

5

AKTIIVISUUDEN MÄÄRITYS

Tarja K. Ikäheimonen, Seppo Klemola, Pia Vesterbacka, Tua Rahola

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.1 | Yleistä | 138 |
| 5.2 | Gammaspektrometria | 139 |
| 5.3 | Alfaspektrometria | 157 |
| 5.4 | Nestetuikelaskenta | 165 |
| 5.5 | Muut määrittymenetelmät | 178 |
| 5.6 | Ihmisessä olevien radioaktiivisten aineiden mittaus | 181 |

Aktiivisuuden määrittämisä tarvitaan monella tieteen alalla; menetelmiä on lukuisia riippuen millaisia määriä ja minkä tyyppistä aktiivisuutta halutaan mitata, mihin tarkoitukseen, millä tarkkuudella ja niin edelleen. Yleisenä nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että mitä suuremmasta aktiivisuuspitoisuudesta (aktiivisuuskonsentraatiosta) on kysymys, sitä helpompi se on määrittää. Tosin hyvinkin suuret aktiivisuuskonsentraatiot nuklidikohtaisesti eroteltuina voivat olla hankalia määritettäviä esimerkiksi gammaspektrometriassa, jos nuklidien lukumäärä on suuri. Tässä luvussa keskitytään hankalimpien, alhaisaktiivisten ympäristö- ja elintarvikenäytteiden määrittämismenetelmiin. Lisäksi kuvataan erikseen ihmisessä olevan aktiivisuuden mittaaminen. Väestön säteilysuojelun ja siihen liittyvän tutkimuksen sekä valmiuden kannalta nämä määrittäykset ovat tärkeimpiä. Luvussa käsitellään gammaspektrometriaa, alfaspektrometriaa, nestetuikelaskentaa, beetalaskentaa verrannollisuuslaskurilla sekä joitain harvemmin käytettyjä ja uusia kehityksen alla olevia lähinnä alfa- ja beeta-aktiivisuuden määrittämismenetelmiä. Näitä menetelmiä ei kuitenkaan kuvata yksityiskohtaisesti, se vaatisi huomattavasti suuremman sivumäärän, oman kirjansa tai jopa useita kirjoja. Luvun lopussa olevista kirjallisuusviitteistä löytyy hyvinkin yksityiskohtaisia menetelmäkuvauksia niitä haluaville. Tässä esitetään eri määrittäysten periaatteet, tarvittava laitteisto sekä tärkeimpiä mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä. Yksinkertaistamalla menetelmiä niitä voidaan soveltaa myös aktiivisuuskonsentraatioihin, joissa pitoisuudet ovat korkeampia.

Tässä esitetyt määrittämismenetelmät perustuvat suurimmaksi osaksi näytteenottoon ja näytteen sisältämien radioaktiivisten aineiden mittaamiseen. Edustavan näytteen otto on siten määrittäysten onnistumisen ensimmäinen ehto. Mikäli mitattu näyte ei edusta tutkittavaa asiaa hyvin, ei koko analyysillä tai sen tuloksella ole juurikaan merkitystä, tai mikä pahempaa, se voi olla jopa väärä. Näytteenotosta aiheutuva epävarmuus saattaa olla moninkertainen mittaamismenetelmän epävarmuuteen nähden. Ympäristö- ja elintarvikenäytteiden otolle on olemassa joitakin standardeja, joita voidaan soveltaa aktiivisuuskonsentraatioissa. Usein tarvittava näyttemäärä on kuitenkin paljon suurempi kuin esimerkiksi kemialliseen määrittäykseen tarvittavan näytteen määrä. Näytteenotto on aina tarkoin suunniteltava ja toteutettava kutakin tarkoitusta varten erikseen.

Tässä luvussa käsitellään vain menetelmiä, joilla mitataan suoraan aktiivisuutta. Nuklidien määrän mittaamiseen on myös menetelmiä, jotka eivät perustu säteilymittauksiin. Tällainen määrittämismenetelmä on esimer-

kiksi massaspektrometrinen määrittäminen, joka perustuu isotooppien määrän mittaamiseen niiden massaluvun mukaan.

5.2 | Gammaspektrometria

Gammaspektrometria on tehokas menetelmä radioaktiivisia aineita sisältävän näytteen koostumuksen ja aktiivisuuden selvittämiseksi, sillä gammasäteilyä lähettävien nuklidien aktiivisuudet tai niiden ylärajat voidaan määrittää yhdellä mittauksella. Analyysimenetelmä perustuu siihen, että kullakin radionuklidilla on juuri sille ominainen gammasäteilyn energiajakauma, joten näytteen radioaktiiviset nuklidit voidaan tunnistaa rekisteröimällä ja analysoimalla niiden lähettämää gammasäteilyä. Tässä kappaleessa kuvataan gammaspektrometriaa puolijohdeilmalaitteilla, joilla on erinomainen energian erotuskyky ja jotka siksi soveltuvat parhaiten monimutkaisemman säteilyspektrin mittaamiseen. Tuokeimmat soveltuvat yksinkertaisten gammaspektrien mittauksiin, varsinkin jos tarvitaan suurta havaitsemistehokkuutta (katso luku 5.6). Yleisin gammaspektrometreissa käytetty puolijohdemateriaali on germanium. Atomipainonsa takia pii-ilmalaitteet (Si(Li)) absorboivat heikosti gammasäteilyä ja niillä mitataan lähinnä alle 50 kiloelektronivoltin fotonien energiaa (röntgenspektrometria). Yhdistepuolijohteita (CdZnTe, GaAs ja HgI₂) käytetään toistaiseksi vain erityissovelluksissa.

Näytteen valmistus

Näytteen valmistus on yhtä tärkeä osa aktiivisuusmäärittämisestä kuin varsinaisen analyysin. Gammaspektrometriassa ei tutkittavia alkuaineita yleensä tarvitse erottaa muusta näytteen materiaalista ja ainakin kvalitatiivinen analyysi voidaan tehdä jopa kokonaan ilman näytteen valmistusta tai esikäsittelyä. Sen sijaan tarkkoissa kvantitatiivisissa mittauksissa homogeenisuus on tärkeää: analysoitavien aineiden on oltava tasaisesti jakaantuneena näyttemateriaalissa. Esimerkiksi vesinäytteessä estetään hiukkasten kiinnittyminen astian seinämiin lisäämällä näytteeseen sopivaa happoa. Kiinteät näytteet yleensä jauhetaan ja sekoitetaan hyvin ennen mittausta.

Ympäristön radioaktiivisten aineiden määrittämistä varten tarvitaan – toisaalta alhaisen aktiivisuuden ja toisaalta edustavuuden takia – yleensä suuri määrä näyttemateriaalia. Näytteenvalmistusmenetelmien tarkoituksena on, paitsi saattaa näyte kalibroituun tilavuuteen, myös konsentroida näytettä niin, että mahdollisimman paljon radioaktiivista materiaalia saa-

daan mahdollisimman lähelle ilmaisinta. Kuivaus, tuhitus eli poltto ja nestemäisten näytteiden haihdutus tai ioninvaihto ovat tyyppisiä konsentroidintimenetelmiä. Näitä käytettäessä on koko ajan huolehdittava näytteen homogenisoinnista sekoittamalla ja jauhamalla näytettä. Jos näytteen esikäsitelyssä käytetään korkeita lämpötiloja, on huomioitava aineiden erilainen haihtuvuus: tutkittava aine tai aineet saattavat haihtua kokonaan tai osittain käsittelyn aikana. Esimerkiksi tyyppillinen maidon ^{137}Cs -pitoisuus on niin alhainen, että sen havaitsemiseen tarvittava näytemäärä on useita litroja. Tällöin maidonäyte haihdutetaan ja sen jälkeen poltetaan tuhkaksi 450°C lämpötilassa. Gammamittaus voidaan tehdä silloin esimerkiksi 30 gramman painoisesta tuhkasta, joka vastaa noin neljää litraa maitoa. Toisaalta jotkin radioaktiiviset aineet, kuten ^{131}I , karkaavat haihdutuksen ja polton aikana höyrynä ilmaan. ^{131}I varten otetaan toinen muutaman litran maidonäyte, joka konsentroidaan laskemalla se ioninvaihtimen läpi. Jodi kiinnittyy ioninvaihtimeen ja voidaan mitata noin 35 millilitran ioninvaihtohartsinäytteestä.

Paras mittausherkkyyys saavutetaan, jos kaikki näytemateriaali voidaan sijoittaa mahdollisimman pieneen tilavuuteen. Jos näytettä ei pystytä konsentroimaan tarpeeksi, pyritään näytteen ja ilmaisimen välistä keskimääräistä etäisyyttä pienentämään. Tätä tarkoitusta varten on kehitetty Marinelli-astia, joka ympäröi sekä sylinterinmuotoisen ilmaisimen vaippaa että päätä. Yli 200 millilitran näyte on yleensä tehokkainta mitata Marinelli-astiassa.

Vuorovaikutusilmiöt

Gammaspektrin mittaaminen perustuu kolmeen säteilyyn ja aineen vuorovaikutusilmiöön: fotosähköilmiöön, Comptonin sirontaan ja parinmuodostukseen. Nämä ilmiöt on käsitelty tarkemmin luvussa 1.1; tässä niitä kuvataan lyhyesti gammaspektrometrian kannalta. Alhaisilla energioilla (noin 1–150 keV) todennäköisin vuorovaikutusmuoto on fotosähköinen ilmiö, jossa foton luovuttaa koko energiansa väliaineen atomin elektronille. Osa energiasta kuluu elektronin irrottamiseen ja jäljelle jäävä osa siirtyy elektronin liike-energiaksi. Virittynyt atomi luovuttaa energiansa karakteristisena röntgensäteilynä tai Auger-elektroneina. Jälkimmäisillä on hyvin lyhyt kantama ja röntgenkvanteistakin vain niillä, jotka syntyvät lähellä kiteen reunaa, on mahdollisuus poistua ilmaisinkiteestä vuorovaikuttamatta. Alhaisilla energioilla voidaan yleensä olettaa gammakvantin koko energian jäävän kiteeseen ja siksi fotosähköilmiö on toivottavin vuorovaikutus gammaspektrometriassa.

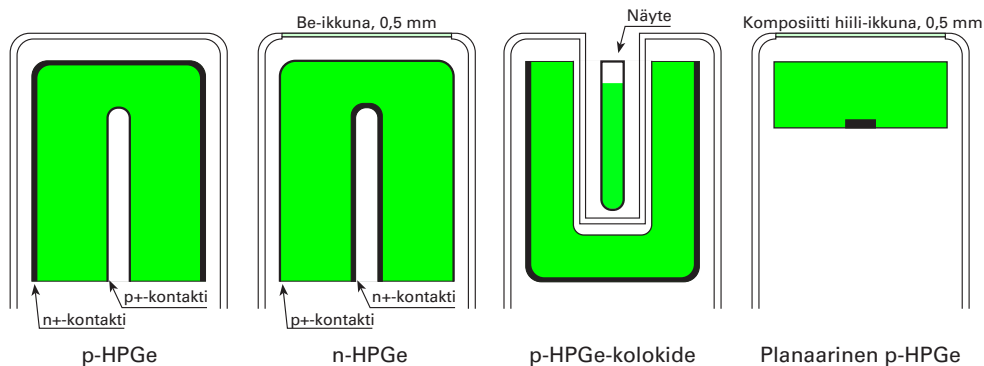
Comptonin sironnassa fotoni siroaa elektronista, joka saa sirontakulmasta riippuvan osan energiasta ja loppu jää fotonille. Sironnut kvantti voi luovuttaa loput energiastaan myöhemmissä vuorovaikutuksissa tai se voi poistua kiteestä mukanaan osa alkuperäisestä energiasta. Tämän vuoksi Comptonin sironta on gammaspektrometrian kannalta epäedullinen vuorovaikutus kuten myös parinmuodostus, jossa fotoni muuttuu ytimen kentässä elektroni-positroni-pariksi. Positronin tuhoutuessa syntyy kaksi 511 kiloelektronivoltin annihilaatiokvanttia, joiden mukana saatetaan menettää osa alkuperäisestä energiasta.

Jotta ilmaisimeen osuva fotoni tulisi rekisteröidyksi, sen on aiheutettava jokin edellä mainitusta vuorovaikutuksista. Vuorovaikutuksen todennäköisyyttä nimitetään ilmaisimen kokonaistehokkuudeksi. Gammaspektrometriassa pyritään yleensä määrittämään säteilyn energia ja intensiteetti. Tällöin on tärkeää, että ilmaisimeen tuleva fotoni menettää koko energiansa kiteelle. Kokonaisabsorptio on aina useamman peräkkäisen absorptiotapahtuman yhteisvaikutus. Perustapahtumana on fotosähköinen ilmiö, jota saattaa edeltää yksi tai useampia sirontailmiöitä. Kokonaisabsorptio tapahtuu, jos kaikki Compton-elektronit ja fotosähköisessä ilmiössä vapautuva fotoelektroni absorboituvat ilmaisinkiteen niin sanottuun aktiiviseen alueeseen eli varauksenkeräysalueeseen. Jos tapahtuu parinmuodostus, täytyy sekä elektronin ja positronin että molempien annihilaatiokvanttien absorboitua kiteeseen.

Germaniumilmaisim

Germaniumilmaisimessa muodostuu säteilyn ja aineen vuorovaikutuksen seurauksena elektroni-aukko-pareja. Nämä varaukset kerätään sähkökentän avulla virtapulsseiksi, jonka suuruus on suoraan verrannollinen absorboituneeseen energiaan. Puolijohdeilmaisimien toimintaperiaate on kuvattu yksityiskohtaisemmin kappaleessa 4.4.

Germaniumilmaisimissa sähkökenttä synnytetään jännitteellä, jonka suuruus on tyypillisesti 2 000–4 000 volttia. Vuotovirtaa pienennetään jäädyttämällä ilmaisinta nestemäisellä tyypellä, jonka lämpötila on noin 77 K eli -196°C . Jäädyttäminen toteutetaan käytännössä kryostaatin avulla, joka yhdistää ilmaisinkiteen nestetyyppeen. Typpisäiliöitä ja kryostaatteja on saatavana useina variaatioina erilaisiin mittausjärjestelyihin. Jäädytys voidaan vaihtoehtoisesti toteuttaa myös sähkökäyttöisellä kompressorikoneistolla, jolloin nestetyyppeä ei tarvita lainkaan.



KUVA 5.1 Erityyppisiä germaniumilmaisimia

Näyte sijoitetaan joko ilmaisimen päälle tai ympärille (Marinelli-astia). Pienet näytteet voidaan mitata kolokiteen sisällä, jolloin erityisesti alle 1 000 keV:n energioiden havaitsemistehokkuus on hyvin suuri.

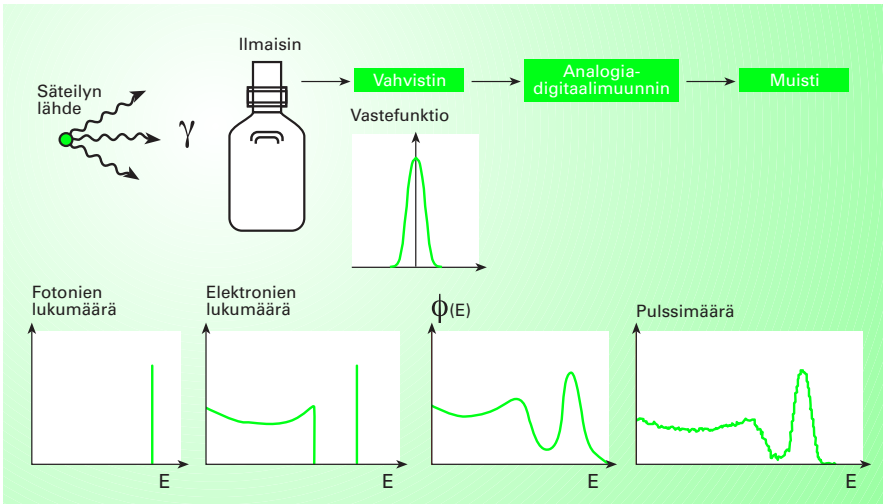
Äärimmäisen puhdas germaniumkide on sijoitettu tyhjöeristettyyn alumiinikapseliin, joka kytketään kryostaattiin. Kapselin ja kidettä tukevien rakenteiden tulee olla ohuita, jotta säteilyn absorptio olisi mahdollisimman vähäistä. Pienten gammaenergioiden ja röntgensäteilyn mittaamiseen tarkoitettut ilmaisimet on varustettu ohuella beryllium- tai hiili-ikkunalla.

Germaniumilmaisimia on saatavana eri muotoisina, jolloin niillä on toisistaan poikkeavat säteilyn havaitsemistehokkuudet (kuva 5.1). Kiteen muoto vaikuttaa sen varaustenkeräysominaisuuksiin ja siten energian erotuskykyyn. Yleisin ilmaisintyyppi on p-tyyppin germaniumista valmistettu sylinteri. Varaustenkeräystehokkuuden parantamiseksi sylinterin kulmat on usein pyöristetty. Pieniä näytteitä voidaan mitata myös niin sanotulla kolokiteella. Sen havaitsemistehokkuus ($E_\gamma < 1 \text{ MeV}$) on hyvin suuri, koska näyte voidaan asettaa ilmaisimen sisälle.

Nykyisissä germaniumilmaisimissa esivahvistin on sijoitettu kiteen kapselin alle, kryostaatin ympärille, josta se saa tarvittavan jäähdytyksen. Erittäin pienten aktiivisuuksien mittauksia varten ilmaisimeen ja esivahvistimeen valitaan materiaaleja, joiden sisältämien radioaktiivisten aineiden määrä on äärimmäisen alhainen.

Pulssinkäsittely

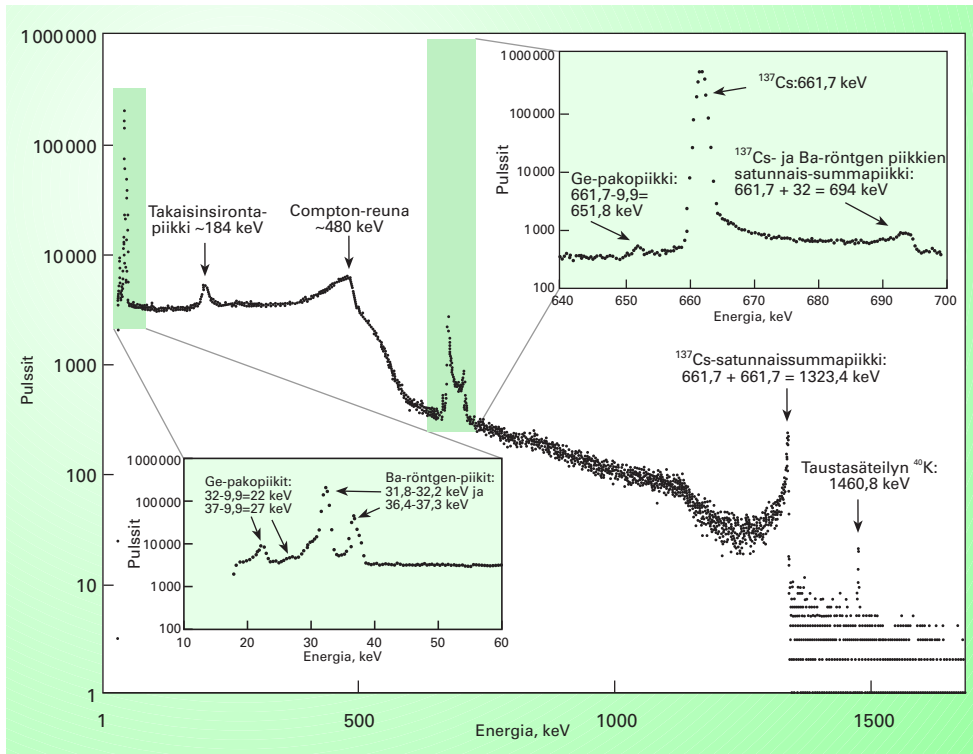
Ilmaisimesta saatu heikko virtapulssi muutetaan ensin varausherällä esivahvistimella jännitepulssiksi ja johdetaan sitten vahvistimeen, jossa



KUVA 5.2 Gammaspetrometrilaitteisto ja gammahajoamiseen liittyvän tiedon muuttuminen gammaspektriiksi

sitä muokataan ja vahvistetaan. Pulssinmuokkauksella parannetaan lähkekkäisten pulssien erottelukykyä sekä tehdään pulsseista vakiomuotoisia. Pulssin muotoon vaikuttaa vahvistimen muokkausajan (shaping time) säätäminen. Käyttämällä pitkää muokkausaikaa varmistetaan, että kaikki varaukset saadaan kerättyä pulssiin, mistä puolestaan seuraa parempi energian erotuskyky. Suurilla pulssitaajuuksilla on kuitenkin käytettävä lyhyttä muokkausaikaa, koska muutoin samanaikaisten pulssien satunnaisuus todennäköisyys kasvaa.

Vahvistimelta pulssit siirretään pulssinkorkeusanalysointiin, joka on itse asiassa analogia-digitaalimuunnin. Käytetty energia-alue on analysointiosuudessa jaettu sarjaksi yhtä leveitä energiavälejä, joita sanotaan kanaviksi. Puolijointeilla tehtävissä gamma-analyseissa käytetään tavallisesti 4 096 tai 8 192 kanavaa. Analysointiosuuden muuttaminen jännitepulssin amplitudin kanavan eli muistipaikan osoitteeksi ja kasvattaa muistissa olevaa lukua yhdellä. Näin muodostuu pulssinkorkeuksien jakauma, spektri, jonka muotoon vaikuttavat näytteen lähettämän säteilyn energiajakauksen lisäksi ilmaisimissa sekä näytteen ja ilmaisimen ympäristössä tapahtuvat vuorovaikutukset. Kuvassa 5.2 on kaaviomaisesti esitetty gammaspetrometrilaitteisto ja gammahajoamiseen sisältyvän informaation muuttuminen gammaspektriiksi.

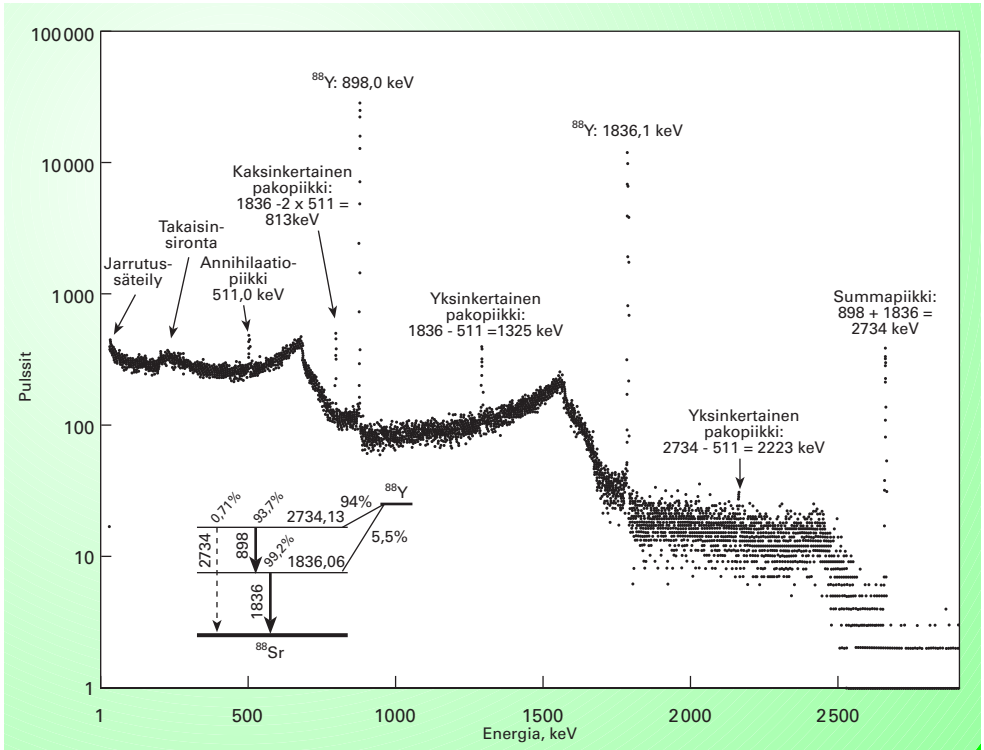


KUVA 5.3 Mallispektri, jossa nuklidilla on vain yksi gammasiirtymä

^{137}Cs -lähteen gammaspektri mitattuna n-typin germaniumilmaisimella (suhteellinen tehokkuus 28 %). Spekttrissä on cesiumin synnyttämän kokonaisabsorptiopiikin (661,7 keV) lisäksi myös sekä summa- ja pakopiikkejä. ^{137}Cs :n tytärnuklidin ^{137}Ba :n viritystilan sisäisen konversion takia K-röntgenenergiat (noin 32 ja 37 keV) ovat erityisen intensiivisiä. Suuren pulssitaajuuden takia satunnaissummautuminen on aiheuttanut summapiikit 1323,4 keV ja 694 keV kohdalle. Säteilyn virittämien Ge-atomien K-röntgenenergia on 9,9 keV. Lähellä pintaa syntyvät kvantit saattavat päästä poistumaan kiteestä vieden mukanaan kyseessä olevan energian, minkä seurauksena nähdään niin sanotut germaniumpakopiikit voimakkaimpien piikkien lähellä. Compton-reuna syntyy ilmaisimesta ja takaisinsirontapiikki ympäristöstä 180° siroavista fotoneista.

