

Työ 55

Radioaktiivisuus ja säteily

Työvuoro **51** pari **4**

Juho Salmi 80391C
Jukka Kemppainen

Selostuksen laati *Juho Salmi*

Mittaukset suoritettu **11.11.2013**
Selostus palautettu **18.11.2013**

1 Johdanto

Atomit koostuvat sen ytimeen pakkautuneista protoneista ja neutroneista sekä ulkokehällä sijaitsevista elektroneista. Ytimen hiukkasten välillä on vahva vuorovaikutus, joka pitää atomiydintä koossa. Sähkömagneettinen vuorovaikutus saa puolestaan positiivisesti varautuneet ytimen protonit hylkimään toisiaan. Näiden voimien yhteisvaikutuksesta vain tietyn protoni- ja neutronimäärän sisältävät atomiytimet ovat stabiileja. [1, 2]

Epästabiilit atomiytimet pyrkivät stabiileiksi spontaanisti hajoamalla. Tätä kutsutaan radioaktiiviseksi hajoamiseksi. Hajoamisessa vapautuneiden hiukkasten sinkoutumista ympäristöön kutsutaan radioaktiiviseksi säteilyksi. [1, 2]

Tässä työssä tutkitaan alfa-, beeta- ja gammahajoamisia sekä -säteilyä. Alfahajoamisessa ydin emittoi kahden protonin ja neutronin muodostaman alfahiukkasen eli heliumytimen. Beetahajoamisessa protoni muuttuu neutroniksi tai päin vastoin. β^- -hajoamisessa ytimen neutroni muuttuu protoniksi vapauttaen elektronin ja antineutriinon. β^+ -hajoamisessa protoni muuttuu neutroniksi vapauttaen positronin ja neutriinon. Vapautuvia elektroneita tai positroneita kutsutaan beetahiukkasiksi ja -säteilyksi. [1, 2]

Alfa- ja beetahajoamisissa atomiydin voi jäädä virittyneeseen tilaan. Viritystilan lauetessa ydin emittoi viritysenergiansa gammafotonina. Tätä kutsutaan gammahajoamiseksi ja -säteilyksi. [1, 2]

Alfa- ja beetasäteilyä kutsutaan hiukkassäteilyksi, sillä niissä vapautuu hiukkasia, joilla on massa. Gammasäteily on puolestaan sähkömagneettista säteilyä. [1, 2]

Eri radioaktiivisen säteilyn tyypeillä on erilaiset ominaisuudet [1, 2]. Tässä työssä tutustutaan alfa-, beeta- ja gammasäteilyn kantamaan ilmaan sekä läpäisykykyyn ja absorptioon erilaisissa väliaineissa.

2 Laitteisto ja menetelmät

Säteilynilmaisin eli detektori on laite, joka tuottaa jännitepulssin havaitessaan säteilyhiukkasen. Pulssitaajuus (\dot{n}) on pulssimäärä (n) aikayksikköä kohden. Detektori ei havaitse kaikkia siihen osuvia hiukkasia. Havaitsemistodennäköisyyttä kutsutaan detektorin efektiivisyydeksi (ϵ). Radioaktiivisten hajoamisten lukumäärä noudattaa Poisson-jakaumaa, joten pulssimäärän virhearviona voidaan käyttää sen neliöjuurta: $\Delta n = \sqrt{n}$.

Lähteen aktiivisuus A tarkoittaa siinä tapahtuvien radioaktiivisten hajoamisten määrää aikayksikköä kohden. Aktiivisuuden yksikkö on 1/s, jonka erityisnimi on Becquerel (Bq). Aktiivisuus voidaan määrittää mittaamalla lähteen säteilyn pulssitaajuutta (\dot{n}). Oletetaan lähteen koko etäisyyteen nähden niin pieneksi, että lähde voidaan käsitellä pistemäisenä. Oletetaan lisäksi detektori niin pieneksi, että sitä voidaan kuvata tasona. Gammasätei-

