

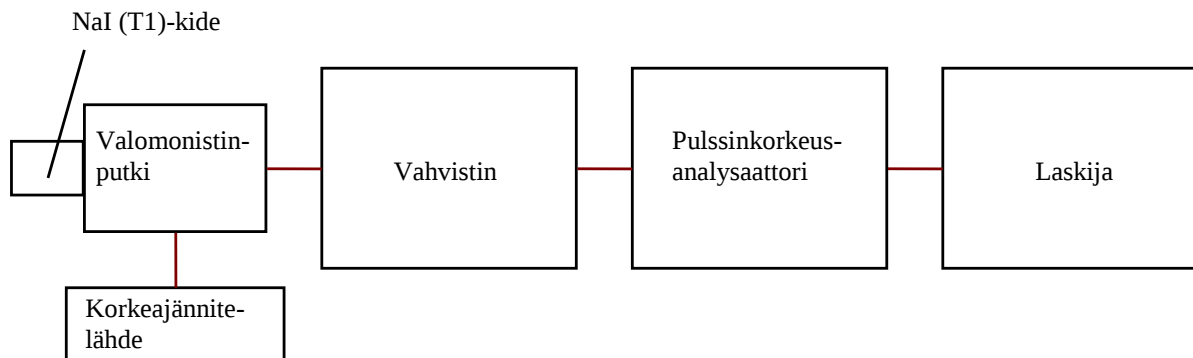
GAMMASÄTEILYMITTAUKSIA

Atomiytimet voivat olla vain määrättyissä kvantittuneissa energiatiloissa. Ydinreaktion tai hajoamisen jälkeen viritystilaan jäänyt ydin voi siirtyä alempaan viritystilaan tai perustilaan emittoimalla sähkömagneettisen säteilyn kvantin, jonka energia vastaa energiatilojen erotusta. Tällä tavalla syntyvää fotonisäteilyä nimitetään gammasäteilyksi. Se on hyvin lyhytaaltoista ja siis suurenenergistä; tyypillisesti gammafotonien energiat ovat välillä 100 keV – 3 MeV.

Tässä työssä tutustutaan gammasäteilyn havaitsemiseen tuikespektrometrillä, määritetään gammalähteen aktiivisuus ja tutkitaan gammasäteilyn absorboitumista väliaineeseen.

1 Tuikespektrometri

Kuva 1 esittää työssä käytettävän tuikespektrometrin rakennetta. Seuraavassa on lyhyesti esitetty sen eri osien merkitys ja toiminta.



Kuva 1. Tuikespektrometrin rakenne.

1.1 NaI(Tl)-kide

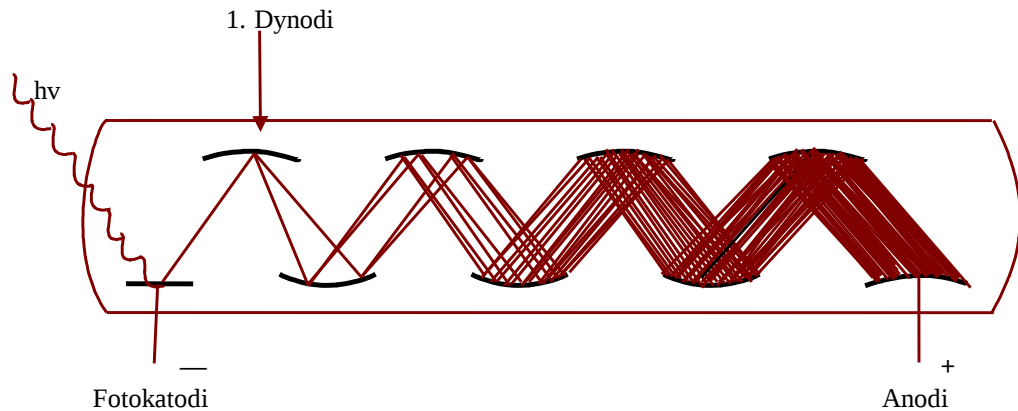
Talliumilla aktivoituun natriumjodidikiteeseen tuleva ionisoiva säteily (gammasäteily tai varatut hiukkaset) tuottaa kiteessä elektroneja, jotka törmäyksissä virittävät kiteen atomeja. Viritystilat purkautuvat valontuikahduksina UV- ja näkyvän valon alueella.

