

GEM-TPC-ilmaisimen testimittausten datan analyysi

Pro gradu -tutkielma, 1.11.2017

Tekijä:

MINNA LUOMA

Ohjaaja:

TUOMAS GRAHN



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIIKAN LAITOS

Tiivistelmä

Luoma, Minna

GEM-TPC-ilmaisimen testimittausten datan analyysi

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2017, 76 sivua.

GEM-TPC-ilmaisimien on kaasutäytteinen hiukkasilmaisin, jolla pystytään mittaamaan hyvin pieniä sähköisiä signaaleja ja niiden syntyä paikkaa ilmaisimissa. Näitä ilmaisimia tullaan tulevaisuudessa käyttämään mm. FAIR-tutkimuslaitoksen Super-FRS-nimisessä fragmenttiseparaattorissa.

Tässä tutkielmassa analysoin kesällä 2016 GEM-TPC:llä GSI:ssä suoritettuja ilmaisintestimittauksia ROOT-ohjelmiston avulla. Alkuun kerron, miksi GEM-TPC-ilmaisimien on lähdetty suunnittelemaan, minkälaisia mittauksia ja missä sillä on tarkoitus tehdä. Tutkielman loppupuolella analysoin testimittausten tuloksia. GSI:ssä GEM-TPC:tä testattiin Xe- ja C-suihkujen avulla. Tässä tutkielmassa perehdyn syvemmin C-suihkusta tehtyihin mittauksiin, mutta teen myös analyysin liittyen Xe-suihkulla tehtyyn mittaukseen.

Tutkielmassa tekemäni analyysin perusteella ilmaisimien näyttää toimivan hyvin ja se täyttää osan sille asetettuja vaatimuksia, kuten mittauksen suorittaminen vakaasti useiden päivien ajan, ilman, että sen läheisyyteen tarvitsee kenenkään mennä. Mittaustaajuuden kasvattaminen ilmaisimissa ei näytä vaikuttavan ilmaisimen toimintaan. Erilaisilla vahvistuksilla ja sähkökentillä ei myöskään tullut ilmi, mitään erityistä huomiota vaativaa asiaa.

Analysoituissa mittauksissa ei tosin käytetty mittaustaajuutena suurimpia taajuuksia, joilla ilmaisimen tulee pystyä operoimaan eikä suurimpia energioita, joilla ilmaisimen tulee pystyä mittaamaan. Näin ollen tulevaisuudessa tulee vielä suorittaa uusia ilmaisimen suorituskyvyn mittauksia mm. suuremmilla mittaustaajuuksilla ja energioilla, jotta voidaan varmistua ilmaisimen olevan kykenevä täyttämään kaikki sille asetetut vaatimukset.

Avainsanat: GEM-TPC-ilmaisimien, GEM-kalvo, TPC

Abstract

Luoma, Minna

Data analysis of GEM-TPC detector test measurement

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2017, 76 pages.

The GEM-TPC detector is a gas filled particle detector capable of measuring very small electrical signals and their origin in the detector. These detectors will be used in the future for example in FAIR facility in the Super-FRS fragmentation separator.

In this thesis, I analyze the measurements carried out by the GEM-TPC in GSI in the summer 2016 using the ROOT software. At first I will tell why the GEM-TPC detector is developed, what measurements and where it will be used. At the end of the thesis I analyze the results of the detector measurements. In GSI the GEM-TPC detector was tested using Xe and C beams. In this thesis, I'm going to study deeper into the C beam measurements, but at the end of the thesis I will also do an analysis of the Xe beam measurement.

Based on my analysis in my thesis, the detector seems to work well and meets some of the requirements set for it, such as performing a measurement steadily for several days, without having to go anywhere near to it. Increasing the measurement frequency in the detector does not seem to affect the operation of the detector. Also, various reinforcements and electric fields did not reveal any special interest.

The analyzed measurements were not used the highest frequencies and energies that the detector should be able to operate. Therefore, further measurements of the detector's performance will still be required in the future, with higher frequencies and energies, to ensure that the detector is capable of meeting all of its requirements.

Keywords: GEM-TPC detector, GEM foil, TPC

Sisältö

1	Johdanto	6
2	FAIR	7
2.1	Super-FRS	8
2.2	Mittausolosuhteet Super-FRS:ssä	8
3	GEM-TPC-ilmaisimien	9
3.1	GEM-kalvot	11
3.1.1	GEM-kalvon rakenne	12
3.1.2	GEM-kalvojen laatuksiteerit	14
3.2	TPC	14
3.2.1	Hiukkasen paikan määrittäminen TPC:ssä	15
3.2.2	Kenttähäkin rakenne ja siihen liittyvät laatuksiteerit	15
4	Hiukkasen massa/varaus-suhteen määrittäminen	18
4.1	Hiukkasen energianjättömittaus	19
5	Kesän 2016 mittauksien	20
5.1	Mittauksissa käytettävä kaasun	21
5.2	Mittauksista saadun datan muuttaminen LMD-tiedostosta CAL ROOT-tiedostoksi	22
6	TPC- ja GEM-TPC-ilmaisimien kalibraatiot	23
6.1	Kalibraation mittaus	23
7	C-suihkun profiili	24
8	Mitatun ja lasketun paikan erotus eri ilmaisimien välillä	26
9	Tarkistussumma (control sum)	31
9.1	Keskimääräinen tarkistussumma sähkökentän funktiona	32
10	Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona	36
10.1	Mittauksien GEM-TPC:n eri sähkökentillä	36

10.2	Mittaukset GEM-TPC:n eri vahvistuksilla	39
10.3	Mittaukset suihkun eri skaalauksilla	42
11	Tarkistussumma mittaustaaajuuden funktiona	45
11.1	Eri vahvistuksilla	45
11.2	Eri sähkökentillä	47
12	Tarkistussumma ajan funktiona	48
12.1	Eri sähkökentillä	48
12.2	Eri vahvistuksilla	49
13	Analyysi Xe-suihkusta	50
13.1	Xe-suihkun profiili	50
13.2	Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona Xe-suihkulla .	53
14	Johtopäätökset	61
	Lähteet	64
A	CAL ROOT-tiedoston sisältämät parametrit	66
B	GEM-TPC-ilmaisimesta mitatut virrat ja jännitteet ilmaisi- men eri osista	69
C	Katodin ja ensimmäisen GEM-kalvon välisen resistanssin mää- ritys	71
D	Ensimmäisen GEM-kalvon yli olevan resistanssin määritys	72
E	Toisen GEM-kalvon yli olevan resistanssin määritys	73
F	Kolmannen GEM-kalvon yli olevan resistanssin määritys	74
G	Kalvojen välisen tilavuuden resistanssin määritys	75
H	Resistanssi alimman GEM-kalvon ja anodin välillä	76

1 Johdanto

Ionisoivan säteilyn käytön historia ulottuu reilun sadan vuoden taakse vuoteen 1895, jolloin Wilhelm Conrad Röntgen keksi röntgensäteilyn. Tämän jälkeen tutkimus liittyen ionisoivaan säteilyyn, sen käyttöön, aineen rakenteeseen ja atomin yhä pienempiin osasiin kasvoi suunnattomasti ja vuosien saatossa on kehitetty tärkeitä sovelluksia mm. lääketieteen tarpeisiin, kuten röntgenkuvauslaitteet.

Nykyaikana säteilynilmaisimia käytetään edelleen apuna mm. lääketieteessä, ydinfysiikan tutkimuksissa ja teollisuuden eri osa-alueilla. Tutkimuksen kehitys liittyen hiukkasilmaisimiin ei suinkaan ole vielä loppunut, vaan yhä edelleen tarvitaan tehokkaampia ilmaisimia. Saksaan rakennettavassa FAIR-tutkimuslaitoksessa NUSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions) -kollaboraatio aikoo tutkia alkuaineiden syntyyn liittyviä reaktioita [1, s. 4]. Nykykäsityksen mukaan rautaa raskaammat alkuaineet saavat alkunsa tähtien romahtaessa tai niiden törmätessä toisiinsa [1, s. 4]. Alkuaineiden syntyyn liittyvän tutkimuksen avuksi rakennetaan FAIRiin Super-FRS-fragmenttiseparaattori, jonka avulla voidaan erotella siihen ohjatut isotoopit [2, s. 85].

Tässä tutkielmassa tutkittavana on GEM-TPC-hiukkasilmaisim, joka tulee olemaan osa Super-FRS:n fragmenttiseparaattoria. Super-FRS:ssä GEM-TPC-ilmaisimia tullaan käyttämään hiukkassuihkun seurannassa ja hiukkasten identifikaatiossa [3]. GEM-TPC-ilmaisim yhdistää kaksi tunnettua ilmaisintyyppiä yhdeksi ilmaisimeksi. Nämä ovat GEM (gas electrol multiplication) eli kaasutäytteinen elektronivahvistin ja TPC (time projection chamber) eli aikaprojektiokammio. Tässä tutkielmassa tästä eteenpäin käytetään näistä nimiä GEM ja TPC. GEM-TPC-ilmaisimen kehitystyön pohjana on ollut GSI:ssä aiemmin operoineet TPC-ilmaisimet, joihin on GEM-TPC-ilmaisimissa lisätty GEM-kalvot mahdollistamaan yhä pienempien sähköisten signaalien mittaaminen.

GEM-kalvojen kehittäjänä on toiminut Fabio Sauli ja ensimmäinen artikkeli liittyen kalvoihin julkaistiin jo vuonna 1996 [4]. GEM-TPC-ilmaisimen avulla saadaan tietoa tapahtuneen ionisaation syntypaikasta, elektronin lentoajan, nopeuden ja mitatun sähköisen signaalin syntypaikan perusteella. Super-FRS:ssä vallitsevien haastavien olosuhteiden vuoksi, sinne asennettaville ilmaisimille on luotu tiettyjä laatukriteereitä ja vaatimuksia, jotka ilmaisimen tulee täyttää ennenkuin se voidaan hyväksyä operoivaksi ilmaisimeksi.

Tässä tutkielmassa esittelen ensin GEM-TPC-ilmaisimen rakennetta, sekä sen toimintaperiaatetta ja tutkielman loppupuolella analysoin GSI:ssä kesälä 2016 tehtyjä ilmaisintestimittauksia ROOT-ohjelmiston avulla. Analyysin avulla tarkoitukseni on selvittää täyttääkö GEM-TPC-ilmaisimille asetettuja laatukriteereitä ja vaatimuksia.

2 FAIR

FAIR eli Facility for Antiproton and Ion Research on Saksaan rakenteilla oleva monikansallinen tutkimuslaitos, joka tulee koostumaan 4 varastorenkkaasta, kahdesta lineaarisesta hiukkaskiihdyttimestä, kahdesta synkrotronista ja näihin hiukkaskiihdyttimiin liittyvästä noin 3,5 km pitkästä korkean energian suihkulinjasta [1, s. 14][5, s. 13]. FAIR:ssa NUSTAR eli Nuclear Structure, Astrophysics and Reaction -kollaboraatio tulee tutkimaan epästabiliin nukleonien rakennetta ja dynamiikkaa [1, s. 26]. FAIR:iin on suunnitteilla Super-FRS-nimeä kantava fragmenttiseparaattori, jonka tulee pystyä erottelemaan siihen ohjatuista hiukkassuihkuista halutut isotoopit ja ohjaamaan ne edelleen eri koealueille erilaisiin mittauksiin [1, s. 4].

2.1 Super-FRS

Super-FRS eli Superconducting Fragment Separator on fragmenttiseparatori, jonka tarkoitus on pystyä mittaamaan tehokkaasti ja nopeasti erityyppisiä hiukkasia [1, s. 19]. Hiukkasten erottelu on tarkoitus pystyä tekemään noin 100 ns aikana [2, s. 5]. Separaattoriin ohjatuissa suihkuissa osa hiukkasista on hyvin lyhytikäisiä, joten niiden mittaamiseen tarvitaan tarkkoja mittalaitteita.