lyn kohdalla vuorovaikutustodennäköisyys ilman kanssa on niin pieni, ettei säteilyä absorboidu merkittävästi ennen sen osumista detektoriin. Tällöin detektorin havaitsema pulssitaajuus on

$$\dot{n} = \epsilon \cdot A \cdot n_A \cdot \frac{\Omega}{4\pi}, \quad (1)$$

jossa n_A on yhdessä hajoamisessa emittoituvien gammakvanttien määrä, jossa lähde näkee detektorin. Detektorin pinta-ala on a_d , joten kaava voidaan kirjoittaa muotoon

$$\dot{n} = \epsilon \cdot A \cdot n_A \cdot \frac{a_d}{4\pi r^2}, \quad (2)$$

jossa r on detektorin etäisyys lähteestä. Pulssitaajuus on siis kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön.

Säteilyn absorptiotodennäköisyys väliaineessa kasvaa väliaineen järjestyksluvun funktiona ja pienenee fotonin energian funktiona. Gammasäteilyn intensiteetti φ vaimenee säteilyn väliaineessa kulkeman matkan x funktiona eksponentiaalisesti:

$$\varphi(x) = \varphi_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}, \quad (3)$$

jossa φ_0 on intensiteetti ennen väliaineeseen osumista. Matkavaimennuskerroin μ on väliaineesta ja fotonin energiasta riippuva absorptiotodennäköisyys pituusyksikköä kohden. Detektorin mittaama pulssitaajuus on suoraan verrannollinen säteilyn intensiteettiin:

$$\dot{n} = \epsilon \cdot \varphi \cdot a_d \quad (4)$$

Osueessaan väliaineeseen, säteily ionisoi sen atomeita ja molekyyliä. Absorboitunut annos D määritellään kohteeseen absorboituneen säteilyenergian ja kohteen massan suhteena:

$$D = \frac{E}{m} \quad (5)$$

Absorboituneen annoksen yksikkö on J/kg, jonka erityisnimitys on Gray (Gy). Annosnopeus on absorboitunut annos aikayksikköä kohti:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = \frac{dE}{dt} \frac{1}{m} \quad (6)$$

Energiaa siirtyy väliaineeseen saman verran kuin säteilyn intensiteetti vaimenee, joten annosnopeus voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\dot{D} = \frac{\varphi \cdot a \cdot p_{abs} \cdot \bar{E}}{m}, \quad (7)$$

jossa a on tarkasteltavan tilavuusalkion pinta-ala, p_{abs} fotonien absorboitumistodennäköisyys ja \bar{E} fotonien keskimääräinen energia. Tarkasteltaessa pientä tilavuusalkiota voidaan absorptiotodennäköisyys kirjoittaa muotoon

$$p_{abs} = \mu_{en} \cdot l, \quad (8)$$

jossa μ_{en} on energian absorptiotodennäköisyys pituusyksikköä kohden ja l tilavuusalkion pituus. Massa voidaan puolestaan kirjoittaa puolestaan tiheyden, pinta-alan ja pituuden tulona ($\rho \cdot a \cdot l$) ja ϕ voidaan ratkaista kaavasta 4. Saadaan siis

$$\dot{D} = \frac{\dot{n} \cdot a \cdot \mu_{en} \cdot l \cdot \bar{E}}{\epsilon \cdot a_d \cdot \rho \cdot a \cdot l} = \frac{\dot{n} \cdot \bar{E}}{\epsilon \cdot a_d} \frac{\mu_{en}}{\rho} \quad (9)$$

jossa tekijää μ_{en}/ρ kutsutaan energia-absorption massakertoimeksi. Vaihdoehtoisesti voidaan pienillä etäisyyksillä mitatessa arvioida, että annosnopeus voidaan määrittää vaimentumattoman (\dot{n}_0) ja väliaineessa vaimentuneen (\dot{n}_1) pulssitaajuuden avulla.