1.2 Valomonistinputki

Tuiekiteessä syntyvien heikkojen valontuikahdusten ilmaisemiseen käytetään valomonistinputkea, jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. Valomonistinputki koostuu tyhjiöputkesta, jossa on valoa läpäisevä ikkuna, valoherkkä fotokatodi, useita vahvistuselektrodeja eli dynodeja ja anodi. Fotokatodille tuleva fotoni irrottaa siitä elektroneja, joiden määrä on kuitenkin liian pieni mitattavaksi. Dynodeille on kytketty asteittain nousevat jännitteet katodin suhteen, joten fotokatodilta irronneet elektronit kiihtyvät kulkiessaan sähkökentässä katodilta ensimmäiselle dynodille ja tältä seuraavalle. Dynodit on valmistettu materiaalista, josta irtaantuu 2 – 5 elektronia jokaista siihen osuvaa nopeaa elektronia kohti. Kun dynodien määrä putkessa on 8 – 18, on jokaista fotokatodille tullutta fotonia kohti anodille päättyvien elektronien määrä $10^6 - 10^8$. Tämä on mitattavissa oleva sähkömäärä. Pulssin varaus on suoraan verrannollinen fotokatodille osuneen valon määrään.

1.3 Korkeajännitelähde

Korkeajännitelähde tuottaa valomonistinputken dynodeille kytketyt jännitteet. Korkein jännite on luokkaa 1000 V.



Kuva 2. Valomonistinputken toimintaperiaate.

1.4 Vahvistin

Vahvistimessa valomonistinputkesta saatavat pulssit vahvistetaan ja muokataan niin, että ne sopivat käsiteltäviksi pulssinkorkeusanalysoitsijassa.

1.5 Pulssinkorkeusanalysoitsija

Pulssinkorkeusanalysoitsija päästää lävitseen laskijaan vain ne pulssit, joiden korkeus (jännite) on halutulla välillä. Yksikanavaiseen pulssinkorkeusanalysoitsijaan vahvistimesta tuleva pulssijono joutuu kahden rinnakkaisen ns. diskriminaattorin käsiteltäväksi. Diskriminaattori päästää lävitseen vain sellaiset pulssit, joiden korkeus on tiettyä kynnysarvoa suurempi. Kynnykset asetetaan erisuuriksi siten, että ne rajoittavat halutun jännitevälän eli ikkunan. Diskriminaattorien jäljessä on ns. antikoinssidenssiipiiri, joka päästää pulssin eteenpäin laskijalle ainoastaan siinä tapauksessa, että pulssi tulee vain toisesta diskriminaattorista. Näin laskijalle pääsevät vain ne pulssit, joiden korkeus osuu asetettuun ikkunaan.

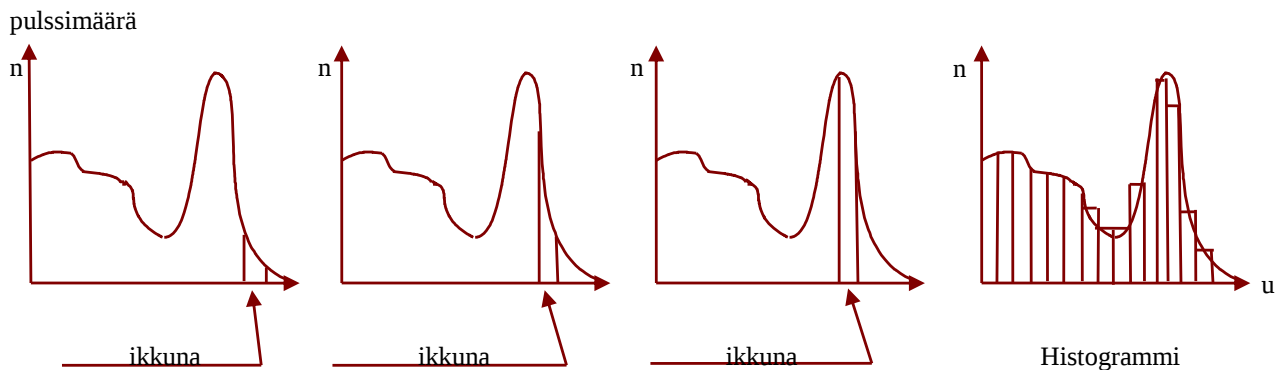
1.6 Laskija

Laskija laskee pulssinkorkeusanalysoitsijasta annetun laskenta-ajan kuluessa tulevien pulssien lukumäärän.

