Elementi di RADIOATTIVITA'

Prof. Giovanni Buccolieri
Facoltà di Scienze MMFFNN
Università del Salento
e-mail: giovanni.buccolieri@unisalento.it

Elementi di RADIOATTIVITA'

Processo naturale attraverso cui gli atomi instabili di un dato elemento emettono energia, da parte dei nuclei, trasformandosi in atomi di un diverso elemento o in stati energetici di minor energia dello stesso elemento. Tali nuclei sono detti **nuclidi radioattivi** o **radionuclidi**.

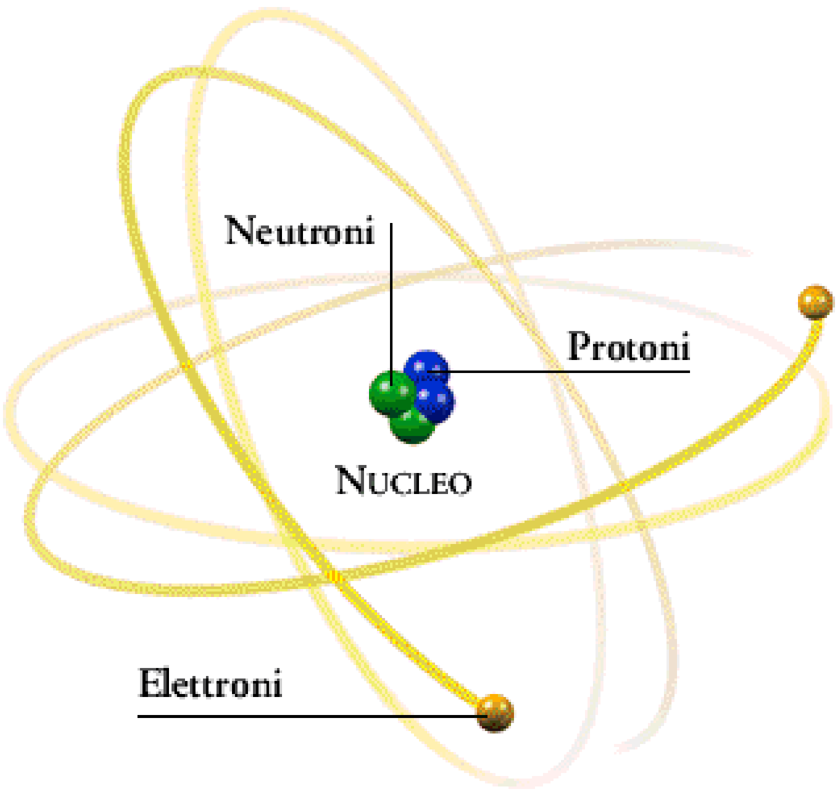
Si definisce **attività** di un radionuclide il numero di trasformazioni nucleari spontanee che si producono nell'unità di tempo. L'unità di misura dell'attività è il Becquerel:

1 **Becquerel** = 1 disintegrazione / 1 secondo

La radioattività naturale fu osservata per la prima volta da Becquerel nel 1896: studiando alcuni sali di uranio si accorse casualmente che i suoi campioni emettevano radiazioni penetranti simili a quelle descritte un anno prima da Roentgen (1895 raggi X). Si stabilì quindi (A. Becquerel e i coniugi Curie) che alcuni nuclei avevano la proprietà di emettere particelle trasformandosi in altri elementi: le particelle emesse furono chiamate particelle α e β.

Le particelle α sono nuclei di elio (2 protoni e 2 neutroni) mentre le particelle β sono o elettroni (carica negativa, decadimento β^-) o positroni (carica positiva, decadimento β^+). Il nucleo ottenuto dopo il decadimento (nucleo figlio) è talvolta lasciato in uno stato eccitato che tornando allo stato fondamentale emette γ.

