

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika Instituut

Sullo Saan

Madala energiaga beetakiirguse stsintillatsioonidetektori arendamine

Bakalaureusetöö (6 EAP)
Füüsika eriala

Juhendajad:
Siiri Salupere, PhD
Madis Kiisk, PhD

Tartu 2022

Madala energiaga beetakiirguse stsintillatsioonidetektori arendamine

Ioniseeriva kiirguse detekteerimise viise on mitmeid, aga nendest vähesed töötavad madala energiaga beetakiirguse jaoks. Viimased nõuavad proovi võtmist ja laboris analüüsimist. Seevastu positsioonitundlik stsintillatsioonidetektor võiks suuta detekteerida beetakiirgust kohapeal, ilma objekti lõhkumata ja ka kiiremini.

Töö käigus ehitati kaks detektorit, mille põhiline erinevus on stsintillaatorplaadi paksus – 20 mm ja 1 mm. Üleminek 20 mm paksult stsintillaatorplaadilt 1 mm paksule parandas signaal-müra suhet 30,2 korda. Erinevalt 20 mm paksust stsintillaatorplaadist suutis 1 mm paks tuvastada ka süsinik-14 madala energiaga beetakiirgust.

Veel võrreldi kahte algoritmi stsintillatsioonvalguse impulsside ja beetakiirguse allika asukohtade määramiseks. Teine algoritm andis kaugemate allikate korral mõnevõrra täpsemaid tulemusi kui esimene, aga arvutamise aeg oli 13 400 korda pikem.

Märksõnad: madala energiaga beetakiirgus, stsintillatsioonidetektor, räni-fotokordisti, impulsi asukoha rekonstrueerimine

CERCS: P220 – tuumafüüsika

Development of a Scintillation Detector for Low-Energy Beta Radiation

There are many methods for detecting ionizing radiation but few of them work for low-energy beta radiation. These require extracting a sample and analysis in a laboratory. On the other hand, a position-sensitive scintillation detector should be able to detect beta radiation *in situ*, non-destructively and faster.

In this thesis, two detectors were built. The main difference is the thickness of the scintillator plate – 20 mm and 1 mm. Replacing the 20 mm thick scintillator plate with the 1 mm plate improved the signal-to-noise ratio 30,2 times. Unlike the 20 mm thick scintillator plate, the 1 mm plate successfully detected the low-energy beta radiation from carbon-14.

In addition, two algorithms for determining the locations of the scintillation pulses and the beta ray source were compared. The second algorithm gave somewhat more accurate results for further sources than the first, but the computing time was 13 400 times longer.

Keywords: low-energy beta radiation, scintillation detector, silicon photomultiplier, reconstruction of pulse location

CERCS: P220 – nuclear physics

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1 Teoreetiline taust	5
1.1 Ioniseeriva kiirguse liigid.....	5
1.2 Stsintillatsioonmaterjalid.....	5
1.3 Räni-fotokordisti tööpõhimõte	7
1.4 Madala energiaga beetakiirguse tuvastamine.....	7
2 Meetodid.....	9
2.1 Eksperimentaalse osa ülesehitus	9
2.2 Detektori ehitus	10
2.3 Kiirgusallikad.....	12
2.4 Andmete analüüs.....	13
3 Tulemused ja arutelu	15
3.1 Ehitatud detektorite võrdlus	15
3.2 Impulsside asukohtade kujutamine	16
3.3 Impulsi asukoha määramise algoritmide võrdlus.....	18
Kokkuvõte.....	21
Tänuavaldused	23
Kirjanduse loetelu	24
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	25

Sissejuhatus

Madala energiaga beetakiirgust on raske tuvastada selle kiirguse neeldumise tõttu ruumis, mistõttu võib radioaktiivne saaste jääda tuvastamata. Ioniseeriva kiirguse detekteerimise viise on mitmeid, aga nendest vähesed töötavad madala energiaga beetakiirguse jaoks. Viimased nõuavad proovi võtmist ja laboris analüüsimist.[1]

Seevastu stsintillatsioonidetektor võiks suuta detekteerida beetakiirgust kohapeal, ilma objekti lõhkumata ja ka kiiremini. Positsioonitundlik detektor annab kõrgema detekteerimistundlikkuse kiirgusallikate tuvastamisel. Eestis leiaks selline detektor kasutust näiteks dekomissioneeritud Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidlas betoonkonstruktsiooni jääksaaste tuvastamiseks. Nimelt on vaja kindlaks teha, millised betooni osad on radioaktiivselt saastunud. See võimaldab vastu võtta otsuse, kuidas jäätmeid käidelda: kas tegemist on radioaktiivse jäätmega või võib betooni piiranguteta ümbertöötlemisse saata.[2]

Selle töö esmane eesmärk on arendada positsioonitundlik stsintillatsioonidetektor, mis tuvastab madala energiaga beetakiirgust. Sealjuures peab detektor võimalikult vähe tuvastama muud kiirgust beetakiirgusena. Arendamine sisaldab nii sobiva detektori ehitamist kui ka andmeanalüüsi. Töö teine eesmärk on leida sobiv algoritm stsintillatsioonvalguse impulsside asukohtade ja nende abil beetakiirguse allika asukoha määramiseks.

Töö käigus ehitati kaks detektorit, mille põhiline erinevus on stsintillaatorplaadi paksus – 20 mm ja 1 mm. Eesmärk on võrrelda, kuidas see mõjutab detektori tundlikkust beetakiirgusele ja selle tuvastamist segavale taustkiirgusele. Impulsi asukoha määramiseks võrdlesin kahte erinevat algoritmi. Esimene arvutab impulsi asukoha analoogselt massikeskmega. Teine lähendab eri punktides mõõdetud intensiivsusi kauguse pöördruut-sõltuvusega.

1 Teoreetiline taust

1.1 Ioniseeriva kiirguse liigid

Radioaktiivsus on teatud aatomituumade omadus iseeneslikult laguneda. Selle käigus moodustub üks või mitu uut tuuma ning kiiratakse kiirgust, mille liik sõltub lagunemisprotsessist. Ioniseeriv kiirgus liigitatakse nelja kategooriasse: rasked laetud osakesed (sh alfakiirgus), kiired elektronid ehk beetakiirgus, elektromagnetkiirgus (sh gammakiirgus) ja neutronkiirgus.[3] Selles töös on olulised beeta- ja gammakiirgus.

See töö keskendub beetakiirguse tuvastamisele. Kõige tavalisem kiirete elektronide allikas on beeta-miinus lagunemine. Selle üldvõrrand on järgmine:



kus X ja Y on vastavalt ema- ja tütar nukliid, β^- on elektron ja $\bar{\nu}$ on antineutriino. Enim kasutatud viis beeta-lagunemist tuvastada on detekteerida beetaosake. Kuna beetalagunemise tütar nukliid on tihti ergastatud seisundis, siis alternatiivina saab tuvastada tütar nukliidi relakseerumisel kiiratavat gammakiirgust. Beetalagunemisel vabaneb energia, mis vastab ema- ja tütar nukliidide masside vahele. See energia jaguneb beetaosakese ja antineutriino vahel juhuslikult. Seetõttu moodustub beetaosakeste energiast pidev spekter, mis ulatub nullist kuni lagunemisel vabanenud energiani.[3] Maksimaalne lagunemisenergia varieerub üle kahe suurusjärgu: alates 18,6 keV-st trüitiumi (${}^3_1\text{H}$) lagunemisel kuni 1710 keV-ni fosfor-32 (${}^{32}_{15}\text{P}$) lagunemisel. Lisaks n-ö tavalistele elektronidele ehk beeta-miinus-kiirgusele esineb tuumasid, mis kiirgavad positrone ehk beeta-pluss-kiirgust. Selle üldvõrrand on järgmine:



kus X ja Y on vastavalt ema- ja tütar nukliid, β^+ on positron ja ν on neutriino. Omadustelt on beeta-pluss-kiirgus sarnane beeta-miinus-kiirgusega.[4]

