

M. Marengo

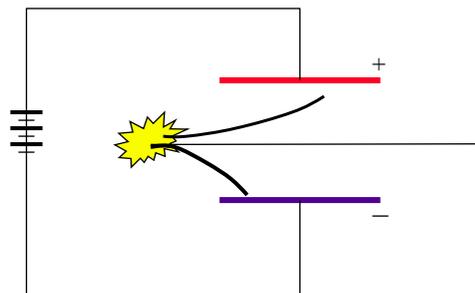
LA RADIOATTIVITA'

*Servizio di Fisica Sanitaria
Ospedale Policlinico S.Orsola - Malpighi, Bologna*

mario.marengo@unibo.it

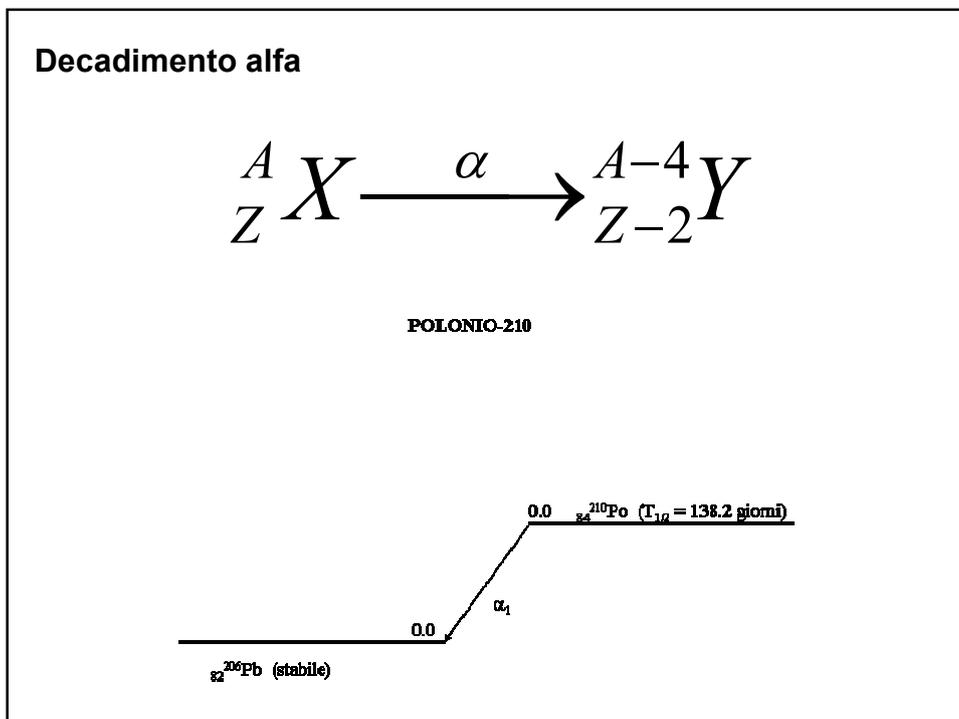
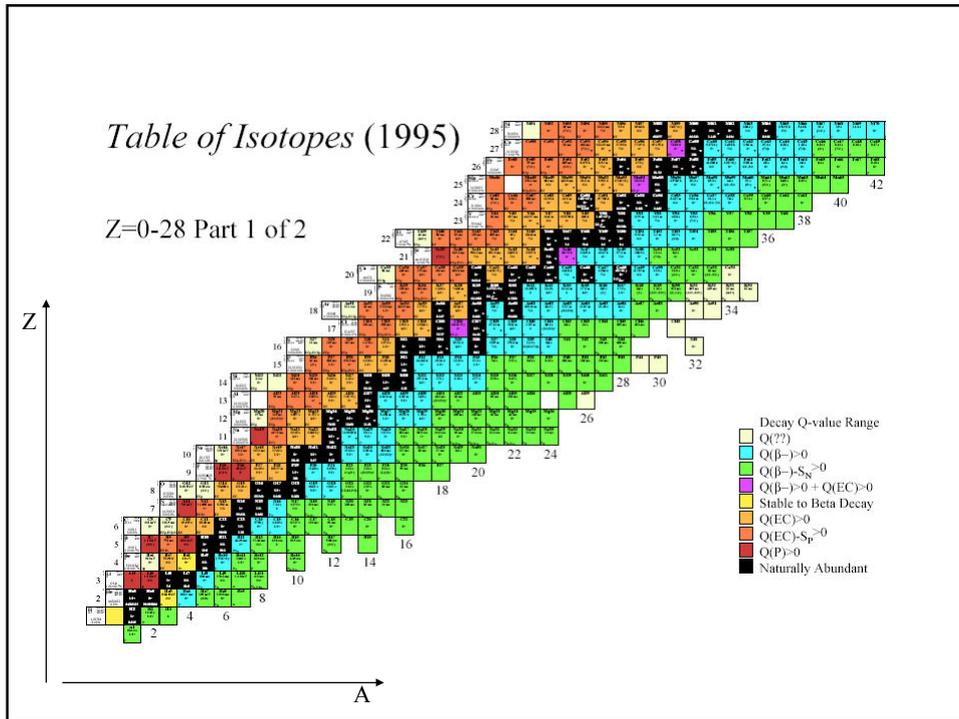
Rev Febbraio 2010

