

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika Instituut

Rain Eichhorn

Plastikupõhise stsintillatsioonidetektori mõõtmisefektiivsuse  
võrdlemine erinevate stsintillatsioonplaadi katete ja optiliste  
määrdeainete puhul

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Füüsika eriala

Juhendajad:

Madis Kiisk, PhD

Mats Mikkor, MSc

Tartu 2023

## Plastikupõhise stsintillatsioonidetektori mõõtmiseefektiivsuse võrdlemine erinevate stsintillatsioonplaadi katete ja optiliste määrdeainete puhul

Töö esmaseks eesmärgiks oli eksperimentaalselt võrrelda kolme erineva peegeldava katte ja kolme erineva optilise määrdeaine mõju räni-fotokordisti stsintillatsioonil tekkinud valguse tuvastamise efektiivsusele. Detektoriga mõõdeti kõikide määrdeainete ja katete kombinatsioonide korral taustakiirgust ja beetakiirgust kahel erineval kaugusel.

Töö teiseks eesmärgiks oli määrata parim kate ja määrdeaine. Eksperimentaalselt osutus parimaks katteks DF2000MA. Paber- ja alumiiniumfooliumkattega mõõtmistulemused oluliselt ei erine. Määrdeained mõjutasid detektori mõõtmistulemusi palju vähem kui katted. Tulemuste alusel ei saa järeldada kumb on parem optiline määrdeaine, kas laservedelik 1057B või määrdeaine EJ-550.

Märksõnad: müüontomograafia, stsintillatsioonidetektor, räni-fotokordisti, optiline määrdeaine, peegeldav kate

CERCS: P211- Kõrgenergeetiliste vastasmõjude uuringud, kosmiline kiirgus

## Comparison of measurement efficiency of a plastic-based scintillation detector with different scintillation plate coatings and optical lubricants

The first objective of this thesis was to experimentally compare how three different reflective coatings and three different optical lubricants affect a silicon photomultiplier's detection efficiency of scintillation light. The detector measured background radiation and beta radiation at two different distances for all combinations of lubricants and coatings.

The second objective was to determine the best coating and optical lubricant. Experimentally, DF2000MA proved to be the best reflective coating. The measurement results with paper and aluminum foil cover do not differ much. Lubricants affected the detector measurement results a lot less than coatings. Based on the results, it is not possible to conclude which optical lubricant is better, either laser fluid 1057B or lubricant EJ-550.

Keywords: muon tomography, scintillation detector, silicon photomultiplier, optical lubricant, reflective coating

CERCS: P211 - High energy interactions, cosmic rays

## Sisukord

Sissejuhatus .....	4
1. Teoreetiline taust .....	5
1.1 Kosmiline kiirgus ja müüonid .....	5
1.2 Räni-fotokordisti tööpõhimõte .....	5
1.3 Stsintillatsioon ja plastikupõhised stsintillaatorid .....	6
2. Eksperimentaalne katse .....	9
2.1 Katse kirjeldus .....	9
2.2 Katsevahendi ehitus .....	10
2.2.1 Stintillatsioonplaadid .....	10
2.2.2 SiPM-maatriks .....	11
2.2.3 Elektroonikakomponendid .....	12
2.2.4 Arvuti ja tarkvara .....	12
2.3 Stsintillatsioonplaadi katted ja optilised määrdeained .....	13
3. Andmeanalüüs .....	15
3.1 Stsintillatsioonplaadi katete võrdlus .....	15
3.2 Optiliste määrdeainete võrdlus .....	19
Kokkuvõte .....	22
Tänuavaldused .....	24
Kasutatud kirjandus .....	25
Lisad .....	27
Lisa 1 Advatech UK plastikupõhise stsintillaator materjali ATP-50515 andmed .....	27
Lisa 2 Laservedeliku 1057B andmeleht .....	27
Lisa 3 SiPM number 1 mõõtmisetulemused beetakiirgus allika puhul .....	28
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks .....	29

## Sissejuhatus

SilentBorder on Euroopa Liidu poolt rahastatud projekt, millel on peamiselt kaks eesmärki. Esiteks, luua uus alternatiivne meetod kaubakonteinerite läbivalgustamiseks, kasutades selleks kosmilist kiirgust, täpsemini atmosfäärseid müüoneid. Teiseks, võrrelda müüontomograafilist meetodit kasulikkuse aspektis tavaliste röntgenkiirgusel põhinevate meetoditega.

Kuna tegemist on müüonitel põhineva tomograafiaga ei teki oht, et kaup saab läbivalgustamise käigus kiirguse tõttu kahjustada. Samuti ei ole aparadi kasutamisel takistuseks kiirguskaitse eeskirjad. Uus detektor on võimeline vähendama riske ja inimliku vea võimalust turvakontrollis ning annab kaubast ruumilise kujutise ja määrab selle kauba materjali koostise.[1]

Müüonitel põhinev tomograafia ehk müüontomograafia põhineb müüonite Coulomb'i mitmik-hajumisnähtustel aatomituumadelt [2]. Coulomb'i hajumist kasutaval detektoril on peamiselt kaks olulist komponenti: plastikupõhine stsintillaator, mis kiirgab detektoritele nähtavat stsintillatsioonvalgust, kui seda läbib ioniseeriv kiirgus (nagu näiteks müüon), ja fotokordisti, mis mõõdab stsintillatsioonvalgust. Et saada head tomograafilist kujutist on eelkõige vaja, et detektor saaks võimalikult palju ioniseerivat kiirgust mõõta. Lühidalt – on vaja tõsta osakeste detektori stsintillatsioonvalguse mõõtmiseefektiivsust.

Parema efektiivsuse saavutamiseks saab parandada detektori ja stsintillatsioonplaadi vahelist kontakti, kasutades selleks näiteks optilisi määrdeained. Need kaitsevad detektorit, täidavad plaadi pinnal mikropraod ning annavad võrreldes õhuga parema optilise läbilaskvuse. Teine viis, kuidas efektiivsust tõsta, on katta stsintillaator peegeldava kattega, mis suurendab ioniseeriva kiirguse poolt tekitatud stsintillatsioonvalguse peegeldumist detektorisse.

Selle töö eesmärgiks on eksperimentaalselt võrrelda kolme erineva peegeldava katte ja kolme erineva optilise määrdeaine mõju räni-fotokordisti stsintillatsioonvalguse tuvastamise efektiivsusele. Töö teiseks eesmärgiks on eksperimendi tulemuste põhjal otsustada, milline uuritud määrdeainetest ja katetest on parim kasutamiseks müüontomograafia plaatdetektorites.

Töö käigus valmistati kolm erineva kattega stsintillatsioonplaati. Seejärel võrreldi kolme erineva katte ja kolme erineva optilise määrdeaine kombinatsioonide puhul, kui efektiivselt detektor suudab stsintillatsioonvalgust tuvastada. Selleks kasutati varasemalt valmistatud stsintillatsioonplaat detektorit.

# 1. Teoreetiline taust

## 1.1 Kosmiline kiirgus ja müüonid

Kosmiline kiirgus on kõrge energiaga osakeste voog (~90% vesiniku prootonid, ~9% alfaosakesed ja ülejäänud on raskemate elementide nukliidid), mille potentsiaalsed kiirgustekitajad on näiteks supernoovad ja kvasarid. Avakosmosest Maani levivate osakeste voogu nimetatakse primaarkiirguseks. Need samad osakesed põrkuvad atmosfääris olevate osakestega (peamiselt hapniku ja lämmastiku nukliididega) ja tekitavad uute osakeste kaskaadi ehk sekundaarkiirguse. Põrgete tulemusena tekib suurel hulgal piione ja kaaone, mille üheks peamiseks kiirguse lagunemisproduktiks on müüon.[3]

Müüonid on ebastabiilsed ning nende keskmine eluiga on umbes 2,2  $\mu$ s. Siiski, olenemata lühikesest elueast, suudavad müüonid oma suure seisumassi (ligikaudu 207 korda suurem elektronist) ja kõrge energia tõttu läbida mitmeid kilomeetreid enne lagunemist.[4] Keskmine mõõdetud müüonite energia maapinnal on umbes 4 GeV ning näiteks müüon 2,4 GeV energiaga, suudab läbida umbes 15 km vahemaa. Sellest järeldub, et müüonitel on väga hea läbitungimisvõime. Lisaks on müüonitel laeng, mistõttu saab neid stsintillaatoritega mõõta. Kokkuvõtvalt - müüonite voog kujutab endast läbitungivat, ioniseerivat kiirgust.[3,5]

Merepinnani jõuab müüoneid keskmiselt 100 Hz/m<sup>2</sup> ning nad moodustavad suurima osa Maale langevast atmosfääri kiirgusest [5]. Ülejäänud atmosfääris tekkinud kiirgusest põhjustavad näiteks prootonid, elektronid või positronid. Sellist kiirgust jõuab maapinnani vähem võrreldes müüonite vooga. Prootonid ja elektronid kaotavad energiat pidurduskiirguse (ingl k „*bremsstrahlung*“) tõttu. Müüonid kaotavad energiat samal viisil, kuid energia kadu sel viisil on ligikaudu 40 000 korda väiksem nende suurema impulsi tõttu. Positronid annihileeruvad suhteliselt kiiresti lähima elektroniga.[3]