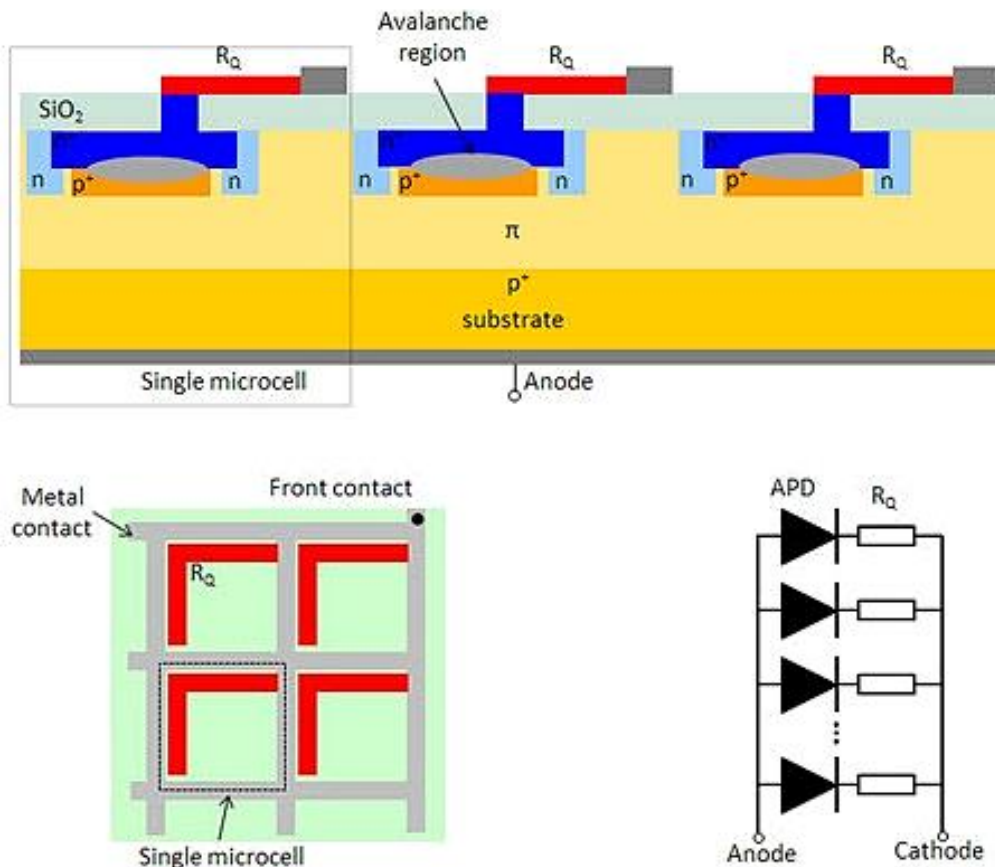
Ioniseeriv elektromagnetkiirgus sisaldab nii gamma- kui ka röntgenkiirgust. Röntgenkiirgust kiiratakse, kui ergastatud aatomid relakseeruvad. Gammafootoneid kiiratakse, kui relakseeruvad ergastatud tuumad, mis omakorda on tavaliselt tekkinud teiste tuumalagunemisprotsesside, nt alfa- või beetalagunemise tagajärjel.[3] Selles töös pakub huvi ka gammakiirgus, sest see segab madala energiaga beetakiirguse tuvastamist [1].

1.2 Stsintillatsioonmaterjalid

Stsintillatsioon on nähtus, kus välise energia, näiteks radioaktiivsel lagunemisel tekkinud kiirguse mõjul aine kiirgab valgust. Kui kiirgus langeb ainele, siis see annab vastasmõjul energia üle ainele, mis selle tulemusena ergastub. Energia ülekanne toimub soojuse,

ionisatsiooni ja ergastamise kaudu. Ergastunud aine relakseerub kiiresti, kiirates footoni energiaga, mis on võrdne ergastatud ja põhioleku energiatega. Kiirgunud valguse intensiivsus on proportsionaalne pealelangenu kiirguse energiaga. Stsintillatsiooni parameetreid mõjutavad pealelangenu kiirguse liik ja kasutatav stsintillaatormaterjal. Beeta-kiirguse energia neeldub aine molekulides, kui kiirgus nendega pörkub.[1]

Plaststsintillaatoritel on mitmeid eeliseid anorgaaniliste stsintillaatorite ees: lühike surnud aeg, suhteliselt odav hind, vormitavus eri suurustele ja kujudele. Keskkonnaseires eelistatakse õhukesest kilest plaststsintillaatoreid (ingl k „*thin-film plastic scintillator*“), sest need on tundlikud juba väikeste aktiivsuste juures.[5] Plaststsintillaatorite puudused võrreldes anorgaaniliste stsintillaatoritega on vähem stabiilne struktuur ning halvem lineaarsus pealelangeva kiirguse ja väljakiirratava valguse hulga vahel [1].



Joonis 1. SiPM-i skemaatiline struktuur. Üleval on ristlõige SiPM-st. All vasakul on näidatud fotodiodide asetus SiPM-l. All paremal on ekvivalentne elektriskeem. Üks fotodiod (*APD*) koos takistiga (*R_Q*) moodustab ühe raku („*Single microcell*“, kastiga ümbritsetud). Joonised on pärit Hamamatsu veebilehelt.[7]

1.3 Ráni-fotokordisti tööpõhimõte

Ráni-fotokordisti (ingl k „*silicon photomultiplier*“ ehk SiPM) koosneb suurest hulgast üksikfooton-laviindiodidest (ingl k „*single photon avalanche diode*“) (joonisel 1 „*APD*“). Kui diodi vaegalale (joonisel 1 „*Avalanche region*“) langeb footon, läheb ränis sisalduv elektron valentstsoonist juhtivustsooni, tekitades elektron-auk paari. Diodi pn-siire on vastu pingestatud nii, et vaegalas on tugev elektriväli. See kiirendab juhtivustsooni viidud elektroni nii palju, et elektroni kineetilise energiast piisab järgmiste räniaatomite ioniseerimiseks. Järjestikuste ionisatsioonide tulemus on elektronide laviin, mis hõlmab kogu diodi ja tekitab mõõdetava elektrivoolu. Kokkuvõttes võimendatakse voolu umbes 10^6 korda. Selleks, et see vool kestaks lühikest aega, on diodiga jadamisi ühendatud takisti (joonisel 1 R_Q), mis vähendab pinget, kuni laviin lõpeb.[6]

Ühe laviindiodi signaal on iga footoni või footonite hulga korral võimendatud maksimumini, mistõttu sellest ei saa infot valguse intensiivsuse kohta. Selleks, et signaal oleks proportsionaalne valguse intensiivsusega, ühendatakse SiPM-s rööbiti sadu kuni tuhandeid laviindioode (vt joonist 1). Kuna iga diod annab signaali sõltumatult ülejäänutest, siis nende suur hulk praktiliselt tagab proportsionaalsuse pealelangeva valgushulga ja väljundamplituudi vahel.[6]

Lisaks SiPM-tüüpi detektoritele kasutatakse laialdaselt ka fotokordisti torusid (ingl k „*photomultiplier tube*“) ja tahkeid fotodioode. Fotokordisti torude eelised on ülimaldalt mürafoon ja see, et iga fotoelektron võimendatakse ligikaudu miljon korda. See võimaldab mõõta ka üksikuid footoneid. Tahkete fotodioodide eelised on suur kvantsaagis, kompaktsus ja vastupidavus. SiPM-d ühendavad mõlema head omadused, võimaldades mõõta fotoelektronide spektri.[6]

1.4 Madala energiaga beetakiirguse tuvastamine

Erinevalt gammakiirgusest on madala energiaga beetakiirguse mõõtmine ja analüüs keeruline, sest see ei läbi pakse ainekihte, spektraallahutus on kehv ja spektrit on raske mürast eristada. Nende raskuste ületamiseks kasutatakse beetakiirguse mõõtmiseks põhiliselt vedelikstintillatsioon-detektoreid. Teisalt nõuab see meetod proovide võtmist, töötlust ja suurte seadmetega analüüsimist, mis teeb meetodi aeglaseks ja takistab kohapeal kasutamist.[1]

Kiire kohapeal kasutatav detektor leiaks kasutust näiteks dekomissioneeritud Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidlas betoonkonstruktsiooni jääksaaste tuvastamiseks. Hoidla oli kasutusel aastatel 1963-1995 Eestis tekkivate radioaktiivsete jäätmete matmispaigana. Kuna

