

4 SÄTEILYN ILMAISIMET

Säteilyn mittaustehtävät vaihtelevat yksinkertaisesta säteilyn toteamisesta tarkkoihinkin tutkimuksiin. Mittaamiseen voi kuulua esimerkiksi säteilyn tunnistaminen, sen spektrin mittaaminen sekä varauksen, energian, nopeuden ja massan määrittäminen. Ydin ja hiukkasfysikaalisissa tutkimuksissa tarvitaan usein lisäksi ns. koincidenssimittauksia, joiden avulla todetaan useamman havaitun kvantin liittyminen samaan yksittäiseen prosessiin (coincidence = samanhetkisyys, yhteensattuma).

Säteilyn havaitseminen ja mittaaminen perustuu sen aiheuttamiin prosesseihin. Ionisoiva säteily ja sen yksittäiset hiukkaset ja kvantit havaitaan niiden aiheuttaman ionisaation ja viritysten avulla. Ionisoituminen tekee väliaineen sähköä johtavaksi ja viritykset puolestaan todetaan niiden purkautuessa emittoituvan valon perusteella.

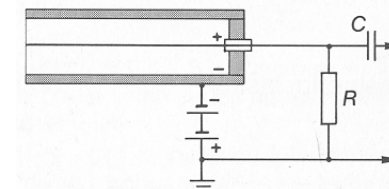
Neutronien havaitseminen perustuu niiden aiheuttamiin ydinprosesseihin, erityisesti neutronisieppaukseen (n, γ), tai niiden kimmoisiin törmäyksiin protonien kanssa vetyä sisältävissä väliaineissa. Kummassakin tapauksessa syntyvä ionisoiva säteily paljastaa neutronit ja ilmaisee niiden energian.

Nykyisin käytössä olevat säteilyn ilmaisimet eli detektorit voidaan jakaa *signaali-ilmaisimiin* ja *ratailmaisimiin*. Signaali-ilmaisimeen saapuva ionisoiva hiukkanen aiheuttaa hetkellisen signaalin, joka mitataan. Signaali-ilmaisimia on kolmea tyyppiä: kaasutäytteiset ilmaisimet, tuikeilmaisimet ja puolijohdeilmaisimet. Ratailmaisimissa taas saadaan ionisoivan hiukkasen ratakäyrä näkyviin. Ratailmaisimia ovat valokuvausmulsiot sekä erilaiset kammioilmaisimet.

4.1 SIGNAALI-ILMAISIMET

4.1.1 Kaasutäytteiset ilmaisimet

Toiminta perustuu säteilyn kaasussa aiheuttaman ionisaation havaitsemiseen. Perusrakenteeltaan ilmaisimena on putki, jonka akselilla on ohut anodilanka ja kuori toimii katodina (kuva). Elektrodiin välille kytketään suuri jännite.



Kaasutäytteinen ilmaisimena

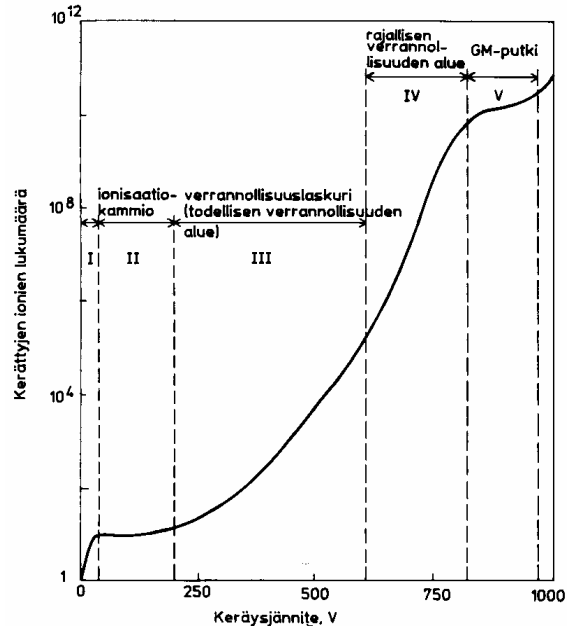
Putken läpi kulkeva fotoni tai varauksellinen hiukkanen ionisoi putkessa olevaa kaasua. Kaasu tulee johtavaksi ja syntyy sähköpurkauspositiivisten ionien kulkeutuessa kohti katodia ja negatiivisten kohti anodia. Virtapiirin vastuksella R on suuri resistanssi, joten purkauksen synnyttämä virtasysäys aiheuttaa jännitteen nopean laskemisen putkessa ja purkauksen katkeamisen. Jännite nousee jälleen ja putki voi rekisteröidä uuden kvantin. Jokaisen purkauksen jälkeen ilmaisimella on siis tietty *hukka-aika* (dead time), jonka aikana se ei toimi.