Super-FRS:llä on tarkoitus pystyä separoimaan eli erottelemaan relativistisen energian omaavia raskaita ioneja, aina uraaniin ja 10^{11} ionia/s intensiteetteihin asti [1, s. 38].

2.2 Mittausolosuhteet Super-FRS:ssä

Olosuhteet Super-FRS:ssä ovat radioaktiivisia suurenergisen ja intensiivisen suihkun vuoksi. Tämän vuoksi Super-FRS:ssä operoivilta mittalaitteilta edellytetään hyvää säteilynkestoa ja niiden operointi tulee pystyä tekemään siten, ettei niiden läheisyyteen tarvitse mennä. Käytettävät ilmaisimet eivät saa myöskään vaikuttaa suihkun rakenteeseen.

Aiemmin FRS:ssä käytettyjen TPC-ilmaisinten suorituskyvyn rajat tulevat vastaan, kun suihkun nopeus ja energia kasvavat. Tämän vuoksi on päädytty kehittämään uusi tehokkaampi hiukkasilmaisimien GEM-TPC, joka kykenee operoimaan suuren intensiteetin suihkuilla tässä haastavassa ympäristössä.

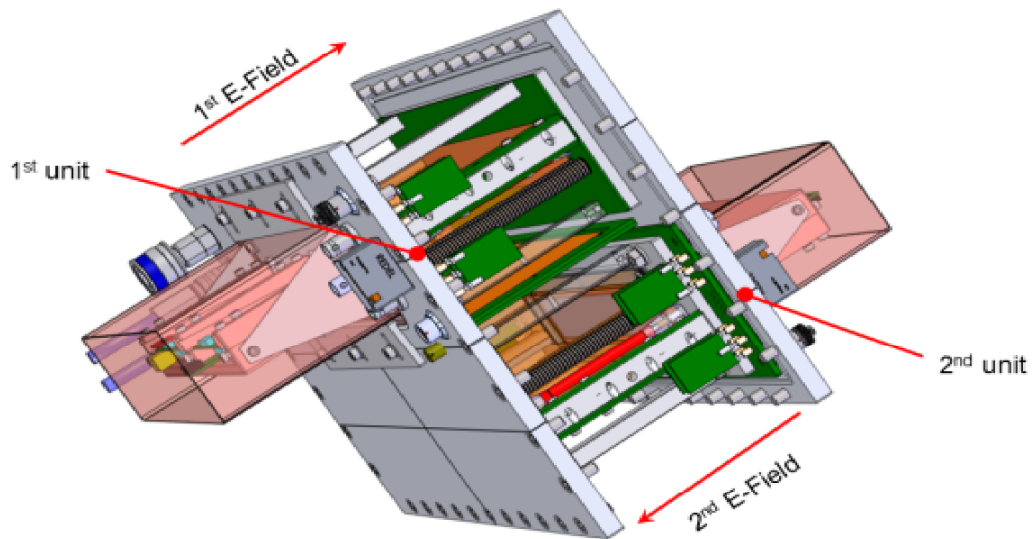
Super-FRS:ssä toimivien GEM-TPC-ilmaisimien on täytettävä tiettyjä laatuksiteereitä, jotta ne voidaan hyväksyä operoiviksi ilmaisimiksi [2]. Näihin laatuksiteereihin kuuluu mm. kenttähäkkiin (field cage) ja GEM-kalvoihin liittyviä kriteerejä, jotka ilmaisimen tulee täyttää. Laatuksiteereitä käsitellään tarkemmin kappaleissa *GEM-kalvojen laatuksiteerit* ja *Kenttähäkin rakenne ja siihen liittyvät laatuksiteerit*.

3 GEM-TPC-ilmaisimien

GEM-TPC:hen on yhdistetty kaksi aiemmin tunnettua komponenttia yhdeksi hiukkasilmäsimiksi. Nämä ovat GEM (gas electron multiplication) eli kaasutäytteen elektronivahvistin ja TPC (time projection chamber) eli aikaprojektioammio. GEM-kalvot on yhdistetty TPC:hen, jotta ilmaisimella pystytään mittaamaan yhä pienempiä sähköisiä signaaleja.

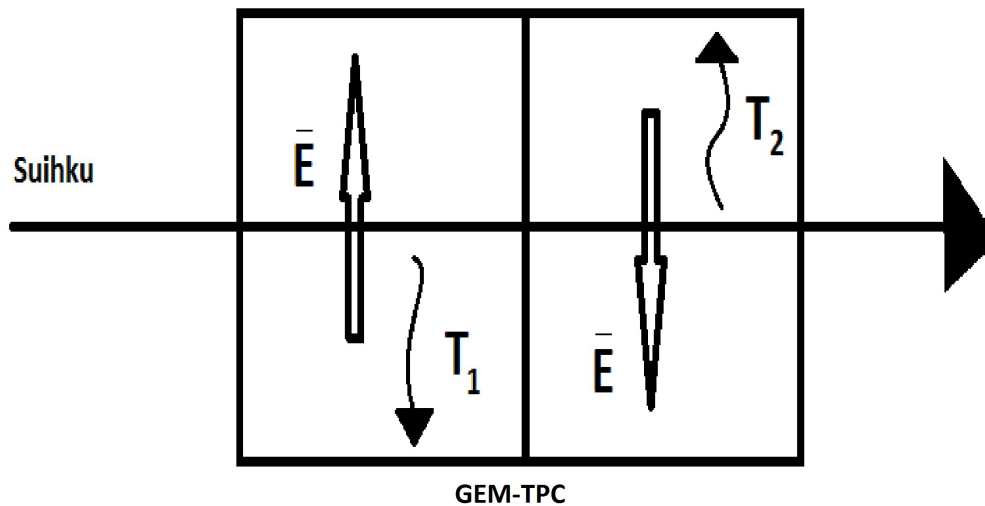
GEM-TPC:n avulla on tarkoitus pystyä seuraamaan fragmenttiseparaattorin hiukkasuihkua [1, s. 4]. Suihkusta on tarkoitus pystyä mittaamaan hiukkasen magneettinen jäykkyys, joka on verrannollinen hiukkasen liikemäärään, joka puolestaan on verrannollinen hiukkasen paikkaan fokaalitasossa. Näin ollen GEM-TPC:llä mitattavat hiukkasen x- ja y-koordinaatit ovat tärkeässä roolissa hiukkasuihkun analysoinnissa [2, s. 7].

CAD-kuva eli tietokoneella piirretty kuva Super-FRS:ään suunniteltavista GEM-TPC-ilmaisimista on kuvassa 1. Ilmaisimeen on yhdistetty kaksi GEM-TPC-ilmasinta yhdeksi twin-GEM-TPC-ilmaisimeksi. Twin-GEM-TPC:n sisällä olevan sähkökentän tulee olla mahdollisimman tasainen ja se voidaan kasvattaa aina 550 V/cm asti [2, s.15]. Kuvasta 1 nähdään, että kahden yhteenliitetyn GEM-TPC:n sähkökenttien suunnat ovat y-akselin suuntaiset ja ne on valittu vastakkaisuuntaisiksi, jotta elektronien yhteenlaskettu ajautumisaika ilmaisimen kummassakin yksikössä pysyy vakiona.



Kuva 1: Kaksi GEM-TPC-ilmaisinta yhdistettynä yhdeksi ilmaisimeksi. Kuvaan on merkitty lisäksi kummankin ilmaisimen sähkökentän suunta [2].

Kuvassa 2 on kuva, jossa näkyy GEM-TPC-ilmaisimen kummankin yksikön sähkökentän suunta ja ionisaatioissa syntyneiden elektronien ajautumissuunnat. Kuvan 2 perusteella nähdään, että elektronien yhteenlasketut ajautumisajat (drift time) ilmaisimessa pysyvät vakiona, vaikka suihku osuisi ilmaisimeen eri korkeudelta. Ilmaisimien keskikohtien määrittäminen samalle kohtaa, tehdään käyttäen apuna lasereita. Tällöin keskikohtien tarkkuus saadaan asetettua 0,1 mm virhemarginaaliin [2, s. 21]. Kummankin ilmaisimen on pystyttävä operoimaan 0,3 mbar paineesta aina 1 bar ylipaineeseen asti [2, s. 17].

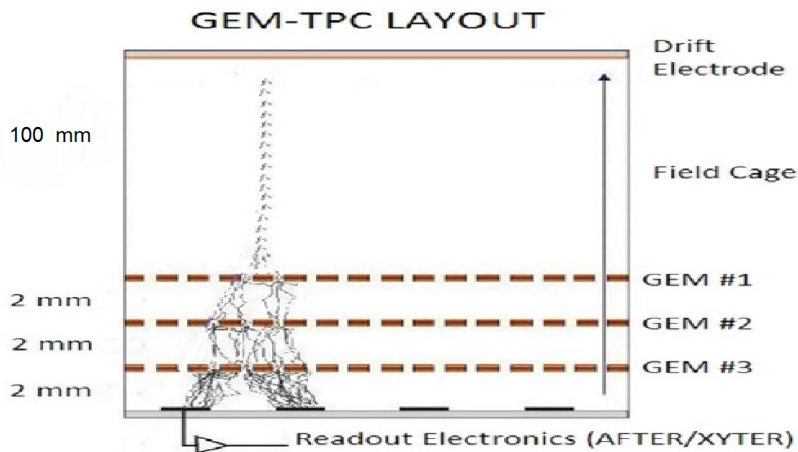


Kuva 2: Kuvassa näkyy GEM-TPC-ilmaisimen kummankin yksikön sähkökentän suunta ja ionisaatioissa syntyneiden elektronien ajautumissuunnat.

3.1 GEM-kalvot

GEM-kalvojen on tarkoitus toimia pienten sähköisten signaalien vahvistajana. Kalvojen toimintaperiaate on se, että kalvoilla oleviin aukkoihin ajautuneet elektronit ionisoivat tehokkaasti uusia kaasumolekyylejä, pienemmän tilavuuden ja suuremman sähkökentän vuoksi. GEM-kalvojen avulla voidaan mitata hyvin pieniä sähköisiä signaaleja, sillä niillä saatavan vahvistuksen koko voi olla kymmenien tuhansien luokkaa, riippuen käytettävästä potentiaalierosta kalvojen välillä.

Käytettäessä GEM-kalvoja sähköisen signaalin vahvistajana, luodaan ilmaisimen katodin ja anodin välille potentiaaliero, käyttäen apuna vastuksia. Sähkökenttä pyritään luomaan siten, että se kulkee GEM-kalvoilla olevien reikien läpi mahdollisimman hyvin. Kuvassa 3 näkyy kaaviokuva sähkökentän kenttäviivoista GEM-kalvon läpi. Käytettäessä suurta sähkökenttää päättyy osa kentästä kalvojen pintaan, jolloin osa ionisaatioissa syntyneistä elektroneista menetetään niiden osuessa kalvoihin. Pienen sähkökentän tapauksessa elektronien liike kohti anodia on puolestaan hidasta ja rekombinaatioita pääsee helpommin syntymään. Näin ollen käytettäessä GEM-TPC-ilmaisinta pyritään ilmaisimeen luomaan sellainen sähkökenttä, että mahdollisimman suuri osa elektroneista pystytään mittaamaan anodilta.



Kuva 4: GEM-TPC-ilmaisimen ajautumistilavuuden ja GEM-kalvojen etäisyydet ilmaisimen aktiivisessa tilavuudessa. Kuvassa on lisäksi esitetty kenttähäkissä syntyneen elektronin monistuminen ilmaisimen sisällä [8].

