

**FYSZ460 Syventävien opintojen  
laboratoriotyöt**

# **Ympäristösäteilyn mittaus**

*Työohje*

*Ensimmäinen beetaversio 17.4.2001 Heikki Penttilä  
Päivitykset 9.2.2006 ja 15.11.2007 Markus Nyman  
Päivitys 1.11.2016 Sakari Juutinen*

# 1 Taustaa

Työssä tutustutaan ympäristössämme olevaan luonnolliseen ja ihmisen toiminnan seurauksena syntyneeseen radioaktiivisuuteen. Näytteiden radioaktiivisuus määritetään gammaspektroskopiaa käyttäen. Gammojen havaitsemisella alfa- tai beetasäteilyn asemasta on monia etuja (mitä voi pohdiskella selostuksessa).

Työn laajuus on 2 opintopistettä. Työn voi tehdä yksin tai pareittain mutta ei suuremmissa ryhmissä. Mittaustapahtumista tulee laatia mahdollisimman yksityiskohtainen mittauspöytäkirja. Työssä tehdään lukuisia joukko erilaisia mittauksia, joiden alkamis- ja loppumisaikoja tai muita tarpeellisia yksityiskohtia kukaan muista enää seuraavana päivänä.

Ympäristössä joudumme jatkuvasti alttiiksi myös ionisoivalle säteilylle. Pääasialliset säteilyn lähteet ovat huoneilman radon (erityisesti Suomessa), kallioperästä ja rakennusmateriaaleista tuleva säteily (erityisesti  $^{40}\text{K}$ ) ja kosminen säteily. Ihmisen toiminnasta johtuvia radioaktiivisia päästöjä syntyy lähinnä ydinpolttoaineen jälleenkäsittelystä. Kyseiset päästöt ovat jo luonnon omaan taustasäteilyyn verrattuna merkityksettömiä, mutta ne ovat sikäli makroskooppisia että ne ovat mitattavissa.

Miljoonia kertoja suurempia ja miljardeja kertoja dramaattisempia päästölähteitä ovat ydinvoimalaonnettomuudet, joista tosin ainoa, josta kannattaa päästölähteenä puhua, on Tšernobyli. Toivottavasti se ainoaksi jääkin. Tšernobylin kanssa samaa suuruusluokkaa oleva radioaktiivisen aineen ihmisperäinen levitystoimi ovat olleet ilmakehässä suoritettut ydinkokeet vuosina 1945 – 63. Ydinaseiden silloin tällöin sattuneet hukkaamiset esim. lento-onnettomuuksissa (Espanja 1966, Thule 1968,...) ovat ilmeisesti synnyttäneet enemmän hysteriaa kuin vakavia päästöjä.

## MDA-arvo

Mittauslaitteiston herkkyyttä kuvaa MDA-arvo, Minimum Detectable Activity eli pienin havaittavissa oleva aktiivisuus. Tämä kuvaa sitä, mikä on pienin aktiivisuuden taso jolla kyseisestä aktiivisuudesta gammaspektriin tuleva piikki erottuu mahdollisesta "tasaisesta" taustasta. Huomaa että MDA riippuu aivan kaikesta, mittausaika mukaan lukien. Siispä eri mittauksista saatavat MDA:t on, jos niitä halutaan vertailla, jollakin lailla normitettava vertailukelpoiseen tilanteeseen.

## Gammaspektristä

Gammaspektri on luonteeltaan viivaspektri. Ilmaisin ei kuitenkaan ole ideaalinen, vaan gammasäteilyn ja ilmaisinmateriaalin väliset vuorovaikutukset muuttavat spektriä. Viivat leviävät Gaussin jakaumiksi, "piikeiksi", jotka ovat kuitenkin erityisesti Ge-ilmaisimen spektrissä varsin kapeita ja helposti toisistaan erotettavissa. Jokaisen piikin matalan energian puolelle spektriin syntyy "häntä" vajaasti havaituista gammafotoneista eli niistä fotoneista, joiden energiasta vain osa on saatu pyydystettyä

