

## **Työ 55, Säteilysuojelu**

Ryhmä: 18

Pari: 1

Jonas Alam

Antti Tenhiälä

Selostuksen laati: Jonas Alam

Mittaukset tehty: 7.4.2000

Selostus jätetty: 12.5.2000

# 1. Johdanto

Tutkimme työssämme kolmea eri säteilylajia:  $\alpha$ ,  $\beta$  ja  $\gamma$ -säteilyä. Kaikki edellä mainitut säteilytyypit syntyvät atomien ytimissä tapahtuvista ilmiöistä.  $\alpha$ -säteily syntyy kun labiili ydin emittoi  $4\text{He}$ -ytimen, jossa on kaksi protonia ja kaksi neutronia.  $\alpha$ -säteilyn kantama riippuu sen liike-energiasta, mutta on yleensä suhteellisen lyhyt. Se absorboituu ohuisiinkin esteisiin, ja ilmassa kantama on muutamien senttimetrien luokkaa.

$\beta$ -säteilyä on kahta eri tyyppiä.  $\beta^-$ -hajoamisessa, ytimen neutroni muuttuu elektroniksi, protoniksi ja antineutriinoksi, joista vain elektroni ja antineutriino emittoituvat pois ytimestä, ja ytimen varausluku kasvaa täten yhdellä.  $\beta^+$ -hajoamisessa taas protoni muuttuu positroniksi, neutroniksi ja neutriinoksi.  $\gamma$ -säteily ei ole hiukkassäteilyä kuten edelliset, vaan lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Sitä syntyy ytimien siirtyessä alempiin viritystiloihin ja yleensä myös muiden säteilylajien yhteydessä.

## 2. Laitteisto ja menetelmät

### ***Gammasäteilyn mittaaminen***

Gammasäteilyn lähde oli  $60\text{Co}$ -isotooppi, jossa yhden atoimin hajotessa syntyy kaksi gammakvanttia energioiltaan 1173 ja 1332 keV. Lisäksi säteilylähteestä vapautuu beta-hiukkasia, joita käyttämämme BICRON-tuikedetektor ei havaitse. Lähteen aktiivisuus oli 5.3.1988, 16  $\mu\text{Ci}$  ja  $60\text{Co}$ :n puoliintumisaika on 5,272 a. Detektorin pohjan ala on  $a=5,07\text{ cm}^2$  ja se havaitsee noin  $\epsilon=32\%$  siihen osuvista gammakvanteista ja detektorin etäisyys lähteestä oli helposti säädeltävissä ja mitattavissa.

Ensimmäiseksi mittasimme gammasäteilyn pulssitaajuuden kymmenellä eri sopivasti valitulla etäisyydellä, mittausajalla  $t=10\text{s}$ . Sitten selvitimme taustasäteilyn vaikutuksen mittauksiin, mittaamalla säteilyä  $t=200\text{s}$  ajan  $r=80\text{cm}$ :n etäisyydellä lyijytiili lähteen ja detektorin välissä ja ilman. Seuraavaksi tutkimme pulssimäärän hajontaa suorittamalla mittaukset 15 kertaa etäisyydellä  $r=5\text{cm}$ ,  $t=10\text{s}$  ja  $r=30\text{cm}$ ,  $t=10\text{s}$ . Lopuksi mittasimme lyijylevyn vaimennusta pulssitaajuuteen etäisyydellä  $r=30\text{cm}$ .

### ***$\alpha$ - ja $\beta$ -säteily***

Alphalähteenä käytimme  $241\text{Am}$ - ja betalähteenä  $90\text{Sr}$ -isotooppia.  $241\text{Am}$ :n puoliintumisaika on 432 a ja lähteestä saatavien alphahiukkasten liike-energia on 5,5 MeV.  $90\text{Sr}$ :n lähettämien betahiukkasten maksimiliike-energia on 0,53 MeV ja lähteen puoliintumisaika on 29 a. Mittarina käytimme Nuclear Enterprises P, C.M.5/1 ja anturina  $\text{ZnS}$ -tukepäättä ja valomonistinputkea. Anturi havaitsee tuikepäähän osuneista alphahiukkasista 12% ja betahiukkasista 23%. Lähteen halkaisija on  $(10,0\pm 0,2)\text{ mm}$ , mylarkalvon tiheys on  $1600\text{ kg/m}^3$  ja pleksin tiheys on  $1200\text{ kg/m}^3$ .