Tammiku hoidla ei vasta tänapäevastele ohutusnõuetele, siis seal hoitud jäätmed on praeguseks viidud Paldiski radioaktiivsete jäätmete käitluskeskusse. Betoonist mahutid, mida kasutati Tammikul radioaktiivsete jäätmete hoidmiseks, võisid ise jäätmetelt lähtuva kiirguse tõttu saastuda. Sellepärast on vaja kindlaks teha, millised betooni osad on radioaktiivselt saastunud. See võimaldab vastu võtta otsuse, kuidas jäätmeid käidelda: kas tegemist on radioaktiivse jäätmega või võib betooni piiranguteta ümbertöötlemisse saata.[2]

Kiirgusallikate kohapeal mõõtmise võimaldamise poole on viimastel aastatel tehtud edusamme. Näiteks Myong-Ji Ülikoolis ehitati $\text{CaF}_2\text{:Eu}$ detektor, mis tuvastas strontsium-90 allika, kuigi detektori läbimõõt oli vaid 50,8 mm. Prantsusmaa Tuumaenergia Komisjonis töötati välja beetakiirgust tuvastav ekraan, mis on taaskasutatav, lihtne ja väike, mistõttu sobib kohapeal kasutamiseks. Edaspidi loodetakse ka nanomaterjalid stsintillatsioonidetektorites kasutusele võtta.[1]

Kui lisaks beetakiirgusele esineb mõõtmiskohas madala energiaga gammakiirgust, on vaja sobiva paksusega stsintillaatorit. See peab olema piisavalt paks, et enamus beetakiirgusest selles neelduks, aga samas piisavalt õhuke, et võimalikult vähe gammakiirgust selles neelduks. 2012. aastal K. Pourtangestani ja R. Machrafi mõõtsid CANBERRA Argos-TPS monitori omadusi, et saada simulatsiooniks lähteandmed.[8] Monte Carlo simulatsioon viidi läbi erinevate stsintillaatori paksuste juures 150 mikromeetrist 600 mikromeetrini. Kasutatud süsinik-14 allikas kiirgab beetaosakesi, mille teepikkus stsintillaatormaterjalis on 280 μm . Leiti, et optimaalne plaststsintillaatori paksus on 300 μm kuni 450 μm , mis ei erine oluliselt beetaosakeste teepikkusest. Gamma- ja beetakiirgusest tekkinud stsintillatsioonifootonite suhe oli 300 μm juures 3,2% ja 450 μm juures 3,6%. See tähendab, et stsintillaatoris neeldus enamus beetakiirgusest, aga suhteliselt väike osa gammakiirgusest.[8]

2 Meetodid

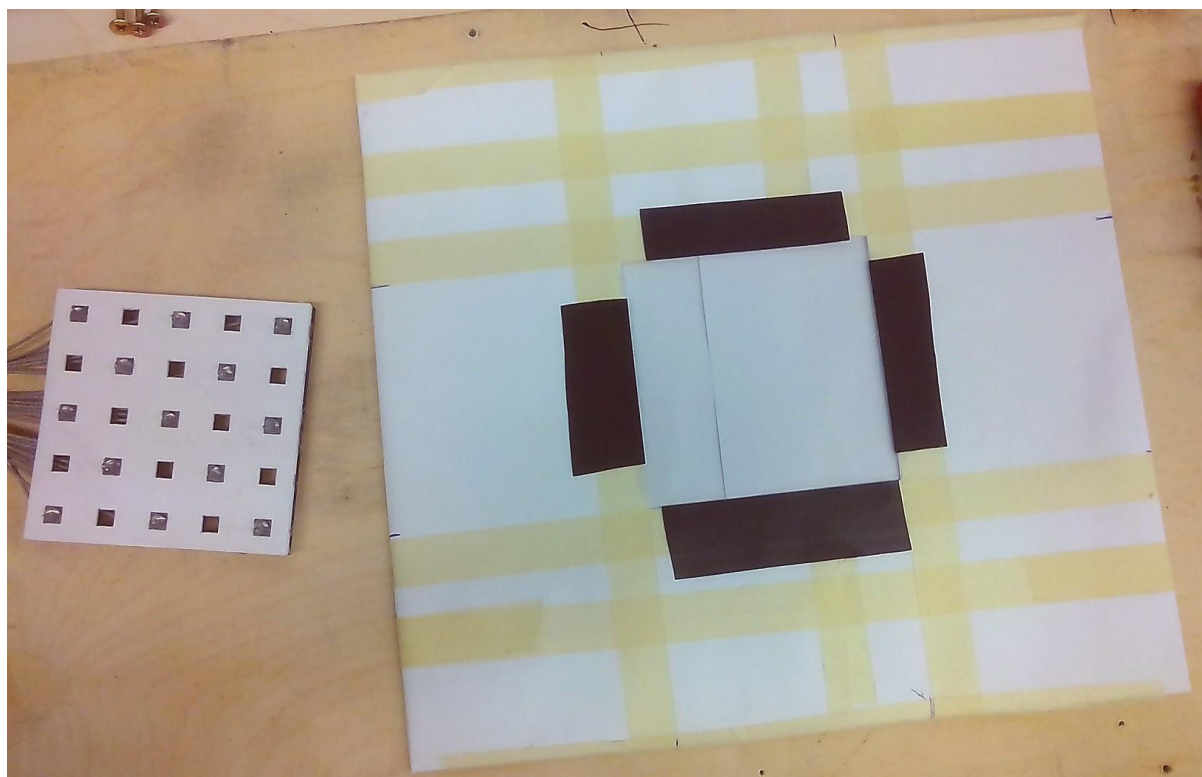
2.1 Eksperimentaalse osa ülesehitus

See alapeatükk annab lühiülevaate, milliseid katseid ja mis eesmärgil töö eksperimentaalses osas läbi viisin. Eksperimente kirjeldan detailsemalt järgnevates alapeatükkides.

Töö käigus ehitati kaks detektorit, mille põhiline erinevus on stsintillaatorplaadi paksus – 20 mm ja 1 mm. Eesmärk on võrrelda, kuidas see mõjutab detektori tundlikkust beeta-kiirgusele ja selle tuvastamist segavale taustkiirgusele.

Mõlema detektoriga tegin sarnased mõõtmised. Kõigepealt mõõtsin taustkiirgust, et SiPM-d kalibreerida ja et hinnata, kui palju see segab beeta-kiirguse tuvastamist. Edasi mõõtsin beeta-kiirgust, mida kiirgab strontsium-90 allikas erinevatel asukohtadel. Sellega katsetasin, kui hästi suudab detektor beeta-kiirguse allika positsioneerida. Süsinik-14 ja koobalt-60 allikate kiirgust mõõtsin selleks, et hinnata detektori tundlikkust erinevatele kiirgusliikidele.