Gammasäteilyn ilmaisimena tuikekiteellä on merkittäviä etuja verrattuna geigerputkeen. Ensimmäisen kiteen hukka-aika on vain tuhannesosa geigerputken hukka-ajasta. Toiseksi kiteen tiheys on niin suuri, että lähes kaikki siihen osuvat gammakvantit havaitaan - geigerputki havaitsee vain noin joka sadannen gammakvantin. Kolmanneksi kiteessä syntyvän valon määrä on verrannollinen gammakvantin kiteeseen menettämään energiaan, joten sillä saadaan tietoa säteilyn energiasta.

Gammasäteilyn energijakauma eli spektri voidaan mitata yksikanavaisella tuikespektrometrillä seuraavasti: Ikkunan leveydelle eli diskriminaattorien kynnysarvojen erotukselle asetetaan haluttu vakioarvo. Ikkunaa siirretään siten leveytensä suuruisin askelin halutulla jännitealueella ja mitataan vakioajassa saatava pulssimäärä laskijalle. Näin saadaan määritetyksi histogrammi, jonka vaak akselina on jännite ja pystyakselina pulssimäärä aikayksikössä. Peräkkäiset ikkunan asemat, joita nimitetään kanaviksi, voidaan merkitä vaak akselille myös numeroina 1, 2, 3, ... Koska pulssin korkeus eli jännite ja siten myös kanavan numero ovat verrannollisia gammakvan-

tin energiaan, vaaka-akseli on samalla energia-akseli. Histogrammi voidaan tasoittaa graafisesti energiaspektrin kuvaajaksi. Kuva 3 havainnollistaa asiaa.



Kuva 3. Gammasäteilyn energiaspektrin mittaaminen yksikanavaisella pulssinkorkeusanalysaattorilla.

2 Gammasäteilyn spektrin syntyminen tuiekiteessä

Tuiekiteeseen osuvat gammafotonit kokevat kiteessä kolmentyyppisiä vuorovaikutuksia:

2.1 Valosähköinen ilmiö

Fotoni menettää kaiken energiansa tuikeaineen atomin elektroniverhon sisäkuorella olevalle elektronille, joka irtoaa atomista. Irronnut elektroni virittää muita tuikeaineen atomeja. Purkauksessaan viritystiloistaan atomit emittoivat valoa, jonka yhteismäärä on suoraan verrannollinen alkuperäisen fotonin energiaan. Valomonistinputkesta saadaan jännitepulssi, jonka korkeus vastaa tulevan fotonin koko energiaa. Gammaenergispektrissä nämä pulssit muodostavat ns. fotohuipun.

2.2 Compton-sironta

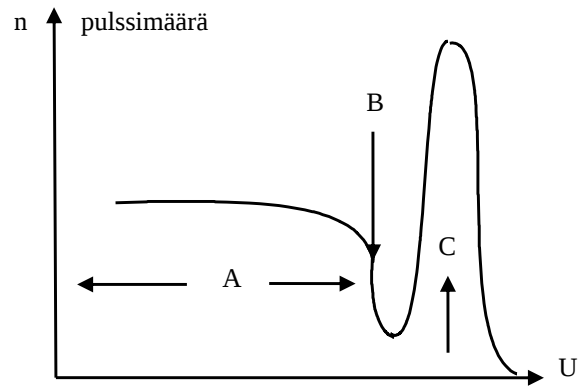
Fotoni irrottaa (sirottaa) tuikeaineen atomin elektroniverhon ulkokuorelta elektronin, joka virittää kiteen muita atomeja ja tuottaa jännitepulssin edellä kuvatulla tavalla. Fotonin koko energia ei kuitenkaan siirry siroavalle elektronille ja sen saama energia riippuu siitä, mihin suuntaan elektroni siroaa. Kun kiteeseen tulee suuri joukko gammafotoneja ja sirontakulmat vaihtelevat, syntyy erikorkuisia jännitepulsseja, jotka muodostavat gammaenergispektriin jatkuvan alueen fotohuipun energiaa pienemmille energioille.

2.3 Parinmuodostus

Kiteeseen tuleva fotoni aineellistuu elektroni-positroni-pariksi ja positronin annihiloituessa syntyvä gammafotoni havaitaan. Parinmuodostus edellyttää, että fotonin energia on yli 1,022 MeV (= kaksi kertaa elektronin lepomassa).

Kuva 4 esittää kaavamaisesti gammaenergispektrin tyypillistä muotoa.

- A Compton-sironnan synnyttämä jatkuva jakauma
- B Compton-reuna, joka vastaa fotonien 180° :n sirontaa
- C Fotohuippu.



