

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava

Roald Heinrich Ivask

Müüontomograafilises detektoris kasutatavate
stsintillatsioonkiudude karakteriseerimine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad: MSc Mats Mikkor, PhD Madis Kiisk

Tartu 2023

Müüontomograafilises detektoris kasutatavate stsintillatsioonkiudude karakteriseerimine

Müüontomograafia tehnoloogia võimaldab luua rekonstrueeritud kolmedimensioonilise pildi uuritavast objektist kasutades läbivalgustamiseks kosmilise päritoluga müüoneid. Kosmiline primaarkiirus põrkub atmosfääris olevate õhumolekulidega, mille tagajärjel tekivad müüonid jõuab merepinnani. Üks võimalus müüonite trajektoori tuvastamiseks on kasutada stsintillatsiooni nähtusel põhinevaid detektoreid. Stsintillatsioonidetektorist läbi lendav müüon annab osa oma energiast teele jäävatele molekulidele, mille tagajärjel tekib luminesentsi-järgne valgus. Registreerides tekkinud valguse ränipõhise fotokordistiga on võimalik määrata müüoni asukoht. Selle jaoks on tarvis asukoha-tundlikke plaststsintillaator kiudusid, mis on paigutatud detektorisse nii, et oleks võimalik määrata müüoni asukohta kahel teljel.

Käesolevas töös on vaatluse all kolm USA ettevõtte Luxium Solutions (varem tuntud kui Saint-Gobain) stsintillatsioonkiu tüüpi: BCF-12 ühekihiline, BCF-12 mitmekihiline ning uuendatud BCF-12 ühekihiline. Töö eesmärgiks on detektoris kasutamise jaoks teada saada kõige efektiivsem stsintillaatsioonkiudude tüüp läbi karakteriseerimise. Hüpoteesiks on, et kõige efektiivsemaks stsintillatsioonkiu tüübiks osutub stsintillatsioonkiud BCF-12 mitmekihiline. Töö käigus leidis antud hüpotees kinnitust.

Märksõnad: müüontomograafia, plaststsintillaator, müüon, stsintillatsioonidetektor, stsintillatsioonkiud, efektiivsusanalüüs

CERCS: P211 Kõrgenergeetiliste vastasmõjude uuringud, kosmiline kiirgus

Characterizing scintillating fibers for muon tomography

Muon tomography technology lets us reconstruct a three-dimensional image of the object of interest by using muons of cosmic origin for transillumination. Cosmic primary rays interact with air particles in the atmosphere, which results the creation of a muon. One of the ways to identify the trajectory of a muon is to use scintillation detectors. A muon passing through a scintillation detector transfers some of its energy to the surrounding molecules, resulting in the generation of a subsequent light emission. By detecting the generated light emission with a silicon based

photomultiplier, it is possible to determine the position of the muon. For this purpose, sensitive plastic scintillator fibers are required, which are arranged within the detector in such a way that the position of the muon can be determined along two axes.

This thesis focuses on three types of scintillating fibers by the USA enterprise Luxium Solutions (formerly known as Saint-Gobain): single-clad BCF-12, multi-clad BCF-12, and upgraded single-clad BCF-12. The aim of the thesis is to determine the most efficient type of scintillating fiber for detectors through characterization. The hypothesis is that the multi-clad BCF-12 scintillating fiber proves to be the most effective. This hypothesis was confirmed.

Keywords: muon tomography, plastic scintillator, muon, scintillation detector, scintillating fibers, effectiveness analysis

CERCS: P211 High energy interactions, cosmic rays

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Teoreetiline taust.....	7
1.1 Müüon	7
1.2 Müüontomograafia	9
1.3 Müüonidetektor ja selle ehitus	9
1.4 Kiirgusallikad	9
1.5 Stsintillatsioonkiu tüübid	10
2. Metoodika	12
3. Tulemused ja arutelu.....	18
4. Kokkuvõte.....	30
Tänuavaldused	31
Kasutatud materjalid	32

Sissejuhatus

Inimkonna areng läbi sajandite on kaasa toonud kiire ja mugava rahvusvahelise kaubanduse võrgustiku. Sellega kaasnevad paratamatult mitmed probleemid siseriikliku julgeoleku tagamisel. Esinenud on mitmeid juhtumeid, mil riigipiiri on ületanud ebaseaduslik kaup. Üksikute väikeste pakkide puhul on visuaalne ülevaatus efektiivne, kuid sellise turvalisuse tagamise meetodiga võib ilmnedu probleeme suuremate pakkide ja kaupade ülevaatusel. Selliste probleemide ennetamiseks on kasutusel mitmed turvameetmed, mis kasutavad objekti läbivalgustamiseks radiograafia meetodeid. Radiograafiaks nimetatakse protseduuri, kus analüüsitakse läbipaistmatu objekti struktuuri läbi elektromagnetkiirguse. Üldjuhul kasutatakse radiograafilise meetodi jaoks röntgenkiirgust, mille abil valgustatakse objekt läbi. Protseduuri tulemuseks on röntgenpilt, mida saab kasutada ohtlike või keelatud objektide tuvastamiseks.[1] Seejuures võivad osutada probleemiks tihedamad materjalid, mis võivad kiirgust neelata, mistõttu selle materjali varjus olevad objektid võivad jääda tuvastamata. Samuti võib esineda probleeme sarnase tihedusega objektide eristamisel.

Üheks alternatiiviks on viimase 70 aasta jooksul välja töötatud müüontomograafia tehnoloogia. Müüonid on võimelised läbi tungima oluliselt tihedamast ning paksemast ainekihist kui röntgenkiired. Röntgentehnoloogia puhul kiiratakse röntgenkiired läbi materjali ning need registreeritakse teisel pool. Materjal, mida röntgenkiir läbib neelab mingi osa tema energiast, mistõttu on võimalik kiirte registreerimisel ning pildi konstrueerimisel võrrelda erinevate materjalide energia neelduvust. Müüontomograafia puhul kasutatakse allikana kosmilise päritoluga müüoneid, mis tekivad Maa atmosfääris olevate osakeste ja kosmilise kiirguse vastasmõju tulemusena. Müüontomograafia meetodeid on võimalik kasutada kuvatehnoloogiate loomiseks geotehnilistes uuringutes, tuumajäätmete uuringutes, rahvusvahelise turvalisuse tagamiseks, looduskatastroofide ennustamiseks ja teistes valdkondades.[2]

Müüontomograafia läbiviimiseks on tarvis registreerida uuritavast objektist läbi liikuvad müüonid enne objekti sisenemist ning ka objektist väljudes. Selle tarbeks on loodud mitmeid detektortehnoloogiaid. Mõningad detektortehnoloogiaid on näiteks stsintillatsioonidetektorid, emulsioonidetektorid ning gaasi detektorid. Käesoleva töö raames on tähelepanu all stsintillatsioonidetektorid. Tegemist on võrdlemisi lihtsa ning robustse detektor-lahendusega.[2]

Stsintillatsioonidetektorid kasutavad plaststsintillaatoreid, mis laetud osakeste mõjul genereerivad registreeritavat valgust stsintillatsiooni omadusega luminestsentsi käigus. Luminestsentsi käigus genereeritavat valgust registreerib ränipõhine fotokordisti, mis tõlgendab kohale jõudnud footonite arvu laengu väärtusena. Teatud energiaga laetud osake läbides stsintillatsiooni omadusega materjali annab teatud osa oma energiast luminestsentsi jaoks. Asetades vaadeldava objekti kahe stsintillatsioonidetektori vahele on võimalik määrata, kui palju energiat kaotab osake objekti läbimisel. Kirjeldatud protsessi tulemusena saadud andmetega on võimalik määrata objekti tihedus. Vaadeldava objekti ligikaudse kolmemõõtmelise rekonstruktsiooni kujutamiseks saab kasutada asukohatundlikut detektor konfiguratsiooni, mille tööpõhimõte seisneb objekti läbinud osakese hajumisnurga tuvastamisel. Hajumisnurgaks nimetatakse osakese trajektoori muutust, mis ilmneb kui osake on vastastikmõjus kõrge laenguarvulise aatomiga vaadeldavas objektis.

Töö eesmärgiks on detektoris kasutamise jaoks teada saada kõige efektiivsem stsintillatsioonikiu tüüp läbi karakteriseerimise. Töös vaatluse all olevad stsintillatsioonikiu tüübid on USA ettevõtte Luxium Solutions (varem tuntud kui Saint-Gobain) poolt välja töötatud ühekihiline BCF-12, selle uuendatud mudel ning mitmekihiline BCF-12.