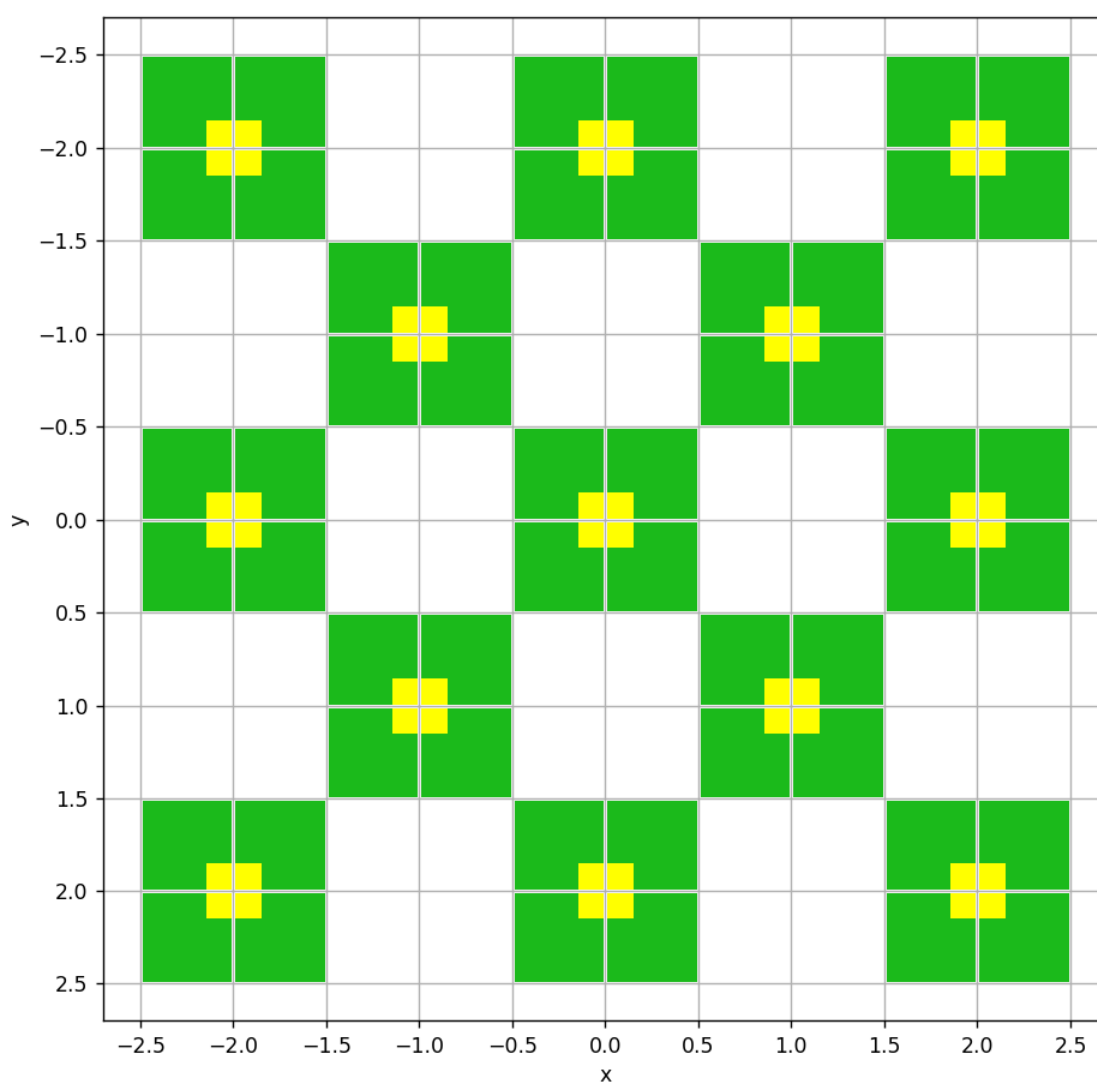
Detektor salvestab arvutisse andmed, kus on kirjas iga SiPM-i mõõdetud impulsside intensiivsused. Nende andmete järgi on vaja leida impulsi asukoht. Töös võrdlen kahte algoritmi, mis impulsi asukoha määravad.



Joonis 2. 1 mm stsintillaatorplaadiga detektor ehitusjärgus. Vasakul on maatriks SiPM-dega. Paremal on paberiga kaetud stsintillaatorplaat.

2.2 Detektori ehitus

Detektoris on kiirgustundlikuks osaks plaststintillaatorplaat. Plaatide tootja on Eljen Technology, mudel EJ-200. Kasutatud materjal kiirgab stintillatsioonil valgust lainepikkustel 400 kuni 500 nm, enim lainepikkusel 425 nm.[9] Esimesena ehitatud detektoris on stintillaatorplaat 20 mm paks. Selleks, et vähendada gammakiirguse segavat mõju beeta-kiirguse mõõtmisele, ehitati uus detektor, mille stintillaatorplaat on 1 mm paks (vt joonist 2). Kumbki plaat oli ruudukujuline, küljepikkusega 300 mm. Plaadi katsin valge paberiga, mis toimib hajutava peeglina. Samuti varjestab see alfakiirgust.



Joonis 3. SiPM-de asukohad maatriksis. Nullpunktiks on valitud detektori keskkoh, mis on ühtlasi keskmise SiPM-i keskkoh. Mõlemal teljel on ühikuks SiPM-i küljepikkus ehk 2 cm. Kollasega on näidatud SiPM-de detekteerivad osad. Rohelisega on näidatud SiPM-de elektroonika osad.

Detektoris kasutasin SiPM-e firmalt Hamamatsu, mudel S14160-6050HS. Need on tundlikud valgusele lainepikkustega 270 kuni 900 nm, maksimaalse tundlikkusega lainepikkusel 450 nm, kus detekteerimisefektiivsus on 50%. Kasutatud SiPM-de detekteerivad osad on ruudukujulised, küljepikkusega 6 mm.[10] SiPM-d liimisin maatriksisse, milles saab 25 SiPM-i paigutada 5 ritta ja 5 tulpa, sammuga 20 mm (vt joonist 2). Kuna parasjagu oli saadaval 13 SiPM-i, siis sümmeetria huvides paigutasin need malelauamuustrina (vt joonist 3). SiPM-de detekteerivad pinnad katsin optilise määrdega ja asetasin vastu stsintillaatorplaati (vt joonist 2).

Enamus detektori ülejäänud osadest koosnevad puidust. Need hoiavad detektori erinevaid osi koos ja kaitsevad neid. Selleks, et kiirgus jõuaks stsintillaatorplaadist segamatult SiPM-esse, on vaja neid kergelt teineteise vastu suruda. Esimesena ehitatud detektoris on surve tagamiseks teip, mis surub vahtplastist risttahukat vastu detektorit. Uues detektoris on surve tagamiseks kruvid, mis hoiavad puidust risttahukat vastu detektorit. Kõrvaline valgus tekitab mõõtmisel müra, mis varjab ära selle valguse, mis tekib stsintillatsioonil. Selle vältimiseks hoidsin mõõtmiste ajal detektorit musta riide all, mis neelab kõrvalise valguse (vt joonist 4).



Joonis 4 20 mm stsintillaatorplaadiga detektor kasutuses. Vasakul servas on arvuti, millesse andmed kogusin. Keskel on vajalikud elektroonikakomponendid ja juhtmed. Paremalt on musta riidega kaetud detektor.

SiPM-de välja antud signaal liigub juhtmete kaudu elektroonikakomponentideni (vt joonist 4). Signaali töötleb kasutusespetsiifiline integraallülitus (ingl k „*application-specific integrated circuit*“ ehk ASIC) firmalt WeeROC, mudel Petiroc 2A. See on kinnitatud trükiplaadile A55PET4, mis on omakorda kinnitatud emaplaadile DT5550W, mõlemad firmalt CAEN. Emaplaat tagab ülejäänud elektroonikakomponentidele vajaliku pinget, jahutuse ja USB-ühenduse arvutiga.[11]

Mõõtetulemused salvestatakse arvutisse CSV-formaadis. Käimasoleva mõõtmise tulemusi näeb CAEN tarkvara abil ka mõõtmise ajal arvuti ekraanilt. Sama tarkvara kaudu saab muuta süsteemi kui terviku ja eraldi iga SiPM-i mõõtmiseadeid.[11] Emaplaadilt kõigile SiPM-dele rakendatavaks pingeks valisin 42,08 V. Märgatavalt kõrgematel või madalamatel pingetel ei suutnud detektor kiirgusallikaid tuvastada. SiPM-delt tulevat signaali võimendatakse või vähendatakse ASIC-s enne andmete edastamist. See on vajalik erinevate SiPM-de signaalide ühtlustamiseks, kuna isegi sama mudeli detektorid ei anna identsetes tingimustes identse amplituudiga signaali. SiPM-de kalibreerimiseks mõõtsin taustkiirgust ja muutsin CAEN tarkvara kaudu võimendusastmeid, kuni tunnipikkusel taustkiirguse mõõtmisel andsid kõik SiPM-d signaali, mis erines keskmisest vähem kui 10%.

2.3 Kiirgusallikad

Detektori katsetamiseks mõõtsin nii taustkiirgust kui ka kiirgusallikaid (vt tabel 1). Enim kasutasin strontsium-90 allikat. Strontsium-90 beeta-lagunemisel tekkiva ütrium-90 poolestusaeg 2,6684(13) päeva on oluliselt lühem kui strontsium-90 poolestusaeg 28,80(7) aastat [12]. Seega allika kasutamise ajaks oli tekkinud sekulaarne tasakaal, kus strontsium-90 ja ütrium-90 aktiivsused on võrdsed. Selleks, et hinnata detektori tundlikkust madala energiaga beetakiirguse ning gammakiirguse suhtes, kasutasin vastavalt süsinik-14 ja koobalt-60 allikat.

