ingeriti attraverso le catene alimentari. Gli esperimenti nucleari nell'atmosfera del periodo 1950-1960 hanno contribuito nel 1963 per circa 1.5 mSv, ora ridotta a un valore trascurabile.

RADIONUCLIDI NATURALI

isotopo	abbondanza (%)	t dimezzamento (y)	transizioni
${}_{19}^{40}\text{K}$	0.0119	$1.2 \cdot 10^9$	β^- , EC, γ
${}_{37}^{87}\text{Rb}$	27.85	$6 \cdot 10^{10}$	β^-
${}_{49}^{115}\text{In}$	95.77	$6 \cdot 10^{14}$	β^-
${}_{52}^{130}\text{Te}$	34.49	$1 \cdot 10^{21}$	produzione di ${}_{54}^{130}\text{Xe}$
${}_{57}^{138}\text{La}$	0.089	$2 \cdot 10^{11}$	β^- , EC
${}_{60}^{144}\text{Nd}$	23.9	$1 \cdot 10^{15}$	α
${}_{62}^{147}\text{Sm}$	15.07	$1.4 \cdot 10^{11}$	α
${}_{71}^{176}\text{Lu}$	2.6	$7.5 \cdot 10^{10}$	β^- , γ
${}_{75}^{187}\text{Re}$	62.93	$4 \cdot 10^{12}$	β^-
${}_{90}^{232}\text{Th}$	100	$1.4 \cdot 10^{10}$	α
${}_{92}^{235}\text{U}$	0.715	$7.1 \cdot 10^8$	α
${}_{92}^{238}\text{U}$	99.28	$4.5 \cdot 10^9$	α

La radioattività naturale è costituita da radioisotopi presenti all'atto della formazione della terra (ca. 4,6 miliardi di anni fa) a lunghissimo tempo di dimezzamento e che quindi non si sono ancora completamente esauriti. Ovviamente all'epoca vi erano molti più radioisotopi naturali ma quelli a vita breve o media sono già tutti decaduti in atomi stabili.

Famiglie radioattive

Serie dell'Uranio (famiglia $4n+2$)

capostipite: U-238 $T_{1/2}=1,4*10^{10}$ anni

Serie dell'Attinio (famiglia $4n+3$)

capostipite: U-235 $T_{1/2}=7,13*10^8$ anni

Serie del Torio (famiglia $4n$)

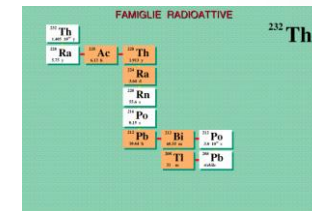
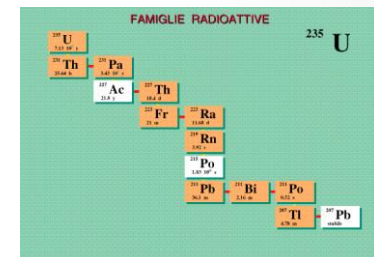
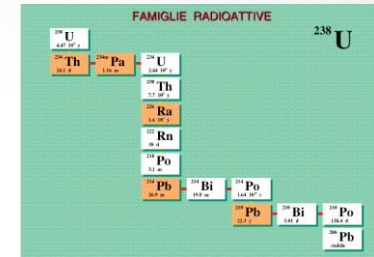
capostipite: Th-232 $T_{1/2}=4,5*10^9$ anni

Esiste una quarta famiglia, artificiale (non più presente in natura) :

Serie del Nettunio (famiglia $4n+1$)

