

I fondamenti fisici delle radiazioni ionizzanti ovvero Aspetti fisici della protezione dalle radiazioni

Oggi si parlerà di radioprotezione. Sentirete come ci dobbiamo proteggere e perché. Io vi darò alcuni cenni su quello da cui dobbiamo proteggerci.

- ✓ Le radiazioni
- ✓ Le sorgenti di radiazioni
- ✓ I costituenti della materia
- ✓ I decadimenti radioattivi e l'interazione delle radiazioni con la materia

Le radiazioni

Con il termine ‘radiazioni’ ci riferiamo, in generale, a tutte le specie alle quali è associato un trasporto di energia. Se al trasporto di energia è associato anche un trasporto di massa parleremo di **radiazioni corpuscolate**. Di particolare importanza per la nostra discussione sono le modalità (e le conseguenze) della cessione di tale energia alla materia. Noi ci limiteremo a considerare una particolare modalità e parleremo delle sole **radiazioni ionizzanti**. Vedremo cosa sono e perché si chiamano così.

L'uomo è da sempre immerso in un fondo naturale di radiazioni

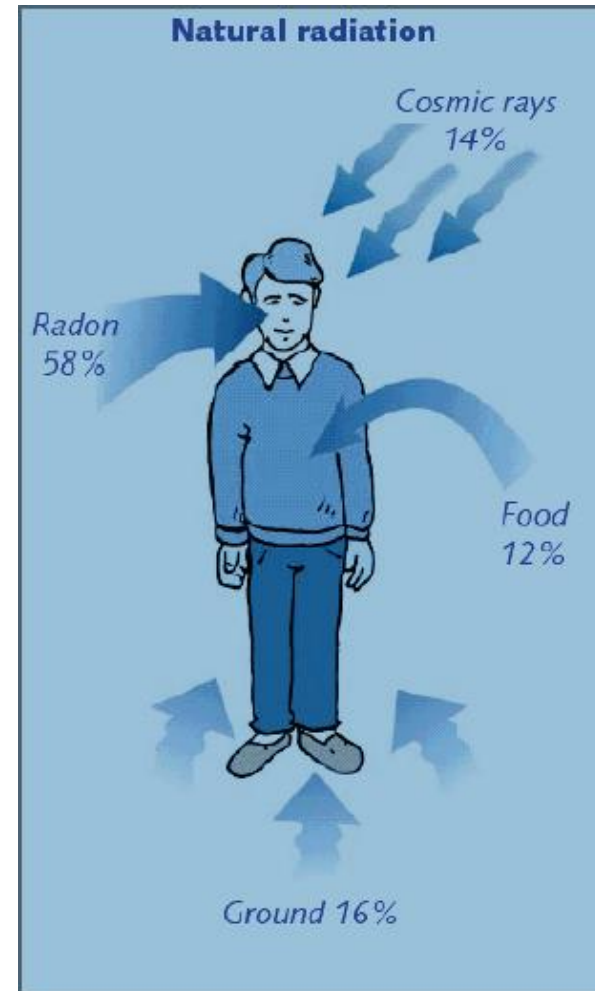
- Raggi cosmici
- Sorgenti radioattive naturali

Il fondo naturale dipende molto da dove si vive e può variare anche di un fattore 3-3.5 tra le diverse località. Inoltre, il contributo dei raggi cosmici è fortemente dipendente dall'altitudine (circa un fattore 150 tra livello del mare e 12000 metri)

A questo si aggiungono le sorgenti dovute alle attività umane

- Sorgenti radioattive artificiali
- Macchine radiogene (acceleratori di particelle → reazioni nucleari)

Nella maggior parte dei casi, le radiazioni hanno origine da trasformazioni del nucleo atomico