Kõiki allikaid mõõtsin vahemikus 21.12.2021 – 04.03.2022 ehk kõik mõõtmised jäid 2,5 kuu piiresse. Kasutatud allikatest on koobalt-60-l lühim poolestusaeg – 5,2711(8) aastat [12]. Kuna mõõtmiste vahele jäänud aeg on poolestusaegadega võrreldes tühine, siis pole vaja arvestada allikate aktiivsuse vähenemist radioaktiivse lagunemise tõttu mõõtmiste vahel.

Nukliidi nimetus	Nukliidi sümbol	Poolestusaeg	Lagunemise viis	Lagunemisenergia (keV)	Tütarnukliid
Strontsium-90	⁹⁰ Sr	28,80(7) aastat	beeta	545,9	Ütrium-90
Ütrium-90	⁹⁰ Y	2,6684(13) päeva	beeta	2278,7	Tsirkoonium-90
Süsinik-14	¹⁴ C	5,70(3)*10 ³ aastat	beeta	156,476	Lämmastik-14
Koobalt-60	⁶⁰ Co	5,2711(8) aastat	beeta + gamma	1332,492 ja 1173,228	Nikkel-60

Tabel 1. Kasutatud kiirgusallikad. Beetalagunejate juures on toodud maksimaalne lagunemisenergia. Koobalt-60 juures on toodud gammafootonite energiad.[12]

2.4 Andmete analüüs

Detektor ühildub firma CAEN tarkvaraga. See salvestab mõõtmisandmed CSV-formaadis faili, kus on kirjas iga valgusimpulsi jaoks iga SiPM-i mõõdetud intensiivsus. Nende analüüsimiseks kirjutasin Python-keeles programmi, mida kasutasin internetikeskkonnas Jupyterhub. Arvestades intensiivsusi ja detektorite paigutust, arvutatakse iga impulsi jaoks selle asukoht. Mõõdetud impulsside asukohad moodustavad kahedimensioonilise (x, y) statistilise jaotuse. Allika asukoha hindamiseks leitakse eraldi x- ja y-koordinaadi jaotuse keskväärtus. Allika mõõtmete hindamiseks leitakse eraldi x- ja y-koordinaadi jaotuse standardhälve.

Impulsi asukoha määramiseks katsetasin kahte erinevat algoritmi. Üks nendest arvutab impulsi asukoha analoogselt massikeskmega:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i x_i}{E}; \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i y_i}{E}; E = \sum_{i=1}^N m_i \quad (3)$$

kus x_i, y_i on SiPM-i koordinaadid, m_i on SiPM-i mõõdetud intensiivsus, E on impulsi koguenergia ehk kõigi SiPM-de mõõdetud intensiivsuste summa ning \bar{x}, \bar{y} on impulsi koordinaadid.

Teine algoritm lähtub ideest, et kui muud mõjud kõrvale jätta, siis stsintillaatorplaadis tekkiv valgus käitub nagu punktvalgusallikas. Kuna punktallika valgus jaotub isotroopselt üle

sfääri, siis valguse intensiivsus väheneb pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga. Seetõttu algoritm sobitab signaali tugevusi funktsiooniga

$$I = \frac{A}{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (4)$$

kus A on sobitatav kordaja, I on iga SiPM-i mõõdetud intensiivsus ning $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ on sobitatava impulsi koordinaadi ja teadaoleva SiPM-i koordinaadi vahe:

$$\Delta x = x_{impulss} - x_{SiPM} ; \Delta y = y_{impulss} - y_{SiPM} ; \Delta z = z_{impulss} - z_{SiPM} \quad (5)$$

Lähendamiseks kasutatakse vähimruutude meetodit. Kui lähendamise tulemus näitab, et impulss pärineb väljastpoolt stsintillaatorplaati, mis pole füüsikaliselt realistlik, siis selle impulsi asukohta ei salvestata. Iga impulsi algjärgel on eelmise õnnestunud lähenduse tulemus.

3 Tulemused ja arutelu

3.1 Ehitatud detektorite võrdlus

Kahe ehitatud detektori peamine erinevus on stsintillaatorplaadi paksuses – 20 mm ja 1 mm. Õhema stsintillaatorplaadi kasutamise esmane eesmärk on vähendada gammakiirguse segavat mõju beetakiirguse mõõtmisele.

Kummagi detektoriga mõõtsin taustkiirgust nii kaua, et registreeritakse üle 100 000 impulsi. Eeldades, et tuvastatud impulsside arv järgib Poissoni jaotust, on üle 100 000 impulsi tuvastamisel mõõtemääramatuse statistiline komponent alla 0,32%. Järelikult see on piisav kogus, et täpselt hinnata, kui palju taustkiirgust registreeritakse. Esimese detektoriga mõõtsin 2 tundi, tuvastades 130 865 impulssi. Taustkiirguse loenduskiirus oli järelikult 18,2 impulssi sekundis. Teise detektoriga mõõtsin 24 tundi, tuvastades 154 546 impulssi. Taustkiirguse loenduskiirus oli järelikult 1,79 impulssi sekundis. Üleminek 20 mm paksult stsintillaatorplaadilt 1 mm paksule vähendas taustkiirguse loenduskiirust 10,2 korda. Arvestades, et detektoreid katsetasin siseruumides, oli enamus väliskeskonnast pärit alfa- ja beetakiirgust varjestatud hoonekonstruktsiooniga. Eelnevast võib järeldada, et põhiline osa taustkiirgusest, mille esimene detektor tuvastas, oli gammakiirgus.

Beetakiirguse detekteerimistundlikkust proovisin strontsium-90 allika abil. Selle asetasin kummagi detektori keskpunkti kohale. Esimese detektoriga mõõtsin 60 sekundit, tuvastades 44 119 impulssi. Loenduskiirus oli järelikult 735 impulssi sekundis. Taustkiirguse mahalahutamine annab beetakiirguse loenduskiiruseks 717 impulssi sekundis. Teise detektoriga mõõtsin 30 sekundit, tuvastades 63 937 impulssi. Loenduskiirus oli järelikult 2131 impulssi sekundis. Taustkiirguse mahalahutamine annab beetakiirguse loenduskiiruseks 2129 impulssi sekundis. Üleminek 20 mm paksult stsintillaatorplaadilt 1 mm paksule suurendas strontsium-90 allika loenduskiirust 2,97 korda. Kui võtta signaaliks beetakiirgus ja müräks taustkiirgus, siis signaal-müra suhe paranes 30,2 korda.

Madala energiaga beetakiirguse detekteerimistundlikkust proovisin süsinik-14 allika abil. Esimese detektoriga mõõtmisel tuvastasid kõik SiPM-d ligikaudu võrdsel määral kiirgust. Mõõtmise lõpetasin ajaga 2621 sekundit, tuvastades 52 007 impulssi. Loenduskiirus oli järelikult 19,8 impulssi sekundis, mis on praktiliselt võrdne taustkiirguse loenduskiirusega. Teise detektoriga mõõtsin 2 minutit, tuvastades 2065 impulssi. Loenduskiirus oli järelikult 17,2 impulssi sekundis. Taustkiirguse mahalahutamine annab beetakiirguse loenduskiiruseks 15,4 impulssi sekundis. Üleminek 20 mm paksult stsintillaatorplaadilt 1 mm paksule võimaldas tuvastada ka süsinik-14 allika.

Põhjus, miks esimese detektoriga ei õnnestunud tuvastada süsinik-14 allikat, on arvatavasti mitme teguri koosmõju. Esiteks on süsinik-14 kiiratud beetaosakestel madal energia. Sellepärast need neelduvad stsintillaatorplaadi suhteliselt õhukeses pinnakihis. Teiseks teguriks on detektori ehitus. Mõõdetava allika kiirgus tekitab ühe pinna lähedal stsintillatsioonvalgust, mis peab läbima kogu plaadi, et jõuda teisel pool asuvate SiPM-deni. Esimese detektori stsintillaatorplaat on 20 mm paks. Nii paksu kihti läbiv valgus neeldub oluliselt rohkem kui teise detektori 1 mm paksus plaadis. Lisaks vähendab kaugus efektiivsust sellepärast, et stsintillatsioonvalgus jaotub kõiki suundadesse laiali. Viimane põhjus on gammakiirguse segav mõju. Esimesel detektoril oli taustkiirguse loenduskiirus 10,2 korda suurem kui teisel.

