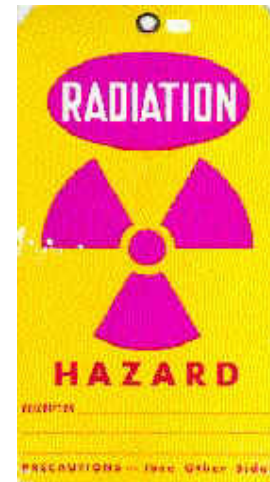


ASPETTI FISICI DELLA RADIOPROTEZIONE



ICRP



Dr. Adolfo Esposito
Esperto di Radioprotezione dei L.N.F.

In data 12/8/2020 è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale, con il DLgs 101, la nuova legge in materia di radioprotezione, in recepimento della Direttiva Europea 1013/59 EURATOM

Il nuovo decreto, entrato in vigore a partire dal 27/8/20, abroga del tutto la normativa attualmente in vigore , introduce molte novità' e richiede molteplici nuovi adempimenti nei suoi 245 articoli e 35 allegati, di cui è composto

Informazione e Formazione Dirigenti e preposti art 110

Informazione e Formazione Dirigenti e preposti art 111

Entrambe con frequenza triennale di ripetizione

In presenza

L'informazione e la formazione previste nel presente articolo sono svolte nell'ambito delle rispettive competenze dagli Esperti di Radioprotezione e dai Medici Autorizzati in possesso dei requisiti previsti dalla normative vigente concernente il riconoscimento della figura del formatore in materia di salute e sicurezza.

Principali argomenti

- Cenni storici sulla radioattività
- Natura ed origine delle radiazioni
- Energia delle radiazioni
- Attenuazione delle radiazioni
- Grandezze fisiche ed unità di misura
- Alcune leggi fisiche importanti
- Gli effetti biologici e sanitari
- Concetto di rischio, danno, protezione e prevenzione
- Gli obiettivi della radioprotezione
- I tre principi della R.P.
- Le grandezze limite ed operazionali
- Il rischio radiologico e fattori di rischio
- misure tecniche di prevenzione e protezione dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti
- D.Lgs.101/20
- Esperto di Radioprotezione e suoi compiti
- Sanzioni

Scoperta della radioattività

Alla fine del XIX secolo, poco più di cento anni fa, in un lasso di tempo di circa tre anni, avvennero alcune fra le più importanti scoperte scientifiche in assoluto che avrebbero rivoluzionato la scienza moderna, permettendo l'estensione della speculazione scientifica dal mondo macroscopico al mondo microscopico.

1895	Scoperta dei raggi X	Wilhelm Conrad Roentgen
1896	Scoperta della radioattività	Henry Becquerel
1897	Scoperta dell'elettrone	Joseph John Thompson
1898	Scoperta del Polonio e del Radio	Marie Curie

Negli stessi anni, già nel 1896 cominciarono a manifestarsi i primi segni dei danni da radiazioni

I raggi X

Nel 1895 W. C. Roentgen (1845-1923) studiava i fenomeni luminosi associati alle scariche ad alta tensione in ampolle di vetro a vuoto (tubi di Crookes). Si accorse, lavorando con uno schermo fluorescente attorno al tubo in funzione, che l'ombra delle ossa della sua mano era proiettata sullo schermo.

La radioattività naturale

"Nel 1896 il fisico francese Henri Becquerel si accorse casualmente che i sali di uranio, posti in vicinanza di una lastra fotografica, anche racchiusa in un involucro opaco, la impressionano, mostrando così di emettere radiazioni capaci di attraversare anche i corpi che non sono attraversati dalla luce. Questa osservazione aprì un nuovo capitolo della fisica, quello della radioattività".

(E. Persico *Gli atomi e la loro energia*)

Le osservazioni di Becquerel

Insensibilità ai legami chimici: la radiazione emessa da 1 g di *bromuro di radio*, che contiene il 59% di Radio, è identica a quella emessa da 0.59 g di Radio puro.

Insensibilità alla temperatura, alla pressione, ai campi elettrici e magnetici.

Diversi isotopi di uno stesso elemento, nonostante presentino le stesse proprietà chimiche, non presentano la stessa *radioattività*. Per questo si può parlare delle proprietà radioattive di un *nuclide* (o *radionuclide*, o *radioisotopo*) ma non di un elemento.

1897: J.J. Thompson scopre l'elettrone.

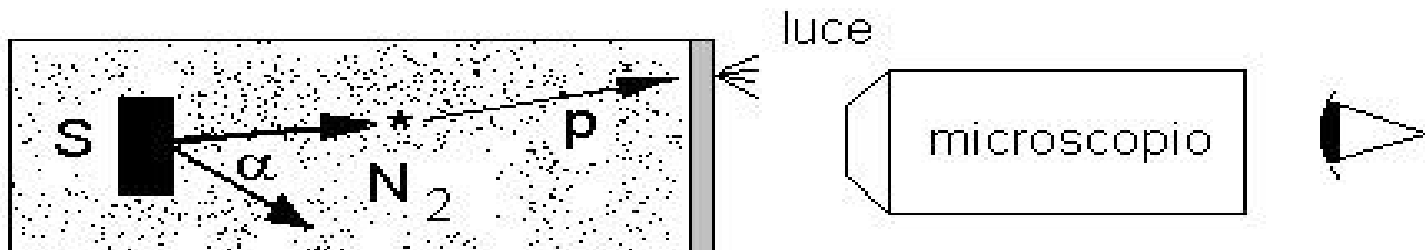
1898: Marie Curie scopre il Polonio ed il Radio

Proseguendo gli studi iniziati da Becquerel, M. Curie scoprì che anche altre sostanze godevano della stessa proprietà (**radioattive, radium = raggio**) Notò che la pechblenda (contenente piccole quantità di sali di uranio) manifestava più radioattività dei sali di uranio: ne dedusse la presenza di una specie chimica ignota. Riuscì a separare **il polonio e il radio**. Utilizzando il radio, con un semplice esperimento riuscì a stabilire la natura dei raggi emessi scoprendo che si trattava di 3 tipi di radiazioni: la prima elettricamente carica positivamente, la seconda negativamente e la terza neutra. Associò a tali raggi le prime tre lettere dell'alfabeto greco α (**alfa**), β (**beta**), γ (**gamma**).

Le trasmutazioni artificiali

(Reazioni Nucleari)

Rutherford osservò la prima trasmutazione nucleare artificiale (1919) con un semplice dispositivo: una sorgente di particelle alfa (α) in un contenitore riempito di azoto (N_2) chiuso con uno schermo fluorescente. Lo schermo era posto ad una distanza dalla sorgente tale che nessuna particella alfa lo potesse raggiungere. Tuttavia sullo schermo osservò delle scintillazioni, dovute ai protoni (p) uscenti dalle reazioni nucleari tra le particella alfa e i nuclei di azoto: $^{14}N + \alpha = ^{17}O + p$.



Le trasmutazioni artificiali

In generale una trasmutazione artificiale avviene quando una particella proiettile colpisce un nucleo bersaglio con energia sufficiente per cambiarne la struttura interna e mutarlo in un altro nuclide. La trasformazione può essere accompagnata dall'emissione di radiazione particolata e fotonica.

Dal 1919 al 1932 gli unici *proiettili* disponibili erano le particelle alfa, che permettevano di produrre reazioni solo con nuclei leggeri.

Il *neutrone* venne scoperto nel 1932 in seguito ad un'esperienza condotta da I. Curie e F. Joliot ed interpretata da Chadwick.