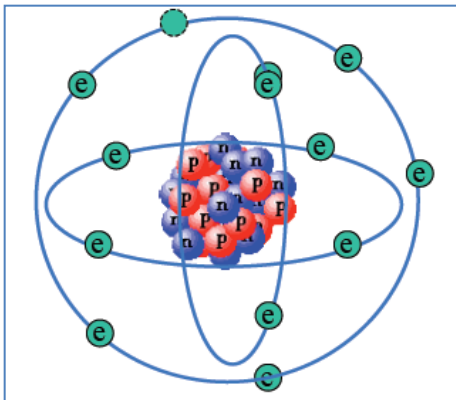
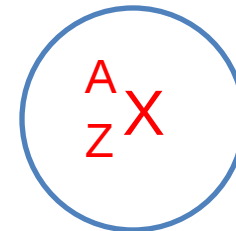
La struttura dell'atomo

Definizione: l'atomo è la più piccola parte di un elemento che ne conserva le proprietà chimiche. E' composto da un nucleo, che contiene quasi interamente la sua massa, e dagli elettroni orbitali. Il nucleo, a sua volta, si compone di protoni e neutroni (nucleoni). Gli elettroni sono particelle cariche negativamente, i protoni sono carichi positivamente e i neutroni non sono dotati di carica. La carica di un elettrone è uguale e di segno opposto rispetto a quella del protone. Il numero di elettroni è uguale al numero dei protoni → l'atomo è globalmente neutro.

Proprietà dei tre costituenti fondamentali dell'atomo			
PARTICELLA	SIMBOLO	CARICA	MASSA
protone	p	$+ 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
elettrone	e	$- 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
neutrone	n	nulla	$1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Numero atomico Z: numero di elettroni (e protoni) → definisce l'elemento (X) e le sue caratteristiche chimiche

Es.: $Z=6 \rightarrow$ Carbonio (C)



Peso atomico (numero di massa) A: numero di nucleoni → fissato Z, A identifica un particolare **isotopo** di un dato elemento. $A-Z = N$ è il numero di neutroni.

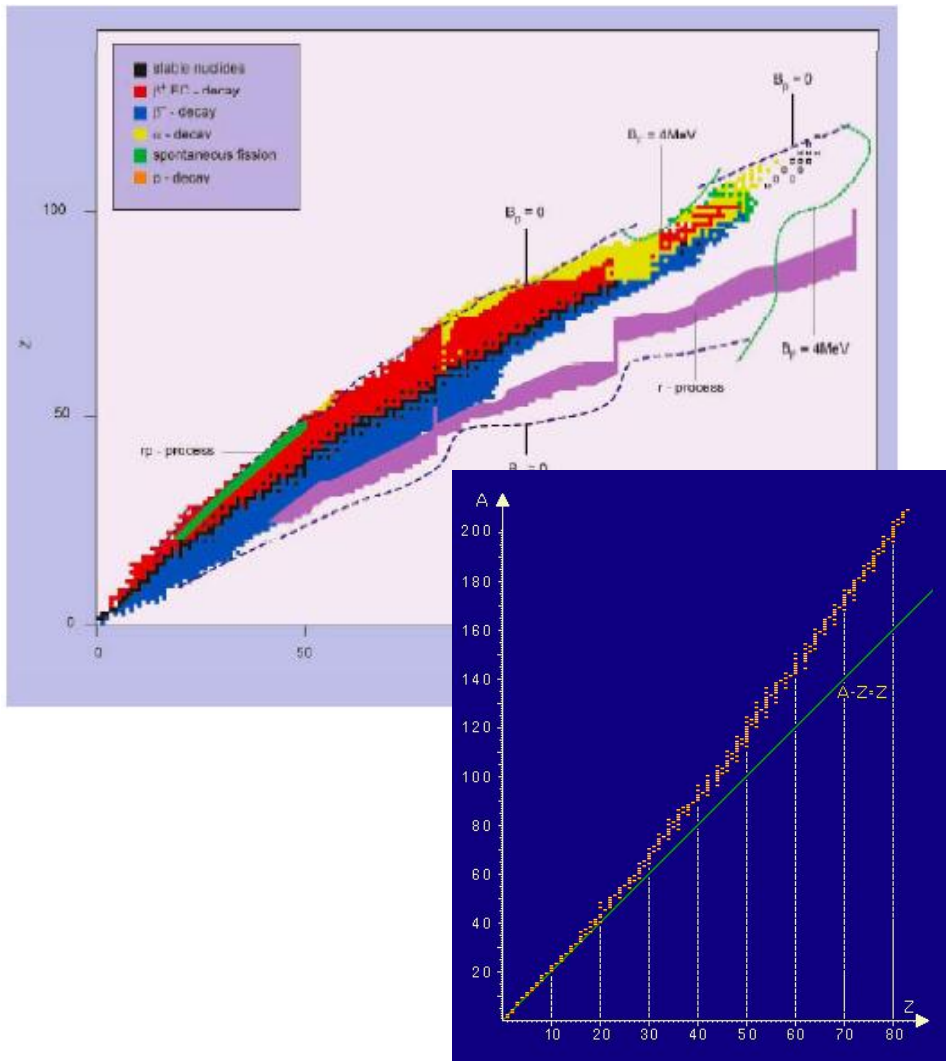
Es: il C-12 è un atomo di carbonio con 6 neutroni nel nucleo, il C-14 è un atomo di carbonio con 8 neutroni nel nucleo.