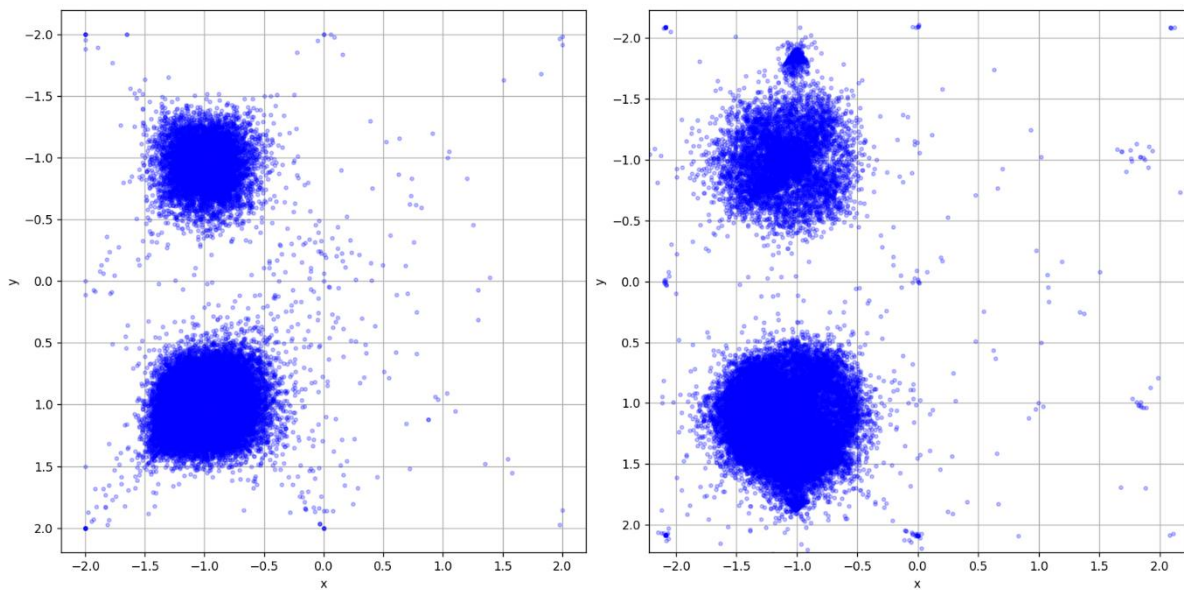
Gammakiirguse segavat mõju detektorile proovisin koobalt-60 allika abil. Selle asetasin kummagi detektori keskpunkti kohale. Esimese detektoriga mõõtsin 60 sekundit, tuvastades 60 056 impulssi. Loenduskiirus oli järelikult 1001 impulssi sekundis. Taustkiirguse maha-lahutamine annab gammakiirguse loenduskiiruseks 983 impulssi sekundis. Teise detektoriga mõõtsin 60 sekundit, tuvastades 13 772 impulssi. Loenduskiirus oli järelikult 230 impulssi sekundis. Taustkiirguse mahalahutamine annab gammakiirguse loenduskiiruseks 228 impulssi sekundis. Üleminek 20 mm paksult stsintillaatorplaadilt 1 mm paksule vähendas gamma-kiirguse loenduskiirust 4,3 korda.

3.2 Impulsside asukohtade kujutamine

Mõõteandmete analüüsist saab teada iga impulsi hinnangulise asukoha. Nende kujutamiseks täiendasin Python-keeles programmi nii, et see väljastab joonised. Üks variant, kuidas impulsse kujutada, on xy-tasandile märkida iga impulss ühe punktina (vt joonist 5).

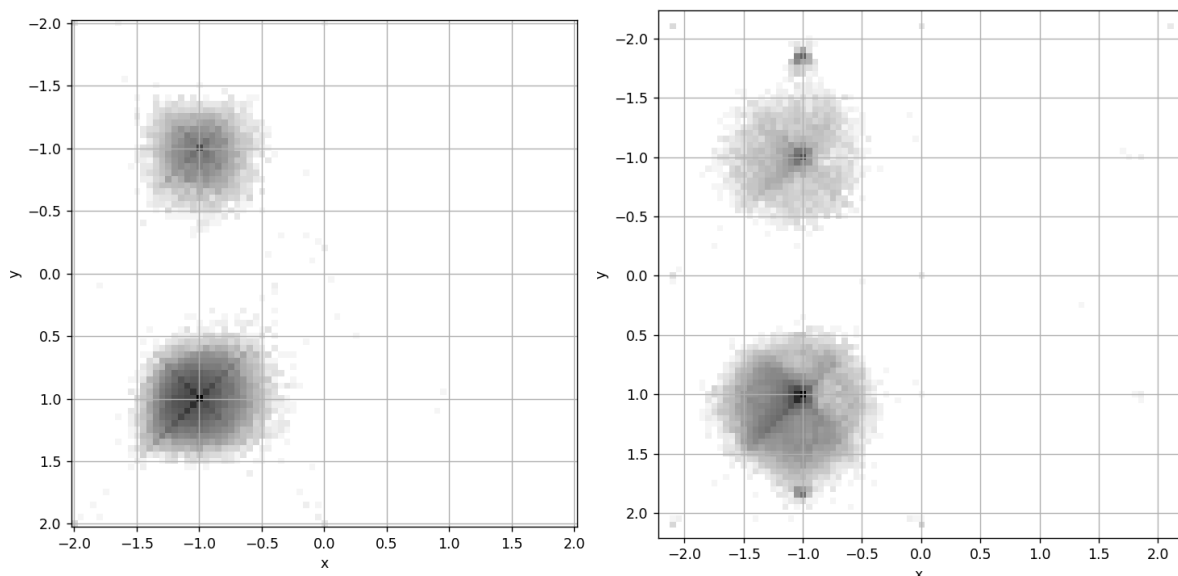
Joonistel on nullpunktiks valitud detektori keskkoh, mis on ühtlasi keskmise SiPM-i keskkoh. Mõlemal teljel on ühikuks SiPM-i küljepikkus ehk 2 cm. Seega on iga SiPM-i keskpunkt täisarvuliste koordinaatide juures. SiPM-de asukohad samal teljestikul on kujutatud eespool (vt joonist 3).

Selles alapeatükis on kõigil joonistel näitena kujutatud sama mõõtmise tulemused. Siin on mõõtmiseks kasutatud esimest detektorit, mille stsintillaatorplaat on 20 mm paks. Detektori peal oli kaks strontsium-90 allikat, kumbki ühe SiPM-i kohal. Sel mõõtmistel oli kahe allika vahekaugus 4 cm. Võrdluseks on kujutatud nii analoogselt massikeskmega (valem 3) kui ka pöördruutsõltuvuse lähendamisel (valemid 4 ja 5) leitud impulsside jaotusi.



Joonis 5. Iga impulsi asukoht kujutatud ühe punktina. Vasakul asukohad leitud analoogselt massikeskmega (valem 3), paremal pöördruutsõltuvusega lähendamisel (valemid 4 ja 5).

Iga impulsi kujutamisel punktina tekib mitu probleemi. Kuigi allika asukoht on ligikaudselt näha, on sellise joonise põhjal raske asukohta täpselt määrata. Impulsside tihedusi saab võrrelda vaid seal, kus neid on hõredalt. Nende probleemide põhjuseks on see, et impulsse



Joonis 6. Kahemõõtmeline histogramm impulssidest. Mida tumedam ruut, seda rohkem impulsse. Vasakul asukohad leitud analoogselt massikeskmega (valem 3), paremal pöördruutsõltuvusega lähendamisel (valemid 4 ja 5). Värviskaalad on logaritmilised ja suhtelised.