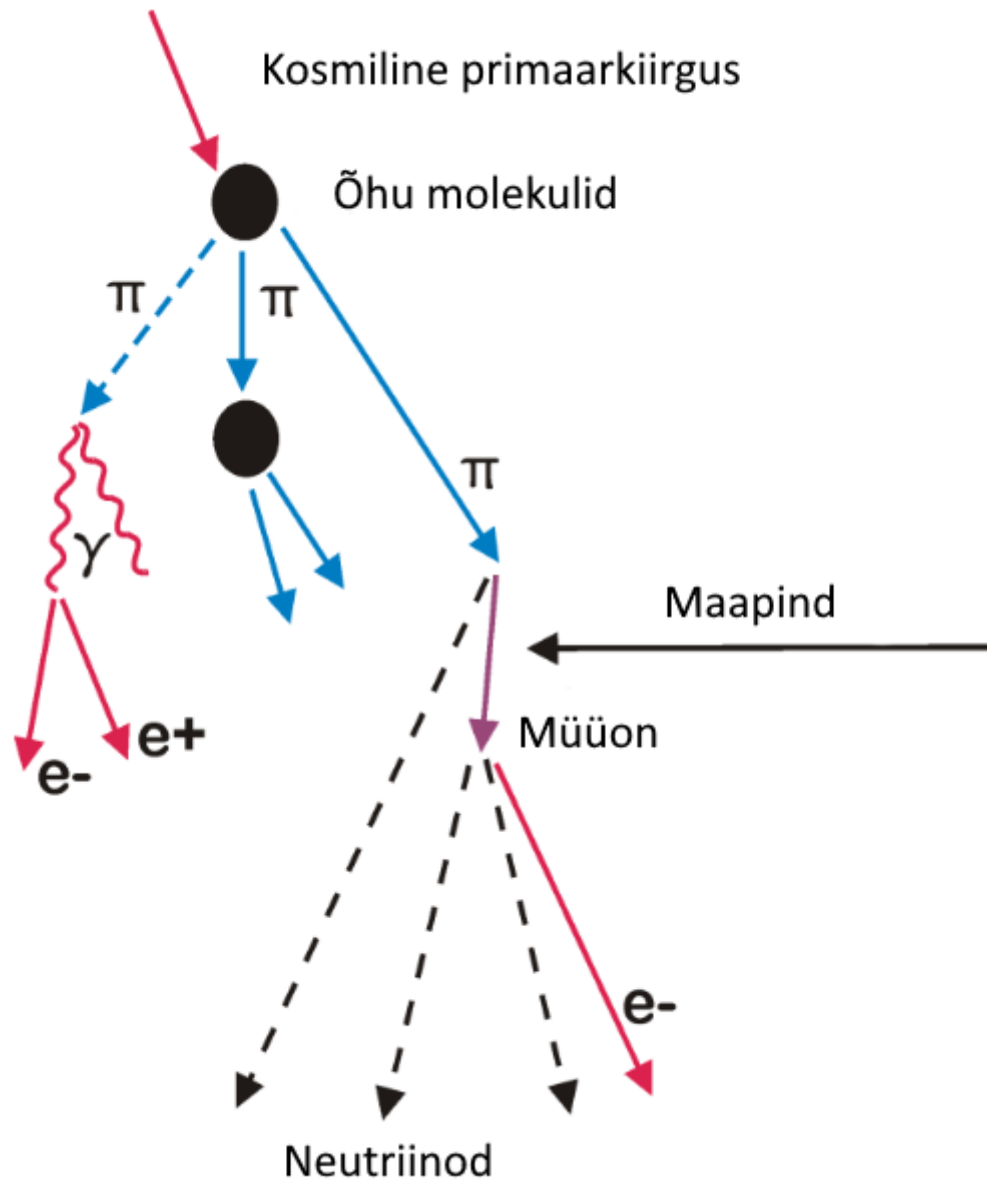
Töö hüpoteesiks on, et kõige efektiivsemaks stsintillatsioonikiu tüübiks osutub mitmekihiline BCF-12.

Töö käigus uuritakse, missugune stsintillatsioonikiu tüüp on kõige efektiivsem detektoris kasutamiseks. Pärast efektiivsuse määramist uuritakse, kui palju efektiivsem on see stsintillatsioonikiud võrreldes teiste kiu tüüpidega.

1. Teoreetiline taust

1.1 Müüon

Müüon on elementaariosake, mis kuulub leptonite klassi. See avastati 1936. aastal Carl D. Andersoni ja Seth Neddermeyeri poolt California Tehnoloogiainstituudis kosmilist kiirgust uurides. Müüoni avastus leidis kinnitust 1937. aastal J. C. Streeti ja E. C. Stevensoni poolt läbi viidud Wilsoni kambri eksperimendiga.[3] Müüoni mass on umbes 200 korda suurem kui elektronil ning tänu sellele omadusele on see võimeline läbima palju paksemaid ja tihedama koostisega esemeid kui röntgenkiirgus. Müüonid on kosmilise päritoluga. Need tekivad kosmilise kiirguse ja Maa atmosfääri ülemise kihi vaheliste interaktsioonide tulemusena.[2] Kosmiline primaarkiirgus ehk kosmilise päritoluga hadronid, mis jõuavad Maa atmosfääri, tabavad õhumolekule, mille tagajärjel tekib hulgaliselt osakesi, kaasa arvatud piioneid. Piionid lagunevad umbes 14 km kõrgusel maapinnast omakorda müüoniteks (vt joonist 1).



Joonis 1. Müüonite tekke ahel kosmilise primaarkiirguse interaktsiooni tulemusel õhumolekulidega.[4]

Müüoni eluiga on teadaolevalt keskmiselt 2,2 μ s. Sellegipoolest jõuavad müüonid tulenevalt relativistlikest efektidest merepinnani.[5] Merepinnani jõudev müüonivoog on keskmiselt 1 müüon ruutsentimeetri peale minutis.[6]

1.2 Müüontomograafia

Müüontomograafia on tehnoloogia, mida on arendatud 1950ndatest alates.[7] See tehnoloogia võimaldab luua kolmemõõtmelise kujutise uuritavast objektist kasutades müüonite Coulomb'i hajumist. Müüontomograafias mõõdetakse müüoni trajektoor uuritavasse objekti sisenemisel ning uuritavast objektist väljumisel. Uuritavasse objekti sisenev müüon hajub ehk kaldub trajektoorilt kõrvale tänu objekti koostises olevale aatomile, mistõttu müüoni trajektoor muutub aatomnumbrist sõltuva hajumisnurga all. Hajumisnurgaks nimetatakse nurka müüoni algse trajektoori ning hajumise järgse trajektoori vahel.

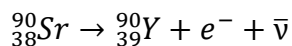
1.3 Müüonidetektor ja selle ehitus

Müüontomograafilise protsessi läbi viimiseks kasutatakse müüonidetektoreid. Müüonidetektori tüüpe on mitmeid, kuid käesoleva töö raames kasutatakse stsintillatsioonkiududel põhinevat detektorit. Stsintillatsioonkiud koosneb polüstüreenist, millesse on sisse viidud fluorestseeruvad lisandid soovitud stsintillatsiooni nähtuse tekkimiseks. Kiududele on kantud polümetüülmetakrülaati (ingl *Polymethyl Methacrylate*) ehk PMMA vooderdis, mis kaitseb kiudusid ning võimaldab müüonite läbimisel fluorestsentsi käigus tekkivate footonite sisepeegeldumisest tulenevat efektiivsuse kasvu.[8] Detektor on asetatud valguskindlasse kasti ning ühendatud ühe otsaga ränipõhise fotokordisti ehk SiPM-i (ingl *Silicon Photomultiplier*) külge. SiPM on kinnitatud Itaalia ettevõtte CAEN SpA poolt välja töötatud andmehõiveplaadi külge, mis on ühendatud sama ettevõtte poolt arendatud mõõtmistarkvaraga.

1.4 Kiirgusallikad

Loodusliku kosmilise päritoluga müüonvoogu pole mõistlik kasutada kiirgusallikana, sest voo suuruseks on umbkaudu 1 müüon ruutsentimeetri peale minutis, mis tähendab, et arvestades ühe 2 m stsintillatsioonkiu pindalaga, peab piisava suurusega andmeseeria saamiseks koguma SiPM-lt saadavaid sündmuseid liigselt suure ajavahemiku jooksul. Hea variant müüonvoo simuleerimiseks on strontsium 90 ehk Sr-90 kiirgusallikas. Selle kiirgusallika tulemuste võrdlemine annab hea ettekujutuse stsintillatsioonkiudude tegelikust efektiivsusest. Tegemist on radioaktiivse

