

# HAJOAMISLAKI, AKTIIVISUUS JA RADIOHIILIMENETELMÄ

## Radioaktiivisuus tarkoittaa atomiytimien hajoamista.

Radioaktiiviset alkuaineet hajoavat ajan kuluessa toisiksi alkuaineiksi. Hajoaminen voi tapahtua useiden välivaiheiden kautta, joihin liittyy monesti alfa- ja beetasäteilyn lisäksi gammasäteilyä. Lopulta muodostuu pysyvä ydin.

Radioaktiivinen hajoaminen noudattaa tilastollista lakia.

**Radioaktiivisen aineen puoliintumisaikalla  $T_{1/2}$  tarkoitetaan aikaa, jonka kuluessa puolet radioaktiivisista ytimistä on hajonnut.**

Jos aktiivisten ytimien määrä alkuhetkellä ( $t = 0$ ) on  $N_0$ , niin ajan  $t = T_{1/2}$  kuluttua ytimiä on jäljellä  $N_0/2$

Alla olevassa kuvassa on esitetty hajoamatta olevien ytimien lukumäärä  $N$  ajan  $t$  funktiona;  $N = N(t)$ .

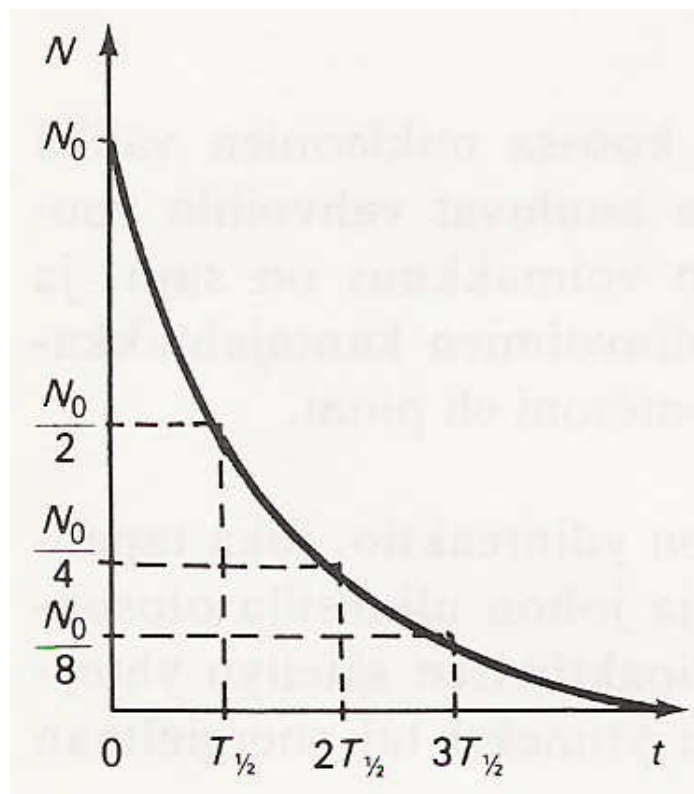
$N_0$  = ytimien määrä alussa ( $t = 0$ )

$N$  = ytimien määrä hetkellä  $t$

$T_{1/2}$  = puoliintumisaika

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

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



Kun aikaväli  $\Delta t$  on pieni,  $\Delta t \ll T_{1/2}$ , niin hajoaneiden ytimien lukumäärä  $\Delta N$  aikavälillä  $\Delta t$  on suoraan verrannollinen aktiivisten ytimien lukumäärään  $N$  eli  $\Delta N = -\lambda \cdot N \Delta t$ , missä verrannollisuuskerroin  $\lambda$  on nuklidille ominainen **hajoamisvakio** (yksikkö 1/s).

Voidaan osoittaa, että  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ . Tämä tulos on myös taulukossa (MAOL. s. 127 (123)).

