

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Alexey Filippov

**MÜÜONTOMOGRAAFI LABORIPROTOTÜÜBI MÕÕTEANDMETEL PÕHINEV
ERINEVATE MÜÜONI KIUTABAMUSE KOORDINAATIDE ARVUTUSMEETODITE
ANALÜÜS**

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Juhendaja: Madis Kiisk, PhD

Tartu 2022

SISUKORD

SISUKORD.....	2
INFOLEHT	3
ABSTRACT	4
SISSEJUHATUS.....	5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	6
1.1 Müüondetektorite printsiibid	6
1.1.1 Müüongraafia ja -tomograafia.....	6
1.1.2 Pehme kosmilise kiirguse tomograafia	8
1.1.3 Tomograafi ja detektorplaatide kirjeldus	9
1.1.4 Suurused ja definitsioonid.....	12
2. EKSPERIMENT.....	15
2.1 Kirjeldus	15
2.2 Tulemused	15
2.2.1 Kahe erineva kihi punktide analüüs (1. grupp)	18
2.2.2 Kahe sama kihi kahe punkti analüüs (2. grupp)	21
2.2.3 Erinevate kihtide kolme punkti analüüs (3. grupp)	25
KOKKUVÕTE.....	28
SUMMARY	29
KASUTATUD KIRJANDUS	30
LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ELEKTROONSEKS AVALDAMISEKS	31

INFOLEHT

Töö teema: „Müüiontomograafi laboriprototüübi mõõteandmetel põhinev erinevate müüioni kiutabamuse koordinaatide arvutusmeetodite analüüs“

Käesolevas töös karakteriseeritakse GScan OÜ ja TÜ Füüsika Instituudi poolt loodud müüiontomograafi laboriprototüübi asukohatundlike detektorplaatide ja hodoskoopi.

Töö eesmärgiks on selgitada välja seosed andmete müüioni detektori läbimisest ja tema tõelise trajektoori vahel.

Selgus, et ainult 57% kiutabamustest koosneb üksnes ühest kiutabamusest, mis tähendab, et antud tomograafi nelja plaati jaoks ainult $(0.57)^4 \sim 10.56\%$ müüioni jälgedest saab arvutada otse ilma vaidlemata müüioni raja geomeetria üle. Ülejäänud peaaegu 9 müüioni jälge 10-st saab arvutada erinevate lähenemisviiside abil.

Vähemalt kahes kolmest andmerühmast näitab amplituudi kaalutud arvutusmeetod paremat tulemust ja üks näitab, et lähenemisviisi vahel pole palju erinevusi.

Märksõnad: müüiontomograafia, kiutabamus, arvutusmeetod

CERCS: T110 Instrumentatsioonitehnoloogia; P211 Kõrgenergeetiliste vastasmõjude uuringud, kosmiline kiirgus

ABSTRACT

Thesis title: „Analysis of different muon hit coordinate computational methods using data obtained by lab prototype tomograph”

In this paper, the location-sensitive detector plates and hodoscope of the muon tomograph laboratory prototype created by GScan OÜ and the Institute of Physics of the University of Tartu are characterized.

The purpose of this work is to find out the connections between data about muon passing through detector and its real trajectory.

It turned out that only 57% of the fiber hits consist of only one fiber hit, which means that for this tomograph of four plates only $(0.57)^4 \sim 10.56\%$ of the muon traces can be calculated directly without disputing the geometry of the muon track. The remaining almost 9 out of 10 muon traces can be calculated using different approaches.

In at least two of the three data groups, the amplitude-weighted calculation method shows a better result, and one shows that there are not many differences between approaches.

Key words: muon tomography, fiber event, calculation methods

CERCS: T110 Instrumentation technology; P211 High energy interactions, cosmic rays

SISSEJUHATUS

Kaasaegne maailm on pidevas arengus ning iga aastaga ületab piire üha rohkem kaupa ja inimesi, siis turvalisuse mõttes on vajalikud täiendused ja tehnoloogiline areng aitamaks ebaseaduslikke kaupu kiiresti ja paremini tuvastada. Viimaste aastakümnete jooksul tehtud uuringud on tõestanud, et kosmilise kiirguse müüonitel põhinevad läbivalgustusseadmed on elujõulised ja ohutud alternatiivid kunstlikku ioniseerivat kiirgust kasutavatele avastamistehnoloogiatele.

Käesolevas teadustöös karakteriseeritakse GScan OÜ ja TÜ Füüsika Instituudi poolt loodud müüontomograafi laboriprototüübi asukohatundlike detektorplaatide ja hodoskoopi.

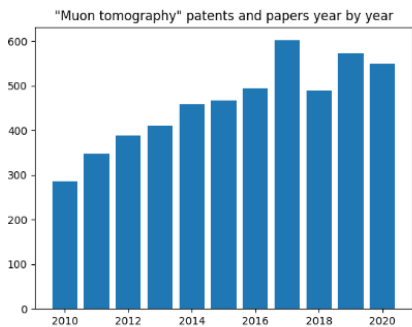
Töö eesmärgiks on selgitada välja seosed andmete müüoni detektori läbimisest ja tema tõelise trajektoori vahel. Eriti oluline on seoste leidmine müüoni trajektoori ja tema amplituudi näitajate andmete vahel ning nende parameetrite mõju selgitamine tema trajektoori lõpplähendusele. Sarnaste korrelatsioonide leidmine aitab tulevikus valida kõige korrektsemat meetodit trajektoori arvutamiseks kasutades ainult neid andmeid, mis tõepoolest annavad panuse lõpplähendusse. Kiudude amplituudi väärtuseid kogume eesmärgiga mõista, milliseid amplituudi väärtusi võib andmekogus oodata.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Müüondetektorite printsiibid

