

1 Tuikeilmaisain

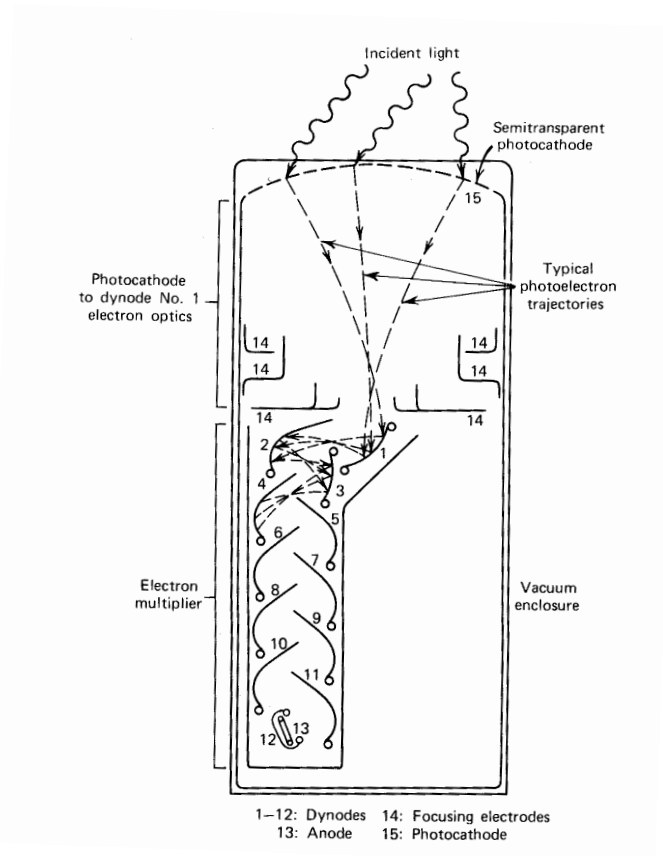
Tuikeilmaisain on laite, jolla hyvin yleisesti tutkitaan gammasäteilyn energiajakaamaa. Tuikeilmaisimeen perustuva säteilynmittauslaitteisto koostuu tuikekiteestä, valomonistinputkesta, suurjännitelähteestä, esivahvistimesta, lineaarivahvistimesta, analogia-digitaali-muuntimesta, monikanava-analysaattorista ja tietokoneesta. Näistä kaksi ensimmäistä, siis tuikekide ja valomonistinputki, ovat fysikaalisesti mielenkiintoisia ja niitä käsitellään seuraavassa; muut liittyvät enemmänkin elektroniikkaan ja niistä on tietoa työpaikkaohjeessa. Lähteenä tässä tekstissä on käytetty Knollin oppikirjaa [1], jossa on myös paljon lisätietoa asiasta.

Oppilaslaboratorion tuikeilmaisimissa käytetään tuikeaineena talliumilla (Tl) seostettua natriumjodidia (NaI). Tuikeaine vuorovaikuttaa siihen osuvan gammafotonin kanssa siten, että fotonin energia joko osittain tai kokonaan siirtyy tuikeaineen elektronille ja virittää sen. Näin syntyvä nopea elektroni puolestaan aiheuttaa runsaasti sinisen tai UV-valon alueella olevia tuikefotoneja, jotka suurella todennäköisyydellä etenevät absorboitumatta kiteen läpi fotokatodille.

Valomonistinputken alussa olevan fotokatodin tehtävänä on muuntaa mahdollisimman monet siihen osuvista tuikefotoneista matalaenergisiksi fotoelektroneiksi. Jos valo tulee tuikekiteestä pulssina, syntyy myös fotokatodilla pulssi. Koska tyyppillinen elektronipulssi sisältää vain muutamia satoja fotoelektroneja, on pulssin kokonaisvaraus liian pieni, jotta pulssi voisi toimia sähköisenä signaalina. Valomonistinputken tehtävänä on kerätä fotokatodilta irronneet elektronit ja kasvattaa niiden lukumäärää lineaarisesti, jolloin tieto alkuperäisen pulssin suuruudesta säilyy. Valomonistinputken vahvistuksen jälkeen pulssin koko on tyyppillisesti $10^7 - 10^{10}$ elektronia ja pulssi voi toimia signaalina. Kuvassa 1 on esitetty tyyppillinen valomonistinputken rakenne ja kuvassa 2 eri tuikekiteiden (mukaanlukien NaI(Tl)) emissiospektrit sekä kahden yleisesti käytetyn fotokatodin herkkyys aallonpituuden funktiona.