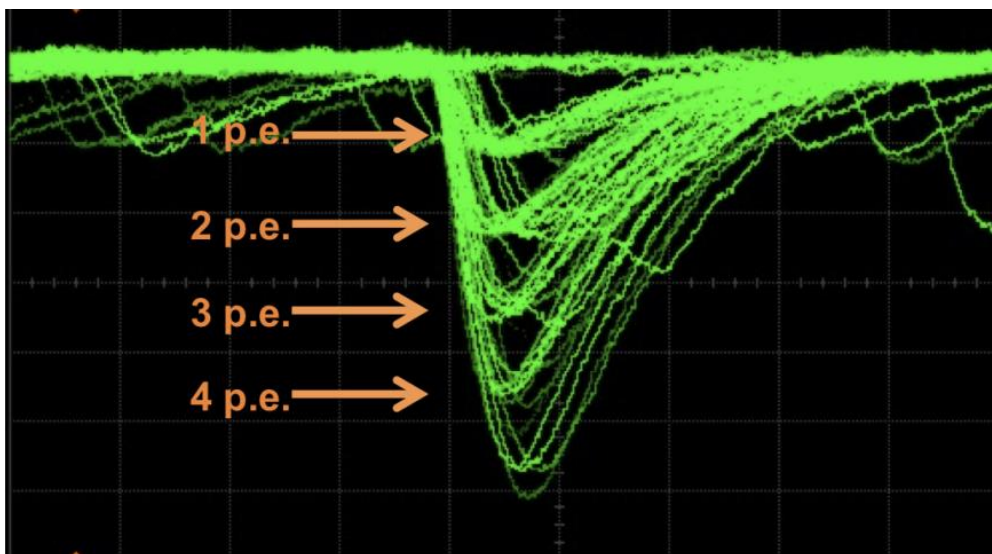
## 1.2 Räni-fotokordisti tööpõhimõte

Räni-fotokordisti (ingl k „*Silicon photomultiplier*“, edaspidi SIPM) koosneb paljudest laviinfotodiodidest. Fotodiodide üheks olulisemaks komponendiks on räni, mis moodustab diodis vaegala. Räni aatom neelab temale langevad footonid. Neelatud energia sunnib räni valentstsooni elektroni liikuma juhtivustsooni – tekib elektron-auk paar. Seejärel, kui vastupingestada diodi pn-siiret, tekib pooljuhi vaegalasse tugev elektriväli, mis soodustab juhtivustsooni elektroni kiirenevat liikumist. Elektroni piisavalt suure kineetilise energia tõttu ioniseeritakse ette jäävad räni aatomid, ehk ioniseeritud räni aatomid tekitavad juhtivustsooni

elektrone juurde. Mille tulemusena tekib elektronide laviin, mis tekitab fotodiodis mõõdetava voolu. [6]

Üksik fotodiod annab samal temperatuuril ja vastupingel ühesuguse amplituudiga väljundsignaali ehk signaali põhjal ei saa välja selgitada valguse intensiivsust. Kuna iga fotodiod on võimeline sõltumatult teistest mõõtma footoneid, siis saab tekkinud fotovoolud kokku liita ja saada sellega tervikliku signaali, mis on proportsionaalne teatud SiPM-le peale langenud valguse intensiivsusega. SiPM-i väljundsignaal on nähtav ostsilloskoobi abil (vt joonis 1). Joonisel on näha signaali amplituudi sõltuvus sellest, mitu laviinfotodiodi korraga signaali mõõtis. [6]

SiPM-i puhul esineb peamiselt kahte tüüpi suuremat müraallikat: pimevool ja optiline ristsaastumine (ingl k „*optical crosstalk*“). Pimevool tekib soojusenergia arvelt, mis ergastab diodi vaegalas uue elektroni ning mis omakorda tekitab uue laviini ehk mürasignaali. Optiline ristsaastumine on sündmus, kus ühes fotodiodis toimunud laviini efekti korral emiteerub pooljuht-alast vabade laengukandjate kiireneva liikumise tulemusena foton. See võib levida kõrval olevasse diodi ja seal tekitada sekundaarse laviin efekti.[6]



Joonis 1. Ostsilloskoobil nähtav SiPM-i väljundsignaal, kui seda valgustada nõrkade valguspulssidega (p.e. tähistab fotoelektroni).[6]

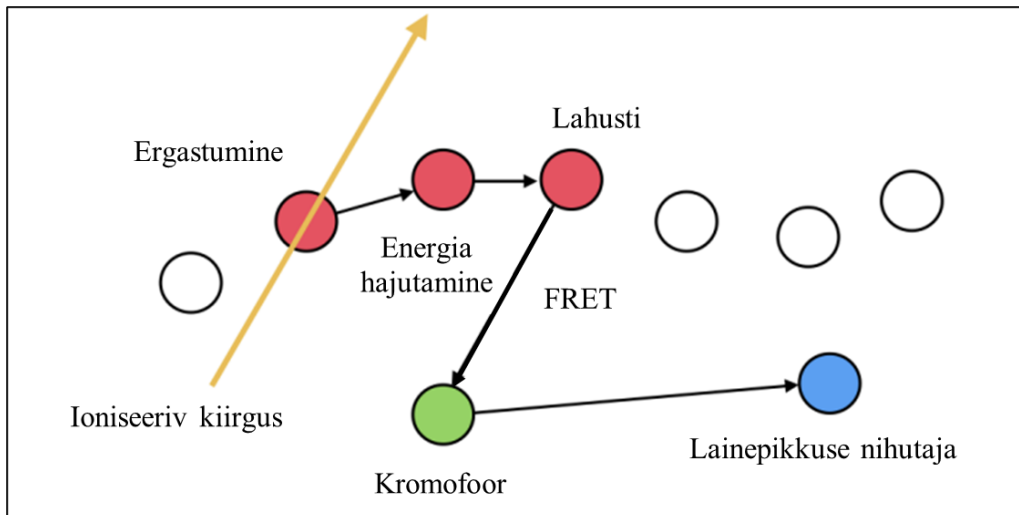
### 1.3 Stsintillatsioon ja plastikupõhised stsintillaatorid

Luminesstsents on füüsikaline nähtus, kus aatomis välise energia arvelt ergastunud elektroni liikumisel relaksatsiooni tõttu madalamale energia tasemele tekib valgus. Stsintillatsiooni nähtuse puhul kiiratakse valgust samuti luminesstsentsi tõttu, aga ergastumine

toimub välise ioniseeriva kiirguse mõjul. Liikudes läbi stsintillaatori kannab ioniseeriv kiirgus osa oma energiast üle materjalile läbi erinevate elektromagnetiliste vastastikmõjude.[7]

Läbi stsintillatsioonmaterjali liikudes kaotab ioniseeriv kiirgus energiat peamiselt kolme erineva elektromagnetilise vastastikmõju arvelt. Esiteks, võib ioniseeruv kiirgus interakteeruda aatomi või molekuliga nii, et annab kogu oma energia ära – toimub fotoabsorptsioon. Teiseks võib kiirgus kaotada osa energiast põrgates vastu aatomi laetud osakest, nagu näiteks elektron. Seda nimetatakse Comptoni hajumiseks (ingl k „*Compton scattering*“). Kolmandaks võib kiirguse energia kaduda elektron-positron paari tekkimisel. Need protsessid toimuvad kuni kiirgus on kõik energia ära kaotanud ehk toimub mitmikhajumine.[7]

Plastikupõhised stintillaatorid sisaldavad vähemalt kahte komponenti: lahustunud aine ja lahusti. Vastavalt vajadusele lisatakse ka lisandaineid nimega „lainepikkuse nihutajad“ (ingl k „*wavelength shifter*“), mis nihutavad fluorestsentsi lainepikkuse detektori mõõtmisdiapasooni. Stsintillatsioonmaterjalis ergastub lahusti välise ioniseeriva kiirguse mõjul ja kannab juurde tekkinud energia üle lahustunud ainele Försteri resonantsenergia ülekandega (ingl k „*Förster resonance energy transfer*“, edaspidi FRET). FRET on nähtus, kus üks ergastunud lahusti molekul annab energiat üle teisele mitte-ergastunud kromofoorile läbi dipool-dipool vastastikmõju. Seejärel hakkab lahustunud aine ise valgust kiirgama ehk tekib fluorestsents. Enne kromofoorile energia üle kandmist võib ergastunud lahusti aatom oma ergastusenergiat kõrval olevatele aatomitele edasi hajutada. Kromofoori kiiratud valgust võib neelata lainepikkuse nihutaja, mis kiirgab välja nihutatud lainepikkusega valguse. Lõpptulemusena tekib stsintillatsioonvalgus. Energia ülekannet stsintillaatoris illustreerib joonis 2. Stsintillatsioonmaterjal sisaldab rohkesti lahustit, et materjal tekiks pidevalt ergastumist ja sellega kaasnevat stsintillatsioonvalguse teket. Lahustunud aine ja lisandainete kogus jääb kuni paari protsendi ulatusse kogu materjali massist, sest nende kontsentratsioonist sõltub fluorestsentsi efektiivsus – mida suurem sisaldus, seda väiksem on efektiivsus. [8]



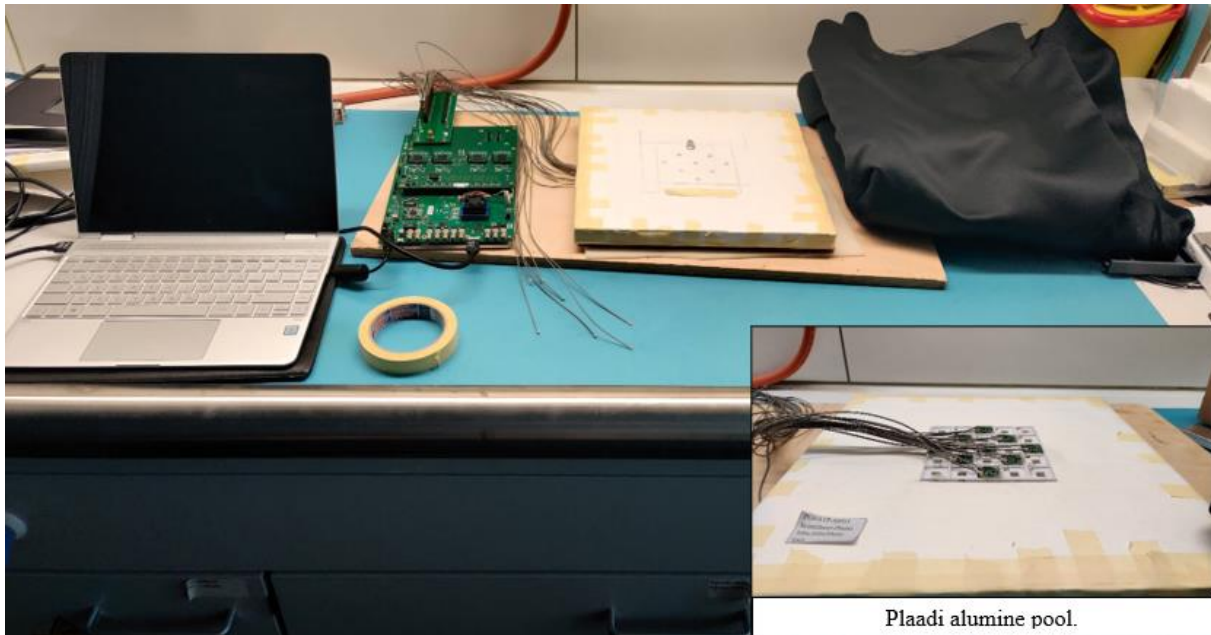
Joonis 2. Energiasiirded stsintillaatoris. Ioniseeriv kiirgus ergastab stsintillaatoris lahusti molekule, mille ergastumisenergia võib edasi hajuda kõrval olevatele aatomitele. Seejärel kantakse lahustilt energia üle lahustunud ainele FRET-i nähtuse abil. Viimaks nihutatakse lahustunud ainest kiirgunud valguse lainepikkust soovitud mõõtmisdiapasooni kasutades lainepikkuse nihutajaid.[8]