Spektrin rakenne

Gammaspektrometrinen analyysi käyttää hyväksi fotonien kokonaisabsorption aiheuttamia niin sanottuja fotopiikkejä (kokonaisabsorptiopiikkejä). Piikin paikka ilmaisee gammakvantin energian ja sen pinta-ala (piikkiin kuuluvissa kanavissa olevien pulssien summa) on verrannollinen kvanttien määrään ja siten näytteessä olevan radioaktiivisen aineen aktiivisuuteen. Ilmaisimessa syntyneiden varausten lukumäärän tilastollisesta vaihtelusta seuraa, että piikin muoto on lähellä normaalijakaumaa. Tämän lisäksi piikin leveyttä kasvattaa elektronisten komponenttien aiheuttama kohina, josta osa on peräisin pulssin muokkaus- ja vahvistuslaitteista, mutta osa syntyy

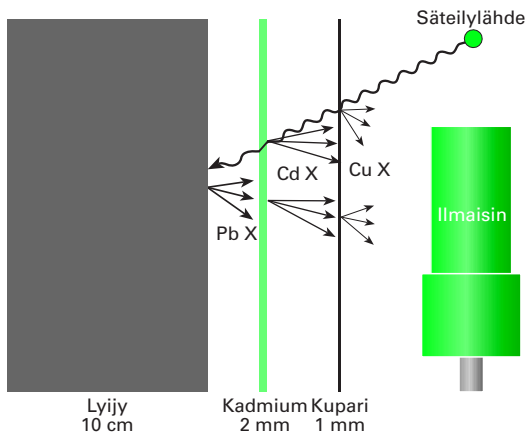


KUVA 5.4 Mallispektri, jossa on useampia gammasiirtymiä

^{88}Y -lähteen gammaspektri mitattuna p-tyyppin germaniumilmaisimella (suhteellinen tehokkuus 40 %) sekä ^{88}Y :n yksinkertaistettu hajoamiskaavio. Spektrissä esiintyy yttriumin kokonaisabsorptiopeikkien (898,0 ja 1 836,1 keV sekä heikko 2 734 keV) ja vastaavien Compton-reunojen (noin 700, 1 600 ja 2 550 keV) lisäksi myös parinmuodostuksen aiheuttamat piikit: annihilaatiopeikki (511,0 keV) sekä yksinkertainen (1 352 keV) ja kaksinkertainen (813 keV) pakopiikki. Ilman yttriumin pääpiikien (898 ja 1 836 keV) koinsidenssisummautumista 2 734 keV:n piikki olisi huomattavasti heikompi, koska suoran siirtymän todennäköisyys on vain 0,7 %. Jarrutus säteily on peräisin beetasäteilyn absorptiosta.

myös itse kiteessä. Piikin muotoon vaikuttaa lisäksi epätäydellisestä vaurustenkeräyksestä johtuva epäsymmetria (tailing).

Spektrin rakennetta ja komponentteja on esimerkkien avulla esitetty myös kuvissa 5.3 ja 5.4. Fotopiikkien lisäksi spektrissä esiintyy Comptonin sironnan aiheuttama jakauma. Ilmaisimeen jäänyt energia riippuu sirontakulmasta. Kiteestä lähellä sen pintaa takaisin 180 astetta siroava foton luovuttaa yhdessä vuorovaikutuksessa kiteelle suurimman mahdollisen määrän energiaa. Tätä vastaava jakauman kohta on muuta Compton-aluetta korkeampi, niin sanottu Compton-reuna. Fotonien takaisinsirontaa tapahtuu myös kidettä ympäröivästä väliaineesta ja erityisesti taustasuojasta. Sirontakulman ollessa yli 120 astetta on sironneen fotonin



KUVA 5.5 Taustasuojaus

Taustasuojan lyijyn karakteristista röntgensäteilyä (energiat 70–85 keV) voidaan vaimentaa vuoraamalla suojan sisäpuoli kadmiumilla. Sen röntgenkvantit (23–26 keV) absorboidaan puolestaan kuparilla.

energia lähes riippumaton alkuperäisen fotonin energiasta. Näin syntyy spektriin leveä paikallinen maksimi, niin sanottu 'takaisinsirontapiikki', noin 200 keV kohdalle. Compton-reunan ja fotopiikin välinen alue edustaa niitä tapauksia, joissa fotoni luovuttaa energiaansa kahdessa tai useammassa peräkkäisessä Compton-vuorovaikutuksessa, mutta viimeinen sirronnut kvantti pääsee poistumaan kiteestä.

Ympäristöstä tulee ilmaisimeen myös gammasäteilyn absorption aiheuttamia karakteristisen röntgensäteilyn kvantteja. Varsinkin taustasuojana tavallisesti käytettävän lyijyn röntgenpiikit ovat lähes aina mukana spektrissä. Niitä voidaan vaimentaa vuoraamalla suojan sisäpuoli kerroksittain alkuaineilla, joiden järjestysluku on pienempi kuin lyijyn, esimerkiksi tinalla ja kuparilla. Paljon käytetty kadmium on huono materiaali sen vuoksi, että sillä on suuri vaikutusala kosmisen säteilyn neutroneille, mistä aiheutuu taustapiikkejä spektriin (kuva 5.5).

Jos gammaenergia ylittää parinmuodostukseen tarvittavan energian (1 022 keV), saatetaan spektrissä havaita pakopiikit. Jos molemmat parinmuodostukseen liittyvät annihilaatiokvantit poistuvat kiteestä, esiintyy spektrissä piikki, jonka energia on alkuperäisen fotonin energia vähennettynä 1 022 keV. Vain toisen kvantin päästessä karkaamaan syntyy piikki, jonka energia on 511 keV kokonaisabsorptiopiikin energiaa pienempi.

β^+ -hajoamisesta tai yleensä ilmaisimen ympäristössä tapahtuvasta annihilaatiosta syntyy spektriin piikki 511 keV kohdalle. Tämä annihilaatiopiikki on leventynyt, koska gammakvanttien energiat riippuvat vähän myös elektronin ja positronin kineettisistä energioista.

Radioaktiiviseen hajoamiseen liittyvien nopeiden beetahiukkasten pysähtyminen ilmaisinta ympäröivissä materiaaleissa synnyttää jarrutusäteilyä, joka näkyy spektrin alussa jatkuvana jakaumana. Käytännössä vain korkeaenergistien beetahiukkasten vaikutus voi olla merkittävä.

Jos lähde lähettää kaksi gammakvanttia samanaikaisesti, on mahdollista, että ilmaisinkide absorboi molemmat. Tällöin kiteeseen syntyy varaus, joka on yhtä suuri kuin yksittäisten fotonien aiheuttamien varausten summa eli syntyy summapulssi. Summautumista on kahta lajia: todellinen koinsidenssisummautuminen ja satunnaissummautuminen.

Satunnaissummautuminen on merkittävä vain suurilla laskentataajuuksilla eli mitattaessa korkeita aktiivisuuksia lähellä ilmaisinta. Tällöin samanaikaisten, eri ytimistä tulevien gammakvanttien summautuminen (pile-up) johtaa pulssien menetykseen fotopiikistä. Todennäköisyys on suoraan verrannollinen laskentataajuuden neliöön. Satunnaissummautumisista voidaan ratkaisevasti vähentää sijoittamalla lähde etäämmälle ilmaisimesta, jolloin laskentataajuus pienenee.

Todellisessa koinsidenssisummautumisessa havaitaan kaksi tai useampia saman ytimen lähettämää kvanttia spektrometrin erotusaikana. Spektriin syntyy summapiikki, jos kumpikin fotoneista luovuttaa koko energiansa ilmaisimelle. Jos toinen tai molemmat fotonit luovuttavat vain osan energiastaan, syntyy summapulssi johonkin kohtaan spektriä aina summapiikin energiaan asti. Kaikissa tapauksissa summautuminen vähentää fotopiikkiin tulevien pulssien määrää. Todellisen koinsidenssisummautumisen todennäköisyys riippuu lähteen ja ilmaisimen välisestä etäisyydestä, mutta ei lähteen aktiivisuudesta. Piikki- ja kokonaistehokkuuden lisäksi summautuminen riippuu myös nuklidin hajoamistavasta.

Nuklidit, jotka hajoavat elektronisieppauksen kautta tai joilla tapahtuu sisäinen konversio, lähettävät karakteristista röntgensäteilyä. K-röntgensäteilyn aiheuttamalle koinsidenssisummautumiselle voidaan myös laskea korjauskertoimet. L-röntgensäteilyn osuus on yleensä merkityksetön. Sen aiheuttama summautuminen on kuitenkin otettava huomioon ilmaisimissa, joilla pystytään havaitsemaan alle 20 keV säteilyä.

Spektrometrin kalibrointi

Analyysia varten mittauslaitteisto on kalibroitava eli määritettävä sen energia- ja tehokkuusvaste.

Energiakalibroinnilla määritetään gammasäteilyn energian ja sitä vastaavan spektrometrin muistipaikan, kanavan, välinen yhteys. Tämä riippuu tutkittavasta energia-alueesta, käytössä olevien kanavien lukumäärästä ja vahvistimen asetuksista. Energiakalibrointi tehdään sellaisten tunnettujen nuklidien avulla, joiden gammaenergiat kattavat halutun energia-alueen. Piikin paikka kanava-asteikolla määritetään joko piikin pinta-alan painopisteenä tai sovittamalla pisteisiin normaali jakauma. Energian ja kanavan välinen yhteys saadaan sovittamalla mittauspisteisiin polynomi tai muu funktio. Käytännössä riippuvuus on hyvin lähellä lineaarista ja usein riittävä tarkkuus saavutetaan sovittamalla suoran yhtälö mittauspisteisiin.

Energian erotuskyvyn kalibroinnilla määritetään spektrometrin erotuskyky energian funktiona. Erotuskyky- eli muotokalibrointia tarvitaan tietokoneohjelmalla tehtävässä piikkien etsinnässä ja pinta-alan määrittämisessä. Erotuskyvyn mittana käytetään piikin puoliarvoveyttä FWHM (full width at half maximum) ja sen määrittäminen voidaan tehdä yhtä aikaa energiakalibroinnin kanssa. Germaniumilmaisimen suorituskykyä kuvataan yleensä ^{60}Co :n 1 332,5 keV piikin puoliarvoveydellä. Korkealatautisella ilmaisimella se on tyypillisesti välillä 1,7–1,9 keV.

Tehokkuuskalibroinnilla määritetään lähteessä syntyneiden fotonien ja spektriin rekisteröityjen pulssien suhde. Tehokkuus riippuu fotonin energiasta, ilmaisimen ominaisuuksista, mittausgeometriasta (näytteen koosta, muodosta ja sijainnista) ja näytteessä sekä näytteen ja ilmaisimen välisessä aineessa tapahtuvasta absorptiosta. Tehokkuutta voidaan kuvailla eri suureilla, joista tärkeimmät ovat piikkitehokkuus ja kokonaistehokkuus.

Piikkitehokkuus kuvaa fotonin, jolla on tietty gammaenergia, osumista kiteeseen ja absorboitumista siihen siten, että pulssi rekisteröidään energiaa vastaavaan fotopiikkiin. Piikkitehokkuus ε_p voidaan määrittää yhtälöstä:

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N_p}{R}, \quad (5.1)$$

missä N_p on fotopiikin (energia E) pulssimäärä (pinta-ala) ja R niiden lähteen mittausajassa emittoimien fotonien lukumäärä, joilla on energia E . Tässä oletetaan, että summautumista ei tapahdu eli kaikki kokonaan absorboituneet fotonit tuottavat pulssin kyseiseen fotopiikkiin.

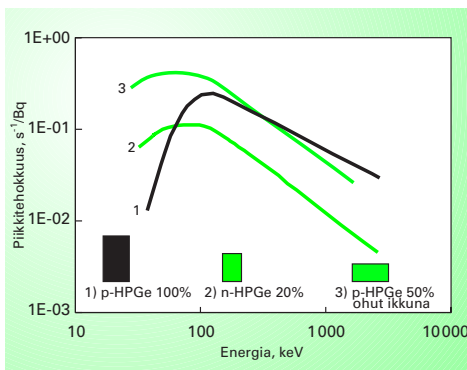
Kokonaistehokkuus on todennäköisyys sille, että lähteen emittoima fotoni tulee yleensä rekisteröidyksi. Kokonaistehokkuus ε_i fotonin energialla E määritetään yhtälöllä:

$$\varepsilon_i(E) = \frac{N_i}{R}, \quad (5.2)$$

missä N_i on kyseessä olevan energian spektriin tuottamien pulssien kokonaismäärä.

Germaniumilmaisimen havaitsemistehokkuutta kuvataan yleisesti suurella suhteellinen tehokkuus. Se määritellään vertaamalla tehokkuutta standardin 76 · 76 mm NaI(Tl)-ilmaisimen tehokkuuteen 25 senttimetrin etäisyydellä olevan ^{60}Co -pistelähteen 1 332,5 keV säteilylle. Tehokkaimpien germaniumilmaisimien suhteellinen tehokkuus on yli 150 prosenttia. Vertailtaessa eri germaniumilmaisimien tehokkuutta on syytä huomata, että ilmaisimen lähellä tämä suure kuvaa tehokkuutta huonosti – erityisesti mitattaessa suurikokoisia lähteitä ja pienempiä gammaenergioita kuten esimerkiksi ^{137}Cs :n 661,7 keV säteilyä.

Tehokkuus voidaan arvioida samanlaisille ilmaisimille tehdyistä kalibroinneista, mutta koska germaniumilmaisinten kokoa ei ole standardisoitu, päästään tällä tavalla yleensä vain noin 10–20 prosentin tarkkuuteen. Tehokkuuskäyrän muoto voidaan määrittää nuklideilla, joilla on riittävästi gammaenergioita, joiden suhteelliset intensiteetit tunnetaan hyvin. Tällaisia nuklideja ovat esimerkiksi ^{56}Co ja ^{152}Eu . Ilmaisimen absoluuttinen kalibrointi voidaan tämän jälkeen tehdä standardilähteellä, jonka aktiivisuus tunnetaan esimerkiksi 0,5–2 prosentin tarkkuudella. Tehokkuuskäyrä on logaritmiasteikolla muodoltaan lähes suora ($\ln \varepsilon = a \ln E + b$, a ja b vakioita), kun energia on yli 150 keV, mutta pienemmillä energioilla tehokkuus heikkenee nopeasti (kuva 5.6). Käyrän muoto muuttuu mitausgeometrian ja näytteen tiheyden muuttuessa.



KUVA 5.6 Kolmen erilaisen ilmaisimen havaitsemistehokkuudet energian funktiona

Näytteenä on ympyränmuotoinen levy, halkaisijaltaan 42 mm, suoraan ilmaisimen päällä.

Tehokkuuskalibrointi on yksinkertaisinta silloin, kun se tehdään analysoitavalla nuklidilla samassa väliaineessa ja astiassa, joka on samalla etäisyydellä ilmaisimesta kuin mitattava näyte. Tällöin näytteen omasta absorptiosta, geometriasta ja koinsidenssisummautumisesta johtuvat tekijät eliminoiduvat. Laboratorioissa käytetään kuitenkin yleensä useita mittauseriä ja matriisiaineita, joten tällainen kalibrointi on työläs suorittaa. Lisäksi läheskään kaikkia nuklideja ei ole saatavana standardeina. Näin ollen on käytännöllisempää pyrkiä yleiseen kalibrointiin mittaamalla vain muutamia nuklideja, jotka kattavat halutun energia-alueen mahdollisimman hyvin. Mittaustulosten avulla muodostetaan ilmaisimen tehokkuuskäyrä tai etsitään funktio, joka kuvaa tehokkuuden riippuvuutta energiasta. Samoin voidaan määrittää geometrian ja absorption korjauskertoimet vertailugeometrian tai -aineen suhteen.

Mittausten helpottamiseksi olisi yksinkertaisinta käyttää lähdettä, joka lähettää useita gammaenergioita laajalla energiavälillä. Tällaisessa lähteessä on joko useita eri nuklideja tai sitten yksi nuklidi, jolla on runsaasti gammasiirtymiä kuten esimerkiksi edellä mainitut ^{56}Co ja ^{152}Eu . Alhaisaktiivisten näytteiden mittaauksissa pyritään parantamaan havaitsemistehokkuutta sijoittamalla näyte mahdollisimman lähelle ilmaisinta, jolloin summautuminen saattaa vaikuttaa tuloksiin. Summautumisen vaikutus voidaan ottaa huomioon laskemalla korjauskertoimet eri nuklideille. Koska kertoimien laskemiseksi tarvitaan piikki- ja kokonaistehokkuudet, ne on määritettävä sellaisten nuklidien avulla, jotka lähettävät vain yhtä gammaenergiaa. Sopivia nuklideja ovat esimerkiksi ^{54}Mn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{203}Hg ja ^{241}Am . Piikkitehokkuutta varten nämä voivat olla samassa lähteessä, mutta kokonaistehokkuus kyseiselle energialle saadaan vain, jos ne mitataan erikseen (yhtälö 5.2).

Puolijohdeilmaisimien kalibroimiseksi on kehitetty myös useita laskennallisia menetelmiä helpottamaan työlästä kokeellista kalibrointia. Niissä havaitsemistehokkuus lasketaan ilmaisimen ja lähteen geometrinen tekijöiden sekä absorptio- ja sirontaominaisuuksien avulla joko Monte Carlo-menetelmällä tai puolikokeellisesti. Pelkästään laskentaan perustuvan kalibroinnin tarkkuus riippuu siitä, kuinka hyvin ilmaisimien pystytään mallintamaan. Vaikeinta on germaniumkiteiden varauksenkeräysalueen koon ja muodon sekä niin sanotun kuolleen kerroksen paksuuden määrittäminen tarkasti; joskus myös ilmaisimen muusta rakenteesta on saatavissa vain puutteellista tietoa. Puolikokeelliset menetelmät käyttävät laskennan pohjana jotain kokeellista, usein pistelähdegeometrian, tehokkuutta. Useimmat laskentamenetelmät ovat käyttökelpoisia soveltaviin rutiinimittauksiin,

joiden tarkkuudeksi riittää tavallisesti 5–10 prosenttia. Laskennallinen gammaspektrometrien tehokkuuskalibrointi tulee yleistymään ja jopa korvaamaan useimmissa tapauksissa kokeelliset menetelmät. Tämän kehityksen mahdollistaa muun muassa tietokoneiden yhä kasvava laskentateho, jota tarvitaan varsinkin Monte Carlo -menetelmien soveltamisessa. Laskennalliset menetelmät edellyttävät myös tarkkaa mittaussjärjestelyn kuvausta, jolla ilmaisin ja kaikki muut rakenteet – näyteastioita ja taustasuojia myöten – mallinnetaan.

Myös taustasäteilyn määrittäminen kuuluu spektrometrin kalibrointiin. Taustamittauksella määritetään spektrometrin havaitsema pulssijakauma, joka aiheutuu näytteen ympäristön säteilystä. Ympäristön säteilylähteitä ovat

- taustasuojassa ja muissa ympäröivissä materiaaleissa olevat radioaktiiviset aineet
- itse ilmaisimessa olevat radioaktiiviset aineet
- radioaktiiviset aineet mittaustilan ilmassa
- kosmisen säteilyn vuorovaikutukset ilmaisimen ja sitä ympäröivien materiaalien kanssa.

Spektrin analysointi

Kuten edellä spektrin rakenteen kuvauksesta käy ilmi, jo yhdenkin nuklidin spektri voi olla hyvin monimutkainen. Siksi useita radioaktiivisia aineita sisältävän näytteen spektrin analysointi tehdään lähes aina tietokoneella. Analysointiohjelman tehtävänä on määrittää piikkien paikat ja pinta-alat, laskea paikkoja vastaavat energiat, tunnistaa nuklidit ja laskea niiden aktiivisuudet. Aktiivisuuden laskemisessa on otettava huomioon useita erityyppisiä korjauksia, joiden merkitys vaihtelee näytetyypistä, mittaussjärjestelystä ja nuklidista riippuen. Näitä korjauksia ovat taustakorjaus, näytteessä tapahtuvan absorptioon korjaus, koinsidenssikorjaus sekä puoliintumis- eli ikäkorjaus.

Analyysin ensimmäinen osa on piikkien etsiminen. Piikkien etsintää vaikeuttavat piikkien päällekkäisyys, pienten piikkien lähellä olevat isot piikit sekä pienten piikkien luotettava erottaminen taustasta. Lähes kaikki piikinhakumenetelmät perustuvat konvoluutioon. Yleisesti käytettyjä piikinhakufunktioita ovat normaalijakauman ensimmäinen ja toinen derivaatta sekä normaalijakauman yhdistäminen toiseen funktioon siten, että saadaan haluttu suodatus. Kaikissa menetelmissä voidaan parametrien

valinnalla vaikuttaa siihen, kuinka pienet piikit havaitaan. Kun spektristä etsitään mahdollisimman pieniä todellisia piikkejä, voi mukaan tulla myös satunnaisvaihtelusta johtuvia virheellisiä piikkejä. Toisaalta, jos halutaan vähentää virheellisiä piikkihavaintoja, voivat myös pienimmät todelliset piikit jäädä havaitsematta.

Toisessa vaiheessa määritetään löydettyjen piikkien pinta-alat. Pinta-alan määrittämisen tarkkuus riippuu siitä, kuinka hyvin piikki voidaan erottaa spektrin taustasta. Yksinkertaisinta on sovittaa lineaarinen pohja käyttämällä piikin molemmilla puolilla olevia kanavia. Piikkiryhmälle (multipletti) on parempi määrittää epälineaarinen tausta, joka muodostaa porrasmaisen pohjan piikin alle. Useimmissa tapauksissa yksittäisen piikin pinta-ala saadaan tarpeeksi tarkasti suoraan taustan yläpuolella olevien kanavien summana. Tällä menetelmällä voidaan kuitenkin saada virheellinen pinta-ala, jos piikin alla on energian funktiona nopeasti muuttuva tausta tai jos piikin ala on hyvin pieni. Kehittyneemmissä määrittämenetelmissä piikin alueen pisteisiin sovitetaan analyyttinen funktio käyttäen esimerkiksi pienimmän neliösumman menetelmää. Tavallisesti piikin muodoksi valitaan normaalijakauma, johon on lisätty yksi tai kaksi pientä epäsymmetristä komponenttia. Piikin integroitirajat riippuvat energian erotuskyvystä; usein rajoiksi valitaan noin kaksi puoliarvoleveyttä. Koska eri menetelmillä saadaan piikin pinta-alalle erilaisia arvioita, on tärkeää, että kalibroinneissa ja analyyseissä pinta-alat määritellään samalla tavalla. Ennen aktiivisuuksien laskemista on piikkien pinta-aloista vielä vähennettävä mahdollinen ympäristön gammasäteilyn osuus.