3.1.2 GEM-kalvojen laatuksiteerit

GEM-kalvoille on luotu laatuksiteereitä, jotta GEM-TPC-ilmaisimet olisi-
vat vertailukelpoisia ja niiden käyttöikä saataisiin mahdollisimman pitkä-
ksi. GEM-kalvoihin liittyviä laatuksiteereitä ovat vuotovirran mitta-
us, kalvon skannaus korkean resoluution kameralla ja kalvon vahvistuksen tasaisuuden
mittaukset [2, s. 43].

Vuotovirran mittauksessa kalvon ylä- ja alapinnan välille luodaan 100 V po-
tentiaaliero mitaten samalla vuotovirtaa, jos vuotovirta pysyy alle asetetun
0,5 nA rajan, niin jännitettä kasvatetaan asteittain aina 100 V jatkuen 500
V asti. Maksimijännitteellä 500 V, mittausta suoritetaan yhteensä 30 min [2,
s.45].

Optisessa laadunvarmistuksessa tutkitaan kalvoilla olevien aukkojen sisä- ja
pintahalkaisijan kokoa. Aukkojen dimensioiden mittausta suoritetaan, koska
tiedetään sisähalkaisijan suuruuden vaikuttavan kalvolta saatavaan vahvis-
tukseen [6]. Samassa tutkimuksessa saadaan selville myös puuttuuko kalvolta
aukkoja, tai onko kalvo jonkin muun syyn vuoksi vaurioitunut [2, s. 47].

GEM-TPC:n laatuksiteerit edellyttävät, että ilmaisimen vahvistuksen tulee
olla tasainen koko sen aktiivisella alueella. Tämän vuoksi GEM-kalvojen vah-
vistusten tasaisuuden mittaukset suoritetaan kaikille ilmaisimeen asetettavil-
le kalvoille, jos kaikkien kalvojen vahvistukset eroavat toisistaan enintään 7
%, niin kalvot voidaan asentaa ilmaisimeen [2, s.49].

3.2 TPC

TPC-ilmaisimien koostuu kaasulla täytetystä kenttähäkistä (field cage), jonka
pohjan ja huipun välille luodaan potentiaaliero käyttäen apuna vastuksia.
Energeettisen hiukkasen osuessa TPC:hen ionisoi hiukkanen kaasumoleky-
ylejä. Tällöin positiivisesti varautuneet kaasuatomit ajautuvat kohti negatii-
visesti varattua katodia ja elektronit ajautuvat kohti positiivisesti varattua
anodia.

Ilmaisimessa vapautuneen elektronin y-koordinaatti voidaan laskea sen ajautumisajan ja nopeuden avulla. Paikkakoordinaateista x saadaan puolestaan selville anodilla sijaitsevilta signaalinlentalinjoilta (strip). Anodi koostuu signaalinlentalinjoista, sillä tämän rakenteen avulla muodostuneen signaalin luenta on nopeaa ja myös signaalin muodostumispaikka saadaan selville [1, s. 37].

Kenttähäkin sisällä olevan sähkökentän tulee olla mahdollisimman tasainen, jotta ilmaisimeen osuneen hiukkasen paikka voidaan määrittää mahdollisimman tarkasti. Elektronien ajautumisnopeus kohti anodia riippuu käytettävän sähkökentän suuruudesta. Näin ollen, jos sähkökenttä ilmaisimen sisällä on epätasainen, syntyy hiukkasen paikan määrittämiseen epätarkkuutta.

3.2.1 Hiukkasen paikan määrittäminen TPC:ssä

Hiukkasen paikka TPC:ssä voidaan määrittää hiukkasen lentoajan ja nopeuden avulla [9, s. 93]. Hiukkasen y-koordinaatti saadaan laskettua lausekkeesta [9, s. 93]

$$y = v_d \cdot t_d, \quad (1)$$

missä v_d on elektronien ajautumisnopeus ja t_d on elektronien ajautumisaika (drift time). Hiukkasen paikkakoordinaatti x-suunnassa saadaan puolestaan määritettyä anodilta paikasta, jossa sähköinen signaali on syntynyt.

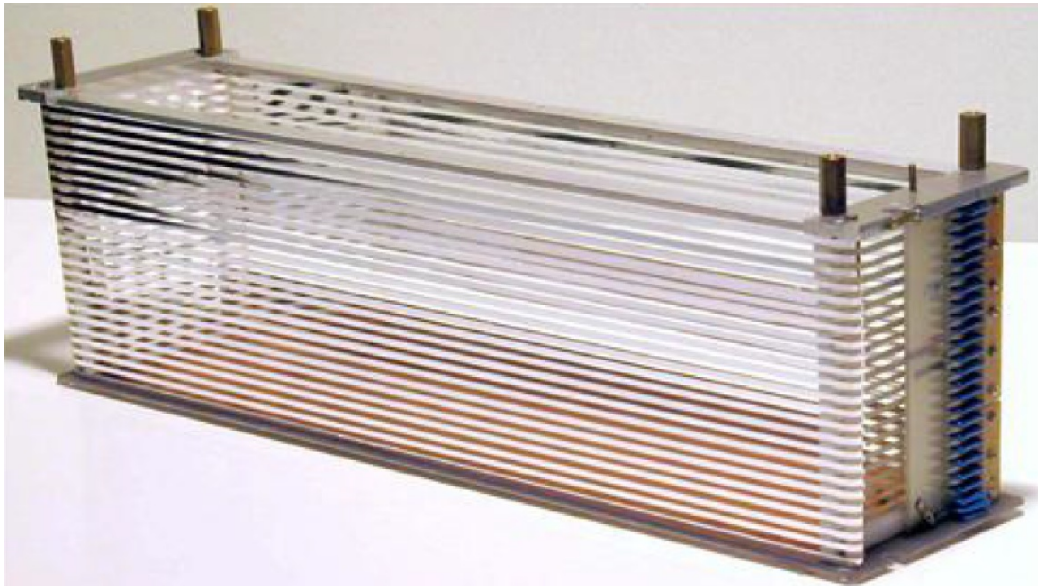
3.2.2 Kenttähäkin rakenne ja siihen liittyvät laatukriteerit

Kenttähäkki koostuu katodilevystä, kalvosta, joka sisältää alumiiniset nauhat sähkökentän suuruuden säätelyyn ja ruostumattomasta teräksestä valmistetusta kehikosta, jonka sisälle ilmaisimen rakennetaan.

Kenttähäkkiin liittyviä laatukriteereitä ovat: hyvä säteilynkesto, sähkökentän määrittelevien pintojen tulee olla tasomaisia, sen tulee pystyä operoimaan

useampia vuosia, se ei saa muuttaa hiukkassuihkun rakennetta tai muotoa, yksikköön eivät saa vaikuttaa ulkoiset sähkömagneettiset häiriöt ja sen sisältämän sähkökentän tulee olla mahdollisimman homogeeninen [2, s.30].

Mahdollisimman tasainen sähkökenttä saadaan luotua kenttähäkin sisälle siten, että häkin pohjan ja yläpinnan välille asennetaan kalvo, jossa on useita toisistaan eristettyjä alumiinisia nauhoja. Nauhojen leveys on $(2,15 \pm 0,03)$ mm ja etäisyys toisistaan $(3,12 \pm 0,05)$ mm [2, s. 32]. Näiden nauhojen välille luodaan potentiaaliero käyttäen apuna vastuksia. Näin saadaan kenttähäkin keskimääräiseksi resistiivisyydeksi yhteensä $(24,79 \pm 0,01)$ M Ω käyttäen SMD 1206 -vastuksia [2, s.34]. Kuvassa 5 näkyy kenttähäkin reunoille asennetut nauhat ja häkin sivussa nauhoja yhdistävät vastukset. Tämän rakenteen avulla saadaan sähkökenttää muutettua mahdollisimman tasaisesti kenttähäkin sisällä.



Kuva 5: Kuvassa näkyy kenttähäkki, jonka reunoihin on asennettu alumiiniset nauhat sisältävä kalvo. Nauhat on yhdistetty toisiinsa häkin reunassa näkyvillä vastuksilla. [8].

Kenttähäkissä käytettävien alumiininauhojen laadunvarmistus tehdään käyttäen digitaalista mikroskooppia. Tällä tavoin voidaan havaita mm. mahdollisia vaurioita nauhoissa [2, s. 39]. Kenttähäkki testataan myös kipinöinnin varalta 5,5 kV jännitteellä Ar/CO₂ kaasuseoksella ennen sen hyväksymistä ilmaisimeen [2, s. 39].

Liitteestä B löytyy taulukot, jotka sisältävät kesän 2016 mittauksissa GEM-TPC-ilmaisimesta mitatut virrat, sekä jännitteet kenttähäkin eri osista. Liitteistä C, D, E, F, G ja H löytyy liitteen B taulukoiden tietojen avulla tekemäni kuvaajat mitatuista jännitteistä virtojen funktiona. Näiden tekemieni kuvaajien kulmakertoimista saadaan laskettua resistanssit kenttähäkin eri osissa. Liitteiden C, D, E, F, G ja H kuvaajista nähdään, että jännitteet kasvavat virran funktiona kaikissa kuvaajissa kauniin lineaarisesti.

4 Hiukkasen massa/varaus-suhteen määrittäminen

Hiukkanen voidaan yksilöllisesti tunnistaa, kun tunnetaan sen varausluku Z ja massaluku A . Super-FRS:ssä hiukkasen yksilölliseen tunnistamiseen käytetään ns. $B \cdot p - \Delta E - ToF$ -metodia [2, s. 70]. Tällöin hiukkasen yksilöllinen tunnistaminen tapahtuu mittaamalla hiukkasen magneettinen jäykkyys, energianjätö ja lentoaika [10]. Näiden mittaamiseen Super-FRS:ssä tarvitaan kolme erillistä mittalaitetta, GEM-TPC-ilmaisimilla mittaamaan hiukkasen paikka, MUSIC-ilmaisimilla mittaamaan energianjätö ja lentoaika-ilmaisimilla mittaamaan hiukkasen nopeus [10].

Hiukkassuihkun magneettinen jäykkyys $B \cdot p$ voidaan määrittää seuraavasta lausekkeesta [2, s. 70]

$$\frac{A}{Q} = \frac{B \cdot p}{\beta \cdot \gamma}, \quad (2)$$

missä B on käytettävän magneettikentän suuruus, p on magneettikentän aiheuttaman hiukkasen ympyräradan säde, β on hiukkasen nopeus, γ on relativistinen Lorentzin termi ja $\frac{A}{Q}$ on hiukkasen massa/varaus-suhte. Hiukkasen magneettinen jäykkyys voidaan määrittää lausekkeella [2, s. 71]

$$B \cdot p = B \cdot p_0 \left(1 - \frac{x_{\text{FHF1}} - M \cdot x_{\text{FMF2}}}{D} \right), \quad (3)$$

missä $B \cdot p_0$ on magneettisen jäykkyyden referenssi fokaalitasossa olevien mitauspisteiden FMF2 ja FHF1 välillä, D on dispersio, M on suurennos ja x_{FHF1} sekä x_{FMF2} ovat hiukkasen mitatut paikat fokaalitasossa. Lausekkeista 2 ja 3 nähdään, että GEM-TPC:llä mitattu paikka on tärkeässä roolissa hiukkasen massa/varaus-suhteen määrittämisessä, sillä hiukkasen magneettinen jäykkyys on verrannollinen hiukkaselle mitattuihin paikkoihin ja magneettinen jäykkyys on edelleen verrannollinen hiukkasen massa/varaus-suhteeseen. Tarkasti mitatun paikan avulla voidaan tarvittaessa myös korjata hiukkasen lentoaikaa, kun hiukkasen nopeus ja paikka tunnetaan.

