

Gamma- ja röntgenspektrin mittaaminen monikanava-analysaattorilla

Fysiikan laboratoriotöissä käytetään digitaalista pulssinkäsittelijää töiden, 1.3 (Gammasäteilyn energiaspektri) ja 1.4 (Elektronin suhteellisuusteoreettinen liikemäärä) yhteydessä.

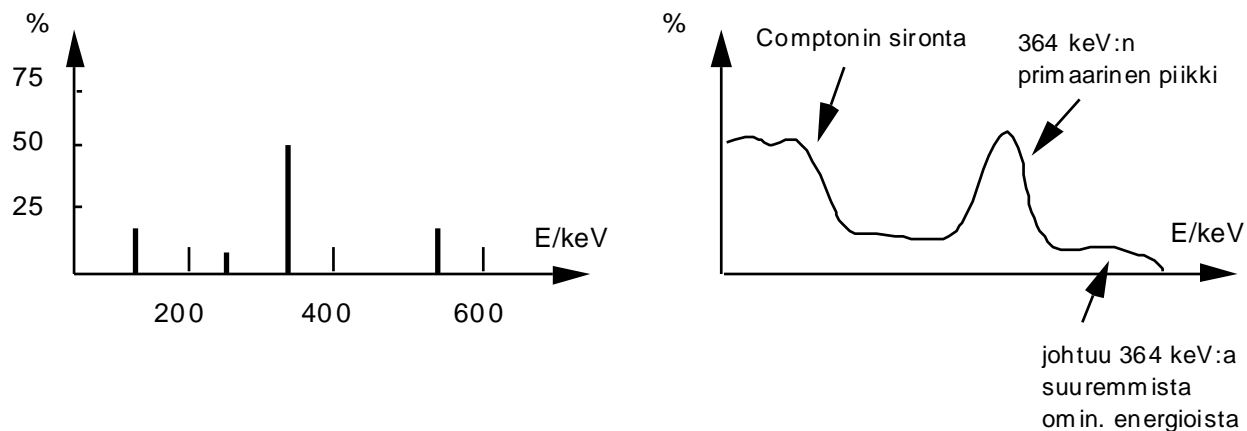
Energiaspektri

Tehtävissä mittauksissa tutkitaan detektorin, vahvistinelektroniikan ja digitaalisen pulssinkäsittelijän avulla sitä, miten fotonien säteilyilmaisimeen luovuttama energia on jakautunut. Tällaisessa esityksessä eri gammakvantit näkyvät karakteristisina piikkeinä. Saadussa energiaspektrissä (kuva 1) nähdään muutakin kuin pelkät piikit, koska gammasäteilyn vuorovaikutus ilmaisimateriaalin kanssa on monimuotoista. Spektrissä on vaakaa-akselilla fotonien energia jaettuna pieniin energiaväleihin eli kanaviin ja pystyakselilla on kutakin kanavaa vastaava tapahtumien lukumäärä. Ilmaisimeen osuva foton voi

1. saapua absorboivaan väliaineeseen, mutta jättää vuorovaikuttamatta sen kanssa.
2. osua ilmaisimeen ja luovuttaa koko energiansa valosähköisen ilmiön välityksellä.
3. sirota Compton-sironnassa (yksi tai useampia) ilmaisimessa ja lopulta menettää koko energiansa valosähköisen ilmiön kautta.
4. sirota Compton-sironnassa ja lopulta karata ilmaisimaineesta menettämättä kaikkea energiaansa.
5. virittää atomin ja menettää koko energiansa, mutta viritystilan lauetessa syntyvä foton karkaa ilmaisimesta

Energiaspektri saadaan näiden mekanismien summana.

Atomi- ja ydinfysikaalisten prosessien yhteydessä syntyvien fotonien energia saa tiettyjä arvoja, jotka vastaavat kvanttimekaanisten tilojen energioiden eroa. Karakteristista röntgensäteilyä (fotonien energiat kymmeniä elektronivolteja) syntyy atomien elektronitilojen viritysten lauetessa ja gammasäteilyä (fotonien energiat 1 MeV luokkaa) radioaktiivisten prosessien yhteydessä ytimien viritystilojen muuttuessa.



Kuva 1. Gammaemissiospektri ja mitattu energiaspektri

Ilmaisimet

Fotonien osuessa ilmaisimateriaaliin tapahtuu siinä ionisoitumista ja elektronitilojen virittymistä. Säteilyilmaisimessa muutetaan näissä prosesseissa vapautunut energia sähköiseksi pulssiksi. Saatavan pulssin amplitudi on suoraan verrannollinen tähän energiaan.