La radioattività artificiale

Nel 1934 I. Curie e F. Joliot si accorsero che il Magnesio, bombardato con particelle alfa, diventa radioattivo, e precisamente emette radiazione beta con un tempo di dimezzamento caratteristico.

Si era cioè scoperto che le reazioni nucleari possono produrre nuclidi non esistenti in natura, *i radioisotopi artificiali*.

Poco dopo questa esperienza, Fermi scopriva che anche un bombardamento con neutroni poteva produrre radioattività artificiale (*attivazione neutronica*).

Il dispositivo era molto semplice: una sostanza veniva esposta ai neutroni emessi da un miscuglio di Radio e Berillio (ancora oggi usato come sorgente di neutroni), poi veniva misurata con un contatore Geiger: dall'andamento temporale del numero di conteggi si ricavava il tempo di dimezzamento tipico del radionuclide prodotto.

Radiazioni



Caratteristica comune di tutti i tipi di radiazione è il trasporto di energia nello spazio.

L'assorbimento di energia si manifesta in genere con un aumento locale della temperatura

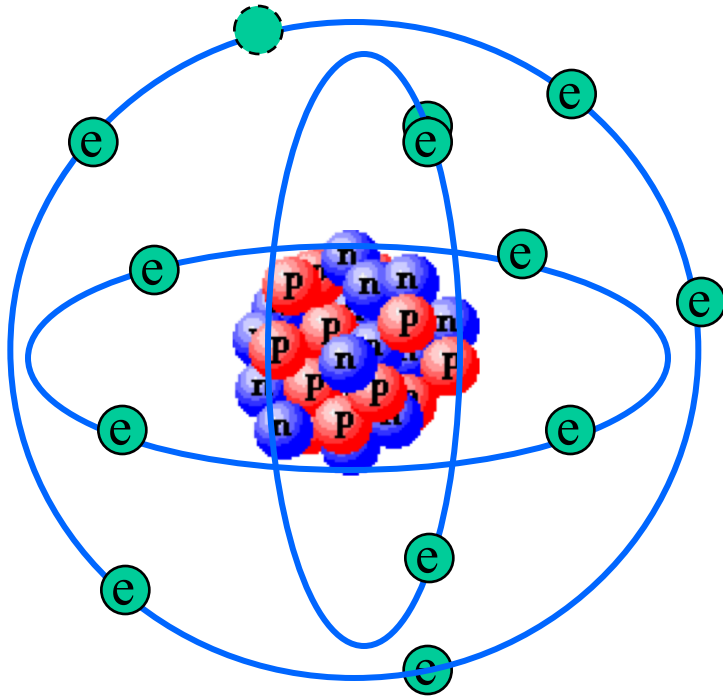
L'assorbimento di energia, attraverso i processi fisici di eccitazione e ionizzazione delle molecole dei tessuti viventi, può interferire con i processi biologici e può pertanto danneggiare il corpo umano è