4.1 Hiukkasen energianjättömittaus

Hiukkasen energianjättö aineeseen perustuu hiukkasen kykyyn ionisoida uusia atomeja. Super-FRS:ssä energianjättömittaukset tehdään MUSIC eli MUlti-Sampling Ionization Chambers -ilmaisimien avulla. MUSIC-ilmaisimessa neljä toisistaan riippumatonta anodia mittaa hiukkasen energianjättöä ja ajautumisaikaa [11, s. 42]. Energianjättömittaus perustuu siihen, että hiukkasen varaustila on verrannollinen hiukkasen energianjättöön aineessa. Keskimääräinen hiukkasen energianjättö tietylle matkalle voidaan määrittää Bethe-Bloch-yhtälön avulla [12, s. 130]

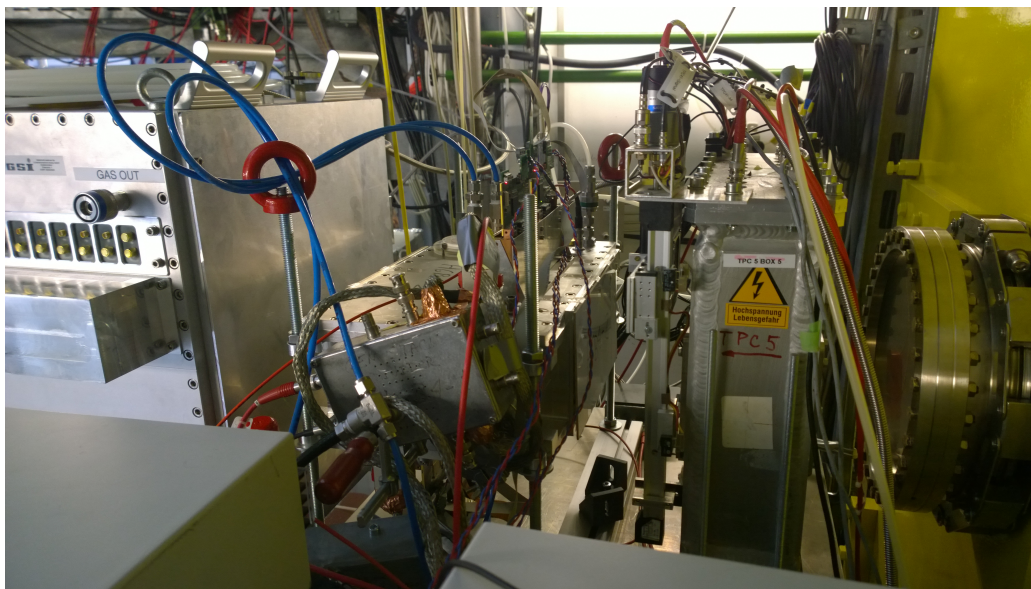
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{4\pi ZpN_A}{Amv^2} \left(\ln \frac{2mv^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right). \quad (4)$$

Lausekkeessa 4, m on elektronin massa, N_A on Avogadron vakio, ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, Z on väliaineen atomin varausluku, A sen massaluku, β on hiukkasen nopeus laskettuna suhteena (v/c), e on alkeisvaraus, p on väliaineen tiheys, I on väliaineen materiaalin efektiivinen ionisaatiopotentiaali ja ze on ionin varaus [12, s.130].

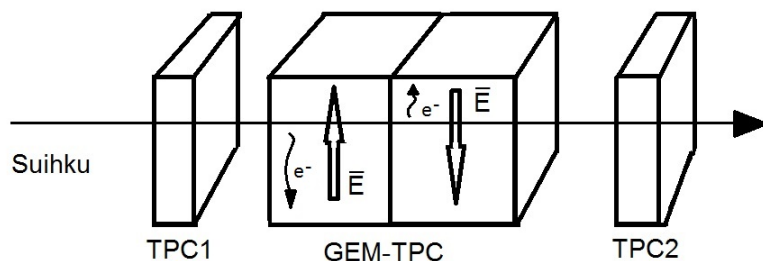
Bethe-Bloch-yhtälöstä voidaan laskea hiukkasen ze eli ionin varaus. Ionin varauksen, hiukkassuihkun nopeuden ja magneettisen jäykkyyden avulla saadaan lopulta selville hiukkasen massa/varaus-suhde, joka usein on mittauksissa mielenkiinnon kohteena. Hiukkasen nopeuden määrittäminen tapahtuu suihkulinjastossa olevien tuikeilmaisimien, pii-ilmaisimien tai diamond-ilmaisimien avulla [13].

5 Kesän 2016 mittaukset

Kesän 2016 mittaukset suoritettiin GSI:ssä Saksassa. Mittauksia tehtiin GEM-TPC:n HGB4-prototyypillä Xe-124 -hiukkassuihkulla, C-12 -hiukkassuihkulla ja näiden fragmentaatiossa eli pirstoutumisessa syntyneillä suihkuilla. Energiat mittauspöytäkirjan mukaan olivat Xe-suihkulla 600 MeV/u ja C-suihkulla 350 MeV/u. Kuvassa 6 näkyy GEM-TPC-ilmaisimien asennettuna paikalleen TPC- ja MUSIC-ilmaisimien väliin ja kuvassa 7 kaaviokuva mittaussasetelmasta, jossa GEM-TPC-ilmaisimien on asennettuna kahden TPC-ilmaisimen väliin. Tässä tutkielmassa keskityn pääasiassa analysoimaan C-12-suihkun mittauksista saatua dataa, mutta tutkielman loppupuolella teen analyysin liittyen Xe-suihkulla tehtyyn mittaukseen.



Kuva 6: Kuvassa keskellä näkyy GEM-TPC-ilmaisimien ja sen oikealla puolella mittauksissa käytetty toinen TPC-ilmaisimien. Kuva saatu mittauksissa mukana olleelta Francisco Garciaalta.



Kuva 7: Kuvassa näkyy kaaviokuva mittausasetelmasta, jossa GEM-TPC-ilmaisimen on asennettu kahden TPC-ilmaisimen väliin. Kuvassa näkyy myös hiukkassuihkun suunta, GEM-TPC-ilmaisimen sähkökenttien suunnat ja ionisaatioissa syntyneiden elektronien ajautumissuunnat.

5.1 Mittauksissa käytettävä kaasu

Super-FRS:ssä operoivan GEM-TPC:n kaasun valintaan vaikuttaa se, että FRS:ssä toimiva TPC-ilmaisimen toimii P10-kaasulla eli argonin ja metaanin muodostamalla kaasuseoksella (tilavuusprosentteilla 90/10) [2, s. 28]. Hyviä puolia argonin ja hiilidioksidin muodostamalla kaasuseoksella on sen myrkyttömyys, kohtuullisen edullinen hinta ja se, ettei se ole helposti syttyvää [7, s. 181]. Kesän 2016 mittauksissa GEM-TPC:ssä käytetty kaasu oli kuitenkin ArCO_2 (tilavuusprosentteilla 90/10).

5.2 Mittauksista saadun datan muuttaminen LMD-tiedostosta CAL ROOT-tiedostoksi

Kesän 2016 mittauksista saadut datatiedostot ovat lmd-muotoisia. Nämä tiedostot on muutettu rawroot-hakemistoiksi, ROOT-ohjelmiston avulla. Rawroot-hakemistosta tiedostot on muutettu edelleen CAL ROOT-tiedostoiksi.

CAL ROOT-tiedostoissa mittausdatoille on tehty seuraavat muunnokset:

- Kaikki mittaustaajuudet on laskettu vastaamaan yksikköä Hz.
- GEM-TPC-ilmaisimeen liitettyjen korttien kanavaluvut on yhdistetty ilmaisimen ensimmäisessä ja toisessa yksikössä siten, että ne vastaa kummassakin yksikössä kanavia 0 - 512.
- Tuikeilmaisimen ajat oikealta- ja vasemmalta puolelta on laskettu vastaamaan yksikköä ns.
- Kaikki mahdolliset ajautumisajat eli tarkistussumma (control sum) on GEM-TPC:ssä laskettu vastaamaan yksikköä ns.
- Standardin eli yksittäisen osuman tapaan (single-hit manner) on tehty TPC:n paikkakalibraatio.
- TPC:n kalibraation avulla on laskettu interpoloitu paikka GEM-TPC:ssä.

CAL ROOT -tiedostojen sisältämien parametrien sisältö löytyy liitteestä A.

6 TPC- ja GEM-TPC-ilmaisimen kalibraatiot

Ennen varsinaisia ilmaisintestimittauksia tulee suorittaa TPC- ja GEM-TPC-ilmaisimien nopeus-, paikka- ja aikakalibraatiot. Kalibraatiot ovat tärkeitä, sillä elektronin y-koordinaatti määritellään hiukkasen ajautumisajan ja nopeuden perusteella. Kesän 2016 mittauksissa oli mukana kaksi FRS:n standardia TPC:tä ja tuikeilmaisim, joista saatavan datan avulla voidaan tehdä tehdä kalibraatiot myös GEM-TPC:lle.

FRS:ssä on käytössä kaksi tapaa tehdä TPC:n kalibraatio: passiivinen mes-sinkivaijerikalibraatio ja aktiivinen tuikevaijerikalibraatio [14]. Tässä tutkielmassa analysoitavissa mittauksissa käytettiin aktiivista tuikevaijerikalibraatiota, jossa TPC:n eteen asetetaan aktiivinen tuikevaijerimaski.

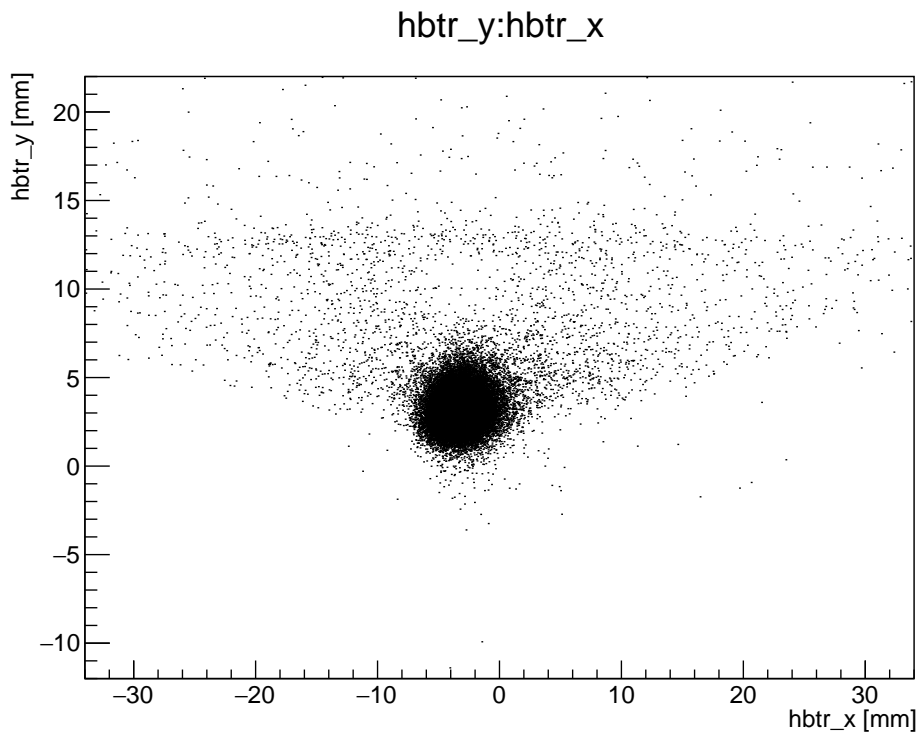
6.1 Kalibraation mittaus

Suoritettaessa ilmaisimien kalibraatiomittauksia asetettiin TPC-ilmaisimen eteen tuikevaijerimaski, jossa on kolme vaijeria horisontaalisessa- ja vaakasuuntaisessa tasossa. Vaijerien välinen etäisyys vaakasuunnassa on 12 mm ja horisontaalisessa suunnassa 6 mm.