capostipite: Pu-241

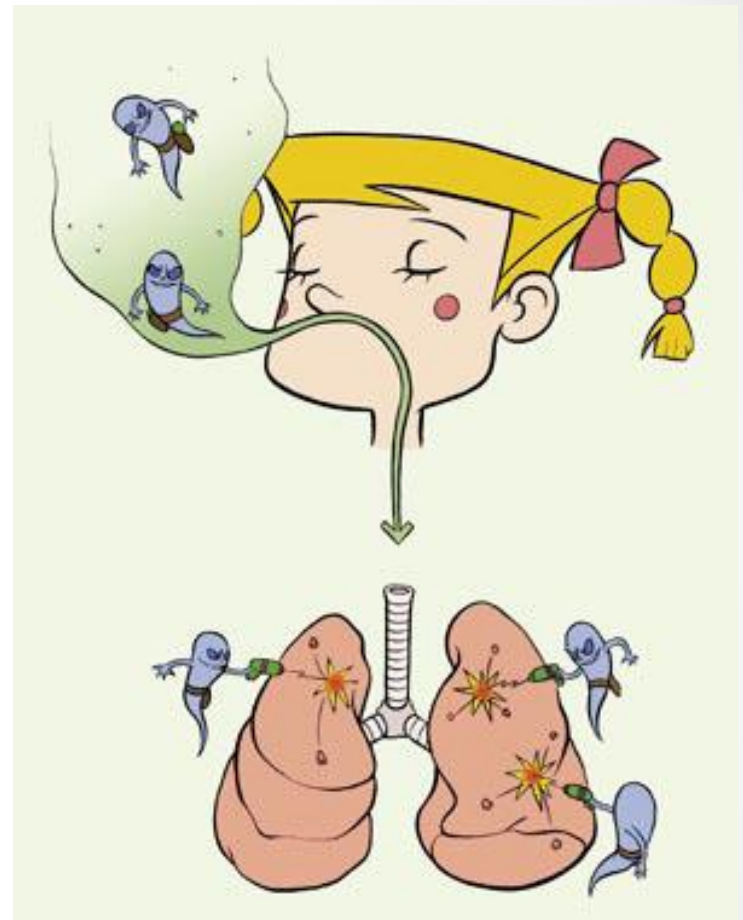
^{237}Np (+ longevo) con $T_{1/2} \approx 10^6$ anni



Tempo di dimezzamento 3,82 giorni

Il Radon è un gas nobile non reattivo che, 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 -emittenti 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 α che possono produrre tumori polmonari



Il Radon

È tra i radionuclidi naturali più diffusi



È presente nel sottosuolo quasi ovunque



Filtra dal suolo e dai materiali da costruzione



Si può trovare disciolto nelle falde acquifere



Filtra dagli impianti idrici



Penetra nelle abitazioni

Rischi per la salute

Il radon è la seconda causa
di cancro polmonare



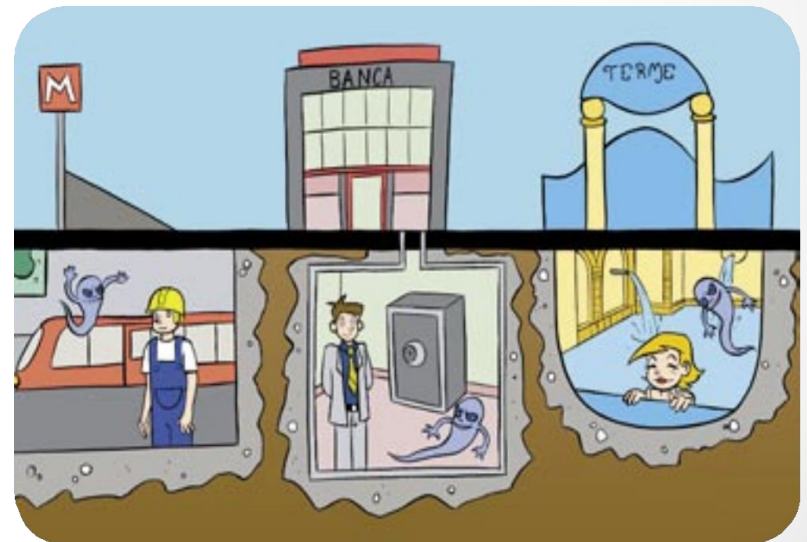
- L'OMS l'ha inserito tra le sostanze cancerogene di gruppo 1
- Rischio 25 volte maggiore per i fumatori

DOSI AMBIENTALI (valori annui in mSv)

