

RADIOAKTIIVISUUS JA SÄTEILY

1 Johdanto

1.1 Radioaktiivinen hajoaminen ja säteily

Atomin ydin koostuu positiivisesti varautuneista protoneista ja neutraaleista neutroneista. Samalla alkuaineella on aina yhtä monta protonia, mutta neutroniluku ja samalla ytimen massa voi vaihdella saman alkuaineen atomeilla. Näitä saman alkuaineen erimassaisia ytimiä kutsutaan *isotoopeiksi*.

Läheskään kaikki ydinkonfiguraatiot eivät ole *stabiileja*, vaan suurin osa tunnetuista isotoopeista on *epästabiileja*. Epästabiilit eli *radioaktiiviset* ytimet lähettävät hajotessaan *ionisoivaa säteilyä*, joka voi olla hiukkassäteilyä, kuten alfa- tai betasäteilyä (α , β^- , β^+), tai sähkömagneettista gammasäteilyä (γ).

Alfahajoamisessa epästabiili ydin emittoi *alfahiukkasen* (${}^4_2\text{He}$ -ydintä vastaava), joka koostuu kahdesta protonista ja kahdesta neutronista. Beetahajoamisessa heikko vuorovaikutus muuttaa joko ytimen neutronin protoniksi (β^- -hajoaminen), jolloin ydin emittoi elektronin e ja antineuriinon $\bar{\nu}$, tai ytimen protonin neutroniksi (β^+ -hajoaminen), jolloin ydin emittoi näiden positronin e^+ ja neutriinon ν . Hajoamisessa *tytärudin* voi jäädä virittyneeseen tilaan, jonka jälkeen ydin emittoi γ -kvantin palatessaan perustilaan. Samoin kuin atomin tapauksessa myös atomin ytimen energiatilat ovat kvantittuneet ja emitoidun fotonin (γ -kvantin) energia vastaa ytimen energiatilojen erotusta. Tässä työssä tutustutaan gammasäteilyn ominaisuuksiin ja sen havaitsemiseen.

1.2 Hajoamislaki, puoliintumisaika ja aktiivisuus

Radioaktiivisen ytimen hajoaminen on satunnainen tapahtuma, eikä yksittäisen ytimen hajoamisen ajankohtaa voi ennustaa. Tarkasteltaessa suurta määrää ytimiä, voidaan kuitenkin määrittää kuinka paljon ytimiä keskimäärin hajoaa tietyllä aikavälillä.

Ytimien hajoamisten lukumäärä ΔN on verrannollinen radioaktiivisten ytimien lukumäärään N ja *hajoamisvakioon* λ , joka on todennäköisyys sille, että radioaktiivinen ydin hajoaa aikayksikössä Δt . λ on isotoopille ominainen, ajasta riippumaton vakio. Näistä ehdoista voidaan johtaa ytimien lukumääräksi ajan funktiona

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

Yhtälössä N_0 on ytimien lukumäärä tarkastelun alkuhetkellä $t = 0$. Yhtälöä (1) kutsutaan *hajoamislaksiksi*.

Puoliintumisajalla $T_{\frac{1}{2}}$ tarkoitetaan aikaa, jonka kuluessa tietyn isotoopin radioaktiivisten ytimien lukumäärä lähteessä on vähentynyt puoleen. Yhtälöstä (1) voidaan ratkaista puoliintumisajan ja hajoamisvakion yhteydeksi

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

Lähteen *aktiivisuus* R määritellään aikayksikössä tapahtuvien hajoamisten lukumääränä

$$R(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N(t). \quad (3)$$

Hajoamislaki voidaan kirjoittaa myös aktiivisuudelle käyttämällä avuksi yhtälöä (3). Tällöin hajoamislaki saadaan muotoon

$$R(t) = R_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}. \quad (4)$$

Aktiivisuuden SI-yksikkö on 1/s, jonka erityisnimi on *Becquerel (Bq)*; vanha yksikkö on Curie (Ci), $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