Radiazioni

Direttamente ionizzanti

Indirettamente ionizzanti

La struttura dell'atomo secondo Rutherford



L' atomo viene simbolicamente rappresentato con $\overset{A}{X}_Z$

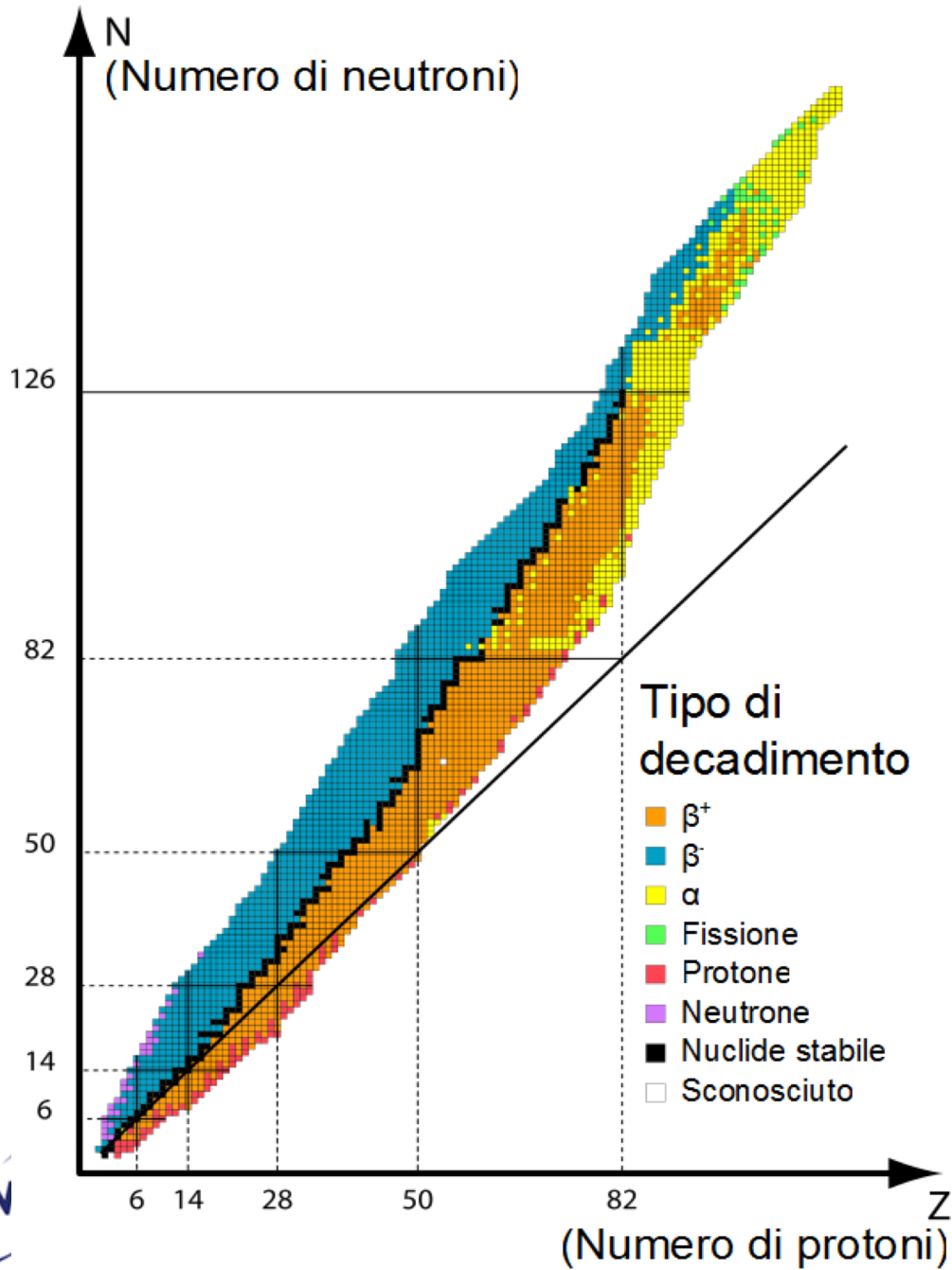
X = Specie fisica

A = Numero di massa = Numero di nucleoni

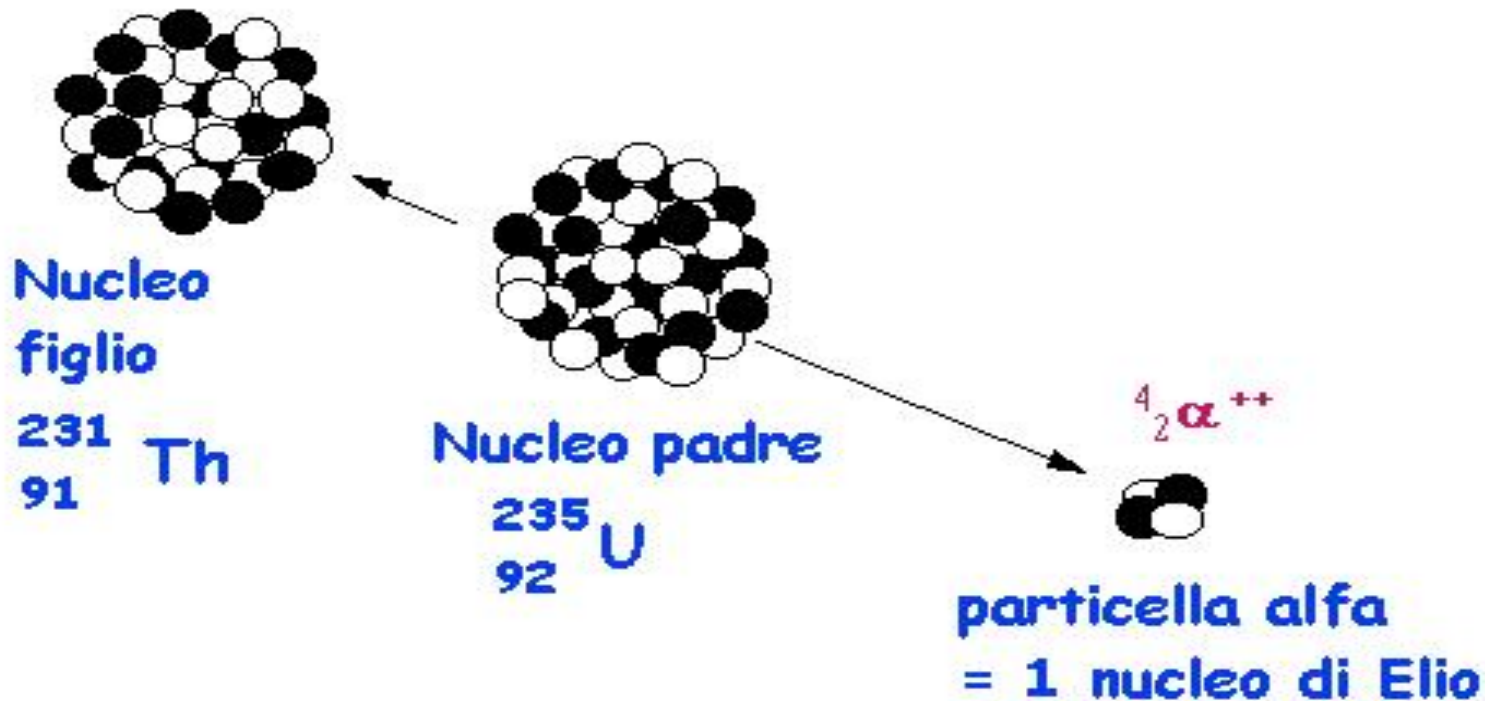
Z = Numero di protoni

A - Z = Numero di neutroni

Il diagramma dei nuclidi



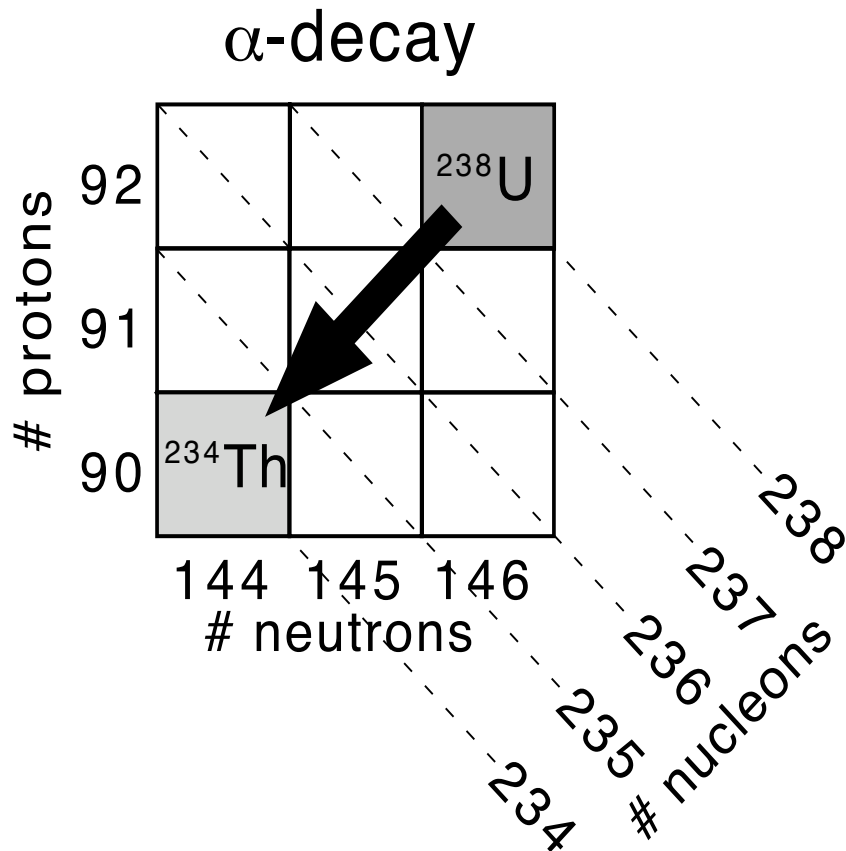
Il decadimento alfa



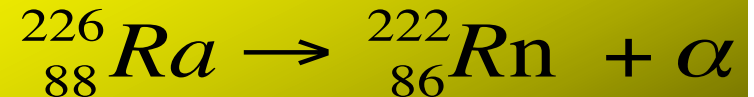
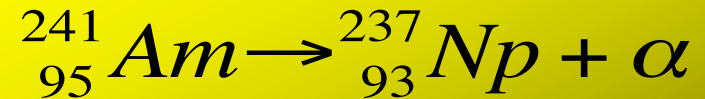
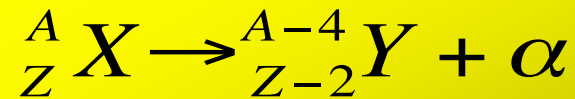
Le PARTICELLE ALFA sono formate da due protoni e due neutroni (un nucleo di elio)

Sono emesse da nuclei pesanti (come l'Uranio) con energia compresa tra 4 e 8 MeV.

Il decadimento alfa



Decadono in modalità alfa i nuclei più pesanti del ^{209}Bi con rapporto n/Z lungo la curva di stabilità.



La radiazione alfa

Essendo dotate di carica elettrica, le particelle alfa interagiscono DIRETTAMENTE con la materia:

Cedono energia al mezzo attraversato ionizzandone gli atomi e le molecole.

L'elevata massa (circa 8000 masse elettroniche) fa sì che il loro percorso sia rettilineo.

Il percorso (range) di una particella alfa è di qualche cm in aria e di qualche mm in tessuto.