La radioattività

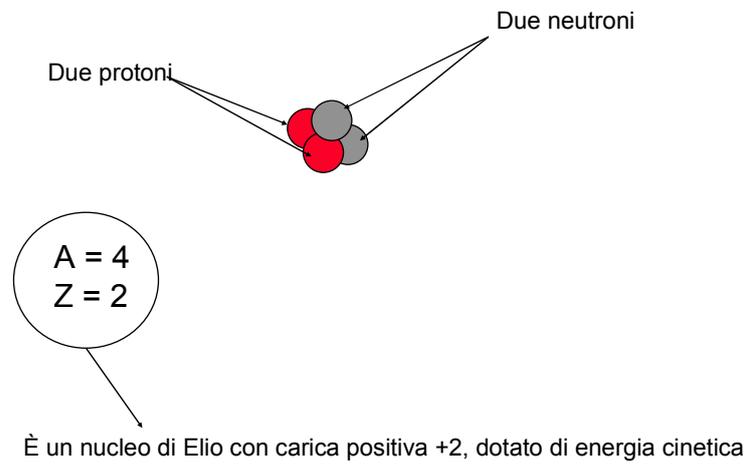


- Bequerel osservò che alcuni materiali emettevano continuamente energia, anche senza nessuna sollecitazione; ciò si poteva spiegare solo ammettendo che gli atomi di quei materiali non sono stabili
- questa energia viene emessa in forma radiante, cioè di radiazioni; da qui il nome di radioattività
- ci si rese rapidamente conto che ci sono radiazioni con carica elettrica positiva, altre con carica negativa ed altre ancora senza alcuna carica

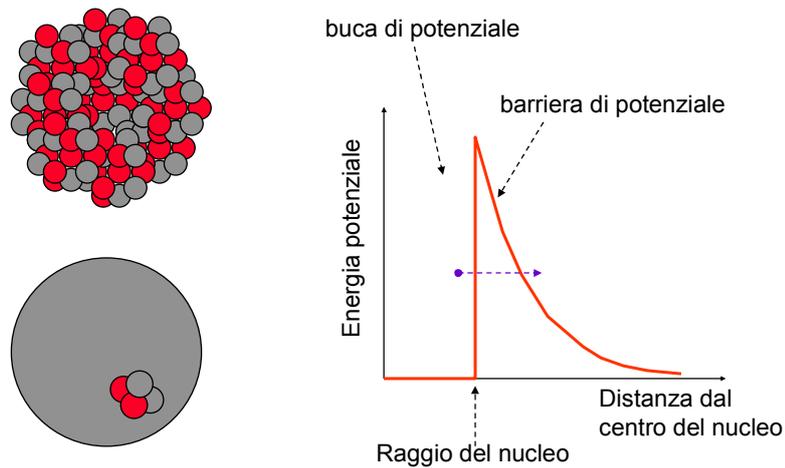
H. Bequerel: "Sur le radiations invisibles emises par les corps phosphorescents". Comptes Rendus 122, 1896