## 2. Eksperimentaalne katse

### 2.1 Katse kirjeldus

Töös kasutati varasemalt valmistatud detektorit, mida kasutas S. Saan bakalaureusetöös [9]. Detektori välimust on näha joonisel 3. Töö käigus valmistati kolm erineva kattega stsintillatsioonplaati ning võrreldi detektori suutlikkust mõõta stsintillatsioonkiirgust erinevate katete ja määrdeainete kombinatsioonide puhul. Töös kasutati strontsium-90 allikat, mille poolestusaeg on 28,80(7) aastat ja lagunemisenergia on 545,9 keV. Tütarnukliidiks on ütrium-90, mille poolestusaeg on 2,6684(13) päeva ja lagunemisenergia 2278,7 keV. Beetakiirgus allikas on sama, mida kasutas S. Saan bakalaureusetöös [9]. Selle töös mainiti, et allikas oli saavutanud sekulaarse tasakaalu. See tähendab, et strontsium-90 ja ütrium-90 aktiivsused on võrdsed.[10]

Erinevaid katteid ja optilisi määrdeaineid oli kolm, seega valmistati kokku kolm eraldi stsintillatsioonplaati erineva kattega. Järgmisena pandi iga detektori SiPM-i peale optilist määrdeainet ning suruti detektor vastu stsintillatsioonplaati. Mõõtmiste ajal kaeti plaat täielikult pimendava linaga, et vähendada taustavalgust. Detektoriga mõõdeti esmalt taustakiirgust ja seejärel beetakiirgust kasutades strontsium-90 allikat. Allikas asetati ühele ja samale SiPM-le maatriksis, mis lubas koheselt mõõta beetakiirgust erinevatel kaugustel. Peale seda puhastati plaadi ja SiPM-de pinnad määrdeainest kasutades piiritust ning katsekäiku korrati ülejäänud optiliste määrdeainetega. Kirjeldatud katsekäik viidi läbi ka teiste valmistatud stsintillatsioonplaatidega. Arvutisse salvestati erinevate SiPM-de poolt tuvastatud impulsid ja nende intensiivsused.



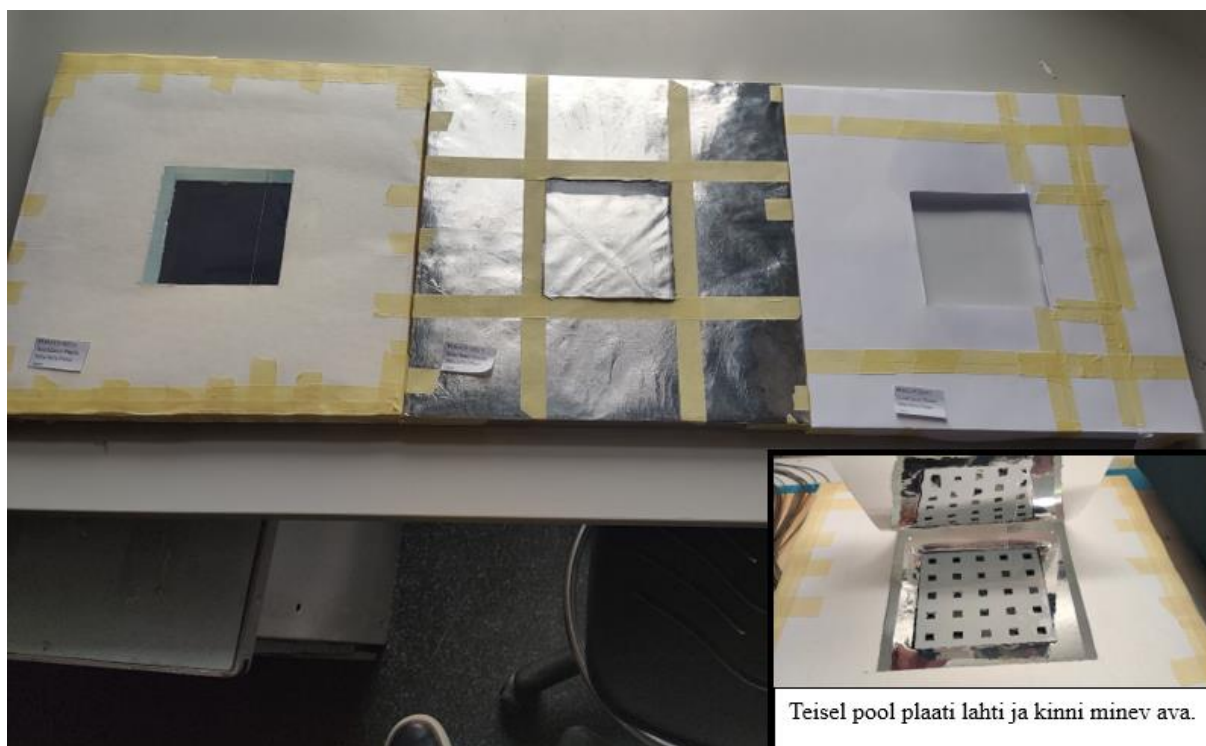
Joonis 3. Vasakult paremale on näha arvuti, elektroonikakomponendid, peegeldava kattega stsintillaatorplaat, mille all asub SiPM-maatriks, ja pimendav lina. Joonise all paremal on plaadi vaade altpoolt, kus on näha, kuidas on SiPM-maatriksit kinnitatud vastu stsintillatsioonplaati.

## 2.2 Katsevahendi ehitus

Detektor koosneb neljast osast: arvuti, elektroonikaplaat, SiPM-maatriks ja stsintillatsioonplaat. Järgnev kirjeldab neid osi eraldi.

### 2.2.1 Stintillatsioonplaadid

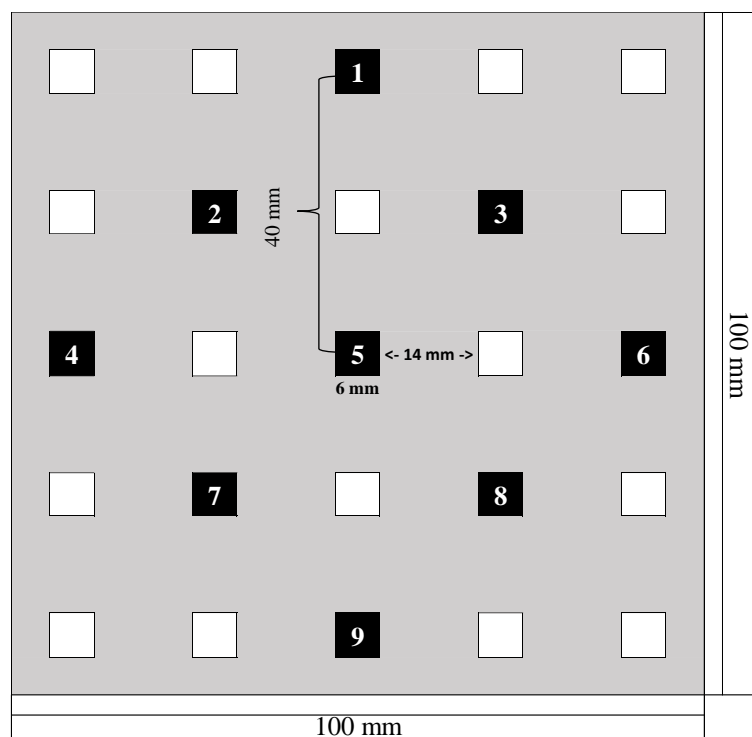
Stintillatsioonplaadi jaoks kasutati tootja Advatech UK plastikupõhine stsintillaator mudel ATP-50515. Antud stsintillaator kiirgab valgust kõige paremini lainepikkusel 423 nm (vt lisa 1). Töö käigus valmistati kolm erineva kattega stsintillatsioonplaati. Esimene plaat kaeti tavalise valge paberiga, teine alumiiniumfooliumiga ning kolmas peegeldava kattega, mille mudel on DF2000MA ja tootja 3M. Plaadid olid kõik ruudukujulised küljepikkusega 300 mm ja paksusega 20 mm. Plaadi ühele poole lõigati SiPM-maatriksi jaoks ruudukujuline ava küljepikkusega ligikaudu 10 cm. Teisele poole plaati lõigati avatav ja suletav ava. Selle abil kontrolliti, et optiline määrdeaine kataks tervet SiPM-i ja et määrdeaine paigaldamisel ei jäänud selle sisse õhumulle. Samuti lõigati beetakiirguse allika jaoks avad, et vältida ebahühtlast varjestamist katete vahel. Kõik kolm stsintillatsioonplaati on näha joonisel 4.



Joonis 4. Vasakult paremale on peegeldava kattega, alumiiniumfooliumiga ja paberiga kaetud stsintillatsioonplaadid. Paremalt all nurgas on joonis peegeldava kattega plaadi tagumisest poolest, kus on näha avatavat ja suletavat ava optilise määrdaine kontrollimiseks.