Kuva 4. Gammaenergiespektrin tyypillinen muoto.

3 Aktiivisuuden määrittäminen tuikespektrometrillä

Tarkastellaan gammasäteilylähdettä, jonka aktiivisuutta A voidaan pitää vakiona tarkasteltavana aikana. Lähteessä tapahtuu silloin A hajoamista sekunnissa. Oletetaan edelleen, että gammafotoni emittoituu murto-osassa I_γ hajoamisista. Lähteestä emittoituu siten AI_γ fotonia sekunnissa. Suuretta I_γ nimitetään suhteelliseksi intensiteetiksi ja sen arvo prosentteina saadaan kyseisen nuklidin hajoamiskaaviosta.

Kun pistemäiseksi oletettua näytettä havaitaan tuiekiteellä, vain osa näytteestä kaikkiin mahdollisiin suuntiin lähtevistä gammafotoneista osuu kiteeseen. Tämä murto-osa voidaan ilmaista suhteena $\Omega/4\pi$, missä Ω on se avaruuskulma, jossa kide näkyy näytteestä. Kiteeseen osuu siten sekunnissa $AI_\gamma \Omega/4\pi$ fotonia.

Kidespektrometri ei kuitenkaan havaitse fotohuipun alueella kaikkia kiteeseen osuvia fotoneja vaan ainoastaan murto-osan ε_{ph} . Suure ε_{ph} on kiteen sisäinen havaitsemistehokkuus ja se riippuu mm. kiteen koosta ja fotonin energiasta. Tuikespektrometri rekisteröi siten sekunnissa $AI_\gamma (\Omega/4\pi) \varepsilon_{ph}$ pulssia. Jos pulsseja lasketaan aika t_c , spektrometri laskee fotohuipun alueella

$$N_{ph} = AI_\gamma t_c \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_{ph} \quad (1)$$

pulssia. Kun muut suureet mitataan tai tunnetaan, aktiivisuus A voidaan määrittää tämän yhtälön avulla.

4 Gammasäteilyn absorptio

Säteilyn ja aineen vuorovaikutusten runsaus ja laatu riippuvat säteilyn lajista ja energiasta sekä väliaineen fysikaalisista ominaisuuksista. Protonit, alfahiukkaset ja elektronit vuorovaikuttavat varauksensa vuoksi taajaan väliaineen atomien elektronien ja ydinten kanssa menettäen yleensä energiansa lyhyen kantaman sisällä. Esimerkiksi 1,5 mm:n paksuinen alumiinilevy pysäyttää 1 MeV:n elektronit täysin ja vedessä niiden kantama on 4 – 5 mm. Saman energisten alfahiukkasten pysäyttämiseen riittää 2 – 3 μm alumiinia ja vedessä niiden kantama on 5 μm . Varauksettomien neutronien vuorovaikutukset aineessa riippuvat voimakkaasti neutronien energiasta ja vaihtelevat epäsäännöllisellä tavalla väliaineesta toiseen. Tyypillinen vuorovaikutus on kimmoimen sironta varsinkin keveistä ytimistä. Sen sijaan gammasäteilyn vuorovaikutuksilla on säännönmukainen riippuvuus säteilyn energiasta E ja väliaineen järjestysluvusta Z .

Gammasäteilyn absorboitumista väliaineeseen voidaan siksi tarkastella yksinkertaisin laskuin, kun otetaan käyttöön vuorovaikutuksen mittana ns. lineaarinen kokonaisvaimennuskerroin eli lineaarinen absorptiokerroin $\mu(E, Z)$.

Fotonien ja väliaineen vuorovaikutukselle on ominaista, että fotoni, joka kokee jonkin vuorovaikutuksen – siroaa tai absorboituu – poistuu alkuperäisestä fotonivuosta. Kapean fotonisuihkun energiavuon tiheys eli intensiteetti I noudattaa silloin absorptiolakia

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x}, \quad (2)$$

missä I_0 on alkuperäinen intensiteetti, $\mu_m = \mu/\rho$ on massa-absorptiokerroin, ρ on väliaineen tiheys ja x on väliainekerroksen paksuus.

Käytännöllinen väliaineen absorptiokyvyn mitta on puoliintumiskerros $x_{1/2}$. Puoliintumiskerros tarkoittaa sen väliainekerroksen paksuutta, joka absorboi puolet väliaineeseen tulevan kapean fotonisuihkun intensiteetistä. Yhtälön (2) perusteella

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}. \quad (3)$$

5 Mittaukset

Työssä käytetään tuikespektrometria, jonka periaate on esitetty kuvassa 1. Assistentti kytkee laitteiston päälle ja säätää valomonistimen korkeajännitteen. Korkeajännitettä ei saa muuttaa harjoitustyön aikana. Assistentti auttaa sopivan vahvistuksen valinnassa ja opastaa spektrometrin käytössä.