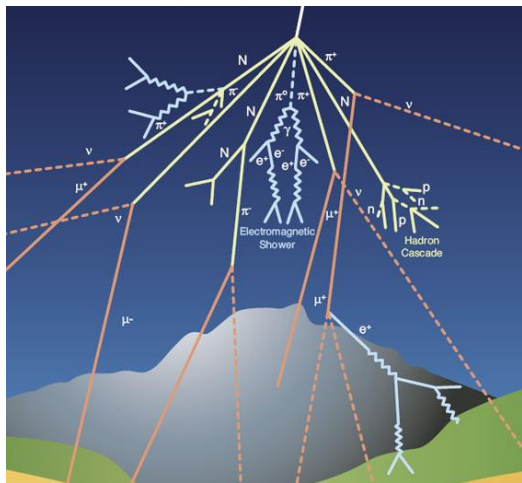
1.1.1 Müüongraafia ja -tomograafia

Maad on pidevalt tabamas kosmosest tulenevad osakesed. Neid nimetatakse üldiselt primaarseteks kosmilisteks kiirgusteks. Kui need kiirgused toimivad vastastikku atmosfääriga, kogevad nad reaktsioone tuumadega ning produtseerivad valanguid, mis võivad sisaldada väga kõrget osakeste numbrit. Neid osakesi nimetatakse üldiselt sekundaarseteks kosmilisteks kiirgusteks. Suurem osa neist laguneb enne Maale jõudmist, samas kui teised võivad jääda ellu ning jõuda maapinnale. Suurem osa neist on müüonid (kosmilise kiirguse müüonid). Meretasapinnal tabab maapinda umbes 10000 kosmilist kiirgust minutis ühe ruutmeetri kohta. Keskmiselt umbes 600 nendest läbib inimese keha minutis. Kui nad põrkavad kokku materiaga, siis toimuvad interaktsioonid, mis lõpevad kahe põhilise efektiga: 1) energiakadu (põhiliselt mitteelastse kokkupõrge, pärsskiiruse, elektroon-positron paari produktsioon) ja 2) hajumine originaalsest trajektorist (mitmekordne kulon hajumine). Teisisõnu kalduvad materjali läbivad müüonid kõrvale sirgjoonest ning aeglustuvad. Nende efektide tugevus sõltub osakese energiast, läbiva materjali paksusest ja tüübist. Need karakteristikud ning fakt, et müüonid võivad läbida suuri ruumalaid, oli kasutuses aastakümneid, kui neid kasutati kalibreerimaks eksperimentaalseid aparate ja detektoreid osakeste- ja tuumafüüsikas. Hiljuti on erinevad grupid üle maailma kaalutlenud selle kasutamist samuti ka tsiviil- ja kommertsrakenduses. (Bonomi, 2017) Seda fakti, et antud uuringuvaldkond veetleb kasvavat tähelepanu, kajastab müüongraafia ja -tomograafia publikatsioonide arv viimastel aastatel (joonis 1).



Joonis 1. Müüontomograafia patendid ja publikatsioonid aastate vältel

Kosmilised kiirgused on tüüp loomulikest taustakiirgusest, mis lähtuvad astrofüüsilistest allikatest (Tanabashi et al., 2018). Kosmilised kiirgused jagunevad primaarseks ning sekundaarseks (Eelsalu, 1996). Primaarsed kiirgused, enamasti prootonid, jõuavad atmosfääri ning produtseerivad osakeste kaskaadi (joonis 2). Sellel osakeste voolul on muutuv kompositsioon, mis sõltub vertikaalsest distantsist maalt. Kõige arvukam osakeste tüüp merepinnal on müüon, mille voog horisontaalsel detektoril on ligikaudu $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. (Tanabashi et al., 2018)



Joonis 2. Primaarsete ja sekundaarsete kiirguste jaotus atmosfääris

Loomulikku kosmilise kiirguse müüonivoogu on võimalik kasutada selleks, et mõõta voo väärtuse muutust suurte või tihedate objektide läbimisel. Samuti on võimalik kasutada teist füüsilist efekti, milleks on Coulombi hajumine. Selle abil on võimalik tuvastada, kui palju kaldub müüon erinevaid materjale läbides kõrvale võrreldes materjali sisenemistrajektooriga. Antud muutus sõltub

aatomnumbrist (Z), materjali paksusest (x) ning samuti ka osakese impulsist (p). Müüonite jaoks on sisenemis- ja väljumisnurga muutus kirjeldatud alloleva üldistava seosega:

$$\theta = \frac{14MeV}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

kus βc on osakese kiirus, p on selle impulss MeV-des ning radiatsiooni pikkus on:

$$X_0 = \frac{716.4}{Z(Z+1)\ln \frac{287}{Z}} \frac{g}{cm^2}$$

Atmosfääri kiirete tomograafia sooritust mõjutab kolm põhilist faktorit: osakese trajektoori hindamise täpsus, võime tuvastada osakese tüüp ja energia, paigaldatud tomograafiliste rekonstruktsioonimeetodid. Neljas ehk süsteemi sõltumatu faktor on mõõtmise aeg. (Schultz, Borozdin, Gomez et al., 2004)

Osakese jälgimise algoritm, mis määrab osakese tabamuse asukoha detektorplaadis ning selle trajektoori hodoskoobis, annab täpsust suuruses 120 μm . On näidatud, et suuruse tiheduse kaart võib olla analüüsitud kui hulk 2D kujutisi, see annab võimaluse avastada objekte kui eraldiseisvaid loogilisi suurusi. Meetod töötab efektiivselt kõrge *Poisson noise* juhul, seeläbi on rakendatav lühikeste mõõtmisaegade puhul. Uuritavat objekti läbiva müüoni kõrvalekalde nurka mõõtmine ning oskus rakendada sobivat rekonstruktsiooni algoritmi annab võimaluse kasutada kosmilise kiirguse müüoneid eesmärgiga luua uuritavast objektist 3D kujutisi. (Kiisk, Anbarjafari, Anier et al., 2019)

1.1.2 Pehme kosmilise kiirguse tomograafia

Tomograafilise süsteemi disainimine üksnes müüonide hajumisele tähendab järelikult seda, et süsteem ei ole võimeline diferentseerima kergemaid Z materjale seetõttu, et peamised müüoni hajumise nurgad ei erine piisavalt eri madala aatomnumbriga materjalides. Eesmärgiga disainida seade, mis oleks võimeline tuvastama ka kergemaid materjale, peaksid töösse olema rakendatud täiendavad füüsilised efektid ja/või elementaarsed osakesed ning nende omadused. (Suurpere, 2019)

Skanneril baseeruv passiivne radiatsioon kosmilise kiirguse osakestelt samuti nagu ka gamma-kiirete avastus on võimeline avastama ning klassifitseerima laia ulatusega materjale mõistlikkes ajaraamides. Koos kujutise segmenteerimise ning hajutatud ja peatatud radadega on võimalik välja võtta hajumist, peatamist, hajumise ja peatamise suhet ning gamma signaali kui tunnuseid kindlakstehtud objektide klassifitseerimiseks. (Blanpied, Kumar, Dorroh et al., 2015).

Blanpied et al. (2015) näitas kosmilise kiirguse Coulombi hajumise ja kosmilise kiirguse elektronide hajumise kombineerimise võimalust eemärgiga tuvastada keskmiste kõrvalt ka kergemaid materjale (Blanpied, Kumar, Dorroh et al., 2015).

Müüonite hajumise mõõtmisele suunatud tomograafid on üliolulised suure aatomnumbriga materjalide puhul, kuna nende kõrvalekalded on suuremad ning kergemini tuvastatavad. Neid tomograafe kasutatakse maailmas erinevates olukordades, sh radioaktiivsete materjalide tuvastamiseks merekonteinerites. (Clarkson, 2015; Riggi, Antonuccio, Bandieramonte et al., 2013)

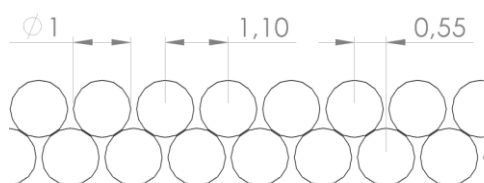
1.1.3 Tomograafi ja detektorplaatide kirjeldus

Joonisel 3 esitatud tomograafi keskel on näha neli detektorplaati, millest väljuvad kahele poole stsintillatsioonikiud, mis on ühendatud andmeid lugevate elektroonikaplaatide külge. Kolm plaati on vajalikud esialgse detektorisse sisemisnurga määramiseks (müüoni algtrajektoor) ning neljas (allpool asuv) aitab määrata trajektoori muutust. Töörežiimis on seade valguskindlalt suletud kastis, mille osad seinad on pildi jaoks eemaldatud.