Atomo



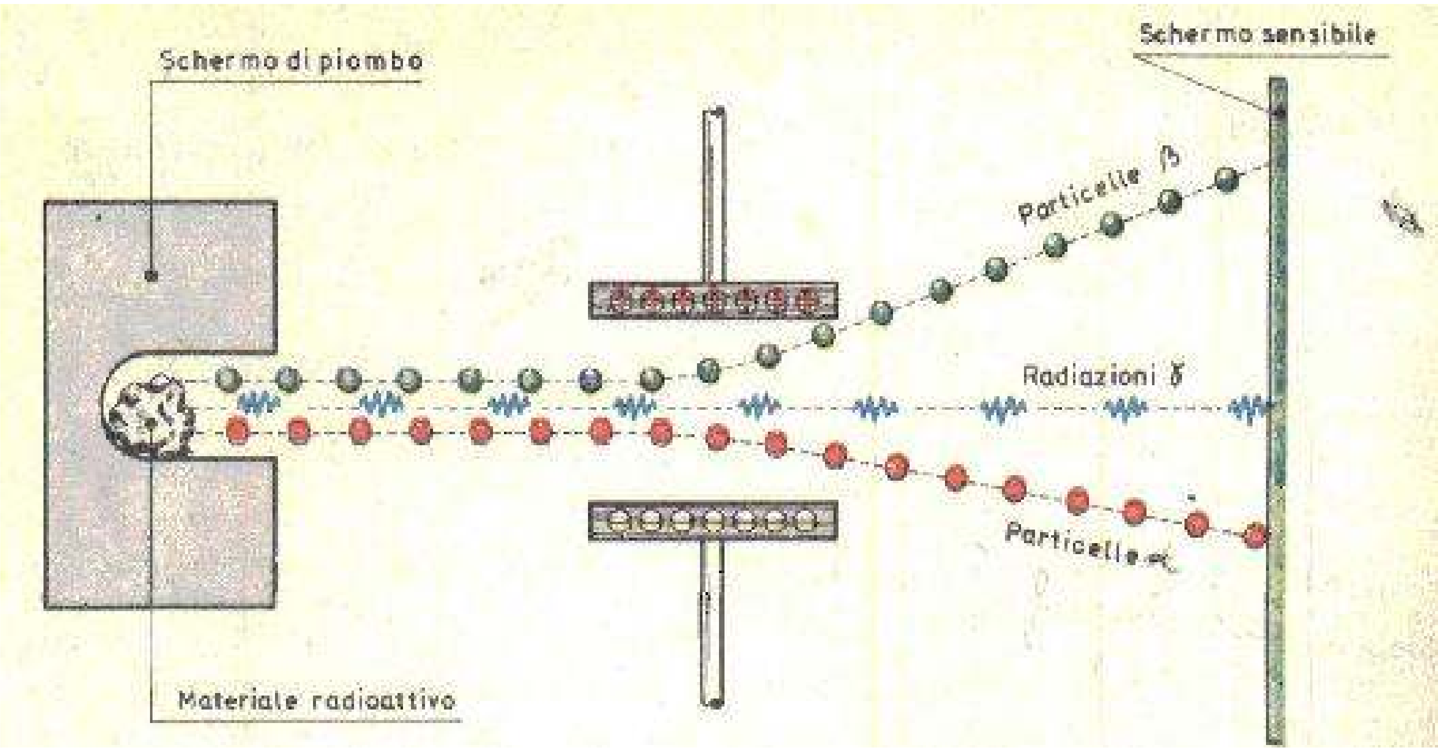
Z (numero atomico): numero di protoni (**p**)

A (numero di massa): numero di nucleoni (protoni **p** e neutroni **n**)

Il numero di neutroni **n** è dato da A-Z.

Esperimento di Becquerel

(1896 studiando composti dell'uranio)

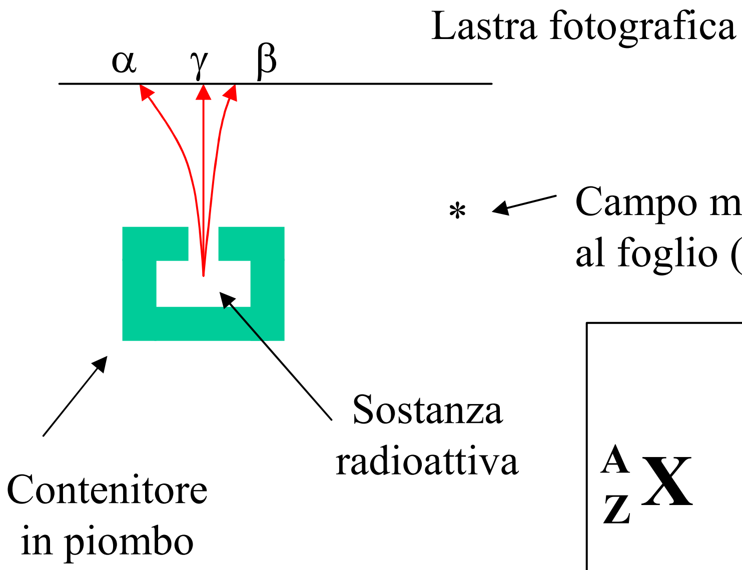


Mettendo un magnete i tre fasci (α, β e γ) si separavano. In assenza del magnete non c'era separazione

Esperimento di Becquerel

(1896 studiando composti dell'uranio)

Indicando con **Z** il numero atomico (numero di protoni), con **A** il numero di massa (numero di nucleoni: protoni e neutroni), il numero di neutroni è dato da A-Z.