ilmaisimeen. Kunkin piikin hännällä on rakenne, jossa näkyvät erilaiset vuorovaikutusmekanismit ilmaisimen kanssa. Näitä rakenteita ovat mm. Compton-reuna ja mahdolliset takaisinsironta- ja pakopiikit. Lisää gammaspektrin olemuksesta (ja monista muista työn kannalta oleellisista asioista) on luettavissa mm. lähteistä [1,2,3,6,7]. Varoitus: Lähteessä [2] kerrotaan antaumuksella litiumilla kompensoiduista Ge(Li)-ilmaisimista, joita ei JYFL:ssa ole käytetty aikoihin. Nykyiset ilmaisimet ovat puhtaasta germaniumista valmistettuja. Ge-kiteiden valmistustekniikat ovat parantuneet niin että litiumilla kompensointia ei enää tarvita [4].

Spektrin analysointi tapahtuu määrittämällä spektrin gammapiikkien pinta-alat eli määritetään kuinka monta täyden energia fotonia ilmaisimella on havaittu. Tästä voidaan sitten ilmaisimen tunnettujen ominaisuuksien avulla päätellä näytteen aktiivisuus. Piikin määrityksen teoriasta lisää mm. lähteessä [1].

## 2 Mitattavat näytteet

### Luonnonnäyte, ihmisalkuinen radioaktiivinen säteily

Työssä mitataan ympäristönäyte, josta tunnistetaan gammapiikit ja määritetään niiden alkuperä. Näytteissä oleva ihmisperäinen säteily on tyypillisesti Tšernobylin jäänteitä, josta havaitaan pitkäikäinen  $^{137}\text{Cs}$  (puoliintumisaika 30,2 vuotta). Näytteeksi soveltuu esim.:

- Riista/kala (pitoisuudet merkittävästi 90-luvun alkua pienempiä, mutta vieläkin joissain tapauksissa mitattavissa).
- Jäkälä (ei niinkään sammalet)
- Maannos ja karike.
- Sienet. "Parhaita" näytteitä siinä mielessä että  $^{137}\text{Cs}$  pitoisuudet vieläkin kohtuullisen korkeita. Ryöpätty sieni ei käy, koska cesium on vesiliukoinen.
- Metsämarjat (suuria eroja).

Näytteeksi eivät sovellu puutarhamarjat tai -kasvit, koska niillä on ylen määrin tarjolla cesiumia parempia ja helppoliukoisempia ravinteita.

### Luonnonvesinäyte, $^{222}\text{Rn}$

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) on uraanin ( $^{238}\text{U}$ ) radioaktiiviseen hajoamissarjaan kuuluva kaasumainen aine.  $^{232}\text{Th}$ :n radioaktiiviseen hajoamissarjaan kuuluva  $^{220}\text{Rn}$  on terveyshaitta joissakin tapauksissa, jolloin sitä vapautuu huoneilmaan suuria määriä seinän rakenteista, mutta lyhytikäisenä sitä ei voida edes määrittää vesinäytteestä. Kaasumaiset aineet, myös radon, liukenevat veteen. Veteen liuenutta radonia on erityisesti porakaivovedessä ja kalliolähteistä otetuissa vesinäytteissä. Jyväskylän alueella olevissa luonnonvesilähteissä on niin paljon radonia että sen määrän toteaminen gammaspektroskopian avulla onnistuu helposti. Järvivedessä radonia ei ole. Vesi-johtovedestä on joskus saatu määritettyä pieniä radonpitoisuuksia, mikä saattaa olla mittausvirhe. Koska  $^{222}\text{Rn}$  hajoaa emittoimalla alfahiukkasen, sen hajoamista ei voi gammamittauksella havaita suoraan. Radonin hajoamistuotteet ovat kuitenkin lyhytikäisiä verrattuna radoniin itseensä, joten niiden lukumäärä näytteessä saavuttaa

nopeasti tasapainon radonin kanssa. Hajoamissarjan gammaemitterit ovat  $^{214}\text{Pb}$  ja  $^{214}\text{Bi}$ . Näiden energiat ja gammahaarat tunnetaan [5] ja määritetyistä gammasäteilyn intensiteeteistä voidaan päätellä radonin määrä vesinäytteessä.