1.3 Gammasäteilyn havaitseminen

Säteilynlmaisoin eli *detektori* on laite, joka säteilyhiukkasen havaitessaan tuottaa jännitepulssin. *Pulssitaajuus* on pulssien lukumäärä aikayksikköä kohti. Liittämällä detektoriin pulssilaskuri saadaan laskettua *pulssimäärä* eli mittausaikana havaittujen säteilyhiukkasten lukumäärä. Detektori ei kuitenkaan havaitse kaikkia siihen osuvia hiukkasia; havaitsemistodennäköisyyttä kutsutaan detektorin *efektiivisyydeksi* ε . Radioaktiivisten hajoamisten lukumäärä mittausaikana noudattaa ns. Poisson-jakaamaa. Tästä johtuen voidaan mitatun pulssimäärän n virhearviona käyttää sen neliöjuurta, siis $\Delta n = \sqrt{n}$.

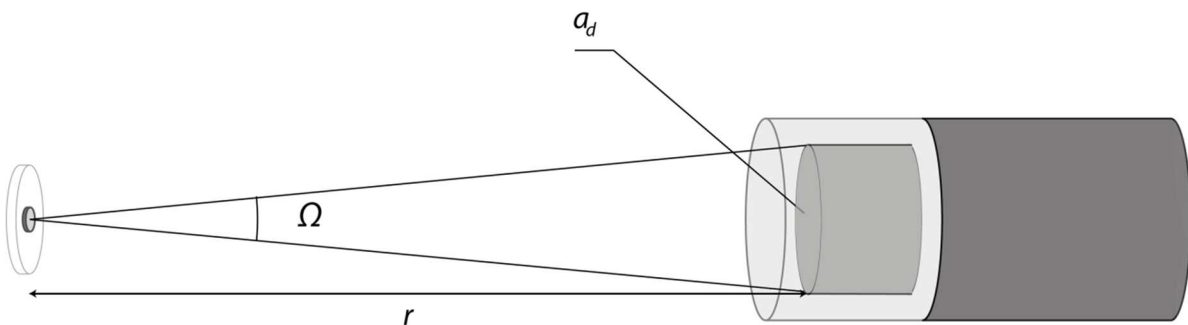
Radioaktiivisen lähteen aktiivisuus R voidaan määrittää mittaamalla lähteen emittoiman gammasäteilyn pulssitaajuutta $\frac{dn}{dt}$. Oletetaan lähteen koko etäisyyteen nähden niin pieneksi, että lähde voidaan käsitellä pistemäisenä (kuva 1). Oletetaan lisäksi detektori niin pieneksi, että sitä voidaan kuvata tasona. Lisäksi otetaan huomioon, että gammasäteilyn vuorovaikutustodennäköisyys ilman kanssa on niin pieni, ettei säteilyä absorboidu merkittävästi ennen sen osumista detektoriin. Tällöin detektorin havaitsema pulssitaajuus on

$$\frac{dn}{dt} = \varepsilon R n_i \frac{\Omega}{4\pi}, \quad (5)$$

missä n_i on yhdessä hajoamisessa emittoituvien gammakvanttien lukumäärä ja Ω se avaruuskulma, jossa lähde näkee detektorin. Jos detektorin pinta-ala on a_d , voidaan yhtälö (5) kirjoittaa muotoon

$$\frac{dn}{dt} = \varepsilon R n_i \frac{a_d}{4\pi r^2}, \quad (6)$$

missä r on detektorin etäisyys lähteestä. Yhtälöstä havaitaan, että mitattu pulssitaajuus on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön.



Kuva 1. Periaatekuva ilmaisimesta ja säteilylähteestä.