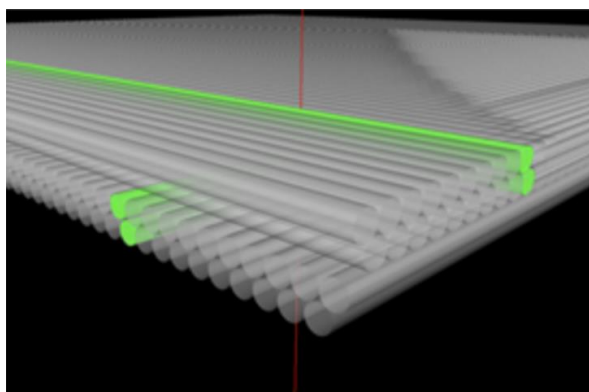
Joonis 3. Karakteriseeritav prototüübi osade paiknemist illustreeriv skeem

Hodoskoop koosneb neljast asenditundlikust detektorplaadist, mis koosnevad plastikust stsintillatsioonkiududest. Detektorplaadil on 4-kihiline struktuur: kaks risti asetsevat kahekihilist kiudmatti, mis annavad osakese tabamuse x ja y asukoha. Kiu läbimõõt on 1,0 mm, kiududevaheline samm on 1,1 mm. Pealmine kiht on nihutatud poole sammu võrra, selle asend on joondatud vastavalt alumise kihi kiudude positsioonile. See tagab peaaegu 100% geomeetrilise tuvastamise efektiivsuse iga langemisnurga juures ja kõrge ruumilise eraldusvõime. (Anbarjafari, et al., 2021) Kiudude ideaalse paigutuse skeem ja mõõtmed millimeetrites on toodud välja joonisel 4.



Joonis 4. Ideaalne kiudude paigutus detektori aktiivses piirkonnas

Detektorplaadi skeem on toodud välja joonisel 5. Punane joon näitab müüoni trajektoori ning roheliseks värvitud kiud märgivad kiude, kus on tekkinud tabamuse tagajärjel footonid. (Mikkor, 2021) Detektorplaatidega mõõtmine toimub nii, et kiud grupeeritakse kahest otsast ning mõlemast otsast on vaja saada signaal, et otsustada, milline kiud müüoni tabamuse sai.



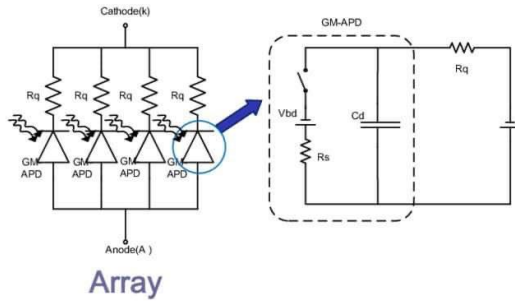
Joonis 5. Stsintillatsioonkiuddetektori müüoni tabamuse asukoha tuvastamise skeem

Laviinfotodiod ehk SiPM (*ingl k silicon photomultiplier*) kasutab laviinfotodioode selleks, et tuvastada fiibrites tekkivaid footonite. Tekkiva fotovoolu võimendamiseks kasutab antud pooljuhtfotodiod sisefotoefekti ja kiirguse koosmõju. Nn Geigerrežiimis töö annab võimaluse tuvastada üksikuid footoneid. Diodi siirdepiirkonnas liiguvad laengukandjad saavad elektriväljas

piisava kineetilise energia selleks, et aatomitest lüüa välja elektrone (kui põrkavad tugevas väljas kristallvõre aatomitega) ja luua uusi elektron-auk paare. Ilmneb tõukeionisatsioon, mille tulemusel vabanenud elektronid ja augud hakkavad omakorda samuti elektriväljas kiirenevalt liikuma ja osalevad omakorda tõukeionisatsioonis. Tekib laviiniefekt kuni tekib laviinlabilöök, mille saavutamiseks on pooljuhi siirdestruktuuri lisatud tugevalt dopeeritud kitsas p-kiht. Sellise struktuuri vastupingestamise tulemusena tõuseb antud p-tsoonis väljatugevus ning selle peale kiirendavad laengukandjad piisavalt selleks, et kutsuda esile laviinlabilöögiks vajalikku tõukeionisatsiooni. (Mikkor, 2021)

Nagu mainitud, pannakse üksikute footonite tuvastamiseks süsteem tööle Geigerrežiimis, milleks pingestatakse diood üle tema läbilöögipingega võimaldada läbilöögi teket. Tegemist on ebastabiilse olukorraga, kus üksik footon suudab käivitada tuvastatava laviini laengukandjaid, p-n siire muutub täielikult juhivaks ja tulemusena tekib tugev mõõdetav vool. Selleks, et viia diood uuesti mõõteolukorda, on kasutusel voolu piirav takisti RQ, mis on dioodiga ühenduses jadamisi. Kui dioodi tabab footon, tekib laviin ja siire muutub juhivaks, mis tähendab, et sulgub lüliti S, sellest tingitult hakkab kondensaator CJ end tühjaks laadima läbi takisti RS vähendades elektrivälja tugevust siirdel kuni väljatugevus langeb nii palju, et elektriväljas liikuvad osakesed ei saavuta enam tõukeionisatsiooniks vajalikku energiat ning siire enam ei juhi. Seega lüliti S avatakse ning vastupinge VBIAS laeb kondensaatori CJ jälle ja siis seade on uuesti võimeline tabavat footonit tuvastama. (Mikkor, 2021)

Niisiis on antud laviinfotodiooni puhul sisuliselt tegemist footonlülitiga, kus registreeritakse vaid seda, kas toimub footoni tabamine või mitte. Selleks, et osata hinnata ka kui palju footoneid on tabatud, on kasutusel korraga palju selliseid mikrorakke, mis on paralleelselt ühendatud. Kuna rakud on sisuliselt identsed, annavad nad footoni tabamuse korral identset signaali, mis tähendab, et sellise asetuse korral on väljundis diskreetsed signaalitasemed, mis vastavad aktiveerunud rakkude arvule. See omakorda näitab aga sel hetkel tabanud footonite arvu. SiPM sisestruktuur on toodud välja joonisel 6.



Joonis 6. SiPM sisestruktuur. SiPM skeem koosneb passiivse kustutamisega ühe footoni laviindiodi mikrorakkude massiivist, see laseb SiPM-i väljundil lühikese aja jooksul taastuda ja impulsi esiservas on suurem pöördekiirus

1.1.4 Suurused ja definitsioonid

Kiutabamus on tabamus, mis registreeris mõne amplituudi väärtuse mõlemal pool kiust. *Amplituudi ühik* on suhteline skaala, mis on proportsionaalne kiust mõõdetud valgustugevusega, kuid ei ole kalibreeritud. Iga kiutabamus võib olla iseloomustatud nelja parameetriga (x , y , *amplituud*₁, *amplituud*₂). X ja y on konkreetse kiu 2D koordinaadid ning *amplituud*₁ ja *amplituud*₂ on mõlemalt poolt kiust saadud amplituudi väärtused (joonis 7).