### 2.2.2 SiPM-matriks

SiPM-d matriksis on tootjalt Hamamatsu mudeliga S14160-6050HS. Nende valgustundlikpind on ruudukujuline küljepikkusega 6 mm ning on valgustundlik lainepikkustel 270 kuni 900 nm. Parim tundlikkus on lainepikkusel 450 nm, mille puhul saavutab SiPM footoni 50%-lise tuvastamisefektiivsuse. Antud stsintillatsioonplaadi jaoks, mis kiirgab kõige intensiivsemalt lainepikkusel 423 nm, on tuvastamisefektiivsuseks ligikaudu 48%. [11] SiPM-matriks koosneb üheksast SiPM-st ning nad on paigutatud vastavalt joonisele 5. Kui matriksis üks SiPM alustab mõõtmist, siis samal hetkel hakkavad mõõtma ka ülejäänud SiPM-d. Kusjuures iga SiPM on erineva mõõtmistundlikkusega.



Joonis 5. SiPM-maatriks, kus SiPM-de asukohad on märgitud mustade ruutudega. Halliga on märgitud auklik alus, millele paigaldati SiPM-d.

### 2.2.3 Elektroonikakomponendid

SiPM-de signaal liigub mööda kaableid elektroonikakomponentideni. Kogu elektroonika süsteem on üles ehitatud rakendusspetsiifilisele integraallülitile (ingl k „*application-specific integrated circuit*“ ehk ASIC), mis signaali läbi töötab. Töös kasutati firma WeeROC mudelit Petiroc 2A integraallülitit. See on võimeline mõõtma energiad vahemikus 0 – 480 pC, mis omakorda on väljundis jaotatud kanalitele 0 – 1023 [12]. Sellest järeldub, et ühele kanali väärtusele vastab 0,46875 pC. Süsteem koosneb emaplaadist DT5550W ja lisandplaadist A55PET4, mis asetub emaplaadi peale ja sisaldab nelja integraallülitit. Mõlemad plaadid on tootjalt CAEN.[13] SiPM-de vähese arvu tõttu sai kõik ühendatud ühele integraallülitile.

### 2.2.4 Arvuti ja tarkvara

Arvutis oleva DT5550W tarkvaraga sai kontrollida detektorit ja käivitada mõõtmisi. Selle abil sai seadistada eraldi kõikide SiPM-de mõõteseadeid. Töös kasutati varasemalt tehtud kalibratsioone, mis tasakaalustasid SiPM-de signaalid. Need kalibratsioonid olid tehtud vastavalt emaplaadi juhendile nii SiPM-dele kui ka integraallülitile. S. Saani bakalauresutetöös

kasutati SiPM-de vastupingeiks 42,08 V [9]. Kuna see pinge kuulub antud SiPM-i mudeli puhul soovitatava tööpinge vahemikku, siis jäeti pinge samaks [11]. Läbitöödeldud signaal salvestatakse arvutisse CSV-formaadis, mida hiljem analüüsiti, kasutades Jupyteri keskkonnas programmeerimiskeelt Python. Ühtlasi kasutati ka Excelit.

### 2.3 Stsintillatsioonplaadi katted ja optilised määrdeained

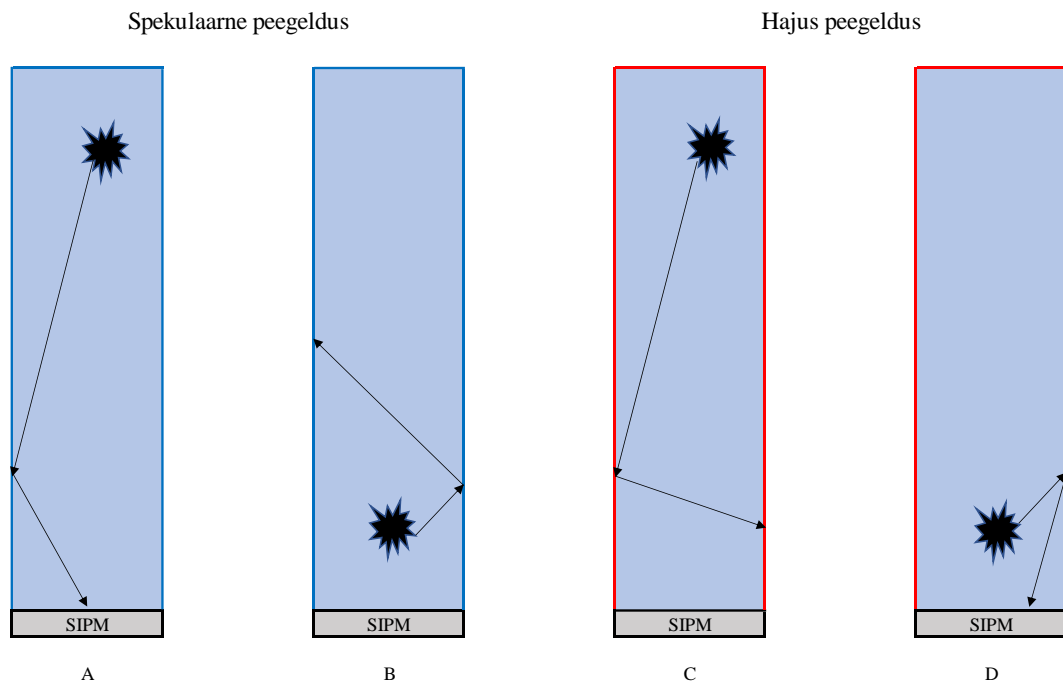
Nagu eelpool sai mainitud, siis kasutati töös kolme stsintillatsioonplaadi katet: valge paber, alumiiniumfoolium ja peegeldav kate DF2000MA. Määrdeid oli samuti kolm: Henkel firmalt silikoon määrdeaine Loctite LB 8104, Eljen Technology firmalt optiline määrdeaine EJ-550 ja Cargille Laboratories tootjalt laservedelik 1057B. Selles peatükis kirjeldatakse kasutatud katteid ja määrdeaineid.

Katete eesmärk detektoris on soodustada stsintillatsioonvalguse sattumist SiPM-le. Kiirgust on võimalik peegeldada difuusselt ehk hajusalt ja spekuarselt. Hajus peegeldumine esineb siis, kui peegeldav pind on ebatasane. Sel juhul ei ole peegeldumisnurk võrdne langemisnurgaga. Antud katetest on hajusa peegeldusega valge paber. Katses kasutati tavalist poest ostetud valget paberit, millel puudusid täpsed optilised andmed. Tavapäraselt suudab valge paber ligikaudu 75 – 90% nähtavast valgusest peegeldada [14].

Spekulaarne peegeldus on nähtus, kus kiire peegeldumisnurk on võrdne kiire langemisnurgaga. Katetest esineb spekulaarne peegeldumine peegeldava kate DF2000MA puhul. See kate suudab peegeldada alates lainepikkusest 380 nm ligikaudu 99% nähtavast valgusest [15]. Katete valmistamisel ei õnnestunud katta stsintillatsioonplaati alumiiniumfooliumiga täies ulatuses siledalt. Seega esineb alumiiniumkatttega kohati nii spekulaarne kui ka hajus peegeldumine. Võttes arvesse spekuarset ja hajuvat peegeldumist saab öelda, et alumiiniumfoolium suudab peegeldada nähtavast valgusest ligikaudu 80 – 90% [16].

Optiliste määrdeainete eesmärgiks on parandada detektori ja plaadi vahelist kontakti. Määrdeaine kaitseb detektorit, täidab plaadi pinnal mikropraod ning annab võrreldes õhuga parema optilise läbilaskvuse. Optiline läbilaskvus kirjeldab, kui palju valgust aine läbib. LB 8104 on toiduga seotud masinatele mõeldud määrdeaine ehk see ei ole optiline määrdeaine [17]. LB 8104 võeti kasutusele varasemates müüontomograafiaga seotud katsetes kuna ta oli odav, kättesaadav, hea viskoossusega ja ohutu stsintillaatorile. Paraku pole toiduga seotud masinatele mõeldud määrdeaine LB 8104 murdumisnäitaja ja läbilaskvus teada. EJ-550 on optiline määrdeaine, mis on mõeldud fotodetektorite ja stsintillatsioonplaatide ühendamiseks. Selle

murdumisnäitaja on 1,46 ja 0,1 mm paksuse määrdekihi puhul on läbilaskvus ligikaudu 98% lainepikkuste vahemikus 350 – 450 nm [18]. Optiline määrdeaine oli LB 8104-ga sarnase viskoossusega. 1057B on optiline vedelik, mille murdumisnäitaja on keskmiselt 1.61 lainepikkuse vahemikus 325 – 550 nm (vt Lisa 2). 0.1 mm paksuse määrdekihi puhul on samas lainepikkuste vahemikus läbilaskvus keskmiselt 100% (vt Lisa 2). Määrdeaine oli vedel ja ei hoidnud SiPM-e plaadi küljes.



Joonis 6. Stsintillaatoris tekkinud kiirte liikumine spekulaaarse ja hajusa katte puhul. Joonisel A ja C ning joonisel B ja D on toodud sarnased olukorrad, mis näitab, kuidas hajusad ja spekulaaarsed katted võivad mõjutada kiirte käiku SiPM-i.