Il C-12 e il C-14 sono due isotopi del carbonio.

Stesso comportamento dal punto di vista chimico, molto diverso dal punto di vista fisico, almeno per quanto riguarda gli aspetti che discuteremo oggi

La stabilità del nucleo atomico

Il numero relativo di protoni e di neutroni determina la stabilità del nucleo. I nuclei degli elementi pesanti, per esempio, per bilanciare la repulsione coulombiana tra i protoni (tutte cariche dello stesso segno), che tenderebbe a disgregarli, hanno bisogno di un maggior numero di neutroni come ‘collante’. I nuclei leggeri, invece, hanno la configurazione di massima stabilità a $Z=N$. Il C-12 è stabile, il C-14 non lo è.



Carta dei nuclidi e valle di stabilità (in nero)

I nuclei che si trovano fuori dalla valle di stabilità si trasformano per raggiungerla nell'intento di arrivare a una configurazione per loro energeticamente più conveniente. Nel fare questo emettono ‘radiazioni’.

Questo processo è il **decadimento radioattivo**.

Alcuni nuclei radioattivi (radionuclidi) esistono in natura (per esempio, il K-40), altri sono creati artificialmente dall'uomo attraverso le reazioni nucleari, alle quali accenneremo brevemente in seguito.

Nuclide = specie nucleare caratterizzata da un dato numero di neutroni e protoni

I decadimenti radioattivi

Esistono diversi tipi di decadimento radioattivo:

$\alpha \rightarrow$ radiazione associata particella alfa

$\beta \rightarrow$ radiazione associata particella beta

$\gamma \rightarrow$ radiazione associata fotone

fissione spontanea $\rightarrow$ radiazioni associate fotoni e neutroni

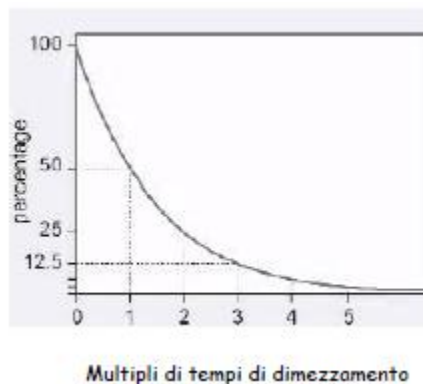
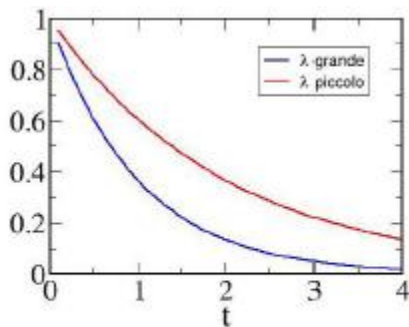
Spesso un radionuclide presenta più di un tipo di decadimento.

Quello che accomuna tutti questi processi è la **legge di decadimento**.