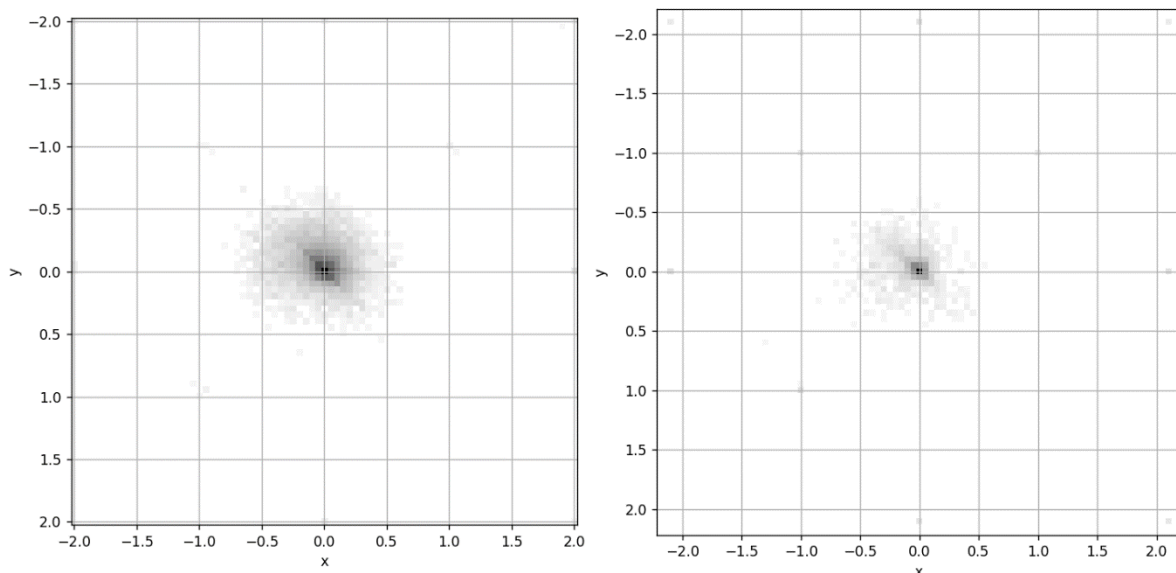
tähistavad punktid kattuvad. Selle vältimiseks saab kujutada impulsse kahedimensioonilisel histogrammil, kus iga ruut on värvitud vastvalt sellele, mitu impulssi seal on.

Nii saadud histogrammid näitavad selgelt allikate täpseid asukohti. Impulsside tihedused on otseselt võrreldavad. Samas on jooniseid raske lugeda, kuna nõrgemad allikad ei paista välja ja igast allikast on selgelt näha vaid see ruut, kus impulsse on kõige rohkem. Loetavuse parandamiseks asendasin lineaarse skaala logaritmilise skaalaga (vt joonist 6).

3.3 Impulsi asukoha määramise algoritmide võrdlus

Impulsside asukohtade määramiseks katsetasin kahte algoritmi. Esimene arvutab impulsi asukoha analoogselt massikeskmega (valem 3). Teine lähendab SiPM-de mõõdetud intensiivsusi kauguse pöördruutsõltuvusega (valemid 4 ja 5). Edaspidi analüüsitud mõõtmised tegin teise detektoriga, mille stintillaatorplaat on 1 mm paks.

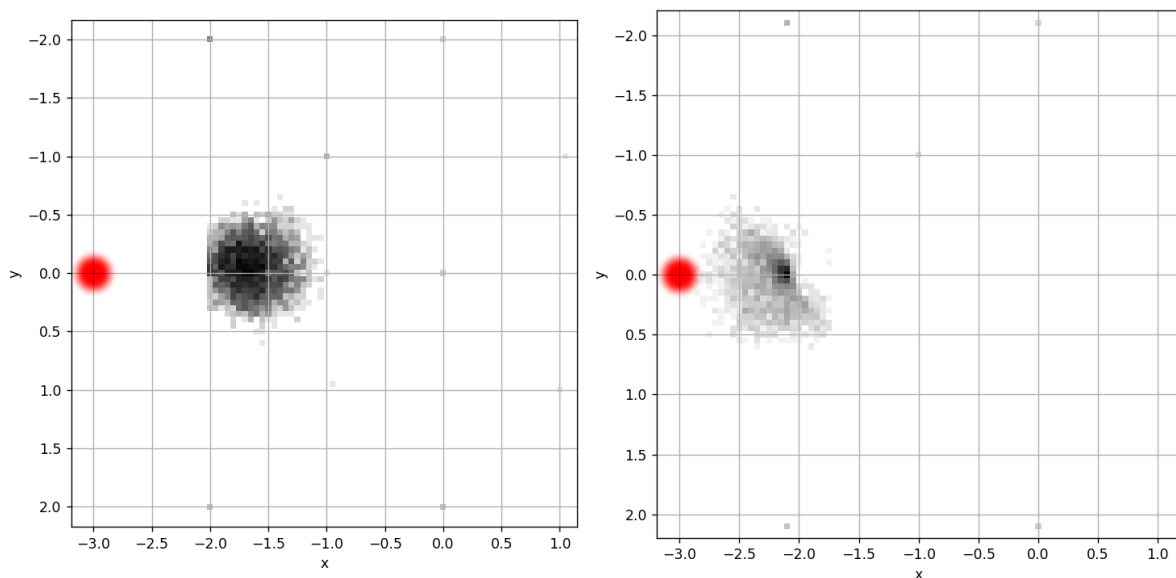
Asukoha määramise täpsuseks analüüsin mõõtmist, kus strontsium-90 allikas oli keskmise SiPM-i kohal ehk koordinaatidel (0 mm; 0 mm) (vt joonist 7). Analoogselt massikeskmega arvatud impulsside asukohad moodustavad statistilise jaotuse keskpunktiga (-0,17 mm; -0,24 mm). Impulsside x- ja y-koordinaatide standardhälve on vastavalt 2,0 mm ja 1,8 mm. Pöördruutsõltuvusega lähendamisel leitud impulsside asukohad moodustavad statistilise jaotuse keskpunktiga (-0,09 mm; -0,07 mm). Impulsside x- ja y-koordinaatide



Joonis 7. Strontsium-90 allika keskmise SiPM-i kohal mõõtmise tulemused. Vasakul asukohad leitud analoogselt massikeskmega (valem 3), paremal pöördruutsõltuvusega lähendamisel (valemid 4 ja 5). Värviskaalad on logaritmilised ja suhtelised.

standardhälve on vastavalt 2,4 mm ja 2,0 mm. Mõlema algoritmiga leitud keskväärtused jäävad nullpunktist eemale vähem kui 0,3 mm võrra. Arvestades, et allika paigutasin silma järgi ja käsitsi, on paigutamise määramatus oluliselt suurem. Seega võib lugeda mõlema algoritmi leitud keskväärtused täpseteks. Kõik leitud standardhälbed jäävad vahemikku 1,8...2,4 mm, nii et algoritmide täpsused ei erine oluliselt.

Sarnaselt eelmise lõiguga analüüsin mõõtmist, kus strontsium-90 allikas oli detektori äärmisest SiPM-st 20 mm eemal ehk koordinaatidel (-60 mm; 0 mm) (vt joonist 8). Analoogselt massikeskmega arvatud impulsside asukohad moodustavad statistilise jaotuse keskpunktiga (-32,0 mm; -1,0 mm). Impulsside x- ja y-koordinaatide standardhälve on vastavalt 6,8 mm ja 5,9 mm. Pöördruutsõltuvusega lähendamisel leitud impulsside asukohad moodustavad statistilise jaotuse keskpunktiga (-43,6 mm; 0,4 mm). Impulsside x- ja y-koordinaatide standardhälve on vastavalt 9,2 mm ja 8,0 mm. Allika x-koordinaadi hindamisel teeb esimene algoritm vea 28,0 mm ja teine 16,4 mm. Erinevus on 1,7-kordne. y-koordinaadi hindamisel tehtav viga pole võrreldes x-koordinaadi veaga oluline. Massikeskmega analoogselt impulsi asukoha leidmisel on võimalik saada tulemus ainult piirkonnas, mis jääb mõõtekohtade vahele. Kauguse pöördruutsõltuvusega lähendamisel sellist piirangut ei ole. See seletab, miks teine algoritm teeb väiksema vea. Samas mõõtmise tulemus näitab, et ka selle algoritmiga kasvab allika asukoha määramatus oluliselt, kui see on mõõtekohtadest kaugel külgsuunas.