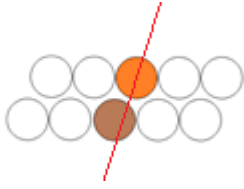
```
-2.75, -699.5,59.0,75.0
-23.1, -700.5,69.0,46.0
57.75, -699.5,119.0,105.0
28.6, -450.5,113.0,72.0
35.2, -375.5,53.0,78.0
-67.65, -699.5, 100.0,95.0
```

Joonis 7. Näide kiutabamuse väljundist (x , y , *amplituud*₁, *amplituud*₂)

Kiutabamuste omavaheliste amplituudide võrdlemiseks määratleme *sündmuse amplituudi* järgmiselt:

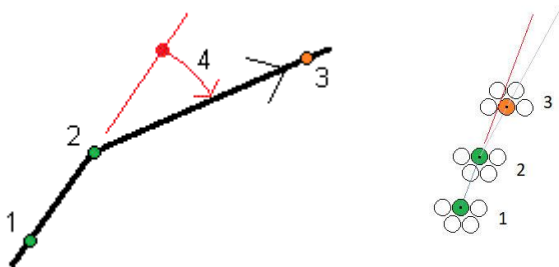
$$\text{sündmuse amplituud} = \text{amplituud}_1 + \text{amplituud}_2$$

Klastrina defineerime üksteisega ühendatud kiutabamuste komplekti. Kaks ühendatud kiudu on toodud välja joonisel 8.



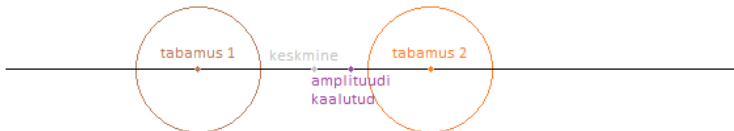
Joonis 8. Kaks üksteisega ühendatud kiutabamust

Klastri tulemuse koordinaat on arvutatud üksikpunkt x- ja y-koordinaadiga ning seda saab arvutada erinevate lähenemisviiside abil. *Hajumisnurk* on nurk punkt 1 ja punkt 2 (või vektorite 12 ja 23 vahel) ning punkt 2 ja punkt 3 liini vahel (joonis 9).



Joonis 9. Hajumisnurga definitsioon ja punktide seos kolmekihilise hodoskoobiga

Kahe kiu jaoks mõeldud arvutust selgitav skeem, kus ühel on amplituud suurem, on toodud välja joonisel 10. Keskmine punkt asub nende kahe kiu tsentrite keskel, amplituudi kaalutud on nihutatud suurema amplituudiga kiu suunas.



Joonis 10. Keskmise punkti ja amplituudi keskmise skemaatiline definitsioon

Arvutatud *hajumisnurk* mida kasutatakse erinevate arvutuste soorituse võrdlemiseks klastri tulemuse koordinaadi puhul.

Kasutusel on erinevad lähenemised *klastri tulemuse koordinaadi* arvutamiseks.

Klastri keskmise punkti x ja y koordinaadid arvutatud n kiutabamuse jaoks:

$$\text{keskmise punkt}_x(\text{kiutabamused}) = \frac{\sum_1^n \text{tabamus}_n(x)}{n}$$

$$\text{keskmine punkt}_y(\text{kiutabamused}) = \frac{\sum_1^n \text{tabamus}_n(y)}{n}$$

Klastri amplituudi kaalutud x ja y koordinaadid arvatud n kiutabamuse jaoks:

$$\begin{aligned} & \text{amplituudi keskmine}_x(\text{kiutabamused}) \\ &= \sum_1^n \frac{\text{tabamuse amplituud}_n}{\sum_1^k \text{tabamuse amplituud}_k} \text{tabamus}_n(x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{amplituudi keskmine}_y(\text{kiutabamused}) \\ &= \sum_1^n \frac{\text{tabamuse amplituud}_n}{\sum_1^k \text{tabamuse amplituud}_k} \text{tabamus}_n(y) \end{aligned}$$

Kuna suurem osa müüonitest ei haju või hajub väga väikese nurga all, mis on väiksem kui detektori lahutusvõime, siis on statistiliselt ootuspärane, et enamik müüonitest näivad meile mõõtesüsteemi jaoks pigem sirged. Sean töö hüpoteesiks, et müüoni trajektoori arvutamisel suurendab amplituudiväärtuste arvestamine müüoni trajektoori arvutamise täpsust.

2. EKSPERIMENT

2.1 Kirjeldus

Mõõdetud andmefailidest saadud tabamuste summa on 138348, mõõteaja pikkus 12h30m .

Uuritavas kambris objekti polnud, seega võime järeldada, et müüoni trajektoorid olid valdavalt sirged liinid. Sellest lähtuvalt on töö eesmärgiks leida korrelatsioonid erinevate arvutusmeetoditega saadud amplituudide ja trajektooride väärtuste vahel.

Andmestiku mürast puhastamiseks rakendame filtrite komplekti:

- 1) Valime klastrid, kus igalt neljalt plaadilt registreeriti müüoni tabamus
- 2) Valime klastrid, kus süsteemi läbis vaid üks müüon (teisisõnu: igal plaadil on ainult üks müüoni klaster)
- 3) Valime klastrid, mille hajumisnurk plaatide 1, 2, 3 ja 2, 3, 4 vahel on väiksem kui 2 kraadi

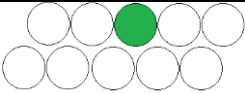
2.2 Tulemused

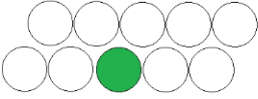
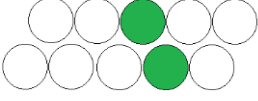
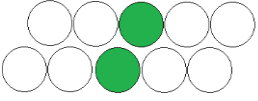
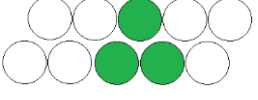
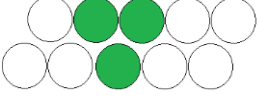
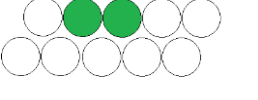
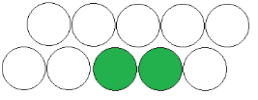
Pärast rakendatud filtreid saadi tulemuseks ainult 38963 klastrit (28,1% algandmetest). Kuna kiud on ortogonaalselt teineteisele suunatud, võime jagada sündmused kaheks osaks, siis saame kaks korda rohkem sündmusi (77926).

Detektor sisaldab 4 plaati ja kokku sai kogutud $77926 * 4 = 311704$ andmeid eraldiseisva klastri tabamuste kohta kõikide detektorplaatide peale kokku.

Analüüsime klastri tabamusi rühmitades neid gruppidesse, mis näitavad, mitmest kiust on üks tabamuse klaster ja kuidas need kihiruumis eraldusid. See annab parema arusaama selle kohta, milliste tabamustega on tegemist ja millised rühmad mõjutavad klastri punktide arvutamise lõpptulemust kõige rohkem (tabel 1).

Tabel 1. Klasterite rühmitamine ja tulemused

 või	177780	57.0%
--	--------	-------

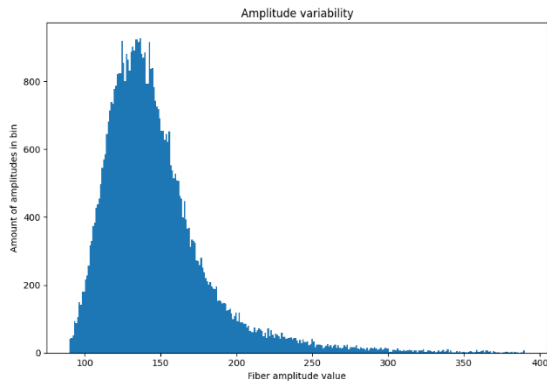
		
 või 	123955	39.8%
 või 	6302	2%
 või 	1852	0.6%
Teised:	1815	0.6%
Kokku	311704	100%

Esimest üksikute kiutabamuste rühma (57%) ei saa analüüsida, kuna erinev klasteri punkti arvutamine annab sama tulemuse. Kõrge või madala amplituudiga punkt puudub ning klasteri keskmise või kaalutud amplituudi arvutamine annab sama tulemuse kui lihtsalt punkti koordinaatide andmed (x, y).