Nuklidien tunnistaminen tapahtuu vertaamalla piikeille laskettuja energioita eri radionuklidien tunnettujen gammasiirtymien energioihin. Yleensä mahdollisia tietyn piikin selittäviä nuklideja on runsaasti: keskeisellä gammaenergia-alueella 30–2 700 keV tunnetaan yhteensä noin 65 000 gammasiirtymää, jotka ovat peräisin noin 1 700 nuklidista. Mahdollisten nuklidien joukkoa pienennetään ottamalla huomioon tiedot muun muassa näytteen alkuperästä, iästä, olomuodosta ja kemiallisesta koostumuksesta. Tässä vaiheessa voidaan useimmiten hylätä suurin osa nuklideista, joiden läsnäolo näytteessä on eri syistä epätodennäköistä, esimerkiksi lyhyen puoliintumisaikansa takia. Täydellinen tunnistaminen on yleisessä tapauksessa vaikea ongelma, joka edellyttää paitsi menetelmien hyvää hallintaa myös kokemuksella hankittua asiantuntemusta.

Seuraavassa kuvataan eräs nukliditunnistuksen menettelytapa:

1. Tunnistetaan annihilaatiopiikki.
2. Valitaan joku spektrin suurimmista tunnistamattomista piikeistä ja etsitään kaikki energiat, jotka ovat valitun toleranssin sisällä. Toleranssiarvona voidaan käyttää esimerkiksi ± 1 keV tai jopa alle sen edellyttämän, että energiakalibrointi on riittävän tarkka koko spektrin alueella. Löytyneitä energioita vastaavat nuklidit otetaan ehdokkaiksi.
3. Etsitään ehdokasnuklidin muut gammaenergiat. Nuklidi hylätään, jos löydettyä energiaa voimakkaamman intensiteetin energiaa ei esiinny spektrissä.
4. Nuklidi hylätään, jos ehdokasnuklidin puoliintumisaika on selvästi lyhyempi kuin näytteen ikä eikä sillä ole pitkäikäistä emonuklidia.
5. Nuklidin syntyvän perusteella voidaan arvioida, onko mahdollista, että näyte sisältää kyseistä nuklidia.
6. Tutkitaan nuklidin kaikki gammaenergiat. Jos spektristä löytyneiden piikkien pulssimäärien suhteet – ilmaisutehokkuus huomioon ottaen – vastaavat nuklidin energioiden gammaosuuksien suhteita, merkitään piikit kuuluviksi tälle nuklidille. Jonkin piikin 'liian' suuri pulssimäärä voi johtua muista nuklideista.
7. Tunnistetaan kyseisen nuklidin gammaenergioiden mahdolliset summa- ja pakopiikit.
8. Palataan kohtaan 2. kunnes spektrissä ei enää ole tunnistamattomia piikkejä.

Tietokoneohjelmat käyttävät tunnistuksessa hyväksi nuklidikirjastoa, jossa on lueteltu radionuklidien tärkeimmät gammaenergiat ja niiden intensiteetit. Nuklidikirjaston laadinnassa on kiinnitettävä huomiota nuklidien ja gammaenergioiden valintaan. Energioita ja nuklideja on oltava tarpeeksi, jotta mahdolliset päällekkäiset piikit tulevat lasketuksi oikein. Toisaalta liian suuri nuklidien ja energioiden määrä lisää virhetunnistusten todennäköisyyttä.

Kun tiettyä piikkiä vastaava nuklidi on tunnistettu, saadaan aktiivisuus yhtälöstä

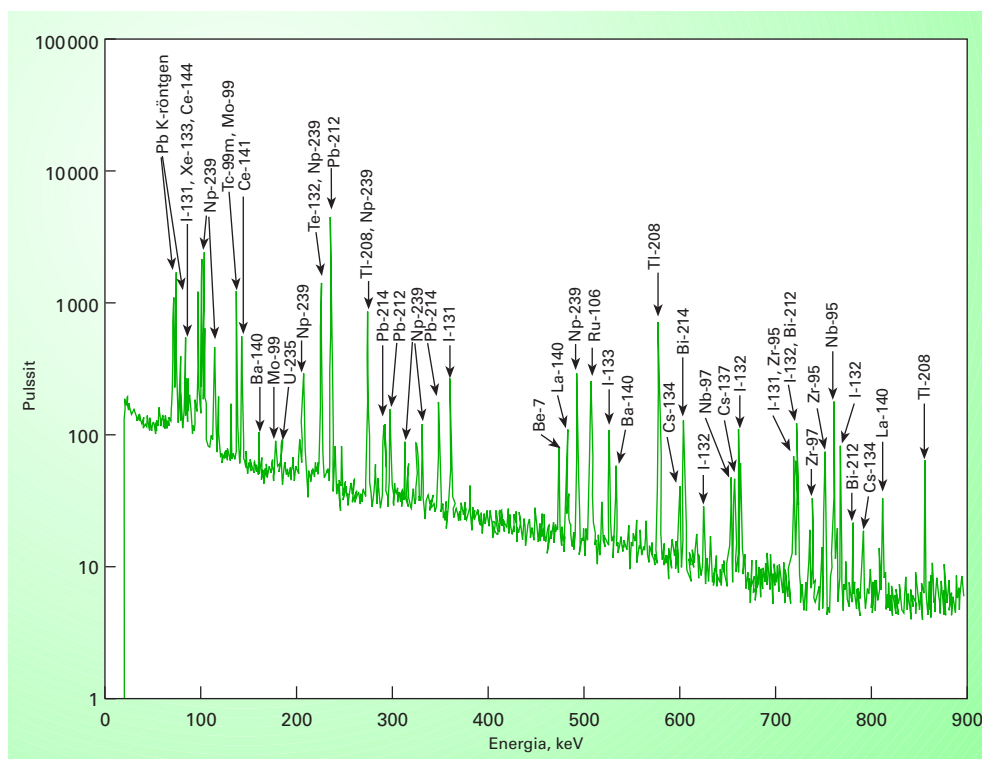
$$A = \frac{I(E)}{t \varepsilon_p(E) p_\gamma(E)}, \quad (5.3)$$

missä $I(E)$ on fotopiikin (energia E) nettopulssimäärä mittausajassa t (spektrometrin live time), $\varepsilon_p(E)$ piikkitehokkuus energialla E ja $p_\gamma(E)$ gammaenergian emissiotodennäköisyys. Kalibrointitavasta, piikkitehokkuudesta sekä kyseisen nuklidin hajoamiskaaviosta riippuen tulee ottaa

huomioon myös koinsidenssisummautumisen vaikutus. Jos tulos halutaan vastaamaan tiettyä referenssiaikaa, esimerkiksi näytteenottoaikaa, lasketaan vielä puoliintumiskorjaus. Jos nuklidi kuuluu hajoamissarjaan, voidaan puoliintumisajan valinnalla vaikuttaa siihen, lasketaanko koko sarjan, emonuklidin vai kyseisen nuklidin aktiivisuus. Kahdessa ensimmäisessä tapauksessa tulee varmistua siitä, että tytärnuklidin aktiivisuus on tasapainossa emonuklidin tai vastaavasti koko sarjan kanssa.

Nuklidin tuloksena ilmoitetaan joko yhdestä fotopiikistä laskettu aktiivisuus tai kyseisen nuklidin kaikkien tunnistettujen piikkien tulosten painotettu keskiarvo. Painotuskertoimina käytetään yleensä piikkien pintaalojen varianssien käänteisarvoja.

Esimerkkeinä monimutkaisesta gamma-analyysistä ovat kuvat 5.7 ja 5.8. Maaliskuussa 1992 tapahtui Sosnovyi Borin ydinvoimalaitoksella reaktio-



KUVA 5.7 Osa ilmapölynäytteen gammaspektristä

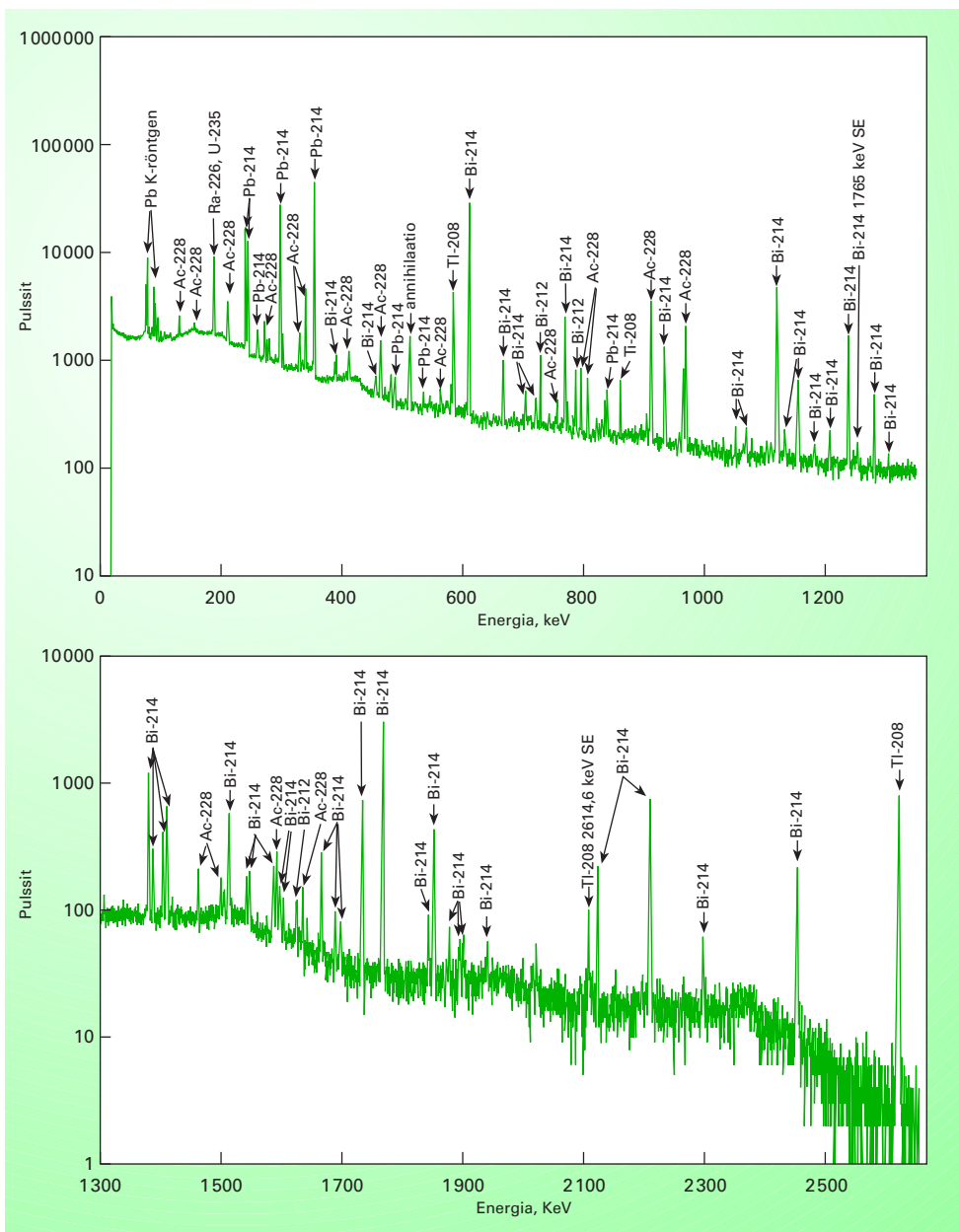
Yhdellä mittauksella voitiin havaita yhteensä 32 radionuklidia, jotka olivat peräisin Sosnovyi Borin ydinvoimalaitoksen päästöistä ja luonnon radioaktiivisista aineista. Selvyyden vuoksi kuvaan on merkitty tunnistus vain osalle piikeistä.

rin polttoainekanavan vaurio, minkä seurauksena ympäristöön pääsi pieniä määriä radioaktiivisia aineita. Osa päästöstä kulkeutui Suomen etelärannikolle. Ilman sisältämistä radioaktiivisista aineista kerätty näyte mitattiin puolijohdeilmallisella. Alhaisen aktiivisuuden takia mittausaika oli 26 tuntia. Spektristä voitiin havaita yhteensä 25 keinotekoisia radionuklidia, joista suurin osa oli lyhytikäisiä fissiotuotteita. Niitä vastaavat pitoisuudet ilmassa olivat näytteenkeräyshetkellä 0,1–10 millibecquereliä kuutiometrissä (mBq/m^3) ilmaa. Lisäksi spektrissä oli useita luonnon radioaktiivisten aineiden gammapiikkejä (^7Be , ^{40}K , uraanin ja toriumin hajoamissarjat). Selvytyden vuoksi kuvaan on merkitty tunnistus vain osalle piikeistä.

Osa piikeistä on päällekkäisiä, mikä vaikeuttaa tunnistusta ja aktiivisuuslaskentaa. Näitä ovat muun muassa energiat 140 keV ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ ja ^{99}Mo) ja 228 keV (^{132}Te ja ^{239}Np). Tällaisessa tapauksessa aktiivisuus pyritään laskemaan nuklidien muiden piikkien avulla. Koska $^{99\text{m}}\text{Tc}$:lla ja ^{132}Te :lla ei ole muita gammasiirtymiä, niiden aktiivisuus saadaan laskettua vain vähentämällä häiritsevien nuklidien osuus kyseisistä piikeistä. ^{239}Np :n hajotessa ^{239}Pu :ksi syntyy sisäisen konversion seurauksena plutoniumin röntgenkvantteja (K_{α} : 99–106 keV, K_{β} : 116–121 keV), jotka ovat selvästi näkyvissä spektrissä. Näiden summautuminen gammakvanttien kanssa vaikeuttaa neptuniumin analysointia. Kyseiselle ilmaisimelle, näytekoolle ja mittausetäisyydelle laskettu koinsidenssisummautumisen korjauskerroin on neptuniumin gammaenergiasta riippuen välillä 0,75–1,3. Toisin sanoen jos summautumista ei oteta huomioon, saadaan neptuniumin eri piikeistä tuloksia, jotka ovat tämän kertoimen verran virheellisiä.

Kuvassa 5.8 on esitetty radiumpitoisen kivi­näytteen spektri. Näytteen massa oli 146 grammaa ja mittausaika 66 minuuttia. Tietokoneohjelma löysi spektrin energia-alueelta 30–2 700 keV yhteensä 157 piikkiä, joista suurin osa on peräisin ^{238}U :n ja ^{232}Th :n hajoamissarjojen gamma-aktiivisista jäsenistä. ^{238}U :n hajoamissarjaan kuuluvat ^{226}Ra , ^{214}Pb ja ^{214}Bi ; ^{232}Th :n hajoamissarjaan ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi ja ^{208}Tl . Muista luonnon radioaktiivisista aineista on havaittavissa ^{40}K ja ^{235}U . Näiden nuklidien gammaenergioiden lisäksi spektrissä esiintyy taustasuojasta peräisin olevia lyijyn röntgenpiikkejä, annihilaatiopiikki sekä voimakkaimpien gamma­piikkien pakopiikkejä.

^{226}Ra :n ainoa gammaenergia (186,1 keV) on niin lähellä ^{235}U :n pääpiikkiä (intensiteetiltään voimakkainta siirtymää, 185,7 keV), että germaniumilmaisimen energian erotuskyky ei riitä yleensä erottamaan piikkejä toisistaan. Jos ^{235}U :n tulos saadaan laskettua tarpeeksi tarkasti muista piikeistä,



KUVA 5.8 Radiumpitoisen kivenäytteen spektri

Spektrissä esiintyy runsaasti ^{238}U :n ja ^{232}Th :n hajoamissarjojen gammaenergioita. Tasapainolanteissa ^{226}Ra :n pitoisuus voidaan määrittää ^{214}Bi :n piikeistä ja vastaavasti ^{232}Th :n pitoisuus ^{228}Ac :n piikeistä.

voidaan sen osuus vähentää 186 keV piikistä. Kuvan 5.8 spektrissä ^{235}U :n muita energioita ei ole havaittavissa. Olettaen, että kyseessä on luonnon uraani (uraani-isotoppien 235 ja 238 suhde 0,72 %), voidaan ^{235}U :n pitoi-

suus laskea ^{238}U :n avulla. Esimerkin tapauksessa ^{238}U :n pitoisuutta ei kuitenkaan pystytä määrittämään, koska sen tai sen tytärnuklidien piikkejä ei esiinny spektrissä. Ainoaksi keinoksi määrittää ^{226}Ra :n pitoisuus jää tuloksen laskeminen sen hajoamistuotteista ^{214}Pb ja ^{214}Bi olettaen, että ne ovat tasapainossa pitkäikäisen emonuklidinsa kanssa. Näillä nuklideilla, erityisesti ^{214}Bi :lla, on runsaasti tarpeeksi intensiivisiä gammaenergioita, vieläpä niin korkeilla gammaenergioilla, että näytteessä tapahtuva absorptio ei – suuresta tiheydestä huolimatta – ole merkittävää.

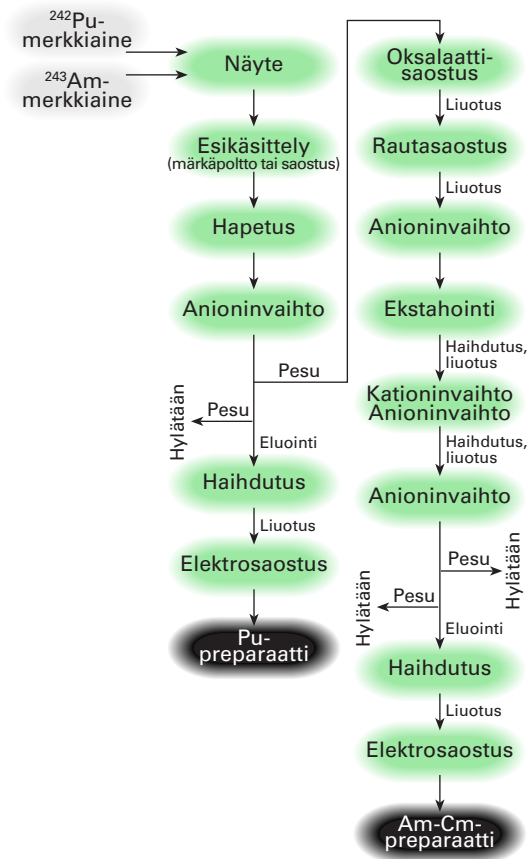
^{232}Th :n aktiivisuus saadaan samoin tytärnuklidien pitoisuuksista edellyttäen, että nuklidit ovat tasapainotilassa. Käyttökelpoisin on ^{228}Ac , jolla on myös runsaasti gammaenergioita. Jos aktiivisuuden määrittämiseen käytetään ^{208}Tl :n piikkejä, tulee ottaa huomioon, että sarja haarautuu ja ^{212}Bi hajoaa talliumiksi vain 35,9 prosentin todennäköisyydellä. Tällöin ^{208}Tl :n aktiivisuus on jaettava tällä haarautumissuhteella, jotta saadaan sama tulos kuin ^{212}Pb :n ja ^{212}Bi :n avulla.

5.3 Alfasppektrometria

Useimmilla lyijyä raskaammilla alkuaineilla sekä eräillä lantanideilla on alfa-aktiivisia isotooppeja, joista osa on luonnossa esiintyviä ja osa keino-tekoisesti tuotettuja. Tietyn nuklidin lähettämällä alfa-hiukkasilla on joko kaikilla sama energia, tai ne jakautuvat muutamiksi monoenergeettisiksi ryhmiksi ja muodostavat niin sanotun viivaspektrin (katso luku 1.2). Alfa-hiukkasten energiat ovat 1,5 MeV:sta aina 11,7 MeV:iin, suurimman osan ollessa välillä 4–8 MeV. Koska alfa-hiukkasen kantama on lyhyt, se asettaa tarkkoja vaatimuksia sekä näytteelle että mittausjärjestelylle. Näytteen valmistus ennen alfasppektrometrin mittausta on tärkeää, jotta tutkittavat isotoopit voidaan alfasppektristä erottaa energioidensa mukaan.

Näytteen valmistus

Näytteenvalmistukseen kuuluvat yleensä näytteen esikäsittely, alkuaineen kemiallinen erottaminen ja tarpeeksi ohuen mittauspreparaatin valmistus. Mitä pienempiä aktiivisuuksia määritetään sitä tärkeämpää on saada aikaan ohut ja kemiallisesti puhdas preparaatti. Esikäsittelynä voi olla näyttemateriaalista riippuen tuhitus, erilaiset sulatteen, märkäpoltot hapoilla, mikroaaltouunipoltot tai suodatukset ja keraasotukset nestemäisillä näytteillä. Kvantitatiivisissa määrityksissä käytetään alfasäteilevää merkkiainetta, joka on yleensä saman alkuaineen jokin muu kuin



KUVA 5.9 Lohkokaavio ympäristönäytteen plutonium- ja amerikum-curium-erotuksesta

Ruostumattomalle teräslevylle elektrosaostettavan preparaatin valmistus kestää näytelajista riippuen 3–5 päivää (plutonium) tai noin kaksi viikkoa (amerikum-curium).

tuokittava isotooppi, koska sen täytyy käyttäytyä kemiallisesti samalla lailla kuin tuokittava aine. Esimerkiksi plutonium-analyysissä voidaan käyttää merkkiaineena ²³⁶Pu:a tai ²⁴²Pu:a, kun määritettävät isotoopit ovat ²³⁸Pu, ²³⁹Pu ja ²⁴⁰Pu. Merkkiaine lisätään näytteeseen ennen analyysin aloittamista, koska sen avulla tehdään saaliskorjaus lopulliseen tulokseen. Saaliskorjauksessa huomioidaan analyysin eri vaiheissa hävinnyt aktiivisuus.

Ympäristönäytteitä analysoitaessa tarvittava näytemäärä vaihtelee alle yhdestä grammasta jopa satoihin kilogrammoihin. Sen sijaan mitattavan näytepreparaatin näytemäärän on oltava erittäin pieni, mikrogrammaluokkaa. Siksi tuokittava alkuaine on erotettava kaikesta muusta näytteen materiaalista. Kemiallisia erotusmenetelmiä ovat erilaiset saostukset, ioninvaihdot, ekstrahoinnit tai ionikromatografiset menetelmät sekä näiden yhdistelmät. Standardimenetelmiä radiokemiallisille erotuksille ei ole kovin monta, menetelmät on usein itse validoitava ja todettava sopi-

viksi. Kuvassa 5.9 on esimerkki ympäristönäytteen plutonium-, ja ameriikium-curium-näytepreparaatin valmistusvaiheista.