* Campo magnetico B perpendicolare al foglio (entrante)

$$ {}^{A}_{Z}\mathbf{X} \rightarrow {}^{A'}_{Z'}\mathbf{Y} + \begin{matrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{matrix} $$

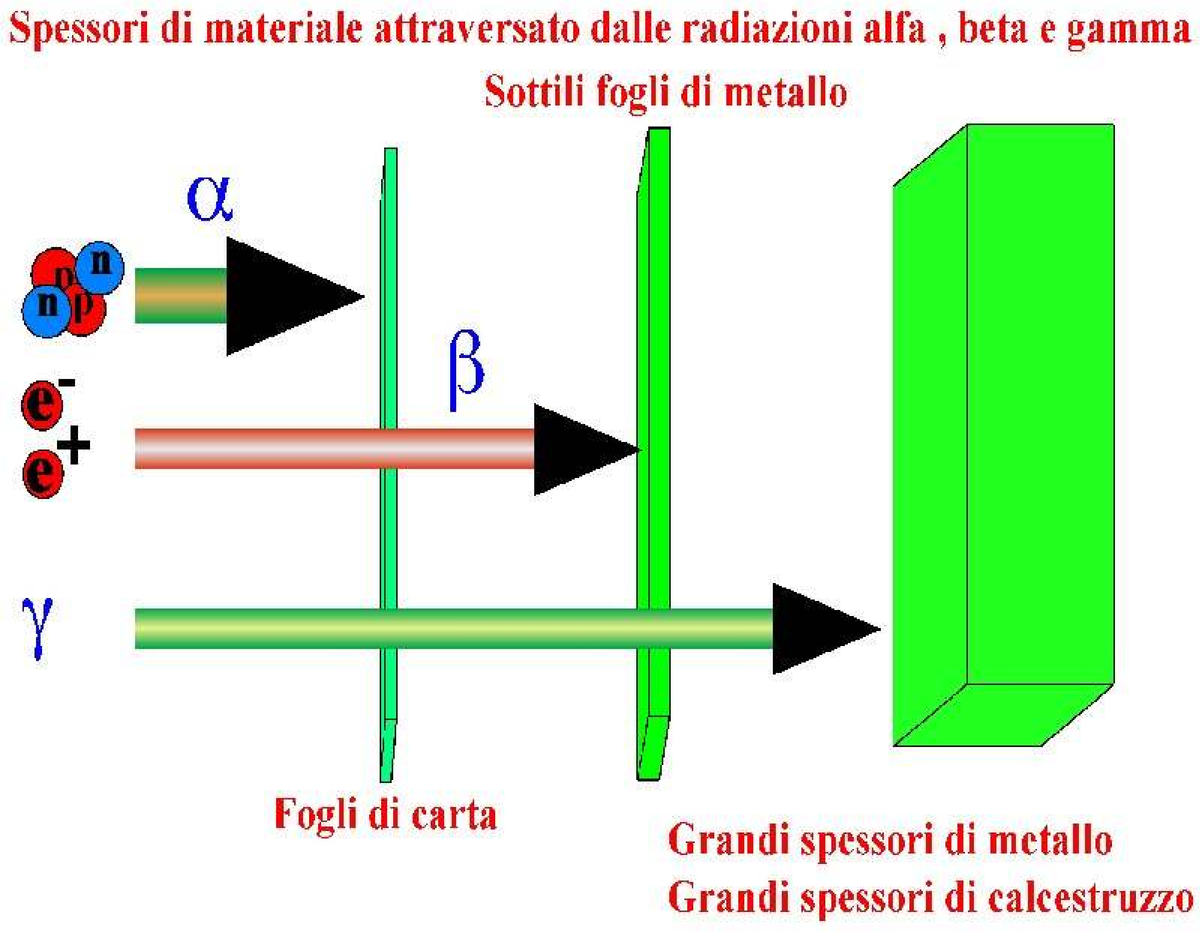
Generica reazione nucleare

Quasi tutti gli elementi radioattivi naturali (tranne pochissimi tra cui il K-40) si raggruppano in famiglie nel senso che provengono dalle successive disintegrazioni dei quattro elementi capostipiti:

Torio ${}_{90}\mathbf{Th}^{232}$ — Uranio 235 ${}_{92}\mathbf{U}^{235}$

Uranio 238 ${}_{92}\mathbf{U}^{238}$ — Nettunio ${}_{93}\mathbf{Np}^{237}$

Le radiazioni α, β e γ sono assorbite in maniera differente



Decadimento α

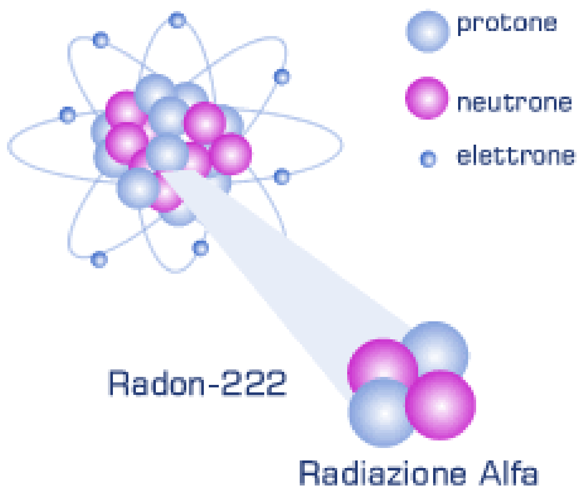
Particella α $\quad {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

Tipico decadimento α $\quad {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

Esempio di decadimento α

$$ {}^{226}_{88}\mathrm{Ra}\,(\mathrm{radio}) \rightarrow (1622\ \mathrm{anni})\ {}^{222}_{86}\mathrm{Rn}\,(\mathrm{radon}) + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

Anche se di grande energia, le particelle α, sono frenate in pochi cm di aria o in pochi millesimi di cm di tessuto biologico (≈10 μm).



Decadimento α del Radon

Decadimento β

Disintegrazione radioattiva con emissione di un elettrone β^- o un positrone β^+.

Quando è emesso un β^- si considera che un neutrone del nucleo si trasforma in un protone ed un elettrone.

$$\mathbf{n = p + \beta^- + \nu \;\Rightarrow\; \begin{matrix} A \to A \\ Z \to Z+1 \end{matrix} \;\Rightarrow\; {}^{A}_{Z}X \to {}^{\;\;A}_{Z+1}Y + \beta^-}$$

Esempio di decadimento β^-: $\mathbf{{}^{14}_{6}C \to {}^{14}_{7}N + \beta^-}$

Quando è emesso un β^+ si considera che un protone del nucleo si trasforma in un neutrone ed un positrone.

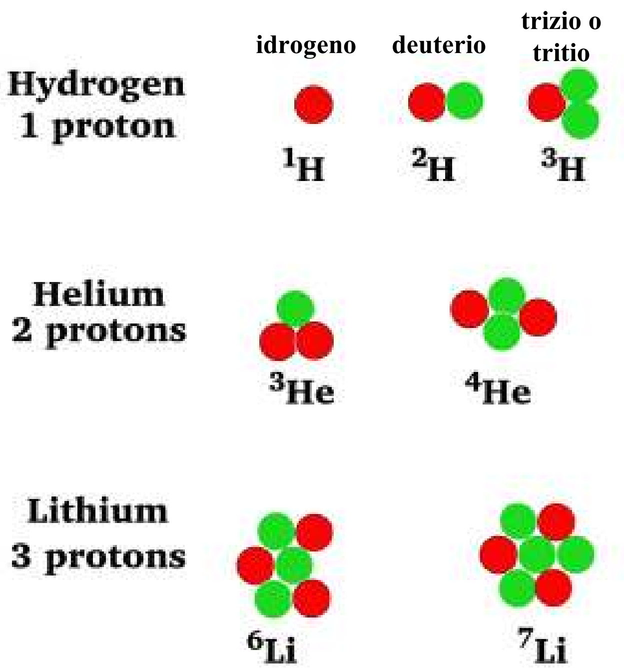
$$\mathbf{p = n + \beta^+ + \nu \;\Rightarrow\; \begin{matrix} A \to A \\ Z \to Z-1 \end{matrix} \;\Rightarrow\; {}^{A}_{Z}X \to {}^{\;\;A}_{Z-1}Y + \beta^+}$$

Esempio di decadimento β^+: $\mathbf{{}^{11}_{6}C \to {}^{11}_{5}B + \beta^+}$

Le particelle β emesse da un dato nucleo hanno energia da zero fino ad un valore massimo caratteristico del nucleo (spettro continuo). Le emissioni β sono accompagnate dall'emissione di una particella neutra ν: **il neutrino**. La presenza del neutrino era richiesta dai principi di conservazione dell'energia, della quantità di moto e del momento angolare.