Teine rühm sisaldab klasteri, mis omakorda sisaldavad kahte kiutabamust, mis asuvad erinevatel alamkihtidel. See on hiig suur hulk andmeid, mida saab analüüsida ja mis mõjutab lõpptulemust kõige rohkem. Kui mõlemal nendel kiutabamustel on erinev amplituud, mis kehtib enamasti kõikide klasterite kohta, tähendab see seda, et keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti koordinaadid erinevad ja neid saab võrrelda hajumisnurga abil.

Neljas rühm võib olla huvitav analüüsivõimalus, kuna selle konfiguratsiooni hajumisnurgal on suurem nurkade erinevus kõrge ja madala amplituudiga punktide vahel ning ka keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punktide koordinaatide puhul samuti. See tähendab, et me vajame erinevate lähenemisviiside vahelise korrelatsiooni märkamiseks vähem andmeid.

Kogutud kiudude amplituudi väärtused on toodud välja joonisel 11.



Joonis 11. Kiudude amplituudi väärtused ja amplituudi varieeruvus

Saadud tabamuste amplituudi keskmine väärtus, mediaanväärtus ja standardhälve on toodud välja tabelis 2.

Tabel 2. Tabamuste amplituudid nende keskmise väärtuse, mediaanväärtuse ja standardhälvega

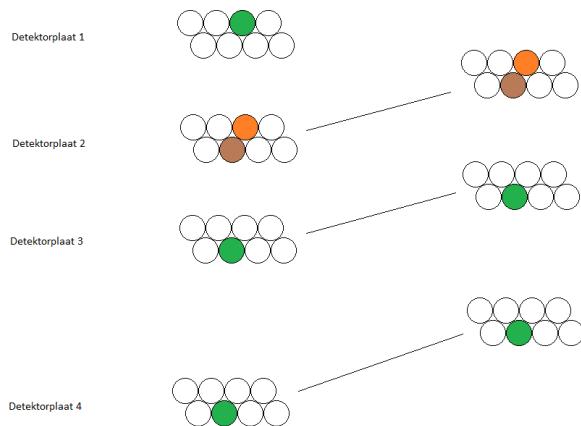
	Tabamuse amplituudi keskmine väärtus	Tabamuse amplituudi mediaanväärtus	Standardhälve
Tabamuste amplituudid	147.90	140.0	38.0

Amplituudi kast algab 90-st, kuna müüonraja mürast eristamiseks kasutatav lävi on 45 kiu mõlema külje jaoks, mis tähendab, et $45 + 45$ on registreeritud amplituudi minimaalne väärtus. Graafikud näitavad, et amplituud langeb normaaljaotusse.

2.2.1 Kahe erineva kihi punktide analüüs (1. grupp)

Esiteks analüüsime kõrge ja madala amplituudi punkte.

Lõpptulemuse arvutamist mõjutab kõige enam teine rühm, kus on peaaegu 40% kõigist sündmustest (joonis 12).



Joonis 12. Madala ja kõrge amplituudi punktide paigutus

Eraldame klastrid andmestikust, kus kahel plaadil on klastrid ainult ühe kiutabamusega ja ühel plaadil on klaster kahe erineva amplituudiga kiutabamusega, mida saame määratleda kui **madala amplituudi kiutabamust** ja **kõrge amplituudi kiutabamust**. Seega, *kõrge amplituudiga sündmus* on kiutabamus suurima klastrisisese *amplituudiga ja madala amplituudiga sündmus* on kiutabamus väikseima klastrisisese *amplituudiga*.

Märkamaks mis tahes amplituudikorrelatsiooni arvutame mõlema tabamuse jaoks hajumisnurka ja võrdleme neid (tabel 3).

Tabel 3. Madala ja kõrge amplituudi kiutabamuste hajumisnurkade võrdlus

	Hajumisnurk on väiksem	Hajumisnurk on väiksem %
Madala amplituudi kiutabamus	24557	47.0 %
Kõrge amplituudi kiutabamus	27620	52.8 %
Kiutabamused kokku	52225	100%

Tabelis on näidatud hajumisnurkade arv, mis näitab väikseimat hajumisnurka väärtust. See on kvantitatiivne arvestus, mis näitab, et tavaliselt on suuremal osal kõrge amplituudi kiutabamustest väikseim läbipaindenurk või kõige sirgem müüonirada.

Tabelis 4 on juba toodud välja kvaliteedi arvestus, mis näitab, et nii mediaan- kui ka keskmine nurk on suurema amplituudi tabamuse puhul väikseima hajumisnurka väärtusega, mis on esimene märk sellest, et lõplikul klasteri punkti arvutamisel tuleb arvestada ka amplituudi väärtust.

Tabel 4. Madala ja kõrge amplituudi mediaan- ja keskmine nurk

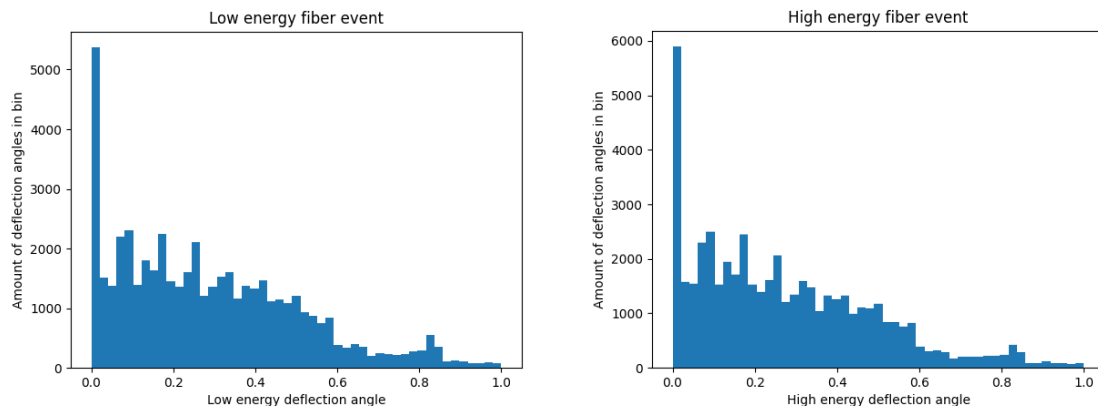
	Kõikide hajumisnurkade summa	Hajumise mediaannurk	Hajumise keskmine nurk
Madala amplituudi kiutabamus	17314.8	0.2597	0.33154
Kõrge amplituudi kiutabamus	16150.6	0.246	0.3123244

Standardhälve on üsna kõrge, mida ka eeldatakse laia mõõtekomplekti puhul (tabel 5).

Tabel 5. Madala ja kõrge amplituudiga kiutabamus standardhälbed

	Madala amplituudiga kiutabamus	Kõrge amplituudiga kiutabamus
Standardhälve	0.3112478	0.30356

Madala ja kõrge amplituudi kiutabamuste võrdlus on toodud välja joonisel 13.