Mitä ohuempi näytepreparaatti pystytään valmistamaan, sen parempaan erotuskykyyn päästään alfaspektrissä. Itseabsorptio paksusta näytekerroksesta aiheuttaa satunnaisesti vaihtelevan alfahiukkasten energiame- netyksen, mikä ilmenee spektrin piikkien leviämisenä ja energia- alueen siirtymisenä. Optiminäytemäärä näytepreparaatilla on yhden ato- min paksuinen kerros mitattavaa isotooppia tasaisesti levitetynä prepa- raatille. Käytännössä preparaattit ovat kuitenkin tätä paksumpia. Hyvä erotuskyky saadaan, jos näytekerroksen paksuus preparaatilla on alle 25 mikrogrammaa neliösenttimetrillä. Ohuen preparaatin valmistuksessa käytetään useita eri menetelmiä: elektrostaostusta metallilevyille, hydrok- sidi- tai fluoridikerasaostusta ja suodatusta ohueksi kerrokseksi suodatin- paperille, vakuumisublimointia, elektrosumutusta tai suoraa haihdutusta mittausalustalle. Yleisimmin käytetään elektrostaostusta, jossa alkuaine saostetaan laimeasta happoliuksesta platinaspiraalin avulla teräs-, plati- na- tai nikkeli-levylle. Menetelmä sopii kaikille aktinideille toriumista curiumiin. Yleensä tällä menetelmällä saavutetaan 15–40 keV:n erotus- kyky riippuen ilmaisimesta ja preparaatin puhtaudesta. Kerasaostusmen- etelmää käytetään paljon sen nopeuden ja halpuuden takia. Sillä pääs- tään lähes yhtä hyvään erotuskykyyn kuin elektrostaostuksella, mikäli näytekerros pystytään saamaan tarpeeksi ohueksi. Polonium voidaan saostaa suoraan liuksesta spontaanisti esimerkiksi hopealevyille. Vakuu- misublimoinnilla ja elektrosumutuksella päästään kaikkein ohuimpiin näytepreparaatteihin, jolloin alfaspektrin erotuskyky voi olla jopa 10 keV. Ne vaativat kuitenkin monimutkaisemman ja kalliimman laitteiston kuin esimerkiksi elektrostaostus, lisäksi vakuumisublimointimenetelmä ei ole kvantitatiivinen määrittäminen.

Mittaus puolijohdeella

Alfaspektrometrisissa mittauksissa käytetään nykyään melkein yksin- omaan puolijohdeilmaisimia. Puolijohdeilmaisimen toimintaperiaate on kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.4.

Ilmaisimen valinta

Alfaspektrometriin mittauksiin soveltuvat pintaesteilmaisimet, jois- ta yleisimmin on käytössä ioni-istutuspuolijohde, kuten PIPS-ilmai-

sin¹. Ilmaisimen vaatimuksina ovat hyvä erotuskyky ja tehokkuus, stabiilius ja matala tausta. Alhaisaktiivisten näytteiden määrittelyyn on saatavilla hyvin puhtaita kiteitä, joiden taustat voivat olla esimerkiksi 300 mm²:n kiteellä alle 0,15 pulssia tunnissa energia-alueella 3–7 MeV. Ilmaisimen erotuskykyyn ja tehokkuuteen vaikuttavat ilmaisimen ikkunan paksuus, pinta-ala ja vuotovirta. Lisäksi hyvän erotuskykyyn ja tehokkuuden saavuttamiseen vaikuttavat mittaussuhteet kuten mittauskammion alipaine, näytepreparaatin ja ilmaisimen ikkunan etäisyys toisistaan, preparaatin koko suhteessa ilmaisiin ja preparaatin paksuus.

Uudenaikaiset PIPS-puoli-ilmaisimet ovat hyvin ohutikkunaisia (50 nm) ja niiden vuotovirta on alle kymmenesosa vanhemman mallisten pii-pintaesteilmaisimien vuotovirrasta. Ohut ikkuna estää piikin leviämisen ja alhainen vuotovirta vähentää kohinaa, jolloin energian erotuskyky paranee. Iän myötä kiteeseen syntyy säteilyvaurioita, jolloin sen vuotovirta kasvaa. Tällöin on syytä vaihtaa ilmaisin. Ilmaisimen ikkunan pinta-ala vaihtelee välillä 200–1 200 mm² käyttötarkoituksen mukaan. Ikkunan pinta-ala vaikuttaa sekä erotuskykyyn että tehokkuuteen. Suurella käyttöpinta-alalla saadaan hyvä laskentatehokkuus. Toisaalta, mitä pienempi pinta-ala ilmaisimella on, sitä pienempi on sen kapasitanssi ja sitä parempi erotuskyky.

Mittausgeometrian vaikutus

Mittaukset tehdään tyhjiössä (paine usein alle 1 Pa), jotta kaikki alfa-hiukkaset saataisiin kerättyä ilmaisimelle. Liian suuressa alipaineessa on kuitenkin vaarana ilmaisimen saastuminen näytteestä sinkoutuvilla rekyyliatomeilla. Tämä voidaan estää jättämällä mittauskammioon jonkin verran ilmaa preparaatin ja ilmaisimen ikkunan välille, vaikka tämä huonontaakin energioiden erotuskykyä. Rekyyliatomien aiheuttamaa kontaminaatiota voidaan vähentää tuhannesosaan jättämällä pieni (noin 12 mg/cm²) ilmakerros ilmaisimen ja preparaatin väliin joskin piikkien puoliarvoveveys kasvaa muutamalla keV:lla. Ilmaisimille asetettu pieni estojännite tai näytepreparaatin päälle levitetty ohut kalvo vähentävät myös rekyylivaaraa, tosin kalvo huonontaa erotuskykyä.

¹ PIPS = passivated implanted planar silicon detector

| | Ilmaisimen pinta-ala, mm ² | | | | |
|------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|
| | 300 | 450 | 600 | 900 | 1200 |
| Tyypillinen vuotovirta, nA | 35 | 50 | 60 | 100 | 150 |
| Erotuskyky, keV* | 17 | 18 | 23 | 25 | 30 |
| Absoluuttinen tehokkuus, %** | | | | | |
| 2 mm etäisyys | 36,8 | 40,2 | 41,0 | 43,6 | 44,5 |
| 5 mm etäisyys | 23,5 | 28,3 | 31,2 | 34,8 | 36,9 |
| 15 mm etäisyys | 7,3 | 10,1 | 12,4 | 16,1 | 18,9 |

* 5,486 MeV:n ²⁴¹Am:lle 15 mm lähteellä. ** 15 mm:n lähteellä.

Taulukko 5.1 Alfa-aktiivisuusmittauksissa käytettävien PIPS-ilmaisimien tyypillisiä ominaisuuksia

(Lähde: L'Annunziata M.F. (ed.), Handbook of radioactivity analysis, San Diego, USA: Academic Press, 1998.)

Näytepreparaatin ja ilmaisimen etäisyys toisistaan vaikuttaa sekä erotuskykyyn että laskentatehokkuuteen. Mitä lähempänä näyte on ilmaisinta, sitä parempi tehokkuus saadaan aikaan. Toisaalta saadaan aikaan parempi erotuskyky, jos näyte on kauempana ilmaisimesta, koska tällöin alfahiukkasen saapumiskulma kiteelle on pienempi. Yleensä alhaisaktiivisia näytteitä mitattaessa käytetyt etäisyydet ovat yhdestä kolmeen millimetriä. Tällöin tehokkuus on tavallisesti 30–40 prosenttia kiteen koosta riippuen. Taulukossa 5.1 on esitetty tyypillisiä eri kokoisten PIPS-ilmaisimien ominaisuuksia. Mittauspreparaatin optimisäde on yhtä suuri kuin ilmaisimen säde. Tämä pitää paikkansa riippumatta näytteen ja ilmaisimen välisestä etäisyydestä.

Tausta

Alfaspektrometriset mittaukset ovat kestoltaan usein pitkiä, vuorokaudesta kymmeneenkin vuorokauteen. Mittausjärjestelmän on oltava stabiili ja taustan pysyttävä matalana. Ilmaisimien voi kontaminoitua paitsi rekyyliatomeista myös siihen tarttuneista muista epäpuhtauksista: vakuumpumpun öljystä, vakuumikammioon joutuneesta muusta liasta tai näytteistä irronneista aineista, esimerkiksi näytepreparaatista haihtuneista poloniumin isotoopeista. Öljysumukontaminaation välttämiseksi vakuumijärjestelmässä on oltava kunnolliset suodattimet. Nykyisin ilmaisimet kestävät kevyen puhdistuksen metanolilla tai asetonilla. Rekyyliatomit eivät kuitenkaan poistu puhdistamalla. Niiden tarttuminen ilmaisimeen on estettävä aiemmin kuvatuin keinoin. Matalataustaisilla ilmaisimilla pienin havaittava aktiivisuus voi olla erittäin pieni, esimerkiksi sadan tunnin mittausajalla ²⁴¹Am:n havaitsemisrajaksi saadaan 0,1 millibecquereliä näytettä kohti.

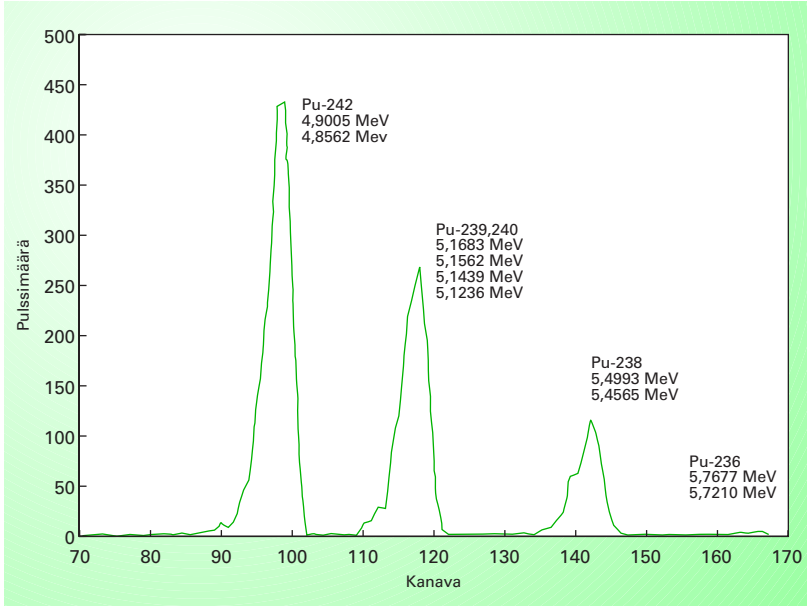
Mittalaitteisto, kalibrointi ja spektrinkäsittely

Puolijohdeilmmaisimilla on kullakin valmistajan määrittämä optimijännite, joka yleensä on 40–100 voltia. Nykyaikaiset laitteistot käsittävät ”yhtenä pakettina” vakuunikammiot, jännitelähteet, esivahvistimet, vahvistimet, analogia-digitaali-muuntimen sekä monikanava-analysaattorin – aivan kuten gammaspektrometriassa (vertaa luku 5.2). Laitteisto voi käsitellä yhdestä aina useaan kymmeneen ilmaisimeen vakuunikammioineen.

Alfaspektrometrille on tehtävä energia- ja tehokkuuskalibroinnit kuten gammaspektrometrillekin. Alfaspektrometriassa kalibrointi on kuitenkin yksinkertaisempaa. Nykyisin on kaupallisesti saatavilla kalibrintipreparaatteja kumpaankin tarkoitukseen. Energiakalibrointi tehdään yleensä preparaattilla, jossa on kolme eri alfanuklidia, esimerkiksi ^{239}Pu , ^{241}Am ja ^{243}Cm . Kalibroinnista saadaan energia/kanava-vaste, jonka avulla voidaan tunnistaa tutkittavan näytteen alfanuklidit energian mukaan. Tehokkuuskalibrointi tehdään yleensä yhdellä nuklidilla, esimerkiksi ^{241}Am :lla, jonka aktiivisuus preparaattilla tunnetaan tarkasti. Jotta tehokkuus vastaisi näytemittauksessa kalibrointia, on mitta-geometrian oltava täsmälleen samanlainen. Näin ei kuitenkaan usein ole, koska tehokkuuskalibroinnissa pyritään välttämään ilmaisimen kontaminaatiota ja käytetään siten suurempaa etäisyyttä mittavan preparaatin ja ilmaisimen välillä. Tällöin saadaan huonompi tehokkuus kuin varsinaisessa näytemittauksessa. Tällä ei ole merkitystä silloin, jos analyysissä käytetään tunnettua merkkiainetta, jonka avulla tulos lasketaan. Tehokkuuskalibroinnin avulla seurataan kuitenkin ilmaisimen kuntoa ja analyysin kemiallista saalista.

Ilmaisimen maksimierotuskyky saadaan myös kalibrintimittauksista. Näytteillä se on useasti huonompi, koska näytepreparaatti on harvoin yhtä ohut kuin kalibrintipreparaatti, samoin preparaatin mitta-asetäisyys ilmaisimen ikkunasta vaikuttaa erotuskykyyn. Jokaiselle näytemittaukselle voidaan haluttaessa laskea erotuskyky esimerkiksi merkkiaineen piikistä.

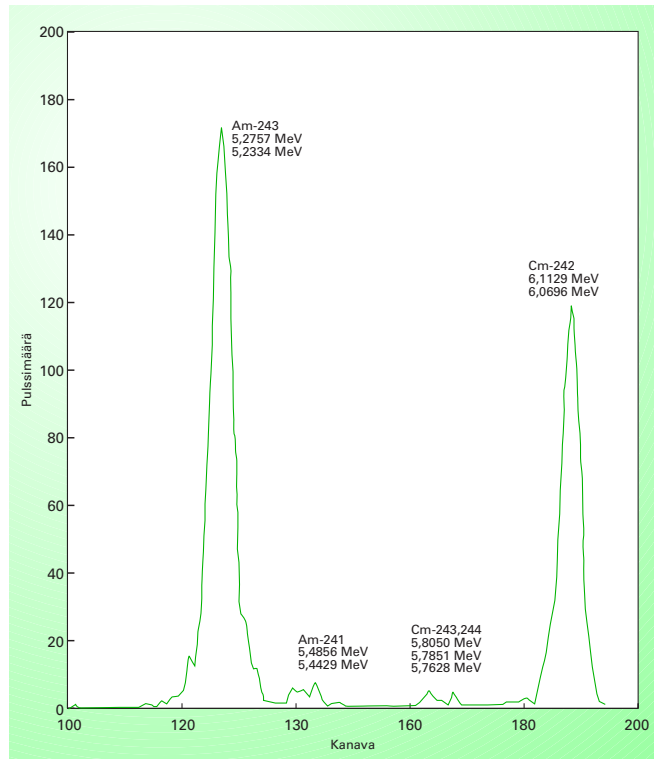
Spektrinkäsittely (analysointi) tapahtuu nykyään lähes aina tietokoneella joko valmistajien valmiilla ohjelmistoilla tai käyttäjän itsensä rakentamalla ohjelmalla. Ohjelmistot ovat samantyyppisiä kuin gammaspektrometriassa, mutta alfaspektrin rakenteen takia paljon yksinkertaisempia. Tausta-, energiakalibrointi- ja tehokkuustiedot sekä alfanuklidikirjasto on yleensä tallennettu ohjelmistoon, joka laskee valmiin tuloksen näiden ja annettujen näytetietojen avulla. Uusimmilla piikinsovitusohjelmilla



KUVA 5.10a plutoniumspektri

KUVA 5.10 a ja b Esimerkki alfaspektreistä

Tshernobyl-onnettomuuden jälkeen otetusta ruohonäytteestä puolijohdekeittellä mitattu plutoniumspektri (a) ja amerikum-curiumspektri (b). Mittausaika on 4 000 min. Merkkiaineena on käytetty ^{242}Pu :a (a) ja ^{243}Am :a (b). ^{239}Pu :n ja ^{240}Pu :n sekä ^{243}Cm :n ja ^{244}Cm :n energiat ovat niin lähekkäin, että ne on määritettävä yhdessä.



KUVA 5.10b amerikum-curiumspektri

pystytään erottamaan energioiltaan toisiaan hyvinkin lähellä olevia piikkejä, esimerkiksi ^{239}Pu :n (pääenergia 5,1554 MeV) ja ^{240}Pu :n (pääenergia 5,1683 MeV) piikit, mikäli kemiallinen analyysi ja näytteen valmistus ovat hyvin onnistuneet ja mittauksessa käytetyn ilmaisimen erotuskyky on kyllin hyvä. Kuvissa 5.10a ja b on esimerkki ympäristönäytteen transuraanien alfaspektreistä.

Mittaus ionisaatiokammioilla

Ionisaatiokammion toimintaperiaate on kuvattu luvussa 4.2. Pulssi-ionisaatiokammiota voidaan käyttää alfaspektrometriseen mittaukseen. Tällöin tarvitaan hilallinen, niin kutsuttu Frischin ionisaatiokammio. Siinä näyte on osana katodia ja kammion syvyys valitaan niin, että alfahiukkaset menettävät koko liike-energiänsä katodin ja hilan välisessä tilassa. Hilalla on pienempi jännite kuin anodilla, ja se suojaa anodia positiivisten ionien vaikutukselta siten, että pulssin amplitudi on suoraan verrannollinen syntyneitten ioniparien alkuperäiseen lukumäärään. Kammion mitat, muoto ja kaasunpaine voidaan valita käyttötarkoituksen mukaan. Täytekaasun on oltava erittäin puhdasta ja reagoimaton, esimerkiksi argonia, johon on lisätty muutama prosentti metaania.

Pulssi-ionisaatiokammiota käytetään sellaisiin alhaisaktiivisten näytteiden alfaspektrometriin määrittäksi, joissa tarvittava näytemäärä on suuri. Kammio voidaan suunnitella siten, että näyte voidaan levittää suurelle alueelle, jolloin saadaan ohut preparaatti. Erotuskyky on yleensä noin 40 keV, mutta sopivilla mittausjärjestelyillä voidaan päästä yhtä hyvään erotuskykyyn kuin puolijohdekiteillä. Ionisaatiokammion laskentatehokkuus on hyvä. Tausta on matala, mikäli täytekaasun, rakennemateriaalien ja instrumenttien epäpuhtaudet saadaan eristettyä. Pulssinmuokkaukseen ja tulosten laskentaan tarvitaan samanlainen järjestelmä kuin puolijohdeilmaisimella mitattaessa.

Ionisaatiokammiosta on olemassa myös sovellus ”pitkän etäisyyden alfailmaisimesta” (long-range alpha detector). Sitä käytetään kontaminaatiomittauksissa, joissa kontaminaatiolähteestä tulevat alfahiukkaset voidaan kuljettaa ilmavirtauksen tai elektrostaattisen kentän avulla ionisaatiokammioon mitattavaksi. Menetelmää käytetään muun muassa Yhdysvalloissa Los Alamosin laboratoriossa määritettäessä pintamaasta ja liuosmaisten jätteiden pinnasta lähtevää alfasäteilyä.

Jatkuvatoiminen alfaspektrometria

Varsinkin valmiustilanteita varten on tärkeää saada nopeasti tietoa ilman radioaktiivisuudesta. Tätä tarkoitusta varten on kehitetty jatkuvatoimisia ilmapölynäytteiden alfaspektrin mittausrakenteita. Näyte kerätään pumpun avulla suodattimelle, jonka päälle on asetettu PIPS-puolijohdeilmaisin. Mittaus tapahtuu suoraan suodattimelle kerätystä ilmapölystä. Ilmaisimen on oltava erikoisrakenteinen, koska se ei ole vakuuissa eikä valolta suojattuna. Alumiinikerros suojaa ilmaisinta valon haitalliselta vaikutukselta ja ohut absorptiokerros kosteudelta, pölyltä ja korroosiolta. Tällainen ilmaisimen rakenne sekä ilmaisimen ja näytteen välillä oleva ilmakerros huonontavat energian erotuskykyä verrattuna vakuuikammio-mittauksiin. Esimerkiksi CAM PIPS (Canberra) 450 mm²:n ilmaisimella se on noin 300 keV puolen senttimetrin etäisyydellä ilmaisuodattimesta.

Korkea taustasäteily aiheuttaa suurimmat epävarmuudet tuloksiin tällaisissa mittauksissa. Ilmaisimen ominaisuuksilla on tässä tapauksessa hyvin pieni vaikutus taustan vaihteluun. Taustan aiheuttavat ilmassa olevat luonnon alfa- ja beetasäteilijät (radonin ja toronin tyttäret). Niiden pitoisuudet ilmassa ovat normaalisti kertaluokkia suuremmat kuin esimerkiksi transuraanien pitoisuudet. Lisäksi luonnon taustasäteilyn taso vaihtelee ajan suhteen. Osa beetasäteilyä absorboituu ilmaimeen ja aiheuttaa ylimääräisiä pulsseja varsinkin energia-alueen alkupäähän. Luonnonnuklidien alfaenergiat ovat yleensä suurempia kuin 6,1 MeV, kun taas tärkeimpien transuraanien (plutoniumin ja amerikiumin isotoopit) energiat ovat tätä pienempiä. Automaattisella energioiden erottelulla (energiadiskriminointi) pystytään vähentämään sekä luonnon beeta- että alfasäteilyn vaikutusta. Spektri voidaan jakaa esimerkiksi kolmeen osaan ja tarkastella vain keskimmaisella energia-alueella 4–6 MeV olevia pikoja. Tyypillisellä mittausrakenteella, jonka tehokkuus on noin 40 prosenttia, ilman pumppausnopeus yksi kuutiometri tunnissa, keräysaika kahdeksan tuntia ja luonnon taustasäteily 40 Bq/m³, päästään ²³⁹Pu:n määrittämisrajaan 0,08 Bq/m³.

5.4 Nestetuikelaskenta

Luvussa 4.3 on kuvattu nestetuikelaskennan periaate. Nestetuikelaskentaa käytetään yleisimmin beeta- ja alfa-aktiivisten aineiden määrittämiseen, mutta sitä voidaan käyttää myös pienenergiisten gammasäteilijöiden ja röntgensäteilijöiden havainnointiin. Nestetuikelaskentaa voidaan käyttää myös Tsherenkovin säteilyä lähettävien näytteiden mittaamiseen. Menetelmää käytetään erityisesti hyväksi biokemiassa ja sairaaloissa, mutta nykyään

sitä hyödynnetään myös analysoitaessa alhaisaktiivisia ympäristönäytteitä. Näytteen isotooppikoostumus voidaan useassa tapauksessa tunnistaa spektristä ja samalla mittauksella saatetaan määrittää useita eri isotooppeja. Nestetuikemenetelmällä määritettäviä ympäristön radionuklideja ovat esimerkiksi tritium, ^{14}C , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{210}Pb , ^{222}Rn ja ^{241}Pu .

Näytteen valmistus

Huolellinen näytteen valmistus on nestetuikelaskennassakin tärkeää. Näyte saatetaan usein liuosmuotoon, jolloin energian siirtyminen näytteestä tuikeaineelle on tehokkainta, mutta myös kiinteitä näytteitä voidaan mitata. Näytteen esikäsittelyssä, liuottamisessa ja konsentroinnissa käytetään samanlaisia menetelmiä kuin alfaspektrometriin mittauksiin valmistettavien näytteiden käsittelyssä: uuttoa, sulatetta, tuhitusta, haihdutusta ja tislausta (vertaa kohta 5.3). Tutkittava alkuaine on usein erotettava kemiallisesti muista aineista, joskin vesinäytteistä voidaan joitain isotooppeja määrittää suoraan vedestä (esimerkiksi ^{222}Rn). Näyte ja tuike-liuos sekoitetaan homogeeniseksi seokseksi. Näyteliuokseen ei saa jäädä saostumia, jotka estävät alfa- tai beetahiukkasten energian siirtymisen tuikeainemolekyyleille eikä liuos saisi olla värillinen.

Oikeanlaisen nestetuikeseoksen ja pullon valinta ovat tärkeitä optimaalisten mittaolosuhteiden saavuttamiseksi. Näyte mitataan yleensä joko muovisessa tai lasisessa nestetuikepullosta. Lasisesta nestetuikepullosta aiheutuva tausta on muovipullon taustaa korkeampi, koska se on valmistettu borosilikaattilasista, mikä sisältää pieniä määriä ^{40}K :a. Lasipullo voi kuitenkin olla muovipulloa parempi käytettäessä haihtuvia orgaanisia liuottimia tai kaasumaisten aineiden määrittämisessä, koska kaasumaiset aineet voivat tunkeutua muovipullon seinämän läpi. Lasipullojen pinta voidaan etsata, mikä parantaa energiaerotuskykyä mittauksessa. Muoviset nestetuikepullot on valmistettu joko polyeteenistä tai polypropeenista. Muovipullot voivat olla myös teflonilla pinnoitettuja tai pullot voivat olla kokonaan teflonista. Pullojen koot vaihtelevat kolmesta 22:een millilitraan.