Kaasutäytteisessä ilmaisimessa anturina toimii siis kahden elektrodin välinen kaasutila, jossa ionisaatiossa syntynyt varaus kerätään talteen periaatteessa sähkökentän avulla. Ilmaisimen toimintatapa riippuu siitä miten voimakas sähkökenttä elektrodien väliin synnytetään. Sähkökentän suuruus on verrannollinen elektrodien väliseen jännitteeseen eli ns. *keräysjännitteeseen*. Käytetystä keräysjännitteestä riippuen laite toimii *ionisaatiokammiona*, *verrannollisuuslaskurina* tai *geigerputkena*.

Kuvassa seuraavalla sivulla on esitetty talteenkerättyjen ionien lukumäärä keräysjännitteen funktiona. Kun jännite on pieni (kuvan alue I), osa ionisaatiossa syntyneistä elektroneista ja ioneista ehtii rekombinoitua takaisin neutraaleiksi atomeiksi ennen kuin ne saavuttavat kohtiot (elektrodit). Pulssit ovat heikkoja ja epäluotettavia.

Ionisaatiokammio

Suuremmilla jännitteillä (kuvan alue II) lähes kaikki syntyvät elektronit ja ionit kulkeutuvat kohtioille, ts. sähkökentän voimakkuus riittää ionien talteen keräämisen ennen kuin huomattavaa rekombinoitumista ehtii tapahtua. Toisaalta kenttä on vielä niin pieni, että ionien siltä sama energia ei riitä ylimääräisen ionisaation aiheuttamiseen. Laite mittaa siis vain säteilyn aiheuttamaa ionisaatiota kammiossa.



Ionisaatiokammiota käytetäänkin tavallisesti säteilyn aiheuttaman kokonaisionisaation määrittämiseen tietynä aikana eikä niinkään yksittäisten hiukkasten havaitsemiseen.

Työntekijäin *annosmittarina* voidaan käyttää ionisaatiokammiota. Kysymyksessä on kaasutäytteen kondensaattori, joka tarkkailujakson alussa ladataan tiettyyn jännitteeseen. Ionisoiva säteily purkaa latausta ja alentaa jännitettä. Jännitteen alenema kertoo annoksen määrän.

Esimerkki: Annosmittarin kondensaattorilevyjen välissä on argonkaasua. Mittariin saapuu α -hiukkanen, jonka energia on 4,2 MeV. Kuinka paljon kondensaattorin jännite muuttuu, kun ioniparin syntymiseen argonissa tarvitaan 25 eV?

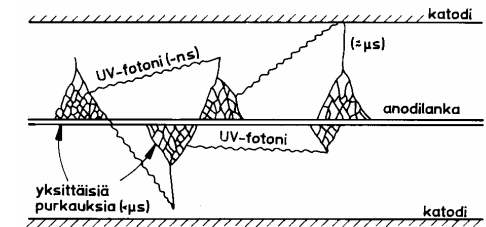
Verrannollisuuslaskuri

Keräysjännitettä edelleen kasvatettaessa tullaan alueelle III (ja IV), jossa putki toimii verrannollisuuslaskurina. Ionisaatiossa vapautuneet *elektronit* saavat sähkökentässä kiihtyessään niin suuren energian, että ne pystyvät aiheuttamaan uutta ionisoitumista. Syntyneet uudet elektronit kiihtyvät sähkökentässä ja aiheuttavat edelleen ionisaatiota. Syntyy ionisaatiovyöry. Vyöry sammuu, kun kaikki vapautuneet elektronit ovat kulkeutuneet anodille.

Nimi verrannollisuuslaskuri tulee siitä, että putkessa sekundääristen ionisaatiotapahtumien lukumäärä on verrannollinen primääristen ioniparien lukumäärään. Havaittavan pulssin voimakkuus, ts. jännitteen muutos, on siis verrannollinen hiukkasen synnyttämien ioniparien lukumäärään ja siten myös sen luovuttamaan energiaan. Verrannollisuuslaskurilla voidaan sen tähden myös tunnistaa hiukkasia ja määrittää niiden energioita.

Geigerputki

Kun keräysjännitettä vielä lisätään kiihdytetyt elektronit aiheuttavat sekundääri-ionisaatioiden lisäksi myös ionien ja molekyylien virityksiä. Viritystilojen purkautuessa vapautuneet fotonit ionisoivat molekyyliä kaikkialla putkessa ja sähköpurkaus leviää koko anodin pituudelle (kuva). Näin yksi hiukkanen aiheuttaa hyvin voimakkaan jännitepulssin, joka on helppo havaita, mutta jonka voimakkuus ei riipu hiukkasen energiasta. Geigerputkella ei siis voida tunnistaa hiukkasta.