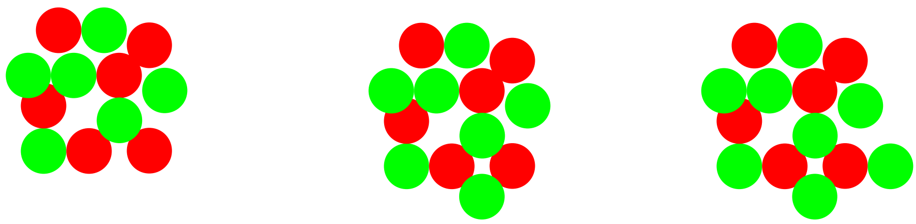
Isotopi

Atomi con stesso numero di protoni (stesso elemento chimico) e differente numero di neutroni



protoni

neutroni



C-12 **C-13** **C-14**

Le radiazioni α e γ emesse nei decadimenti radioattivi hanno energie ben definite. Le radiazioni β sono caratterizzate da uno spettro continuo con un valore massimo di energia tipica del radioisotopo considerato.

Identificare le particelle emesse nel decadimento di un particolare radionuclide e determinare il nucleo stabile o instabile risultante.

Determinare la probabilità del decadimento (legge temporale con cui il fenomeno si manifesta).

Famiglie radioattive

Thorium series

Nuclide	Half-life[215]
^{232}Thorium	14.1×10^{9} years
↓ $2\alpha, 2\beta$	
^{224}Radium	3.66 days
↓ 1α	
^{220}Radon (thoron)	56 sec
↓ 1α	
^{216}Polonium	0.16 sec
↓ $2\alpha, 2\beta$	
^{208}Lead	Stable

Uranium/radium series

Nuclide	Half-life[215]
^{238}Uranium	4.47×10^{9} years
↓ $1\alpha, 2\beta$	
^{234}Uranium	245×10^{3} years
↓ 1α	
^{230}Thorium (ionium)	77×10^{3} years
↓ 1α	
^{226}Radium	1600 years
↓ 1α	
^{222}Radon	3.82 days
↓ $3\alpha, 2\beta$	
^{210}Lead	22 years
↓ 2β	
^{210}Polonium	138 days
↓ 1α	
^{206}Lead	Stable

Uranium/actinium series (natural abundance 0.72%)

Nuclide	Half-life[215]
^{235}Uranium	0.704×10^{9} years
↓ $1\alpha, 1\beta$	
^{231}Protactinium	32.8×10^{3} years
↓ $2\alpha, 1\beta$	
^{223}Radium	11.4 days
↓ 1α	
^{219}Radon (actinon)	4.0 sec
↓ 1α	
^{215}Polonium	1.8×10^{-3} sec
↓ $2\alpha, 2\beta$	
^{207}Lead	Stable

Tempo di dimezzamento

Consideriamo $\mathbf{N_0}$ atomi di un dato radionuclide al tempo t=0: emettendo particelle (α o β) si trasforma in un altro elemento e quindi $\mathbf{N_0}$ decresce nel tempo (**t**) secondo la legge:

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

Dove λ è una costante caratteristica del particolare radioisotopo considerato e rappresenta la probabilità che un nucleo si disintegri nell'unità di tempo.

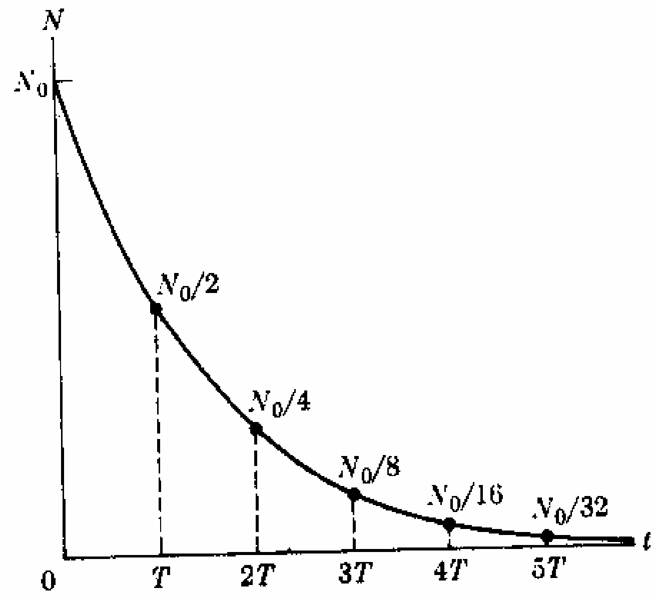
Si definisce **tempo di dimezzamento** $\mathbf{T_{1/2}}$ il tempo necessario affinché il numero di nuclei radioattivi si dimezzi. $\mathbf{T_{1/2}}$ è legato a λ da:

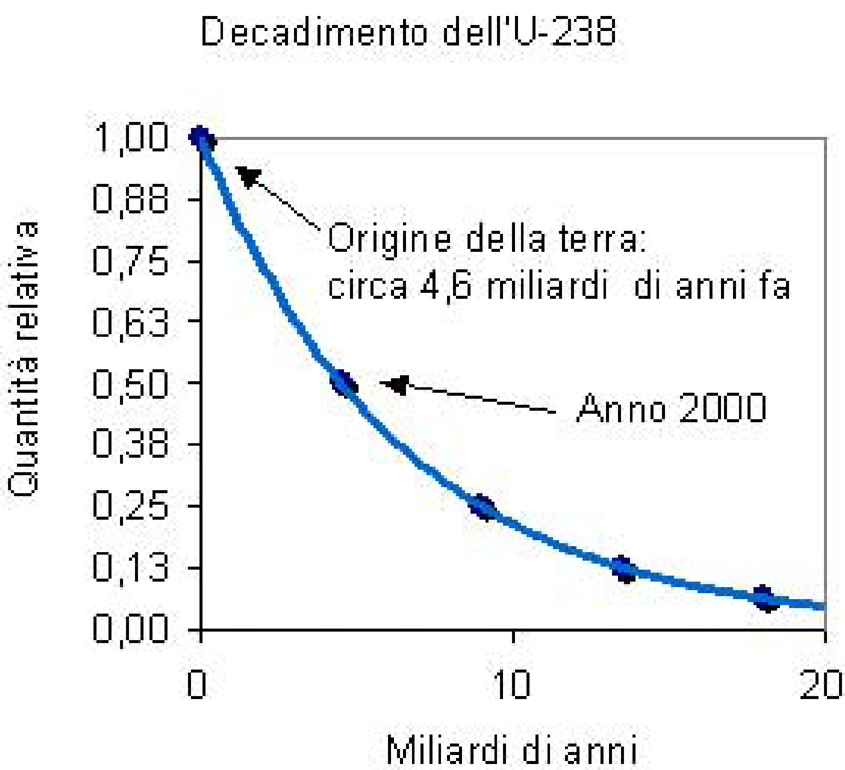
$$\mathbf{\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \Rightarrow \quad \lambda \cdot T_{1/2} = \ln 2}$$

Andamento di N(t)

Andamento di N_0 in funzione del tempo: per $t=T_{1/2}$, $N=N_0/2$. Tale numero si riduce di un ulteriore fattore 2 dopo un tempo $t= T_{1/2}$.

Dopo **n** tempi di dimezzamento il numero N_0 si è ridotto di un fattore $\mathbf{2^n}$.





Attività

$$\mathbf{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}} \qquad \mathbf{(1)}$$

L'espressione 1 descrive la variazione del numero di nuclei radioattivi nel tempo **N(t)**. Il prodotto **N(t)** per la costante λ definisce l'attività **A** della sorgente, ossia il numero di decadimenti nell'unità di tempo.

$$\mathbf{\lambda N(t) = A(t)}$$

$$\mathbf{[A] = Ci\ \ (Curie),\ \ 1\,Ci = 3.7 \cdot 10^{10}\ \ \ dis/s\,,}$$
$$\mathbf{1\,dis/s = 1\,Bq\ \ (Becquerel)}$$