Tuikeilmaisimien (työt 1.3 & 1.4)

Tuikeilmaisimena käytetään fluoresoivia aineita, kuten eräitä epäorgaanisia kiteitä tai orgaanisia aineita. Gammakvanttien tuikemateriaalissa synnyttämien elektronitilojen viritysten lauetessa säteilevät atomit valokvantteja. Syntynyt valo muunnetaan sähköiseksi signaaliksi valomonistinputken avulla. Tehtävissä töissä käytetään tuikemateriaalina talliumilla aktivoitua natriumjodidia NaI(Tl). Tuikeilmaisimien soveltuu hyvin energisen gammasäteilyn tutkimiseen. Tuikeilmaisimen toiminta on selitetty tarkemmin kurssin oppimateriaalin liitteessä C.

Pulssien käsittely



Kuva 2. Pulssinkäsittelyjärjestelmä

Pulssinkäsittelyjärjestelmän (kuva 2) tarkoituksena on muuttaa ilmaisimelta saatavan heikon signaalin sisältämä informaatio havainnollistavaan muotoon. Se koostuu esivahvistimesta, digitaalisesta pulssinkäsittelijästä ja tietokoneesta.

Esivahvistin

Välittömästi ilmaisinkiteen yhteyteen on sijoitettu esivahvistin, jonka tehtävänä on vahvistaa ilmaisinkiteessä syntynyt heikko sähköinen signaali. Vahvistus tekee mahdolliseksi tavallisen koaksiaalikaapelin käytön siirrettäessä signaalia mittausjärjestelmän datakäsittelyosaan.

Digitaalinen pulssinkäsittelijä (monikanava-analysaattori)

Esivahvistinta seuraa mittausjärjestelmässä digitaalinen pulssinkäsittelijä, jonka tehtävänä on yksittäisten hiukkasten tai kvanttien aiheuttamien pulssien erottaminen esivahvistimen antamasta signaalista, kohinan suodattaminen ja edellä kuvatun energiaspektrin luominen. Pulssinkäsittelijässä esivahvistimen tuottama signaali ensin suodatetaan ja muokataan niin, että lopputuloksena on jännitepulssi, jonka amplitudi eli korkeus riippuu lineaarisesti fotonin ilmaisainaineesta luovuttamasta energiasta. Tämän jälkeen varsinainen pulssien analysointi eli energiaspektrin muodostaminen tapahtuu pulssinkäsittelijän monikanava-analysaattorissa (MCA, engl. multichannel analyser). Monikanava-analysaattorin analogia-digitaalimuunnin (ADC, engl. analog-to-digital converter) muuntaa pulssinkorkeuden pulssinkorkeuteen verrannolliseksi kokonaisluvuksi. Jokainen luku vastaa tiettyä pientä jänniteväliä eli kanavaa. Pulssinkorkeus- eli energiaspektri (pulssinkorkeushistogrammi) muodostuu, kun kuhunkin kanavaan osuneiden pulssien lukumäärä lasketaan yhteen. Histogrammi muodostetaan monikanava-analysaattorin prosessoriosassa, jossa kullekin kanavalle on varattu oma muistipaikkansa. Pulssinkäsittelijää ohjataan tietokoneella olevalla käyttöliittymällä.