Kalibraatiomittauksia suoritettiin mittauspöytäkirjan mukaan Xe-suihkulle yhteensä viisi ja C-suihkulle kolme. Tässä työssä käytettyjen datatiedostojen parametrien kalibraatiot on tehty käyttäen Xe-suihkulla tehtyjä kalibraatiomittauksia.

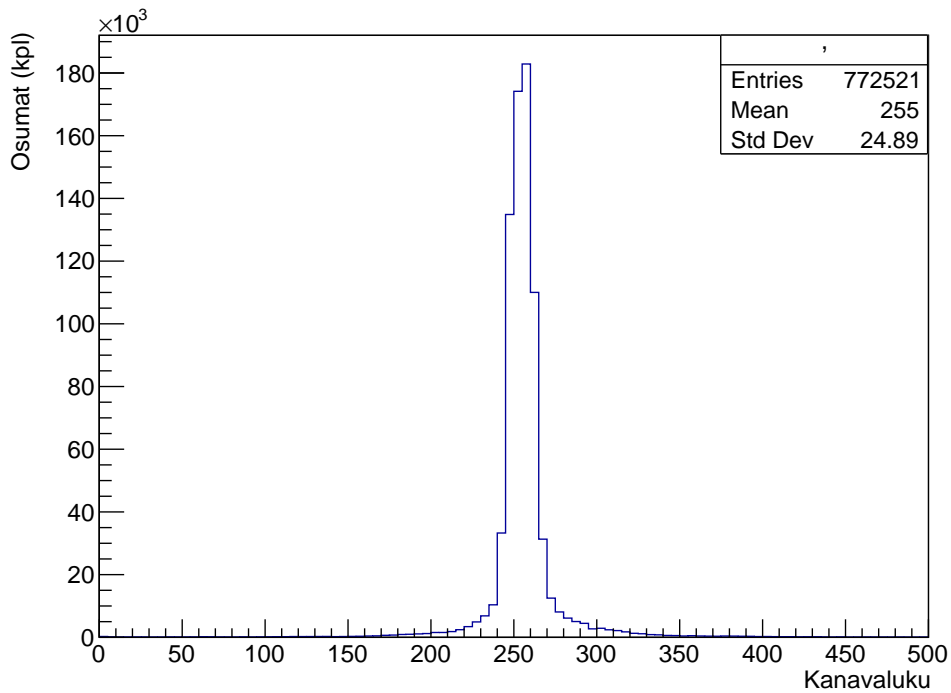
7 C-suihkun profiili

Nyt, kun tarvittavat kalibraatiot mittaustalalle on saatu tehtyä, voin aloittaa tutkimaan hiukkassuihkun profiilia. Ennen GEM-TPC-ilmaisimen suorituskyvyn analyysiä tutkin hieman C-suihkun profiilia erilaisten kuvaajien avulla. Kuvaajien avulla katson, miltä C-suihkun paikan mittaus näyttää GEM-TPC:ssä ja miten mitatut osumat jakautuvat GEM-TPC:n ensimmäiseen ja toiseen yksikköön. Kuvaajissa 8, 9 ja 10 käyttämäni datatiedosto on `cal_c_g1_0309.root`, jonka datalle ei ole annettu erillisiä ehtoja, vaan kuvaajat on tehty kalibraatiossa määritettyjen parametrien avulla. Tässä mitauksessa käytetty sähkökenttä oli 180 V/cm.



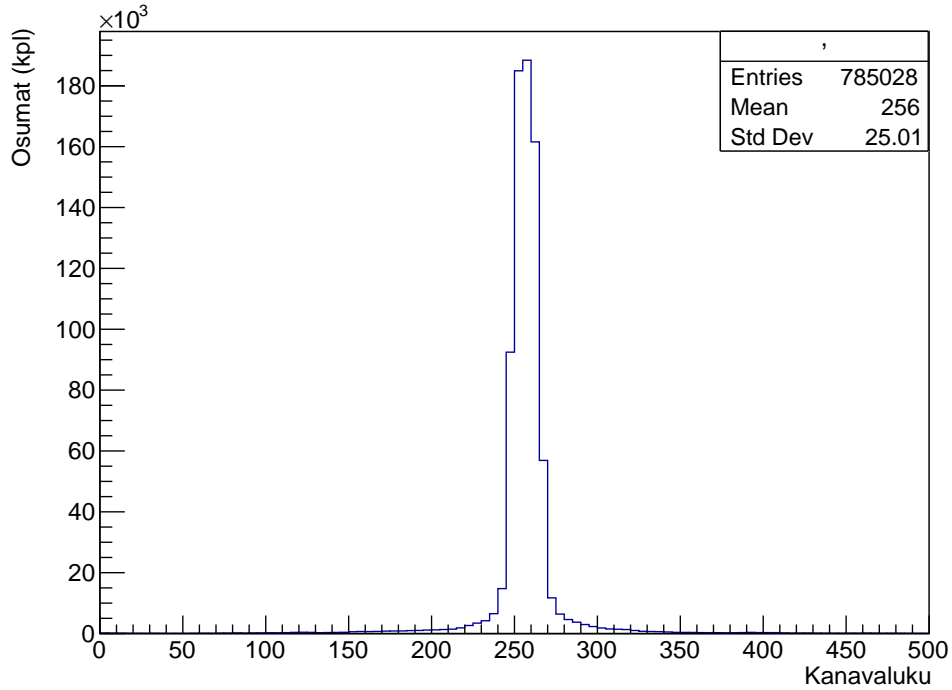
Kuva 8: C-suihkun paikkajakauma y- ja x-suunnassa GEM-TPC-ilmasimessa.

Kuvaajassa 8 näkyy suihkun paikkajakauma x- ja y-suunnassa GEM-TPC-ilmaisimessa. Seuraavaksi selvitän pysyykö GEM-TPC-ilmaisimella mitatut hiukkasten osumat samalla kohtaa ilmasinta, sen ensimmäisessä ja toisessa yksikössä.



Kuva 9: GEM-TPC:llä mitatut osumat ilmasimen kanaviin ilmasimen ensimmäisestä yksiköstä.

Kuvissa 9 ja 10 näkyy GEM-TPC-ilmaisimella mitatut osumat ilmasimen ensimmäisestä ja toisesta yksiköstä. Kuvaajista nähdään, että osumiin paikan keskiarvo vaihtelee yksiköiden välillä 1 kanavan verran ja osumiin keskihajonta eroaa yksiköiden välillä 0,12 kanavan verran. Super-FRS:ssä ope-roivilta ilmaisimilta vaaditaan paikan mittauksen tarkkuudeksi $<0,5$ mm [2, s. 9].



Kuva 10: GEM-TPC:llä mitatut osumat ilmasimen kanaviin ilmasimen toisesta yksiköstä.

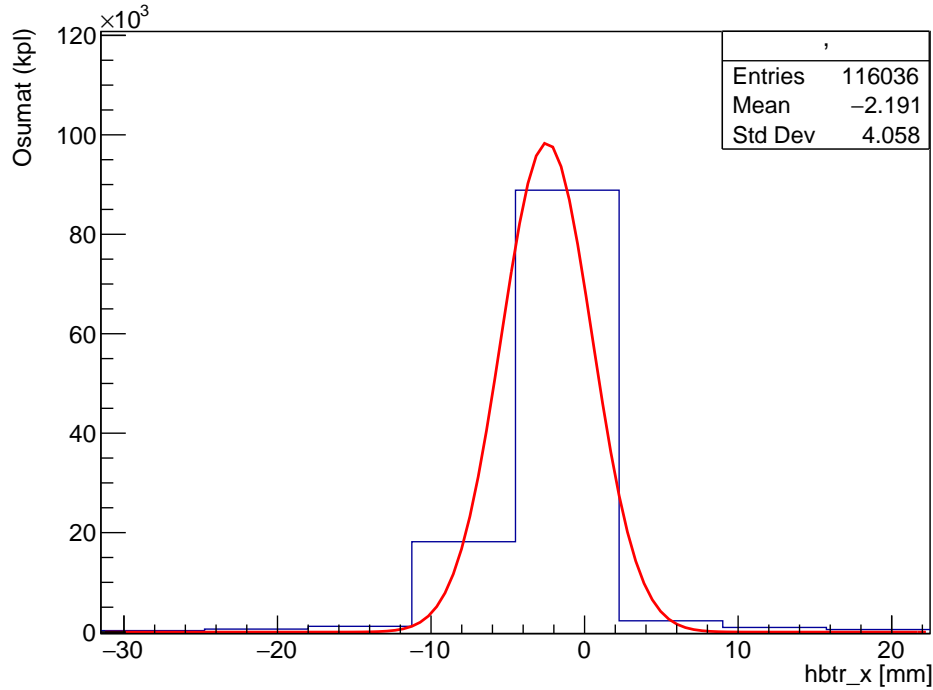
8 Mitatun ja lasketun paikan erotus eri ilmaisimien välillä

Mittauksissa suihkun paikkaa mittasi useampi ilmaisimien, yksi TPC-ilmaisimien GEM-TPC:n kummallakin puolella. Paikkatiedot GEM-TPC-ilmaisimissa on laskettu interpoloimalla, käyttäen apuna TPC-ilmaisimien antamia paikkatietoja. Tämän vuoksi haluan vielä tutkia tuleeko mitatun ja lasketun suihkun paikan välille eroa eri ilmaisimien välillä ja vaikuttaako GEM-TPC:ssä käytettävä sähkökenttä tähän erotukseen. Analyysissäni käyttämäni datatiedot löytyvät taulukosta 1.

Taulukko 1: *Mitatun ja lasketun paikan erotus eri ilmaisimien välillä -* analyysissä käyttämäni datatiedostot ja niissä käytetyt sähkökentät.

Datatiedosto	Sähkökenttä (V/cm)
cal_c_g1_0306.root	150
cal_c_g1_0307.root	160
cal_c_g1_0308.root	170
cal_c_g1_0309.root	180
cal_c_g1_0310.root	190
cal_c_g1_0311.root	200
cal_c_g1_0312.root	210
cal_c_g1_0313.root	220

Paikan määrittämiseksi eri ilmaisimissa tein ensin kuvaajat kaikille taulukossa 1 näkyville datatiedoistoille osumien lukumäärästä paikan funktiona x-suunnassa. Näihin tekemiini kuvaajiin tein Gaussiset sovitukset, joiden avulla sain määritettyä suihkun paikan virheineen x-suunnassa. Esimerkki näistä kuvaajista näkyy kuvassa 11. Kuvaajat osumien lukumäärästä paikan funktiona tein kummallekin mittauksessa käytetylle TPC:lle ja GEM-TPC:lle.



Kuva 11: Kuvaaja osumien lukumäärästä paikan funktiona x-suunnassa GEM-TPC-ilmaisimessa. Kuvaajassa näkyy myös siihen tehty Gaussinen sovitus.