Puoliintumisaikoja ja radioaktiivisia hajoamistapoja ( $\alpha$ ,  $\beta$ , EC) on esitetty taulukossa.

**RADIOAKTIIVINEN HAJOAMISLAKI** voidaan esittää neljässä muodossa:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1) \quad \Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (\Delta t \ll T_{1/2}) \\ 2) \quad N = N_0 e^{-\lambda t} \\ 3) \quad N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \\ 4) \quad N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \end{array} \right.$$

- missä **puoliintumisaika**  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ ,  $\lambda$  = hajoamisvakio (1/s).
- hajoamislain muodosta (1) saadaan laki (2), kun aikaväli on pieni;  $dN = -\lambda dt$  ja integroidaan puolittain. (totea!)
- puoliintumisaika  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$  saadaan kaavasta (3), kun asetetaan:  $t = T_{1/2}$  ja  $N = N_0/2$ . (totea!)  
*Osoita, että lausekkeesta 3) saadaan lauseke 4).*

## **AKTIIVISUUS A**

= **hajoamisten lukumäärä aikayksikössä**;  $A = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|$ .

- aktiivisuuden yksikkö on  $[A] = \frac{1}{s} = \text{Bq}$  (= becquerel)
- esim. jos näytteen aktiivisuus on 1 Bq, niin siinä tapahtuu keskimäärin yksi hajoaminen sekunnissa
- kun aikaväli  $\Delta t$  on pieni, niin aktiivisuus  $A = -\frac{dN}{dt}$

Koska  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , niin  $A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d(N_0 e^{-\lambda t})}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$ .

Aktiivisuus ajan  $t$  kuluttua on siis

$$A = \lambda N.$$

Olkoon aktiivisuus alussa  $A_0 = \lambda N_0$ ,

missä  $N_0$  on aktiivisten ytimien määrä alussa ( $t = 0$ ).

Tällöin saadaan siis  $A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$ .

Lausekkeessa  $A = \lambda N$ ,  $\lambda$  = hajoamisvakio (1/s) ja ytimien lukumäärä voidaan laskea kahdella eri tavalla:

$$N = nN_A = \frac{m}{M} N_A \quad \text{tai} \quad N = \frac{m}{Au}.$$

Eo. lausekkeissa  $n$  = ainemäärä (mol),  $m$  = massa (g),

$M$  = moolimassa (g/mol),  $N_A$  = Avogadron vakio,

$A$  = massaluku ja  $u$  = atomimassayksikkö (ks. MAOL s. 71).

Huom! Jos suhteellista atomimassaa ei ole taulukossa, voidaan moolimassa  $M$  ottaa massaluvun  $A$  mukaan:  $M = A$  (g/mol).

**Aktiivisuus hetkellä  $t$  on**

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

(MAOL s. 127 (123))

- missä  $A$  = aktiivisuus hetkellä  $t$

$$A_0 = \text{aktiivisuus alkuhetkellä } (t = 0), \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

## RADIOHIILIMENETELMÄ

= radioaktiivinen iänmääritys radioaktiivisen hiili-14 – isotoopin avulla

- hiili-14 –isotoopin  ${}^{14}_6\text{C}$  puoliintumisaika  $T_{1/2} = 5730$  a.

- muinaisten eläinten, kasvien ja esineiden iänmääritys

- menettelytapa:

- verrataan tutkittavan näytteen  ${}^{14}\text{C}$ -pitoisuutta elävän organismin  ${}^{14}\text{C}$ -pitoisuuteen

- mitataan säteilymittarilla aktiivisuudet (Bq):

-  $A_0$  = elävän organismin (kasvi/eliö) aktiivisuus

-  $A$  = kuolleen organismin aktiivisuus

- lasketaan näytteen ikä, kun hiili-14 –isotoopin puoliintumisaika

$T_{1/2}$  tunnetaan, esim. lausekkeesta  $t = \frac{\ln \frac{A_0}{A}}{\ln 2} \cdot T_{1/2}$  tai vast.