Joonis 13. Madala ja kõrge amplituudiga kiutabamuste võrdlus graafikute näol

Tabel 6 näitab keskmise ja amplituudi kaalutud klastri punkti arvutamise kvantitatiivset arvestust. Võrreldes varasemalt ülaltoodud tabeliga (madal ja kõrge amplituud), näeme, et amplituudi kaalutud puhul on kõige sirgema müüonirajaga sündmusi vähem, kuid see oli ootuspärane, kuna keskmine ja amplituudi kaalutud punktid on madala ja kõrge amplituudiga punktide vahelisel joonel.

Tabel 6. Keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti hajumisnurkade võrdlus

	Hajumisnurk on väiksem	Hajumisnurk on väiksem (%)
Keskmine punkt	24816	47.5 %
Amplituudi kaalutud	27409	52.5 %
Kokku	52225	100%

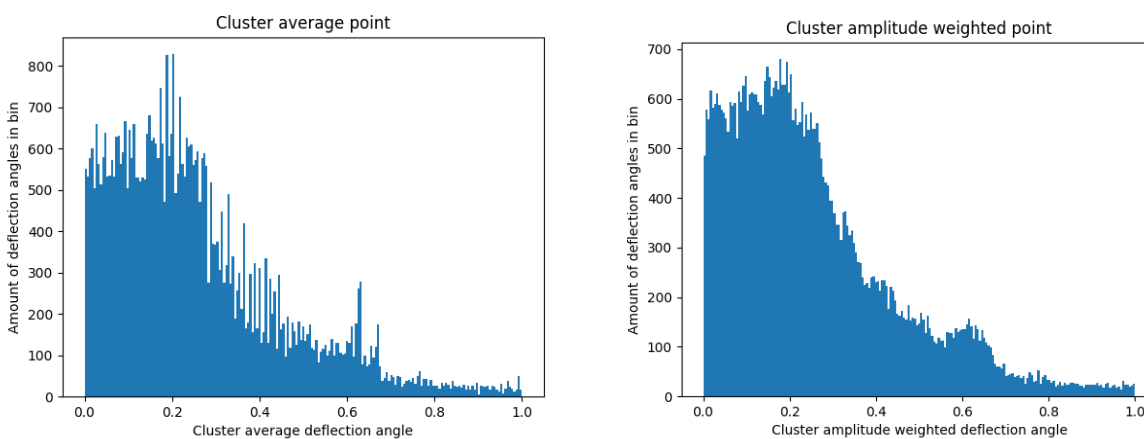
Kuid kvaliteediarvestus (tabel 7) näitab, et mediaan- ja keskmisel hajumisnurgal on parim tulemus võrreldes madala (oodatud), aga samuti ka suure amplituudiga kiutabamusega.

Tabel 7. Klastri keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti kvaliteedi võrdlus

	Kõikide hajumisnurkade summa	Hajumise mediaannurk	Hajumisekeskmine nurk
Klastri keskmine punkt	15478.59	0.22	0.2963

Klastri amplituudi kaalutud punkt	15424.33	0.2187	0.2964
-----------------------------------	----------	--------	--------

See on esimene kinnitus, et parimal klastri arvatud punktil on parim tulemus, kui see jääb madala ja kõrge amplituudi vahele, kuna mõlemad arvutusviisid näitavad oluliselt paremat tulemust. Joonisel 14 näeme sündmuste kogumite arvu, mis näitavad nullilähedast nurga suurenemist amplituudi kaalutud puhul võrreldes keskmise punkti arvutamisega.



Joonis 14. Klastri keskmine punkt ja amplituudi kaalutud punkt

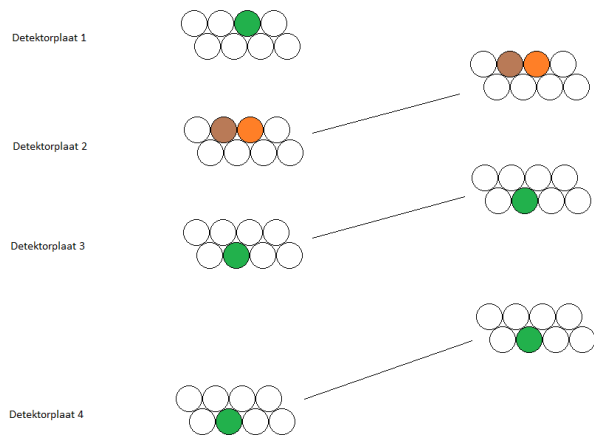
Standardhälve on sama ja mediaanväärtusega võrreldes üsna suur, kuid võrreldes madala/kõrge amplituudi arvutamisega väiksem (tabel 8).

Tabel 8. Keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti standardhälbed

	Keskmine	Kaalutud
Standardhälve	0.28545	0.285318

2.2.2 Kahe sama kihi kahe punkti analüüs (2. grupp)

Teeme samu arvutusi, mis varem ning analüüsime kõrge ja madala amplituudi punkte (joonis 15).



Joonis 15. Punktide paigutus

Eraldame andmestikust punktid, kus kahes kihis on kaasatud ainult üks kiud ja ühel kihil on kaks sama kihi punkti. Selle konfiguratsiooniga kogutud sündmuste koguarv on 1660 sündmuste komplekti ja seda on oluliselt vähem kui eelmise jaotise puhul.

Vaatamata väiksemale andmehulgale võime arvestada, et kui võrrelda kiutabamusi erinevatel kihtidel, on selle konfiguratsiooni puhul ootuspäraselt kõrge amplituudi kiutabamuste protsent kõige sirgema rajaga suurem võrreldes samade tabamustega, kuid erinevatel kihtidel. Seda võib seletada sellega, et siin on vähem andmeid või seetõttu, et ühekihilistel kiutabamustel on suurem hajumisnurja erinevus ja väiksem hulk andmeid võib näidata eeldatavat korrelatsiooni amplituudi ja müüoniraja vahel (tabel 9).

Tabel 9. Madala ja kõrge amplituudi kiutabamuste võrdlus

Madala amplituudi kiutabamus	708	42.3 %
Kõrge amplituudi kiutabamus	966	57.7 %
Kokku	1674	100%

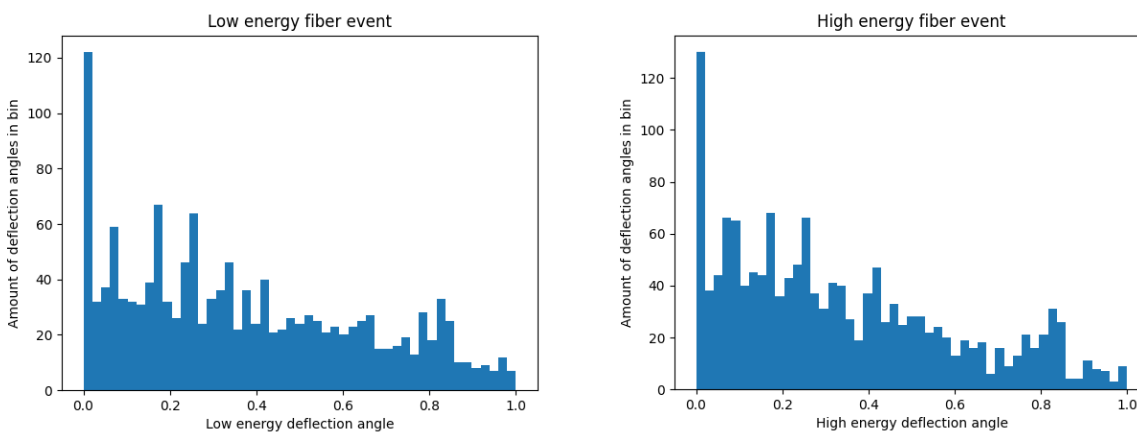
Kvaliteedi arvestus (tabel 10) näitab, et nii mediaan- kui ka keskmisel hajumisnurgal on märkimisväärselt parem tulemus kõrge amplituudi kiutabamuse korral. See näitab ka seda, et

hoolimata andmete puudusest võime kinnitada, et kiutabamuse amplituudi väärtus korreleerub kõige sirgema müüonirajaga.