### **Kaavoja**

Hajoaminen on tapahtuma, joka noudattaa todennäköisyyslakeja. Hajoamislain mukaan

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

missä  $\lambda$  on ajasta riippumaton hajoamisvakio ja  $N_0$  on ytimien määrä alkuhetkellä. Puoliintumisaika  $T_{1/2}$  on aika, jonka kuluessa radioaktiivisten ytimien määrä on vähentynyt puoleen. Kaavasta (1) saadaan puoliintumisajaksi

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

Hajoamistapahtumien nopeuden mittana käytetään aktiivisuutta  $A$ , joka on hajoamisten lukumäärä aikayksikössä

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (3)$$

Absorboitunut annos

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (4)$$

on pieneen massa-alkioon absorboitunut säteilyenergia ja sen nimitys on Gray. Se sopii kaikille säteilylajeille kaikissa väliaineissa. Edellisestä saadaan suoraan annosnopeus eli absorboitunut annos aikayksikköä kohti

$$D' = \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad (5)$$

Seuraavaksi tutkitaan gammasäteilyn koeasetelmaa. Jos radioaktiivinen pistelähde on etäisyydellä  $r$  detektorista, on detektorin havaitsema pulssitaajuus

$$n = n_\gamma A \varepsilon \Omega \quad (6)$$

missä  $n_\gamma$  on gammakvanttien lukumäärä radioaktiivista hajoamista kohti,  $\varepsilon$  on detektorin efektiivisyys ja  $\Omega$  se avaruuskulma, jossa lähde näkee detektorin. Kun kaavaan lasketaan  $\Omega$ :n arvo, saadaan pulssitaajuudeksi

$$n = n_\gamma A \varepsilon \frac{a}{4\pi r^2} \quad (7)$$

missä  $a$  on detektorin pinta-ala. Kirjoitetaan vielä annosnopeus muotoon

$$D' = \Gamma A \frac{1}{r^2} \quad (8)$$

missä tekijä  $\Gamma$  on annosnopeusvakio, joka riippuu säteilylähteenä olevasta isotoopista. Annosnopeudesta saadaan biologinen annosnopeus kertomalla se altistumisajalla ja säteilykohtaisella laatukertoimella  $Q$

$$H = \frac{Qt\Gamma A}{r^2} \quad (9)$$

Annosnopeudeksi  $s$ :n paksuisen kudoksen taakse saadaan

$$D' = D_0 e^{-\mu s} \quad (10)$$

missä  $D_0$  on annosnopeus kudoksen edessä ja  $\mu$  on kudoksen matkavaimennuskerroin. Kun  $D_0$ :n paikalle sijoitetaan kaavan (8) annosnopeus, saadaan

$$D' = \Gamma A \frac{e^{-\mu s}}{r^2} \quad (11)$$

## 3. Tulokset

### ***Gammasäteily***

#### ***Aktiivisuus***

Liitteeseen (2) on piirretty pulssitaajuus  $1/r^2$ :n funktiona, eli kaavan (7) kuvaaja. Kuvaajan arvot on taulukoitu liitteeseen (1) ja virheet on laskettu liitteessä (2).

Kuvaajasta nähdään että suora ei kulje origon kautta, mikä johtuu taustasäteilystä. Taustasäteily ei vakiona kuitenkaan vaikuta kulmakertoimeen, jonka avulla aktiivisuus A lasketaan. Ratkaistaan suoran yhtälön kulmakertoimesta A, ja sijoitetaan arvot. Kulmakertoimen arvo virherajoiheen on laskettu liitteessä (2).

$$A = \frac{4\pi k}{n_\gamma \varepsilon a} \quad (12)$$

Sijoittamalla saadaan  $A = \frac{4\pi \cdot 2,96 m^2 / s}{2 \cdot 0,32 \cdot 5,07 \cdot 10^{-4} m^2} \approx 114,6 kBq$ . Aktiivisuuden virheeksi saadaan

$$\Delta A = \frac{4\pi \Delta k}{n_\gamma \varepsilon a} \quad (13)$$

Sijoittamalla arvot, saadaan  $\Delta A = \frac{4\pi \cdot 0,11 m^2 / s}{2 \cdot 0,37 \cdot 5,07 \cdot 10^{-4} m^2} \approx 3,7 kBq$ . Lähteen alkuperäinen aktiivisuus n. 12 vuotta sitten oli 592 kBq. Tämänhetkinen aktiivisuus saadaan kaavasta

$$A = A_0 e^{-t \ln 2 / T_{1/2}} \quad (14)$$

Sijoittamalla arvot kaavaan (14), saadaan  $A = 592 kBq \cdot e^{-12,099 a \cdot \ln 2 / 5,272 a} \approx 120,6 kBq$ , mikä on samaa suuruusluokkaa mittauksista saadun aktiivisuuden (115±4) kBq:n kanssa, mutta ei teoreettisena arvona ole täsmälleen sama.