1.4 Gammasäteilyn vaimeneminen väliaineessa

Gammafotonin absorptiodennäköisyys väliaineessa kasvaa väliaineen järjestysluvun funktiona ja pienenee fotonin energian funktiona. Gammasäteilyn intensiteetti (eli fotonikertymänopeus, $1/(s \cdot m^2)$) φ vaimenee säteilyn väliaineessa kulkeman matkan x funktiona eksponentiaalisesti

$$\varphi(x) = \varphi_0 e^{-\mu x}, \quad (7)$$

missä φ_0 on intensiteetti ennen väliaineeseen osumista ja matkavaimennuskerroin μ on (väliaineesta ja fotonin energiasta riippuva) absorptiodennäköisyys pituusyksikköä kohti. Detektorin mittaama pulssitaajuus on suoraan verrannollinen säteilyn intensiteettiin, sillä

$$\frac{dn}{dt} = \varepsilon \varphi a_d. \quad (8)$$

Laboratoriotyössä käytetään vaimentavana väliaineena lyijyä ja mitataan gammasäteilyn pulssimäärää lyijykerroksen paksuuden funktiona. Mittaustuloksista määritetään, kuinka paksu lyijykerros vaaditaan, jotta säteilyn intensiteetti laskee tiettyyn osaan alkuperäisestä. Samalla osoitetaan, että säteilyn intensiteetti vaimenee eksponentiaalisesti väliaineessa.

1.5 Gammasäteilyn annosnopeus

Osuaan väliaineeseen, esimerkiksi kudokseen, säteily ionisoi sen atomeja ja molekyyliä. Syntyneet ionit puolestaan luovuttavat saamansa energian edelleen väliaineeseen. Säteilyn vaikutukset väliaineelle riippuvat merkittävästi säteilyn väliaineeseen tuoman energian määrästä.

Absorboitunut annos D määritellään tilavuusalkioon absorboituvan säteilyenergian E ja tilavuusalkion massan m suhteena

$$D = \frac{E}{m}. \quad (9)$$

Absorboituneen annoksen SI-yksikkö on J/kg ja sen nimitys on *Gray* (Gy). Yksikköä voidaan käyttää kaikille säteilylajeille kaikissa väliaineissa. *Annosnopeus* on taas absorboitunut annos aikayksikköä kohti eli $\frac{dD}{dt}$.

Säteilyä suojautumisen kannalta *ekvivalenttiannos* on oleellisempi suure, sillä siinä huomioidaan eri säteilytyyppien erialiset kyvyt aiheuttaa biologisia haittavaikutuksia. Ekvivalenttiannos H määritellään säteilylajin vaarallisuutta kuvaavan painotuskertoimen w_R ja absorboituneen annoksen tulona

$$H = D w_R, \quad (10)$$

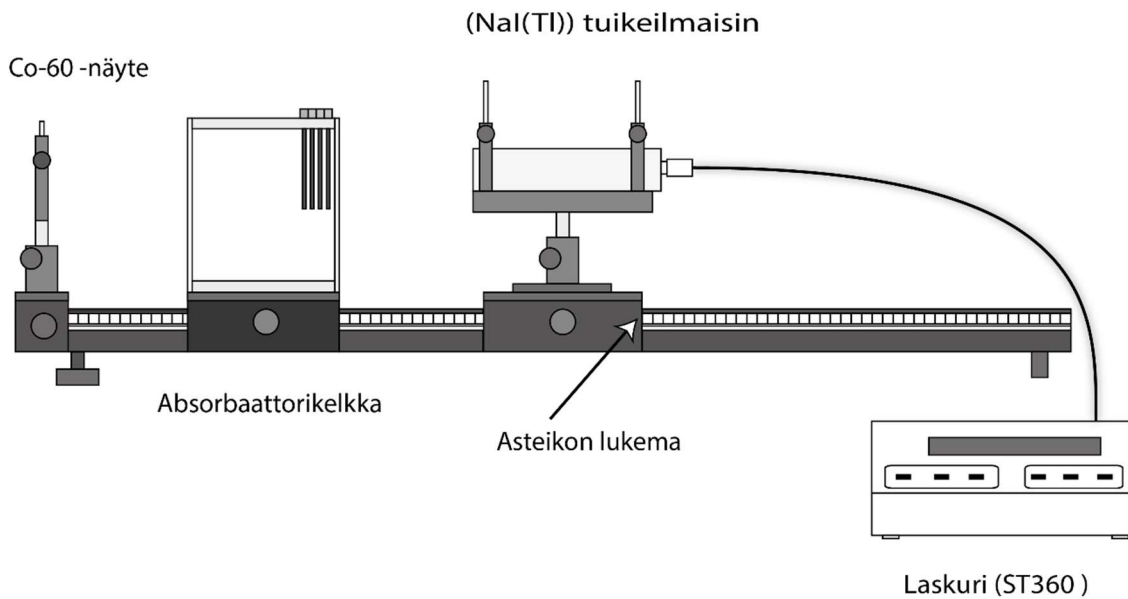
jossa painotuskerroin w_R on 1 gammasäteilylle, mutta esim. alfasäteilylle 20. Ekvivalenttiannoksen yksiköllä on annettu oma nimi, *Sievert* (Sv). Ekvivalenttiannosnopeus on taas vastaavasti ekvivalenttiannos aikayksikköä kohti eli $\frac{dH}{dt}$.