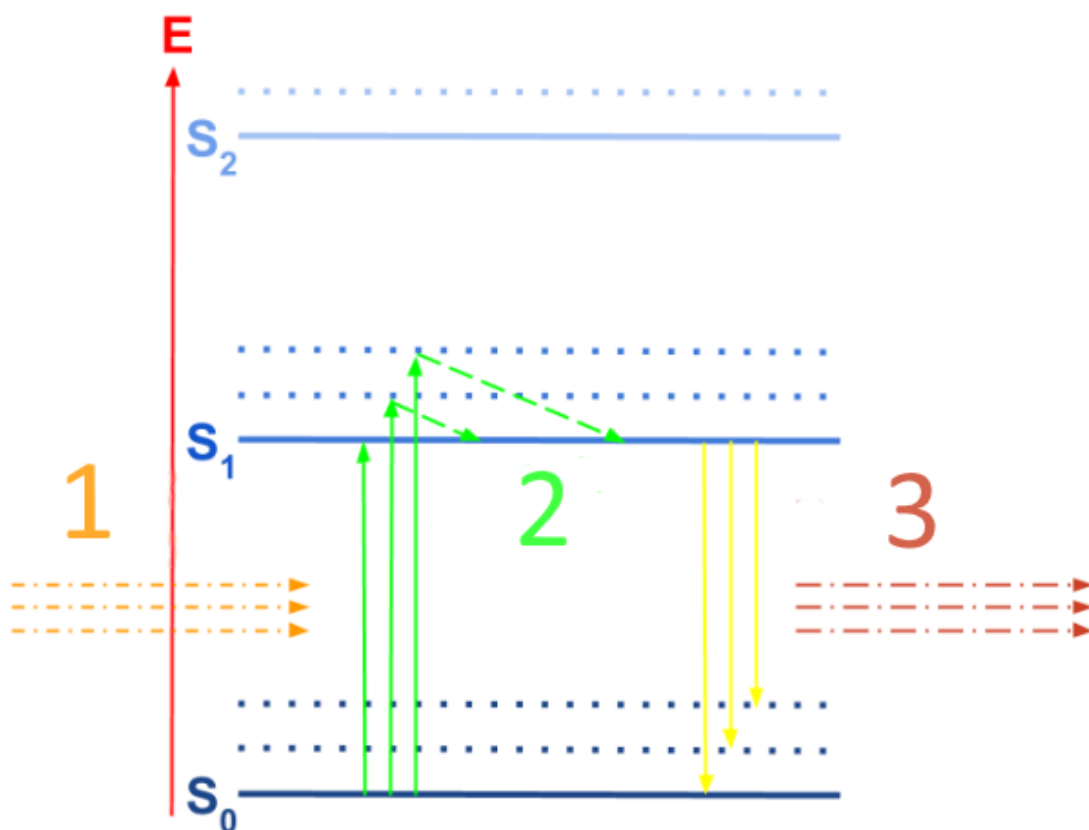
strontsiumi isotoobiga, mis on β^- laguneja.[9] Sr-90 kiirgusallika β^- -lagunemise valem on toodud välja võrrandis 1.



Võrrand 1. Sr-90 β^- -lagunemise valem.

1.5 Stsintillatsioonkiu tüübid

Stsintillatsioonkiu tüüpe on loodud erinevatel eesmärkidel mitmeid. USA ettevõtte Luxium Solutions on välja töötanud mitmeid stsintillatsioonkiu tüüpe, kuid töö jaoks valiti kolm tüüpi: ühekihiline BCF-12, mitmekihiline BCF-12 ning uuendatud ühekihiline BCF-12. Valitud stsintillatsioonkiud on piisava läbimõõduga asukoha määramiseks vajamineva lahutusvõime jaoks ning nendes kulgeva valguse hajumistee pikkus on piisavalt suur. Samuti on valitud stsintillatsioonkiududes genereeritava valguse lainepikkus SiPM-i kõige efektiivsemas piirkonnas. Eelnimetatud stsintillatsioonkiud on keemiliselt orgaanilised. Laetud osake interakteerub stsintillatsioonkiu tuumas ainega, mistõttu aine molekulid ergastuvad (vt joonist 2). Põhiseisundisse naastes kiirgavad molekulid footoneid, mis rändavad mööda stsintillatsioonkiudu mõlemas suunas.



Joonis 2. Kolmeks etapiks jaotatud ergastuva molekuli luminesentsi protsess. 1. Laetud osakesed 2. Molekuli energiaseisundite muutus 3. Fluorestsents.[10]

PMMA vooderdis vähendab niinimetatud ülekostet (ingl *cross-talk*) ehk kiudude vahelist valguse leket.[11] Stsintillatsioonikiu tehnoloogia on asukoha-tundlikkust vajaminevas müöntomograafia valdkonnas vajalik, sest uuritava objekti rekonstrueerimiseks on tarvis võimalikult täpseid ning suure lahutusega andmeid väikeste hajumisnurkade tuvastamiseks.

2. Metoodika

Käesolevas töös kinnitati katsestendile kolme eri tüüpi stsintillatsioonkiud ning stsintillatsioonkiu ribad mõõtmiste läbiviimiseks. Eesmärk on saada mõõtmiste andmed edasiseks analüüsiks.

Katsestend oli kinnitatud valguskindlasse kasti. Tegemist oli metallist konstruktsiooniga, mis võimaldab kindlatele vahekaugustele paigaldada kiirgusallika (vt joonist 3). Valguskindlasse kasti oli kinnitatud CAEN DT5500W trükkplaat, mis oli otseses ühenduses andmelugemise tarkvaraga. Trükkplaadile oli kinnitatud räni fotokordisti ehk SiPM, mille abil on võimalik tõlgendada SiPM-ni jõudnud valgust elektriimpulsi väärtustena. Käesolevas töös oli kasutusel KETEK PA3325-wb-0808 ränipõhine fotokordisti, mis võimaldab lugeda 64 kanaliga ühendatud stsintillatsioonkiu riba.

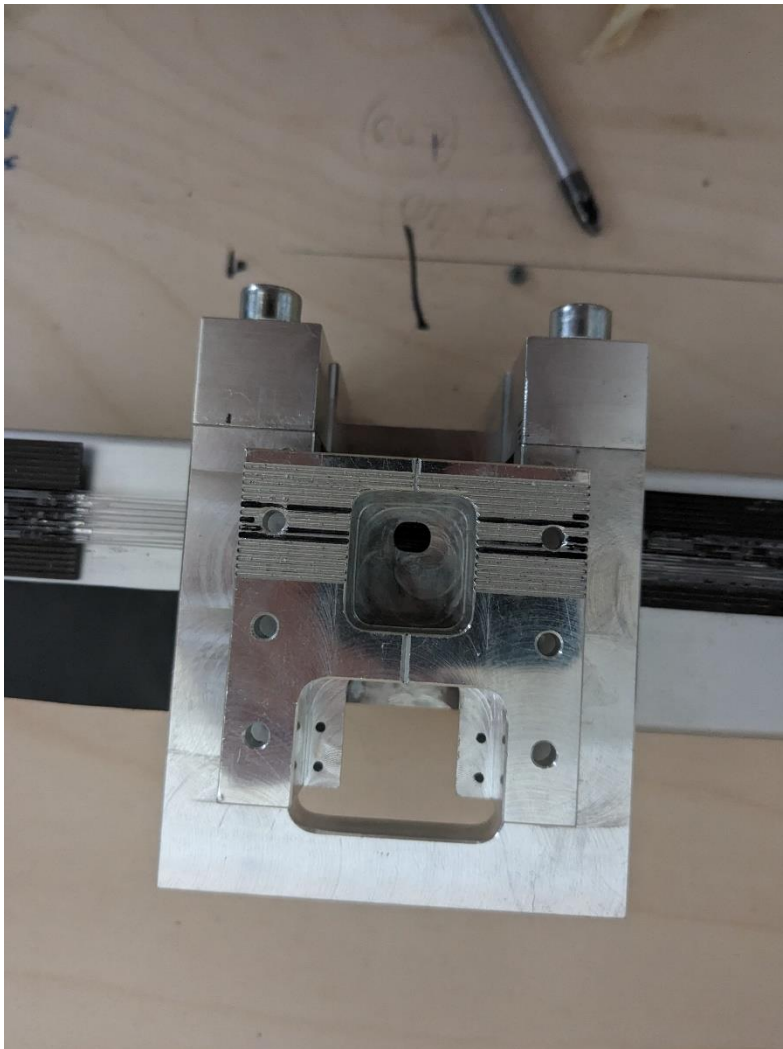


Joonis 3. Valguskindlas kastis olev katsestend, mille peale on asetatud stsintillatsioonkiu riba.

Töö on jaotatud kolme etappi.

Esimeses etapis viiakse läbi eelnevalt nimetatud kolme tüüpi stsintillatsioonkiu efektiivsuste mõõtmised üksikute kiududena. Eesmärgiks on jõuda järelduseni kõige efektiivsema stsintillatsioonkiu tüübi osas. Selleks loodi ühekihilisest BCF-12, selle uuendatud mudelist ning mitmekihilisest stsintillatsioonkiust kolmekiuline mõõtestend nii, et kiude saaks eraldi

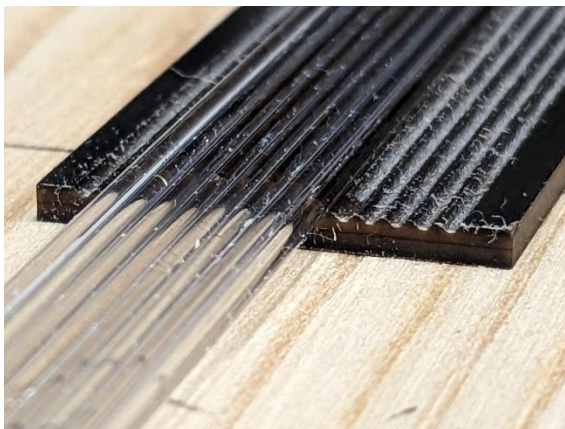
kiirgusallika all hoida. Seejärel asetati antud riba katsestandile ning kinnitati üks ots SiPM-i külge lähtudes seejuures nõudest, et iga stsintillatsioonkiud oleks otseses kontaktis eraldi oleva fotokordisti kanaliga. See võimaldab lugeda üksikute kiudude andmeid nii, et kõrval olevad kiud tulemust ei mõjutaks. Mõõtmiste alustamiseks lülitati sisse plaat ning pingestati SiPM. Mõõtmised teostati Sr-90 allikaga kaugustel 40 cm, 120 cm ja 180 cm SiPM-st. Läbi viidi ka 5 mõõtmist Sr-90 allikaga 40 cm kaugusel SiPM-st kiirgusallika võimaliku määramatuse määratlemiseks. Kiirgusallikas kinnitati umbes 1,5 cm kõrgusele stsintillatsioonkiududest. Kinnitamiseks kasutati eraldi seisvat seadeldist, mille saab kinnitada kolmele eri kaugusele SiPM-st (vt joonist 4).