Geigerputkessa positiiviset ionit liikkuvat paljon hitaammin kuin elektronit. Putken purkaus sammuu, kun positiivisten ionien muodostama avaruusvaraus, joka pienentää kenttää, muodostuu riittävän suureksi. Apuna voidaan käyttää erilaisia täytekaasuja tai jopa ulkoista sammutuspiiriä. Ennenkuin putkessa voi syntyä uusi purkaus positiiviset ionit on kerättävä katodille ja siihen kuluu huomattavasti aikaa. Geigerputken hukka-aika on siis pitkä.

Hukka-aika τ aiheuttaa virheen geigerputken laskentanopeuteen (pulsseja aikayksikössä). Jos havaittu laskentanopeus on n , niin ajassa t rekisteröidään nt pulssia. Todellinen mittausaika on ollut

$$T = t - nt \cdot \tau = t(1 - n\tau).$$

Hukka-ajan suhteen korjattu laskentanopeus n_0 on siis

$$n_0 = n \frac{t}{T} = \frac{nt}{t(1 - n\tau)} = \frac{n}{1 - n\tau}.$$

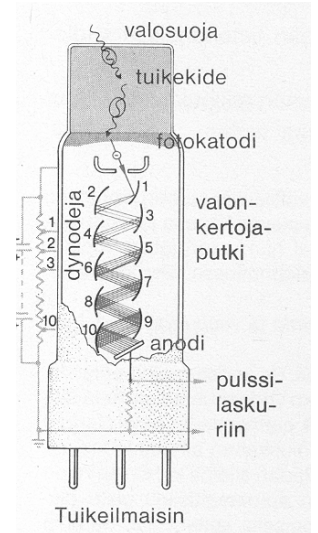
Esimerkki: Laskurin hukka-aika on $175 \mu\text{s}$. Yhdessä minuutissa havaittiin 38714 pukssia. Mikä oli laskurille todellisuudessa saapuvien pulssien lukumäärä?

4.1.2 Tuikeilmaisimet

Ionisoiva säteily aiheuttaa tietyissä aineissa sellaisia elektronien virityksiä, että niiden purkautuessa syntyy näkyvän ja ultraviolettialueen fotoneita, joita voidaan käyttää säteilyn havaitsemiseen.

Tuikeilmaisimen pääosat ovat *tuikekide* ja *valonmonistinputki*. Tuikekide on suuri puolijohdekide, esimerkiksi talliumilla aktivoitu natriumjodidikide NaI(Tl) tai jotakin tuikemuovia. Näillä aineilla on se välttämätön ominaisuus, että ne ovat läpinäkyviä niissä syntyvien *tuikefotonien* aallonpituudella.

Tuiekiteeseen osuva ionisoiva hiukkanen tai kvantti aiheuttaa virityksen. Virityksen purkautuessa syntyy tuikefotoni, joka ohjataan valoherkälle fotokatodille, josta se irrottaa elektronin. Syntyneiden fotoelektronien lukumäärä on verrannollinen energiaan, jonka hiukkanen tai kvantti luovuttaa tuikeaineeseen.



Valonmonistinputkessa elektronit moninkertaistuvat useassa vaiheessa. Putkessa on useita peräkkäisiä elektrodeja, ns. *dynodeja*, ja jokaisessa välissä elektroneja kiihdyttävä jännite. Jokainen törmäys dynodiin synnyttää uusia elektroneja (katso kuva). Anodille saapuva virtasysäys aiheuttaa piiriin kytkeytyvän vastuksen päiden välisen jännitepulssin, joka on verrannollinen virtasysäyksen elektronien lukumäärään ja siis myös säteilykvantin luovuttamaan energiaan.

Pulssit vahvistetaan ja lasketaan. Laskentaan liittyy myös voimakkuuden (ts. hiukkasen energian) mukainen lajittelu ns. monikanava-analysaattorilla. Analysaattorin kuhunkin kanavaan rekisteröityy tietyllä energiavälillä olevien säteilykvanttien lukumäärä. Näin saadaan suoraan määritetyksi tutkittavan säteilyn spektri.

NaI(Tl)-kide on hyvin yleisesti käytetty tuikekide. Nimenomaan alfasäteilyn havainnointiin käytetään paljon myös tuikeainetta ZnS(Ag). Beetasäteilyä ilmaistaan erilaisilla muovituikeaineella. Myös nestemäisiä tuikeaineita käytetään.

4.1.3 Puolijohdeilmaisimet

Puolijohdeilmaisim on erityisrakenteinen valodiodi ja se vastaa kiinteän olomuodon verrannollisuuslaskuria. Nyt ionisoiva hiukka-

nen tai kvantti synnyttää *elektroni-aukkopareja* puolijohteen pn-rapaintaan aiheuttaen estosuuntaisen virtapulssin ilmaisimpiin.