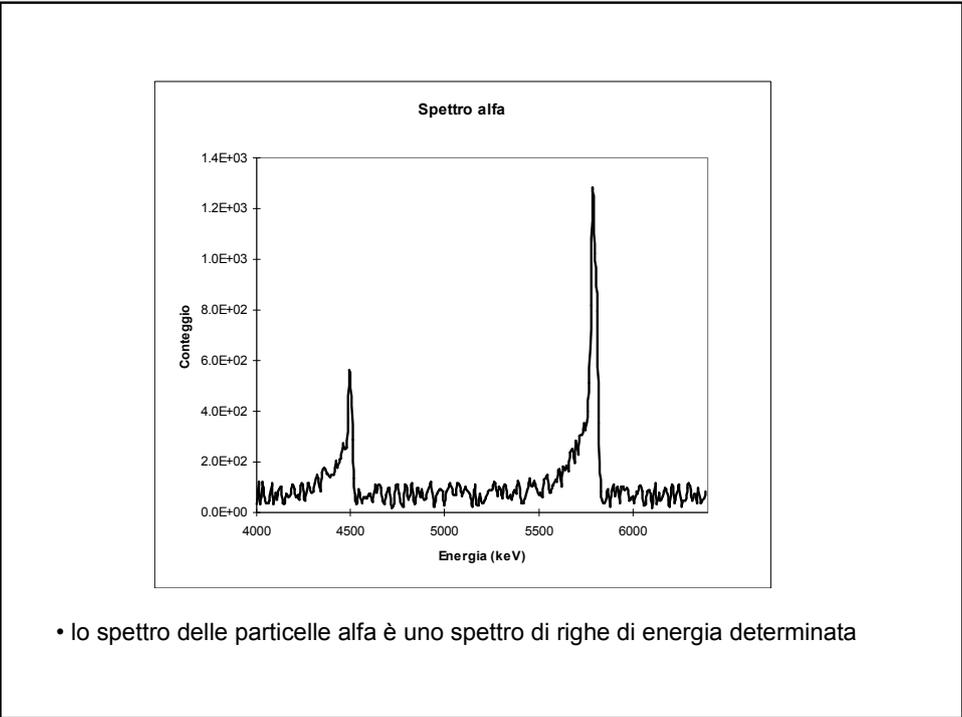
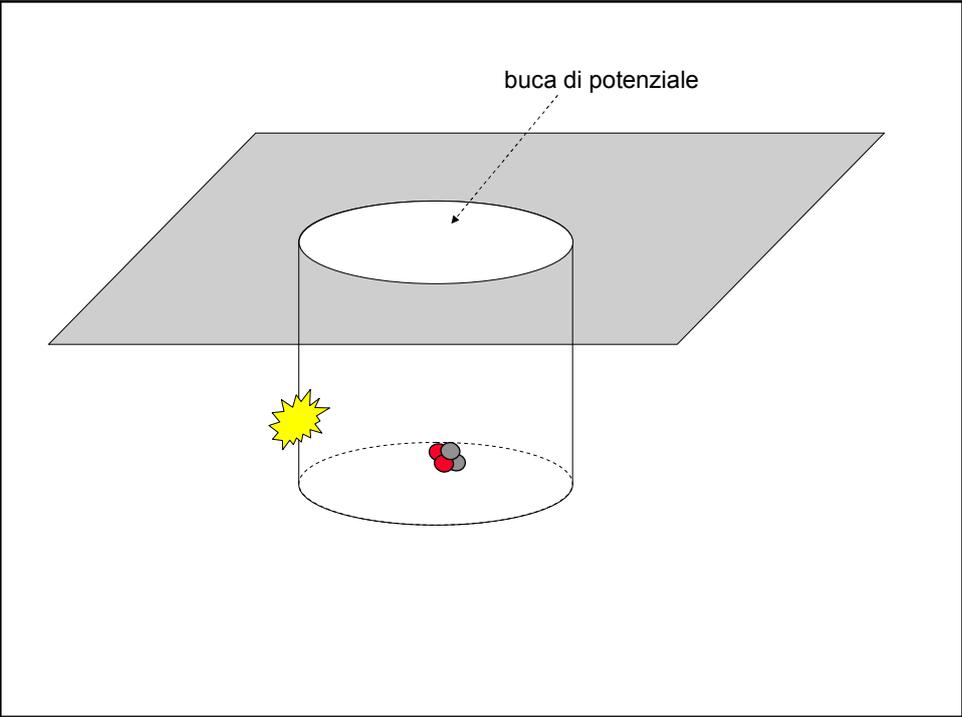
La particella alfa

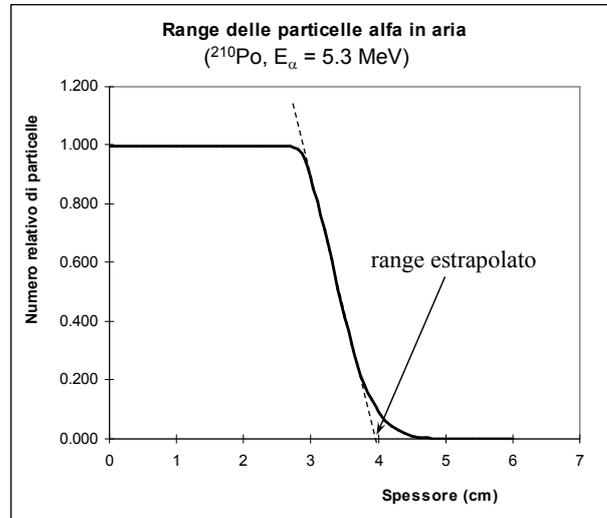


Decadimento alfa



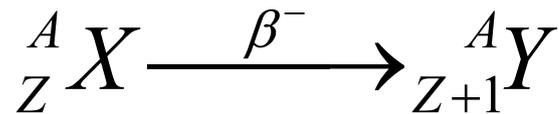
- possiamo immaginare che la particella alfa sia aggregata dentro il nucleo
- dal punto di vista dell'energia potenziale, il nucleo è un a"buca": le particelle non si respingono
- spostandosi nel nucleo come se questo fosse liquido, può trovarsi vicino al confine
- per un effetto quantistico, ha una certa probabilità di poter attraversare la barriera