Ogni processo di decadimento è caratterizzato da una costante di decadimento radioattivo (λ) che rappresenta la probabilità che quel particolare processo di decadimento abbia luogo nell'unità di tempo. Da λ (sec^{-1}) si definiscono la vita media $\tau = 1/\lambda$ (sec) e il tempo di dimezzamento $t_{1/2} = 0,693\tau$ (sec), che rappresenta il tempo necessario perché l'attività di una sorgente si dimezzi.

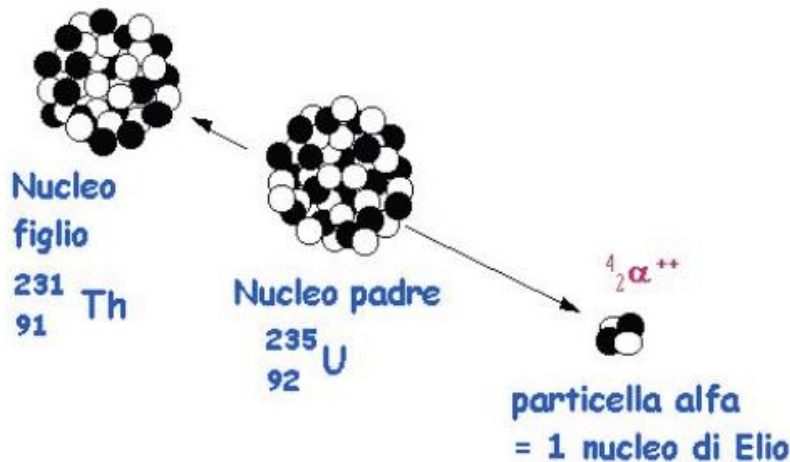
Si definisce attività di una sorgente radioattiva (al tempo t) il prodotto del numero di nuclei in essa presenti al tempo t per la costante λ

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) \quad \text{Becquerel: 1Bq=1 disintegrazione al secondo}$$

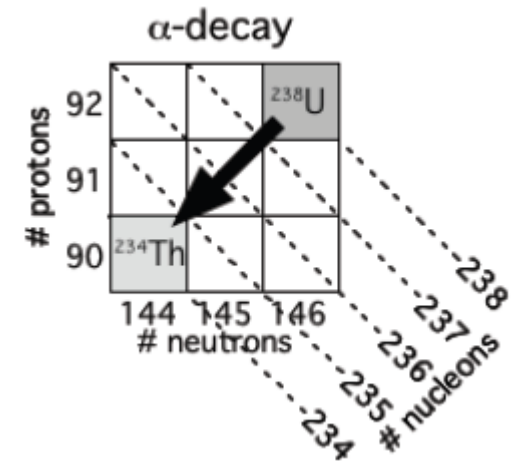


L'attività ci dice quanti nuclei della nostra sorgente decadono in un secondo e varia nel tempo seguendo una legge di tipo esponenziale decrescente.

Il decadimento alfa



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



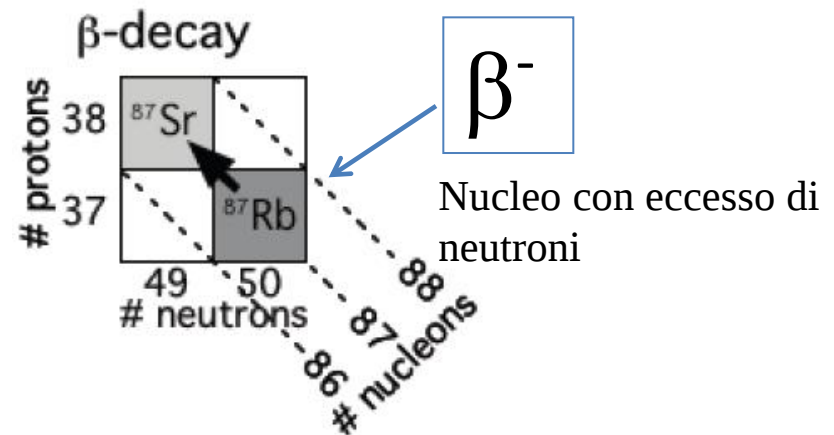
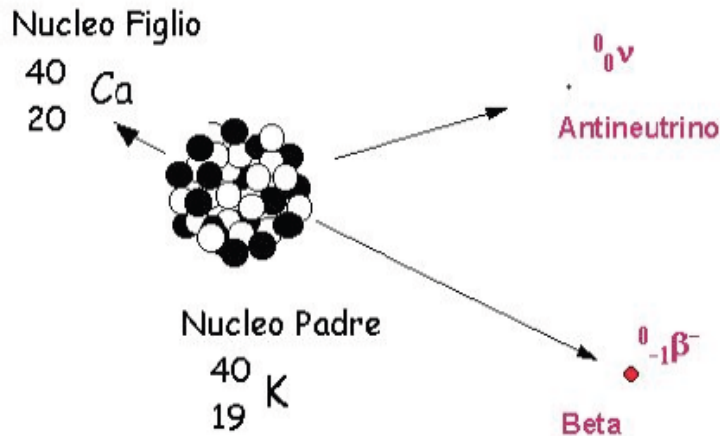
Il decadimento alfa interessa principalmente i nuclei pesanti ($Z > 82$) e deficitari in neutroni (per Z grandi la repulsione elettrostatica diventa preponderante rispetto all'azione delle forze nucleari)