$$\varphi \cdot a \cdot p_{abs} = \frac{\dot{n}_0 - \dot{n}_1}{\epsilon} \quad (10)$$

Sijoittamalla tämä kaavaan 7 saadaan annosnopeudeksi

$$\dot{D} = \frac{(\dot{n}_0 - \dot{n}_1) \cdot \bar{E}}{\epsilon \cdot m}. \quad (11)$$

Eri säteilyn lajien samansuuruisilla absorboituneilla annoksilla on erilaiset biologiset vaikutukset. Ekvivalenttiansnos painottaa säteilyannosta eri painokertoimella kutakin säteilylajia kohden ja efektiivinen annos painottaa ekvivalenttiansnosta kunkin kohde-elimien painokertoimella. Ekvivalenttiansnoksen yksikkö on J/kg eli Sievert (Sv).

[1]

2.1 Alfa- ja beetasäteilyn mittaus

Alfa- ja beetasäteilyn mittauksessa säteilylähteet ja detektori on asennettu muovikoteloon, jossa säteilylähteiden etäisyyttä detektorista voidaan säätää ruuvilla ja säteilylähde voidaan vaihtaa tappia vetämällä tai työntämällä. Detektoriin kytketystä mittalaitteesta voidaan lisäksi valita mitattavaksi haluttu säteilylaji. Alfäsäteilyn lähde koostuu Am-241-isotoopista ja beetasäteilyn (β^-) lähde Sr-90-isotoopista. Lähteet ovat tasomaisia, halkaisijaltaan 10 mm. Alfahiukkasten energia on noin 5,5 MeV. Beetahiukkasten maksimenergia 546 keV ja keskimääräinen energia 196 keV. Työssä tutkitaan säteilyn vaimenemista mylarkalvossa, jonka massa on 1,32 mg sekä pleksilevyssä, jonka massa on 254 mg. [1]

2.2 Gammasäteilyn mittaus

Gammasäteilyn mittauksessa käytetään säteilylähteenä Co-60-isotooppia, joka β^- -hajoamisella muuttuu Ni-60-isotoopiksi, jonka puoliintumisaika on 5,272 vuotta. Hajoamisen jälkeen ydin jää viritystilaan, jonka purkautuessa emittoituu kaksi gammakvanttia energioiltaan 1173 keV ja 1332 keV. Detektorina käytetään tuikeilmaisinta, jonka pohjan pinta-ala on $5,07\text{cm}^2$. Detektori havaitsee noin 36 % tuiekiteeseen osuvista gammakvanteista. Annosnopeuden mittaukseen käytetään Geiger-Muller-putkeen perustuvaa dosimetria. [1]

3 Tulokset

3.1 Alfa- ja beetasäteily

Mitataan alfalähteen säteilyn pulssitaajuus 5 mm etäisyydeltä vaimentamattomana sekä mylarkalvon kanssa.

Taulukko 1: Alfalähteen aiheuttama pulssitaajuus 5mm etäisyydeltä

vaimentumaton	$4000 \pm 200Bq$
mylarkalvon kanssa	$0,25 \pm 0,25Bq$

Mitataan alfasäteilyn kantama ilmassa siirtämällä alfalähdettä kauemmas detektorista. Saadaan, että $23 \pm 1\text{mm}$ etäisyydellä detektori ei havaitse kuin satunnaisia hajoamisia, joten etäisyys voidaan katsoa alfasäteilyn kantamaksi.

Mitataan beetalähteen säteilyn pulssitaajuus 5mm etäisyydeltä vaimentamattomana, mylarkalvon ja pleksilevyn kanssa.

Taulukko 2: Beetalähteen aiheuttama pulssitaajuus 5mm etäisyydeltä

vaimentumaton	$350 \pm 50Bq$
mylarkalvon kanssa	$350 \pm 50Bq$
pleksilevyn kanssa	$125 \pm 25Bq$

Mitataan beetasäteilyn vaimenemista siirtämällä beetalähde niin kauas detektorista kuin mittalaitteella on mahdollista. Saadaan maksimietäisyydellä $83 \pm 0,5\text{mm}$ pulssitaajuudeksi $75 \pm 25Bq$.