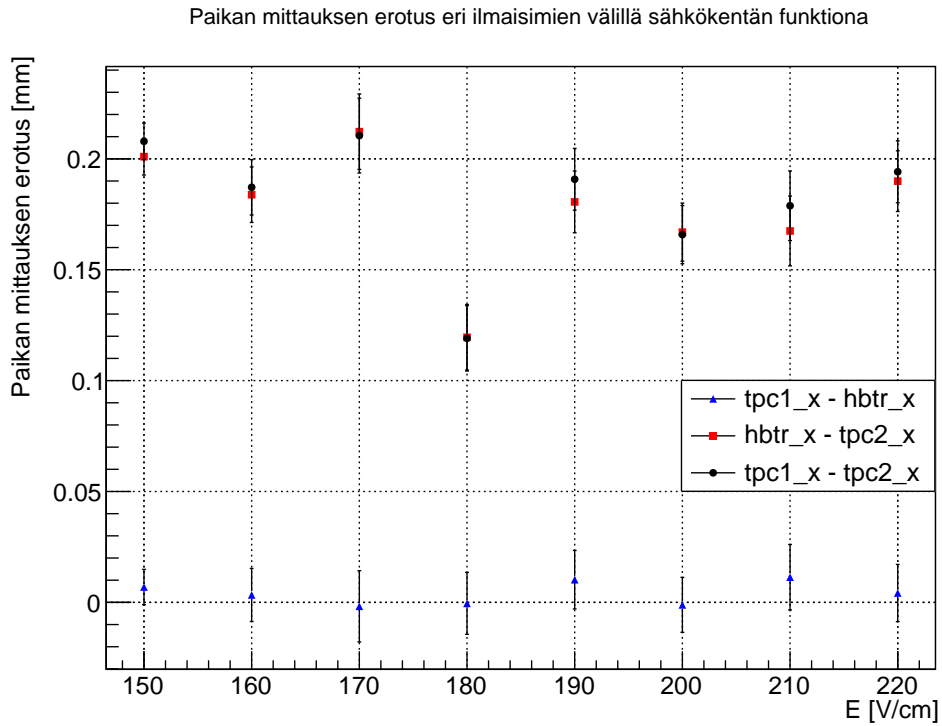
Tämän jälkeen laskin paikkojen erotukset eri ilmaisimien välillä ja tein kuvaajan 12, jossa näkyy paikan erotukset eri sähkökentillä eri ilmaisimien välillä. Kuvaajissa 11 ja 12 käytin kalibraatiossa laskettuja parametreja, ilman erillisiä ehtoja. Laskuissa 5 ja 6 näkyy esimerkkilasku sähkökentällä 150 V/cm paikan mittauksen ja lasketun paikan erotuksesta virheineen TPC1:n ja GEM-TPC:n välillä.

$$\text{tpc1}_x - \text{hbr}_x = -3,06695 - (-3,07387) = 0,00692. \quad (5)$$

Paikan mittauksen ja lasketun paikan erotuksen virhe saadaan laskettua yhdistämällä neliöllisesti kummankin sovituksen antamat paikan mittauksen virheet

$$\delta \text{tpc1_x} - \text{hbtr_x} = \sqrt{(5,59454 \cdot 10^{-3})^2 + (5,65954 \cdot 10^{-3})^2} = 0,007958. \quad (6)$$

Näin paikan mittauksen ja lasketun paikan erotukseksi virheineen TPC1:n ja GEM-TPC:n välillä 150 V/cm sähkökentällä saadaan $(0,007 \pm 0,008)$ mm.

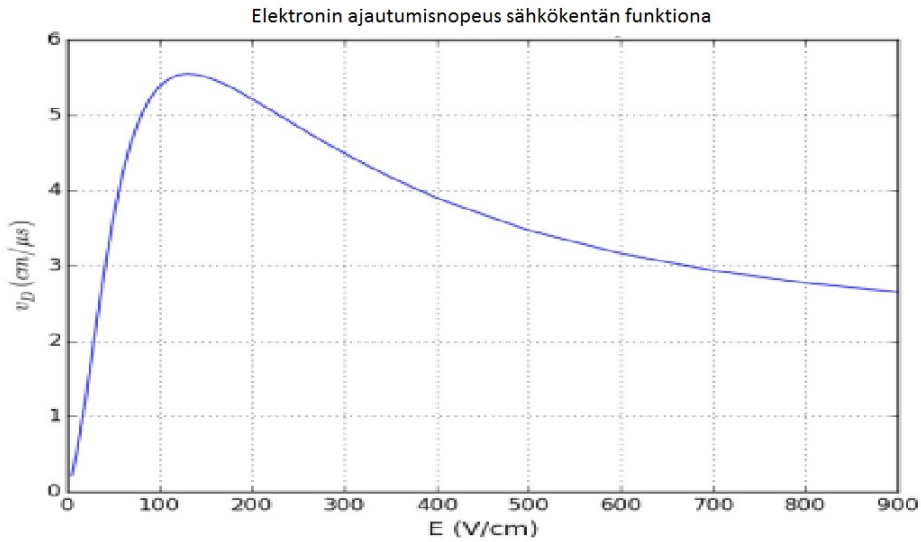


Kuva 12: Kuvassa näkyy TPC1:llä ja TPC2:llä mitattujen paikkojen ja GEM-TPC:hen lasketun paikan erotukset virheineen.

Kuvasta 12 nähdään, että TPC1:n ja GEM-TPC:n välillä mitatun ja lasketun suihkun paikan erotus on maksimissaan noin 0,02 mm. Tämä tulos kertoo GEM-TPC:hen lasketun paikan vastaavan TPC1:ssä mitattua suihkun paikkaa, mikä onkin kalibraation perusteella odotettavaa. GEM-TPC:n ja sen jäljessä olevan TPC2:n välillä lasketun ja mitatun suihkun paikan erotus on maksimissaan noin 0,23 mm ja se on melkein yhtenevä GEM-TPC:n eri puolilla olevien TPC-ilmaisimien väliseen paikan mittauksen erotukseen. TPC2:n ja GEM-TPC:n välinen etäisyys mittauksissa on ollut suurempi kuin TPC1:n ja GEM-TPC:n välinen etäisyys, mikä mahdollisesti aiheuttaa mitatun ja lasketun paikan välisen erotuksen kasvun näiden ilmaisimien välillä. Kuvaajassa TPC-ilmaisimien välinen paikan mittauksen erotus asettuu alle 0,23 mm, minkä perusteella voidaan todeta, ettei GEM-TPC vaikuta suihkun paikkaan, mikä kuuluukin GEM-TPC:lle asetettuihin vaatimuksiin. GEM-TPC:ssä käytettävän sähkökentän suuruudella ei myöskään näytä kuvaajan perusteella olevan vaikutusta mitatun ja lasketun paikan erotukseen.

9 Tarkistussumma (control sum)

Tarkistussumma (control sum) on usein kiinnostuksen kohteena tutkittaessa GEM-TPC-ilmaisinta. Se pitää sisällään hiukkasen kaikki mahdolliset ajautumisajat twin-GEM-TPC-ilmaisimen sisällä. Elektronin ajautumisnopeus kenttähäkin sisällä on riippuvainen kenttähäkissä käytettävästä sähkökentästä. Kuvassa 13 näkyy elektronin ajautumisnopeus käytettäessä P10-kaasua.



Kuva 13: Kuvassa näkyy elektronin ajautumisnopeus sähkökentän funktiona käytettäessä P10-kaasua [2].

Kuvasta 13 nähdään, että elektronin ajautumisnopeus kasvaa ensin sähkökentän funktiona noin 150 V/cm asti ja alkaa sen jälkeen vähenemään sähkökentän yhä kasvaessa. Tarkistussumma eli hiukkasen ajautumisajat ilmaisimissa voidaan laskea seuraavalla lausekkeella [15]

$$\text{Tarkistussumma} = T_{\text{up}} + T_{\text{down}} - 2T_{\text{ref}}, \quad (7)$$

missä $T_{\text{up}} + T_{\text{down}}$ on yhteenlaskettu hiukkasen ajautumisaika kummassakin kenttähäkissä ja T_{ref} on tuikeilmaisimista saatava referenssiaika [15]. Tar-

kistussumman määrittäminen mittauksista on mielekästä, sillä sen avulla voidaan eliminoida mittauksissa esiintyvää kohinaa ja ns. vääriä signaaleja [14].

9.1 Keskimääräinen tarkistussumma sähkökentän funktiona

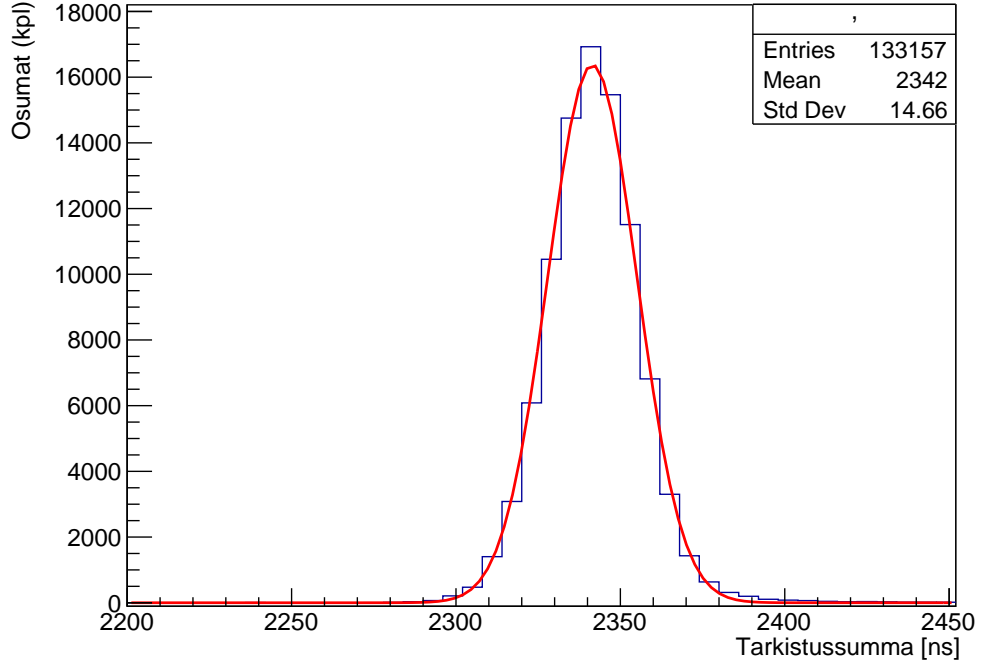
Seuraavassa tarkoitukseni on tutkia, miten tarkistussumman arvo muuttuu sähkökentän funktiona. Teorian mukaan oletuksena on, että alkuun sähkökentän kasvattaminen ilmaisimessa kasvattaa elektronien ajautumisnopeutta, jolloin tarkistussumman eli yhteenlaskettujen ajautumisaikojen tulisi pienentyä, koska suihkun paikka pysyy vakiona. Sähkökentän kasvaessa yli 150 V/cm, alkaa elektronien ajautumisnopeus pienentyä, jolloin tarkistussumman arvon tulisi lähteä kasvamaan.

Analyysissä käytettämäni datatiedostot näkyvät taulukossa 2. Tiedostot olen valinnut siten, että mittaukset on suoritettu peräkkäin, jolloin oletettavasti mittaolosuhteet ovat pysyneet mahdollisimman muuttumattomina tai ainakaan niiden muutoksista ei ole raportoitu mittauspöytäkirjaan. Käyttämäni mittausten kohdalta mittauspöytäkirjasta löytyy kaksi merkintää sähkökenttien 220 V/cm ja 230 V/cm väliltä, joiden mukaan FRS:n magneetteja on skaalattu ensin arvolla 1,001, jolloin suihku on siirtynyt vaakasuunnassa noin 7 mm ja tämän jälkeen vielä uudelleen arvolla 1,001.

Taulukko 2: *Keskimääräinen tarkistussumma sähkökentän funktiona* -analyysissä käyttämäni datatiedostot.

Datatiedosto	Sähkökenttä (V/cm)
cal_c_g1_0305.root	130
cal_c_g1_0306.root	150
cal_c_g1_0307.root	160
cal_c_g1_0308.root	170
cal_c_g1_0309.root	180
cal_c_g1_0310.root	190
cal_c_g1_0311.root	200
cal_c_g1_0312.root	210
cal_c_g1_0313.root	220
cal_c_g1_0316.root	230
cal_c_g1_0317.root	240
cal_c_g1_0318.root	250
cal_c_g1_0319.root	260
cal_c_g1_0320.root	270
cal_c_g1_0321.root	280
cal_c_g1_0322.root	290
cal_c_g1_0323.root	300

Taulukossa 2 näkyvistä datatiedostoista tein ensin kuvaajat osumien lukumäärästä tarkistussumman funktiona. Esimerkki näistä kuvaajista näkyy kuvassa 14. Kuvaajat tein kalibraatiossa määritettyjen parametrien avulla, ilman erillisiä ehtoja. Näihin tehtyihin kuvaajin tein Gaussiset sovitukset, joiden avulla sain määritettyä keskimääräisen tarkistussumman ja siihen liittyvän keskihajonnan arvon.