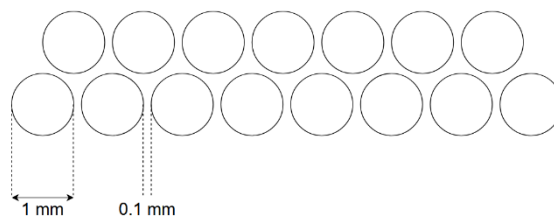
Joonis 4. Katsestandile paigutatav seadeldis, millele asetatakse kiirgusallikas. Kiirgusallikas asetatakse seadeldisel olevatele joondussoontega kohakuti nii, et see oleks alati stsintillatsioonkiudude suhtes samas kohas.

Töö teise etapi eesmärgiks on luua kolmest eri tüüpi stsintillatsioonkiust 2 m ribad, mida saab samuti asetada katsestendile ning kinnitada SiPM-i külge.

Töös kasutusel olevate stsintillatsioonkiu ribade ehitamiseks kasutati kahte 8x8 maatriksiga kollektorplaati (vt joonist 7), mis olid kinnitatud mõlemasse otsa. Riba koostamiseks laoti kaks stsintillatsioonkiu kihti teatud vahemaa tagant joendusplaatidele. Igal stsintillatsioonkiu riba alumisele kihile paigaldati 8 kiudu ning ülemisele 7 kiudu (vt joonist 5 ja 6). See võimaldab mõõta stsintillatsioonkiudude kollektiivset efektiivsust ning neid omavahel võrrelda erinevate kiu tüüpide puhul. Samuti annavad joendusplaadid ribale struktuurilise toe.

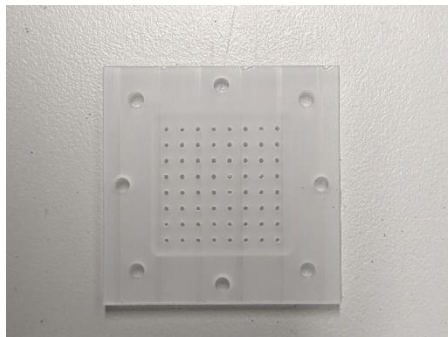


Joonis 5. Joendusplaadile liimitud stsintillatsioonkiud riba loomiseks.



Joonis 6. Stsintillatsioonkiu riba konfiguratsioon. Alumisel kihil 8 kiudu, ülemisel 7. Stsintillatsioonkiu läbimõõt on 1 mm ning riba samm 0,1 mm.

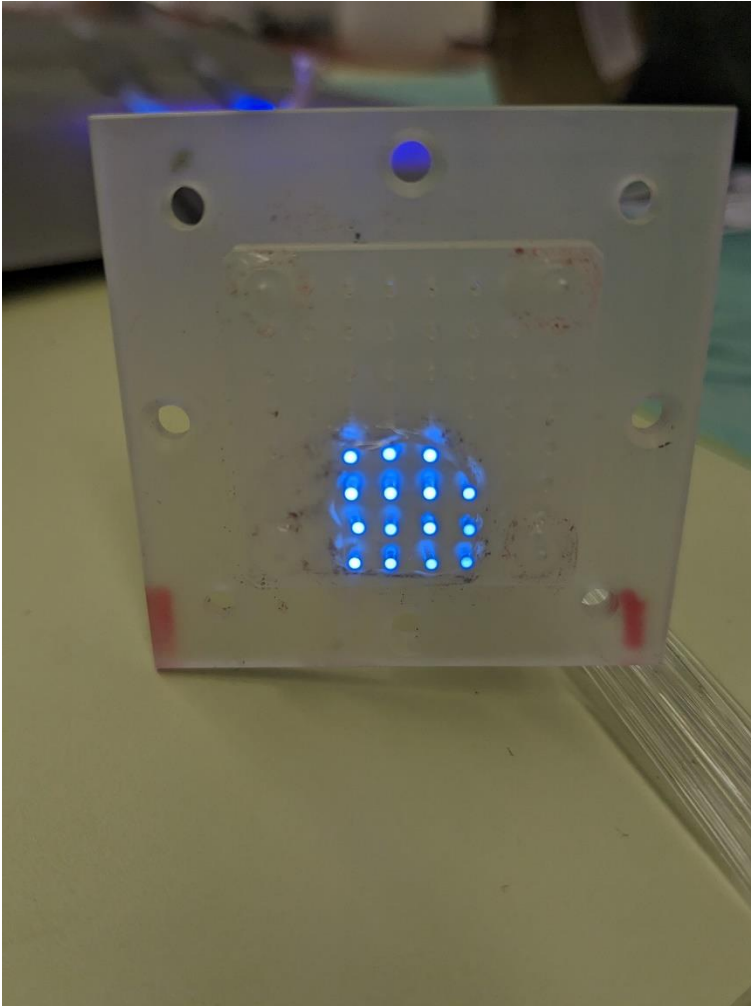
Järgmise sammuna viidi läbi stsintillatsioonkiudude liimimine kollektorplaatides olevatesse aukudesse (vt joonist 7). Selleks kasutati UV-liimi Henkel LOCTITE AA 3311. Seejärel viidi läbi



Joonis 7. Stsintillatsioonkiu riba mõlemas otsas olev kollektorplaat

stsintillatsioonikiu ribade lihvimine nii, et mõlemad otsad oleksid korrapäraseid SiPM-le kinnitamiseks.

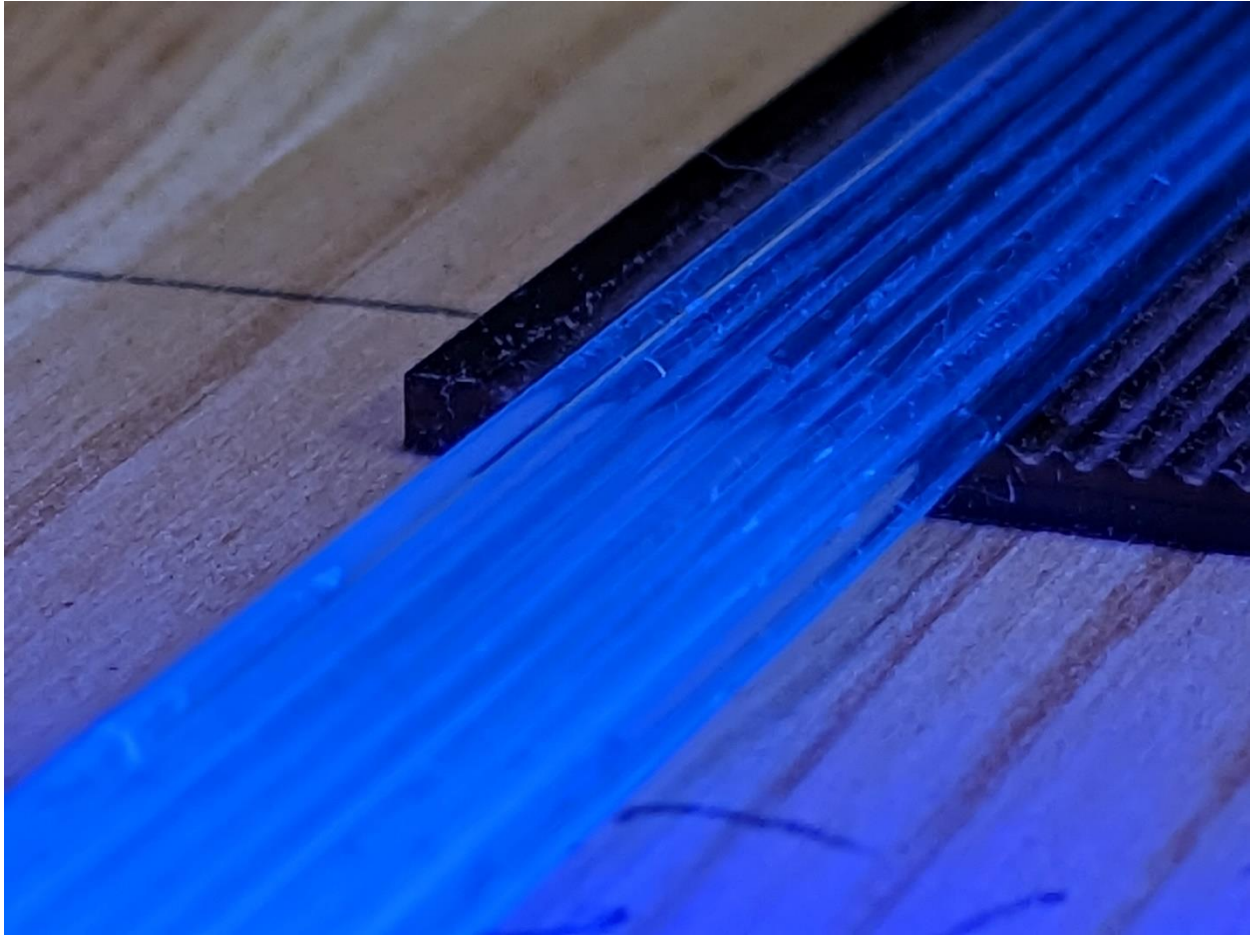
Kinnitamisel lisati SiPM-i ja riba vahele optilist määret EJ-550, mis vähendab mõõtmistel märkimisväärselt valguskadu. Lihvimiseks kasutati vastavas järjekorras lihvpabereid P-400, P-2500, P-3000 ja P-8000. Valminud stsintillatsioonikiu riba ots on nähtav joonisel 8.