- eo. lauseke voidaan johtaa aktiivisuuden A lausekkeesta esim. seuraavasti:

$$\begin{array}{l|l}
 A = A_0 e^{-\lambda t} & : A_0 \\
 \frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} & \text{otetaan logaritmi } \ln \text{ puolittain} \\
 \ln \frac{A}{A_0} = \ln e^{-\lambda t} & \\
 \ln \frac{A}{A_0} = -\lambda t \cdot \ln e & | \ln e = 1 \\
 \ln \frac{A}{A_0} = -\lambda t & | : (-\lambda) \\
 \frac{\ln \frac{A}{A_0}}{-\lambda} = t & \Rightarrow t = \frac{\ln \frac{A_0}{A}}{\lambda}
 \end{array}$$

Sijoitetaan  $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$  eo. lausekkeeseen, jolloin saadaan

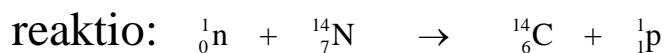
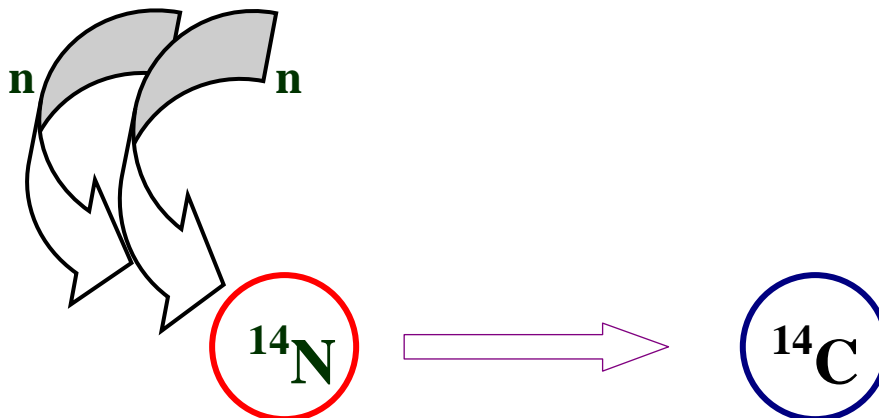
$$t = \frac{\ln \frac{A_0}{A}}{\frac{\ln 2}{T_{1/2}}} = \frac{T_{1/2} \cdot \ln \frac{A_0}{A}}{\ln 2} = \frac{\ln \frac{A_0}{A}}{\ln 2} \cdot T_{1/2}$$

**Nykyisin radiohiiliajoitukseen käytetään useimmiten hiukkaskiihdytintä, jolla määritetään suoraan isotooppien  $^{14}\text{C}$  ja  $^{12}\text{C}$  atomien lukumääräsuhde (isotooppisuhde)  $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}$**

tutkittavassa näytteessä.

### Radioaktiivisen hiili-14 –isotoopin synty:

- kosmisen säteilyn neutronit törmäävät ilmakehän typpi-14 – isotooppeihin, jolloin syntyy radioaktiivinen hiili-14 -isotooppi



Oletus: kosminen säteily  $\approx$  vakio, jolloin  $^{14}\text{C}$  –pitoisuus pysyy ilman hiilidioksidissa  $\text{CO}_2$  vakiona  $\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} = \text{vakio}\right)$ .