## 3 Työn suoritus

### Ilmaisilaitteiston kalibrointi standardinäytteiden avulla

1. Määritetään energiakalibraatio eli spektrin kanavien ja gammaenergian välinen vastaavuus. Yleensä käytetään 2. asteen polynomia.
2. Määritetään tehokkuuskalibraatio, eli ilmaisimen (piikki)tehokkuus säteilyn energian funktiona. Ensin mitataan tunnetun, pistemäisen säteilylähteen spektri, josta määritetään gammapiikkien intensiteetit eli kuinka monta osumaa (havaittua gammafotonia) on kussakin spektrissä erottuvassa piikissä. Taulukkokirjasta etsitään, mitkä ovat siirtymien suhteelliset osuudet. Suhteellinen tehokkuus saadaan piikin pinta-alasta ja piikkiä vastaavan siirtymän intensiteetistä. Absoluuttinen piikkitehokkuus on piikkiin kerättyjen pulssien määrä jaettuna kaikkien lähteestä lähteneiden määrällä. Huomioi tehokkuutta laskiessa virhearvio sekä piikkiin tulleiden että lähteestä lähteneiden fotonien lukumäärälle. Näin määritetty tehokkuus pistemäiselle lähteelle riippuu tietyksi suureksi osaksi lähteen etäisyydestä ilmaisimesta. **Suhteellinen** tehokkuus energian funktiona ei kuitenkaan riipu kovin paljon lähteen etäisyydestä, ts. eri energioiden tehokkuussuhteet eivät muutu. Ge-ilmaisimen tehokkuuskalibraatiota on käsitelty mm. lähteissä [2,6,7]. On myös tapana ilmoittaa Ge-ilmaisimen tehokkuus 1,3 MeV:n energialla verrattuna tietyn kokoiseen NaI tuikeilmaisimeen. Myös tätä kutsutaan suhteelliseksi tehokkuudeksi. Älä mene sekaisin!
3. Koska suhteellinen tehokkuus gammasäteilyn havaitsemiselle on lähteen etäisyydestä riippumaton, ei-pistemäisen lähteen absoluuttinen tehokkuus saadaan (likimäärin) mittaamalla absoluuttinen tehokkuus kyseisessä geometriassa yhdessä pisteessä ja skaalaamalla pistelähteellä mitattu suhteellinen tehokkuuskäyrä absoluuttiselle asteikolle niin että se kulkee kyseisen pisteen kautta. Tämä tehdään säteilyturvakeskuksessa (STUK) kalibroiduilla näytteillä ns. Marinelli-geometriassa (eli siinä geometriassa, jossa itse näytteetkin mitataan).

### Taustan mittaus

Jotta itse näytteistä tulevan säteilyn määrä saataisiin mitattua, on luonnollisesti tiedettävä kuinka paljon säteilyä tulee muista lähteistä. Kaikkein harmillisin taustasäteilyn komponentti on huoneilman sisältämä radon, erityisesti vesinäytteen radonpitoisuuden määrittämisessä. Tällöin ilmasta tuleva säteily on vähennettävä. Ongelman muodostaa, että sitä ei saisi vähentää täysimääräisenä, koska osa huoneilman radonista tulevasta taustasäteilystä absorboituu jo vesinäytteeseen ja näyteastiaan, jolloin taustasäteilyn intensiteetti pienenee sitä kautta.

### Ympäristönäytteen mittaus

Näyte pakataan taarattuun Marinelli-astiaan ja punnitaan. Punnitus voidaan tehdä myös säteilymittauksen jälkeen. Näytettä kannattaa mitata mahdollisimman pitkään, mahdollisuuksien mukaan yli yön. Spektristä etsitään asianmukaiset gammapiikit. Spektrit voi siirtää USB-muistitikulla mittauskoneelta ulos ja analysoida omin nokkinensa. Esimerkiksi Origin soveltuu tähän mainiosti. Mittauskoneen datankeruuohjelma tallentaa spektrin ascii-tiedostona.