Joonis 8. Stsintillatsioonikiu riba ots peale lihvimist.

Seejärel lülitati detektorsüsteem sisse ning viidi läbi tööks vajalikud mõõtmised trükkplaadi jaoks loodud tarkvaraga.

Töö käigus arvestati, et mõõtmistes olulistel kaugustel oleks riba pingul selleks, et simuleerida täiemahulise detektorplaadi puhul laetud osakeste läbimist. UV kiirgusallika all olev stsintillatsioonkiu riba on nähtav joonisel 9.



Joonis 9. Stsintillatsioonkiu riba UV kiirgusallika all.

Mõõtmised viiakse läbi, sarnaselt esimesele etapile, Sr-90 allikaga kolmel eri kaugusel SiPM-st.

Kolmanda etapi eesmärgiks on välja selgitada kõige efektiivsem stsintillatsioonkiu tüüp ning võrrelda neid omavahel nii üksikku kujul kui ka riba kujul. Selle ni jõudmiseks viiakse esmalt läbi mõõtmiste käigus toimuvate sündmuste arvu analüüs. Leitakse sündmuste hulk, mis esines teatud stsintillatsioonkiu mõõtmisel vastava ajavahemiku jooksul ning seejärel võrreldakse tulemusi omavahel. Kirjeldatud analüüs võimaldab luua ettekujutuse eri tüüpi stsintillatsioonkiudude erinevatest omadustest ning parameetritest. Üks tähtsamatest parameetritest antud mõõtmistel on

stsintillatsioonkiu kattekihtide arv. Käesolevas töös võrreldavad stsintillatsioonkiud on ühe- ja kahekihilised. Järgnevalt viiakse läbi analüüs valgussaagisele ehk valgushulgale, mis jõuab SiPM-ni. Teades keskmist SiPM-ni jõudvat valgushulka, on samuti võimalik teha järeldusi stsintillatsioonkiudude optiliste omaduste kohta. Viimaseks tehakse järeldused töös läbi viidud andmeanalüüsist ning arutletakse tulemuste üle.

Andmeanalüüsi läbiviimiseks kasutatakse programmeerimiskeelt Python, mille pakettide Matplotlib ja Pandas abil saab luua tulemuste võrdlemiseks ja visualiseerimiseks graafikuid ning tabeleid. Käesoleva töö raames saadud mõõtmiste andmete töötlemiseks kasutatakse sündmuste valgussaagise lävendiks väärtust 45. See tähendab, et analüüsimisel ei loeta sündmuseid, kus konkreetse stsintillatsioonkiuga ühendatud kanal registreerib lävendist allapoole jäävat valgussaagist ehk valguse intensiivsust. See võimaldab eraldada mõõtmiste andmetest müra, mille põhjustab keskkond.

3. Tulemused ja arutelu

Käesoleva töö raames viidi läbi iga stsintillatsioonkiu tüübiga ühekiulised mõõtmised ning riba kujul mõõtmised kolmel eri kaugusel. Töö tarbeks teostati järgnevad ühekiulised 20-minutilised mõõtmised (vt tabelit 1). Teostati ka standardhälve leidmiseks 5-minutilised mõõtmised.

Tabel 1. Teostatud ühekiulised mõõtmised.

Stsintillatsioonkiu tüüp:	BCF-12 ühekiuline	BCF-12 mitmekihiline	BCF-12 ühekiuline (uuendatud)
Allikas 40 cm kaugusel	1	1	1
Allikas 120 cm kaugusel	1	1	1
Allikas 180 cm kaugusel	1	1	1
Standardhälve mõõtmised, allikas 40 cm kaugusel	5	0	0

Andmete analüüsi käigus on arvestatud asjaoluga, et leitav standardhälve rakendub kõikidele ühekiulistele mõõtmistele, sest iga mõõtmise vahel liigutati kiirusallika asetust seadeldisel allika asukoha muutmiseks. Ühekiuliste mõõtmiste sündmuste arvu analüüsi tulemused on nähtavad tabelis 2.

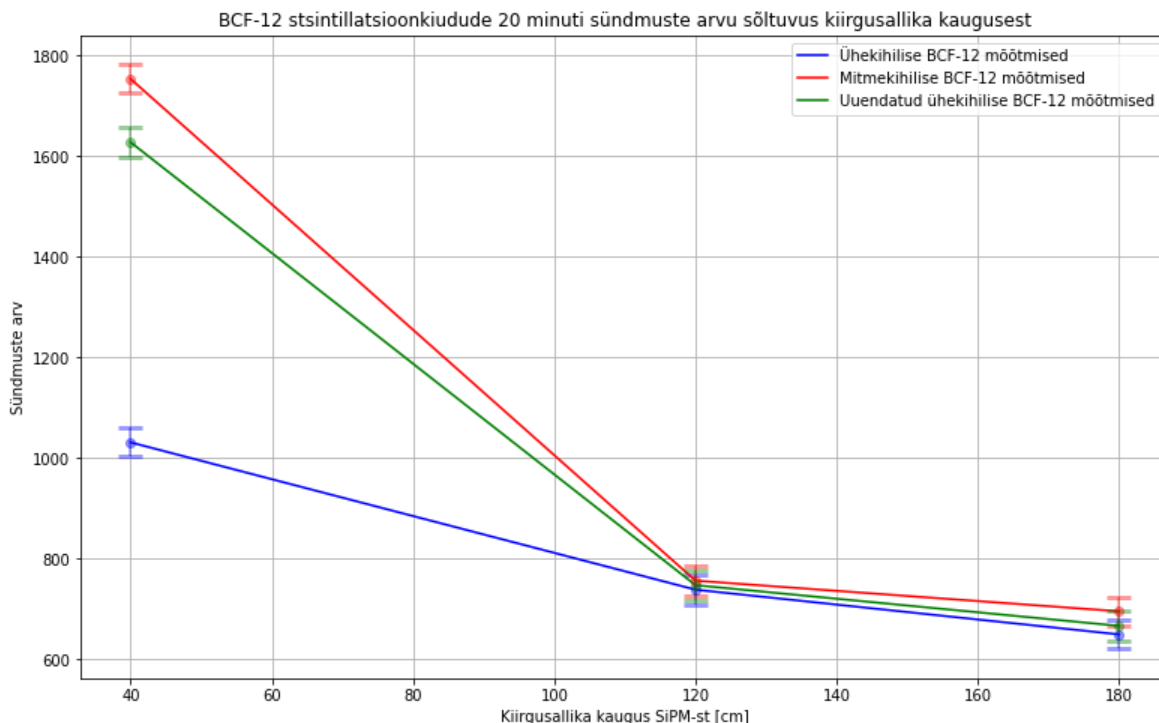
Tabel 2. Ühekiuliste mõõtmiste sündmuste arvu tulemused

Stsintillatsioonkiu tüüp:	BCF-12 ühekiuline	BCF-12 mitmekihiline	BCF-12 ühekiuline (uuendatud)
Allikas 40 cm kaugusel	1031	1754	1628
Allikas 120 cm kaugusel	738	756	747
Allikas 180 cm kaugusel	649	695	666
Standardhälve	29	29	29

Standardhälve arvutati vastavate ühekiuliste BCF-12 mõõtmiste keskmiste sündmuste arvu suhtes (vt tabelit 3).

Tabel 3. Standardhälbe arvutamiseks kasutatud mõõtmiste tulemused.