2 Gammasäteilyn vuorovaikutus tuikekiteessä

Eristeessä tai puolijohteessa olevan elektronin energiatilat jakaantuvat diskreetteihin vöihin. Kuvassa 3 on esitetty NaI-kiteen elektronien energiatasojen vyö rakenne. Alemmalla eli valenssivyöllä olevat elektronit ovat lokalisoituneet tietyille paikoilleen kidehilassa, kun taas ylemmän eli johtavuusvyön elektroneilla on riittävästi energiaa, jotta ne voivat liikkua kiteessä. Puhuttaessa NaI:ssa ei valenssi- ja johtavuusvyön välissä ole elektroneille sallittuja



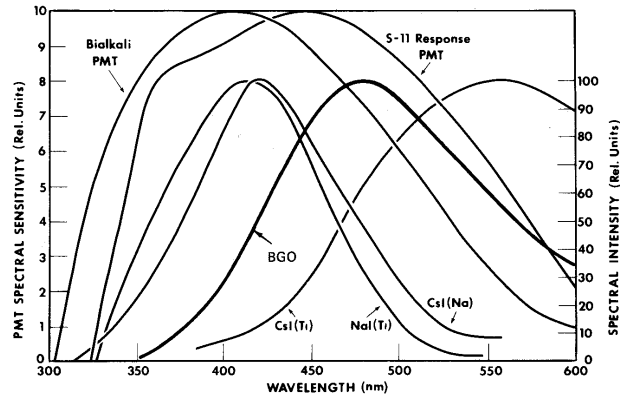
Kuva 1: Valomonistinputken perusrakenne.

energiatiloja ja vöiden välistä aluetta kutsutaankin kielletyksi vyöksi.

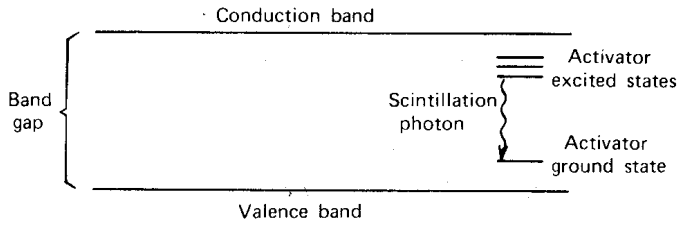
Osuessaan tukekiteeseen gammasäteily voi vuorovaikuttaa kolmella tavalla: valosähköisen ilmiön, Compton-sironnan tai parinmuodostuksen kautta. Gammasäteilyn eri vuorovaikutusten energiariippuvuudet NaI-kiteessä on esitetty kuvassa 4.

2.1 Valosähköinen ilmiö

Valosähköisessä ilmiössä gammakvantti luovuttaa energiansa kokonaisuudessaan elektronille, joka tällöin virittyy valenssivyöltä johtavuusvyölle jättäen samalla valenssivyölle positiivisen aukon. NaI-kiteessä tällainen virittyminen vaatii noin 20 eV energiaa ja loppu gammakvantin energiasta muuttuu virittyneen elektronin liike-energiaksi. Gammasäteilyn energia on keV- tai MeV-suuruusluokkaa, joten johtavuusvyölle virittyntä elektronia kutsutaan nopeaksi elektroniksi. Nopea elektroni liikkuu kiteessä ja kuluttaa energiaansa nopeasti virittäen uusia elektroneja johtavuusvyölle ja luoden samalla vastaavan määrän positiivisia aukkoja valenssivyölle. Esimerkiksi 1



Kuva 2: Tuikekiteiden emissiospektrien ja fotokatodien herkkyiden vertailua.