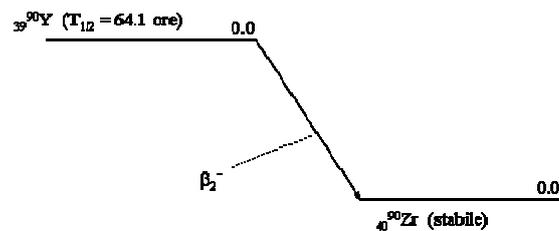


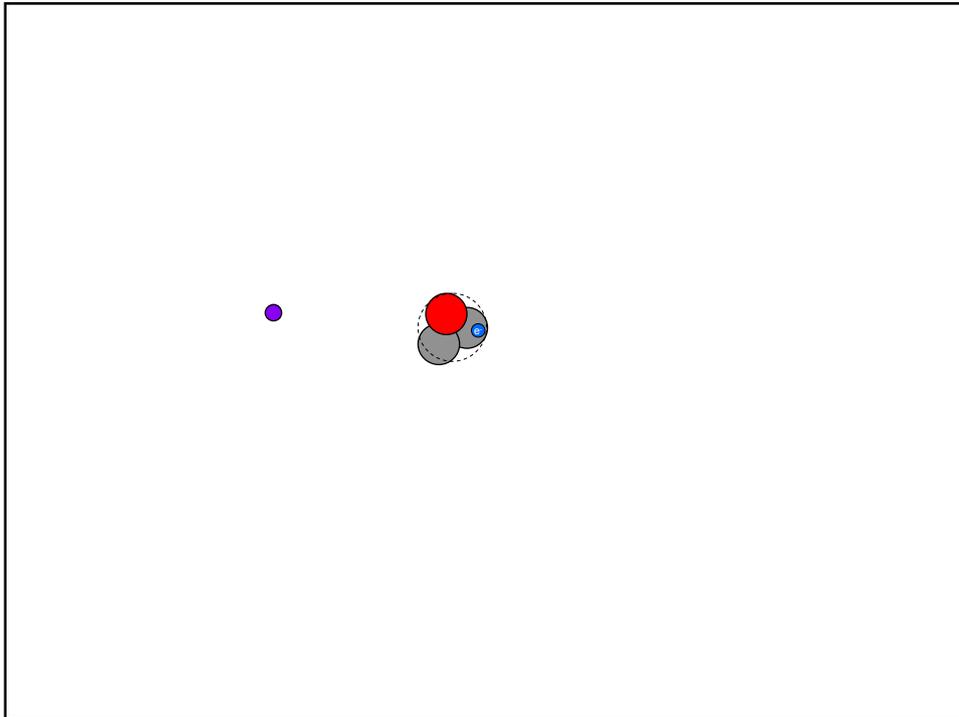
- la curva di assorbimento delle particelle alfa nella materia è quasi “a gradino”
- pressoché tutte le particelle penetrano fino ad un certa profondità, dopodichè sono tutte assorbite nel giro di un ridotto spessore
- il range, ovvero lo spessore di assorbimento totale nella materia, è molto ridotto

Decadimento beta

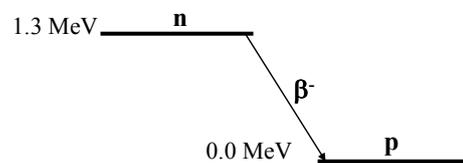
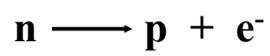


ITTRIO-90





Decadimento beta



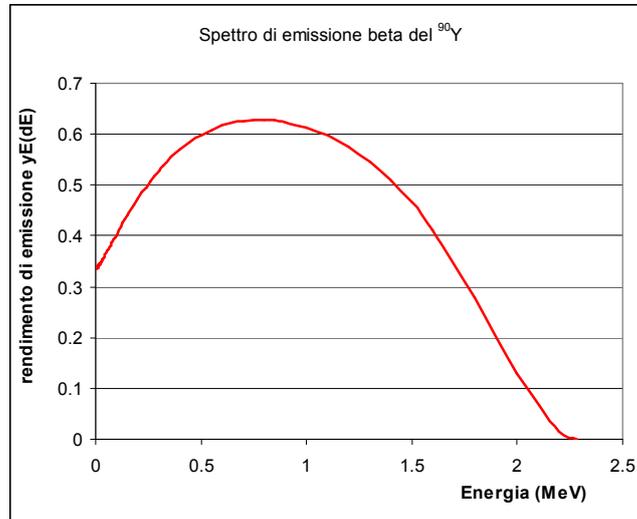
Energia equivalente alla massa del neutrone = 939.55 MeV

Energia equivalente alla massa del protone = 938.25 MeV

Differenza = 1.3 MeV

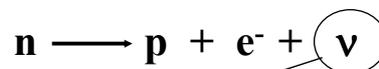
Energia equivalente alla massa dell'elettrone = 0.51 MeV

ma forse manca qualcosa



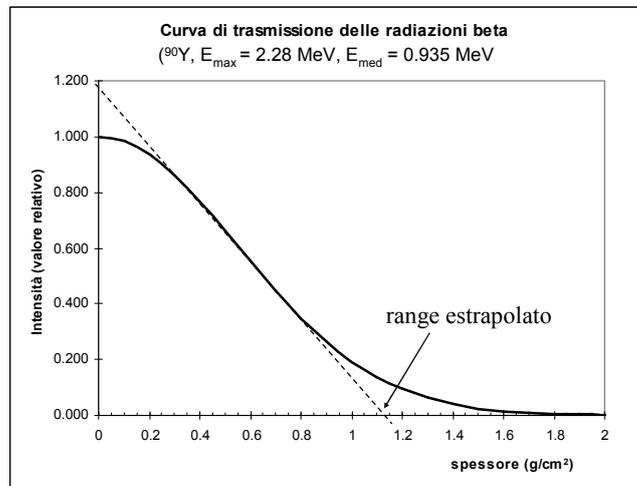
- lo spettro delle particelle beta è uno spettro continuo
- questo aspetto era inatteso; per spiegarlo si è dovuta postulare l'esistenza di una nuova particella

Decadimento beta



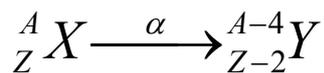
Il neutrino ←

- non ha carica elettrica
- ha una massa piccolissimo, sostanzialmente trascurabile
- è difficilissimo da rivelare