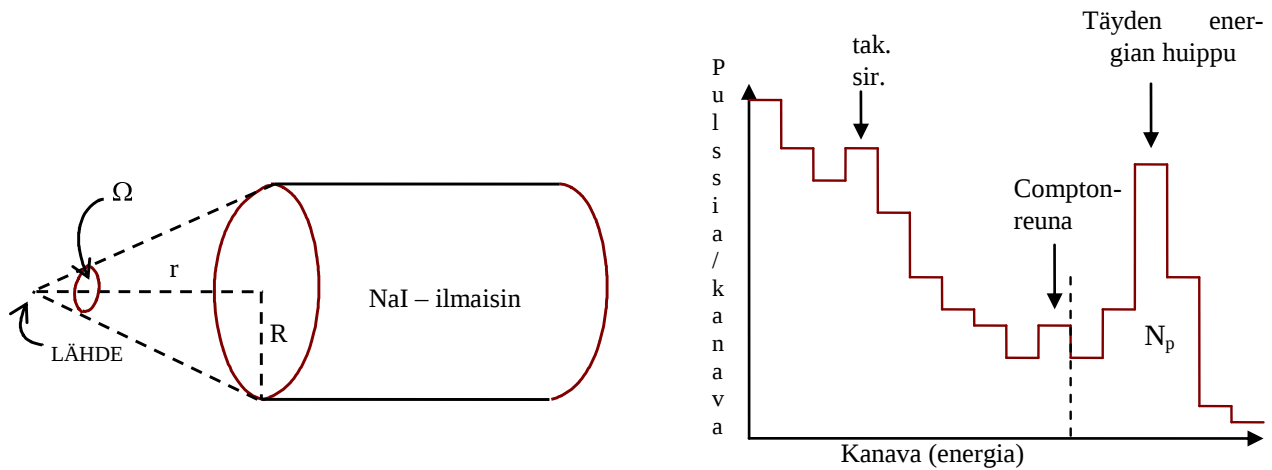
Työssä määritetään annetun gammasäteilylähteen aktiivisuus ja tutkitaan sen lähettämän säteilyn absorboitumista väliaineeseen. Koska näissä mittauksissa rajoitutaan fotohuipun alueella rekisteröitävään säteilyyn, on ensin selvitettävä gammaspektrin muoto pääpiirteissään.

5.1 Gammaenergiespektrin mittaus

Spektri mitataan kuvassa 3 esitetyllä periaatteella käyttäen assistentin opastuksella valittua ikkunan leveyttä ja laskenta-aikaa. Mitattu spektri piirretään välittömästi koordinaatistoon, jonka vaaka-akselilla on periaatteessa jännite ja pystyakselilla pulssimäärä. Käytännössä vaaka-akselille kannattaa kuitenkin sijoittaa jännitteen asemesta ikkunan siirtoon käytetyn kymmenkierrospotentiometrin lukemat, jotka ovat suoraan verrannollisia jännitteeseen.

5.2 Aktiivisuuden määrittäminen

Edellä saadun spektrin kuvaajan avulla asetetaan spektrometrin ikkunan ala- ja yläraja niin, että ne rajaavat spektrin fotohuipun tutkittavaksi (kuva 5). Asetetaan tutkittava lähde mitatulle etäisyydelle kiteestä ja mitataan pulssimäärä. Assistentti antaa ohjeet sopivasta etäisyydestä ja mitausajasta. Mitataan myös taustasäteily samoin asetuksin.



Kuva 5. Avaruuskulman Ω määrittäminen ja fotohuipun rajaaminen aktiivisuusmittausta varten.

Yhtälöstä (1) saadaan aktiivisuudelle A lauseke

$$A = \frac{4\pi}{\Omega} \frac{N_{ph}}{I_{\gamma} t_c \varepsilon_{ph}}. \quad (4)$$

missä N_{ph} = fotohuipun alueella mitattu taustakorjattu pulssimäärä,
 I_{γ} = lähteen suhteellinen intensiteetti (fotonia/ hajoaminen),
 t_c = mittausaika,
 Ω = avaruuskulma,
 ε_{ph} = kiteen sisäinen havaitsemistehokkuus.