Tuikaineseokset

Orgaanisilla tuikeaineilla on kaksi pääkomponenttia: orgaaninen aromaattinen liuotin ja tuikeaine. Emulgoituissa tuikeaineissa on lisäksi emulgoimisaine. Liuottimen tehtävä on liuottaa näyte ja tuikeaineet sekä siirtää energia tehokkaasti alfa- tai beetahiukkaselta tuikeaineelle. Yleisimmin

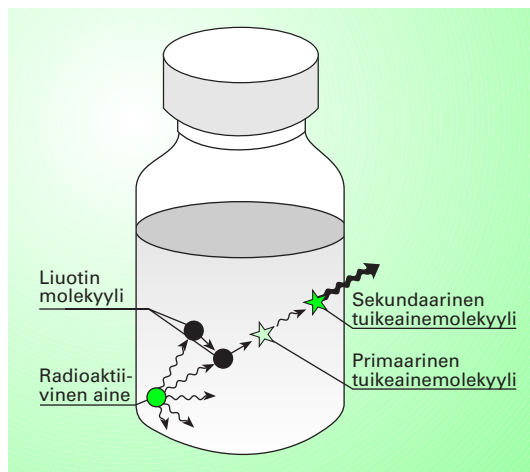
käytettyjä liuottimia ovat olleet tolueeni, ksyleeni ja 1,2,4-trimetyylibentseeni. Niiden käyttö on kuitenkin vähentynyt myrkyllisyyden, hajun, ja matalan syttymislämpötilan takia sekä siksi, että ne voivat tunkeutua muovisen nestetuikepullon seinämän läpi. Tilalle on tullut turvallisempia liuottimia kuten di-isopropyylinaftaleeni (DIN) tai dodesyylibentseeni (LAB). Näillä liuottimilla on saatu myös lisättyä laskentatehokkuutta.

Tuikaineseokset koostuvat tavallisesti kahdesta eri tuikaineesta. Ensimmäinen tuikaine vapauttaa viritysenergian valona. Emittoituvan valon aallonpituus ei kuitenkaan ole aina optimaalinen havaittavaksi valomonistinputkissa. Toinen tuikaine muuttaa valotuikahdusten aallonpituuden oikealle alueelle (kuva 5.11). Tuikaineita on kaupallisesti saatavana useita kymmeniä, ne ovat usein bentseeni- tai atsolipohjaisia orgaanisia yhdisteitä. Käytettävä tuikaine valitaan aina tutkittavan nuklidin ja näytematriisin mukaan. Näytteet ovat yleensä happo-, emäs- tai vesiliuoksessa. Nestetuikeseokset kestävät näitä liuoksia eri tavoin. Ne pystyvät muodostamaan värittömän homogeenisen seoksen vain tietyn liuosmäärän kanssa. Mikäli nestetuikaineseos ei kestä näyteliuosta, voivat näyteliuos ja nestetuikaineseos erottua kahdeksi eri faasiksi tai seoksesta voi tulla maitomainen. Tällöin on yleensä syytä muuttaa näyteliuoksen konsentraatiota tai näyteliuoksen ja tuikaineseoksen suhdetta. Joskus tuikaineseoksella voi olla myös jokin epästabili alue, jolla se ei kestä näyteliuosta. Tällöin joko näyteliuoksen määrän lisääminen tai sen vähentäminen voi parantaa tilanteen.

Nykyään on saatavilla myös uuttavia tuikaineseoksia, joiden orgaanisessa liuottimessa on mukana kullekin alkuaineelle tai alkuaineryhmälle sopiva uuttava aine. Niillä voidaan saada tutkittava nuklidi uuttumaan suoraan liuoksesta tuikaineseen.

KUVA 5.11 Nestetuikeseppi

Radioaktiivinen nuklidi virittää liuotinmolekyylin. Tämän jälkeen energia siirtyy sisäisen siirtymän kautta tuikainemolekyylille, joka vapauttaa viritysenergian valona. Valomonistinputki muuttaa valon sähköiseksi pulssiksi.



Vuorovaikutusilmiöt

Eri säteilylajien aiheuttama tuikeilmiö ja siitä syntyvä valontuotto ovat erilaisia. Alfahiukkasen kulkema matka jää tuikeliuoksessa lyhyeksi ja energiansiirto tuikeainemolekyylille pieneksi, mikä johtuu sen suhteellisen suuresta varauksesta ja suuresta massasta verrattuna beetahiukkaseen. Esimerkiksi 5 MeV alfahiukkasen kulkema matka tuikeliuoksessa on vain noin yksi kymmenesosa 0,2 MeV beetahiukkasen matkasta. Tällöin alfahiukkasen valontuotto energiayksikköä kohden jää myös kymmenesosaan beetahiukkasen valontuotosta. Alfa- ja beetahiukkasten aiheuttamat valotuikahdukset ovat myös kestoltaan erilaisia. Alfahiukkasen synnyttämän pulssin kesto on noin 35–40 nanosekuntia pidempi kuin beetahiukkasen aiheuttaman pulssin kesto. Tätä ilmiötä hyväksikäyttäen voidaan näytteestä määrittää samanaikaisesti alfa- ja beeta-aktiivisia aineita.

Nestetuikelaskennassa laskentatehokkuus lähes kaikille alfahiukkasille on noin 100 prosenttia. Beetahajoamisen energia jakautuu beetahiukkasen ja neutriinin välille, mutta näistä vain beetahiukkanen havaitaan tuikeprosessissa. Beetaspektri alkaa nolasta ja päättyy isotoopin maksimienergiaan (E_{\max}), eli beetaspektri on jatkuva (vertaa luku 1.2). Tuikeprosessissa beetahajoamisessa yhden keV:n energia tuottaa noin 10 valofotonia. Nestetuikelaskennassa beetahiukkasten laskentatehokkuus on riippuvainen hiukkasten alkuperäisestä energiasta. Niille beetahiukkasille, joiden energia (E_{\max}) on yli 100 keV, laskentatehokkuus on yleensä välillä 90–100 prosenttia, mutta matalammille energioille tehokkuus vaihtelee 10–60 prosentin välillä.

Laskentatehokkuus ja vaimeneminen

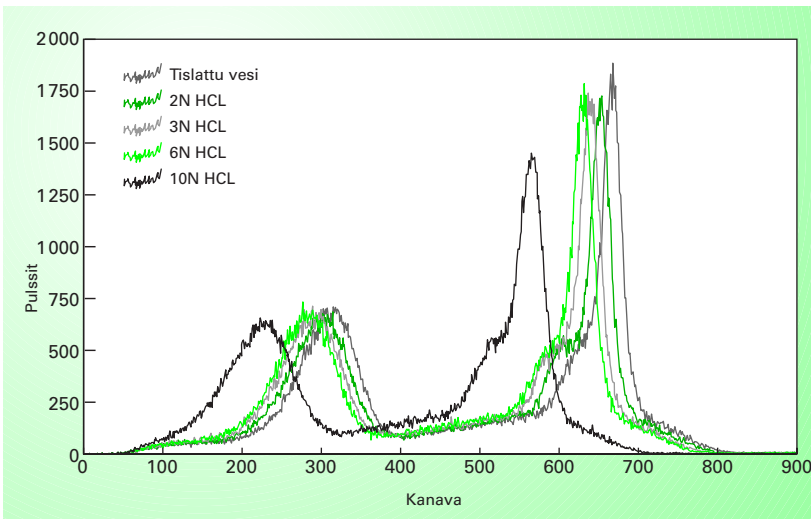
Nestetuikelaskennassa täytyy ennen varsinaista näytteen mittausta määrittää käytettyjen mittausolosuhteiden vaikutus mitattavan nuklidin laskentatehokkuuteen. Laskentatehokkuuteen vaikuttavat vaimeneminen, nestetuikeliuos, näytteen tilavuus sekä nestetuikepullon materiaali.

Ydinajoamisessa vapautunut energia tai tuikemolekyylin viritystilasta vapautunut valontuikahdus voi absorboitua liuottimeen ja jäädä havaitsematta valomonistinputkissa: tapahtuu vaimeneminen. Vaimeneminen voi olla joko kemiallista vaimenemista tai väriivaimennusta. Kemiallisessa vaimenemisessä absorboituu säteilyn energia ja väriivaimenemisessä valofotonit. Kemiallinen vaimeneminen voi tapahtua joko ennen tai jälkeen tuikeainemolekyylin virittymisen. Vaimenemisessä energia voi joko absorboitua ko-

konaan, jolloin valotuikahdusten lukumäärää vähenee, tai vain osittain, jolloin valotuikahdusten intensiteetti heikkenee ja pulssi rekisteröityy alemmille kanaville spektrissä. Väri-vaimenemisessa näytteessä oleva väri absorboi valofotonit ennen kuin ne havaitaan valomonistinputkissa. Keltainen väri vaimentaa eniten.

Beeta-aktiivisuutta määritettäessä vaimeneminen on riippuvainen nuklidin beetaenergiasta (E_{\max}). Mitä pienempi on määritettävän nuklidin beetaenergia, sitä suurempi on vaimenemisen vaikutus. Alfa-aktiivisuutta määritettäessä vaimenemisella on vähäisempi vaikutus. Näytteen vaimenemisen kasvaessa monoenergisien alfahiukkasten aiheuttama piikki siirtyy alemmille kanaville spektrissä. Vaimeneminen muuttaa myös alfahiukkasen aiheuttaman piikin leveyttä, mikä heikentää energian erotuskykyä, jolloin huippujen erottaminen toisistaan vaikeutuu. Kaikki liuottimet – olivatpa ne osana tuikeliuosta tai tarkoitettuja liuottamaan näytettä – aiheuttavat vaimenemista. (kuva 5.12).

Kiinteitä aineita mitattaessa näyte pannaan suoraan tuikeaineeseen. Tällöin ei yleensä esiinny kemiallista vaimenemista. Sen sijaan väri-vaimenemista saattaa esiintyä, jos mitattava näyte on värillinen. Väri-vaimeneminen on otettava huomioon myös Tsherenkovin säteilyä havainnoitaessa.



KUVA 5.12 Esimerkki vaimenemisesta

Tyttäriensä (^{210}Bi ja ^{210}Po) kanssa tasapainossa olevan ^{210}Pb :n spektri eri lailla vaimentuneena.

Vaimenemisen määrittäminen

Kemiallisen vaimenemisen määrittämiseen voidaan käyttää lukuisia erilaisia menetelmiä, joista yleisimpiä ovat sisäisen standardin menetelmä, ulkoisen standardin menetelmä ja vaimenemiskäyrän tekeminen. Väri-vaimenemista voidaan poistaa näytteen väriä muuttavilla lisäaineilla ja valitsemalla sopiva tuikeaineseos.

Sisäisen standardin menetelmä on vanhin ja varmin, mutta samalla myös työläin tapa määrittää näytteen vaimeneminen. Näytteeseen lisätään tunnettu määrä yleensä samaa isotooppia kuin itse määritettävä nuklidikin. Näyte mitataan ennen standardin lisäystä ja standardin lisäyksen jälkeen. Standardin lisääminen ei saa lisätä näytteen vaimenemista. Näistä kahdesta mittauksesta voidaan jokaiselle näytteelle määrittää laskentatehokkuus kaavalla

$$\text{Laskentatehokkuus}(\%) = \frac{cpm_2 - cpm_1}{dpm} \cdot 100, \quad (5.4)$$

missä cpm_1 on näytteen antama pulssimäärä minuutissa, cpm_2 on näytteen ja lisätyn standardin antama pulssimäärä, ja dpm on standardin tunnettu aktiivisuus (hajoamista minuutissa).

Ulkoisen standardin menetelmä on yleisimmin käytetty. Siinä mitataan heikkoa gammasäteilyä lähettävän ulkoisen standardin Comptonin spektri, jota hyväksi käyttäen määritetään näytteen vaimentuminen. Ulkoinen säteilylähde sijaitsee tuikelaskurissa ja se voidaan tuoda automaattisesti näytepullon läheisyyteen. Näyte mitataan ensin ilman ulkoista standardilähdettä, jolloin havaitaan näytteestä itsestään lähtevät fotonit. Kun ulkoinen säteilylähde tuodaan mitattavan näytteen viereen sen lähettämät gammakvantit osuvat tuikenesteeseen. Comptonin elektronit synnyttävät spektrin, jossa vaimentuminen on samanlainen kuin mitattavan näytteen spektrissä. Ulkoisen standardin avulla määritetty näytteen laskentatehokkuus voidaan esittää vaimennusparametrin funktiona. Nestetuikelaskimissa yleisimmin käytettyjä ulkoisia standardeja ovat ^{133}Ba , ^{137}Cs ja ^{152}Eu . Vaimennusparametrille käytetään erilaisia merkintöjä, kuten SQP(E) (ulkoisen standardin spektrin vaimennusparametri), tSIE (ulkoisen standardin muuttuva spektri-indeksi) ja H# (Horrockin luku). Vaimennusparametrit määritetään eri menetelmillä käyttäen eri ulkoista standardilähdettä näytteen vieressä tai alapuolella.

Vaimenemisen määrittämiseksi voidaan tehdä vaimennussarja. Se on kalibrintikäyrä, jossa laskentatehokkuus esitetään yleensä vaimennusparametrin funktiona. Siinä tutkittavan aineen samaa isotooppia mitataan eri tavoin vaimennettuna. Mitattavien standardinäytteiden tulee olla samalla lailla valmistettuja kuin varsinainen näyte. Helpoin tapa on ostaa valmiiksi sinetöityjä ja puhtaita standardeja, jotka ovat eriasteisesti vaimentuneita. Kaupallisesti on saatavissa ainakin ^3H - ja ^{14}C -standardeja. Toinen tapa on tehdä standardinäytteet itse ja lisätä niihin eri määrä vaimentavaa ainetta. Tätä menetelmää tulisikin käyttää, jos näytteestä määritetään enemmän kuin yhden radionuklidin aktiivisuus ja silloin, kun aktiivisuuspitoisuus halutaan määrittää erittäin tarkasti. Vaimentavina aineina voidaan käyttää eri kemikaaleja esimerkiksi nitrometaania (CH_3NO_2), hiilitetrakloridia (CCl_4), asetonia, vettä tai värillisiä väriaineita. Näytteen vaimentuminen voidaan määrittää myös käyttämällä vaimentavana aineena ainetta jota näytteessä on jo itsessään, esimerkiksi happoa johon näyte on liuotettu.

Taulukossa 5.2 on esitetty eri nuklidien tyypillisiä laskentatehokkuuksia ja määrittäysrajoja tietyillä nestetuikeaineseoksilla.

Nestetuikelaskentaa häiritsevät ilmiöt

Tärkeimmät huomioitavat häiriötekijät ovat tausta, luminesenssi, staattinen sähkö ja näytepullon seinäefekti, johon voidaan vaikuttaa valitseamalla oikeanlainen liuotin ja tuikepullo (vertaa kappale Tuikeaineseokset).

| Määritettävä nukliidi | Tuikeaine | Seossuhde | Tehokkuus, % | Määrittäysraja Bq/näyte | Mittausaika, min |
|------------------------------------|-----------------------------|--|--------------|-------------------------|------------------|
| Radon-222 (Po-214, Po-218, Rn-222) | Ultima Gold XR (Packard) | 10 ml H_2O + 12 ml tuikeaine | 290 | 0,002* | 60 |
| Lyijy-210 (Pb-210, Bi-210) | Ultima Gold AB (Packard) | 1 ml 1 M HNO_3 + 20 ml tuikeaine | 190 | 0,01 | 180 |
| Strontium-90 (Sr-90, Y-90) | Lumagel (Lumac) | 1,8 ml 1 M HCl + 11 ml tuikeaine | 195 – 200 | 0,002 | 600 |
| Tritium | Optiphase Hisafe 3 (Wallac) | 9 ml H_2O + 10 ml tuikeaine | 21 | 0,015 | 300 |
| Teknetium-99 | Ultima Gold AB (Packard) | 4 ml H_2O + 16 ml tuikeaine | 75 | 0,004 | 600 |

Taulukko 5.2.

Tyypillisiä laskentatehokkuuksia ja määrittäysrajoja tietyille aktiivisuusmäärittäyksille eri nestetuikeaineseoksilla. Suluissa on ilmoitettu nuklidit, joiden perusteella tulos lasketaan. Mittalaitteena Wallac, Quantulus (*Wallac, Guardian).

Tausta

Tausta aiheutuu useasta eri lähteestä ja se pyritään saamaan niin matalaksi kuin mahdollista, jotta laskentalaitteen suorituskyky saataisiin mahdollisimman suureksi. Suorituskykyä kuvataan hyvyystekijällä (E^2/B), missä E on nestetuikelaskurin laskentatehokkuus ja B taustan pulssimäärä minuutissa. Hyvyystekijä pyritään saamaan mahdollisimman suureksi. Tausta syntyy kosmisesta ja muusta ympäristön säteilystä sekä nestetuikelaskurin ja valomonistinputkien kohinasta. Ympäristöstä tuleva säteily vuorovaikuttaa laskentalaitteiden materiaalien kanssa aiheuttaen Comptonin sirontaa, Tsherenkovin säteilyä sekä pienenergistä gamma- ja röntgensäteilyä. Näiden vaikutus nähdään herkästi beetaspektrissä. Beetatausta onkin alfataustaa huomattavasti suurempi.

Taustaa voidaan vähentää erillisillä lyijysuojilla, alentamalla valomonistinputkien jännitettä, suojaamalla valomonistinputket tai käyttämällä tuikeaineliuoksia ja näytepulloja, joiden oma aktiivisuus on mahdollisimman pieni. Laskentalaitteessa olevalla koinsidenssisuojalla voidaan välttää yhden fotonin aiheuttamat pulssit, jolloin ne jäävät rekisteröimättä monikanava-analysaattorissa. Tällöin valomonistinputkista aiheutuva kohina ja fosforesenssi vähenevät. Kosmisen säteilyn aiheuttama tausta voidaan eliminoida hyvin tehokkaasti antikoincidenssivartijalla varustetussa laskentalaitteessa.

Itse näytteestä taustaa aiheutuu nestetuikepullosta, tuikeaineesta sekä liuotimesta, johon näyte liuotetaan. Lisäksi huoneilman radon ja sen hajoamistuotteet voivat aiheuttaa taustan kohoamista, jos mittalaitteita ei ole sijoitettu alhaisaktiivisiin huoneisiin. Valomonistinputkien aiheuttamaa kohinaa voidaan vähentää myös laskemalla tuikeilmaisimen lämpötilaa.

Luminesenssi

Luminesenssi-ilmiössä molekyylin viritystilan purkautuessa siihen absorboitunut energia vapautuu valofotonina. Siinä molekyyli on virittänyt jonkin muun kuin radioaktiivisen aineen vaikutuksesta. Nestetuikelaskennassa luminesenssi voi olla häiriötekijä, mutta sitä voidaan käyttää myös hyödyksi mittauksissa.

Fotoluminesenssissa tuikeliuoksen molekyylit virittyvät ultravioletti-valon vaikutuksesta. Fotoluminesenssi voidaan eliminoida säilyttämällä näytteitä ennen mittausta pimeässä tilassa. Kemiluminesenssissa tuike-

aineen molekyylit virittyvät kemiallisen reaktion seurauksena. Kemiluminesenssiä voi esiintyä, jos tuikeliuokseen lisätään emäksistä liuotinta tai jos näyte sisältää esimerkiksi vetyperoksidia. Kemiluminesenssi on yhden fotonin aiheuttama tapahtuma, mutta fotonien lukumäärä voi olla niin suuri – riippuen näytteen koostumuksesta ja pH:sta – että niiden eliminoiminen koinsidenssillä ei aina onnistu. Kemiluminesenssia voidaan vähentää neutraloimalla emäksiset näytteet, käyttämällä kemiluminesenssia vähentäviä tuikeaineita, tai lämmittämällä näytteitä 40°C:ssa. Sitä voidaan vähentää myös laskemalla tuikeilmaisimen lämpötilaa, jolloin kemialliset reaktiot hidastuvat. Uudenaikaisissa nestetuikeilmaisimissa onkin automaattinen jäähdytys. Luminesenssi-ilmiöiden tuottama valo vähenee ajan funktiona, jolloin näytteiden seisottaminen ennen mittausta myös vähentää sitä. Oikeilla kanava-alueiden valinnoilla voidaan poistaa luminesenssin aiheuttamat pulssit spektristä.

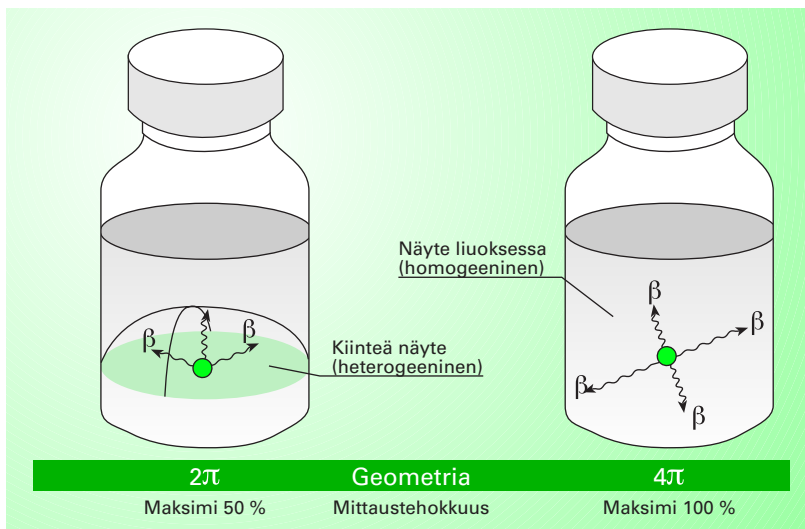
Bioluminesenssia esiintyy biokemiallisessa reaktioissa, missä nämä reaktiot aiheuttavat valonmuodostusta. Bioluminesenssissa valofotonien tuotto on huomattavasti suurempi verrattuna radioaktiivisessa hajoamisessa syntyvään valontuottoon.

Staattinen sähkö

Staattista sähköä syntyy yleensä näytepullon pinnalle pulloa käsiteltäessä. Kestoltaan ilmiö on varsin pitkä ja näytettä mitattaessa staattinen sähkö tuottaa satunnaisia pulsseja. Muovipullojen pinnalle staattista sähkövarausta syntyy enemmän kuin lasipullojen pinnalle. Staattista sähköä syntyy enemmän silloin kun ilman suhteellinen kosteus on alhainen. Siitä aiheutuvaa häiriötä voidaan välttää pitämällä näytteenkäsittelyhuoneen kosteus riittävän korkeana ja pyyhkimällä näytepullot ennen mittausta kostealla ja mahdollisimman vähänukkaisella paperilla.

Kiinteiden näytteiden mittaaminen

Myös kiinteitä näytteitä mitataan nestetuikemenetelmällä. Tällöin mittauserometria on erilainen kuin liukoisessa muodossa olevan homogeenisen näytteen geometria (kuva 5.13). Kiinteät näytteet voidaan mitata suoraan lasikuitu-, kalvo- tai paperisuodattimelta. Suodatinpaperille kerätty näyte kuivataan ja siirretään nestetuikepulloon, missä on pieni määrä kiinteälle aineelle sopivaa nestetuikeainetta. Aktiivisuus mitataan, kun paperi on kokonaan kostunut tai peittynyt tuikeaineella.