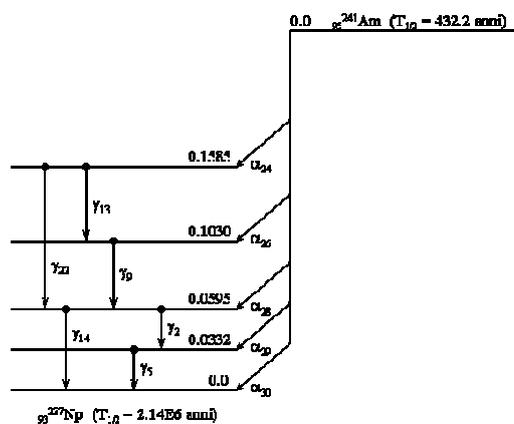


- l'assorbimento delle particelle beta nella materia avviene progressivamente
- approssimativamente, la parte centrale della curva di assorbimento può essere descritta da una legge esponenziale
- si può definire comunque un valore di range, ovvero di spessore di assorbimento totale

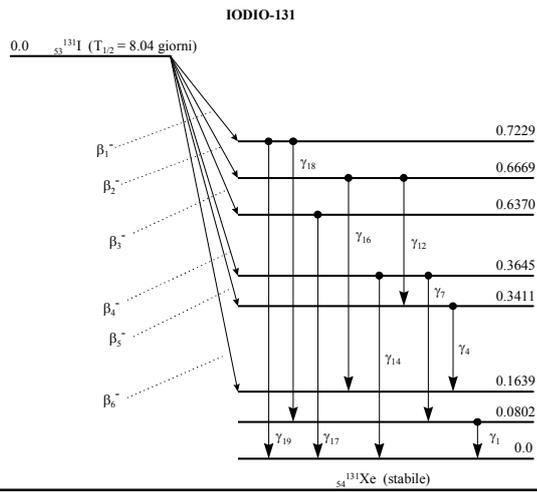
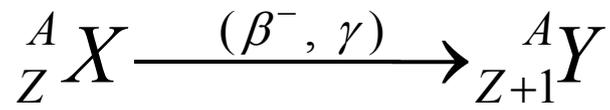
Decadimento alfa - gamma