Kaavasta 11 saadaan laskettua alfasäteilyn mylarkalvoon aiheuttama annosnopeus: $0,02J/kg \cdot s$

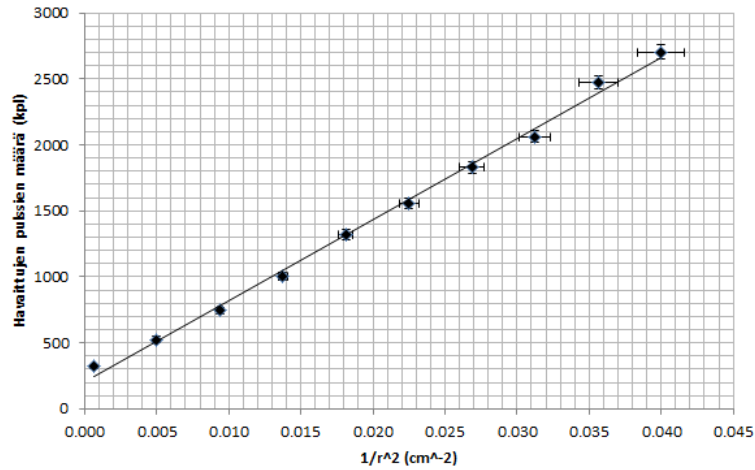
Beetasäteilyn pleksilevyyn aiheuttaman ekvivalenttiannoksen annosnopeus: $0,12\mu J/kg \cdot s$

3.2 Gammasäteily

Mitataan gammalähteen pulssien lukumäärää eri etäisyyksiltä tasavälisesti $1/r^2$ suhteen kymmenen sekunnin ajan. Etäisyyden virheeksi arvioidaan $\pm 0,1\text{cm}$ ja pulssimäärän virheeksi \sqrt{n} .

Taulukko 3: Gammalähteestä mitattujen pulssien määrä eri etäisyyksiltä 10 s aikana

Etäisyys (cm)	Havaitut pulssit (kpl)
5.0	2704
5.3	2474
5.7	2061
6.1	1830
6.7	1552
7.4	1320
8.5	1005
10.3	743
14.1	523
40.0	319



Kuva 1: Havaittujen pulssien määrä eri $1/r^2$ arvoilla.

Kuvaajasta saadaan kulmakertoimeksi $k = \frac{\Delta n}{\Delta \frac{1}{r^2}} = 62000\text{cm}^2$. Sen avulla voidaan ratkaista kaavasta 2 aktiivisuus, kun $\dot{n} = \frac{\Delta n}{\Delta t}$

$$A = \frac{\Delta n}{\Delta \frac{1}{r^2}} \frac{4\pi}{\epsilon \cdot n_A \cdot a_d \Delta t} = 0,021\text{MBq}, \quad (12)$$

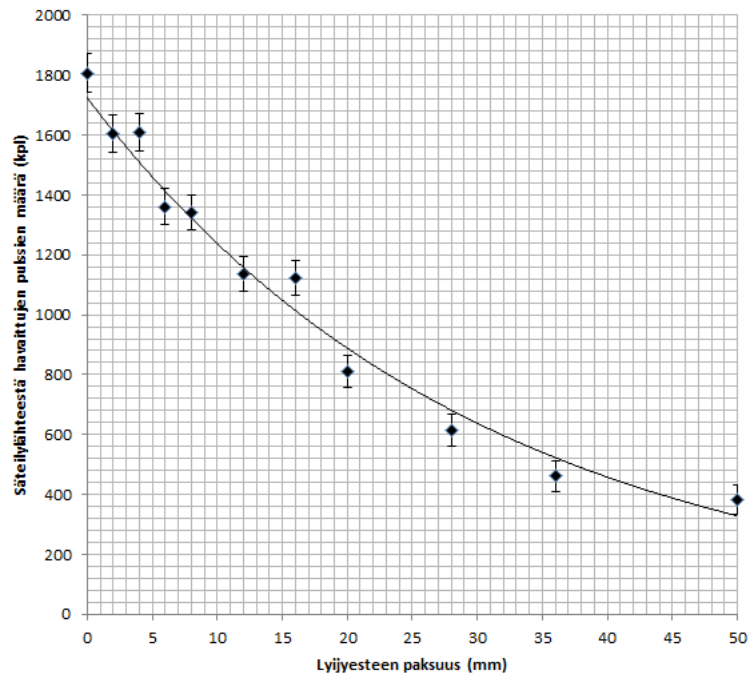
Tarkistetaan saatu vastaus puoliintumisaajan avulla. Lähteen aktiivisuus vuonna 1987 oli 0,62 MBq, joten sen aktiivisuus on ehtinyt puoliintua 4,93 kertaa.