2 Tavoitteet

Laboratoriotyön tehtyään opiskelija

- on kokeellisesti tutkinut gammasäteilyn vaimenemista väliaineessa
- osaa selittää, miten gammasäteilyltä voidaan suojautua
- ymmärtää mitä radioaktiivisen lähteen aktiivisuudella tarkoitetaan

3 Laitteisto



Kuva 2. Radioaktiivisuustyössä käytettävä mittauslaitteisto.

Työssä säteilyä mitataan laitteistolla, joka koostuu säteilylähteestä, tuikeilmaisimesta, pulssilaskurista, absorbaattorikelkasta ja kiskosta, johon näyte sekä ilmaisimien on kiinnitetty. Säteilylähteen on Co-60-gammalähde. Co-60 on kobolttin epästabiili isotooppi, joka β^- -hajoamisen kautta muuttuu Ni-60:ksi. Hajoamisen jälkeen ydin jää viritystilaan, jonka purkautuessa emittoituu kaksi gammakvanttia, joiden energiat ovat 1173 keV ja 1332 keV. Co-60 isotoopin puoliintumisaika on 5,27 vuotta.

Gammasäteilyn intensiteettiä mitataan tuikeilmaisimella (SPECTECH SDA-38), joka koostuu talliumilla aktivoituneesta natriumjodidi NaI(Tl)-tukeiteestä ja valomonistinputkesta. Ilmaisimien on yhdistetty pulssilaskuriin (ST360), joka laskee tuikeilmaisimen havaitsemat gammafotonit. Detektorin *pinta-ala* on 11,4 cm². Ilmaisimen toiminta perustuu säteilyn ja tukeaineen vuorovaikutukseen, jossa tukeaineen atomit virittyvät ja emittoivat fotoneja näkyvän valon ja UV-säteilyn alueella. Tukeaineessa syntyneet fotonit ohjataan valomonistinputkelle, joka muuntaa tukeaineessa syntyneen valon havaittavaksi virtapulssiksi. Virtapulssi voidaan viedä analysaattorille tai laskurille kuten tässä työssä. Havaittua gammakvanttia vastaa yksi virtapulssi, jonka suuruus on verrannollinen havaitun gammakvantin energiaan.

Työn aikana näyte on paikoilleen kiinnitetty kiskon päähän. Detektoria voidaan liikuttaa kiskolla, kun detektorikelkan kiristysruuvi on löysätty. Kelkan kiristysruuvi on kuitenkin syytä sulkea aina liikuttamisen jälkeen.

Tuikeilmaisimen lisäksi on käytössä säteilyannosmittari eli *dosimetri* (Rados RDS-31 monitoimimittari). Kyseisen laitteen toiminta perustuu energiakompensoituun Geiger-Müller-putkeen ja se mittaa ympäristön säteilyn ekvivalenttiannosta ja annosnopeutta sähkömagneettiselle säteilylle energia-alueella 48 keV - 3 MeV. Laitteen mittaama suure on ns. vapaa annoskvivalentti, jonka voidaan ajatella vastaavan gammasäteilyn ekvivalenttiannosta/-annosnopeutta. Laitteen käyttöohje löytyy työpisteeltä.