KUVA 5.13 Kiinteän ja nestemäisen näytteen mittausgeometriat

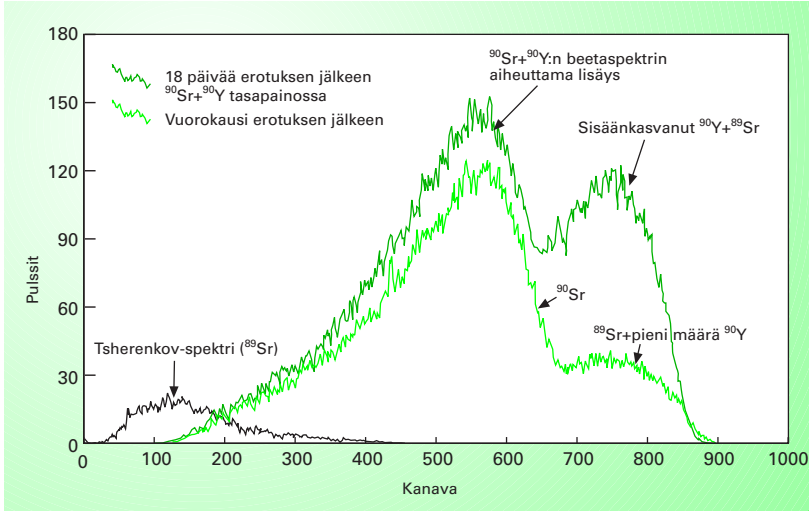
Kiinteän näytteen (esimerkiksi suodatinpaperi) ja nestemäisessä muodossa olevan näytteen mittausgeometriat.

Kun kiinteä näyte on nestetuikeseoksessa, voi näytteen liukeneminen tapahtua eri tavoilla. Mittauksen toistettavuus on yleensä hyvä, jos näyte ei liukene lainkaan tuikeseokseen, vaan se saadaan sekoitetuksi siihen tasaisesti. Tällöin vaimentuminen on vakio, samoin kuin laskentatehokkuus. Jos kiinteä näyte liukenee kokonaan tuikeseokseen, 2π -geometria muuttuu 4π -geometriaksi. Jos näyte liukenee vain osittain tuikeseokseen, mittauksen toistettavuus kärsii, koska liukeneminen voi olla joka kerta erilainen. Näyte voi myös saavuttaa tuikeseoksessa tasapainotilan ajan kuluessa. Näyte mitataan kun tasapainotila on saavutettu.

Analysoitaessa kiinteitä aineita sekä näytteen määrä että suodatinpaperi vaikuttavat itseabsorption suuruuteen. Suurin laskentatehokkuus saavutetaan yleensä käyttäen lasikuitusuodattimia ja pienin kromatografiapapereria. Kokonaisuudessaan laskentatehokkuus ja mittauksen toistettavuus riippuvat mitattavan nuklidin energiasta, näytteen liukenemisestä, suodatinmateriaalista ja sen paikasta nestetuikepullossa sekä näytemolekyylin koosta.

Usean nuklidin samanaikainen määrittäminen

Radionuklidien samanaikaisen määrittämisen tarkkuuteen vaikuttavat tutkittavien alfa- ja beetahiukkasten energiat. Samanaikainen määrittäminen on hankalaa silloin, kun energiat ovat liian lähellä toisiaan. Vaikeinta on mää-



KUVA 5.14 ^{89}Sr :n ja ^{90}Sr :n nestetuike- ja Tsherenkov-spektrit

Ympäristönäytteen strontium-analyysissä tuoreen laskeuman tilanteessa pitää pystyä määrittämään sekä ^{89}Sr että ^{90}Sr . Näytteestä erotetaan ensin strontium kemiallisesti. Tämän jälkeen näyte mitataan välittömästi ilman tuikeainetta, jolloin saadaan ^{89}Sr :n Tsherenkov-spektri. Sen jälkeen lisätään tuikeaine ja saadaan nestetuikespektri, jossa ovat mukana ^{89}Sr , ^{90}Sr ja ^{90}Sr :n tytärynuklidit ^{90}Y , jonka määrä kasvaa noin 18 päivän ajan tasapainotilaan ^{90}Sr :n kanssa. Spektrien ja etukäteen tehtyjen kalibrointien avulla pystytään laskemaan ^{89}Sr :n ja ^{90}Sr :n määrät näytteessä.

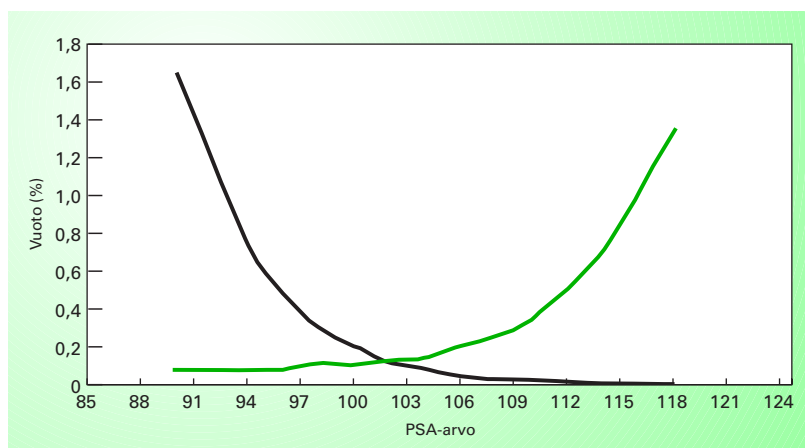
rittää samanaikaisesti usean nuklidin beeta-aktiivisuutta, koska beetaspektri on jatkuva (nollasta hajoamisenergiaa vastaavaan maksimiarvoon E_{max}). Tällöin jokaisen nuklidin laskentatehokkuus täytyy määrittää erikseen. Nuklidien maksimienergioiden on lisäksi erottava toisistaan merkittävästi (yleensä tekijällä 3–4). Kuvassa 5.14 on esitetty ^{89}Sr :n ($E_{\text{max}} = 1\,492$ keV), ^{90}Sr :n ($E_{\text{max}} = 546$ keV) ja sen sisäänkasvavan tyttären ^{90}Y :n ($E_{\text{max}} = 2\,282$ keV) eri ajankohtina mitatut beeta-spektrit ja Tsherenkovin spektri.

Usean alfa-aktiivisen aineen samanaikainen määrittäminen onnistuu, mikäli erotuskyky on riittävän hyvä erottamaan alfapiikit toisistaan. Nestetuikelaskennassa ei kuitenkaan saavuteta läheskään niin hyvää erotuskykyä kuin alfaspektrometrisissa mittauksissa. Jos piikkien huiput erottuvat toisistaan riittävästi, voidaan näytteen analysoinnissa käyttää hyväksi kaupallisia piikinsovitushjelmiä. Esimerkiksi vesinäytteen ^{234}U - ja ^{238}U -pitoisuudet voidaan määrittää nestetuikespektrometrillä, jos uraani saadaan erotettua näytteestä kemiallisesti puhtaana ja pullon ja tuikeaineseoksen valinnalla päästään optimaalisiin mittaolosuhteisiin. Tällöin uraanin määrittämisrajaksi 250 millilitran näytteelle saadaan 10 mikrogrammaa litrassa käyttäen viiden tunnin mittausaikaa.

Alfa- ja beeta-aktiivisuuden samanaikainen määrittäminen

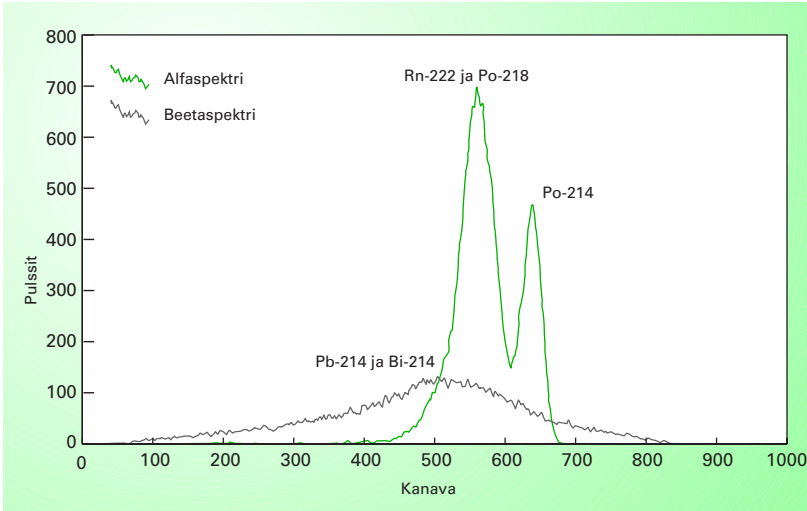
Säteilyn aiheuttama valopulssi muodostuu nopeasta ja hitaasta osasta. Alfahiukkanen tuottaa ajallisesti pitempiä pulsseja kuin beetahiukkanen johtuen sen suuremmasta ominaisionisaatiokyvystä (vertaa kappale Vuoroaikutusilmiöt). Alfa-beeta-erottelu perustuu pulssin kestoaikaan. Yhtenä sovellutuksena tästä on pulssinmuotoanalyysi (PSA), jossa määritetään optimaalinen erottelutaso eli PSA-taso. Kun PSA-taso valitaan oikein, mittalaite erottelee pulssit monikanava-analysaattorin kanava-alueen eri puolikkaisiin. Tällöin beetasäteilyn aiheuttamat pulssit ovat analysaattorin kanava-alueen ensimmäisessä puolikkaassa ja alfasäteilyn aiheuttamat toisessa puolikkaassa. Näin voidaan yhdellä mittauksella määrittää samanaikaisesti näytteen alfa- ja beeta-aktiivisuus.

Optimaalinen PSA-taso määritetään standardinäytteillä, ja se on määritettävä mittaolosuhteiden mukaan. Standardinäytteiksi valitaan puhdas beetasäteilijä (esimerkiksi ^{32}P , ^{36}Cl), puhdas alfasäteilijä (esimerkiksi ^{241}Am) ja taustanäyte. Standardinäytteiden on oltava koostumukseltaan samanlaisia kuin mitattavat näytteet. Ne mitataan eri PSA-tasolla etsien se optimaalinen taso, jossa alfahiukkasten vuoto beetahiukkasten kanava-alueelle on yhtä suuri kuin beetahiukkasten vuoto alfahiukkasten kanava-alueelle. Kuvassa 5.15 on esitetty erään tällaisen mittaussarjan tulokset. Kuvassa 5.16 on tyypillinen vesinäytteen radonmittauksessa alfa-beeta-erottelulla saatu spektri.



KUVA 5.15 PSA-tason määrittäminen

^{241}Am :n ja ^{36}Cl :n avulla tehty PSA-tason määrittäminen alfa-beeta-erottelulle. Tässä esimerkissä päästään parhaaseen erotuskykyyn PSA-arvolla 102.



KUVA 5.16 Vesinäytteen spektri

Vesinäytteen radonmittauksessa alfa-beeta-erottelulla saatu spektri. ^{222}Rn on tasapainossa lyhytikäisten tyttäriensä ^{218}Po :n, ^{214}Pb :n, ^{214}Bi :n ja ^{214}Po :n kanssa.

Optimaalisen PSA-tason määrittäminen ei ole aina mittauksen kannalta tärkeätä, jos halutaan mitata näytteessä olevista alfa- ja beeta-aktiivisuuksista vain jompaakumpaa. Tällöin PSA-taso säädetään sellaiseksi, että yhtään alfa-hiukkasen aiheuttamaa pulssia ei vouda beeta-spektrin kanava-alueelle tai päinvastoin.

Tsherenkovin säteilyn määrittäminen nestetuikelaskennalla

Tsherenkovin säteilyn periaate on kuvattu luvussa 4.3. Tsherenkovin säteilyn tuottaman valon voimakkuus on alhainen ja se havaitaan usein spektrin pienenergisessä päässä. Tsherenkovin säteilyn mittaaminen ei onnistu nuklideista, joiden beetaenergia on pieni, ellei väliaineena käytetä liuotinta, jolla on suuri taitekerroin. Tällöin laskentatehokkuus on niin alhainen, että mittaaminen ei käytännössä ole järkevää. Tsherenkovin säteilyä on hyödynnetty esimerkiksi seuraavien nuklidien aktiivisuuksien määrittämisessä: ^{198}Au ($E_{\text{max}} = 1\,370\text{ keV}$), ^{210}Bi ($E_{\text{max}} = 1\,160\text{ keV}$), ^{90}Y ($E_{\text{max}} = 2\,290\text{ keV}$), ^{56}Mn ($E_{\text{max}} = 2\,840\text{ keV}$), ^{24}Na ($E_{\text{max}} = 1\,390\text{ keV}$) ja ^{32}P ($E_{\text{max}} = 1\,710\text{ keV}$).

Tsherenkovin säteilyn etuna nestetuikelaskentaan verrattuna on suurempien näytemäärien käyttö ja helppo näytteen valmistus. Suurenergisen

beetasäteily voidaan havaita suoraan liuoksesta ilman että mitattavaan näytteeseen tarvitsee lisätä tukeainetta. Tällöin vältetään kemialliselta vaimentumiselta eikä välttämättä synny vaikeasti käsiteltävää radioaktiivista ainetta sisältävää orgaanista jätettä. Näyte voidaan liuottaa lukuisiin eri liuottimiin: orgaanisista liuottimista vahvoihin hapettaviin happoihin (muun muassa perkloorihappoon), joita nestetukeaineet eivät kestä.

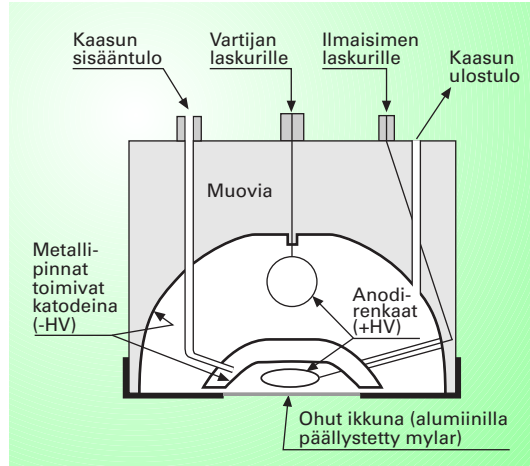
Menetelmän heikkona puolena on huono laskentatehokkuus verrattuna alfa- tai beetamittaukseen (taulukko 5.3). Tällöin määrittämissä on korkeampi kuin olisi saman näytteen alfa- tai beetamittauksessa. Tyypillinen laskentatehokkuus edellä mainituille radionuklideille on 35–55 prosenttia välillä riippuen väri- ja kemiallisesta vaimennuksesta. On kuitenkin olemassa orgaanisia aineita, joilla laskentatehokkuutta on pystytty nostamaan aina 80 prosenttiin. Tsherenkovin säteilyn mittaamisessa on tärkeää, että mittaustulos on asetettu kanava-alueen alkupäähän, jotta vain pieniamplitudiset Tsherenkovin säteilyä vastaavat pulssit tulevat havaituksi analysointivaiheessa.

5.5 Muut määrittämissämenetelmät

Matalataustainen alfa- ja beetalaskenta verrannollisuuslaskurilla

Verrannollisuuslaskurin toimintaperiaate on kuvattu kappaleessa 4.2. Laskurilla, jonka taustasäteily on saatu matalaksi niin sanotulla vartijaputkella, voidaan mitata pieniä aktiivisuuspitoisuuksia. Tällaisessa mitalaitteessa ilmaisimien tai ilmaisinyhmä on ympäröity vartijaputkella, jolla saadaan aikaan antikoinssisuojaus kosmista säteilyä ja osaa ulkoista gammasäteilyä vastaan.

Kuvassa 5.17 on esimerkki matalataustaisen verrannollisuuslaskurin rakenteesta. Näytteestä tulevat alfa- ja beetahiukkaset pääsevät ohuen ikkunan läpi ilmaisimeen, mutta eivät enää sen läpi vartijaan, joka on suojattu esimerkiksi kuparikerroksella. Sen sijaan kosminen säteily ja osa ulkoisesta gammasäteilystä läpäisevät sekä ilmaisimen että vartijan ja aiheuttavat näissä samanaikaisen signaalin. Tällaiset samanaikaiset pulssit hylätään laitteen antikoinssisensitiivisyydessä. Yleensä ilmaisimien on sijoitettuna lyijysuojan, jolloin ulkoisen gammasäteilyn osuutta saadaan vähennettyä lisää. Parhaimmillaan laitteistoilla beetamittauksissa taustasäteilyn taso on alle 0,1 pulssia minuutissa.



KUVA 5.17 Kaaviokuva alhaistaustaisen beetalaskurin ilmaisinosasta

Verrannollisuuslaskurilla voidaan havainnoida joko alfa- ja beetasäteilyä yhdessä tai sitten kumpaakin erikseen. Alfasäteilyn ominaisionisaatio on paljon suurempi kuin beetasäteilyn ja se aiheuttaa suuremman analogisen signaalin vahvistimelle. Alfa- ja beetapulssien amplitudit eroavat toisistaan huomattavasti. Kun laitteeseen asetetaan amplitudia erottavia kynnyksiä, saadaan alfa- ja beetahiukkasten aiheuttamat pulssit eri kanaviin. Beetahiukkasten kanava-alueella on kaksi erilaista erotuskynnystä. Pienet beetapulssit vahvistetaan ensin esimerkiksi 20-kertaiseksi, jolloin ne ylittävät ensimmäisen erotuskynnyksen. Myös alfapulssit ylittävät sen. Toinen erotuskynnys on niin suuri, että vain alfapulssit menevät sen läpi alfahiukkasten kanava-alueelle. Joidenkin alfahiukkasten energia heikkenee kuitenkin matkalla ilmaisimelle ja ilmaisimessa niin paljon, etteivät niiden aiheuttamat pulssit ylitä ylempää erotuskynnystä. Nämä pulssit jäävät siten beetahiukkasten kanava-alueelle. Osa suurienergisistä beetahiukkasista voi puolestaan aiheuttaa pulsseja alfahiukkasten kanava-alueelle. Yleensä tällainen vuoto on vain muutaman prosentin luokkaa. Se on kuitenkin otettava huomioon määrittettäessä pieniä aktiivisuuspitoisuuksia.

Näytteen on oltava verrannollisuuslaskurissa mittausalustalla ohuena kerroksena. Määrittävän nuklidin alkuaine joudutaan lähes aina erottamaan radiokemiallisesti muista aineista. Näyte on yleensä sakkana, jonka mukana tutkittava nuklidi on saostunut. Säteilyn absorptio ja sironta preparaattista ja preparaatin ja ilmaisimen välisessä ilmakerroksessa sekä takaisinsironta mittausalustalta ja ilmaisimen ikkunasta aiheuttavat hajontaa tuloksiin. Laitteiston kalibrointi onkin tällaisella mittausjärjestelyllä työlästä. Jotta saadaan laskentatehokkuus määritettyä mahdollisimman tarkasti, on tutkittavan näytteen ja standardinäytteen oltava saman-

laisia sekä koostumuksen että mittausgeometrian suhteen. Käytännössä joudutaan valmistamaan sarja eripaksuisia standardinäytteitä, joiden mittaustuloksista saadaan kalibrointikäyrä. Käyrältä voidaan lukea laskentatehokkuus näytteen massan funktiona. Esimerkiksi strontiummäärityksissä ^{89}Sr :n ($E_{\text{max}} = 1\,470\text{ keV}$) laskentatehokkuus karbonaattisakasta mitattaessa on noin 40 prosenttia, kun taas ^{90}Sr :n tytärnuklidin ^{90}Y :n ($E_{\text{max}} = 2\,270\text{ keV}$) laskentatehokkuus oksalaattisakasta on noin 50 prosenttia. Ohutta akryliinäytettä käyttäen ^{14}C :lle ($E_{\text{max}} = 157\text{ keV}$) saadaan noin 20 prosentin laskentatehokkuus.

Pienenergisiiä beetanuklideja kuten tritiumia ja ^{14}C :tä sekä alfa-aktiivisia nuklideja voidaan määrittää myös ikkunattomalla verrannollisuuslaskurilla. Tällöin näyte sekoitetaan suoraan täytekaasuun, jolloin sopivilla mittausjärjestelyillä voidaan saavuttaa lähes 4π -geometria. Samalla vältetään absorptio- ja sirontaongelmilta. Menetelmää käytetään esimerkiksi radiohiiliajoituksissa ja tritiumin määrittämisessä ilmanäytteistä. Hiiliajoitusmenetelmässä ^{14}C on joko hiilidioksidina tai metaanina, jolloin se sekoittuu hyvin täytekaasuun. Ilmassa olevan tritiumin määrittämisessä käytetään täytekaasuna ilmaisimen läpi virtaavaa ilmaa. Ilmaisimien on monimutkainen koostuen useista anodilangoista ja katodisilmukoista.

Veden radonpitoisuus voidaan määrittää ikkunattomalla verrannollisuuslaskurilla. Vesinäytteen radon saadaan tarttumaan argonkaasuun argonkuplituksella. Argon puhdistetaan ja ohjataan ilmaisimeen. Radonin alfa-aktiivisuus voidaan mitata 25 prosentin tehokkuudella.

Verrannollisuuslaskurilla mitataan yleensä näytteen kokonaisaktiivisuus, joten näytteiden radiokemiallinen puhtaus on osoitettava muilla keinoin. Näitä keinoja ovat joko tutkittavan nuklidin puoliintumisajan tai tytärnuklidien sisäänkasvun seuraaminen sekä gammaspektrometriset mittaukset.

Nestetuikelaskenta on nykyään suurelta osin korvannut matalataustaisen beeta- ja alfalaskennan. Kuitenkin verrannollisuuslaskuria käytetään edelleen paljon määrittäessä esimerkiksi ympäristönäytteiden strontiumpitoisuuksia. Menetelmä on nopeampi ja edullisempi kuin nestetuikelaskenta, koska useissa laitteissa voidaan mitata jopa 15 näytettä yhdellä kertaa.

Beeta-aktiivisuuden määrittäminen puolijohdeella

Ioni-istutettu PIPS-puolijohdeilmaisimien voidaan valmistaa myös beetalaskentaa tai elektronispektroskopiaa varten. Tällainen ilmaisimien on valmistet-

tu eri lailla kuin vastaavat alfaspektrometriassa käytetyt ilmaisimet (katso luku 5.3, kohta Mittaus puolijohdeella). Ilmaisimessa oleva pii on leikattu kiteen poikkisuuntaan, jolloin beetahiukkasen kanavoituminen on estetty. Kanavoituessaan beetahiukkanen ei menetä energiaansa kiteessä normaalilla tavalla, vaan ”kanavoituu” ja kulkee siten kiteen läpi. Absorboivan kerroksen minimipaksuus on esimerkiksi 475 mikrometriä, jolloin kaikki alle 400 keV:n elektronit absorboituvat tähän kerrokseen. Myös suurempienergiset beetahiukkaset voivat absorboitua kiteeseen riippuen niiden kulkureitistä. Beetaenergian havaitsemiskynnyksen määräävät ilmaisimen koko ja taustakohinan taso; tavallisesti se on välillä 20–75 keV.

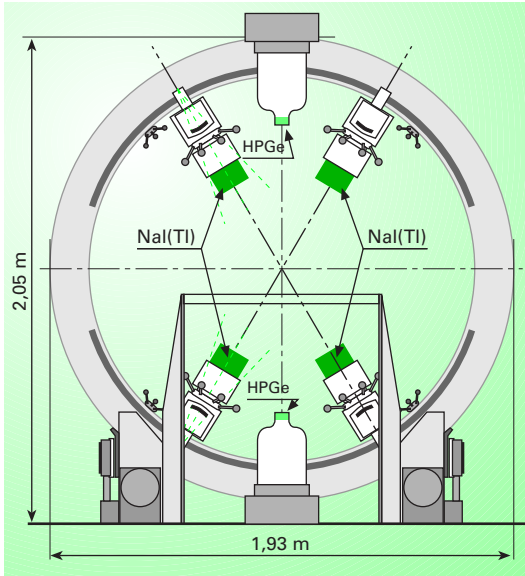
Hankaluutena mitattaessa puolijohdeilmaisimilla on ilmaisimesta tai näytteestä aiheutuva takaisinsironta, sekä konversioelektronien, Comptonin sirronnan ja gammasäteilyn aiheuttama tausta. Tehokkuuskalibrointi onkin tehtävä beetamittauksiin samalla lailla kuin verrannollisuuslaskurille, jonka lisäksi on käytettävä vielä monienergisiiä merkkiaineita (katso kappale matalataustainen alfa- ja beetalaskenta verrannollisuuslaskurilla). Mittauksissa saavutettu erotuskyky ei ole kovin hyvä, ja laskentatehokkuus jää usein huonommaksi kuin verrannollisuuslaskurilla mitattaessa. Menetelmää ollaan kehittämässä siten, että käytetään useampaa PIPS-ilmaisinta yhtä aikaa erillisessä mittaukskammiossa, jolloin saadaan suurempienergistä beetasäteilyä (esimerkiksi ^{90}Sr ja ^{90}Y) havaittua pienemmällä taustalla. Prototyyppi tällaiselle mittauslaitteistolle on jo olemassa.