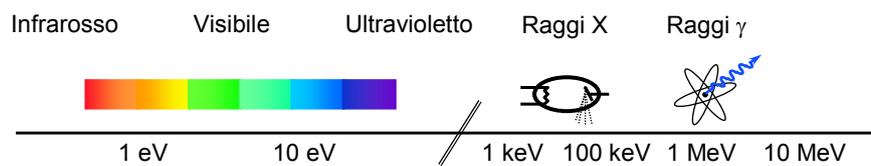
AMERICIO-241



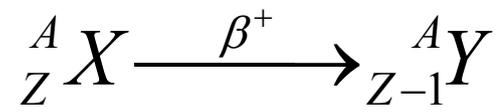
Decadimento beta - gamma



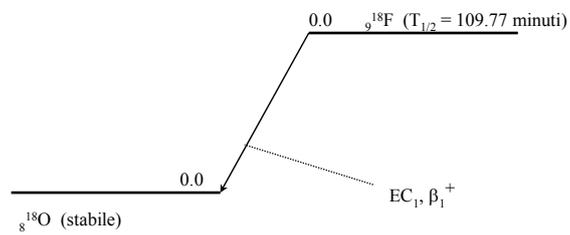
I fotoni



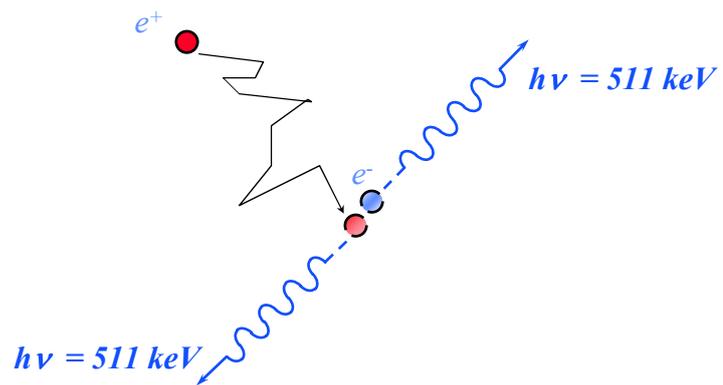
Decadimento beta +



FLUORO-18



Annichilazione di positrone ed elettrone



Animazione annichilazione

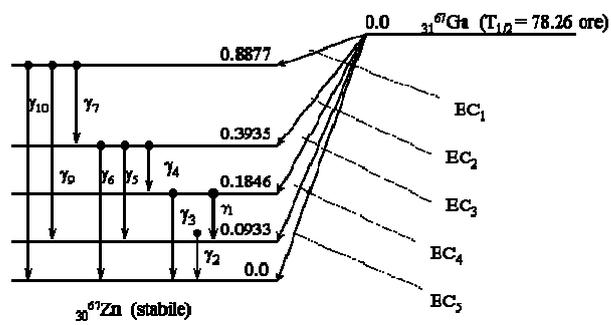
e^+

e^-

Decadimento per cattura elettronica



GALLIO-67

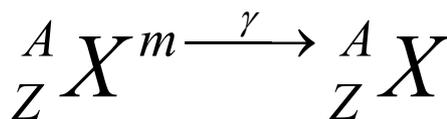


Decadimento per cattura elettronica

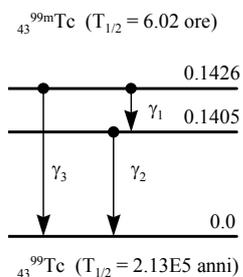
- questo tipo di decadimento produce lo stesso radionuclide figlio di un decadimento beta+ (ma non comporta l'emissione del positrone)
- il nucleo instabile, invece di trasformarsi emettendo una particella, in questo caso cattura uno degli elettroni orbitali degli strati più interni
- per diversi radionuclidi con eccesso di protoni i decadimenti beta+ e CE sono concorrenziali
- di solito, il decadimento beta+ è più probabile nei nuclidi con Z basso, mentre la cattura elettronica è più probabile nei nuclidi con Z alto
- l'energia in eccesso a seguito della trasformazione viene rilasciata sotto forma di fotoni gamma; sarà sempre emessa poi la radiazione X di fluorescenza a seguito del riassetto degli orbitali elettronici

Se l'energia a disposizione del nucleo nella trasformazione è sufficientemente elevata, si può avere la formazione ed emissione del positrone, altrimenti si ha solo la cattura elettronica.

Transizioni isomere



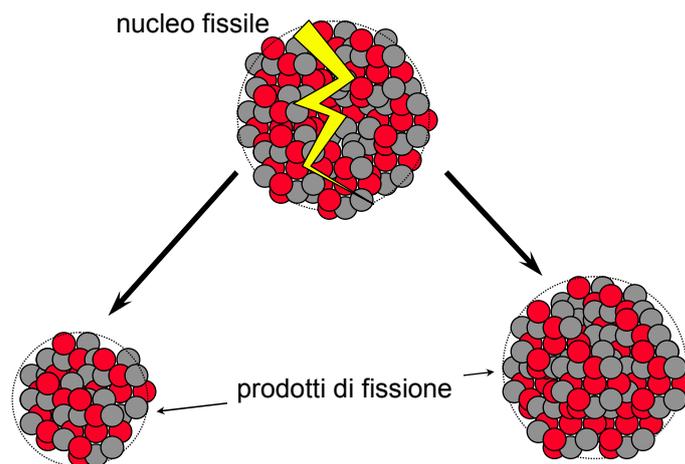
TECNEZIO-99M



Riassumendo

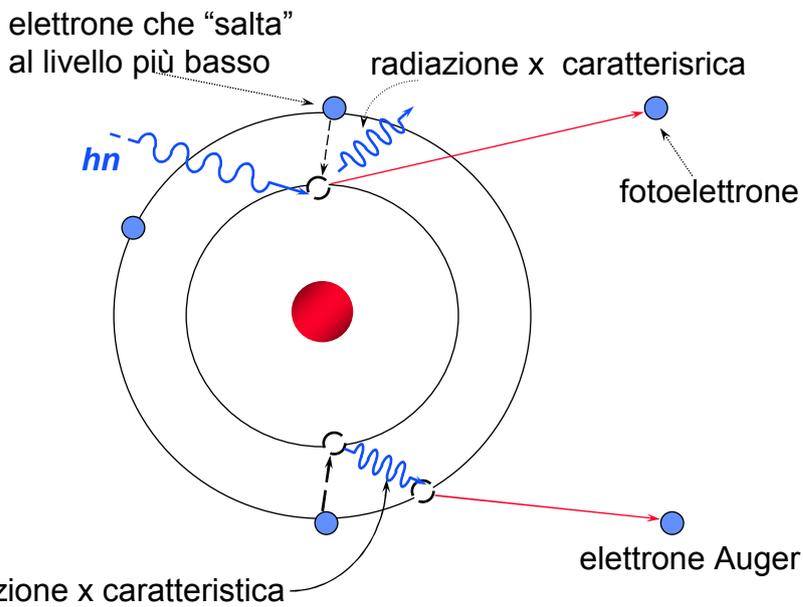
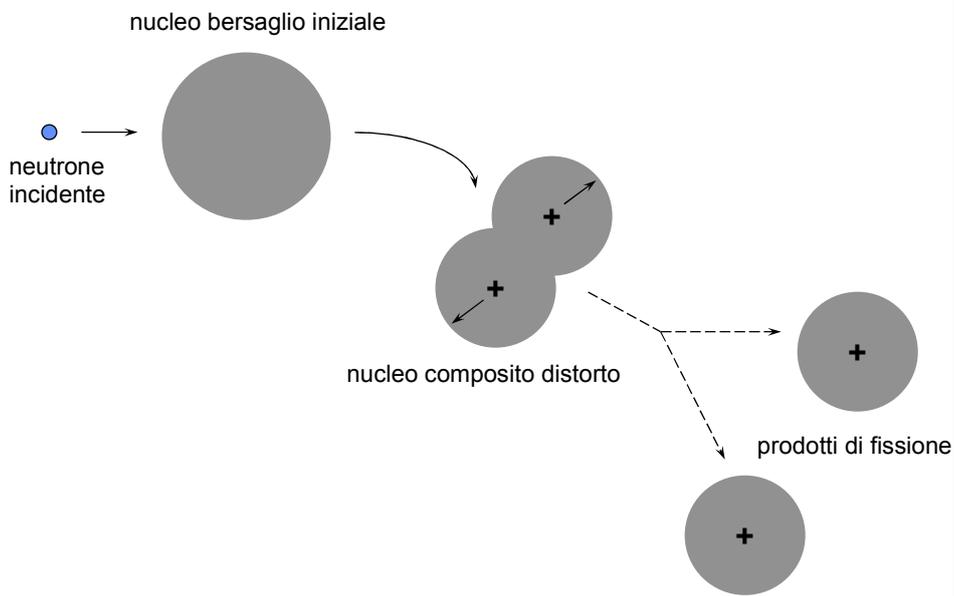
- mano a mano che i nuclei diventano più pesanti (A crescente), è necessario un numero di neutroni superiore a quello dei protoni Z affinché il nucleo sia stabile.
- un nucleo con Z protoni ha bisogno di avere un certo numero di neutroni per essere stabile; se ha troppi neutroni, esisterà un nuclide ugualmente stabile ma con meno neutroni e diverso Z . Allora il nuclide tenderà a riequilibrare il rapporto Z/A decadendo beta meno, cioè trasformando un neutrone in un protone + 1 elettrone.
- Un nucleo con troppi protoni, cioè con un rapporto Z/A troppo grande, tenderà invece a riequilibrare il rapporto con la trasformazione di un protone in un neutrone, attraverso l'emissione di un positrone.
- i nuclei veramente pesanti, possono avere pochi neutroni rispetto al numero di protoni. Per riequilibrare il rapporto Z/A decadono alfa, eliminando simultaneamente 2 protoni e 2 neutroni.