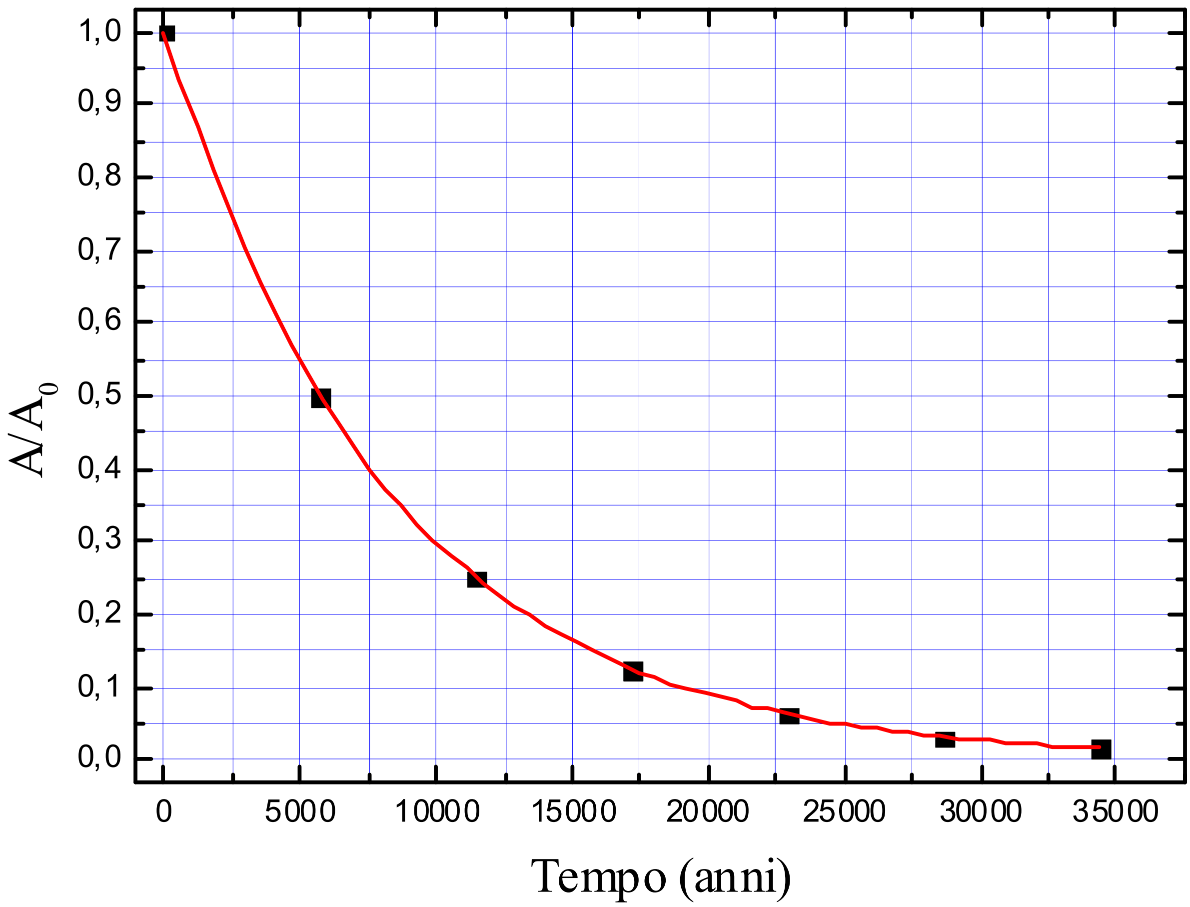
$$\mathbf{\lambda N(t) = A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}}$$
$$\mathbf{\lambda N_0 = A_0 \ \Rightarrow A(t) = A_0 e^{-\lambda t}}$$
$$\mathbf{\frac{A(t)}{A_0} = e^{-\lambda t}}$$

Determiniamo ora l'espressione che lega l'attività iniziale di un campione $\mathbf{A_0}$ alla attività ad un generico tempo t, **A(t)**:

$$\mathbf{A = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{A_0}{2^{\frac{t}{T_{1/2}}}}}$$

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

Decadimento del C-14



Esempio

Fra le rovine di un'antica città si ritrova un pezzo di carbone di 25g. Il campione mostra un'attività di ${}_{6}^{14}C$ (tempo di dimezzamento di 5730 anni) di 250 decadimenti/min. Determinare l'età del campione.

Trasformo il tempo di dimezzamento in secondi e calcolo la costante λ.

$$T_{1/2} = 5730\ \text{anni} = 5730 \cdot 365\ \text{giorni} = 5730 \cdot 365 \cdot 24\ \text{ore}$$

$$T_{1/2} = 5.02 \cdot 10^{7}\ \text{ore} = 5.02 \cdot 10^{7} \cdot 3600\ \text{sec} = 1.81 \cdot 10^{11}\ \text{sec}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{1.81 \cdot 10^{11}} = 3.84 \cdot 10^{-12}\ s^{-1}$$

Calcolo il numero di atomi di C contenuti in 25 grammi. La massa molare del C è pari a 12 g. Il numero di Avogadro è pari a 6.023 10^{23}.

$$n°\ \text{moli} = \frac{25}{12} = 2.08\ \text{moli}$$

$$n°\ \text{atomi} = n°\ \text{moli} \cdot n°\ \text{Avogadro}$$

$$n°\ \text{atomi} = 2.08\ \text{moli} \cdot 6.023 \cdot 10^{23} = 1.255 \cdot 10^{24}\ \text{atomi di C}$$

Un essere vivente è in equilibrio con l'ambiente esterno e quindi il rapporto tra il numero di atomi di C-14 e C-12 è lo stesso per tutti gli esseri viventi (uomini, animali, piante, ecc).