Jatkuvatoimisessa alfaspektrometriassa käytettävää CAM PIPS -ilmaisinta voidaan hyödyntää myös ilmapölynäytteiden beeta-aktiivisuuden määrittämisessä (katso kappale jatkuvatoiminen alfaspektrometria).

5.6 | Ihmisessä olevien radioaktiivisten aineiden mittaus

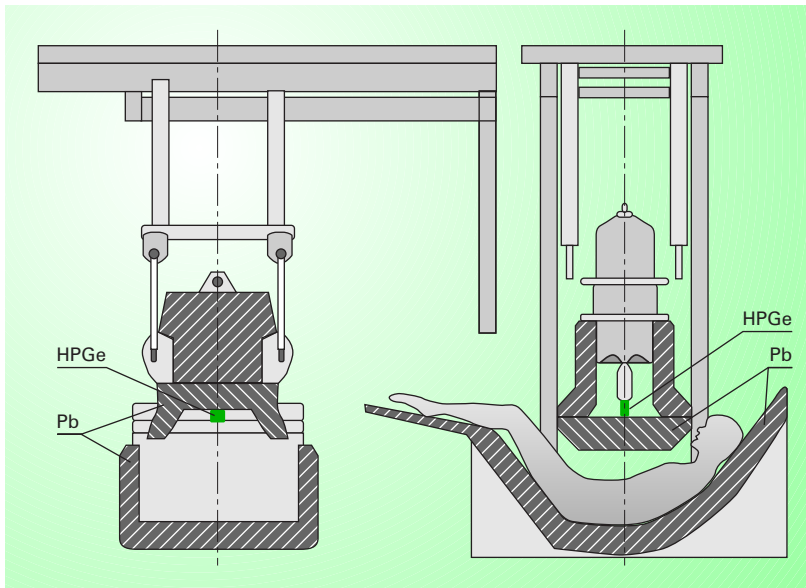
Gammaspektrometrinen kokokehomittaus on tärkein suora mittausmenetelmä, jolla ihmisessä olevien radioaktiivisten aineiden määrät voidaan selvittää. Kokokehomittaus perustuu ihmiskehossa olevien radioaktiivisten aineiden hajotessaan lähettämän gammasäteilyn havaitsemiseen.

Säteilyturvakeskuksessa on kaksi kokokehomittauslaitteistoa. Toinen on kiinteästi laboratorioon asennettu ”IRMA 1” (Ihmisen radioaktiivisuuden mittauslaitteisto, kuva 5.18) ja toinen kuorma-autoon asennettu ”IRMA 2” (kuva 5.19). Myös Helsingin yliopiston kemian laitoksen radiokemian laboratoriossa on sekä kiinteästi että liikkuvaksi asennetut laitteistot. Suorilla mittauksilla voidaan mitata myös eri elinten ja ihmisen osien si-



KUVA 5.18 IRMA 1

STUKin kiinteästi asennettu ihmisen radioaktiivisuuden mittauslaitteisto, IRMA 1. NaI(Tl) ilmaisimet ja toinen puolijohde on sijoitettu ympyränmuotoiseen kannatuskehikkoon. Sängyn alla on toinen puolijohdeilmäisin. Mittattava ihminen makaa sängyllä, joka kulkee kehän läpi mittauksen aikana. Mittaus kestää yleensä noin 30 minuuttia.



KUVA 5.19 IRMA 2

STUKin liikkuvaan mittauslaboratorioon sijoitettu kokokehomittauslaitteisto IRMA 2. Taustasäteilyn vähentämiseksi mittaustuoli ja ilmaisimen ympärillä oleva suojuus on tehty lyijystä. Ilmaisinosaa vedetään paikalleen kun ihminen on asettunut mittaustuoliin. Mittaus kestää yleensä 17 minuuttia.

säلتämien radionuklidien määrät: esimerkiksi kilpirauhasessa olevan radioaktiivisen jodin (^{125}I) ja luustoon kertyneen lyijyn (^{210}Pb) määrät voidaan mitata pienille energioille soveltuvilla ilmaisimilla. Valmiustilanteissa käytetään kilpirauhasmonitoreita ja muita yksinkertaisempia laitteistoja. Näiden kanssa voidaan siirtyä paikkakunnalta toiselle silloin, kun halutaan nopeasti kartoittaa radioaktiivisen laskeuman aiheuttama säteilyaltistus.

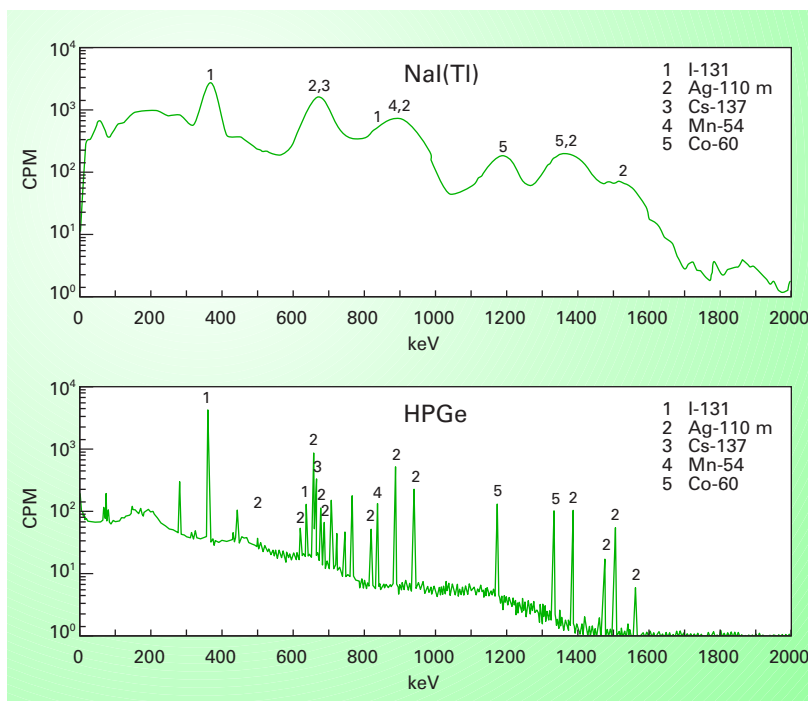
Varsinainen gammaspektrometrinen mittaus ja tulostenkäsittely on suurelta osin samanlainen kuin luvussa 5.2 esitetty, joten alla kuvataan vain siitä poikkeavia asioita.

Ilmaisimet, tausta ja mittausgeometria

Kokokehomittauksissa käytetään tukeilmaisimia (NaI(Tl)) ja puolijohdeilmaisimia (HPGe). Aikaisemmin NaI(Tl)-ilmaisimet olivat suosituimpia paremman havaitsemistehokkuutensa ansiosta. Suurten puolijohdeiden tultua markkinoille yhä useammassa laboratoriossa on siirrytty niiden käyttöön. NaI(Tl)-ilmaisimen haittana on vaatimattomampi energian erotuskyky (kuva 5.20). Yleensä ihmisestä pyritään havaitsemaan hyvin pieniä määriä radioaktiivisia aineita, joten tehokkaiden ilmaisimien käytön merkitys korostuu. Ihmistä ei myöskään voi pitää mittauksessa kauan, yleensä korkeintaan tunnin kerrallaan. Puolijohdeilmaisimen energian erotuskyky on erittäin hyvä, mutta ilmaisim vaatii jäädytystä nestetyypellä elektronisen kohinan vaimentamiseksi (vertaa luku 5.2). Nestetyyppihuollon käytännön järjestäminen varsinkin liikutettavassa mittauslaitteistossa on hankalaa. Käytössä on myös nestetukeaineella täytettyjä sylinterinmuotoisia ilmaisimia ja suuria muovikiteitä. Niitä käytetään silloin, kun mitataan vain yhtä radionuklidia ja muita radionuklideja ei esiinny, tai kun nuklidispesifisyys ei ole tärkeää.

Tausta

Mittauslaitteiston matala tausta on tärkeä, jotta kunkin radionuklidin havaitsemisraja saataisiin riittävän pieneksi. Taustan vaihtelujen vaikutusta mittaustulokseen pyritäänkin vähentämään. Sitä varten käytetään tehokasta säteilysuojaa. Esimerkiksi IRMA 1 -laitteisto on sijoitettu huoneeseen, jonka seinissä on 15 senttimetriä rautaa, 3 millimetriä lyijyä ja 2 millimetriä kuparia. Taustasuojan materiaalina voidaan käyttää myös pelkkää lyijyä, hiekkaa, vettä tai kalkkikiveä. Kaikki materiaalit valitaan niin, että niissä itsessään on mahdollisimman vähän radioaktiivisia aineita.



KUVA 5.20 Natriumjodidi- ja puolijohdeilmaisimella mitatut spektrit

Kuvassa ylempi pulssinkorkeusspektri on mitattu IRMA 2:lla NaI(Tl)-ilmaisimella ja alempi samassa geometriassa puolijohdeilmaisimella. Mitattavana oli ihmistä jäljittelevä fantomi, joka sisälsi vesiliuoksessa olevia radionuklideja, ^{131}I , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , ^{54}Mn ja ^{60}Co .

Ilmaisimen koko vaikuttaa taustapulsien määrään. Ilmaisimen valitaan mitattavan radionuklidin energian mukaan: käytetään niin pientä ilmaisimen tilavuutta kuin mahdollista, jolloin myös taustapulsien määrä on pieni. Taustaa voidaan vähentää myös antikoinssidenssittekniikalla.

Mittaushuoneessa on huolehdittava myös ilmanvaihdesta, jotta luonnonsäteilyn aiheuttama taustasäteily saataisiin mahdollisimman pieneksi ja ennen kaikkea tasaiseksi. Huoneen betonirakenteista diffundoituu radonia, joka tytärnuklideineen lisää taustasäteilyä mittaustilassa. Tätä vaikutusta voidaan vähentää ottamalla osa mittaustilaan tulevasta ilmasta absoluuttisuodattimien läpi ulkoilmasta tai käyttämällä vanhaa ilmaa, jonka radon- ja toronpitoisuudet ovat pieniä huoneilman aktiivisuuteen verrattuna. Mitattaessa täytyy ottaa huomioon, että ihmisessä esiintyy osittain samoja radionuklideja kuin taustassa, esimerkiksi ^{40}K :a ja muita luonnon nuklideja.

Mittausgeometria

Mittausgeometrian valintaan vaikuttaa monta tekijää: mitattava radionuklidi, mittauksen tarkoitus, mittauspaikka ja taustasuojaus sekä laitteiston hinta. Kansainvälisissä julkaisuissa on kuvattu monta niin sanottua standardilaitteistoa sekä erikoistarkoituksia varten kehitettyjä harvemmin käytettyjä laitteistoja. Mittausgeometrian suunnittelussa tärkeitä ovat kehossa olevien radionuklidien fysikaaliset ominaisuudet: fysikaalinen puoliintumisaika, fotonin tai beetahiukkasen energia ja emissiotodennäköisyys. Suunnittelussa on otettava huomioon myös anatomiset tekijät kuten ihmisen rakenne, paino ja pituus, kiinnostuksen kohteena olevat elimet, radioaktiivisen aineen oletettu jakautuma, radionuklidien ajallinen käyttäytyminen kehossa, viipymäaika ja metabolia.

Kokokehon mittausta varten käytetään yleensä yhtä alla olevista kolmesta mittausgeometriasta:

1. Tuoli, jonka havaitsemisraja ^{137}Cs :lle 10 minuutin mittausajalla on noin 100 bequereliä (kuva 5.21a)
2. Kaari, jonka havaitsemisraja vastaavasti on noin 500 bequereliä (kuva 5.21b)
3. Sänky, jonka havaitsemisraja on muutamasta kymmenestä becquerelistä ylöspäin riippuen ilmaisinten lukumäärästä (kuva 5.21c)

Ilmaisimet ovat joko NaI(Tl)-kiteitä tai puolijohteita (HPGe), joiden koko ja muoto vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan.

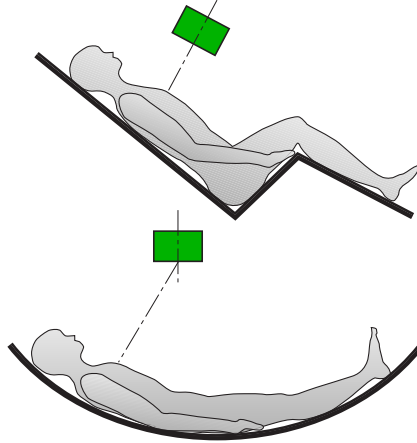
Geometriassa, jossa ihminen makaa sängyllä, voidaan selvittää aktiivisuuden jakautumista kehossa. Tämä voidaan varmistaa eri tavoin: sänky voi liikkua, ilmaisimet voivat liikkua tai ilmaisimia voi olla useampia ja jokaisen signaali tallentua erikseen. Näin syntyy pituusjakautuma, jonka tunteminen on tärkeä säteilyannoslaskujen kannalta. Tuoli- ja kaarigeometriassa ei saada kuvaa aktiivisuuden jakautumisesta kehossa.

Yksittäisen elimen sisältämät radioaktiivisten aineiden määrät voidaan mitata sitä varten suunnitellussa erityisgeometriassa. Tyypillinen esimerkki on jodin mittaaminen kilpirauhasesta.

Mittaukseen riittää pieni esimerkiksi $3,75 \cdot 3,75$ cm NaI(Tl)-ilmaisim, joka asetetaan kaulalle kilpirauhasen kohdalle. Taustasuojana tarvitaan vain lyijystä tehty kollimaattori ilmaisimen ympärillä tai mittaus tehdään erikoistilanteessa kokonaan ilman suojausta.

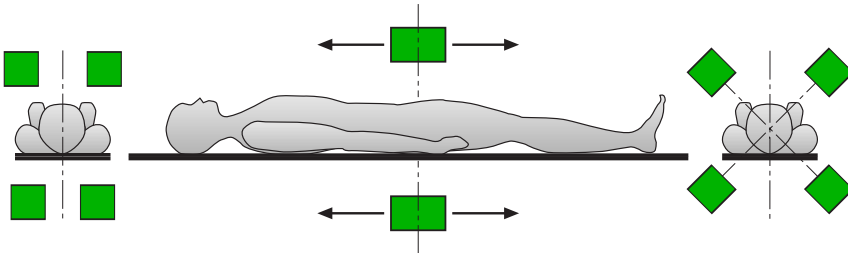
KUVA 5.21 Erilaisia mittausgeometrioita

a) Tuoligeometria. Ilmaisimien, joko NaI(Tl) tai puolijohde, on sijoitettu noin 45 cm päähän ihmisestä. Tuoli itsessään voi olla suojattu lyijyllä tai sijoitettu mittaushuoneeseen, jonka seinät on tehty esimerkiksi raudasta tai lyijystä.



b) Kaarigeometria. Kun ilmaisimen keskipisteen ja mitattavan kohteen välinen etäisyys on riittävän suuri, se on käytännössä vakio riippumatta tarkasteltavasta pisteestä mitattavassa kohteessa. Koska kaaren säteen kuitenkin on oltava vähintään 1 m, jotta ihminen jaksaisi olla siinä tarpeeksi kauan, tehokkuus kärsii. IRMA 2:n geometria on kompromissi tuoli- ja kaarigeometrian välillä.

c) Sänkygeometria. Varsinkin silloin, kun radioaktiivisten aineiden jakauma kehossa ei ole tasainen, tarvitaan tietoa myös jakaumasta säteilyannoksen laskemista varten, tällöin tämä on paras geometria.



Suomessa esiintyy huoneilmassa radonia ja porakaivojen vesissä paljon luonnosta peräisin olevia radionuklideja (katso kirja 2, luvut 4 ja 5). Jotta nämä nuklidit voitaisiin havaita suoraan ihmisestä tarvitaan erikoisilmaisimia, jotka havaitsevat pieniä energioita kymmenestä kiloelektronivoltista ylöspäin. Näillä voidaan mitata esimerkiksi uraania ja ^{210}Pb :ä suoraan ihmisen luustosta, johon nämä nuklidit hakeutuvat. Tämä voidaan tehdä sijoittamalla pään ympärille useampia ilmaisimia. Pää on edullinen mittauskohde, koska luukudoksen päällä on vähän muuta säteilyä vaimentavaa kudosta. Samantyyppisiä ilmaisimia voidaan käyttää myös keuhkomittauksissa.

Suomen ydinvoimaloissa ei ole varsinaisia kokokehomittauslaitteistoja, jotka pystyisivät erottamaan eri radionuklidit toisistaan. Sen sijaan sekä Loviisassa että Olkiluodossa on kvalitatiivisia monitoreita, joilla pystytään havaitsemaan, onko työntekijä kontaminoitunut vai ei.

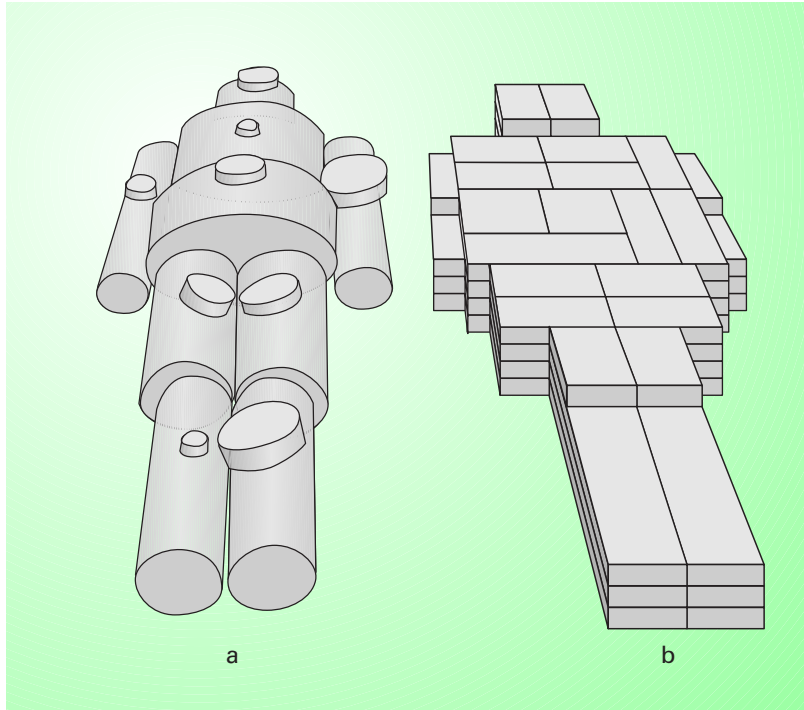
Kalibrointi ja fantomit

Energiakalibrointi tehdään samalla tavalla kuin gammaspektrometriassa (katso luku 5.2). Tehokkuuskalibrointi on yleensä suhteellinen ja se tehdään niin sanottua fantomia käyttäen. Näytemittauksissa käytettyä absoluuttista kalibrointiä on harvoin mahdollista käyttää. Tällä hetkellä kehityksen alla on kuitenkin numeerinen kalibrointi, jossa käytetään hyväksi lääketieteessä kehitettyjä ihmistä kuvaavia malleja. Kehitystyö on hidasta ja näin tehtyjä kalibrointeja tulee tulevaisuudessakin tarkistaa fantomeilla.

Fantomit ovat mitattavaa ihmistä mahdollisimman hyvin muistuttavia jäljitelmiä. Tärkeintä on että fantomilla saatu mittaustulos on sama kuin ihmisestä saatu tulos. Kun kalibroidaan yli 100 keV:n fotonisäteilijöitä varten, riittää, että fantomi on mittasuhteiltaan ihmistä muistuttava. Sen sijaan kun kalibroidaan pieniä, helposti absorboituvia energioita varten, on fantomin vastattava paremmin ihmiskudosta ja -vartaloa.

Yksinkertainen fantomi tehdään tavallisista muovipulloista, jotka on täytetty vesiliuoksella. Liuokseen on lisätty tunnettu määrä sitä radioaktiivista ainetta, jota halutaan mitata tutkittavasta henkilöstä. Tällainen kalibrointi sopii tilanteisiin, joissa halutaan mitata kehoon tasaisesti jakautunutta radioaktiivista ainetta kuten ^{137}Cs :a. Samaan tarkoitukseen sopii kaupallisesti saatavissa oleva liuosfantomi BOMAB, joka eroaa edellisestä lähinnä muotonsa puolesta (kuva 5.22a). Se on kuitenkin kallis eikä siitä voi helposti koota erikokoisia ihmisten jäljitelmiä. Lisähaittana on vuotoriski, varsinkin kun fantomi vanhenee. Fantomeja voidaan tehdä myös niin kutsutuista kylmäkalleista, joita käytetään kylmälaukuissa elintarvikkeiden ja juomien pitämiseksi kylminä. Niistä on helppo rakentaa erikokoisten ihmisten jäljitelmiä ja rakentaa erilaisia radioaktiivisen aineen jakautumia fantomissa (kuva 5.22b). Polymerisointiteknikalla on tehty kiinteitä muunnelmia, jolloin liuoksilla täytettyjen pullofantomien vuotoriski kuljetuksissa pienenee.

Tshernobylin onnettomuuden jälkeen onnettomuuspaikan lähialueilla syntyi tarve suorittaa suuri määrä kokokehomittauksia liikuteltavilla laitteistoilla. Pietarissa kehitettiin uudentyyppinen fantomi, joka koostuu tiiliskiven muotoisista noin kilon painoisista kudosekvivalentista materiaalista valmistetuista kappaleista. Kappaleisiin on porattu pitkittäissuuntaan reikiä ja valmistettu näihin reikiin sopivia muoviputkia. Putket voidaan täyttää ioninvaihtomassalla, jossa on tunnettu määrä tutkittavaa radioaktiivista ainetta. Suurin hyöty käytettäessä tällaista fantomia on mahdollisuus koota myös lapsia kuvaavia jäljitelmiä sekä mahdollisuus

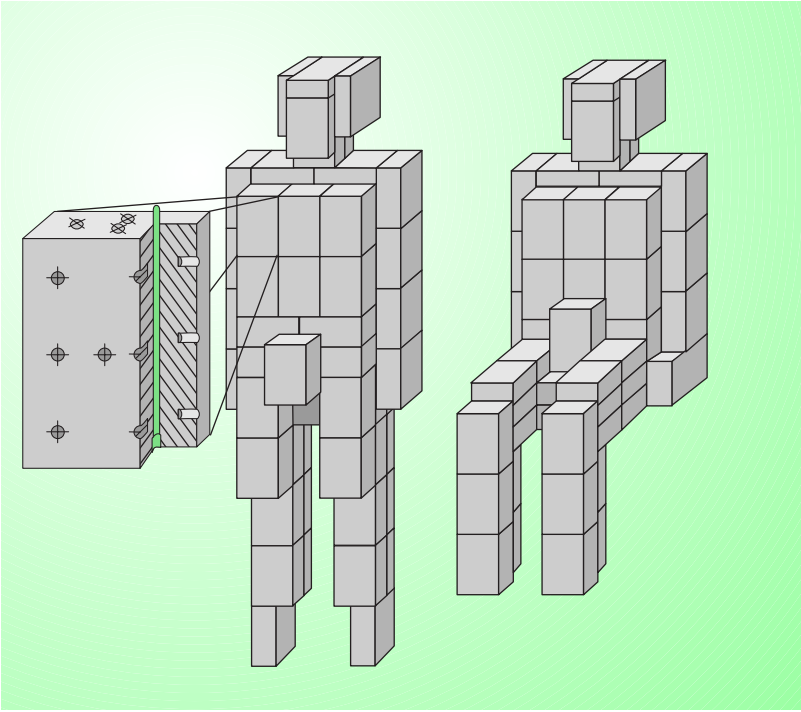


KUVA 5.22 Vesiliuoksella täytettyjä fantomeja

- a) BOMAB fantomi, joka on sylinterin muotoisista muovisäiliöistä koottu 63 kg radioaktiivista liuosta sisältävä fantomi.
- b) Kylmäkalleista rakennettu fantomi.

matkia erilaisia jakautumia. Tästä fantomista onkin tullut suosittu varsinkin laadunvalvontaan liittyvissä vertailumittausprojekteissa, jotka koskevat fissio- ja aktivointituotteita. Fantomi on rakenteeltaan kiinteä eikä kontaminaatoriskiä ole, kun vain huolehditaan siitä etteivät radioaktiivisia aineita sisältävät sauvat vaurioitu (kuva 5.23).