Laitteiston tiedot:

- *Lähteen aktiivisuus ja laitteiston efektiivisyys: arvot käytetyille laitteistolle löytyvät laitteiston luota*
- *Emittoituvien γ -kvanttien energiat 1173 keV ja 1332 keV (jolloin $n_i = 2$)*
- *^{60}Co -isotoopin puoliintumisaika 5,27 vuotta.*
- *Detektorin pinta-ala 11,4 cm².*
- *Detektorin efektiivisyys 0,68.*
- *Kiskon lukemaan tehtävä vähennys on 15,7 cm.*

4 Esitehtävät

Tutustu työhön liittyvään teoriaan haluamastasi fysiikan oppikirjasta esim. [1-3], lue työohje läpi ja vastaa alla oleviin kysymyksiin vastauslomakkeeseen.

1. Mitkä ovat radioaktiivisen hajoamisen lajit? Millaista säteilyä niissä syntyy?
2. Mitä tarkoittaa lähteen aktiivisuus? Mikä on sen yksikkö?
3. Mitä kuvataan ekvivalenttiannoksella? Mikä on sen yksikkö?
4. Kuinka suuri on ihmisen keskimäärin vuodessa saama säteilyannos? Mitä suuruusluokkaa on luonnon taustasäteilystä aiheutuva annosnopeus?
5. Miten mittauspisteet r kannattaa valita, jotta suoran sovittaminen $(1/r^2, \frac{dn}{dt})$ -koordinaatistoon on helpointa? Mittausalue on 5-40 cm.
6. Työssä mitataan ja piirretään pulssitaajuutta dn/dt etäisyyden käänteisluvun neliön $1/r^2$ funktiona sekä sovitetään tähän suora ($y = kx + b$). Mikä on yhtälön (6) mukaan tämän suoran kulmakerroin k ? Anna yhtälö k :lle ja ratkaise siitä lähteen aktiivisuus R .

5 Mittaukset

Kaikki mittaustulokset ja kysymysten vastaukset kirjataan vastauslomakkeelle, joita saa assistentilta. On suositeltavaa käyttää lyijykynää. Vastauslomake palautetaan lopuksi assistentille.

5.1 Etäisyyden vaikutus gammasäteilyn intensiteettiin

1. Varmista, että detektorin on kytketty pulssilaskurin SCINT –liitäntään ja kytke pulssilaskurista virta päälle.
2. Aseta detektorin korkeajännitteen arvoksi 700 V (HIGH VOLTAGE) ja pulssilaskurin mittausajaksi 10 s. (Pulssilaskurin DISPLAY SELECT –näppäimellä voidaan liikkua laitteen valikossa. Laitteen oikeassa yläkulmassa sijaitseva merkkivalo ilmaisee, mitä arvoa laitteen näyttö ilmaisee kullakin

hetkellä. UP ja DOWN näppäimillä voidaan näitä muuttaa arvoja TIME, HIGH VOLTAGE ja ALARM POINT tiloissa. Laskuri ilmoittaa ajan sekunneissa. Mittaus käynnistyy COUNT näppäimellä ja pysähtyy automaattisesti mittausajan päättyessä.)

3. Mittaa gammasäteilyn intensiteetti kymmenessä pisteessä niin, että mittauspisteet asettuvat tasaisesti $1/r^2$ - asteikolla. (Ilmaisimen etäisyys luetaan kiskosta ilmaisinkelkan takareunasta kuvan 2 mukaisesti. Kiskon lukemaan täytyy tehdä 15,7 cm:n vähennys, jotta lukema vastaa ilmaisimen tuiekiteen ja säteilylähteen välistä etäisyyttä r . Sopiva mittausalue etäisyyksille r on 5–40 cm.
4. Kirjoita muistiin mittaamasi Co-60 lähteen annettu aktiivisuus ja sen määrittäminen sekä käyttämäsi laitteiston efektiivisyys.