In base a quanto detto all'inizio, la particella α è una radiazione corpuscolata carica

Nell'attraversare la materia le particelle α 'urtano' gli elettroni del mezzo e cedono la loro energia. Se tale energia è sufficiente, la conseguenza sarà la separazione degli elettroni dagli atomi. Tale fenomeno si chiama **ionizzazione**. Questa modalità di cessione dell'energia è tipica della particelle cariche e la particella che ne è responsabile sarà definita radiazione (direttamente) ionizzante. A causa della sua grande massa (circa 8000 volte quella dell'elettrone) la particella α cederà gradualmente la sua energia ma verrà deviata pochissimo dalla sua traiettoria originaria. Il suo percorso nella materia coincide, in media e con ottima approssimazione, con la sua massima capacità di penetrazione (Range R). R dipende dall'energia della particella (e dal mezzo) ed è, in generale, piccolo (le alfa naturali vengono arrestate in pochi centimetri d'aria e in pochi μm di tessuto biologico).

Il decadimento beta

Nel decadimento beta il nucleo dissipa la sua energia in eccesso trasformando un neutrone in un protone (β^-) o viceversa (β^+). In entrambi i casi il numero di massa (A) resta costante.



Le PARTICELLE β hanno massa pari ad una massa elettronica ($9.11\text{E}-31$ kg) e carica $+1$ (β^+ , positroni) oppure -1 (β^- , elettroni).

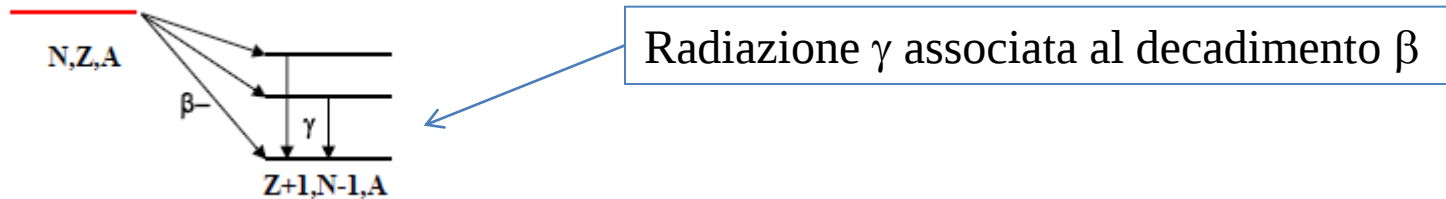
decadimento β^- : avviene per quei nuclei in cui vi è un eccesso di neutroni

decadimento β^+ : avviene per quei nuclei in cui vi è un eccesso di protoni

Come le alfa, anche i β sono particelle direttamente ionizzanti, ma a causa della piccola massa subiscono numerose deflessioni e, quindi, il loro percorso nel mezzo è molto più frastagliato. Anche nel caso dei β si può definire un range (cioè tutti i β di una data energia vengono completamente arrestati in un certo spessore di un dato materiale), ma il loro percorso effettivo è più grande. Il tutto è ulteriormente complicato dal fatto che i β non sono monoenergetici. I β sono molto più penetranti delle particelle alfa, ma pochi millimetri di metallo sono comunque sufficienti ad arrestare anche i più energetici.