Kun mitataan pieniä, alle 100 keV:n energioita, edellä kuvatut fantomityypit eivät ole sopivia. Nykyään valvotaan esimerkiksi ydinpolttoaineen valmistuksessa ja jälleenkäsittelylaitoksissa mahdollista uraani- ja plutoniumkontaminaatiota. Tällöin kalibrointiin vaaditaan fantomeja, jotka vielä paremmin vastaavat mitattavaa ihmistä. Uraanin, toriumin ja plutoniumin mittaaminen keuhkoista vaatii kalibrointia varten erityistä keuhkofantomia. Tällaisessa fantomissa on keuhkokudosta vastaavasta materiaalista tehtyt ”keuhkot” ja eripaksuisia kudosta edustavia kerroksia, joiden absorptio-ominaisuudet vastaavat ihmisen keuhkoja ympäröivän



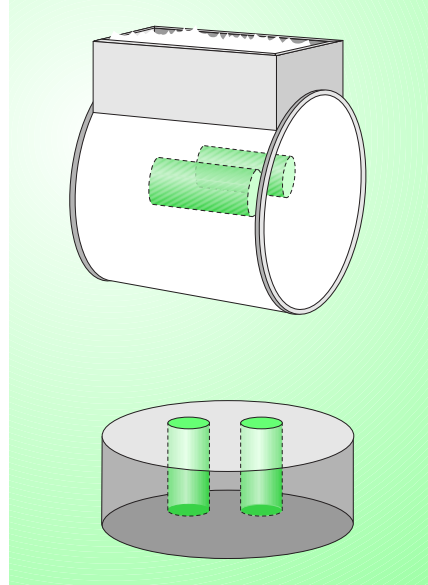
KUVA 5.23 Uudentyyppinen fantomi

Uudentyyppinen polyetyleenistä tehty fantomi, joka voidaan panna makaamaan, istumaan tai seisomaan alumiinisten tukikappaleiden avulla.

kudoksen ominaisuuksia. Tämä tarkoittaa samalla sitä, että tutkittavan henkilön kudospaksuus on määritettävä jollakin sopivalla menetelmällä ja kalibroinnista tulee näin ollen yksilökohtainen.

Luuhun hakeutuvien radionuklidien kuten ^{210}Pb :n määrittämisestä ihmisen pään luusta kerrottiin edellä (katso kappale mittauserimetria). Pään kalibrointia varten on tehty fantomi käyttämällä aitoa ruumiinavauksessa saatua ihmiskalloa, joka on sisä- ja ulkopuolelta maalattu tasaisesti maalilla, jonka radionuklidikoostumus ja -pitoisuus on tunnettu. Kalibrointi voidaan tehdä myös kiinnittämällä kalloon sisä- ja ulkopuolelle suuri määrä pieniä säteilylähteitä, joiden aktiivisuus tunnetaan.

Kilpirauhasta kuvaamaan käytetään usein kahta sylinterin muotoista muovikapselia, jotka täytetään liuksella, jossa on tunnettu määrä ^{125}I :a tai ^{131}I :a. Kapselit sijoitetaan muovista tai muusta kudosekvivalentista materiaalista tehtyyn niskafantomiin (kuva 5.24).



KUVA 5.24 Kaksi kilpirauhasfantomia

Alempana oleva on polyetyleenistä tehty fantomi. Ylempänä oleva on sokerilla täytetty muovista valmistettu kaulanmuotoinen fantomi. Molempiin pannaan kilpirauhasta edustamaan radioaktiivisella jodilla täytettyjä kapseleita.

Mittaus

Teknisesti kokokehomittaus ei poikkea gammaspektrometrisestä näytemittauksesta (katso luku 5.2). Näyte on kuitenkin suurempi eikä sen muoto ole yhtä säännöllinen kuin muiden näytteiden. Elävässä ihmisessä toimivat myös kaikki biologiset prosessit, joten mittaustilanne muuttuu helposti lyhyelläkin aikavälillä – muutenkin kuin radionuklidien fysikaalisen puoliintumisen kautta. Aiemmin tehtyä mittausta ei voida toistaa samalla tavalla kuin näytepurkin mittausta. Ihminen ei jaksa olla paikallaan kovin kauan liikkumatta. Ihmisellä voi olla kontaminaatiota ihollaan. Kontaminaatiota vähennetään huolellisella pesulla. Sen jälkeen mitattava ihminen pukeutuu mittaussyjamaan, jotta mahdollisesti omissa vaatteissa oleva kontaminaatio ei kulkeutuisi mukaan mittaushuoneeseen. Mittaushuone pyritään aina pitämään mahdollisimman puhtaana.

Tulostenkäsittely poikkeaa jonkin verran gammamittaustulosten käsittelystä silloin, kun mitataan usealla ilmaisimella samanaikaisesti. IRMA 1-laitteistossa käytetään neljää NaI(Tl)-ilmaisinta ja kahta HPGe-ilmaisinta rutiinimittauksissakin. Yleensä tuikeilmaisinten signaalit yhdistetään, joten energiakalibrointi on erittäin tärkeä erotuskyvyn pitämiseksi hyvänä. Pitoisuuden lisäksi saadaan myös tulos aktiivisuuden pituusjakautumasta. Puoliyohteella saatu tulos on tarpeen silloin kun mitattavassa henkilössä on useita radioaktiivisia aineita kuten joskus säteilytyöntekijöissä.

KIRJALLISUUTTA

Debertin K, Helmer RG. Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1988.

Direct methods for measuring radionuclides in the human body. IAEA Safety Series No.114. Vienna, 1996.

Gilmore G, Hemingway JD. Practical gamma-ray spectrometry, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1995.

Knoll GF. Radiation detection and measurement, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 2000.

L'Annunziata MF. (ed.). Handbook of radioactivity analysis, San Diego, USA: Academic Press, 1998.

Garcia-Leon M, Madurga G (eds). Low-level measurements of man-made radionuclides in the environment. Proceedings of the second international school, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991.

Hemmilä I, Sthålborg T, Phillips M (eds). Bioanalytical applications of labelling techniques Wallac EG&G company, 1994.

International Commission and Radiation Units and Measurements. Phantoms and computational Models in therapy, diagnosis and protection. ICRU Report 48. Bethesda MD, 1992.

Liite

| Suomenkielinen nimi | Englanninkielinen nimi | Tunnus | Yksikön tunnus | Määrittelykaava |
|---|--|------------------|--|-----------------|
| Absorboitunut annos | Absorbed dose | D | Gy | 2.16 |
| Absorptioannosnopeus | Absorbed dose rate | \dot{D} | Gy s ⁻¹ | 2.17 |
| Aktiivisuus | Activity | A | Bq | 1.11 |
| Aktiivisuuskate | Surface activity | A_s | Bq m ⁻² | |
| Aktiivisuuspitoisuus | Activity concentration | c_A | Bq m ⁻³ | |
| Annosekvivalentti | Dose equivalent | H | Sv | 2.19, 2.20 |
| Annosnopeus, efektiivisen annoksen nopeus | (Effective) dose rate | \dot{E} | Sv s ⁻¹ | 2.25 |
| Cema | Cema | C | Gy | 2.9 |
| Cemanopeus | Cema rate | \dot{C} | Gy s ⁻¹ | 2.12 |
| Efektiivinen annos, annos | Effective dose | E | Sv | 2.24 |
| Efektiivisen annoksen kertymä | Committed effective dose | $E(\tau)$ | Sv | 2.27 |
| Efektiivisen annoksen sitouma | Effective dose commitment | E_c | Sv | 2.29 |
| Ekvivalenttiannoksen kertymä | Committed equivalent dose | $H_T(\tau)$ | Sv | 2.26 |
| Ekvivalenttiannoksen sitouma | Dose equivalent commitment | $H_{c,T}$ | Sv | 2.28 |
| Ekvivalenttiannos | Equivalent dose | H_T | Sv | 2.23 |
| Ekvivalenttiannosnopeus | Equivalent dose rate | \dot{H}_T | Sv s ⁻¹ | |
| Energia-absorptio massakerroin | Mass energy absorption coefficient | μ_{en}/ρ | m ² kg ⁻¹ | (1.41) |
| Energiakertymä | Energy fluence | Ψ | J m ⁻² | 2.3 |
| Energiakertymänopeus | Energy fluence rate | ψ | J m ⁻² s ⁻¹ , W m ⁻² | 2.4 |
| Energianluovutuksen massakerroin (Lineaarinen) energiansiirtokyky | Mass energy transfer coefficient | μ_{en}/ρ | m ² kg ⁻¹ | (1.41) |
| Hajoamisvakio | Decay constant | λ | s ⁻¹ | 1.12 |
| Henkilöannosekvivalentti $H_p(0,07)$, pinta-annos | Personal dose equivalent, superficial | $H_p(0,07)$ | Sv | |
| Henkilöannosekvivalentti $H_p(10)$, syväannos | Personal dose equivalent, penetrating | $H_p(10)$ | Sv | |
| Hiukkaskertymä | (Particle) fluence | Φ | m ⁻² | 1.5, 2.1 |
| Hiukkaskertymänopeus | (Particle) fluence rate | φ | m ⁻² s ⁻¹ | 1.6, 2.2 |
| Hiukkasten energijakauma, hiukkasten (energia)spektri | Energy distribution of particle number | N_E | J ⁻¹ | 2.5 |
| Hiukkasten määrä | Particle number | N | | |
| Hiukkastiheys | Volumic particle number | n | m ⁻³ | |
| Kerma | Kerma | K | Gy | 2.7 |
| Kermanopeus | Kerma rate | \dot{K} | Gy s ⁻¹ | 2.11 |
| Kermanopeuskerroin | Air kerma rate constant | Γ_δ | Gy m ² Bq ⁻¹ s ⁻¹ | |
| Keskim. aineeseen siirtynyt energia | Mean energy imparted | $\bar{\epsilon}$ | J | 2.15 |
| Keskimääräinen energiahäviö muodostunutta ioniparia kohti | Mean energy expended per ion pair formed | W_i | J | |
| Kokonaismassajarrutuskyky | Mass stopping power | S/ρ | J m ² kg ⁻¹ | 1.34 |
| Kollektiivinen efektiivinen annos | Collective effective dose | S | manSv | 2.30 |
| Kollektiivinen ekvivalenttiannos | Collective equivalent dose | S_T | manSv | 2.31 |
| Laatutekijä | Quality factor | Q | 1 | 2.18 |
| Massavaimennuskerroin | Mass attenuation coefficient | μ/ρ | m ² kg ⁻¹ | (1.40) |
| Ominaisaktiivisuus | Specific activity | a | Bq kg ⁻¹ | |
| Puoliintumisaika | Half-life | $T_{1/2}$ | s | |
| Suuntainen annosekvivalentti | Directional dose equivalent | $H'(d,\Omega)$ | Sv | |
| Säteilyenergia | Radiant energy | R | J | |
| Säteilyn energijakauma, säteilyn (energia)spektri | Energy distribution of radiant energy | R_E | 1 | 2.6 |
| Säteilytys | Exposure | X | C kg ⁻¹ | 2.13 |
| Säteilytysnopeus | Exposure rate | \dot{X} | C kg ⁻¹ s ⁻¹ , A kg ⁻¹ | 2.14 |
| Vaikutusala | Cross section | σ | m ² | (1.19) |
| Vapaa annosekvivalentti | Ambient dose equivalent | $H^*(d)$ | Sv | |

Liite 1. Ionisoivan säteilyn ja radioaktiivisuuden tärkeimmät suureet

Hakemisto

A

absorbtiivaikutusala 47
absorptio 44
absorptioannosnopeus 74
akseptori 127
aktiivisuus 19, 136
aktiivisuuskate 19
aktiivisuuspitoisuus 19
aktivoituminen 35
aktivoitumisreaktio 54
alfahajoaminen 20
alfahiukkasen kantama 40
alfaneutronilähde 51
alfaspektrometria 157, 164
alfaspektri 157, 163, 165, 177
alfasäteily 39, 120, 123, 176
annihilaatio 43, 141, 146
annihilaatiosäteily 21
annoksen kasvuilmio (build-up) 75
annosekvivalentti 77
annosekvivalenttinopeus 86
annosnopeus 82
annositouma 88
antikoinsidenssisuojaus 178
antineutriino 23
atomi 12
atomimassa 13
atomimassayksikkö 13
augerelektroni 15, 37, 46
avoionisaatiokammio 100

B

barn 19
becquerel 19
beetahajoaminen 21
beetahiukkasten kantama 43
beetaspektri 175, 177
beetasäteily 40, 122, 125, 176
binaarinen fissio 58
BOMAB 187

C

cema 69
cemanopeus 71
Compton-reuna 145
Comptonin ilmiö 47
Comptonin ilmiön energia-absorptio-
kerroin 48
Comptonin sironta 141, 145
Coulombin valli 18

Coulombin voima 18
Curie 19

D

deuteroni 31
DIS-dosimetri 131
diskreetti spektri 20
donori 127
dynodi 125

E

efektiivinen annos 79
efektiivinen protoniluku 73
efektiivisen annoksen kertymä 87
efektiivisen annoksen sitouma 88
eksponentiaalinen hajoamislaki 27
ekvivalenttiannoksen kertymä 87
elastinen sironta 32, 44, 51
elektroni 12, 40, 47, 116
elektroni-aukko-pari 126, 141
elektronikaappaus 21
elektronikuori 13
elektronin kantama 43
elektronitasapaino 75
elektronivoltti 16
elimen ekvivalenttiannos 80
elimen tai kudoksen ekvivalenttiannos 82
elimen tai kudoksen painotuskerroin 82
energia-absorptiokerroin 48
energia-absorption massakerroin 48
energiadiskriminointi 165
energiakertymä 68
energiakertymänopeus 68
energian luovutuskerroin 48
energianluovutuksen massakerroin 48
energiansiirtokyky 38
energiaspektri 23
ensimmäisen törmäyksen annos 75
epäelastinen sironta 32, 44, 53
erotusaika 121
erotuskyky 124, 125, 130, 142, 148, 160
EUROMET 97
evaporaatio 60

F

Fano-tekijä 128
fantomi 71, 187
fertiili 56
filmi 130
filmidosimetri 131

fissiilit nuklidit 56
fissio 55
fissioitua 56
fotoelektroni 46, 120
fotokatodi 125
fotoluminesenssi 172
fotoneutronilähde 51
fotoni 17, 47, 120, 141
fotosähköilmiö 44, 140
fotodyinreaktio 32, 48, 62
Frischin ionisaatiokammio 164
fuusio 32

G

gammasppektrometria 139
gammasaäteily 17, 44, 118, 123, 139
Ge(Li)-ilmaisimien 129
Geigerputki 120
germanium 128, 139, 142
germaniumilmaisimien 141
grafiittikalorimetri 102
gray 70, 74

H

hadroni 60, 62
hadronikaskadi 60
hajoamiskaavio 26
hajoamisvakio 19, 27
henkilöannosekvivalentti 84, 85
hiukkaskertymä 18, 67
hiukkaskertymänopeuden energia-
jakauma 33
hiukkaskertymänopeus 67
hiukkassäteily 12
hiukkasten energiajakauma 68
hiukkasvirran tiheys 18
HPGE-ilmaisimet 129, 142
hyvyystekijä 172
häviämisaäteily 40, 42
höyrystymisvaihe 60

I

IAEA 66
ICRU 66
ihminen 181
ilmakerma 71
internukleaarinen 60
intranukleaarinen 60
ioni 37, 116
ioni-istutuspuolijohde 159, 180
ionipari 37
ionisaatioenergia 12
ionisaatiokammio 116, 164
ionisoimaton säteily 14

ionisoiva säteily 12
IRMA 1, IRMA 2 181
ISO 66
isomeerinen 24
isomeerinen transiitto 24
isotooppi 12

J

jarrutuskyky 37
jarrutussäteily 16, 37, 41, 147
jatkuva energiaspektri 21
jatkuvatoinen alfaspektrometria 165
jäljitettävyyden 95
järjestysluku 12

K

kaappausreaktio 32
kaasumonistus 118, 120, 122
kaasutäytteen ilmaisimien 116
kaivokammio 108
kalibrointi 95, 147, 162, 179, 191
kalibrointiaudit 100
kalifornium 51
kalorimetri 101
Kansainvälinen atomienergiajärjestö
(IAEA) 66
Kansainvälinen standardoimisjärjestö
(ISO) 66
Kansainvälinen säteilysuojelutoimikunta
(ICRP) 66
Kansainvälinen säteily-yksiköiden ja
-mittausten toimikunta (ICRU) 66
kaoni 60
karakteristinen röntgensäteily 15, 37
kaskadi-ilmiö 60
katoalue 127
kattavuuskertoimen 109
kemiluminesenssi 173
kerma 69
keskikantama 39
keskimääräinen aineeseen siirtynyt
energia 73
ketjureaktio 56
kiinteiden näytteiden mittaaminen 173
kimmoisen sironta 51
kimmoton sironta 53
koinsidenssi 27
koinsidenssisummautuminen 147, 155
koinsidenssisuoja 173
kokekokeittaus 181
kokonaisepävarmuus 109
kokonaistehokkuus 149
kollektiivinen (efektiivinen) annos 89
kollektiivinen ekvivalenttiannos 89

konversiosuhde 17
kriittinen ryhmä 89
kryostaatti 141
kudoscema 71
kudosvastine 83
kuvantamislevy 133
kynnysreaktio 55
käyttönormaali 94

L

laaja kenttä 84
laajakulma-avoionisaatiokammio 101
laatutekijä 78
lama-aika 119
laskentatehokkuus 161, 168, 172, 177,
178, 179
luminesenssi 121, 122, 172

M

Maailman terveysjärjestö (WHO) 66
makroskooppinen vaikutusala 34
makrovaikutusala 34
massajarrutuskyky 37
massaluku 12
massavaimennuskerroin 35
metastabiili tila 24
metrologia 94
mikroskooppinen vaikutusala 33
mikrovaikutusala 19, 32
mittanormaali 94
mittausaudit 100
mittausgeometria 160, 183, 185
moderoituminen 51
mooli 13
moolimassa 13
myoni 61

N

nestetuikeilmaisain 124, 173
nestetuikelaskenta 165, 171
nestetuikepullo 166
nestetuikeseos 166
nestetuikespektrometri 122
neutriino 23
neutroni 12, 49, 60
neutronigeneraattori 51
neutroniluku 12
neutronin hidastuminen 51
nukleoni 12
nukleoniluku 12
nuklidi 12
näytteen valmistus 139, 157, 166

O

ominaisaktiivisuus 19
onteloionisaatiokammio 100
onteloionisaatioteoria 100, 104
orbitaali 14

P

paineionisaatiokammio 118
parinmuodostus 47, 61, 141, 146
peräkkäinen hajoaminen 29
pii 128
piikkitehokkuus 148
pintaasteilmaisain 128, 159
pioni 60, 61
PIPS-puolijohdeilmaisain 160, 165, 180
pitkän etäisyyden alfailmaisain 164
Planckin vakio 14
positroni 40, 42, 47
primaarinormaali 94
primaarinormaali-laboratorio (PSDL) 97
protoni 12, 60
protoniluku 12
pulssi-ionisaatiokammio 164
pulssinkorkeusanalysaattori 143
pulssinkäsittely 142
pulssinmuotoanalyysi 176
puoliarvoleveys 128, 148
puoliintumisaika 20, 28
puolijohdeilmaisain 126, 159, 180, 183

R

rad 74
radioaktiivinen hajoaminen 19
radionuklidi 16
rajaton energiansiirtokyky 78
Rayleighin sironta 44
reaktiotaajuus 32
referenssinormaali 94
rekombinaatio 117
rekombinoitua 116
rekyyliatomi 160
rekyylienergia 25, 53
rem 78
resonanssireaktio 50
röntgensäteily 44, 118, 142

S

sammutuskaasu 122
satunnaissummautuminen 143, 147
sekundaarinormaali 94
sekundaarinormaalilaboratorio (SSDL) 98
Si(Li)-ilmaisain 129, 139
sidosenergia 13, 16
siirtonormaali 94

siirtymä 14
sirona 32
sirontavaikutusala 47
sisäinen konversio 17
sisäisen standardin menetelmä 170
spallaatioreaktio 32, 61
spektri 68, 144
spektrin analysointi 151, 162
spektrin hiukkasvuontiheys 33
Spencerin-Attixin teoria 105
spontaani fissio 24
SSDL-verkosto 98
staattinen sähkö 173
stabiiliuskäyrä 54
suhteellinen atomimassa 13
suhteellinen biologinen tehokkuus 77
suhteellinen molekylimassa 13
suhteellinen tehokkuus 149
suuntainen (suunnattu) annos-
ekvivalentti 84, 85
suuntainen laaja kenttä 84
suurenergiaillmiö 59
synkrotronisäteily 16
syväannos 85
sähkömagneettinen kaskadi 61
sähkömagneettinen säteily 12, 44
säteilyenergia 67
säteilyenergian energijakauma 68
säteilyherätteen neutronilähde 51
säteilyn painotuskertoin 80
säteilytys 72
säteilytysnopeus 72

T

tausta 161, 172, 183
taustasäteily 151
tehokkuuskalibrointi 162
terminen neutroni 55
termoloisteilmaisoin 132
ternaarinen fissio 58
tiheysefetti 41
toipumisaika 121
transitio 14, 17
tritoni 31
Tsherenkov-ilmaisoin 126
Tsherenkovin säteily 41, 126, 177

tuikeaine 123, 166
tuikeilmaisoin 122, 183
tyypin A epävarmuus 109
tyypin B epävarmuus 109

U

ulkoisen standardin menetelmä 170
UNSCEAR 66
usean nuklidin määrittäminen 174

V

vahva vuorovaikutus 16
vaikutusala 18, 30, 32
vaikutusalatiheys 34
vaimennuskertoimen 35
vaimeneminen (vaimennus) 124, 168, 170
valomonistinputki 122, 125
valon nopeus tyhjiössä 14
vapaa annosekvivalentti 84
vapaa radikaali 37
varattu/varauksinen hiukkanen 36
varausluku 12
verrannollisuuslaskuri 118, 178
vertailunormaali 94
vesikalorimetri 101
viivaspektri 20, 157
viivästynyt neutroni 57
viritystila 14
vuontiheys 67
vuorovaikutussilmä 140, 168
vuorovaikutussuure 37
vuorovaikutusten yhteisvaikutus 48
väliydinreaktio 31

W

WHO 66

Y

ydinreaktio 20, 30
yhdistetty epävarmuus 109
ylössirona 52
ytimen energiatila 17
ytimen sidosenergia 16
ytimen säde 13
ytimensisäinen kaskadi 60
ytimenvälinen kaskadi 60