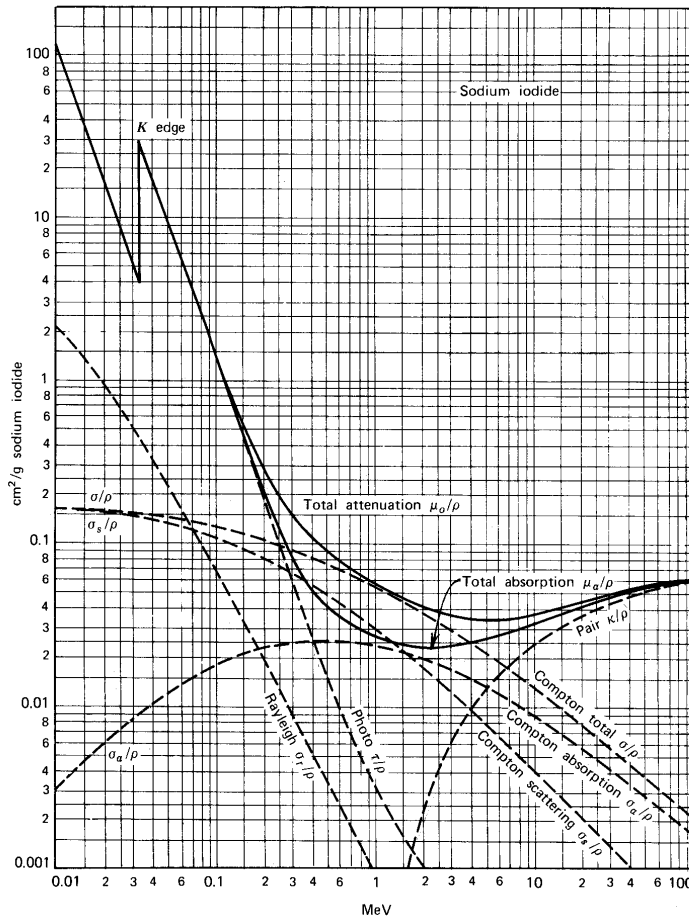


Kuva 3: Tuikekiteen elektronien energiavyö rakenne.

MeV:n nopea elektroni saa aikaan noin 5×10^4 elektroni-aukkoparia.

NaI-kiteeseen seostettu Tl luo hilaan paikkoja, joissa energiatarakenne on erilainen kuin muualla kiteessä ja nämä energiatasot mahdollistavat tuikefotonien syntymisen. Tämän ilmiön vuoksi Tl-atomeja kutsutaan aktivaattoreiksi. Elektronin virittymisen synnyttämä valenssivyön positiivinen aukko hakeutuu hilassa aktivaattoripaikalle ja ionisoi aktivaattorin, sillä ionisaatioenergia tässä kohdassa on alhaisempi kuin muualla kiteessä. Kun johtavuusvyöllä oleva virittynyt elektroni kohtaa tällaisen ionisoituneen aktivaattorin, muodostuu neutraali atomi, joka usein jää viritettyyn tilaan. Tämän viritystilan purkautuessa emittoituu em. tuikefotoni. Tuikefotoni syntyy siis ainoastaan silloin, kun johtavuusvyölle viritetty elektroni purkaa virityksensä aktivaattoriatomien energiatiloilla. Jos elektroni putoaa johtavuusvyöltä valenssivyölle, on syntyneen fotonin energia liian suuri fotokatodille. Aktivaattoriatomien emittoiman tuikefotonin energia (keskimäärin 3 eV) on pienempi kuin NaI-kiteen valenssivyön elektronin viritysen energia, joten tuikefotoni kulkee suurella todennäköisyydellä kiteen läpi absorboitumatta.

Säteily-spektrissä eli pulssinkorkeusjakaumassa nähdään valosähköistä ilmiötä vastaten piikki, jonka paikasta x-akselilla voidaan suoraan lukea ana-



Kuva 4: Gammasäteilyn vuorovaikutusten energiariippuvuudet NaI:ssa.

lysoitavan gammasäteilyn kokonaisenergia. Piikkiä kutsutaan fotopiikiksi.

2.2 Compton-sironta

Toisin kuin valosähköisessä ilmiössä, Compton-sironnassa fotonin ei häviä kokonaan, vaan luovuttaa ainoastaan osan energiastaan sironnan kohteena olevalle elektronille. Sironnassa energian ja liikemäärän säilyminen aiheuttaa fotonin etenemissuunnan muutoksen ja aallonpituuden pitenemisen. Gammafotonilta saamansa energian seurauksena elektroni virittyy valenssivyöltä johtavuusvyölle ja lähtee liikkeelle. Näin syntyneen nopean elektronin energia muuttuu tuikekvanteiksi täsmälleen samoin kuin valosähköisen ilmiön yhteydessä (ks. kappale 2.1). Tuikekiteessä syntyy siis sironnassa elektronille siirtyneeseen energiaan verrannollinen määrä tuikefotoneja, jotka kulkeutuvat fotokatodille.