## Luonnonvesinäytteen mittaus

Näyte tulee olla riittävän suuri, vähintään 1 litra, jotta sitä voidaan tarvittaessa jakaa ja tehdä toistomittauksia. Puolentoista litran kierrekorkillinen muovipullo on riittävän hyvä näytteen ottamiseen. Näyte on aiheellista saada riittävän nopeasti laboratorioon; jalokaasuna radon (Rn) on liukasta karkaamaan pullostakin ja radioaktiivisena hajoilee 3,8 päivän puoliintumisajalla. Näyte kaadetaan Marinelli-astiaan, joka suljetaan tiiviisti. Marinelli-astia sijoitetaan gammailmaisimen päähän ja suljetaan lyijysuoja. Jos näytteessä on radonia, gammapiikit erottuvat selvästi jo 10 minuutin mittauksen jälkeen.

Vaikka näytettä on aiheellista mitata ainakin 2 - 3 tuntia, spektrin kertymisen aikakehitystä on myös mielenkiintoista seurata. Joissakin datankeruuohjelmissa on mahdollista kerätä spektrit ajallisesti perättäisiltä ajanjaksoilta, esim. 10 min ajalta per spektri. Tällainen spektrien keruutapa on tarjolla esim. työosaston Grain-ohjelmassa, jota tässä työssä useimmiten käytetään. Mitä iloa tästä on? Aktiivisuusmittausta aloitettaessa vesipullon täyttämistä on jo useita tunteja, radon ja sen jälkeläiset ovat todennäköisesti näytepullossa jo tasapainossa. Kun vesinäyte kaadetaan Marinelli-astiaan, osa radonista, joka on kaasu, todennäköisesti karkaa. Radonin jälkeläiset taas ovat metalleja, ne eivät karkaa mihinkään. Jos näin käy, lyhytikäiset radonin hajoamistuotteet hajoavat nopeammin kuin mitä määrältään vähentyneen radonin hajoaminen niitä tuottaa, kunnes uusi, alhaisempaan radonin konsentraatioon liittyvä tasapaino on saavutettu. Radonin gamma-aktiivisten hajoamistuotteiden aktiivisuuden mahdollisesta hiipumisesta mittauksen ensimmäisen tunnin aikana voidaan päätellä, minkä verran radonia on mahdollisesti päässyt karkaamaan näytettä Marinelli-astiaan kaadettaessa. Näytteen radonpitoisuus määritetään lopullisesti vain spektrin siitä osasta, jossa uusi tasapaino on saavutettu. Mahdollisesta gamma-aktiivisuuden muutoksesta ennen tasapainon saavuttamista päätellään, mikä radonin konsentraatio oli näytteessä sitä Marinelli-astiaan kaadettaessa.

## 4 Selostuksessa pohdittavia asioita

Työselostuksessa tulee pohtia muun muassa seuraavia kysymyksiä. Tee parhaasi upottaaksesi vastaukset luontevasti osaksi selostustasi. Jos ihan kaikkiin ei onnistu vastaamaan, ei maailma siihen kaadu, mutta jos puutteet ovat merkittäviä (rajan vetää työn tarkastaja), lähetetään selostus korjattavaksi.

- Mikä on gammasäteilyn energia-alue? Vertaa sitä vaikkapa näkyvän valon fotoneihin.

- Mikä on tyypillisen gammafotonin aallonpituus? Vertaa tätä johonkin makroskooppisen maailman olioon (joksi luettakoon tässä yhteydessä vaikkapa lentävä horkkasääski, ilmassa leijuva 1 mm läpimittainen tomuhiukkanen ja kolibakteeri).
- Mitä etuja gammojen havaitsemisella saavutetaan alfa- tai beetahiukkasten havaitsemiseen verrattuna?
- Miksi gammaspektroskopia ei sovellu esimerkiksi  $^{90}\text{Sr}$ :n havaitsemiseen näytteistä? ( $^{90}\text{Sr}$  on neutroni-indusoidussa fissiossa runsain määrin syntyvä fissiotuote. Se kertyy elimistössä mm. kilpirauhaseen, vaikkakaan ei yhtä ärhäkkäästi kuin jodi, ja on siksi ydinvoimalapäästöjen pahapäisimpiä komponentteja).
- Millaisia ovat Marinelli- ja Williams geometriat? Miksi juuri niitä käytetään?
- Mitä ovat piikkitehokkuus ja kokonaistehokkuus? Kumpaa tässä työssä käytetään ja miksi? Miksi kumpikin on gammasäteilyn energian funktio? Missä tilanteessa tehokkuuskäyrän muoto muuttuisi pistemäisen säteilylähteen etäisyyttä muutettaessa ja miksi? Onko tästä mitään seuraamuksia kalibrointiprosessimme oikeellisuuteen ja luotettavuuteen? Havaitaanko tätä mistään lopputuloksissa?
- Mitä radioaktiivisia aineita löydät ympäristönäytteestäsi? Mitkä ovat niiden aktiivisuudet (Bq) ja ominaisaktiivisuudet (Bq/kg)?
- Millainen on  $^{238}\text{U}$ :n radioaktiivinen hajoamissarja? Erityisesti  $^{222}\text{Rn}$ :sta eteenpäin  $^{210}\text{Pb}$ :yn saakka? Mitkä  $\gamma$ -siirtymät liittyvät hajoamissarjan tähän osaan? Mikä ovat niiden energiat ja haarautumissuhteet? Mikä on haarautumissuhde (branching ratio)?
- Mitä asioita tulee ottaa huomioon näytteen radonaktiivisuutta määritettäessä? Kuinka monta radonatomia oli näytteessä näytteenottohetkellä? Mikä oli radonpitoisuus (Bq/l)?