La radiazione alfa

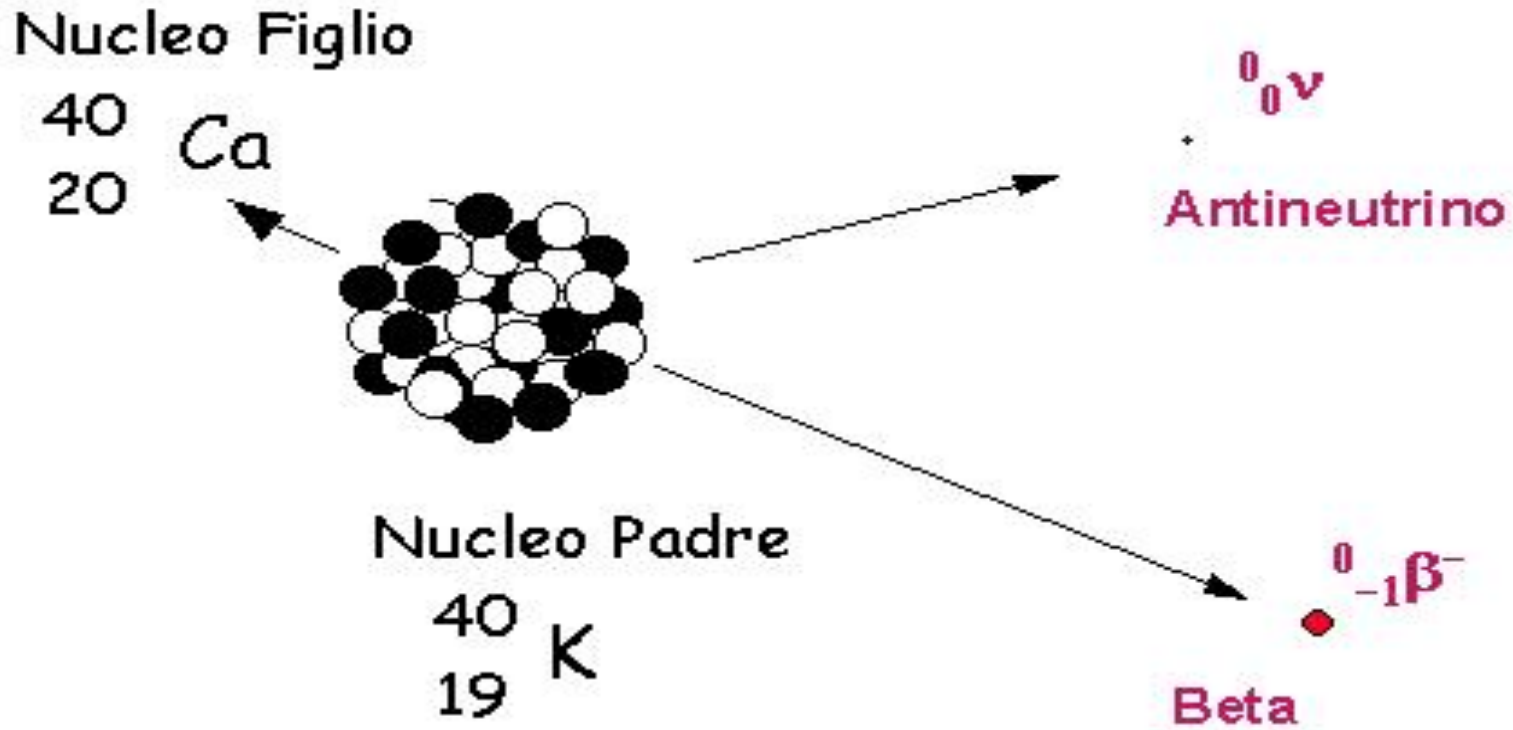
Le PARTICELLE ALFA da sorgenti esterne al corpo NON possono penetrare lo strato corneo della pelle, ma sorgenti interne al corpo producono un notevole danno biologico.

Per questo i composti alfa emettitori sono fortemente radiotossici.

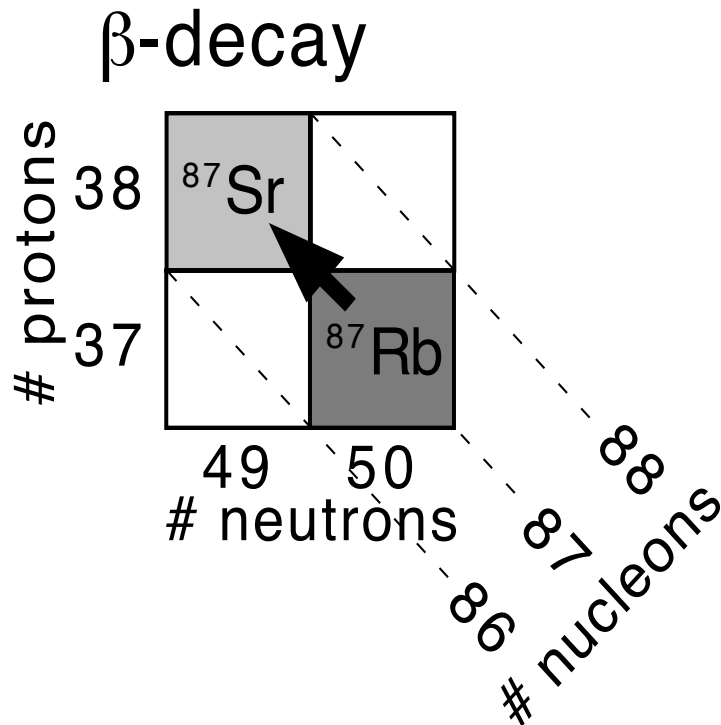
La manipolazione di sorgenti alfa non sigillate è un'operazione ad elevato rischio (inalazione, ingestione, ferita), da effettuare sotto cappa in zona sorvegliata o controllata.

L'inalazione di Radon-222 comporta l'esposizione del tratto respiratorio alle radiazioni alfa del Rn e della progenie.

Il decadimento beta



Il decadimento beta⁻

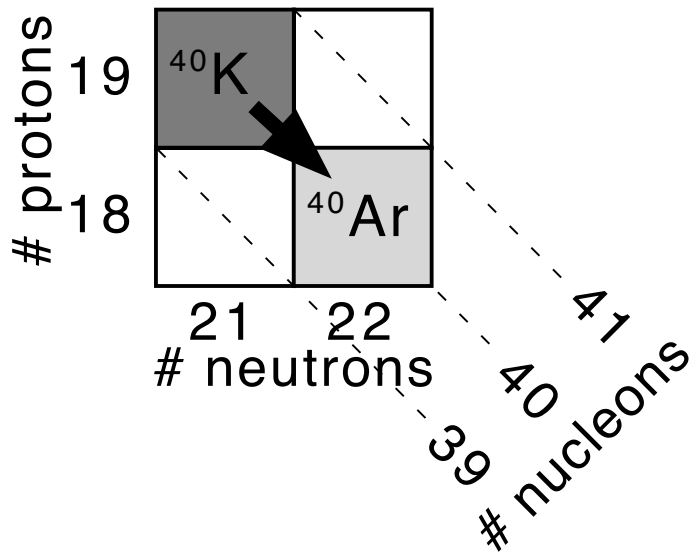


Decadono in modalità β^- i nuclei con un eccesso di neutroni



Il decadimento beta⁺

Electron Capture



Decadono in modalità β^+ o per cattura elettronica quei nuclei che presentano un eccesso di protoni.

La radiazione beta

Le PARTICELLE BETA hanno massa pari ad una massa elettronica ($9.11E-31$ kg) e carica +1 (beta +, positroni) oppure -1 (beta -, elettroni).