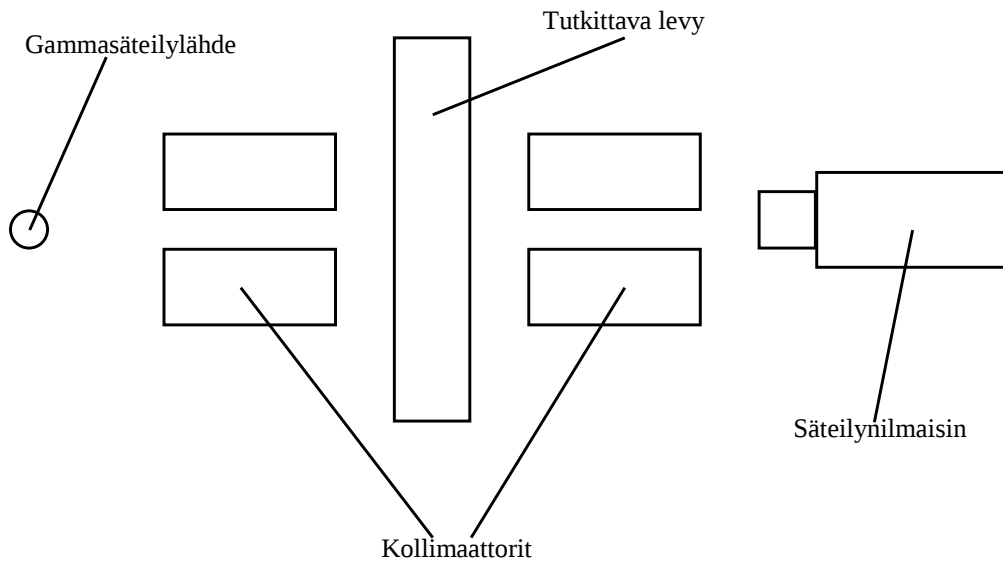
I_{γ} ja fotohuippua vastaava gammaenergia E_{γ} saadaan työpaikalla olevasta tutkittavan lähteen hajoamiskaaviosta. Fotohuipun energiaa E_{γ} vastaava ε_{ph} :n arvo luetaan työpaikalla olevasta kuvaajasta, joka esittää käytetyn kiteen sisäisen havaitsemistehokkuuden riippuvuutta fotonin energiasta. Avaruuskulma Ω voidaan laskea kuvan 5 merkinnöin kaavasta

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{r}{\sqrt{r^2 + R^2}} \right). \quad (5)$$

Aktiivisuus lasketaan kaavasta (4) ja ilmoitetaan becquereleina (Bq).

5.3 Absorptiomittaukset

Työssä tutkitaan gammasäteilyn absorboitumista metalleihin, esimerkiksi kupariin ja alumiiniin. Näistä metalleista valmistettuja levyjä ladotaan peräkkäin eri paksuisiksi kerroksiksi ja mitataan säteilyn vaimentuminen kerroksen paksuuden funktiona. Jotta metallissa tapahtuva sironta to-della vähentäisi mitattavaksi tulevia fotoneja, on fotonisuihku yhdensuuntaistettava kuvan 6 mukaisesti asetetuilla kollimaattoreilla. Kollimaattorit ovat metallikappaleita, joissa on pieni rei-kä säteilyn kulkuaukkona.



Kuva 6. Absorptiomittauksissa käytettävä koejärjestely.

Ennen absorptiomittauksia tehdään gammaenergiaskannauksen tarkistusmittaus, jonka perusteella valitaan ikkunan pituus ja leveys. Assistentti ilmoittaa sopivan mittausajan. Aluksi mitataan ilman säteilylähdettä, mutta muuten aitoa koejärjestelyä käyttäen taustasäteily, joka vähennetään kaikista muista pulssimääristä. Asetetaan lähde paikalleen ja lisätään tutkittavien metallilevyjen määrää assistentin antamien ohjeiden mukaan sekä mitataan vastaavat pulssimäärät.

Taustakorjatut pulssimäärät ovat verrannollisia metallin läpi kulkeneiden fotonien vuon intensiteettiin. Siksi niitä käyttäen voidaan piirtää yhtälöstä (2) saatava kuvaaja

$$\ln I = \ln I_0 - \mu x. \quad (6)$$

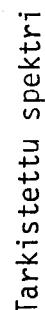
$(x, \ln I)$ – koordinaatistoon. Graafisesti tai pienimmän neliösumman menetelmällä määritetään tästä absorptiokerroin μ . Puoliintumiskerroin $x_{1/2}$ saadaan yhtälöstä (3) tai etsimällä yhtälön (6) kuvaajasta se x :n arvo, jolla $\ln I = \ln I_0 - \ln 2$.