5.2 Gammasäteilyn vaimeneminen väliaineessa

1. Aseta absorbaattorikelkka kiskoille mahdollisimman lähelle säteilylähdettä.
2. Aseta mittausajaksi 100 s ja siirrä detektori mahdollisimman lähelle absorbaattorikelkkaa siten, ettei se kuitenkaan koske siihen.
3. **Tee hypoteesi ja kirjaa se vastauslomakkeeseen:** Miten mitattu pulssimäärä n käyttäytyy lyijykerroksen kokonaispaksuuden x funktiona kun absorbaattorikelkkaan lisätään lyijylevyjä? Perustele vastauksesi fysiikan avulla.
4. Työpisteeltä löytyvistä lyijylevyistä ohuen levyn paksuus on 2 mm ja paksumpien levyjen 4 mm. Mittaa pulssimäärä seuraavilla lyijykerroksen paksuuksilla lisäämällä levyjä kelkkaan: 0, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 28, 36 ja 50 mm. *Käsitellessäsi lyijylevyjä käytä työpisteessä olevia käsineitä.* Lisäksi kädet on hyvä pestä lyijylevyjen käsittelyn jälkeen. Aseta levyt telineeseen siten, että ne ovat mahdollisimman lähellä detektoria.
5. **Testaa hypoteesiä:** Hahmottele vastauslomakkeeseen mitattu pulssimäärä lyijykerroksen paksuuden funktiona. Vastaako tulos hypoteesiä? Jos ei, niin pohdi miksi.
6. Mittaa lopuksi taustasäteilyn pulssimäärä mittauskohdassa. Poistamalla absorbaattorikelkasta suurin osa lyijylevyistä, mutta jätä muutama mahdollisimman lähelle detektoria. Aseta lisäksi kelkkaan kaksi punaista lyijytyiltä peräkkäin pystyasentoon mahdollisimman lähelle detektoria. Tämän lyijymäärän voidaan olettaa vaimentavan lähteestä tulevan gammasäteilyn kokonaan.

5.3 Gammasäteilyn aiheuttama annosnopeus

1. Poista lyijytyilet ja -levyt sekä absorbaattorikelkka kiskolta.
2. Mittaa säteilylähteen aiheuttama annosnopeus annosnopeusmittarilla lähteen läheisyydessä, noin 5-10 cm päässä. Mittaa annosnopeus myös työskentelyetäisyydellä sekä työhuoneen ulkopuolella.
3. Laske lopuksi detektorin korkeajännite nolnaan ja sammuta laitteisto.