### 3. Andmeanalüüs

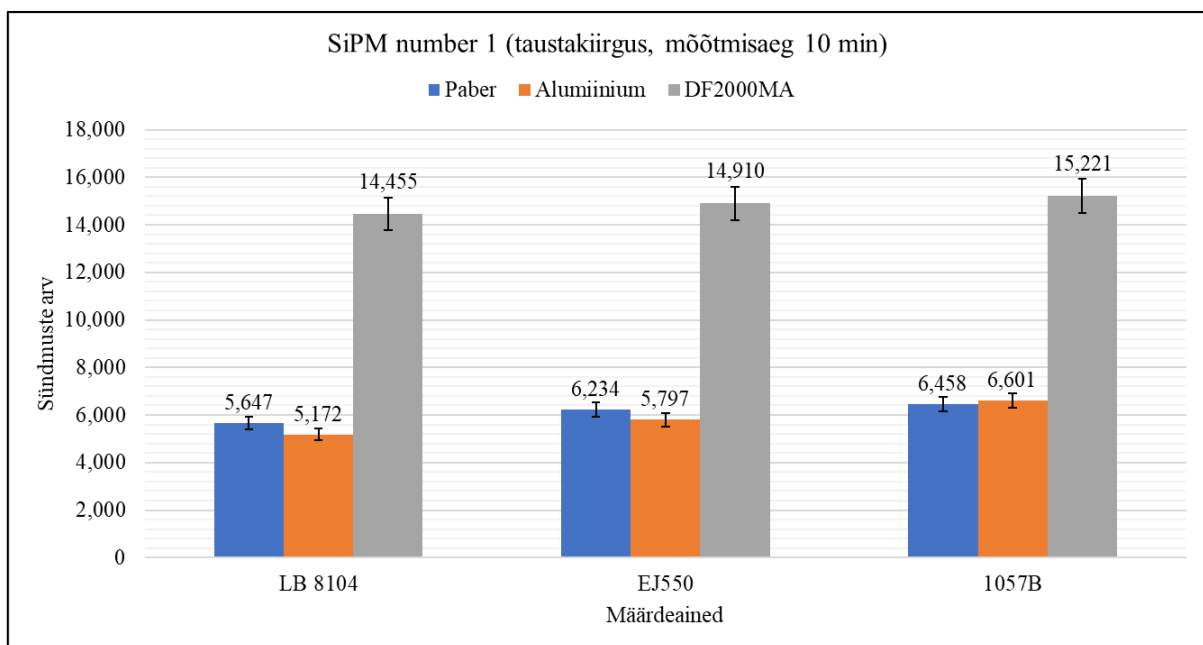
Töö eesmärgiks on leida plaatdetektorile parim kate ja optiline määrdeaine, mis saavutaksid SiPM-del parima footonite mõõtmiseefektiivsuse. Seepärast võrreldakse mõõtmistulemusi esiteks katete ja määrdeainete kõikvõimalike kombinatsioonide puhul. Teiseks võrreldakse SiPM-de mõõtmistulemusi erinevatel kaugustel beetakiirguse allikast. Tulemuste juures võrreldakse esiteks kui palju stsintillatsioonvalguse mõõtmisündmuse suudab detektor erinevate katete ja määrdeainete kombinatsioonide puhul mõõta. Mida rohkem sündmuseid, seda rohkem informatsiooni saab objekti kohta, ehk seda täpsemalt ja kiiremalt saab luua tomograafilise kujutise objektist. Teiseks võrreldakse energiaspektrite keskväärtuse nihkumist. Spektri keskväärtuse nihkumine vasakule tähendab, et stsintillatsioonvalgust neeldub rohkem. Spektri keskväärtuse nihkumine paremale tähendab, et valgus peegeldub paremini. Mida paremini peegeldub valgus, seda parem on detektori müra ja signaali suhe, ehk seda rohkem on müra- ja reaalne signaal üksteisest lahus. Lisaks uuriti detektori mõõtmiseefektiivsust kahel erineval kaugusel beetakiirguse allikast.

Katse ajal mõõtsid kõik SiPM-id aktiivselt, aga andmeanalüüsiks kasutati ainult SiPM-de numbriga 1, 5 ja 9 (vt joonis 5) mõõtmistulemusi. Need SiPM-d valiti kahel põhjusel. Esiteks, et saaks mõõtmise teha erinevatel kaugustel. Teiseks, tekkisid raskused SiPM-i ja plaadi kokku ühendamisel määrdeainega – SiPM-matriksi ja plaadi ühendamisel jäid osade SiPM-de kohale määrdeaine sisse õhumullid. Kõikide mullide eemaldamiseks oleks pidanud SiPM-matriksit uuesti paigaldama koos uue määrdeaine kogusega. Matriksit vana määrdeainega plaadi külge kinnitada oleks tekitanud veelgi rohkem õhumulle. Seetõttu tehti kindlaks, et SiPM-del numbriga 1, 5 ja 9 kohale ei jäänud määrdeainesse õhumulle. Kuna ühe SiPM-i signaali mõõtmine käivitab ka ülejäänud SiPM-de signaali mõõtmise, siis mõõtis süsteem ka null väärtusega sündmuseid. Neid andmeanalüüsis ei arvestata.

#### 3.1 Stsintillatsioonplaadi katete võrdlus

Esiteks võrreldakse katteid ja määrdeaineid kasutades SiPM number 1 taustakiirguse mõõtmistulemusi. Kuna beetakiirguse allikas asetati alati SiPM number 1 kohale, siis sellesse SiPM-i jõudis enamus beetakiirgusest otse, ilma et see oleks peegeldunud kattelt. Seetõttu antud SiPM-i puhul analüüsitakse taustakiirguse mõõtmiseid. Joonisel 7 on toodud taustakiirguse mõõtmistulemused kõikvõimalike määrdeainete ja katete kombinatsioonide puhul, kus andmed on paigutatud nii, et saaks võrrelda omavahel stsintillatsioonplaadi katteid.

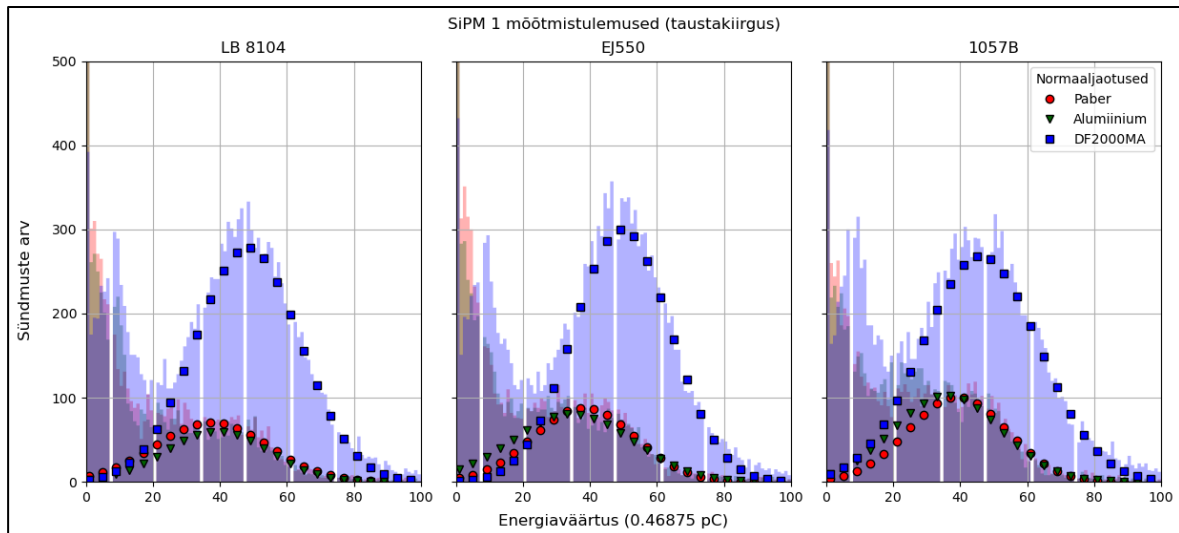
Esiteks, taustakiirguse puhul varieerub sündmuste lugemite arv keskmiselt 4,7%. Jooniselt on näha, et DF2000MA kattega mõõdeti iga määrdeaine puhul ligikaudu 2,5 korda rohkem sündmusi. Sellest saab järeldada, et antud kate tõstis detektori mõõtmisefektiivsus kõige paremini. Alumiiniumfooliumkattega (edaspidi alumiiniumkate) mõõdetud sündmuste arvud erinesid paberkatte omadest keskmiselt 6% ulatuses. Sellest järeldub, et detektor saavutas suhteliselt võrdsed tulemused paber- ja alumiiniumkatte korral. Samas peaks alumiiniumkate keskmiselt rohkem valgust peegeldama kui valge paber [13,16]. Põhjuseks, miks alumiiniumkattega mõõtis detektor vähem sündmusi, on tõenäoliselt katte halb paigaldus plaadile. Alumiiniumkatte valmistamisel tekkisid sellesse kortsud, mis stsintillatsioonvalgust suuremal määral SiPM-dest eemale peegeldasid. Samuti halvendasid kortsud stsintillatsioonplaadi ja katte vahelist kontakti, mistõttu kiirgus hajus veelgi rohkem enne kattelt tagasi peegeldumist. Järgnevalt analüüsitakse mõõtmistulemusi graafiliselt (vt joonis 8).



Joonis 7. Histogrammil on SiPM number 1 taustakiirguse mõõtmistulemused erinevate määrdeainete ja katete kombinatsioonide puhul.

Joonisel 8 on kujutatud graafiliselt iga määrdeaine puhul erinevate stsintillatsioonkatete mõõtmistulemused. Tulemused on kujutatud histogrammidena, kus iga energiaspektri põhiosale sobitati normaaljaotuskõverad. Jaotus sobitati parempoolsele tekkinud energiaspektrile, mis paiknes ligikaudu energiaväärtuse vahemikus 20 – 80. Mõõtmistel saadud energiaväärtused null kuni üks loeti müraks. Kõigi määrdeainete puhul oli DF2000MA katte energiaspektri jaotus nihkunud teiste katetega võrreldes keskmiselt 11 energiaühikut paremale.