Mõõtmise number:	1	2	3	4	5
Keskmine sündmuste arv	328	363	385	367	395



Joonis 10. Ühekihiliste stsintillatsioonkiudude 20 minutiliste mõõtmiste sündmuste arvu sõltuvus kiirgusallika kaugusest. Sinine, punane ja roheline värvus viitab vastavalt ühekihilise, mitmekihilise ja uuendatud ühekihilise BCF-12 mõõtmistele.

Analüüsist järeldub, et SiPM-ni jõudnud valgushulk sõltub allika kaugusest (vt joonist 10). Tõele vastab asjaolu, et sündmuste hulk, juhul kui kiirgusallikas on 120 cm kaugusel, on umbkaudu 50,78% ning juhul kui allikas on kaugusel 180 cm, siis 45,55% 40 cm kaugusel tehtud mõõtmiste keskmisest sündmuste arvust. Võib täheldada, et 120 cm ja 180 cm mõõtmiste puhul on sündmuste hulga efektiivsus ühekihilise ning selle uuendatud mudeli puhul sarnane. Samadel allika kaugustel teostatud mõõtmiste puhul on mitmekihiline stsintillatsioonkiud keskmiselt umbes 3,5% efektiivsem teistest stsintillatsioonkiududest sündmuste arvu poolest 20 minuti jooksul. Antud järelduse puhul on jäetud välja mõõtmised, kus allika kaugus SiPM-st on 40 cm, sest ühekihilise kiu sündmuste arvu tulemus jääb oodatavast sündmuste hulga diapsoonist suuresti välja. Selle põhjuseks on tõenäoliselt valguskadu, mis on tingitud halvast ühendusest stsintillatsioonkiu ja SiPM-i vahel.

Järgnevalt analüüsiti SiPM-ni jõudva valgushulga intensiivsust ehk valgussaagist. Selleks loeti andmed programmi ning leiti keskmine SiPM-ni jõudnud valguse intensiivsus. Sarnaselt

sündmuste hulga analüüsile võetakse arvesse ka standardhälve. Järgnevalt tabelis 4 on esitatud ühekiuliste mõõtmiste valgussaagise tulemused.

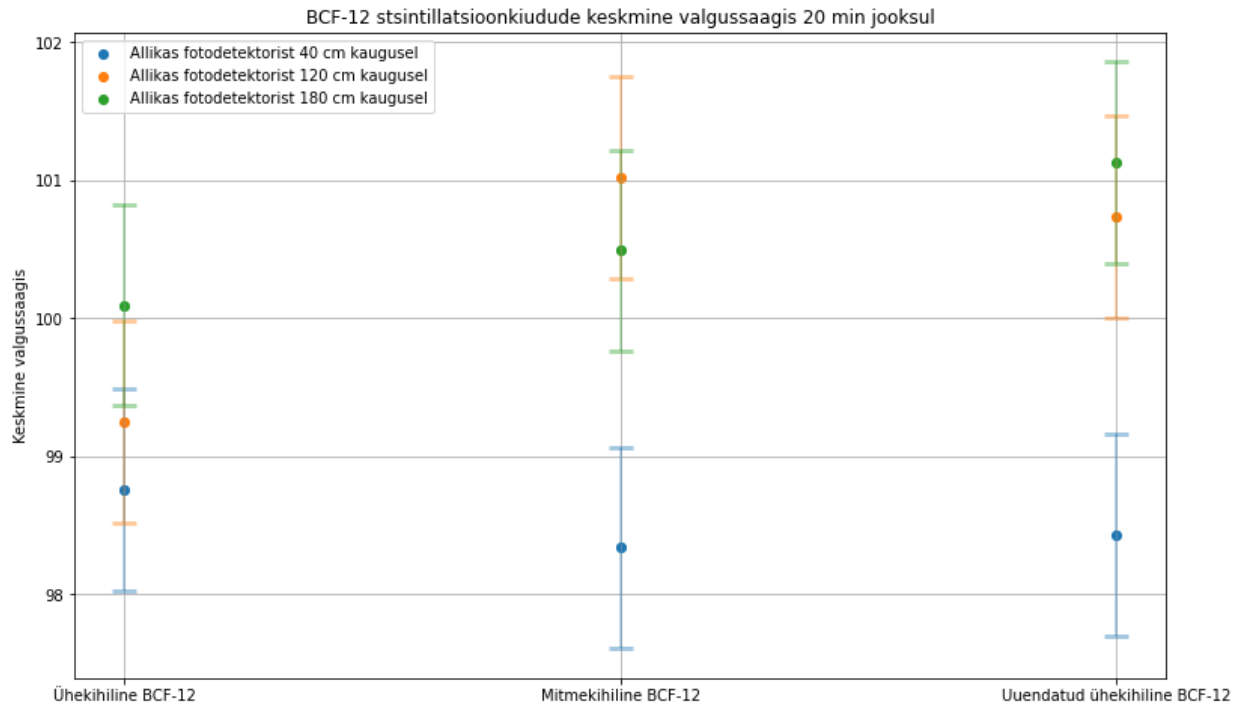
Tabel 4. Ühekiuliste mõõtmiste valgussaagise tulemused.

Stsintillatsioonkiu tüüp:	BCF-12 ühekiuline	BCF-12 mitmekiuline	BCF-12 ühekiuline (uuendatud)
Allikas 40 cm kaugusel	~98,76	~98,34	~98,43
Allikas 120 cm kaugusel	~99,25	~101,02	~100,74
Allikas 180 cm kaugusel	~100,1	~100,49	~101,13
Standardhälve	~0,73	~0,73	~0,73

Standardhälve arvutati vastavate ühekiuliste BCF-12 mõõtmiste keskmiste valgussaagiste suhtes (vt tabelit 5).

Tabel 5. Standardhälbe arvutamiseks kasutatud mõõtmiste tulemused.

Mõõtmise number:	1	2	3	4	5
Keskmine valgussaagise väärtus	~100,86	~100,07	~101,53	~100,32	~101,54



Joonis 11. Ühekiuliste 20 minutiliste mõõtmiste keskmise valgussaagise analüüs. Sinine, oranž ja roheline värvus viitab vastavalt mõõtmistele allika kaugustel 40 cm, 120 cm ja 180 cm.

Analüüsi tulemustest võib järeldada, et 40 cm mõõtmiste puhul on iga stsintillatsioonkiu valgushulga intensiivsus väiksem kui juhtudel, mil kiirusallikas on kaugemal (vt joonist 11). Sündmuste hulga analüüsist võib täheldada vastupidist sõltuvust. See viitab asjaolule, et SiPM-ni jõudva valgushulga intensiivsuse jaotus sõltub kaugusest. Juhtudel, mil stsintillatsiooni nähtus toimub SiPM-le lähemal, jõuab suuremal hulgal footoneid fotokordistini, mistõttu registreeritakse üle valgussaagise lävendi olevaid sündmuseid rohkem kui juhtudel, mil registreeritava valgushulga teke on kaugemal. Seevastu kahaneb aga keskmine sündmustes registreeritud valguse intensiivsus. Käesoleva analüüsi puhul pole mõistlik teha järeldusi eri stsintillatsioonkiu tüüpide efektiivsuse osas, sest keskmine intensiivsus varieerub umbkaudu kõigest 2%, mistõttu määratus on liigselt suur tõepäraste järelduste tegemiseks.

Ühekihiliste stsintillatsioonkiudude analüüsi tulemustest võib järeldada, et Saint-Gobain mitmekihiline BCF-12 on töös võrreldavate stsintillatsioonkiudude hulgast kätte saadud sündmuste arvu poolest kõige efektiivsem. Eelnimetatud stsintillatsioonkiu tüüp on umbes 3,5% efektiivsem sündmuste arvu poolest. See tähendab, et mitmekihilises stsintillatsioonkius tekib stsintillatsiooni efekti käigus suuremal hulgal üle analüüsi kasutatud valgussaagise lävendi jaoks

vajamineva valgushulga intensiivsusega footoneid kui ülejäänud stsintillatsioonkiu mudelite puhul.

Järgnevalt viidi läbi töös vaatluse all olevatest stsintillatsioonkiududest ehitatud ribade mõõtmiste analüüs. Iga stsintillatsioonkiu ribaga teostati üks 10-minutiline mõõtmine allika kaugusel 40 cm, 120 cm ja 180 cm ning viidi läbi viis 5-minutilist mõõtmist standardhälbe leidmiseks allika kaugusel 40 cm. Mitmekiuliste ribade mõõtmiste analüüs on esitatud tabelis 6.

Tabel 6. Teostatud mitmekiuliste ribade mõõtmised.

Stsintillatsioonkiu tüüp:	BCF-12 ühekiuline riba	BCF-12 mitmekiuline riba	BCF-12 ühekiuline (uuendatud) riba
Allikas 40 cm kaugusel	1	1	1
Allikas 120 cm kaugusel	1	1	1
Allikas 180 cm kaugusel	1	1	1
Standardmääramatuse mõõtmised, allikas 40 cm kaugusel	5	5	5

Esmalt viidi läbi mõõtmiste käigus kogutud sündmuste hulga analüüs iga stsintillatsioonkiu riba puhul. Tulemused on järgnevad (vt tabelit 7).