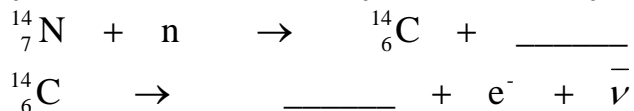
- elävät kasvit saavat ilmasta vakio-osuuden C-14–isotooppia  $^{14}_6\text{C}$   
→ radiohiili C-14 etenee ravintoketjun kautta vakio-osuutena myös eläimiin
- organismin (kasvi/eliö) kuollessa radiohiilen  $^{14}_6\text{C}$  määrä alkaa vähentyä, kun  $^{14}_6\text{C}$ - isotooppi hajoaa:  
$$^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}$$
- kun radiohiilen C-14 puoliintumisaika tunnetaan ( $T_{1/2} = 5730$  a), saadaan tutkittavan näytteen ikä t selville vertaamalla havaittua aktiivisuutta A vastaavaan elävän kudoksen aktiivisuuteen  $A_0$ .  
→ eliön kuolinhetki voidaan näin määrittää hiili-14 –isotoopin aktiivisuuden perusteella (ks. YO-S07-9, YO-S92-9).
- vastaavasti pitempien aikojen määrittäminen (esim. kallioperän ikä) voidaan määrittää  $^{40}\text{K}$ - ja  $^{238}\text{U}$  – isotooppien avulla.  
 $^{238}\text{U}$ :  $T_{1/2} = 4,468 \cdot 10^9$  a ja  $^{40}\text{K}$ :  $T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9$  a.  
(Vrt. YO-K89-9, YO-K84-8).

## TEHTÄVIÄ:

- 1) Tsernobylin ydinvoimalaonnettomuuden tapahtuessa 26.4.1986 reaktorisydämeen oli kertynyt uraanin halkeamistuotteina mm. noin 100 kg cesiumin isotooppia  $^{137}\text{Cs}$  ja 5 kg isotooppia  $^{134}\text{Cs}$ . Onnettomuuden seurauksena kummankin isotoopin kokonaismäärästä 13 % pääsi ilmakehään ja levisi pääasiassa eri puolille Eurooppaa. Laske  $^{137}\text{Cs}$ - ja  $^{134}\text{Cs}$  –päästöjen kokonaisaktiivisuudet päästöhetkellä ja tänään.  $^{137}\text{Cs}$ :n puoliintumisaika on 30,2 a ja  $^{134}\text{Cs}$ :n 2,1 a.  
(YO-K91-7, Fotoni 8, Esim. 3, s. 155-156, Fotoni 9, Esim. 7, s. 245).

- 2) Hiilidioksidin mukana joutuu elävään organismiin kosmisen säteilyn synnyttämää radioaktiivista isotooppia  $^{14}\text{C}$ , jonka puoliintumisaika on 5730 a.  $^{14}\text{C}$ -ytimien ja stabiilien  $^{12}\text{C}$ -ytimien lukumäärien suhde on elävässä organismissa vakio. Organismien kuollessa sen hiilidioksidin saanti loppuu ja  $^{14}\text{C}$ -pitoisuus alkaa vähetä hajoamisen vuoksi.

a) Täydennä asiaan liittyvät reaktioyhtälöt:



- b) Elävästä organismista otettu hiilinäyte, jonka massa on 1,0 g, lähettää  $14 \beta^-$ -hiukkasta minuutissa ja tutkittava 1,0 g näyte  $12 \beta^-$ -hiukkasta minuutissa. Laske näytteen ikä.
- c) Kuinka paljon (%) radioaktiivisen aineen ytimistä on jäljellä kuuden puoliintumisajan jälkeen?

(2ab: YO-K83-8, Fotoni 8, Esim. 3, s. 163, Fotoni 9, Esim. 10, s. 246-247, 2c: Fotoni 8, Esim. 2, s. 153).

- 3) Suosta löytyneessä suksenpalassa oli beeta-aktiivisen hiili-isotoopin  $^{14}\text{C}$  ja pysyvän isotoopin  $^{12}\text{C}$  määrien suhde neljäsosa tuoreen näytteen vastaavasta isotooppisuhteesta. Aktiivisen isotoopin puoliintumisaika on 5730 vuotta. Kuinka vanha suksenpala oli? Mihin olettamuksiin vastauksesi perustuu? (HY fysiikan valintakoe 94, t 4, Fotoni 8, teht. 6-68, Fotoni 9, teht. 8-84).