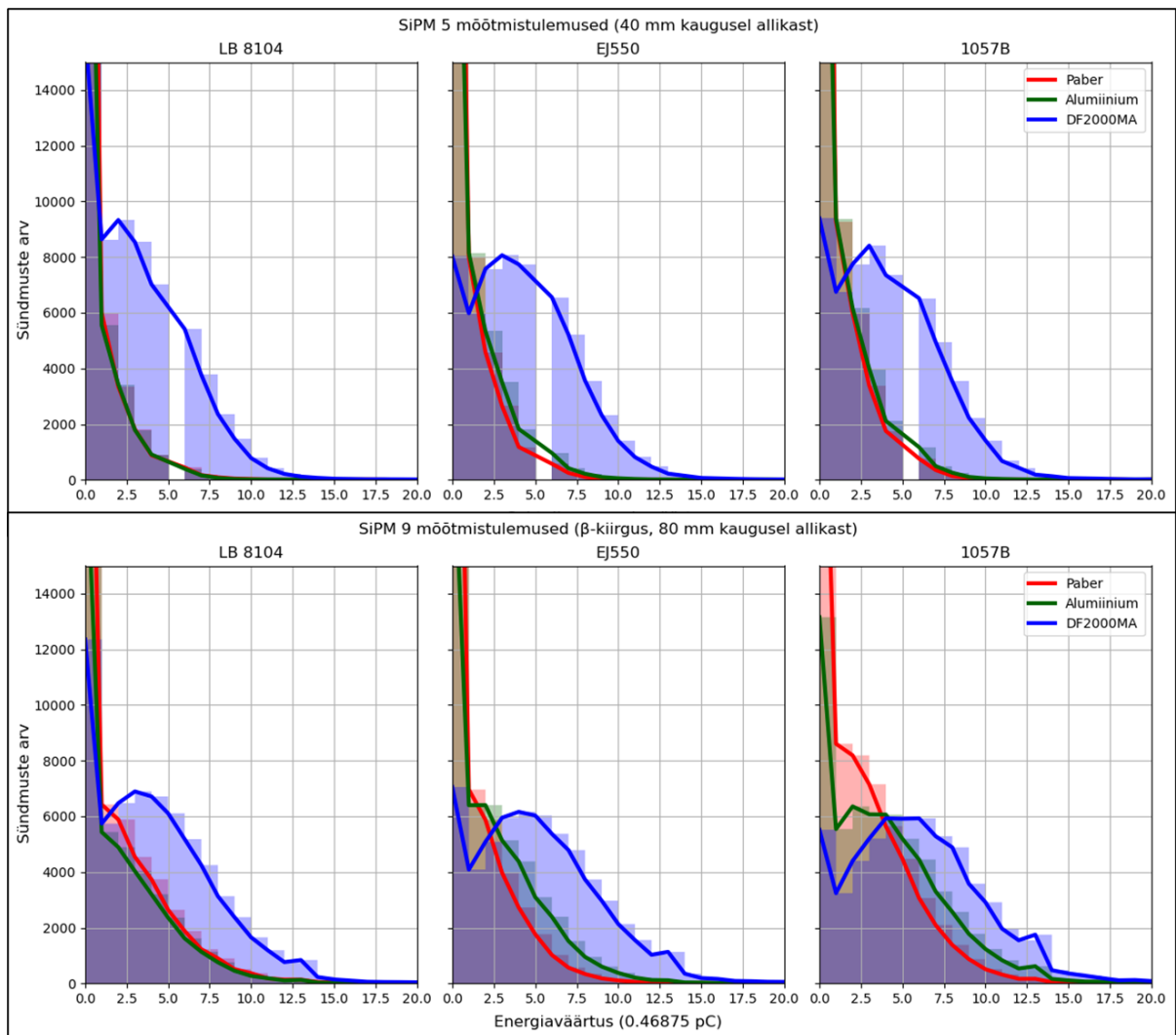
See kinnitab, et DF2000MA kate peegeldab paremini kui teised katted. Samuti on kõigi määrdeainete korral nii paber- kui ka alumiiniumkatte puhul spektrite põhiosa keskväärtused määramatuse piires võrdsed teineteisega.



Joonis 8. SiPM number 1 energiaspektrid erinevate määrdeainete ja katete kombinatsioonidega. Graafikul on paigutatud spektrid nii, et saaks võrrelda erinevaid katteid omavahel.

Järgmisena uuritakse SiPM number 5 ja number 9 beetakiirgusega saadud mõõtmistulemusi. Mõõtmised keetsid 60 sekundit. SiPM number 5 ja 9 asuvad beetakiirgus allikast vastavalt 40 ja 80 mm kaugusel. Joonisel 9 on toodud mõlema SiPM-i mõõtmistulemused graafiliselt erinevate määrdeainete ja katete kombinatsioonide puhul.

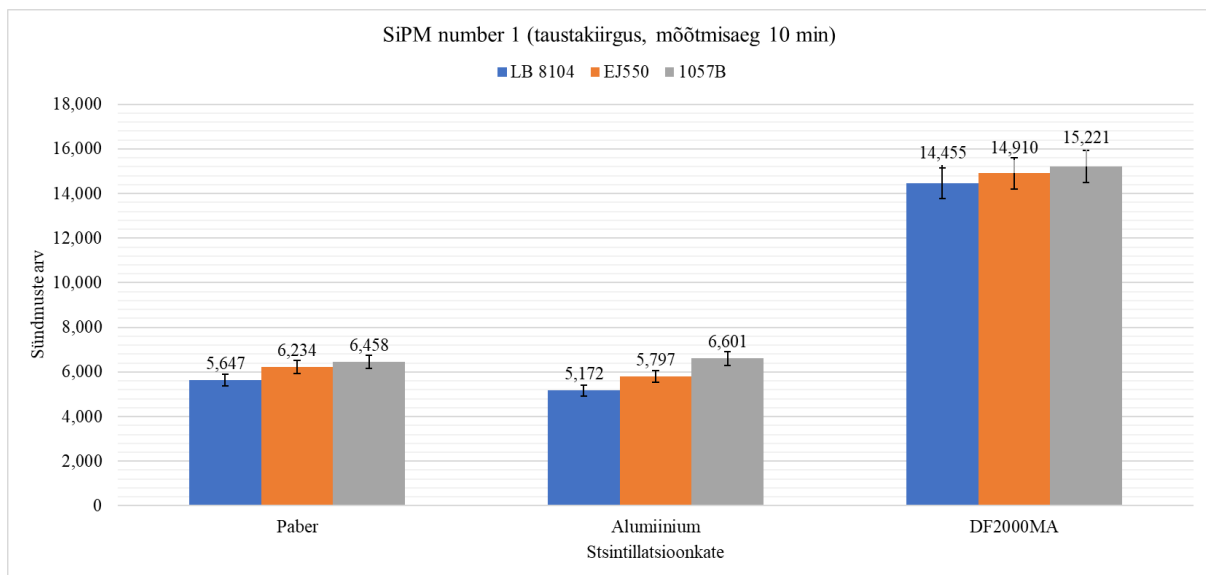
SiPM numbriga 1 mõõtmistulemuste kohaselt asus beetakiirgus allika energiaspekter energiaäärtuse vahemikuks ligikaudu 20 – 80 (vt Lisa 3). Jooniselt näeb, et enamus mõõdetud energiatest asuvad energiaäärtuse vahemikus 0 – 20. Selles vahemikus asub ka SiPM-i poolt mõõdetud beetakiirgus spekter. Saadud energiaspektrites on detektori poolt mõõdetud beetakiirgus ja SiPM-i mürasignaalid hakanud kokku sulama. Sellegipoolest on kate DF2000MA puhul kõige paremini näha beetakiirguse spektrit. Samas alumiiniumkatte ja paberkatte puhul on spekter vähem nähtav. See on hea näide sellest, kuidas peegeldav kate aitab müra-signaali suhet parandada. Joonisel on näha, et SiPM 9 mõõdetud energiaspektrid on laiemate energiaäärtuste vahemikega. See tuleneb SiPM-de erinevast mõõtmistundlikkusest. Mõlema SiPM-i kõikidest energiaspektritest saab järeldada, et DF2000MA on parima peegelduvusega ning alumiinium- ja paberkatte peegeldavad stsintillatsioonvalgust suhteliselt sarnaselt.



Joonis 9. SiPM-de number 5 ja 9 poolt mõõdetud energiaspektrid beetakiirgus allikaga erinevate määrdainete ja katete kombinatsioonidega. Tulemused on kujutatud histogrammidena. Joondiagramm järgib histogrammi kontuuri.

### 3.2 Optiliste määrdeainete võrdlus

Järgmisena analüüsitakse optilisi määrdeaineid. Analüüs toimub analoogselt eelmise peatükis tooduga ning tegemist on samade mõõtmistulemustega, kuid seekord uuritakse iga stsintillatsioonkatte juures kõiki optilisi määrdeaineid, ehk andmed grupeeriti katete järgi. Alustatakse SiPM numbriga 1, kasutades uuesti taustakiirguse mõõtmistulemusi (vt joonis 10).

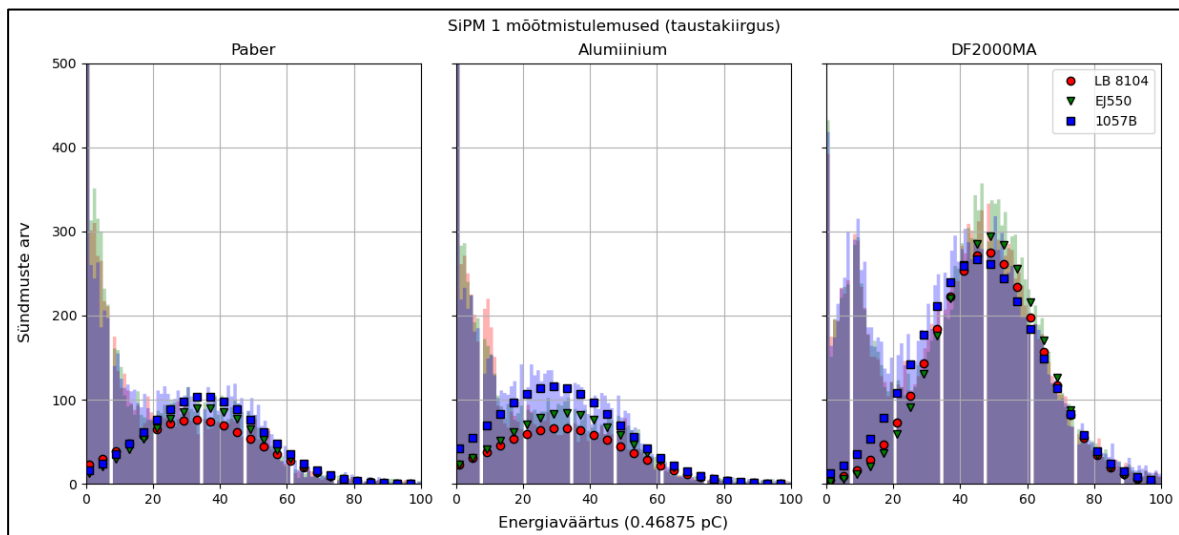


Joonis 10. Histogrammidel on toodud SiPM number 1 taustakiirguse mõõtmistulemused erinevate määrdeainete ja katete kombinatsioonide puhul.