Tabel 7. Mitmekiuliste ribade mõõtmiste sündmuste arvu tulemused.

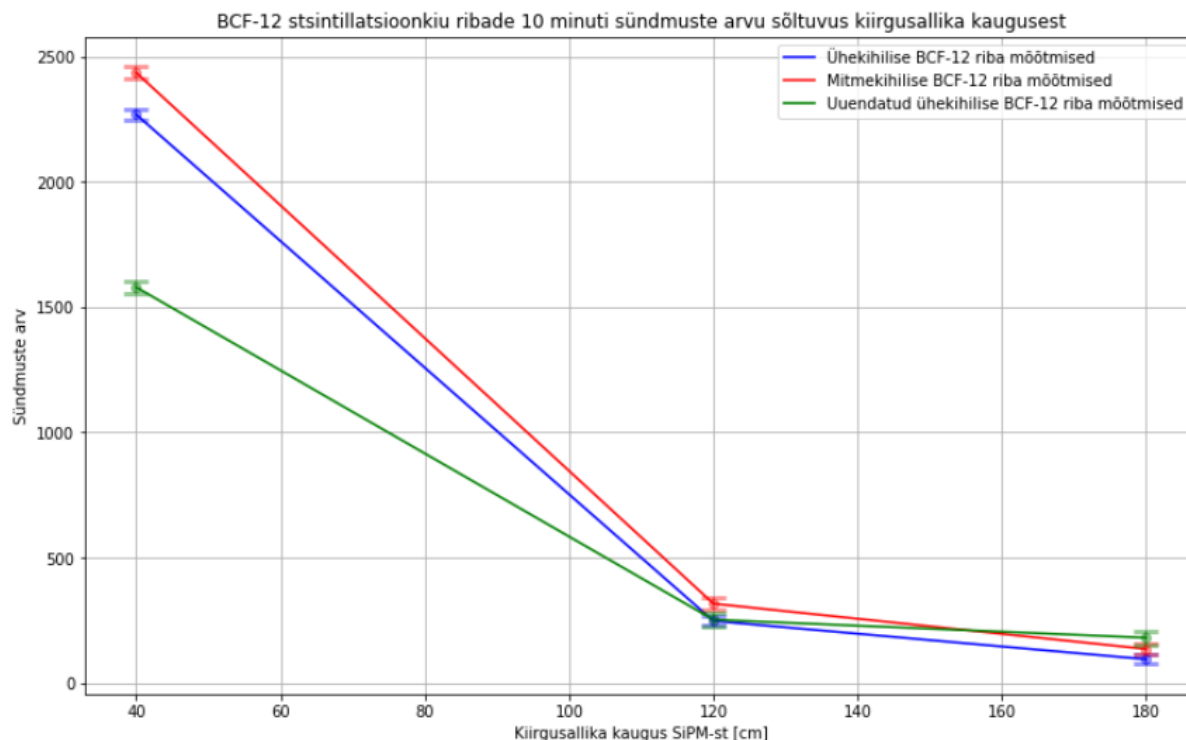
Stsintillatsioonkiu tüüp:	BCF-12 ühekiuline	BCF-12 mitmekiuline	BCF-12 ühekiuline (uuendatud)
Allikas 40 cm kaugusel	2268	2435	1579
Allikas 120 cm kaugusel	248	317	253

Allikas 180 cm kaugusel	95	136	181
Standardhälve	19	24	26

Standardhälve arvutati vastavate BCF-12 ribade mõõtmiste keskmiste sündmuste arvu suhtes (vt tabelit 8).

Tabel 8. Standardhälbe arvutamiseks kasutatud mõõtmiste tulemused.

Mõõtmise number:	1	2	3	4	5
Ühekihilise BCF-12 keskmine sündmuste arv	1130	1138	1166	1065	1138
Mitmekihilise BCF-12 keskmine sündmuste arv	1220	1174	1209	1193	1152
Uuendatud ühekihilise BCF-12 keskmine sündmuste arv	798	787	837	840	802



Joonis 11. Mitmekiuliste ribade 10 minutiliste mõõtmiste sündmuste arvu sõltuvus kiirgusallika kaugusest. Sinine, punane ja roheline värvus viitab vastavalt ühekihilise, mitmekihilise ja uuendatud ühekihilise BCF-12 mõõtmistele.

Antud analüüsis võib täheldada sarnast tulemust nagu ühekiuliste mõõtmiste juures sündmuste arvu ja allika kauguse sõltuvuse osas (vt joonist 12). 120 cm mõõtmiste keskmine sündmuste hulga arv on umbkaudu 13,02% ning 180 cm mõõtmiste keskmine sündmuste arv umbes 6,56% 40 cm mõõtmiste keskmisest sündmuste arvust. Efektiivsuse välja selgitamiseks on mõistlik kasutada 120 cm mõõtmisi, sest ühekihiliste stsintillatsioonkiudude keskmine sündmuste arv on neil võrdlemisi sarnane. Tuleb välja, et mitmekihiline stsintillatsioonkiud on 120 cm mõõtmiste puhul ühekihilise mudeliga võrreldes umbes 27,82% efektiivsem. Arvesse tuleks ka võtta standardhälvet, mis on eelnimetatud stsintillatsioonkiu puhul vastavalt 7,66%. On näha, et uuendatud ühekihilise stsintillatsioonkiu riba puhul on sündmuste arvu poolest tähelepanuväärne kõrvalekalle oodatust. Tõenäoliselt on riba koostamise ning käitlemise käigus tekkinud mõni defekt, mis suurendab valgusekadu märkimisväärselt.

Järgnevalt on läbi viidud valgussaagise analüüs ribade jaoks. Analüüsiks kasutatakse taaskord eelnevas analüüsis kasutatud andmeid (vt tabelit 9).

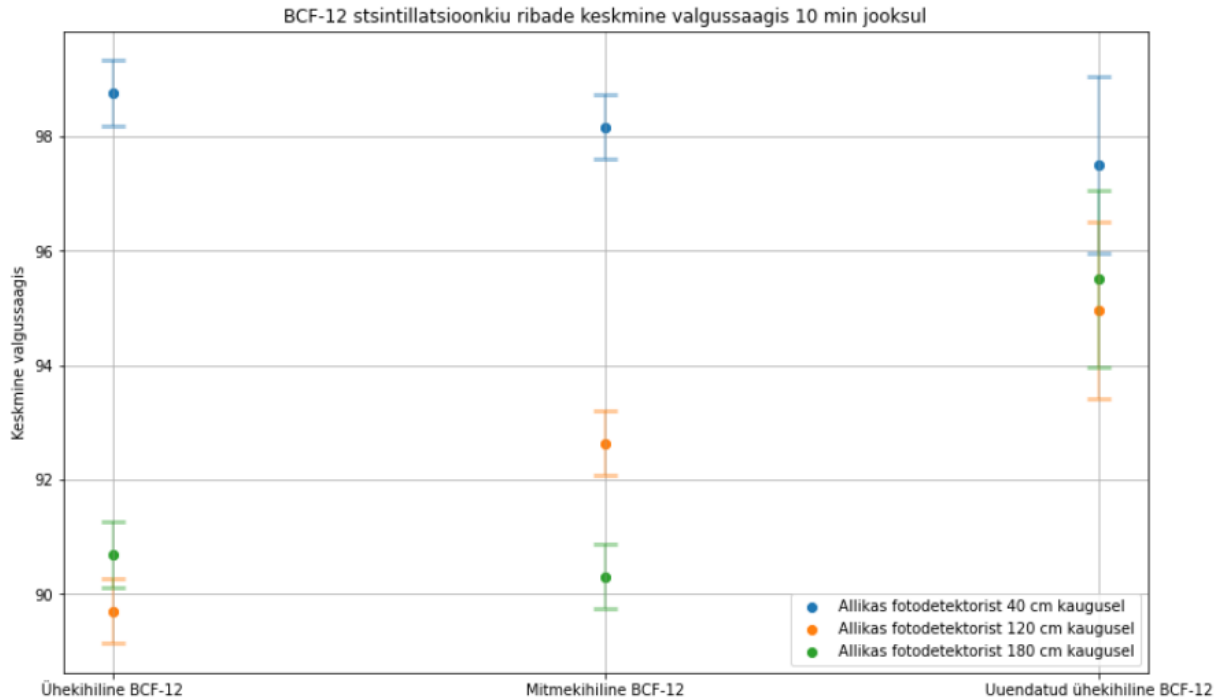
Tabel 9. Mitmekihiliste ribade mõõtmiste valgussaagise tulemused.

Stsintillatsioonkiu tüüp:	BCF-12 ühekihiline	BCF-12 mitmekihiline	BCF-12 ühekihiline (uuendatud)
Allikas 40 cm kaugusel	~98,76	~98,16	~97,51
Allikas 120 cm kaugusel	~89,7	~92,64	~94,95
Allikas 180 cm kaugusel	~90,69	~90,31	~95,51
Standardhälve	~0.57	~0.56	~1,55

Standardhälve arvutati vastavate BCF-12 ribade mõõtmiste keskmiste valgussaagiste suhtes (vt tabelit 10).