Tabel 10. Madala ja kõrge amplituudi kiutabamuse kvaliteedi võrdlus

	Kõikide hajumisnurkade summa	Hajumise mediaannurk	Hajumise keskmine nurk
Madala amplituudi kiutabamus	865.95	0.395	0.522
Kõrge amplituudi kiutabamus	736.02	0.322	0.4434

Kõrge ja madala amplituudi kiutabamuse võrdluseks on andmed välja toodud ka joonisel 16.



Joonis 16. Kõrge ja madala amplituudi kiutabamuste võrdlus

Madala ja kõrge amplituudi kiutabamuste standardhälbed on toodud välja tabelis 11.

Tabel 11. Madala ja kõrge amplituudi kiutabamuste standardhälbed

	Madala amplituudi kiutabamus	Kõrge amplituudi kiutabamus
Standardhälve	0.4560	0.4162

Vaatamata sellele, et nurga keskmised ja mediaanväärtused on suuremad kui eelmises jaotises, näeme sama efekti, et kõrge amplituudiga punktil on väiksemad nurgad ja väiksem dispersioon (tabel 12 ja tabel 13).

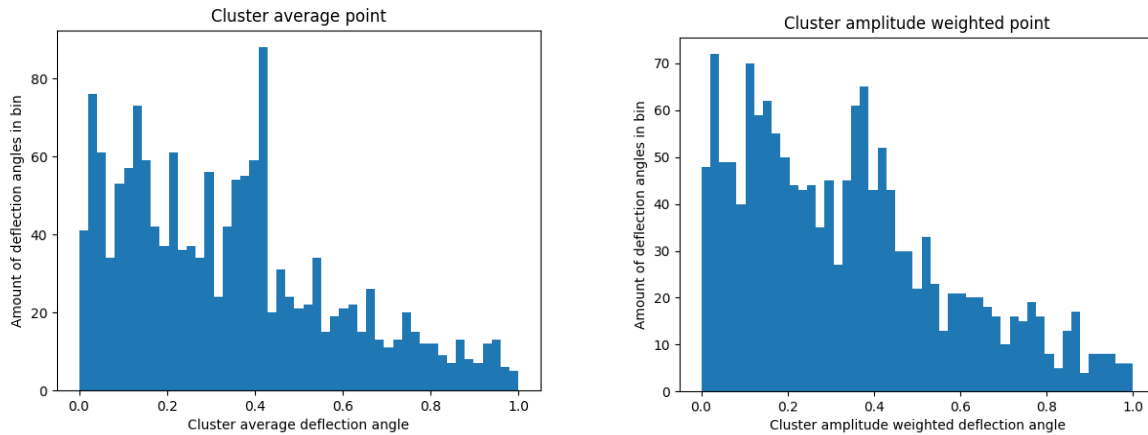
Tabel 12. Klasteri keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti hajumisnurkade võrdlus

	Hajumisnurk on väiksem	Hajumisnurk on väiksem %
Klasteri keskmine punkt	718	42.9 %
Klasteri amplituudi kaalutud punkt	931	57.1 %
Sündmusi kokku	1674	100%

Tabel 13. Klasteri keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti nurkmediaan ja keskmine nurk

	Kõikide nurkade summa	Nurkmediaan	Keskmine nurk
Klasteri keskmine punkt	727.31	0.3504	0.4345
Klasteri amplituudi kaalutud punkt	720.37	0.3464	0.4303

Klasteri keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti võrdlus on toodud välja joonisel 17.



Joonis 17. Klasteri keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti võrdlus

Klasteri keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti standardhälbed on toodud välja tabelis 14.

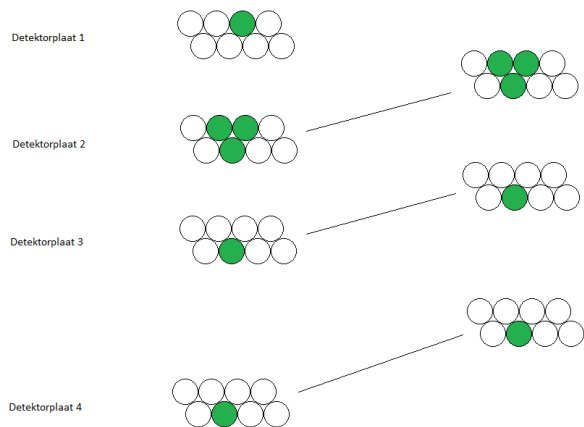
Tabel 14. Klasteri keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti standardhälbed

	Keskmine	Kaalutud
Standardhälve	0.38393	0.38258

Kõik väärtused on kaks punkti eineval kihil analüüsiga võrreldes suuremad, kuid vaatamata sellele on meil kindel tõend, et amplituudi kaalutud koordinaatide arvutamine annab väiksemad nurgad kui lihtsalt koordinaatide keskmistamine.

2.2.3 Erinevate kihtide kolme punkti analüüs (3. grupp)

Kolme punkti paigutus detektorplaatidel on toodud välja joonisel 18.



Joonis 18. Kolme punkti paigutus

Madala ja kõrge kiutabamuste amplituudipunkte pole vaja arvutada ja võrrelda, kuna eelmises lõigus sai tõestatud, et alati arvutatakse keskmisi või amplituudiga kaalutud klastripunktid ja need näitasid mõlemal juhul väikseimat hajumisnurka.

Eraldame andmestikust punktid, kus kahel kihil on ainult üks kiud ja ühel kihil on üks kihist, kus kolm punkti sisalduvad erinevates kihtides (tabel 15).

Tabel 15. Keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti hajumisnurkade võrdlus

	Hajumisnurk on väiksem	Hajumisnurk on väiksem %
Keskmine punkt	1564	50.37 %
Amplituudi kaalutud	1541	49.63 %
Kokku	3105	100%

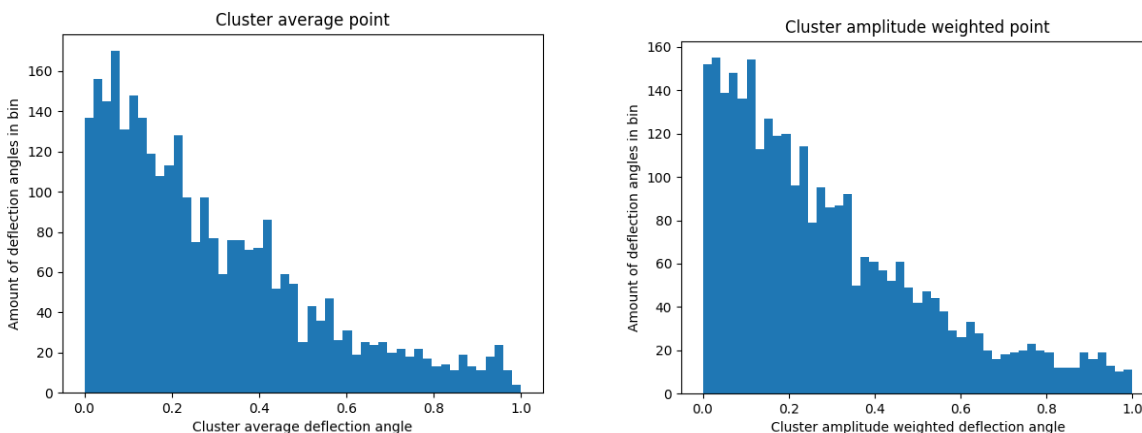
Peamine erinevus on see, et kolme punkti puhul näitab kvantitatiivne arvestus, et kahe pakutud klastripunktide arvutamise meetodi vahel ei ole erinevusi (tabel 16).