Il decadimento gamma

Il decadimento gamma non comporta alcuna variazione nel numero di neutroni e protoni del nucleo: è associato ad una ‘riorganizzazione’ del nucleo stesso, in seguito alla quale esso emette la sua energia in eccesso sotto forma di radiazione elettromagnetica (raggi γ). Molto spesso questa situazione si verifica a seguito di un decadimento α o β

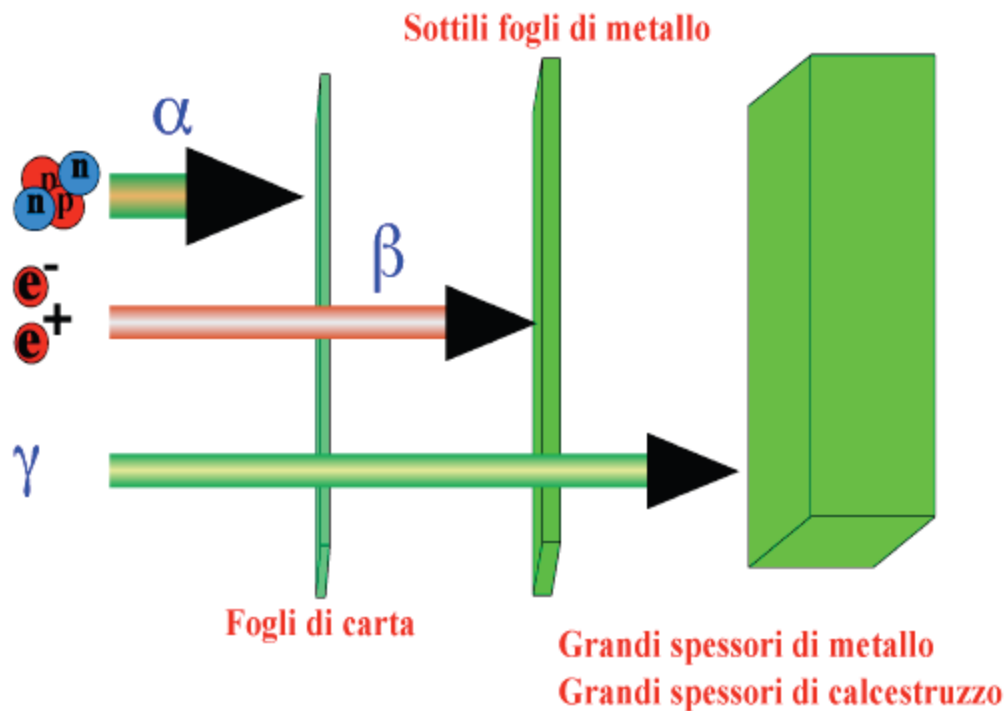


I raggi γ sono simili alla luce, alle onde radio, etc. ma hanno lunghezza d'onda minore e, conseguentemente, energia maggiore. I fotoni non hanno né carica né massa e la loro modalità di interazione con la materia è diversa da α e β . Essi trasferiscono la loro energia al mezzo in processi (effetto fotoelettrico, effetto Compton e creazione di coppie) il cui risultato è la messa in moto di secondari carichi (elettroni e positroni), che poi, a loro volta ionizzeranno il mezzo. Per questo sono detti radiazioni indirettamente ionizzanti. L'interazione dei raggi γ è di tipo statistico: il processo di ‘liberazione’ dei secondari carichi, che dà inizio all'effettiva cessione di energia, anche per energia del fotone fissata, può avvenire a qualsiasi profondità nel mezzo. La conseguenza è che l'attenuazione di un fascio di fotoni è di tipo esponenziale: anche per spessori infinitamente grandi esiste, in teoria, una probabilità diversa da zero che il fotone non venga assorbito. I raggi γ sono radiazioni molto penetranti.