Tabel 10. Standardhälbe arvutamiseks kasutatud mõõtmiste tulemused.

Mõõtmise number:	1	2	3	4	5
Ühekihilise BCF-12 keskmine valgussaagise väärtus	~98,53	~99,67	~99,11	~99,61	~98,68
Mitmekihilise BCF-12 keskmine valgussaagise väärtus	~98,05	~98,08	~97,09	~97,29	~98,11
Uuendatud ühekihilise BCF-12 keskmine valgussaagise väärtus	~99,59	~99,8	~97,02	~96,68	~97,82



Joonis 12. Mitmekihiliste ribade 10 minutiliste mõõtmiste keskmise valgussaagise analüüs. Sinine, oranž ja roheline värvus viitab vastavalt mõõtmistele allika kaugustel 40 cm, 120 cm ja 180 cm.

Analüüsi tulemustest saab järeldada, et vastupidiselt ühekiulistele mõõtmistele, sõltub valgushulga intensiivsus kiirusallika kaugusest SiPM-st (vt joonist 13). Tähelepanu tuleb pöörata asjaolule, et taaskord on uuendatud ühekihilise stsintillatsioonkiu riba tulemus ebakorrapärane. Sellest lähtuvalt on mõistlik välistada ühekihiline uuendatud stsintillatsioonkiu riba efektiivsuse analüüsist. On näha, et mitmekihilise stsintillatsioonkiu riba keskmine valgushulga intensiivsus on ligikaudu 0,5% väiksem ühekihilise kiu riba tulemustest allika kaugustel 40 cm ja 180 cm. See erinevus on liigselt väike, et teha mõni järeldus stsintillatsioonkiudude efektiivsuse kohta.

Stsintillatsioonkiu ribade analüüsi tulemustest võib järeldada, et mitmekihilise kiu riba on sündmuste hulga analüüsi poolest 27,82% efektiivsem ühekihilise kiu ribast. Antud juhul on välistatud uuendatud ühekihiline mudel, sest selle stsintillatsioonkiu riba mõõtmiste tulemuste määramatused kattuvad. Valgushulga intensiivsuse analüüsist saab järeldada asjaolu, et erinevalt ühekiulistest mõõtmistest, sõltub stsintillatsioonkiudude riba valgushulga intensiivsus kaugusest vastupidiselt. Siin võib mängida rolli distants SiPM-i ja kiirusallika vahel ehk teisisõnu seda võib põhjustada stsintillatsioonkius olev paratamatu valguskadu.

Sellega on läbi viidud järelduste tegemiseks vajaminev analüüs. Analüüsi Saint-Gobain stsintillatsioonkiude ühekihilist BCF-12, mitmekihilist BCF-12 ning uuendatud ühekihilist BCF-12 nii üksikkiuna kui ka ribana. Registreeritud valgushulga intensiivsuse analüüs antud mõõtmiste puhul ei võimalda teha töö eesmärgini jõudmiseks vajaminevaid järeldusi, sest ühekiuliste mõõtmiste analüüsi puhul varieerus määramatus liigselt palju ning riba puhul on erinevus kahe stsintillatsioonkiu mõõtmiste vahel liigselt väike. Seevastu saab teha järeldusi sündmuste hulga analüüsist. Mitmekihiline stsintillatsioonkiud saavutas üksikkiuna umbes 3,5% suurema sündmuste arvu kindla ajavahemiku jooksul kui ühekihilised kiud. Riba analüüsis välistati uuendatud ühekihilise stsintillatsioonkiu mõõtmised, sest antud riba oli tõenäoliselt saanud selle koostamise ja käitlemise ajal defekti, mistõttu mõõtmiste tulemused on äärmiselt ebausaldusväärsed. Küll aga saab täheldada, et mitmekihiline stsintillatsioonkiu riba on sündmuste arvu poolest umbkaudu 27,82% efektiivsem ühekihilisest stsintillatsioonkiu ribast.

4. Kokkuvõte

Käesolevas töös on läbi viidud kolme erineva stsintillatsioonkiu tüübiga analüüs ning lähtuvalt analüüsi tulemustest on välja selgitatud kõige efektiivsem vaatluse all olev stsintillatsioonkiud. Vaatluse all oli kolm erinevat stsintillatsioonkiu tüüpi: Saint-Gobain ühekihiline BCF-12, Saint-Gobain mitmekihiline BCF-12 ja uuendatud Saint-Gobain ühekihiline BCF-12.

Analüüsi tulemustest saab järeldada, et stsintillatsioonkius Saint-Gobain mitmekihiline BCF-12 tekib kiu kiiritamise käigus rohkem footoneid, mis jõuavad fotokordistini. Sellest võib järeldada, et stsintillatsioonkiud mitmekihiline BCF-12 on töös vaatluse all olevatest stsintillatsioonkiududest kõige efektiivsem, mistõttu on ka töö hüpotees kinnitatud. Selgub, et Saint-Gobain mitmekihiline BCF-12 on üksikkiuna keskmiselt umbes 3,5% efektiivsem ülejäänud stsintillatsioonkiududest ning riba kujul keskmiselt 27,82% efektiivsem ühekihilisest BCF-12-st. Töös läbiviidud analüüsi tulemustest järeldub ka asjaolu, et uuendatud ühekihilise BCF-12 stsintillatsioonkiu ribas tekkis tõenäoliselt riba koostamise või käitlemise käigus defekt, mistõttu jäeti antud riba analüüsist välja.

Töös läbi viidud keskmise valgushulga intensiivsuse analüüsi tulemustest selgus ka asjaolu, et tulemuste varieeruvuse ja määramatuste tõttu pole mõistlik antud juhul nende põhjal teha järeldusi stsintillatsioonkiudude efektiivsuse kohta.

Uurimisteema jätkuks on tulevikus tarvis koostada uuendatud ühekihilisest BCF-12 stsintillatsioonkiust uus riba ning viia läbi samad mõõtmised. Samuti tuleks analüüsis kasutada suuremal hulgal mõõtmisi, et vähendada keskkonnast tulenevat määramatust.

Tänuavaldused

Lõputöö autor tänab Mats Mikkorit ja Madis Kiiska juhendamise ja abi andmise eest töö loomisel.

Samuti tänab autor Henri Hermi töö teostamiseks vajaminevate oskuste õpetamise eest.

Kasutatud materjalid

- [1] G. Zentai, "X-Ray Imaging for Homeland Security," *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering* 3, 13–20 (2010). <https://doi.org/10.1504/IJSISE.2010.034628>
- [2] L. Bonechi, R. D'Alessandro, and A. Giammanco, "Atmospheric Muons as an Imaging Tool," *Reviews in Physics* 5 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>
- [3] C. J. Rhodes, "Muon Tomography: Looking inside Dangerous Places," *Science Progress* 98, 291–299 (2015). <https://doi.org/10.3184/003685015X14369499984303>
- [4] A. Gutarra-Leon, C. Barazandeh, and W. Majewski, "Cosmic Ray Muons in the Standard Model of Fundamental Particles," *Exigence* 2, (2018).
- [5] H. Herm, "Plastikstintillatsioonikiudude efektiivsuse määramine ja mõõtesüsteemi karakteriseerimine," Bakalaureusetöö. Tartu Ülikool, Tartu (2022).
- [6] J. L. Autran, D. Munteanu, T. S. Saoud, and S. Moindjie, "Characterization of Atmospheric Muons at Sea Level Using a Cosmic Ray Telescope," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 903, 77–84 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.038>
- [7] M. Holma, P. Kuusiniemi, and J. Joutsenvaara. "Muography, Outreaching, and Transdisciplinarity: Toward the Golden Age of Muography," *Journal of Advanced Instrumentation in Science*, (2022). <https://doi.org/10.31526/jais.2022.258>
- [8] C. Whittaker, C. A. G. Kalnins, D. Ottaway, N. A. Spooner, and H. Ebendorff-Heidepriem, "Transmission Loss Measurements of Plastic Scintillating Optical Fibres," *Optical Materials Express* 9, 1–12 (2019). <https://doi.org/10.1364/OME.9.000001>
- [9] "Table of Isotopes decay data," Lund University (vaadatud 26. mai 2023). <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=380090>
- [10] A. Wiczorek, "Development of Novel Plastic Scintillators Based on Polyvinyltoluene for the Hybrid J-PET/MR Tomograph," *ArXiv Preprint ArXiv:1710.08136* (2017).

[11] Ph. Rebourgeard, F. Rondeaux, J.P. Baton, G. Besnard, H. Blumenfeld, M. Bourdinaud, J. Calvet, et al., “Fabrication and Measurements of Plastic Scintillating Fibers,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 427, 543–567 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00053-](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00053-4)

4

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Roald Heinrich Ivask,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Müüontomograafilises detektoris kasutatavate stsintillatsioonkiudude karakteriseerimine,

mille juhendajad on MSc Mats Mikkor ja PhD Madis Kiisk,

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.

Roald Heinrich Ivask

26.05.2023