Joonis 8. Strontsium-90 allika SiPM-dest eemal (märgitud punase täpiga) mõõtmise tulemused. Vasakul asukohad leitud analoogselt massikeskmega (valem 3), paremal pöördruutsõltuvusega lähendamisel (valemid 4 ja 5). Värviskaalad on logaritmilised ja suhtelised.

Kui impulsi asukoht arvutada analoogselt massikeskmega, tuleb eraldi x- ja y-koordinaadi jaoks teha üks arvutus. Kui kasutada lähendamist kauguse pöördruutsõltuvusega, tuleb korraga x- ja y-koordinaadi jaoks teha nii palju arvutusi, kuni lähendus jõuab tulemuseni. See võib nõuda tuhandeid arvutusi ühe impulsi asukoha määramiseks. Sellepärast on teine algoritm esimesest oluliselt arvutusmahukam. Võrdluseks kasutan joonisel 7 kujutatud tulemuste arvutust. Mõõtsin 30 sekundit, tuvastades 63 937 impulssi. Kui arvuti leidis impulsside asukohti analoogselt massikeskmega, kulus selleks 0,0117 sekundit, kogu koodiks kokku 0,91 sekundit. Kui arvuti leidis impulsside asukohti kauguse pöördruutsõltuvusega lähendamisel, kulus selleks 156,6 sekundit, kogu koodiks kokku 157,4 sekundit. Ülejäänud koodi käimiseks kulus mõlemal juhul umbes 0,9 sekundit, aga impulsside asukohtade arvutamiseks kulus teisel algoritmil umbes 13 400 korda kauem. Sealjuures kulus andmete analüüsiks 5,2 korda kauem kui mõõtmiseks. Seega, kui asukoha määramisel väiksema vea tegemine pole kriitilise tähtsusega, on mõttekas kasutada esimest algoritmi, mis arvutab impulsi asukohad analoogselt massikeskmega.

Kokkuvõte

Töö käigus ehitati kaks detektorit, mille põhiline erinevus on stsintillaatorplaadi paksus – 20 mm ja 1 mm. Kumbki plaat oli ruudukujuline, küljepikkusega 300 mm. Mõlemas detektoris kasutasin sama maatriksit koos 13 SiPM-ga, mille paigutasin malelauamustri järgi.

Mõlemad detektori ehitusse kuuluvad veel puidust konstruktsioon osade koos hoidmiseks, must riie kõrvalise valguse vältimiseks, juhtmed ja muud elektroonika-komponendid. Tulemused salvestatakse faili, kus on kirjas iga valgusimpulsi jaoks iga SiPM-i mõõdetud intensiivsus.

Beetakiirguse detekteerimistundlikkust proovisin strontsium-90 allika abil. Üleminek 20 mm paksult stsintillaatorplaadilt 1 mm paksule vähendas taustkiirguse loenduskiirust 10,2 korda ja suurendas strontsium-90 allika loenduskiirust 2,97 korda. Kokkuvõttes signaal-müra suhe paranes 30,2 korda. Madala energiaga beetakiirguse detekteerimistundlikkust proovisin süsinik-14 allika abil. Esimene detektor ei suutnud allikat tuvastada. Teine detektor mõõtis beetakiirguse loenduskiiruseks 15,4 impulssi sekundis.

Gammakiirguse segavat mõju mõõtsin koobalt-60 allika abil. Üleminek 20 mm paksult stsintillaatorplaadilt 1 mm paksule vähendas gammakiirguse loenduskiirust 4,3 korda. Kokkuvõttes on 1 mm paksul stsintillaatorplaadil järgmised eelised: suurem tundlikkus beetakiirguse, suutlikkus tuvastada ka madala energiaga beetakiirgust, väiksem tundlikkus gammakiirgusele ja muule taustkiirgusele. Seetõttu tuleks edasisel arendusel lähtuda stsintillaatorplaadi paksusest 1 mm.

Impulsi asukoha määramiseks katsetasin kahte erinevat algoritmi. Esimene arvutab impulsi asukoha analoogselt massikeskmega. Teine lähendab SiPM-de mõõdetud intensiivsusi kauguse pöördruutsõltuvusega.

Mõõdetud impulsside asukohad moodustavad kahedimensioonilise (x, y) statistilise jaotuse. Nende kujutamiseks osutus parimaks variandiks kahemõõtmeline histogramm, mille skaala on logaritmiline. Selle eelis teiste variantide ees on asjaolu, et selgelt on nähtavad nii tugevamad kui ka nõrgemad allikad. Sealjuures kõigil allikatel on selgelt nähtav nii täpne asukoht kui ka kiirguse jaotus allika ümber.

Allika asukoha ja mõõtmete hindamiseks leitakse eraldi x- ja y-koordinaadi jaotuse keskväärtus ja standardhälve. Kui strontsium-90 allikas oli keskmise SiPM-i kohal, andsid mõlemad impulsi asukoha määramise algoritmid sarnased tulemused. Mõlemad algoritmid määrasid täpselt allika asukoha. Kõik leitud standardhälbed jäävad vahemikku 1,8...2,4 mm.

Kui strontsium-90 allikas oli detektori äärmisest SiPM-st 20 mm eemal, siis analoogselt massikeskmega arvutamisel ja pöördruutsõltuvusega lähendamisel oli x-telje sihiline viga vastavalt 28,0 mm ja 16,4 mm. Seega mõlema algoritmiga kasvab allika asukoha määramatus oluliselt, kui see paikneb mõõtekohtadest kaugel külgsuunas.

Samade impulsside asukohtade määramiseks kulus massikeskmega analoogselt arvutades 0,0117 sekundit. Pöördruutsõltuvusega lähendades kulus selleks 156,6 sekundit ehk 13 400 korda kauem. Seega, kui asukoha määramisel väiksema vea tegemine pole kriitilise tähtsusega, on mõttekas arvutada impulsi asukohad analoogselt massikeskmega.

Tänuavaldused

Töö autor tänab juhendajaid Siiri Saluperet ja Madis Kiiska mitmekülgse juhendamise eest töö kõigis etappides ning Vitali Paštšuki abi eest detektorite ehitamisel.

Kirjanduse loetelu

- [1] H. Kang, S. Min, B. Seo, C. Roh, S. Hong, ja J. H. Cheong, „Low Energy Beta Emitter Measurement: A Review“, *Chemosensors*, kd 8, nr 4, 2020.
- [2] „Hallatavad objektid“. AS A.L.A.R.A. Vaadatud 22.05.2022. <https://alara.ee/hallatavad-objektid/>.
- [3] G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (John Wiley and Sons Inc., New York, 2000).
- [4] M. L'Annunziata, *Handbook of Radioactivity Analysis*, 2. trükk (Academic Press, 2003).
- [5] K. Rajakrishna, A. Dhanasekaran, N. Yuvaraj, K. C. Ajoy, B. Venkatraman, ja M. T. Jose, „Effect of high Z materials loading in the performance of polystyrene-based thin-film plastic scintillators“, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, kd 1008, lk 165454, 2021.
- [6] „Introduction to SiPM. Technical note“. SensL, 2011. <https://www.sensl.com/downloads/ds/TN%20-%20Intro%20to%20SPM%20Tech.pdf>.
- [7] S. Piatek, „What is an SiPM and how does it work?“ Hamamatsu, 2016. <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html>.
- [8] K. Pourtangestani ja R. Machrafi, „Optimization of plastic scintillator thicknesses for online beta/gamma detection“, *EPJ Web Conf.*, kd 24, lk 07010-, apr 2012.
- [9] „General purpose EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212“. Eljen Technology. Vaadatud 09.05.2022. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>.
- [10] „Low breakdown voltage type MPPC for scintillation detector“. Hamamatsu, 2020. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14160_s14161_series_kapd1064e.pdf.
- [11] „DT5550W User Manual Rev. 1“. CAEN, 2019.
- [12] „Nucléide - Lara“. Laboratoire National Henri Becquerel. Vaadatud 25.03.2022. <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>.

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Sullo Saan,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) minu loodud teose

Madala energiaga beetakiirguse stsintillatsioonidetektori arendamine,

mille juhendajad on Siiri Salupere, PhD, ja Madis Kiisk, PhD,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Sullo Saan

27.05.2022