6 Tulosten käsittely

6.1 Etäisyyden vaikutus gammasäteilyn intensiteettiin

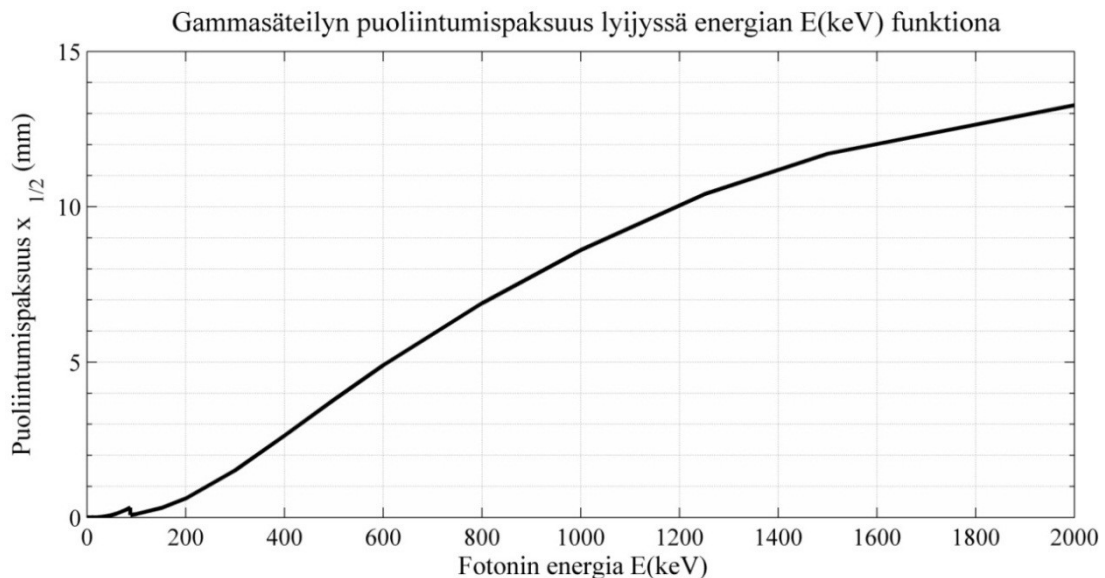
1. Laske etäisyyden $1/r^2$ - arvot.
2. Piirrä pulssitaajuus $\frac{dn}{dt}$ etäisyyden käänteisluvun neliön $1/r^2$ funktiona. Yhtälön (6) mukaan pisteiden tulisi osua suoralle. Sovita kuvaajaan suora ja määritä suoran kulmakerroin sekä kulmakertoimen virhe.
3. Tulosta piirtämäsi kuvaaja vastauslomakkeen liitteeksi.
4. Määritä lähteen aktiivisuus virheineen määritetyn kulmakertoimen ja sen virheen avulla.

6.2 Gammasäteilyn vaimeneminen väliaineessa

1. Piirrä pulssitaajuuden $\frac{dn}{dt}$ kuvaaja lyijykerroksen x paksuuden funktiona ($x, \frac{dn}{dt}$).
2. Tulosta piirtämäsi kuvaaja vastauslomakkeen liitteeksi.
3. Määritä kuvaajasta lyijykerroksen paksuus, jossa Co-60-isotoopin emittoiman gammasäteilyn säteilyn intensiteetti on pienentynyt a) puoleen b) kahdeksasosaan.

7 Pohdittavaa

1. Lähteen aktiivisuudeksi on 01.03.2016 mitattu 37,0 kBq. Laske tästä Co-60-säteilylähteen aktiivisuus R tällä hetkellä hajoamislain perusteella. Vertaa saamaasi arvoa työn mittausten perusteella määritettyyn aktiivisuuden arvoon.
2. Vastaako gammasäteilyn vaimeneminen väliaineessa teorian mukaista mallia? Vertaa lisäksi lyijylle määrittämäsi gammasäteilyn puoliintumispaksuutta kuvaan 3. Vastaavtko arvot toisiaan?
3. Vertaile mittaamiasi annosnopeuden arvoja taustasäteilyn annosnopeuteen. Arvioi, kuinka paljon työssä käytetty gammasäteilylähde kasvatti mittausten aikana saamaasi säteilyannosta taustasäteilyyn verrattuna.
4. Pohdi, tämän laboratoriotyön pohjalta, millä tavoin säteilyaltistusta voidaan pienentää tilanteissa, joissa joudutaan työskentelemään radioaktiivisten aineiden tai ionisoivan säteilyn kanssa?



Kuva 3. Gammasäteilyn puoliintumispaksuuden x ja fotonin energian E_γ riippuvuus. Kuvaaja on piirretty lyijylle määritettyjen säteilyn vaimenemiskertoimien perusteella $\mu(E_\gamma)$. [4]

Lähteet

- [1] D.C. Giancoli, Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics 4th edition, International edition, Pearson Education, Inc, 2009.
- [2] Hugh Young, Roger Freedman, A. Lewis Ford: University Physics with Modern Physics. International Edition. 13. painos. Pearson Education, 2011.
- [3] Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics Extended, Extended 9th edition, International Student Version, Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [4] National Institute of Standards and Technology: “ Mass Attenuation Coefficients”
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z82.html>