Sono emettitori β^- : Trizio (${}^3\text{H}_1$), Fosforo-32 (${}^{32}\text{P}_{15}$), Zolfo-35 (${}^{35}\text{P}_{16}$), Carbonio-14 (${}^{14}\text{C}_6$), Stronzio-90 (${}^{90}\text{Sr}_{38}$) e gran parte dei prodotti di attivazione e dei frammenti di fissione.

La radiazione beta

Le particelle β , essendo dotate di carica elettrica, \square sono direttamente ionizzanti.

Il loro percorso in un mezzo è estremamente frastagliato (a zig-zag) a causa delle innumerevoli diffusioni (rimbalzi) con gli elettroni orbitali degli atomi del mezzo.

Sono molto più penetranti delle particelle α ma possono essere fermati da sottili strati di materiali (es mm - cm di plastica, mm di metallo).

I beta da sorgenti esterne al corpo (Energia > 70 keV) possono essere importanti per la dose alla pelle.

L'introduzione nel corpo di materiali β -emettitori può essere pericolosa ma molto meno di quella degli α -emettitori.

La radiazione gamma

I raggi X e γ sono radiazioni elettromagnetiche simili alla luce e alle onde ma di lunghezza d'onda più corta.

I raggi X e γ sono molto più penetranti dei raggi α e β . Soltanto materiali ad alta densità quali il piombo sono in grado di fermarli.

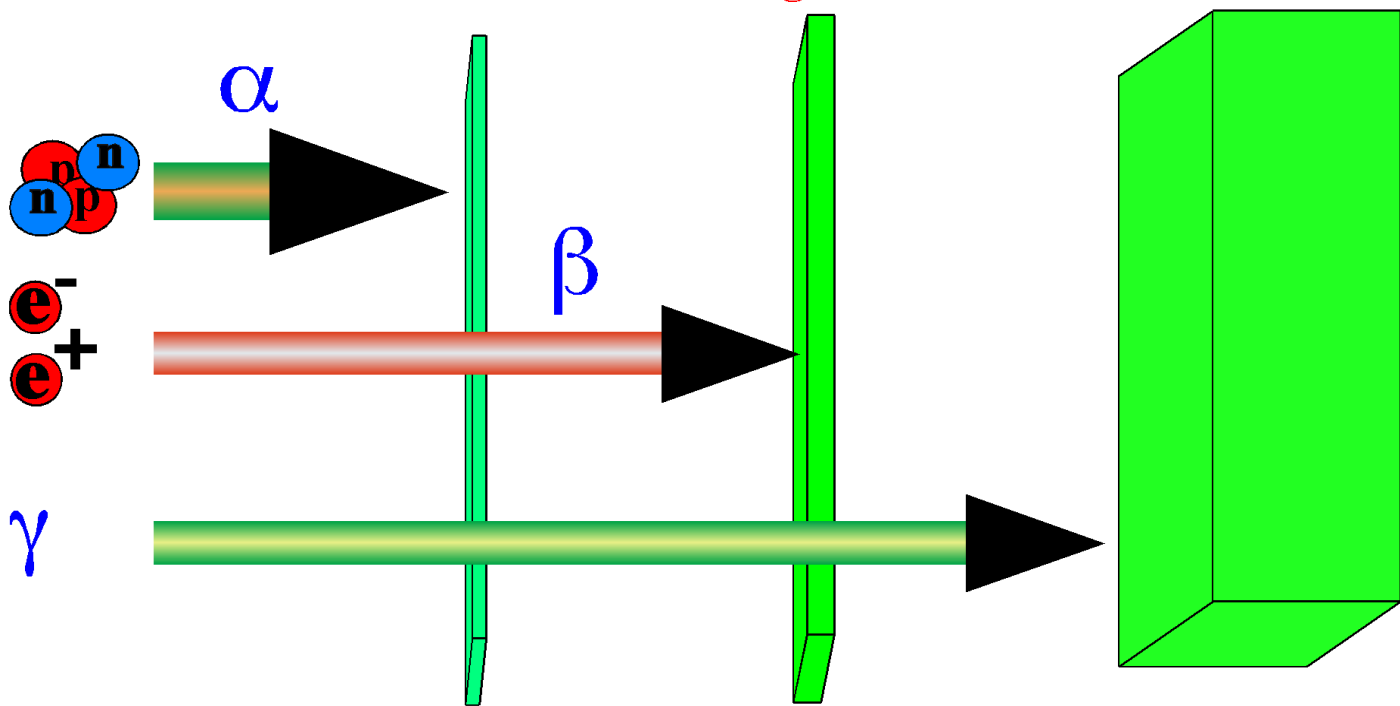
La pericolosità dei raggi X e γ , specialmente nel caso di irraggiamento esterno, è strettamente connessa con l'elevata capacità di penetrazione che essi hanno nei vari materiali, tessuti viventi compresi.

La radiazione γ accompagna quasi sempre il decadimento beta (attivazione dei materiali).

ATTENUAZIONE DELLE RADIAZIONI

Spessori di materiale attraversato dalle radiazioni alfa , beta e gamma

Sottili fogli di metallo



Fogli di carta

Grandi spessori di metallo

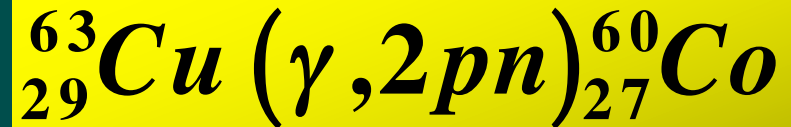
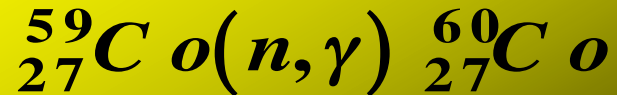
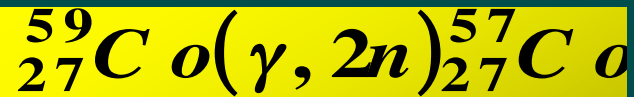
Grandi spessori di calcestruzzo

La radiazione neutronica

I neutroni sono particelle neutre cioè senza carica elettrica; sono molto penetranti, non ionizzano direttamente ma la loro interazione con la materia può generare particelle α , β , γ che a loro volta producono ionizzazione. I neutroni sono fermati da materiali leggeri quali acqua, paraffina, polietilene, e calcestruzzo in spessori più o meno grandi.

Piu' sono idrogenati i materiali e maggiore è il loro grado di assorbimento dei neutroni