Tabel 16. Klastrite keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti mediaan- ja keskmine nurk

	Kõikide nurkade summa	Hajumise mediaannurk	Hajumise keskmine nurk
Klastrite keskmine punkt	1034.27	0.23744	0.333

Klastrite amplituudi kaalutud punkt	1044.94	0.2418	0.3365
-------------------------------------	---------	--------	--------

Esmane statistika näitab, et geomeetriliselt arvutatud klastrite punkt näitab paremat tulemust võrreldes amplituudipunktiga (joonis 19).



Joonis 19. Klastrite keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti võrdlus

Klastrite keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti standardhälbed on toodud välja tabelis 17.

Tabel 17. Klastrite keskmise punkti ja amplituudi kaalutud punkti standardhälbed

	Klastrite keskmine punkt	Klastrite amplituudi kaalutud punkt
Standardhälve	0.32	0.3235

Erinevate kihtide kolme punkti puhul võime järeldada, et nii keskmise amplituudi kui ka amplituudi kaalutud koordinaatide arvutamise lähenemisviisidel on peaaegu samad tulemused ja me ei näe siin vajadust ühe või teise eelistamiseks.

KOKKUVÕTE

Tänapäeva kiiresti arenevas maailmas ületab üha rohkem kaupa ja inimesi riigipiire, mistõttu kõik parandused, mis aitavad ebaseaduslikke kaupu kiiresti ja paremini ära tunda, muudavad maailma turvalisemaks ja usaldusväärsemaks.

Käesolevas teadustöös uuriti müüontomograafi laboriprototüübist saadud andmeid.

Selgus, et ainult 57% kiutabamustest koosneb üksnes ühest kiutabamusest, mis tähendab, et ainult $(0.57)^4 \sim 10.56\%$ müüoni jälgedest saab arvutada otse ilma vaidlemata müüoni raja geomeetria üle. Ülejäänud peaaegu 9 müüoni jälge 10-st saab arvutada erinevate lähenemisviiside abil.

Antud töös analüüsiti võimalike arvutuste kolme lähenemisviisi:

- 1) Suurema amplituudiga punkti leidmine
- 2) Keskmise geomeetrilise punkti leidmine kõigi klastrite vahel
- 3) Amplituudi kaalutud klatri koordinaatide leidmine

Hüpotees vastab tõele kahe juhtumi puhul kolmest. Vähemalt kahes kolmest andmerühmast näitab amplituudi kaalutud arvutusmeetod paremat tulemust ja üks näitab, et teise ja kolmanda lähenemisviisi vahel pole palju erinevusi.

Esimene lähenemine näitab kõigi uurimisjuhtumite halvimat tulemust.

Mida saab edasi teha?

Viimasel aastakümnel on tehisintellekti tehnoloogias tõeline revolutsiooni.

Müüontomograafia võib anda palju puhtaid toorandmeid, mida saab analüüsida süvaõppe algoritmidega ning võrrelda selles artiklis näidatud tulemustega, et arendada seda valdkonda edasi.

SUMMARY

In a rapidly developing world, more and more goods and people cross borders, so any improvements that will help to quickly and better recognize illegal goods will make the world safer and more reliable.

This scientific work examines the data obtained from the laboratory prototype of the muon tomograph.

Only 57% of fiber events consist from only one fiber event, which means that only 10.55% of muon tracks can be calculated directly without any argue about muon track geometry. Other almost 9 of 10 muons tracks can be calculated with help of different approaches.

In this work there was an analyzing of three approaches of possible calculations:

- 1) Finding the point with bigger amplitude
- 2) Finding the average geometrical point between all clusters
- 3) Finding the amplitude weighted cluster coordinates

The hypothesis is true in two of the three cases. At least in two of three data groups the amplitude weighted calculation approach shows the better result, and one shows that there are not much difference between second and third approaches.

First approach shows the worst performance in all research cases.

What can be done next?

Last decade the artificial intelligence technics created a revolution in tech.

Muon tomography can provide a lot of clean raw data that can be analyzed with deep learning algorithms and compared with the results shown in this paper to point the right way forward.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Anbarjafari, G., Anier, A., Avots E., Georgadze A., Hektor, A., Kiisk, M., Kutateladze, M., Lepp, T., Mägi, M., Pastsuk, V., Plinte, H., and Suurpere, S. (2021), “Atmospheric ray tomography for low-Z materials: implementing new methods on a proof-of-concept tomograph,” *Eng. Res. Express*, **3**.
2. Blanpied, G., Kumar, S., Dorroh, D., Morgan, C., Blanpied, I., Sossong, M., McKenney, S., and Nelson, B. (2015), “Material discrimination using scattering and stopping of cosmic ray muons and electrons: Differentiating heavier from lighter metals as well as low-atomic weight materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*,” Symposium on Radiation Measurements and Applications 2014 (SORMA XV), **784**:352 – 358.
3. Bonomi, G. (2017), “Progress in Muon Tomography,” The European Physical Society Conference on High Energy Physics, **609**.
4. Clarkson, A. (2015), „Characterising encapsulated nuclear waste using cosmic-ray muon tomography,” *JINST*, nr 10.
5. Eelsalu, H. (1996), “Astronoomialeksikon,” Eesti Entsüklopeediakirjastus.
6. Kiisk, M., Anbarjafari, G., Anier, A., Georgadze, AS., Mägi, M., Avots, E., and Suurpere, S. (2019), “Development of a polystyrene-based scintillation fiber-mat telescope for cosmic ray detection”.
7. Mikkor, M. (2021), “Kosmilise kiirguse tomograafi mõõteefektiivsuse karakteriseerimine”.
8. Riggi, S., Antonuccio, V., Bandieramonte, M., Becciani, U, Belluso M, et al. (2013), „A large area cosmic ray detector for the inspection of hidden high-Z materials inside containers,” *Journal of Physics: Conference Series.*, kd. 1, nr 409.
9. Schultz, L., Borozdin, K., Gomez, J., Hogan, G., McGill, J., Morris, C., Priedhorsky, W., Saunders, A., and Teasdale, M. (2004). “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.
10. Suurpere, S. (2019), “Design and implementation of a cosmic ray muon detector”.

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ELEKTROONSEKS AVALDAMISEKS

Mina, Alexey Filippov,

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

”Erinevatel müüontomograafi laboriprototüübist saadud andmetel põhinevate
väljaarvatusmeetodite analüüs“,

mille juhendaja on Madis Kiisk,

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

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.

Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

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

Alexey Filippov

20.04.2022