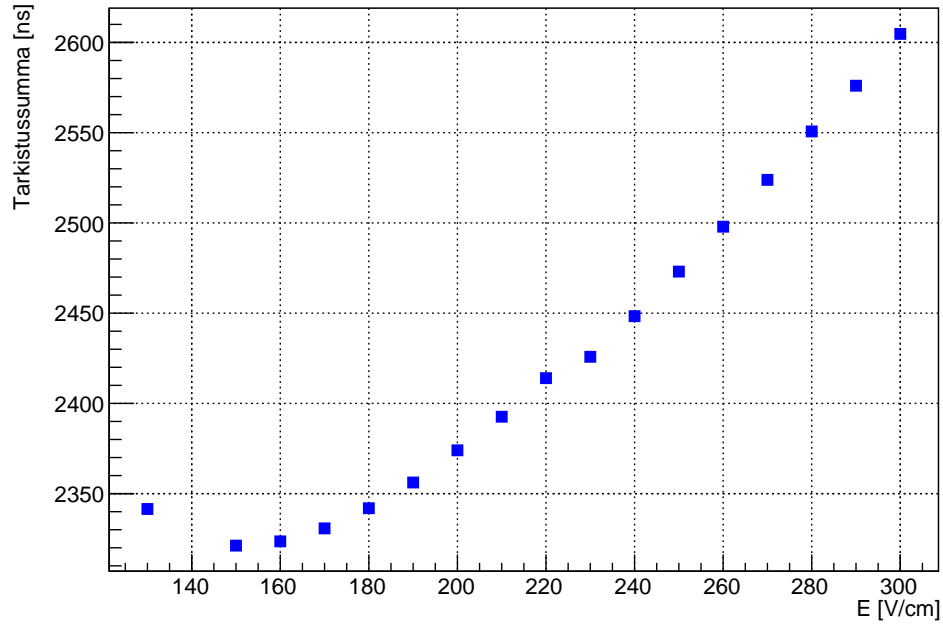


Kuva 14: Osumien lukumäärä tarkistussumman funktiona.

Tehtyjen sovitusten perusteella tehty kuvaaja tarkistussummasta sähkökentän funktiona näkyy kuvassa 15. Kuvaajasta nähdään, että tarkistussumma pienenee sähkökentän kasvaessa välillä 130 V/cm ja 150 V/cm, minkä jälkeen sähkökentän kasvaessa tarkistussumma lähtee kasvamaan. Tarkistussumman pientyminen sähkökentän arvojen kasvaessa 150 V/cm asti olikin odotettavissa kuvaajan 13 perusteella. Kuvaajasta nähdään myös, että sähkökentän arvoilla 190 V/cm - 300 V/cm tarkistussumma kasvaa likimain lineaarisesti, mikä myöskin vastaa suunnilleen kuvaajan 13 antamaa ennustetta.

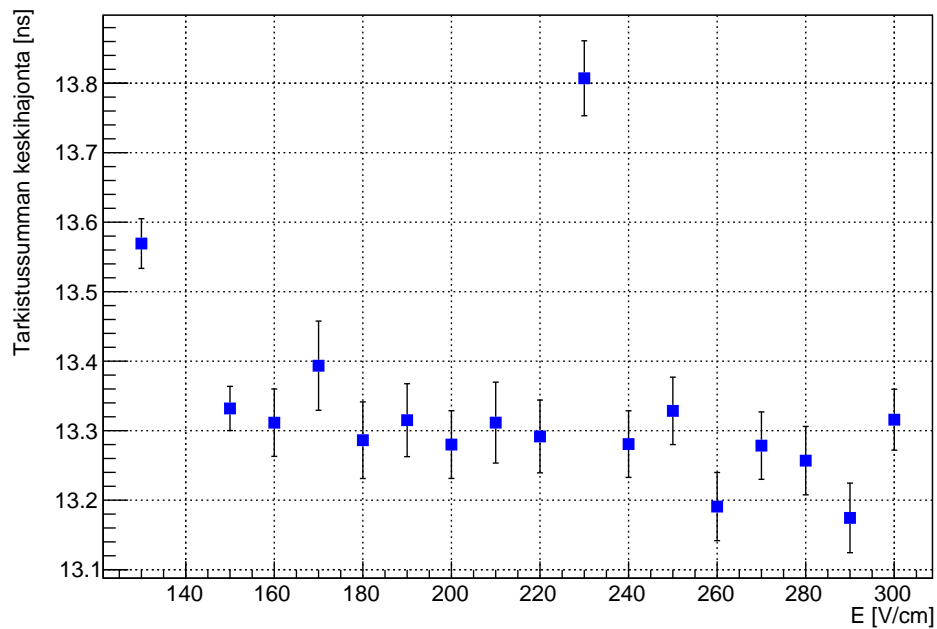
Kuvassa 16 näkyy mitatun tarkistussumman keskihajonta sähkökentän funktiona. Kuvasta nähdään, että jostain syystä sähkökentän arvolla 230 V/cm keskihajonta eroaa muista mitatuista arvoista maksimissaan noin 0,65 ns. Mittauspöytäkirjassa on merkintä, jonka mukaan FRS:n magneetteja on skaalattu arvolla 1,001 ennen sähkökentän nostoa 230 V/cm.

Tarkistussumma sähkökentän funktiona



Kuva 15: Keskimääräinen tarkistussumma sähkökentän funktiona.

Tarkistussumman keskihajonta sähkökentän funktiona



Kuva 16: Tarkistussumman keskihajonta sähkökentän funktiona.

10 Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona

Seuraavaksi tarkoitukseni on tutkia vaikuttaako suihkun paikka GEM-TPC:ssä tarkistussumman arvoon. Eli vaihteleeko tarkistussumman arvo, jos suihkun paikka vaihtuu ilmaisimen sisällä.

10.1 Mittaukset GEM-TPC:n eri sähkökentillä

Ensimmäiseksi tutkin vaikuttaako GEM-TPC:ssä käytettävä sähkökenttä tarkistussummaan paikan funktiona. Analyysissä käytetyt datatiedostot näkyvät taulukossa 3. Analyysissä käytettyjen mittausten välillä ilmaisimen asetuksia ei ole mittauspöytäkirjan mukaan muutettu lainkaan.

Taulukko 3: *Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona eri sähkökentillä* -kuvaajassa käytetyt datatiedostot

Datatiedosto	Sähkökenttä (V/cm)
cal_c_g1_0313.root	220
cal_c_g1_0311.root	200
cal_c_g1_0309.root	180
cal_c_g1_0307.root	160

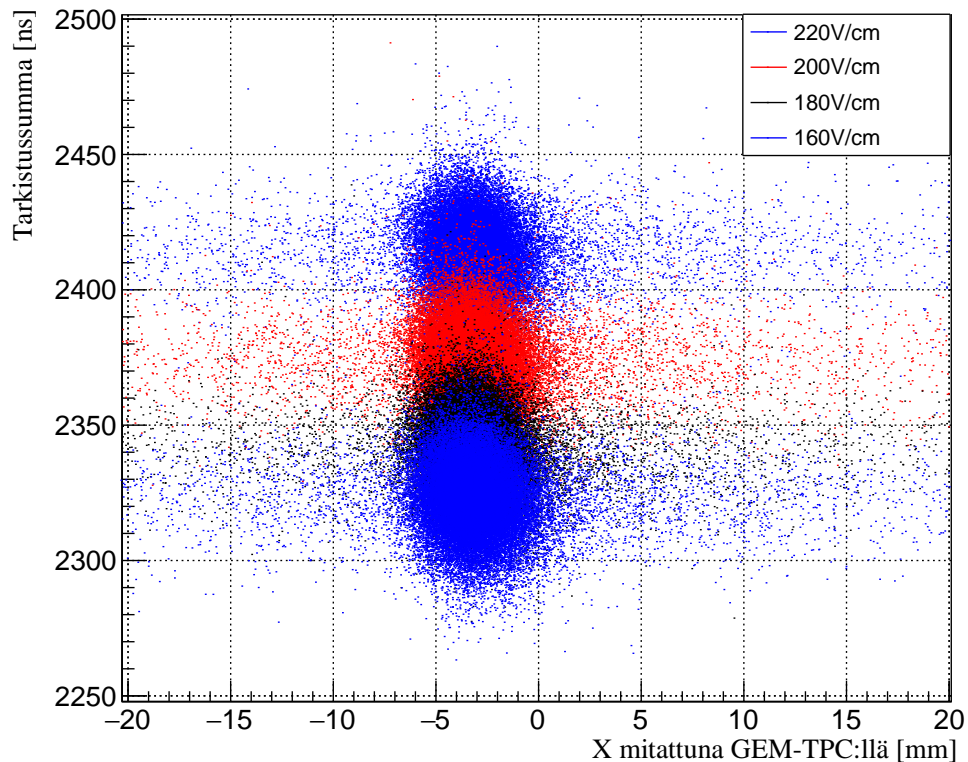
Kuvaajan 17 teossa käyttämäni ehdot kalibroiduille parametreille näkyvät taulukossa 4.

Taulukko 4: *Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona eri sähkökentillä -kuvaajassa parametreille annetut ehdot*

Parametri	Ehto	Sisältö
hbcs	< 3000	Tarkistussumma
hbcs	> 2100	Tarkistussumma
hbtr_x	> -100	GEM-TPC:llä mitattu paikka x-suunnassa
nscl	1	Osumien lukumäärä tuikeilmaisimessa
ndt1	1	Rekisteröidyt osumat ajautumisajoista ensimmäiseen GEM-TPC:hen liitetyn V1290 10 μ s aikaikkunassa
ndt2	1	Rekisteröidyt osumat ajautumisajoista toiseen GEM-TPC:hen liitetyn V1290 10 μ s aikaikkunassa

Taulukosta 4 nähdään, että kuvaaja on piirretty siten, että tarkistussumman arvo on välillä 2100 - 3000 ns, GEM-TPC:llä mitattu paikka on suurempaa kuin -100 mm, osumien lukumäärä tuikeilmaisimessa on 1 ja V1290:llä mitattuja osumia ajautumisajoista ilmaisimen ensimmäisessä ja toisessa yksikössä on yksi kappale 10 μ s aikaikkunassa.

Tarkistussumma X:n funktiona eri sähkökentillä



Kuva 17: Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona eri sähkökentillä.

Kuvassa 17 näkyy tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona eri sähkökentillä. Kuvasta 17 nähdään, että tarkistussumma kasvaa GEM-TPC:ssä käytettävän sähkökentän funktiona, mikä onkin teorian antama ennuste. Kuvajassa käyttämäni mittausten välillä suihkun paikka pysyy likimain vakiona, joten paikan vaikutusta tarkistussumman arvoon ei voi tämän kuvaajan perusteella sanoa. Tarkistussumman vaihtelu paikan funktiona voisi kertoa mahdollisesti esimerkiksi sähkökentän epätasaisuudesta ilmaisimen sisällä.

10.2 Mittaukset GEM-TPC:n eri vahvistuksilla

Toisena tarkoitukseni on tutkia vaikuttaako GEM-TPC:n eri vahvistukset tarkistussumman arvoon GEM-TPC:ssä paikan funktiona. Kuvan 18 kuvaaja on tehty taulukossa 5 näkyvien datatiedostojen avulla, taulukossa 4 näkyvillä parametrien ehdoilla.