$$A = 0,62MBq \cdot \frac{1}{2^{4,93}} = 0,020MBq, \quad (13)$$

Mitataan gammalähteen pulssien lukumäärä 20 cm etäisyydeltä 100 s ajan eri määrällä lyijylevyistä valmistettuja absorptiolevyjä.

Taulukko 4: Gammalähteestä mitattujen pulssien määrä 20 cm etäisyydeltä 100 s aikana eri lyijykerroksen paksuuksilla

Lyijyn määrä (mm)	Havaitut pulssit (kpl)
0	4000
2	3797
4	3801
6	3554
8	3535
12	3330
16	3315
20	3003
28	2809
36	2655
50	2576
80	2193



Kuva 2: Havaittujen pulssien määrä eri lyijyesteen paksuuksilla. Pulssien määrästä on vähennetty taustasäteilyn vaikutus.

Kuvaajan perusteella voidaan päätellä, että intensiteetin puoliintumispaksuus on n. 25 mm. 10 %:iin intensiteetti laskee jossakin 60–70 mm tienoilla.

Mitataan dosimetrillä säteilyannosta työskentelypaikalta lyijytiilien kanssa, ilman lyijytiiliä sekä 5 cm päässä gammalähteestä.

Taulukko 5: Dosimetrin lukemat 5 cm etäisyydeltä

lyijytiilien kanssa	$0,18 \pm 0,01 \mu Sv/h$
ilman lyijytiiliä	$0,18 \pm 0,01 \mu Sv/h$
5 cm päässä lähteestä	$0,50 \pm 0,05 \mu Sv/h$

Dosimetrimittauksen perusteella säteilylähde ei juurikaan kasvata annosnopeutta taustasäteilyyn verrattuna.

4 Yhteenveto ja pohdinnat

Havaitaan, että alfasäteily pysähtyy ohueenkin väliaineeseen, siinä missä beetasäteily läpäisee vähän paksummankin väliaineen. Gammasäteily puolestaan läpäisee jopa paksumman lyijykerroksen. Samalla tavalla käyttäytyvät myös

säteilytyyppien kantamat. Alfasäteilyltä on helppo suojautua, mutta siitä saa nopeasti suuren ekvivalenssiannoksen.

Mittauksia tehdessä, olivat tutkimuksen tekijät pääsääntöisesti suojattu säteilyltä, eikä lähelläkään säteilylähdettä ollut vaarallisia annosnopeuksia. Ainoa elin, joka joutui lähelle säteilylähdettä oli käsi, ja sen efektiiviset painokertoimet ovat pieniä.

Viitteet

- [1] Harjoitustyöohje: Työ 55 Radioaktiivisuus ja säteily,
<http://physics.aalto.fi/pub/kurssit/Tfy-3.15xx/materiaali/55.pdf>
[Viitattu 18.11.2013]
- [2] Wikipedia-artikkeli radioaktiivisuudesta,
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Radioaktiivisuus> [Viitattu 18.11.2013]

Liitteet

1. Mittauspöytäkirja