- 4) a) Radiohiiliajoituksen periaate (C-14 menetelmä)
- b) Nykyisin radiohiiliajoitukseen käytetään useimmiten hiukkakihihtintä, jolla määritetään suoraan isotooppien  $^{14}\text{C}$  ja  $^{12}\text{C}$  atomien lukumääräsuhde (isotooppisuhte) tutkittavassa näytteessä. Vuonna 1991 Tirolista löydetyn muumion ”Jäämies Ötzingin” radiohiiliajoitus antoi isotooppisuhteeksi  $6,7 \cdot 10^{-13}$ . Mikä olisi muumion ikä tämän tiedon perusteella, kun vastaava isotooppisuhte esimerkiksi elävässä puussa on  $1,2 \cdot 10^{-12}$ ? (YO-S07-9).

5) Arkeologisesta löydöstä otetun 1,0 g massaisen hiilinäytteen aktiivisuudeksi mitataan  $(7500 \pm 90)1/d$  (hajoamista/vrk). Laske näytteen ikä virherajoineen, kun tuoreesta puusta saadun 1,0 g hiilinäytteen keskimääräinen aktiivisuus on 20200 1/d. Radiohiilen puoliintumisaika on 5730 a.  
(YO-S92-9b, Fotoni 8, teht. 6-67).

6) Erään teorian mukaan aurinkokuntamme on saanut alkunsa supernovaräjähdyksestä. Oletetaan, että supernovassa oli uraani-isotooppeja  $^{235}\text{U}$  ja  $^{238}\text{U}$  yhtä runsaasti. Nykyisin suhteelliset runsaudet maan päällä ovat 0,72 % ( $^{235}\text{U}$ ) ja 99,3 % ( $^{238}\text{U}$ ). Laske tämän perusteella aurinkokunnan ikä, kun  $^{235}\text{U}$ -isotoopin puoliintumisaika on  $7,04 \cdot 10^8$  a ja  $^{238}\text{U}$ -isotoopin  $4,47 \cdot 10^9$  a.  
(YO-K89-9, Fotoni 8, teht. 6-74, Fotoni 9, teht. 8-105).

7) Radioaktiivinen isotooppi  $^{238}\text{U}$  hajoaa välivaiheiden kautta stabiiliksi isotoopiksi  $^{206}\text{Pb}$ , jolloin puoliintumisaika on  $4,47 \cdot 10^9$  a. Kuusta tuotu kivinäyte sisältää näitä isotooppeja suhteessa  $N_{\text{Pb}} : N_{\text{U}} = 0,333$ . Laske näytteen ikä olettaen, että koko  $^{206}\text{Pb}$ -määrä on syntynyt  $^{238}\text{U}$ :n hajoamisen tuloksena.  
(YO-K84-8, Fotoni 8, teht. 6-73, Fotoni 9, teht. 8-88).

.....

### Vastaukset:

- 1) Päästöhetkellä (26.4.1986):  $4,2 \cdot 10^{16}$  Bq ( $^{137}\text{Cs}$ )  
 $3,1 \cdot 10^{16}$  Bq ( $^{134}\text{Cs}$ )  
 Tänään (26.04.2009):  $2,5 \cdot 10^{16}$  Bq ( $^{137}\text{Cs}$ )  
 $1,5 \cdot 10^{13}$  Bq ( $^{134}\text{Cs}$ ).
- 2) a)  $^1_1\text{p}$  (=  $^1_1\text{H}$ ) ja  $^{14}_7\text{N}$   
 b) 1300 a c) 1,6 %.
- 3) Noin 11500 a.
- 4) Ks. YO-S07-9, YO-S92a.
- 5)  $(8200 \pm 100)$  a.
- 6)  $5,9 \cdot 10^9$  a.
- 7)  $1,85 \cdot 10^9$  a.