Per riassumere

ATTENUAZIONE DELLE RADIAZIONI

Spessori di materiale attraversato dalle radiazioni alfa , beta e gamma



A proposito dei β , però.....

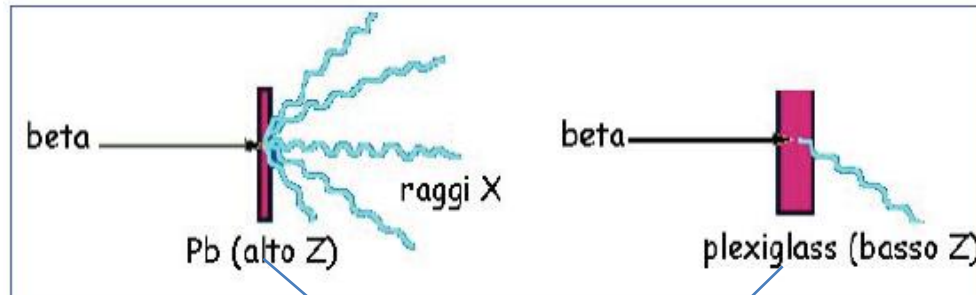
Un cenno alla radiazione di frenamento (bremsstrahlung)

La perdita di energia per collisioni con gli elettroni atomici non è il solo fenomeno che sottrae energia agli elettroni in un mezzo. Parte dell'energia può essere irradiata sotto forma di radiazione elettromagnetica (fotoni) → radiazione di frenamento.

Questo fenomeno è tanto più importante quanto più alto è il numero atomico Z dell'assorbitore e quanto più gli elettroni sono energetici.

I fotoni così generati sono più penetranti degli elettroni che li hanno prodotti:

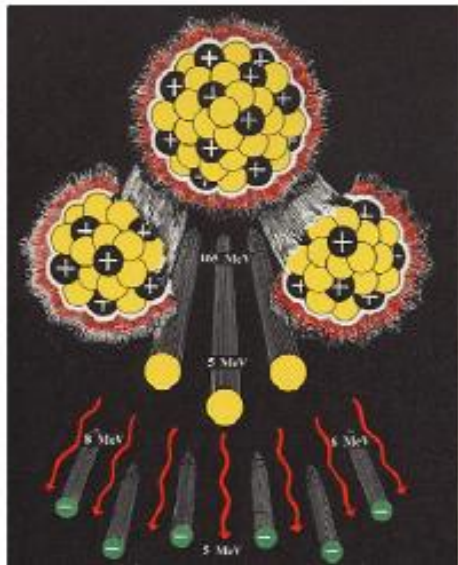
il bremsstrahlung converte una radiazione 'poco' penetrante in una 'molto' penetrante



Se spessori pari al range dell'elettrone → elettroni no, fotoni sì
Molto importante la scelta del materiale.....

La fissione e la radiazione neutronica

Nell'elencare i decadimenti ho citato anche la fissione spontanea, processo raro che interessa solo nuclei molto pesanti (per esempio il Californio- 252). Il processo consiste nella scissione di un nucleo in due nuclei più leggeri (frammenti di fissione). Tra i vari prodotti attraverso i quali viene liberata l'energia in eccesso troviamo un altro tipo di radiazione: la radiazione neutronica (neutroni). I neutroni sono, come abbiamo già visto, particelle prive di carica (neutre) e dotate di massa.