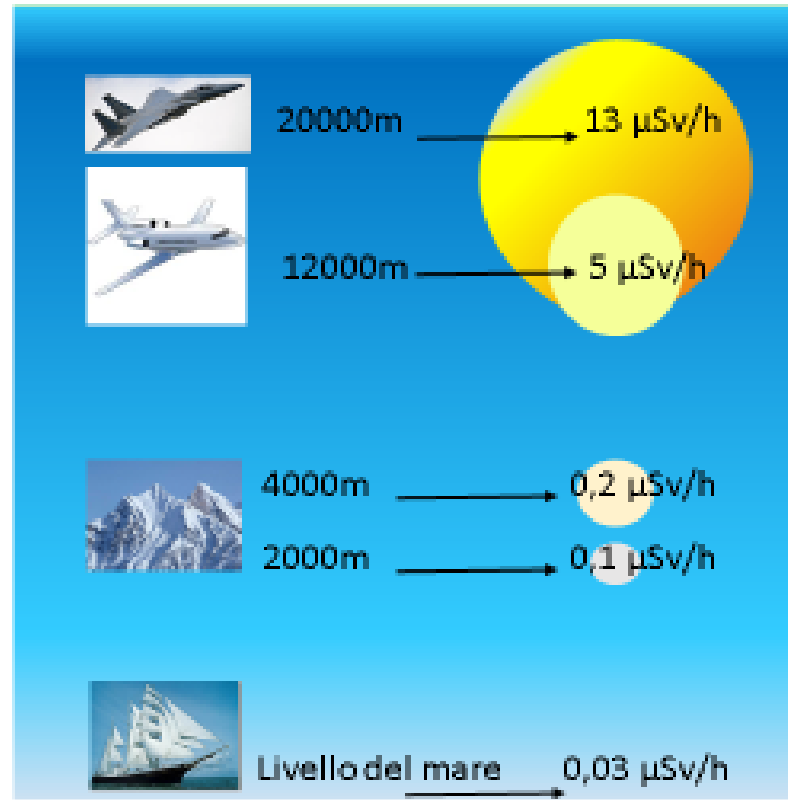


Normativa italiana

- **Decreto legislativo 241/00**: livelli consentiti nei luoghi di lavoro **500Bq/m³**
- Ambienti interessati dal decreto:
 - Tunnel, sottovie, catacombe, grotte, locali sotterranei e interrati;
 - Locali situati in zone ritenute a rischio per le alte concentrazioni di Radon
 - Stabilimenti Termali



La dose di radiazioni a cui siamo sottoposti dipende anche dall'altitudine a causa dell'effetto delle radiazioni cosmiche

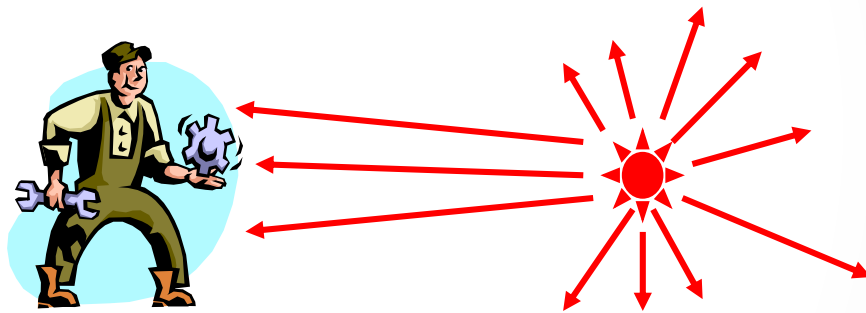


Il personale delle compagnie aeree è in media esposto a circa 2 mSv/anno in più del personale di terra.

Rischi da radiazioni ionizzanti:

irraggiamento:

Sorgente esterna all'organismo
Le radiazioni incidono sul lavoratore



Contaminazione interna:

Sorgente entra nell'organismo a seguito di
Ingestione, inalazione,

Rischio da irraggiamento esterno

La definizione e la quantificazione del rischio da irradiazione esterna non può prescindere da tre elementi fondamentali:

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)

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)

Si osservi in proposito che:

l'uso di un grembiule in gomma piombifera di spessore equivalente a 0.25 mm, riduce da 10 a 20 volte la dose assorbita e conseguentemente il rischio professionale

l'uso di occhiali anti-X, quando prescritto, porta a livelli trascurabili la dose assorbita dal cristallino.

Dispositivi di protezione e monitoraggio individuali