La fissione nucleare



- è possibile spontaneamente solo per alcuni nuclei molto pesanti, p.es. ^{235}U
- il nucleo si rompe in due frammenti, liberando una grande quantità di energia

Modello a goccia di liquido della fissione



Radiazione X caratteristica o di fluorescenza ed elettroni Auger

I fotoni X



W.C Roentgen "Über eine neue Art von Strahlen". Sitzungberichte Med. Phys. Ges. Würzburg, 1895. Tradotto in "On a new kind of rays". Science, 3, 1896.

Legge del decadimento radioattivo

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

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

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

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

- la costante λ rappresenta la probabilità di decadimento nell'unità di tempo
- come tale, è espressa in unità inverse al tempo, p.es. 1/secondi, ovvero secondi⁻¹
- è una caratteristica del radionuclide; ogni radionuclide ha la sua λ .

Il tempo di dimezzamento

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$2 = e^{\lambda T_{1/2}}$$

$$\ln(2) = \lambda \cdot T_{1/2}$$

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693 \cdot \tau$$

Legge del decadimento radioattivo

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\ln(2) = \lambda \cdot T_{1/2}$$

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\ln(2) \cdot \frac{t}{T_{1/2}}}$$

Attività

Si definisce Attività di una sorgente radioattiva il numero di decadimenti nell'unità di tempo:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Poiché la legge del decadimento si ricava a partire dalla $\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$

Si vede che si può scrivere

$$\lambda \cdot N_t = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\ln(2) \cdot \frac{t}{T_{1/2}}}$$

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

Unità di misura della radioattività

- storicamente, la prima unità di misura introdotta per la radioattività è stata il Curie
- 1 Ci corrisponde alla radioattività di 1 grammo di ^{226}Ra
- è quindi basato su di un campione di radioattività
- non è una unità omogenea con il Sistema Internazionale di U.M.
- il Ci è stato usato a lungo e, in pratica, continua ad esserlo

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

Sottomultipli:

mCi = 1/1000 di Ci , corrisponde a 37 MBq

μCi = 1/1000000 di Ci, corrisponde a 37 kBq

Marie Curie

Marja Sklodowska (1867 - 1934)



- si dedicò alla misura del nuovo fenomeno scoperto da Bequerel ed introdusse il termine "radioattività"
- isolò il Polonio ed il Radio
- raffinando una grande quantità di pechblenda ottenne una buona quantità di radio puro, che studiò approfonditamente
- premio Nobel per la Fisica nel 1903 per la scoperta degli elementi radioattivi, insieme al marito Pierre
- nel 1910 secondo Nobel per la Chimica per i lavori sul Radio
- dal 1914 capo dell'Istituto del Radio di Parigi; fondò l'Istituto Curie

Unità di misura della radioattività

- è l'unità di misura del Sistema Internazionale per la radioattività
- non è basato su di un campione di radioattività, ma su una definizione numerica
- la normativa tecnica e di radioprotezione richiede che siano usate le unità di misura del S.I.
- il Bq si sta introducendo nell'uso da circa 10 anni e, al momento, nella pratica "convive" con il Ci

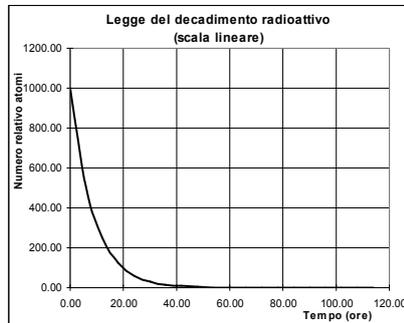
1 Bequerel (Bq) = 1 disintegrazione/secondo