Jooniselt 10 on näha, et optilised määrded mõjutavad detektori mõõtmistulemusi vähe võrreldes katetega. Seega on katte valik olulisem detektori mõõtmiseefektiivsuse suurendamiseks. Määrdeainete puhul mõjutab mõõtmistulemusi eelkõige määrdede optiline läbilaskvus. Määrdeaine 1057B, võrreldes LB 8104-ga, suurendab sõltuvalt kattest sündmuste arvu ligikaudu 5 – 28%, ehk keskmiselt 17%. Ning võrreldes EJ-550-ga, suurendab 1057B määrdeaine sündmuste arvu ligikaudu 2 – 14%, ehk keskmiselt 7%. Nende määrdeainetega mõõtis detektor sündmuste varieeruvuse piires paber- ja DF2000MA katte puhul võrdse arvu sündmusi. Viimaks, EJ-550 määrdeaine suurendab sündmuste arvu LB 8104-ga võrreldes ligikaudu 3 – 10%, ehk keskmiselt 7%. Sõltumata sellest, et tulemused varieeruvad, on näha iga katte puhul, et detektor mõõdab määrdeainega LB 8104 kõige vähem sündmusi ja määrdega 1057B kõige rohkem.

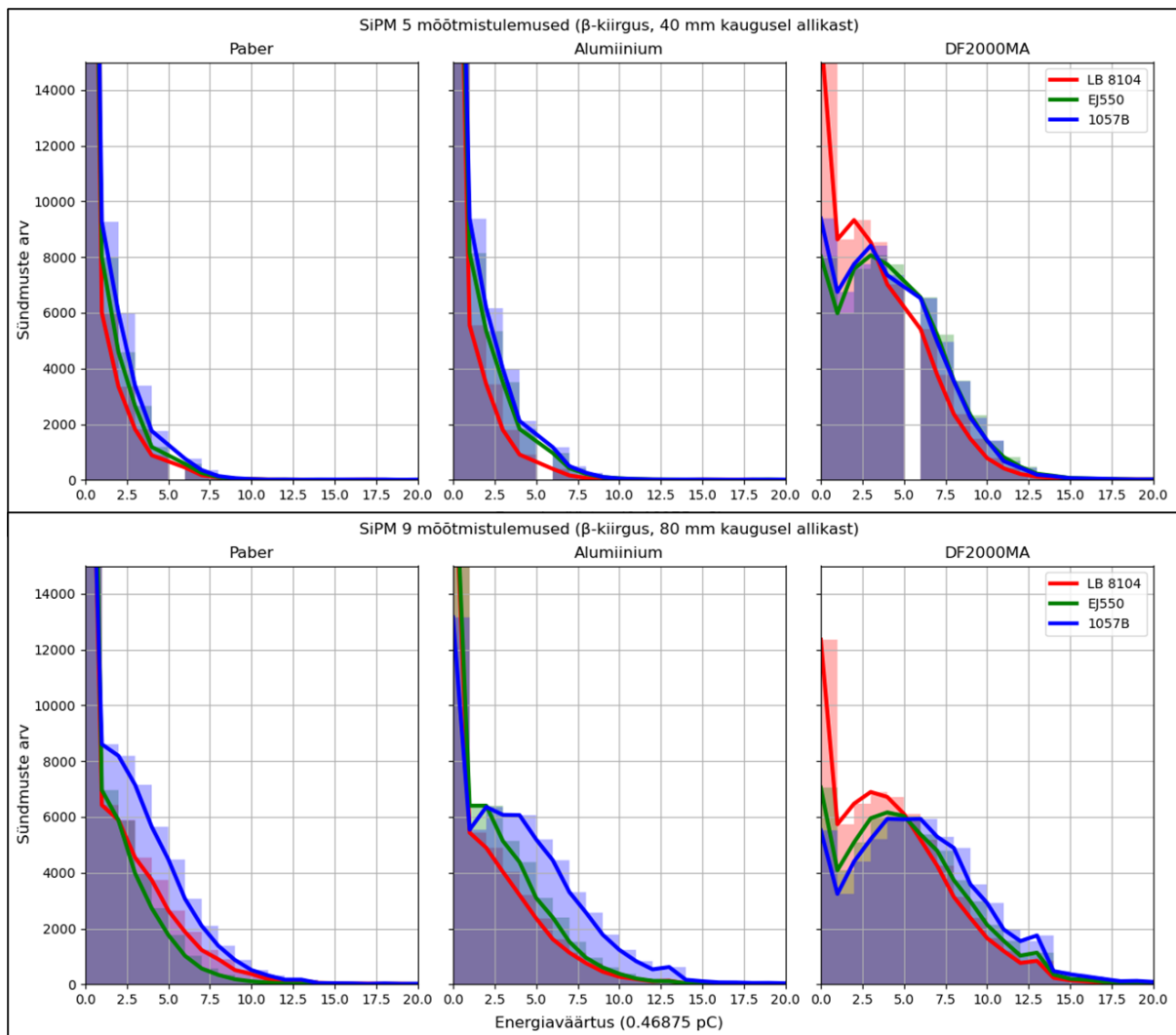
Järgmisena võrreldakse SiPM number 1 energiaspektreid erinevate määrdeainete korral (vt joonis 11). Jooniselt 11 on näha normaaljaotustelt, et LB 8104 määrdeainega saadi

alumiinium- ja paberkatte puhul kõige väiksema amplituudiga normaaljaotused. DF2000MA katte mõõtmistulemustest on näha, et kõigi kolme normaaljaotuse keskvärtused on enam-vähem sarnaselt jaotunud, kui võtta arvesse, et lugemite arv varieerub 4,7% ulatuses. Seega saab järeldada, et määrdeainega LB 8104 mõõtis detektor kõige kehvemini. Määrdeainega 1057B mõõtis detektor paber- ja alumiiniumkatte puhul kõige rohkem reaalseid sündmusi, ehk sündmusi, mis pole mürasignaaliid. Normaaljaotuste järgi mõõtis detektor paberkatte puhul EJ-550 ja 1057B määrdeainega sarnased energiaspektrid. Samas alumiiniumkatte puhul mõõtis detektor 1057B määrdeainega energiväärtuste 10 – 80 vahemikus rohkem sündmusi kui EJ-550 määrdeainega. DF2000MA katte korral mõõtis detektor määrdeainega EJ-550 rohkem sündmusi energiväärtuste 50 – 60 vahemikus.



Joonis 11. SiPM number 1 energiaspektrid erinevate määrdeainete ja katete kombinatsioonidega. Graafikul on paigutatud spektrid nii, et saaks võrrelda erinevaid määrdeaineid omavahel.

Joonisel 12 on näha, et kõikide katete puhul on 1057B määrdeainega mõõdetud kõige rohkem reaalseid sündmusi. SiPM number 5 poolt mõõdetud energiaspektritest selgub, et EJ-550 ja 1057B määrdeainetega mõõdetud energiaspektrid on väga lähedased teineteisele. Kuid SiPM number 9 puhul see nii ei ole. Põhjuseks võib olla määrdeaine ebahühtlane paigaldus SiPM-i ja plaadi vahele. Nimelt, EJ-550 määrdeaine võis oma viskoosuse tõttu ühe SiPM-i peal paksemalt paikneda kui mõnel teisel SiPM-l. Mida paksem kiht määrdeainet, seda halvem optiline läbilaskvus. Joonistest 11 ja 12 järeldub, et tuleks sooritada lisa mõõtmisi määrdeainetega EJ-550 ja 1057B, et saada teada kumb neist parem on. Samuti peaks nendel mõõtmistel kontrollima määrdeainete paksust SiPM-de ja plaadi vahel.



Joonis 12. SiPM number 5 ja 9 poolt mõõdetud energiaspektrid beetakiirgus allikaga erinevate määrdeainete ja katete kombinatsioonidega. Tulemused on kujutatud histogrammidena. Joondiagramm järgib histogrammi kontuuri. Spektrid on grupeeritud katete kaupa.

## Kokkuvõte

Käesoleva töös püstitati kaks eesmärki, millest esimene sai täielikult täidetud, teine eesmärk sai osaliselt täidetud.

Töö esmaseks eesmärgiks oli eksperimentaalselt võrrelda kolme erineva peegeldava katte ja kolme erineva optilise määrdeaine mõju räni-fotokordisti stsintillatsioonvalguse tuvastamise efektiivsusele. Uuritavateks kateteks olid: valge paber, alumiinium foolium ja DF2000MA peegeldav kate. Ning uuritavateks määrdeaineteks olid: LB 8104, EJ-550 ja laservedelik 1057B. Katete ja määrdeainete võrdlemiseks kasutati varasemas bakalauresusetöö raames valminud stsintillatsioonidetektorit ning eelpool mainitud katetest valmistati kolm erineva kattega stsintillatsioonplaati. Detektor kasutas stsintillatsioonvalguse mõõtmiseks üheksast SiPM-st koosnevat SiPM-matriksit. Mõõtmiste jaoks vahetati detektoril vana stsintillatsioonplaat välja tööjooksul valminud plaatide vastu. Detektoriga mõõdeti kõikide määrdeainete ja katete kombinatsioonide korral taustakiirgust ja beetakiirgust kahel erineval kaugusel.

Töö teiseks eesmärgiks oli selgitada välja, millist uuritud määrdeainetest ja katetest on kõige parem kasutada müüontomograafia plaatidetektorites, võttes arvesse eksperimendi tulemusi.

Katete võrdlemisel leiti, et detektor mõõtis DF2000MA kattega taustakiirguse korral ligikaudu 2,5 korda rohkem sündmusi kui teise kahe kattega. Selle katte energiaspektri normaaljaotuse keskväärtused olid nihkunud ligikaudu 11 energiaväärtuse ühikut paremale ülejäänud spektritest. Millest järeldub, et DF2000MA peegeldab stsintillatsioonvalgust kõige paremini. Lisaks, oli beetakiirguse mõõtmistulemustest näha, et see kate annab energiaspektrite korral kõige parema müra-signaali suhte. Lühidalt – eksperimentaalselt osutus parimaks katteks DF2000MA. Üllataval kombel olid paber- ja alumiiniumfooliumkatte puhul mõõtmistulemused sarnased. Mõõtmistulemuste sarnasuse põhjuseks on alumiiniumfooliumkatte valmistamisel tekkinud kortsud kattes, mis suuremal määral peegeldasid valgust SiPM-dest eemale kuna kate ei olnud korralikult stsintillatsioonplaadi vastas.