Lopputuloksina ilmoitetaan tutkittujen metallien lineaariset ja massa-absorptiokertoimet sekä puoliintumispaksuudet.

Alumiinin tiheys $\rho_{Al} = 2,70 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ ja kuparin tiheys $\rho_{Cu} = 8,92 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$.

Valvonut assistentti:

GAMMASATEILYMITTAUKSIA



Lisätään tarvittaessa laitteistoon kollimaattori(t). Tarkistetaan fotohuipun paikka potentiometriasteikolla

Fotohuippu on välillä ____ - ____ ja valitaan mittausajaksi ____.

Tarkastellaan nyt fotohuipun alueen säteilyn absorboitumista annetuissa väliaineissa.

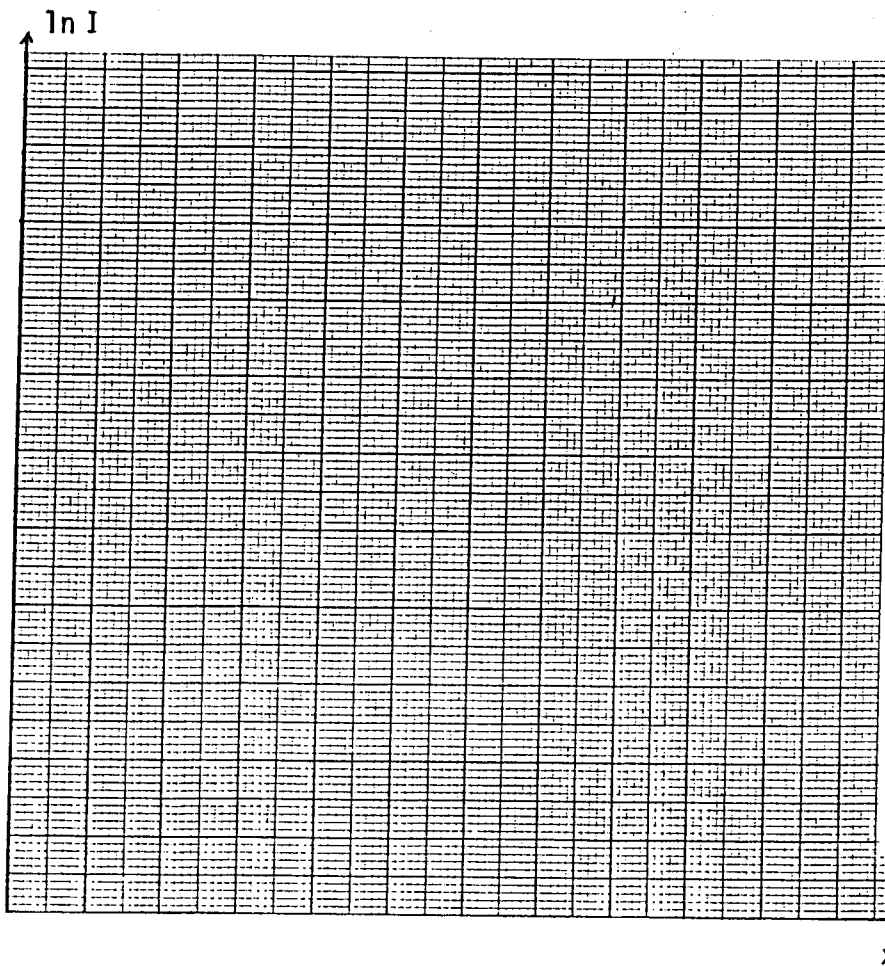
Mittauksista saadaan seuraavat taulukot.