Yhden elektroni-aukkoparin tuottamiseen tarvitaan vain noin kymmenesosa siitä energiasta, joka tarvitaan kaasutäytteisissä ilmaisimissa ioniparin muodostamiseen. Kun lisäksi otetaan huomioon tiheysero, puolijohdeilmaisimien on noin 10^4 kertaa herkempi kuin tilavuudeltaan yhtä suuri kaasutäytteinen ilmaisimien.

Puolijohdeilmaisimissa pulssin kesto on lyhyt (n. 1 ns) ja korkeus tarkasti verrannollinen energiaan. Energianerotuskyky on parempi kuin tuikekiteellä, joten ne ovat erityisen hyviä energiaspektrin määrittämisessä.

Gammasäteilyä voidaan havaita esimerkiksi germaniumdetektorilla Ge(Li), elektroneja ja muita varauksellisia hiukkasia piidetektorilla Si(Li).

4.2 RATAILMAISIMET

Ratailmallisilla on pisin historia. Ne ovat kehittyneet valokuvauksesta ja Wilsonin sumukammion. Becquerelin ensimmäiset radioaktiivisuuden havainnot vuonna 1896 perustuivat säteilyn aiheuttamaan valokuvauslevyn mustumiseen.

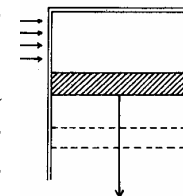
Valokuvausemulsion

hopeahalidit aktivoituvat säteilyn vaikutuksesta niin, että kehitettäessä saadaan näkyviin hopeahiukkasten merkitsemä hiukkasten jälki. Ydinfysiikassa käytetään varta vasten kehitettyjä valokuvaus-emulsioita yleensä melko paksuna koeeroksena ja ns. emulsiopakoina, joista hiukkasten 3-ulotteisia ratoja voidaan tutkia mikroskoopilla. Säteilyle herkkää filmiä käytetään myös säteilyannostareissa, jossa filmi sijoitetaan tarkkailtavalla alueella liikkuvan

henkilön taskuun. Filmin tummumisasteesta voidaan päätellä henkilön saaman säteilyannoksen suuruus.

Sumukammion

keksi Skotlantilainen Charles T. R. Wilson vuonna 1912. Laitteessa ionisoivien hiukkasten radat näkyvät ylikylläiseen vesihöyryyn muodostuvina sumujälkinä. Sumukammio on periaatteessa mäntäsilinteri (kuva), jossa on vesihöyryä. Höyry saadaan ylikyllästettyyn tilaan suurentamalla tilavuutta nopealla männän liikkeellä, jolloin lämpötila laskee. Jos kammioon samanaikaisesti osuu ionisoiva hiukkanen, muodostaa se ratansa varrelle ionipareja, jotka muodostuvat tiivistyskeskuksiksi. Kunkin ionin ympärille muodostuu pieni nestepisara. Valokuvaamalla pisarat nähdään millaista rataa pitkin hiukkanen on kammiossa liikkunut. Usein sumukammio asetetaan magneettikenttään, jolloin varatut hiukkaset voidaan tunnistaa ratojen kaareutumisen perusteella.



Kuplakammio

on sittemmin syrjäyttänyt sumukammion. Laitteen keksi yhdysvaltalainen Donald A. Glaser vuonna 1952. Kuplakammiossa hiukkasten jäljet näkyvät ylikuumennettuun nesteeseen syntyvinä kuplajoina. Kuplakammiossa jäljet ovat paljon terävämpiä kuin sumukammiossa ja mittaustarkkuus on vastaavasti parempi. Paljon käytetään nestemäisellä vedyllä täytettyjä kuplakammioita, joihin syntyyviä jälkiä valokuvataan yhtä aikaa eri suunnista. Ratojen käyritymistä magneettikentässä käytetään hyväksi hiukkasten tunnistamisessa ja niiden energian määrittämisessä.

Lankakammio

on uusi tiedonkäsittelyn nopeutumisen myötä kehitetty ratailmäsim. Laite koostuu elementeistä. Yksi elementti muodostuu katodiparista, joiden välissä on suuri joukko yhdensuuntaisia tasavälisiä anodilankoja. Kammio kootaan useista elementeistä, joiden langat ovat erisuuntaisia. Kammion läpi kulkeva ionisoiva hiukkanen aiheuttaa ionipurkaussarjan, joka ilmaisee hiukkasen radan. Radan sijainti kohtiolankojen muodostamassa koordinaatistossa rekisteröidään automaattisesti piste pisteeltä tietokoneohjatusti. Samalla rekisteröidään purkausten aiheuttamien jännitepulssien korkeudet, joista saadaan hiukkasten tunnistus ja energiat. Tulokset esitetään havainnollisina värikuvina