### **Puoliintumisvakio**

Pulssitaajuuden pieneneminen väliaineessa voidaan laskea kaavasta

$$n = n_0 e^{-\mu s} \quad (15)$$

missä  $\mu$  on matkavaimennuskertoimen ja  $s$  kuljettu matka. Matkavaimennuskertoimen avulla voidaan laskea puoliintumisvakio kaavalla

$$s_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (16)$$

Ratkaisemalla kaavoista (15) ja (16) puoliintumispaksuus, saadaan

$$s_{1/2} = -\frac{s \ln 2}{\ln \frac{n}{n_0}} \quad (17)$$

missä  $s = (4,4 \pm 0,1)$  mm on lyijylevyn paksuus,  $n_0 = 11725/200s - 28,6$  1/s on pulssitaajuus ilman lyijylevyä ja  $n = 10287/200s - 28,6$  1/s on pulssitaajuus lyijylevyn kanssa. Taustasäteilyn pulssitaajuus on saatu liitteestä (1) ja sen suuruus on 28,6 1/s.

Sijoitetaan arvot:  $s_{1/2} = -\frac{0,0044m \cdot \ln 2}{\ln \frac{22,8}{30,0}} \approx 1,1cm$ . Virheet saadaan kaavan (17)

osittaisdifferentiaalilla:

$$\Delta s_{1/2} = \frac{s \ln 2}{\left(\ln \frac{n}{n_0}\right)^2 n_0} \left( \frac{\Delta s}{s} n_0 \ln \frac{n}{n_0} + \frac{n \Delta n}{n_0} + \Delta n_0 \right) \quad (18)$$

mihin arvot sijoittamalla saadaan puoliintumismatkan virheeksi  $\pm 0,03$  cm.

### **Virhetarkastelu**

Toistokokeen tulokset on taulukoitu liitteeseen (1). Saimme  $N=15$ :n mittauksen tuloksina  $r=5,0cm$ :n mittauksille keskiarvoksi 12231,4 1/s ja  $r=30,0cm$ :n mittauksille keskiarvoksi 612,33 1/s. Keskiarvon keskivirhe voidaan laskea niille kaavan

$$\Delta n = \sqrt{\frac{\sum (n_i - \bar{n})^2}{N(N-1)}} \quad (19)$$

Poisson-jakautuneelle jakaumalle keskihajonta voidaan laskea kaavalla

$$\sigma = \sqrt{n} \quad (20)$$

Sijoittamalla arvot saadaan seuraavat tulokset:

### Taulukko 1. Virheet

r (cm)	$\Delta n$	$\sigma$
5	15,7	111
30	7,0	24,7

### Biologinen säteilyannos

Lasketaan biologinen annosnopeus työskentelyetäisyydellä kaavan (9) avulla:

$$H = \frac{1,0 \cdot 1,0h \cdot 3,4 \cdot 10^{-13} \text{Svm}^2 h^{-1} \text{Bq}^{-1} \cdot 114,6 \cdot 10^3 \text{Bq}}{(0,80m)^2} \approx 0,061 \mu\text{Sv}$$

Virheet saadaan kaavan (9) osittaisdifferentiaalilla:

$$\Delta H = \frac{Qt\Gamma A}{r^2} \left( \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{2\Delta r}{r} \right) \quad (21)$$

$$\Delta H = \frac{1,0 \cdot 1,0h \cdot 3,4 \cdot 10^{-13} \text{Svm}^2 h^{-1} \text{Bq}^{-1} \cdot 114,6 \cdot 10^3 \text{Bq}}{(0,80m)^2} \left( \frac{0,1h}{1,0h} + \frac{3,7 \text{Bq}}{114,6 \text{Bq}} + \frac{2 \cdot 0,10m}{0,80m} \right) \approx 0,023 \mu\text{Sv}$$

### Taustasäteily

Mittasimme pulssitaajuuden 80 cm:n etäisyydellä lähteestä ilman lyijytiilä välissä, ja sen kanssa. Näin saimme selville taustasäteilyn vaikutuksen mittauksiin. Taustasäteilyn pulssitaajuudeksi saatiin 28,6 1/s ja taustasäteilyn ja lähteen yhteiseksi pulssitaajuudeksi ko. etäisyydellä saatiin 32,9 1/s. Huomataan siis että taustasäteilyn aiheuttama annos on suuruusluokaltaan merkittävästi suurempi (noin 87% säteilystä kun r=80cm) kuin lähteen aiheuttama annos työn aikana työskentelyetäisyydellä.