Compton-sironnassa elektronin saama liike-energia E_e on sirontakulman θ ja alkuperäisen fotonin taajuuden ν avulla lausuttuna

$$E_e = h\nu \left(\frac{(h\nu/m_0c^2)(1 - \cos \theta)}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos \theta)} \right), \quad (1)$$

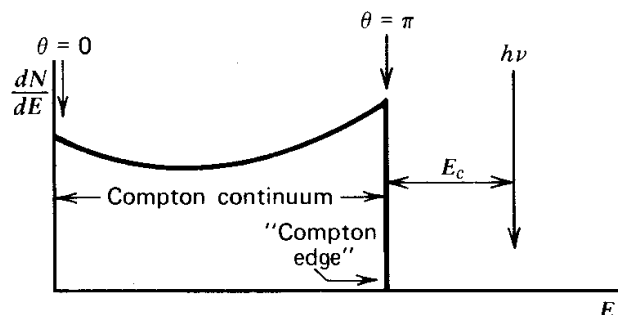
missä h on Planckin vakio, c valon nopeus ja m_0 elektronin lepomassa. E_e saa minimiarvonsa $E_{e,min} = 0$ sirontakulmalla $\theta = 0$ ja maksimiarvonsa $E_{e,max}$ kulmalla $\theta = \pi$. $E_{e,max}$:in lauseke on

$$E_{e,max} = h\nu \left(\frac{2h\nu/m_0c^2}{1 + 2h\nu/m_0c^2} \right). \quad (2)$$

Normaaliolosuhteissa ilmaisimessa esiintyy kaikkia sirontakulmia. Tämän vuoksi säteily-spektrissä nähdään energiajatkumo alkaen nolasta ja päättyen kaavan 2 mukaiseen maksimienergiaan, joka siis on aina pienempi kuin gammafotonin kokonaisenergia $h\nu$. Tämä spektrin alue on nimeltään Compton-jatkumo ja sen oikeaa reunaa kutsutaan Compton-reunaksi. Compton-reunan ja fotopiikin välisen alueen leveys E_c saadaan kaavasta

$$E_c = h\nu - E_{e,max} = \frac{h\nu}{1 + 2h\nu/m_0c^2}. \quad (3)$$

Asiaa on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5: Compton-jatkumo ja -reuna.

Tuiekiteessä etenevä gammafotoni voi kokea useampia Compton-sirontoja, jolloin Compton-sironnan kohtioelektronien yhteenlaskettu energia ylittää Compton-reunaa vastaavan energian. Tämän vuoksi spektrissä havaitaan Compton-jatkumon jälkeen matalampi alue, joka siis vastaa moninkertaista Compton-sirontaa. Erityisesti on huomattava, että usein Compton-sironnalla alkanut sirontaketju päättyy valosähköiseen ilmiöön, jolloin loppujen lopuksi koko gammakvantin energia on absorboitunut kiteeseen. Tällaista tapahtumaketjua ei voida spektriä tarkasteltaessa erottaa tilanteesta, jossa gammafotonin kokema ensimmäinen vuorovaikutus on valosähköinen ilmiö ja se siis absorboituu heti kokonaan.