Määrdeained mõjutasid detektori mõõtmistulemusi palju vähem kui katted. Määrdeainete võrdlemisel leiti, et detektor mõõtis taustakiirguse puhul laservedelikuga 1057B kõige rohkem sündmusi. Määramatuse piires mõõtis detektor taustakiirguse korral määrdeainetega 1057B ja EJ-550 võrdse koguse sündmusi nii paber- kui ka DF2000MA kattega. Paberkatte puhul olid detektori poolt mõõdetud energiaspektrid 1057B ja EJ-550 määrdeaine puhul sarnased. Alumiiniumfooliumkatte puhul olid mõõtmistulemused paremad

1057B määrdeainega ja DF2000MA katte korral EJ-550. Nende tulemuste alusel ei saa teha kindlat järeldust kumb on parem optiline määrdeaine: kas laservedelik 1057B või määrdeaine EJ-550. Tõenäoliselt mõjutas detektori mõõtmistulemusi määrdeainete paksus SiPM-de ja stsintillatsioonplaadi vahel.

Edaspidi tuleks täiendavalt uurida laservedelik 1057B ja EJ-550 määrdeaine mõju räni-fotokordisti stsintillatsioonvalguse tuvastamise efektiivsusele. Selleks tuleks teha detektoriga lisamõõtmised ning mõõtmiste korral kontrollida määrdeainete paksust SiPM-de ja stsintillatsioonplaadi vahel.

## Tänuavaldused

Töö autor tänab juhendajaid Madis Kiisk ja Mats Mikkor mitmekülgse juhendamise eest töö kõigis etappides.

## Kasutatud kirjandus

- [1] SilentBorder projekti kodulehekül (2021). Vaadatud 24.05.2023.  
<https://silentborder.eu/our-values/>
- [2] L. J. Schultz, K. N. Borozdin, J. J. Gomez, G. E. Hogan, J. A. McGill, C. L. Morris, W. C. Priedhorsky, A. Saunders, ja M. E. Teasdale, „Image Reconstruction and Material Z Discrimination via Cosmic Ray Muon Radiography,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 519, 687–694 (2004).
- [3] L. Bonechi, R. D’Alessandro, ja A. Giammanco, „Atmospheric Muons as an Imaging Tool,“ *Reviews in Physics* 5, 100038 (2020).
- [4] A. Knecht, A. Skawran, ja S. M. Vogiatzi. „Study of Nuclear Properties with Muonic Atoms,“ *The European Physical Journal Plus* 135, 777 (2020).
- [5] M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa, K. Nakamura, Y. Sumino, F. Takahashi, J. Tanaka, et al. „Review of Particle Physics,“ *Phys. Rev. D* 98, 030001 (2018).
- [6] „Introduction to SiPM. Technical note“. SensL, 2011.  
[https://www.seti.net/cosmic-rays/SETIPixel/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2-master/Datasheets/Intro\\_to\\_SiPMs.pdf](https://www.seti.net/cosmic-rays/SETIPixel/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2-master/Datasheets/Intro_to_SiPMs.pdf)
- [7] P. Lecoq, A. Gektin, ja M. Korzhik, „Scintillation and Inorganic Scintillators,“ kogumikus *Inorganic Scintillators for Detector Systems*, P. Lecoq, A. Gektin, ja M. Korzhik, (Springer, Cham, 2017), lk 1–41.
- [8] G. Walter, A. Coche, ja G. Laustriat, “The Slow Component of Scintillation in Stilbene,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science* 11, 44–47 (1964).
- [9] S. Saan, *Madala energiaga beetakiirguse stsintillatsioonidetektori arendamine*. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava (2022).
- [10] „Nucléide - Lara“. Laboratoire National Henri Becquerel. Vaadatud 10.05.2023.  
<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>
- [11] „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](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14160_s14161_series_kapd1064e.pdf)
- [12] Rakendusspetsiifilise integraallüliti Petiroc 2a veebileht. Vaadatud 26.05.2023.  
<https://www.caen.it/products/petiroc-2a/>

- [13] „DT5550W User Manual Rev. 1“. CAEN, 2019.
- [14] K. Dornelles ja M. Roriz, “A Method to Identify the Solar Absorptance of Opaque Surfaces with a Low-Cost Spectrometer”. PLEA 2006 - 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings, II-385 (2006).
- [15] „3M™ Specular Film DF2000MA“. 3M, 2017. Vaadatud 24.05.2023.  
<https://multimedia.3m.com/mws/media/982449O/3mtm-specular-film-df2000ma-technical-data-sheet.pdf>
- [16] V. Pozzobon, W. Levasseur, K.-V. Do, B. Palpant, P. Perré, „Household Aluminum Foil Matte and Bright Side Reflectivity Measurements: Application to a Photobioreactor Light Concentrator Design“, Biotechnology Reports 25, e00399 (2020).
- [17] „LOCTITE LB 8104“. Henkel, 2015. Vaadatud 24.05.2023.  
[https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-LB-8104-en\\_US.pdf](https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-LB-8104-en_US.pdf)
- [18] „Silicone Grease EJ-550, EJ-552“. Eljen-Technology, 2021. Vaadatud 24.05.2023.  
[https://eljentechnology.com/images/products/data\\_sheets/EJ-550\\_EJ-552.pdf](https://eljentechnology.com/images/products/data_sheets/EJ-550_EJ-552.pdf)

# Lisad

## Lisa 1 Advatech UK plastikupõhise stsintillaator materjali ATP-50515 andmed

**g** glynd@advatech-uk.co.uk  
saajale mina, Madis ▾

P, 6. november 2022, 11:41 ☆ ↶ ⋮

🗨️ Tuvasta keel ▾ > eesti ▾ Tõlgi sõnum [Lülita välja: inglise x](#)

The parameters of the offered scintillator material are:

Light Yield – Photons/MeV ~64% than C14H10  
Wavelength Emission - nm 423  
Rise Time – ns 0.9ns  
Decay Time – ns 2.3ns  
Light Attenuation – cm 210

Due to the setup costs, the minimum quantity we could offer would be x3 but the prices would be higher than quoted below.

\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\glynd  
\*\*\*

## Lisa 2 Laservedeliku 1057B andmeleht



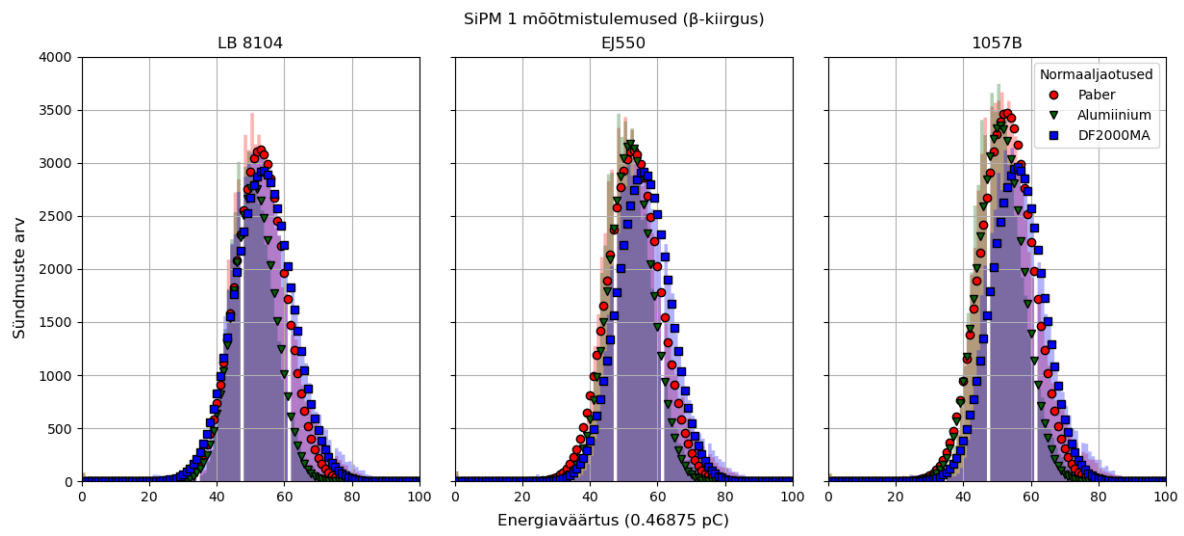
Laser Liquid **1057B**  
Refractive Index **1.56661** at 589.3 nm and 25 ° C

Cauchy Coefficients A B C  
1.540561E+00 8.3843E+03 2.2982438E+08

Cauchy Equation at 25°C  $A + B / \lambda^2 + C / \lambda^4$  ( $\lambda$  = Wavelength in nm)

Wavelength (nm)	Refractive Index	Transmittance			
		0.1 mm	1 mm	1 cm	10 cm
225.0	1.80	90	35	0	0
240.0	1.76	90	35	0	0
250.0	1.73	90	36	0	0
270.0	1.70	90	36	0	0
290.0	1.67	93	50	0	0
308.0	1.65	95	62	1	0
325.0	1.6405	99	94	56	0
365.0	1.6164	100	99	86	23
405.0	1.6002	100	99	89	32
440.0	1.5900	100	99	91	41
550.0	1.5708	100	99	92	42
589.3	1.56661	100	99	92	42
632.8	1.5629	100	99	92	42
656.3	1.5613	100	99	92	43
785.0	1.5548	100	99	92	42
840.0	1.5529	100	99	92	42
1014.0	1.549	100	99	92	45
1310.0	1.54552	100	99	89	32
1550.0	1.54409	100	97	77	7
2500.0	1.54	90	34	0	0

## Lisa 3 SiPM number 1 mõõtmistulemused beetakiirgus allika puhul



## Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Rain Eichhorn,

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

**Plastikupõhise stsintillatsioonidetektori mõõtmiseefektiivsuse võrdlemine erinevate stsintillatsioonplaadi katete ja optiliste määrdeainete puhul,**

mille juhendajad on Madis Kiisk, PhD, ja Mats Mikkor, MSc,

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 lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Rain Eichhorn*

**27.05.2023**