### $\alpha$ - ja $\beta$ -säteily

Alphasäteilyn pulssitaajuudeksi 5 mm:n päässä kalvosta saimme (2900±100) 1/s ja 14  $\mu\text{m}$ :n paksuisen mylarkalvon kanssa (0,2±0,2) 1/s, eli lähes nolla. Raja-etäisyydeksi, jolla alphasäteilyä ei enää havaittu, saimme (20±1) mm.

Betasäteilylle mittasimme (320±50) 1/s 5mm:n etäisyydellä lähteestä, ja vastaavasti mylarkalvo välissä (320±50) 1/s. Mittasimme myös betasäteilyn pulssitaajuuden (3,1±0,5) mm:n paksuisen pleksilevyn läpi ja saimme (45±10) 1/s.

Mylarkalvon massa voidaan laskea kaavan

$$m = h\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \rho \quad (22)$$

Kaavoista (4), (5), (8), (9) ja (13) saadaan biologiseksi annosnopeudeksi

$$H = \frac{4Qn_\alpha \Delta E}{h\pi d^2 \rho \Delta t} \quad (23)$$

johon sijoittamalla saadaan alphasäteilyn aiheuttama annos mylarkalvoon

$$H = \frac{4 \cdot 20 \cdot 2900 / 0,12 \cdot 1 / s \cdot 5,5 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} J}{14 \cdot 10^{-6} m \cdot \pi \cdot (0,0100m)^2 \cdot 1600 kg / m^3 \cdot 3600s} \approx 67 \mu Sv / h$$

H:n virhe saadaan osittaisdifferentoimalla kaavaa (23):

$$\Delta H = \frac{4Qn_\alpha \Delta E}{h\pi d^2 \rho \Delta t} \left( \frac{\Delta n_\alpha}{n_\alpha} + \frac{2\Delta d}{d} \right) \quad (24)$$

$$\Delta H = 67,24(0,34 + 0,04) = 25 \mu Sv/h$$

Lasketaan nyt kaavan (23) avulla betasäteilyn aiheuttama annos mylarkalvolle:

$$H = \frac{4 \cdot 1 \cdot 320 / 0,23 \cdot 1 / s \cdot 0,53 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} J}{14 \cdot 10^{-6} m \cdot \pi \cdot (0,0100m)^2 \cdot 1600 kg / m^3 \cdot 3600s} \approx 0,0187 \mu Sv / h$$

$$\Delta H = 0,0187(0,31 + 0,04) \mu Sv/h = 0,007 \mu Sv/h$$

ja pleksilevyille:

$$H = \frac{4 \cdot 1 \cdot (320 - 45) / 0,23 \cdot 1 / s \cdot 0,53 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} J}{0,0031m \cdot \pi \cdot (0,0100m)^2 \cdot 1200 kg / m^3 \cdot 3600s} \approx 0,000097 \mu Sv / h$$

$$\Delta H = 0,0001(0,22 + 0,04) \mu Sv/h = 0,000026 \mu Sv/h$$

## 4. Yhteenveto

Gammasäteilyltä on hankala suojautua, koska se läpäisee väliaineita paremmin kuin alpha- ja betasäteily. Alphasäteily on kuitenkin vaarallisempaa joutuessa sisäelimiin esimerkiksi ravinnon mukana, koska alphahiukkasilla on sähkövaraus kohtalaisen suuri massa. Vaarallisuus huomataan suuresta annoksesta mylarkalvolle, mikä on laskettu yllä. Mittauksia tehdessämme emme saaneet suuria annoksia mitatuista lähteistä verrattuna säädettyihin rajoihin ja taustasäteilyyn.

Aktiivisuusmittauksen tulos ( $115 \pm 4$ ) kBq näyttää onnistuneen kohtalaisen hyvin, kun verrataan sitä teoreettiseen arvoon.

### ***Liitteet***

Liite 1. Mittauspöytäkirja

Liite 2.  $n=f(1/x^2)$  -kuvaaja

### ***Lähdeviitteet***

Classical and Modern Physics, International edition, Gettys, Keller, Skove, 1989

Fysiikan Laboratoriotyöt, Jukka Vaari, Suomen fyysikkoseura r.y, Gummerus 1994

Maol-taulukot, Matematiikka, Fysiikka, Kemia, Seppänen, Otava 1992.