2.3 Parinmuodostus

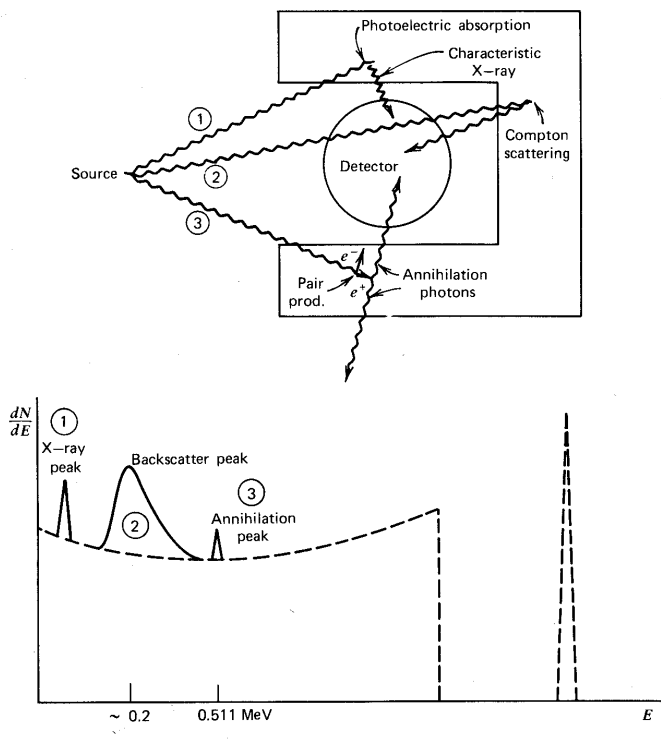
Kolmas merkittävä gammasäteilyn vuorovaikutuslaji on parinmuodostus. Se tapahtuu tukeaineen atomin ytimen vuorovaikutuskentässä ja sen seurauksena syntyy elektroni-positroni-pari. Syntyvien hiukkasten lepoenergia on $2m_0c^2$, minkä vuoksi gammasäteilyn energian on oltava vähintään 1.02 MeV. Jos gammasäteily on energisempää, jakautuu yli menevä osa hiukkasten liike-energiaksi. Tyypillisillä tarkasteltavilla energioilla sekä elektroni että positroni liikkuvat tukeaineessa enintään muutaman millimetrin ennen kuin kaikki niiden energia on absorboitunut tukeaineeseen. Syntynyt elektroni on edellä kuvattu nopea elektroni ja sen, samoin kuin positronin, liike-energia muuttuu tukekvanteiksi aiemmin esitetyllä tavalla. Lopulta liike-energiansa menettänyt positroni annihiloituu elektronin kanssa, jolloin tuloksena on kaksi gammakvanttia (energia noin 511 keV), jotka edelleen vuorovaikuttavat valosähköisen ilmiön tai Compton-sironnan kautta. Aika, joka positronilta kuluu hidastumiseen ja annihilaatioon on niin pieni, että annihilaatiosäteily syntyy lähes samalla hetkellä kuin alkuperäinen parinmuodostus. Ilmaisimen äärellisestä koosta johtuen on mahdollista, että jompi kumpi tai molemmat annihilaatiefotonit karkaavat ilmaisimesta.

3 Gammasäteilyn spektrin epäideaalisuudet

Oppilastöissä mitataan pulssimäärää energian (tai tarkasti ottaen laitteiston havaitseman pulssin korkeuden) funktiona. Tiettyä energiaa vastaavien pulslien lukumäärä puolestaan on verrannollinen vastaavanenergistien gammafotonien lukumäärään, joten spektristä saadaan selville, minkä energistä gammasäteilyä tutkittava lähde lähettää. Ideaalitulanteessa tukekide on niin iso, että jokaisen gammafotonin koko energia absorboituu kiteeseen. Tällöin siis kaikki fotonit, mukaanlukien Compton-sironneet ja annihilaatiossa syntyneet sekundaarifotonit, kokevat jossain vaiheessa valosähköisen ilmiön, eivätkä ehdi karata kiteestä. Tyypillisesti kuitenkin ainakin osa Compton-sironneista fotoneista pääsee karkuun ja säteilyspektri koostuu valosähköisestä ilmiöstä aiheutuvasta terävästä piikistä ja Compton-jatkumosta (nämä on merkitty kuvassa 6 katkoviivalla).

Kaikki lähteestä tuleva gammasäteily ei yleensä osu ensimmäisenä tukeilmaisimeen, vaan osa vuorovaikuttaa ensin ilmaisinta ympäröivässä aineessa. Näissä vuorovaikutuksissa syntyvää säteilyä kutsutaan sekundaarisiksi säteilyksi ja siitä aiheutuu havaittavaan spektriin häiriöitä. Eniten spektriin vaikuttaa ympäröivässä materiaalissa tapahtuva Compton-sironta (luonnollisesti vain sellainen sironta havaitaan, jossa sironnut fotonin osuu tukeilmaisimeen ja vuorovaikuttaa siinä). Kuvassa 6 on esitetty joitain mahdollisia tapauksia sekä niiden vaikutukset spektriin.

Todellisessa spektrissä piikit ja Compton-reuna leviävät ja pyöristyvät, koska informaationkuljettajien määrässä on satunnaista hajontaa. Lisäksi



Kuva 6: Ympäröivän materiaalin gammaspektriin aiheuttamat häiriöt.

jokaisen spektrin alussa esiintyy korkea häiriöpiikki, joka aiheutuu lineaarivahvistimen sähköisestä kohinasta ja voidaan jättää huomioimatta spektriä analysoitaessa.

Viitteet

- [1] G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1989 (Löytyy esim. fysiikan laitoksen kirjastosta.)