Quando cessa la vita cessa anche lo scambio di materia con l'ambiente esterno: questo è il tempo zero nella datazione con C-14.

Gli atomi di C-12 restano invariati mentre gli atomi di C-14 decadono (dopo 5730 anni si dimezzano, dopo 2x5730 anni si riducono di un fattore 4, ecc).

In vita, il rapporto tra il numero di atomi di C-14 e C-12 è dato da:

$$\frac{\mathbf{n° \ atomi \ C-14}}{\mathbf{n° \ atomi \ C-12}} = \mathbf{1.3 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow \mathbf{(n° \ atomi \ C\text{-}14) = 1.3 \cdot 10^{-12} \cdot (n° \ atomi \ C-12)}$$

Se il reperto precedente fosse di un essere vivente, il numero di atomi di C-14 in 25 g sarebbe pari a:

$$\mathbf{(n° \ atomi \ C\text{-}14) = 1.3 \cdot 10^{-12} \cdot 1.25 \cdot 10^{24} = 1.63 \cdot 10^{12}}$$

L'attività iniziale A_0 è data da:

$$A_0 = N_0\,\lambda = 1.63 \cdot 10^{12}\,\text{atomi} \cdot 3.38 \cdot 10^{-12}\,\text{sec} = 6.24\,\text{dec/sec} = 375\,\text{dec/min}$$

Si può ora determinare l'età del campione tramite la relazione:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \;\rightarrow\; e^{\lambda t} = \frac{A_0}{A} \;\rightarrow\; \ln e^{\lambda t} = \ln\frac{A_0}{A} \;\rightarrow\; t = \frac{1}{\lambda}\ln\frac{A_0}{A}$$

$$t = \frac{1}{3.83\,10^{-12}\,\text{sec}}\ln\frac{375}{250} = 1.05\,10^{11}\,\text{sec} = 3350\,\text{anni}$$

La tecnica di datazione al radiocarbonio è stata usata con successo per misurare l'età di resti organici risalenti a 25000 anni fa.

Condizione di equilibrio secolare

(specie 1)
$\downarrow$
(specie 2)
$\downarrow$
(specie 3)
$\downarrow$

Supponiamo di partire da un campione puro di atomi (1) che decadono in atomi (2) anche essi radioattivi. Sia $\mathbf{N_{10}}$ il numero iniziale di atomi (1).

$$\mathbf{N_1 = N_{10}e^{-\lambda_1 t} \Rightarrow \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 t}$$

Per gli atomi tipo 2

$$\mathbf{\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 \quad (rel.1)}$$

La soluzione della equazione 1 è data da:

$$\mathbf{N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) \qquad (rel.2)}$$

$$\mathbf{quindi\ \ A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) \Rightarrow}$$

$$\mathbf{A_2 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(1 - e^{-\lambda_2 t + \lambda_1 t}\right)}$$

$$\mathbf{\left(\lambda T_{1/2} = \ln 2\right) \quad \Rightarrow A_2 = A_1 \frac{T_1}{T_1 - T_2}\left(1 - e^{-\ln 2 \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} t}\right)}$$

$$\mathbf{\left(N_2\right)_{max} \Rightarrow \frac{dN_2}{dt} = 0 \Rightarrow \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1}$$

Padre e figlio hanno la stessa attività

Condizioni iniziali: $N_{20}=0$, $N_{10}=N_1$

Verifica

Dimostriamo che la relazione 2 è soluzione dell'equazione 1

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}\left(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}\right) \quad \textbf{(sostituire in rel.2)}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}\left(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}\right) = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

$$-\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_2 t} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_2 t}$$

il secondo termine e l'ultimo si elidono, mentre $N_{10} e^{-\lambda_1 t}$ si raccoglie a fattore comune

$$\left(-\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 - \lambda_1} - \lambda_1 + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\right) N_{10} e^{-\lambda_1 t} = 0$$

$$\frac{-\lambda_1^2 - \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} = 0 \quad \Rightarrow \frac{0}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t} = 0$$

quindi 2 è soluzione di 1