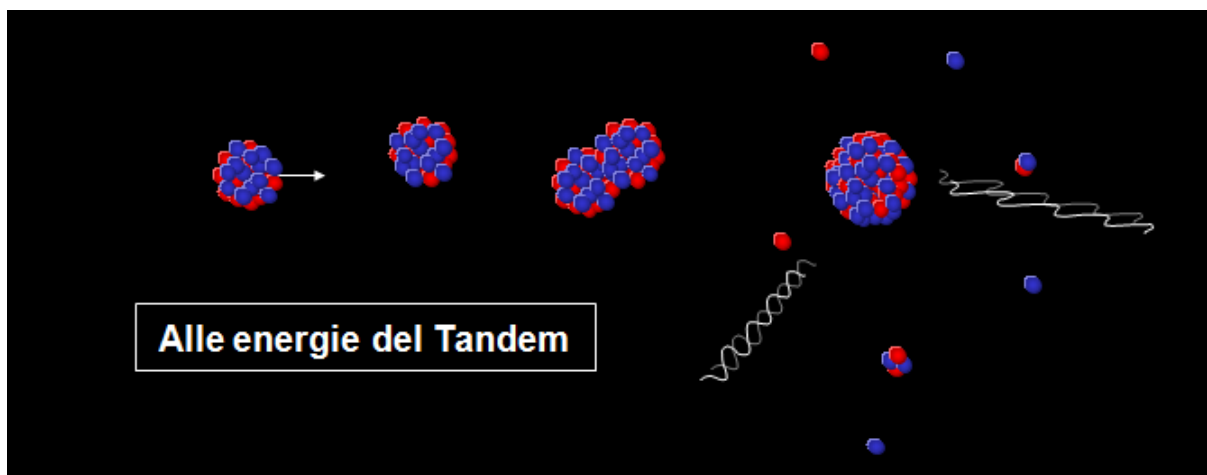


Non avendo carica elettrica, essi non sentono l'effetto della nube elettronica e neppure del campo coulombiano del nucleo: la loro interazione con la materia è totalmente 'nucleare', qualunque sia la loro energia. Cioè il neutrone interagisce con la materia (e trasferisce ad essa la sua energia) solo tramite 'reazioni' nucleari. Se i prodotti di queste reazioni sono delle particelle cariche (secondari carichi), esse inizieranno a impartire energia al mezzo. Quindi anche il neutrone è una radiazione (corpuscolata) indirettamente ionizzante. Il 'tipo' di reazione più probabile dipende dalla energia e dal mezzo attraversato (urto elastico, urto anelastico, cattura...). I piccoli valori delle probabilità associate a questi processi rendono, in generale, il neutrone molto penetrante.

Anche per i neutroni, come per i γ , quindi, siamo di fronte a dei processi di tipo statistico che fanno sì che le 'storie' dei singoli neutroni in un fascio, anche a parità di energia iniziale, possano differire tra loro in maniera sensibile. Il risultato, anche in questo caso, è che l'attenuazione si può assimilare ad un esponenziale (anche per spessori infinitamente grandi esiste, in teoria, una probabilità diversa da zero che il neutrone non venga assorbito).

Gli acceleratori dei LNS → le reazioni nucleari

Abbiamo visto come i decadimenti radioattivi costituiscano una sorgente di radiazioni. Presso i LNS sono in esercizio due acceleratori di particelle, che potenzialmente sono anch'essi sorgenti di radiazioni. Per concludere, vediamo brevemente da cosa derivano queste radiazioni e cosa viene prodotto. Gli esperimenti di fisica nucleare hanno come scopo lo studio del nucleo atomico e presso i nostri laboratori questo tipo di studi si conduce facendo collidere tra loro due nuclei e generando una reazione nucleare. Come risultato della reazione nucleare si formeranno, in generale, dei nuclei diversi da quelli iniziali e l'eccesso di energia depositato nel sistema dalla particella incidente potrà essere emesso sotto forma di radiazioni.



Esempio: la reazione di formazione di un nucleo composto. Le eventuali particelle cariche emesse, per quanto detto prima, vengono tutte arrestate dai materiali circostanti, ma neutroni e gamma possono sfuggire e creare un campo di radiazioni.

Nel caso dei nostri acceleratori il campo di radiazioni più rilevante è quello neutronico. I campi così generati svaniscono appena termina l'erogazione del fascio.

I nuovi nuclei che si formano nella reazione o a causa della interazione dei prodotti di reazione (principalmente neutroni) con i materiali circostanti possono, però, essere radioattivi e, a volte, avere anche una vita media abbastanza lunga. Avremo creato delle sorgenti radioattive artificiali. Questo processo di 'attivazione' è responsabile della presenza di radiazioni anche dopo l'arresto del fascio.