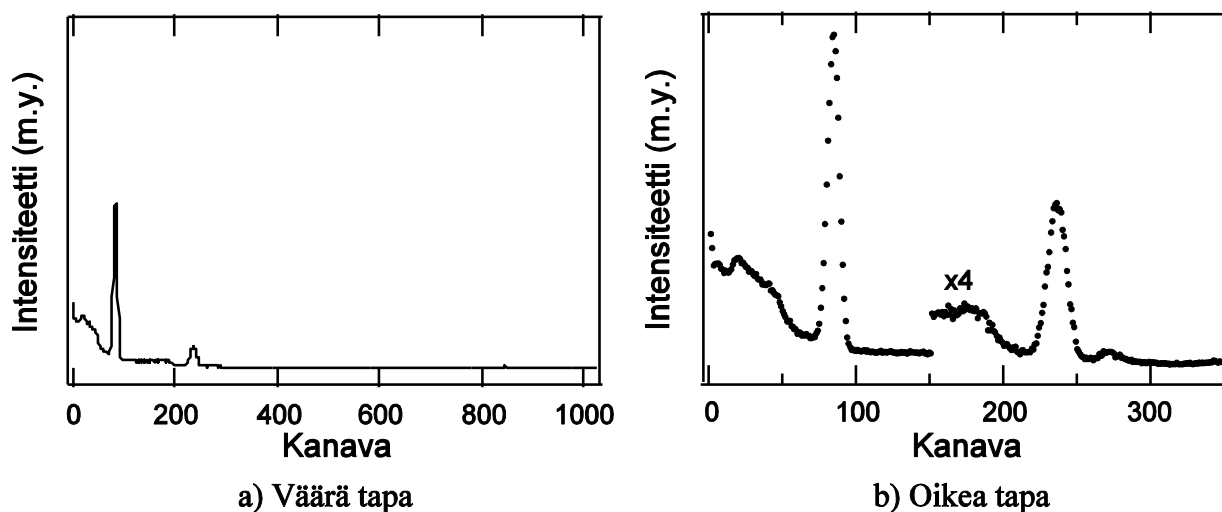
Pulssinkorkeushistogrammin esittäminen

Tietokoneeseen liitetty pulssinkäsittelijä tuottaa varsin suuren joukon mittapisteitä. Kuitenkin käsiteltävän ilmiön kannalta vain osassa pisteistöä on jotain oleellista informaatiota. Piiirrettäessä

pisteistöstä graafi, tämä kannattaa ottaa huomioon, jotta graafista tulisi selkeä ja mahdollisimman informatiivinen.

Graafisessa esityksessä kannattaa huomioida ainakin seuraavat seikat:

- Pulssinkorkeushistogrammi esitetään yleensä pistejoukkona
- X-akselille valitaan sopiva yksikkö (kanava tai energia) tilanteen mukaan
- Pisteistöstä esitetään vain oleellinen osa, ei esim. pitkää nollahäntää
- Pystyakseli on järkevästi skaalattu, osan spektriä voi tarvittaessa skaalata eri tavalla



Kuva 3. Pulssinkorkeushistogrammin piirtäminen.

Energiakalibrointi ja energioiden interpolointi

Laitteiston muuntosuhde fotonin tuottaman pulssin korkeuden ja pulssinkäsittelijän kanavan välillä on lähes lineaarinen. Koska pulssinkorkeus vastaa energiaa, energia-kanava –vastaavuuden määrittämistä kutsutaan energiakalibroinniksi. Energiakalibrointi on helpointa ja nopeinta tehdä siten, että mitataan tunnetusta gammalähteestä saatava spektri ja sovitetaan suoran yhtälö tunnettujen energioiden E_i ja mitattujen kanavien x_i välille.

Suoran yhtälö on

$$E = kx + b, \tag{1}$$

missä E on energia, x piikin paikka (kanava) ja b vakiotermin (ns. offset). Suuretta k kutsutaan usein muuntosuhteeksi kanavista energiaan. Saatua suoran yhtälöä voidaan sitten käyttää interpoloitaessa ja ekstrapoloitaessa tuntemattomien gammafotonien energioita, kun niiden aiheuttamat piikit havaitaan.

Energiakalibraation tapauksessa määritetty virhe on piikin paikassa eli x -suuntainen. Tämä voidaan kuitenkin tarvittaessa muuntaa PNS-sovitusta varten y -suuntaiseksi virheeksi kaavalla

$$\Delta y \approx k \Delta x. \quad (2)$$

Jos virhearviot eivät riitä selittämään hajontaa suoralta, voidaan hajonta laskea pisteistön ja suoran neliöllisistä poikkeamista.

Kaavalla 1 lasketun energian virhettä voidaan arvioida esim. virhesuorien yhtälöiden avulla. Tällöin virhearvioksi saadaan virhesuorien

$$E_1 = (k + \Delta k)x + (b - \Delta b) \quad \text{ja} \quad E_2 = (k - \Delta k)x + (b + \Delta b)$$

antama väli

$$\Delta E = \frac{|E_1 - E_2|}{2}. \quad (3)$$

Vaihtoehtoisesti PNS-sovitukselle voidaan myös määrittää tilastollisesti koko suoran $100(1-\alpha)\%$:n luottamusrajat [1]. Luottamusrajat antavat vaihteluvälin, jonka sisään E :n odotusarvo annetulla x :n arvolla asettuu todennäköisyydellä $1-\alpha$.

Energiakalibraation virheen lisäksi täytyy ottaa myös huomioon kanavan x virhearvio.

- [1] Jouko Lahtinen, Petri Hirvonen, Jaani Nissilä,
<http://www.fyslab.hut.fi/kurssit/Tfy-3.15xx/Luentomat/Tulostenkasittely.pdf>,
'PNS ja graafinen esitys', viitattu 23.10.2007