Kuparille (1 levyn paksuus =)

levyjen lkm	kuparikerroksen paksuus x (mm)	N^{mit} (pulssia)	$I = N^{\text{mit}} - N^{\text{tausta}}$	$\ln I$

$N^{\text{tausta}} =$

Piirretään tuloksista yhtälöä (2) vastaava suora $\ln I = -\mu x + \ln I_0$



Kuvasta saadaan kuparille

$$\mu = |kk| =$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{8,92 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3}$$

=

$$x_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} =$$

=

Graafisesti $x_{\frac{1}{2}}$ vastaa arvoa jolla $\ln I = \ln(I_0/2) = \ln I_0 - \ln 2$ eli

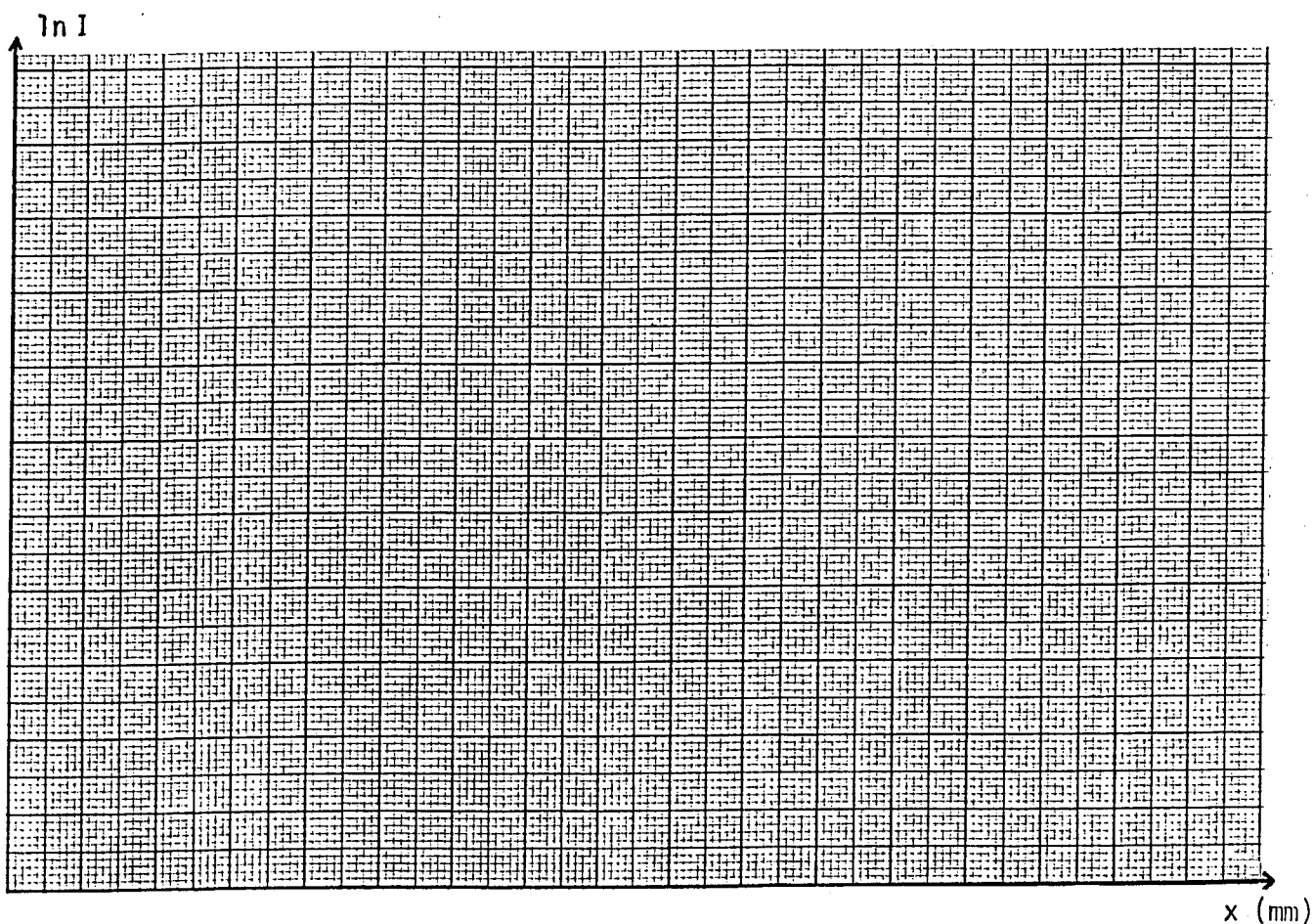
$$x_{\frac{1}{2}} =$$

Alumiinille (1 levyn paksuus =)

levyjen l _{km}	alumiinikerrok- sen paksuus x (mm)	N ^{mit} (pulssia)	I = N ^{mit} · N ^{tausta}	ln I

N^{tausta} =

Piirretään tuloksista suora $\ln I = -\mu x + \ln I_0$



Kuvasta saadaan alumiinille

$$\mu = |kk| =$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{2,70 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3} =$$

$$x_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} =$$