Lopuksi vielä yleisiä asioita työstä kirjoitettavan selostuksen rakenteesta. Selostuksessa noudatetaan pääpiirteittäin tavallisen työselostuksen muotoa, eli siinä tulee olla jonkinlainen yhteenveto, johdanto sekä kappaleet, joissa käsitellään teoriaa (tarvittavilta osin) ja mittalaitteistoa. Teoriaosassa tulee vähintäänkin kertoa jotakin gammasäteilystä ja radioaktiivisuudesta sekä esitellä laskuissa tarvittavat kaavat. Mittauslaitteiston (ilmaisain ja käytetty elektroniikka) esittelystä tulee käydä ilmi se, miten Ge-ilmaisain toimii ja mitä virkaa kullakin komponentilla systeemissä on. Tulosten laskemisessa on kaikki olennaiset numerotiedot laitettava näkyviin jonnekin, joko itse tekstiin tai liitteeksi. Mittauspöytäkirja tulee myös liittää mukaan. Selostukseen pitää laittaa selkeät esimerkkisijoitukset jokaiseen käytettyyn yhtälöön kuten normaaleihin työselostuksiinkin. Erityistä huomiota kannattaa kiinnittää laskujen jäsentelyyn ja välitulosten laskemiseen: laskujen läpi pitää kulkea jonkinmoinen punainen lanka, josta ilmenee yksiselitteisesti kuinka mitatuista numeroista on päästy lopputulokseen. Välituloksien laskeminen on pakollista, koska suoraan lopputulokseen johtavan tolkuttoman ison kaavan rakentaminen tekee (1) virheen tekemisen todennäköisemmäksi ja (2) sen löytämisen vaikeammaksi.

Aivan erityistä huomiota pitää kiinnittää virhearviointiin. Varsinkin kun mitattavat pitoisuudet saattavat olla pieniä (tai olemattomia), on lopputulos ilman järkevää virhearviota täysin merkityksetön. Jotta homma ei menisi liian hankalaksi, on syytä miettiä mitkä virhelähteet ovat mitättömän pieniä ja mitkä eivät.

Ja jos homma meinaa jäädä kokonaan jumiin niin työn ohjaajalta saa toki tulla kysymään neuvoa.



## Lähdeluettelo

[1] Kenneth S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley, New York, 1988.

[2] Pekka Kivalo, Instrumenttianalytiikka 6: Säteilymittaukset, Gummerus, Jyväskylä, 1984.

[3] Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley, 1979.

[4] <http://www.ortec-online.com/> tai ORTEC:in tuoteluettelot, joita pyörii mm. työosastolla ja mittaushuoneessa.

[5] Richard B. Firestone ja Virginia S. Shirley, Table of Radioactive Isotopes, John Wiley, New York, 1986.

[6] Juhani Kantele, Handbook of Nuclear Spectrometry, Academic Press, San Diego, 1995.

[7] <http://www.stuk.fi/> (erityisesti sivustolta löytyvä ”Säteily- ja ydinturvallisuus” kirjasarja)