I prodotti di attivazione



ATTENUAZIONE DELLE RADIAZIONI

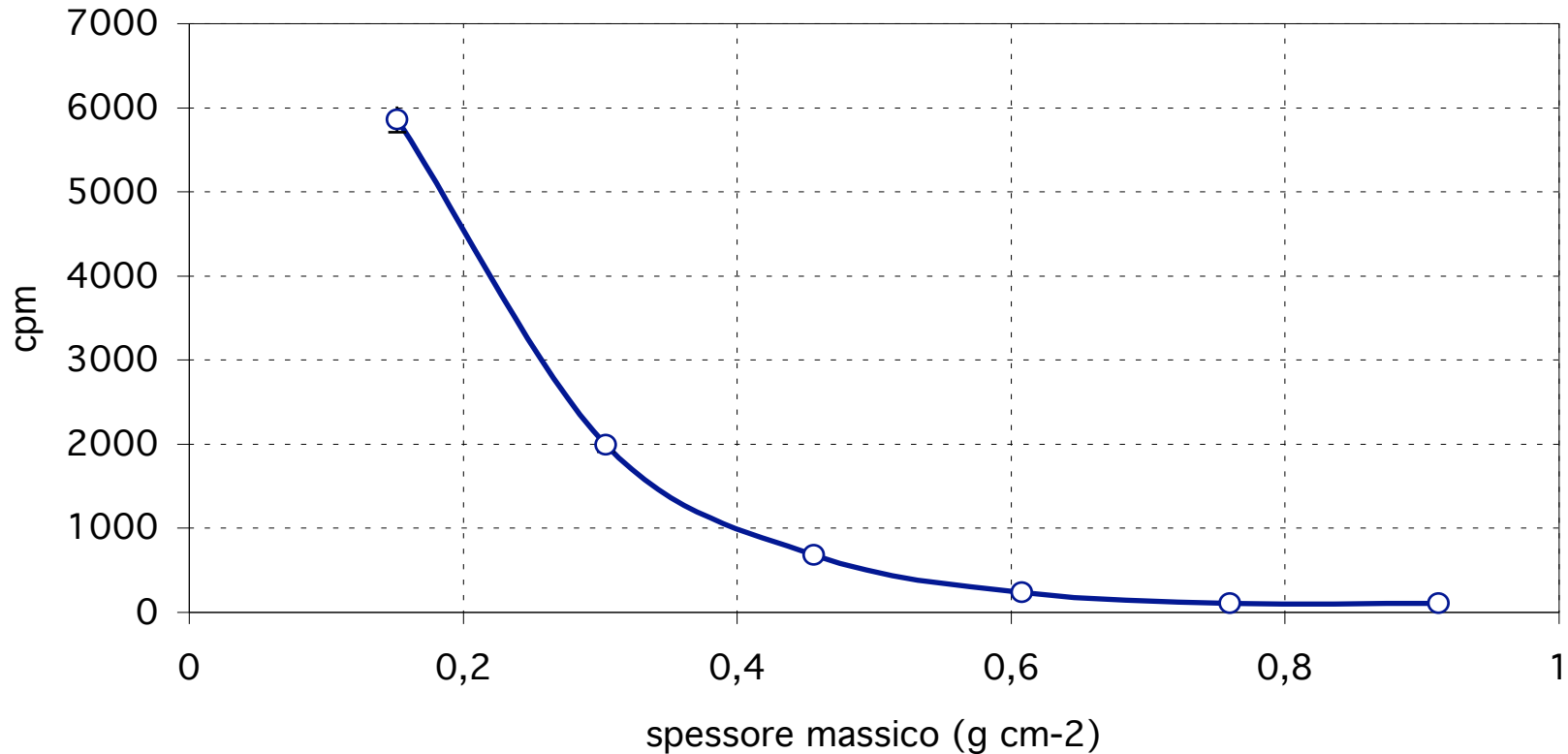
La attenuazione delle radiazioni, ovvero la loro schermatura mediante materiali di tipo e spessore idonei, è uno dei TRE elementi della radioprotezione contro sorgenti ESTERNE al corpo:

SCHERMATURA

TEMPO

DISTANZA

Attenuazione dei β



Attenuazione di una sorgente di $^{90}\text{Sr}+\text{Y}$ con diversi spessori di plastica da 1,5 mm.

Attenuazione dei β

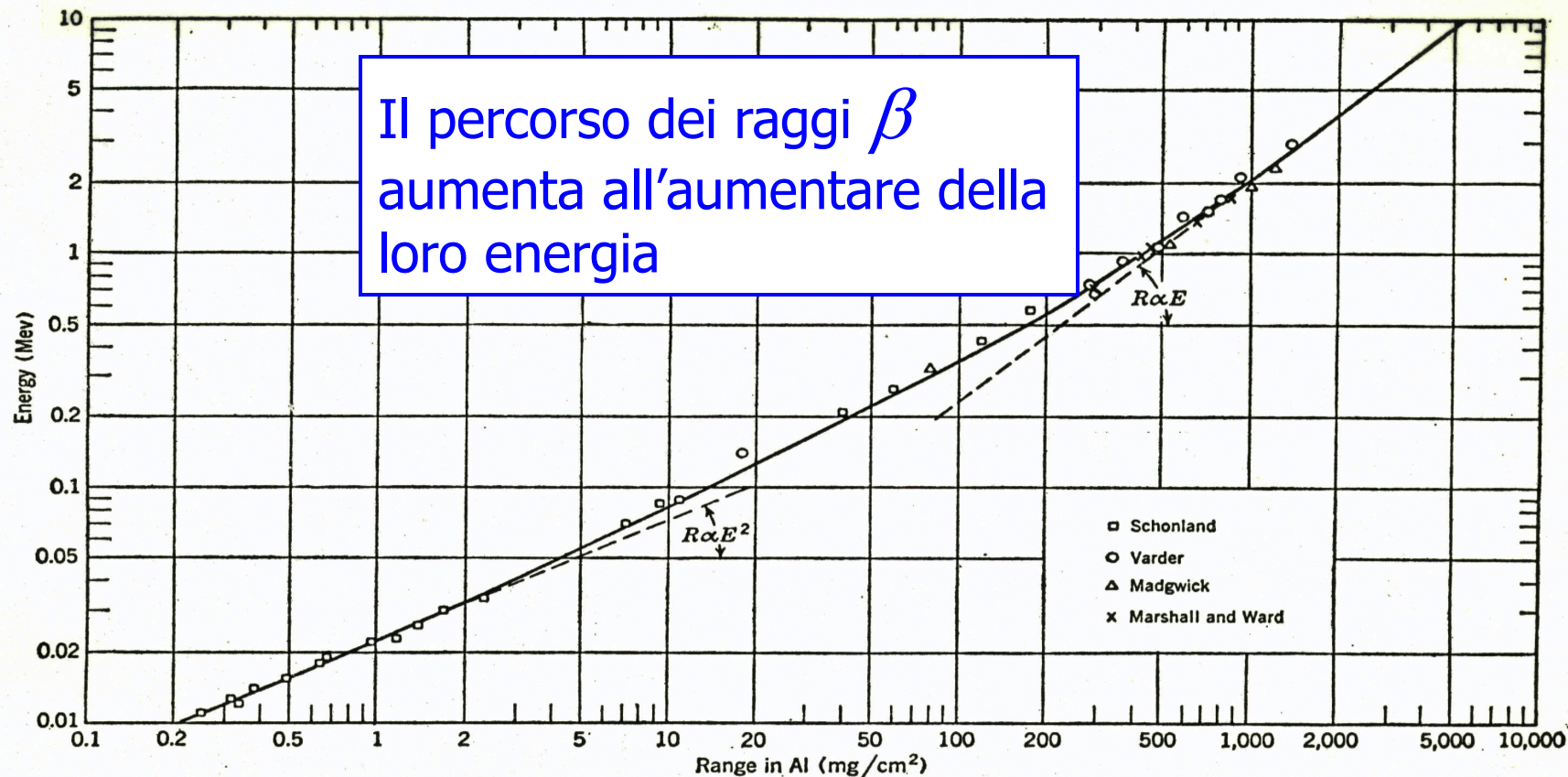
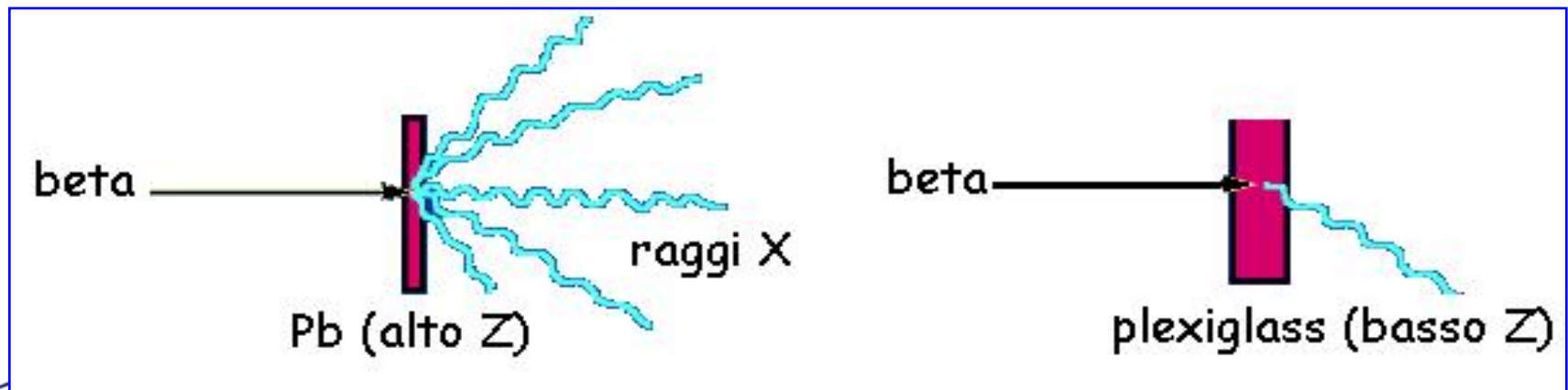