Multipli:

GBq = 10^9 Bq , corrisponde a 27 mCi

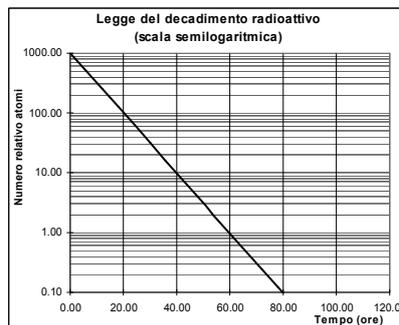
MBq = 10^6 Bq , corrisponde a 0.027 mCi, ovvero 27 μ Ci

kBq = 1000 Bq



- in un grafico semilogaritmico la curva di decadimento è rappresentata da una retta
- il $T_{1/2}$ rappresenta la pendenza della retta

- un fenomeno descritto nel tempo da un andamento esponenziale non arriva mai allo zero, se non per tempo = ∞
- praticamente, in un tempo = $3 \cdot T_{1/2}$ si ha circa il 10 % della radioattività iniziale, per $t = 6 \cdot T_{1/2}$ si ha circa 1 % della radioattività iniziale e per $t = 10 \cdot T_{1/2}$ si ha circa 0.1 % della radioattività iniziale



Coppie genitore-figlio. Equazione di Bateman

- in diversi casi un radionuclide decade ad un nuclide che è anch'esso radioattivo
- in questo caso il primo si dice "genitore" ed il secondo "figlio"
- questo fenomeno è evidente in natura nelle famiglie radioattive naturali
- alcune interessanti coppie genitore – figlio artificiali possono essere usate come sistema per la produzione (generazione) di radionuclidi per impiego medico
- la dinamica temporale dell'attività di genitore e figlio è descritta dalla equazione di Bateman:

$$\frac{dn_f}{dt} = \lambda_g \cdot n_{g0} \cdot e^{-\lambda_g \cdot t} - \lambda_f \cdot n_f$$

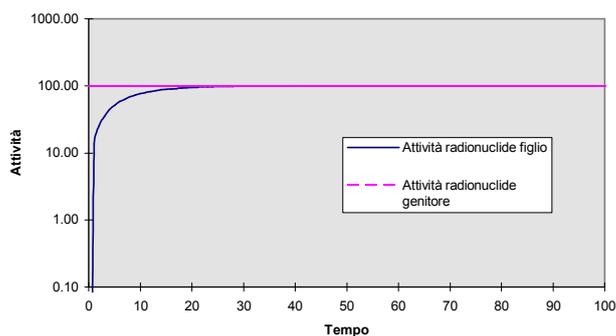
la cui integrazione da:

$$A_f(t) = A_g(0) \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_f - \lambda_g} \cdot (e^{-\lambda_g t} - e^{-\lambda_f t}) + A_f(0) \cdot e^{-\lambda_f t}$$

Equilibrio secolare

$$T_{\frac{1}{2}g} \gg T_{\frac{1}{2}f} \quad A_f(t) \approx A_g(0) \cdot (1 - e^{-\lambda_f t})$$

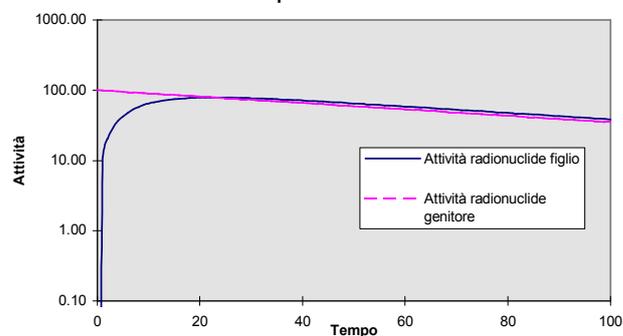
Decadimento di una coppia di radionuclidi genitore - figlio.
Equilibrio secolare.



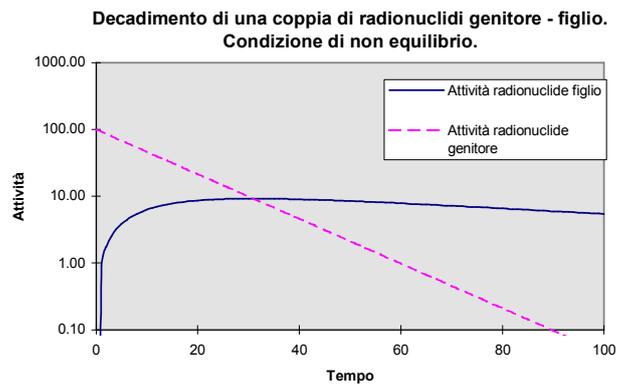
Equilibrio transiente

Se il tempo di dimezzamento del genitore è più lungo di quello del figlio, ma non troppo superiore, e la sua costante di decadimento λ_g non può essere trascurata si ha la condizione di **equilibrio transiente**

Decadimento di una coppia di radionuclidi genitore - figlio.
Equilibrio transiente.



Condizione di non equilibrio



FINE PRESENTAZIONE