Fig. 3.3 Empirical range-energy relationship for electrons absorbed in aluminum. Experimental values by several observers (S16, V4, M4, M17) on monoenergetic electrons are shown. For monoenergetic electrons, the range coordinate refers to the extrapolated range R_0 of Fig. 3.2. For continuous β -ray spectra the energy coordinate refers to the end-point energy E_{max} , and the range coordinate becomes the maximum range R_m of Fig. 3.4. The smooth curve represents the empirical relationship, Eqs. (3.3) and (3.4), developed by Katz and Penfold (K7).

La Radiazione di Frenamento (*bremsstrahlung*)

- La perdita di energia per collisioni non è l'unico fenomeno che sottrae energia agli elettroni in un mezzo.
- La rimanente parte di energia viene trasformata in radiazione fotonica (X), con energia da zero fino all'energia iniziale degli elettroni (*bremsstrahlung*).
- L'importanza di questo fenomeno aumenta all'aumentare dello Z dell'assorbitore e dell'energia degli elettroni (tubi a raggi X).



La *bremsstrahlung*

- La *bremsstrahlung* "converte" una radiazione poco penetrante (elettroni) in una fortemente penetrante (fotoni).

- La schermatura di sorgenti beta deve essere fatta minimizzando questo processo. Pertanto i beta vanno schermati con materiali a basso numero atomico, ad esempio plastici.

- **Frazione di energia convertita in raggi X**

Sr-90 (0.8 MeV) con Pb (Z=82) f = 10%

Sr-90 (0.8 MeV) con plastica (Z=7) f = 0,6%

La radiazione X e γ

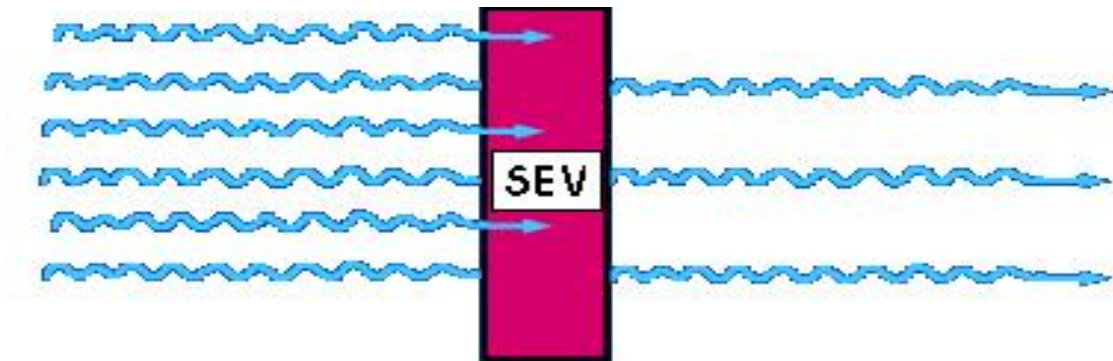
- La radiazione fotonica è **INDIRETTAMENTE IONIZZANTE**, cioè produce ionizzazione nel mezzo tramite i secondari carichi (elettroni) che mette in moto. Il tipo di materiale e lo spessore delle schermature vengono scelti in funzione dell'energia.
- **Tube RX da 100 kV: Uno schermo di cemento è spesso 80 volte e pesante 17 volte rispetto all'equivalente in Pb.**
- **1 MV: ...spesso 6 volte e pesante 1,25 volte rispetto all'equivalente in Pb (molto più economico).**

Pb \Rightarrow < 300 kV

Cemento, terra.... \Rightarrow > 300 kV

Spessore decivalente (SDV)

E' lo spessore necessario per ridurre la dose al 10%



Nota: Per ridurre l'intensità al 1% servono 2 SDV (il 10% del 10% è l' 1%).

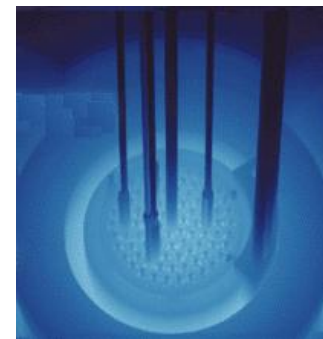
$$I(x) = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} x}$$

Sorgente	E	SDV _{Pb} (cm)	SDV _{cemento} (cm)
Tubo RX	75 kV	0.05	1.3
Tubo RX	100 kV	0.08	5.5
Tubo Rx	250 kV	0.29	9.0
Au-198	411 keV	3.6	13.5
Cs-137	662 keV	2.2	16.3
Linac	1000 kV	2.52	15
Co-60	1,25 MeV	4.0	20.3
Linac	10 MV	6	38
Accel.	100 MV	-	50

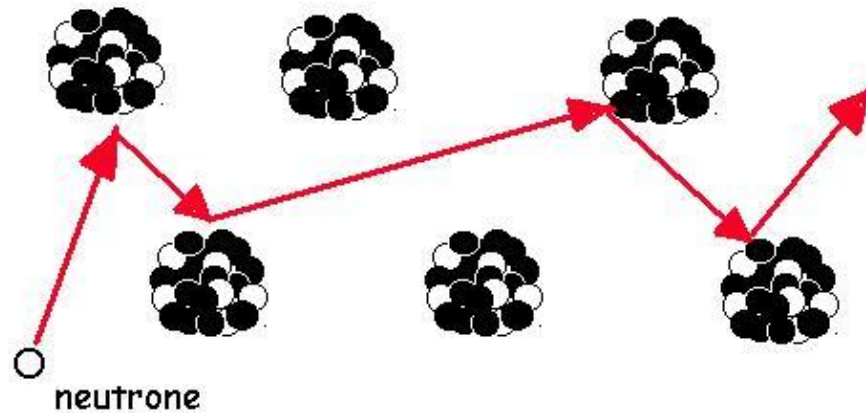
La radiazione neutronica

I NEUTRONI sono particelle prive di carica elettrica e dotate di massa. Interagiscono in modo ELASTICO o INELASTICO, con i NUCLEI del mezzo attraversato. L'assenza di carica li rende infatti insensibili ai campi elettromagnetici degli elettroni orbitali. I neutroni sono prodotti da:

**Fissione e fusione nucleare,
sorgenti radionuclidiche ($^{241}\text{Am-Be}$, ^{252}Cf),
Interazione con la materia di elettroni
e gamma di alta energia ($> 10 \text{ MeV}$)**



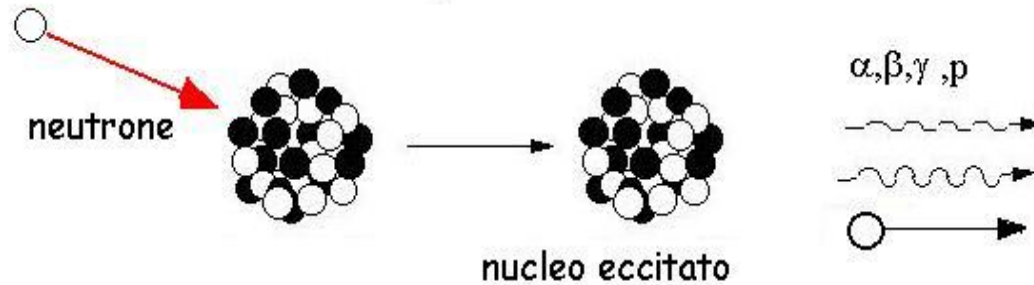
Attenuazione dei neutroni



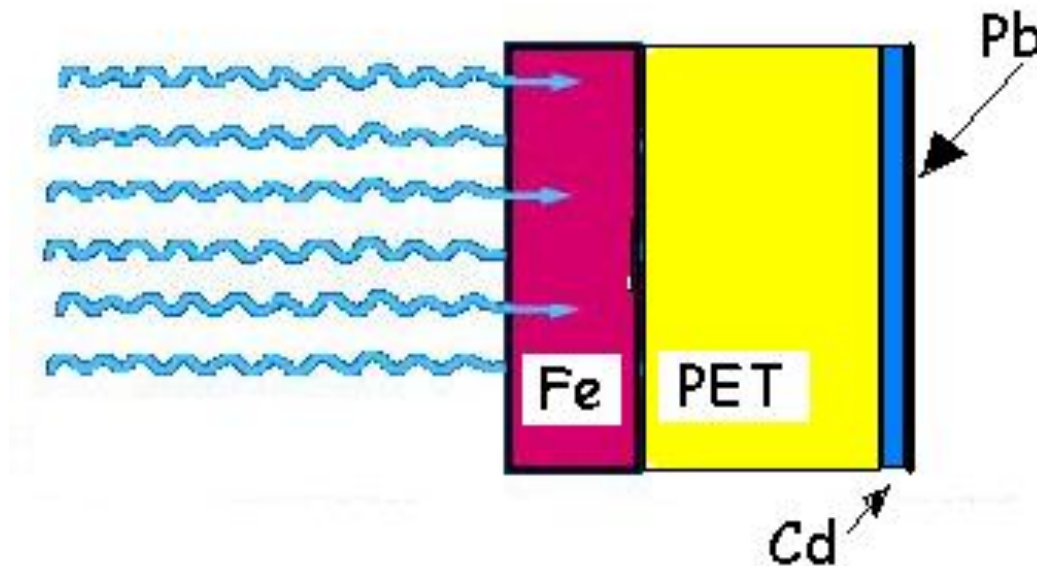
Energia trasferita in media da un urto:
37%(H)
14%(C)
3% (Fe)

Materiali idrogenati

Cattura nucleare



Attenuazione dei neutroni



Esempio di schermatura per una sorgente di $^{241}\text{Am-Be}$ (E media 4.16 MeV).

Attività (A)

Rappresenta il numero di disintegrazioni nell'unità di tempo.

1 Bq = 1 disintegrazione al secondo

unità di misura S.I. = becquerel (Bq)

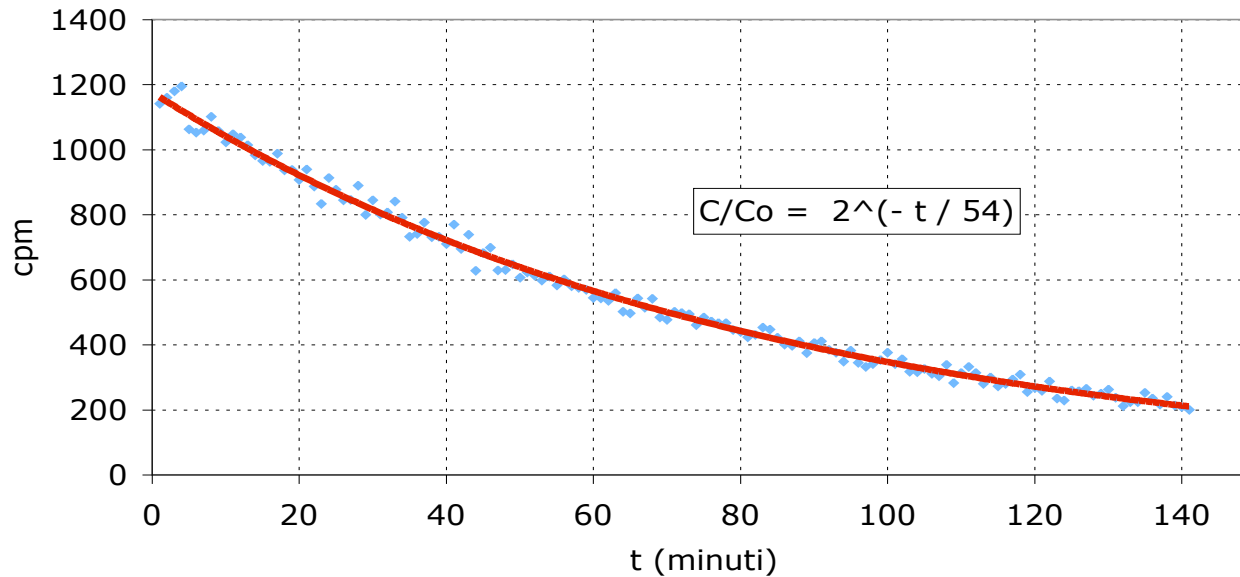
Legge del decadimento radioattivo

La attività di un radionuclide diminuisce nel tempo, in quanto ogni decadimento sottrae un nucleo alla specie "padre".

Siccome il numero di disintegrazioni al secondo (A) è proporzionale al numero di nuclei non ancora disintegrati, la legge sarà di tipo **esponenziale**.

Ogni radionuclide è caratterizzato da un "**tempo di dimezzamento**" (da frazioni infinitesime di secondo a miliardi di anni).

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t}$$



Una lamina di Indio è stata attivata e misurata ad intervalli di un minuto per circa 2 ore. Dalla curva di decadimento si calcola il tempo di dimezzamento dell'isotopo prodotto (^{116}In).

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t}$$

H-3	12.34 anni
C-14	5730 anni
Co-60	5,27 anni
Cs-137	30 anni
Sr-90	28.15 anni
U-238	4470000000 anni

Esempi:

Il Co-60, in 1 mese, si riduce del 1%. Infatti, 5.27 sono circa 1925 giorni se sostituiamo troviamo 0.01

Dopo 10 tempi di dimezzamento, l'attività si riduce a 0,1%.