Mittauspöytäkirjan mukaan vahvistusten G3 ja G4 mittausten välillä ilmaisimen asetuksista on muutettu elektroniikkaan liittyviä jännitteitä, kuten V_{th} eli yleistä kynnysjännitettä, V_{biasF} eli esijännitettä nopealle signaalin muotoilijalle (fast shaper) ja V_{biasS2} eli esijännitettä hitaalle signaalin muotoilijalle (slow shaper) [16, s.19]. Vahvistusten G4 ja G5 välillä erilaisia mittauksia tehtiin mm. eri V_{th} arvoilla ja muuttamalla suihkun intensiteettiä. Mittauspöytäkirjan avulla ei voida sanoa, onko taulukossa 5 näkyvien mittausten elektroniikan asetukset täysin samoja, sillä mittauspöytäkirjasta ei löydy kaikkien mittausten kohdalta niissä käytettyjä elektroniikan asetuksia.

Taulukko 5: *Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona eri vahvistuksilla* -kuvaajassa käytetyt datatiedostot

Datatiedosto	Vahvistus (G)
cal_c_def_g4_0450.root	5
cal_c_g4_0401.root	4
cal_c_g3_0372.root	3

Taulukossa 6 näkyy eri vahvistuksissa ilmaisimeen asetetut jännitteet. Kanavia on yhteensä neljä kappaletta, koska twin-GEM-TPC vaatii toimiakseen kaksi korkeajännitelähdettä, kummallekin kenttähäkille omansa. Kanavat 1 ja 3 vastaavat GEM-kalvojen yläpinnalla olevia jännitteitä ja kanavat 0 ja 2 vastaavat puolestaan jännitteitä katodilla. Taulukossa näkyvien jännitteiden asetusten jälkeen jännitteitä on lähdetty tiputtamaan siten, että kuten kuvassa 18 näkyy, kaikissa mittauksissa käytetyn sähkökentän suuruus on 180 V/cm.

Taulukko 6: Twin-GEM-TPC:ssä käytettävät jännitteet eri vahvistuksissa.

Kanava	Jännitteet G3 (V)	Jännitteet G4 (V)	Jännitteet G5 (V)
ch 0	5423	4423	5405
ch 1	2446	2423	2405
ch 2	5542	4524	5512
ch 3	2558	2528	2512

Sähkökentän suuruus ilmaisimen sisällä kenttähäkissä voidaan laskea, kun tunnetaan jännite-ero ensimmäisen GEM-kalvon ja katodin välillä, sekä niiden välinen etäisyys. Sähkökentän suuruus E ajautumistilavuudessa voidaan laskea seuraavalla lausekkeella

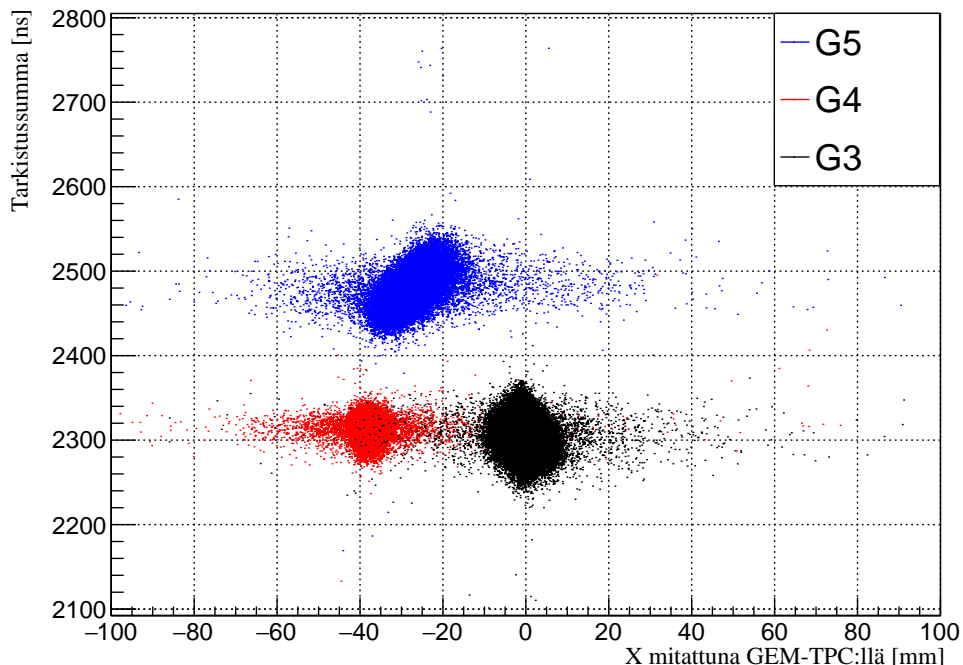
$$E = \frac{\Delta V}{x}, \quad (8)$$

missä ΔV on jännite-ero katodin ja ensimmäisen kalvon pinnan väliltä ja x on ajautumistilavuuden korkeus (10 cm). Sijoittamalla lausekkeeseen 8 taulukossa 6 näkyvät jännitteen arvot katodilta ja ensimmäisen GEM-kalvon yläpinnalta sekä etäisyys 10 cm voidaan laskea ajautumistilavuuden sähkökentäksi vahvistuksella G3

$$E = \frac{(5423 - 2446)}{10} \frac{\text{V}}{\text{cm}} = 297,7 \frac{\text{V}}{\text{cm}}. \quad (9)$$

Virhettä laskettuun sähkökenttään aiheutuu esimerkiksi jännitteiden mittauksesta, sekä ajautumistilavuuden pituuden mittauksesta. Nyt kuvaajan 18 kaikkien vahvistusten jännitteitä on lähdetty tiputtamaan siten, että ajautumistilavuuden sähkökenttä on kaikissa valituissa mittauksissa noin 180 V/cm.

Tarkistussumma X:n funktiona eri vahvistuksilla (sähkökenttä = 180 V/cm)



Kuva 18: Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona eri vahvistuksilla.

Kuvaajasta 18 nähdään, että GEM-TPC:ssä suihkun paikka vaihtelee eri mitausten välillä. Mittauspöytäkirjan mukaan suihkua on siirretty mitausten välillä useamman kerran FRS:n magneeteilla, minkä vuoksi suihkun paikka on siirtynyt. Kuvaajasta nähdään myös, että tarkistussumman arvo vaihtelee eri vahvistusten arvoilla. Tämä voisi kertoa siitä, että vahvistuksessa G5 käytettävän sähkökentän arvo on suurempi kuin vahvistuksissa G3 ja G4, sillä suurempi sähkökenttä vähentää elektronien ajautumisnopeutta ja näin ollen kasvattaa lentoaikoja.

Toinen huomio kuvaajasta on se, että tarkistussumman min- ja max-arvon välinen erotus vaihtelee eri vahvistusten välillä. Vahvistuksella G4 tarkistussumman suuruus on noin (2300 ± 40) ns, vahvistuksella G3 noin (2300 ± 60) ns ja vahvistuksella G5 noin (2480 ± 60) ns. Vahvistuksilla G4 ja G3 tarkistussumman keskiarvo on likimain sama, mutta sen vaihtelu on suurempaa vahvistuksella G3. Tässä huomio kiinnittyy suihkun paikkaan ja siihen, et-

tä onko sillä mahdollisesti vaikutusta tarkistussumman arvojen vaihteluun. Myös vahvistuksella G5 huomataan, että tarkistussumman arvo lähtee kasvamaan GEM-TPC:ssä paikan funktiona, kun siirrytään lähemmäksi ilmaisimen keskikohtaa.

10.3 Mittaukset suihkun eri skaalauksilla

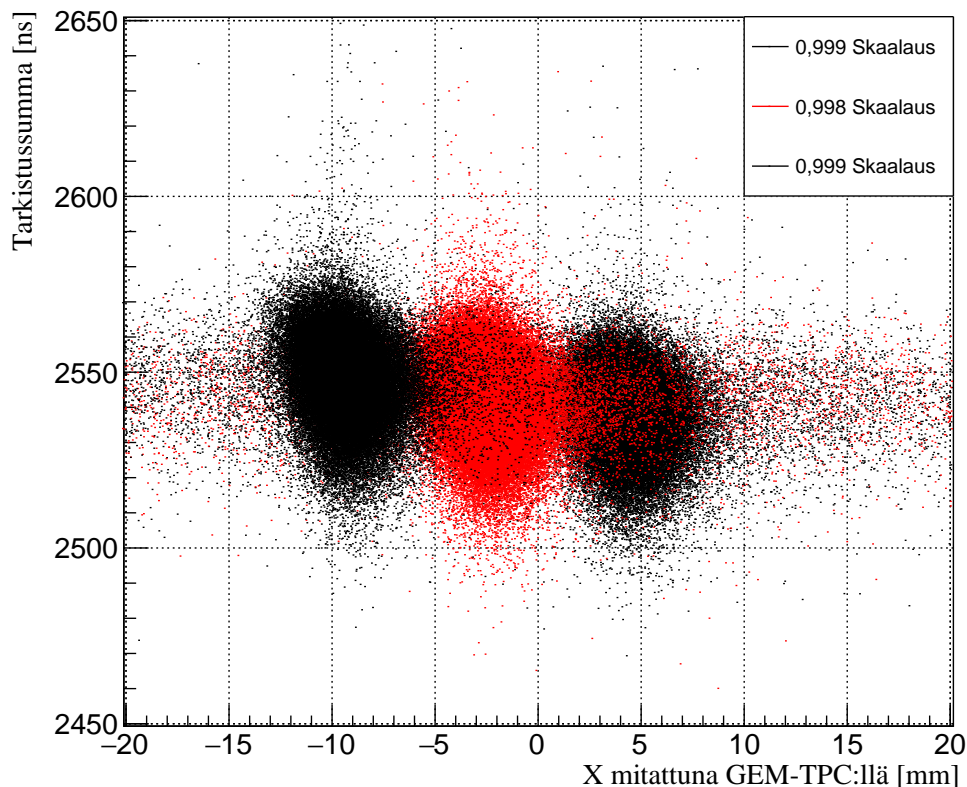
Hiukkassuihkun skaalaus tarkoittaa suihkun paikan tai koon muuttamista erilaisten magneettien avulla. Tässä mittauksessa suihkun skaalaus tapahtui GSI:n FRS:n suihkulinjaston S2-S4 osassa.

Seuraavaksi aion tutkia vaikuttaako suihkun skaalaus tarkistussumman arvoon GEM-TPC:ssä paikan funktiona. Taulukossa 7 näkyy analyysissä käyttämäni datatiedostot. Kuvaajassa käyttämäni parametrien ehdot pysyivät edelleen taulukon 4 mukaisina. Mittauspöytäkirjan mukaan mittausten välillä ilmaisimen asetuksia ei ole muutettu.

Taulukko 7: *Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona suihkun eri skaalauksilla* -kuvaajassa käytetyt datatiedostot

Datatiedosto	Skaalaus
cal_c_g2_0326.root	0,999
cal_c_g2_0327.root	0,998
cal_c_g2_0328.root	0,999

Tarkistussumma X:n funktiona suihkun eri skaalauksilla (sähkökenttä = 300 V/cm)



Kuva 19: Tarkistussumma suihkun eri skaalauksilla GEM-TPC:n paikan funktiona.

Kuvasta 19 nähdään, että suihkun skaalaus siirtää suihkun paikkaa x-suunnassa. Ensimmäisen skaalauksen jälkeen suihkun keskikohdan paikka on suunnilleen +5 mm kohdalla GEM-TPC-ilmaisinta, toinen skaalaus siirtää suihkun likimain ilmaisimen keskelle ja viimeinen skaalaus siirtää suihkun keskikohdan paikan noin -10 mm kohdalle. Mielenkiintoinen huomio on, että tarkistussumman arvo kasvaa, kun siirrytään x-suunnassa vasemmalle, vaikka ilmaisimessa asetukset pysyvät täysin vakiona.

Jos hiukkassuihku kulkisi ilmaisimen läpi x -suunnassa vinoittain ilmaisimen keskipisteen kummallakin puolella, niin tarkistussumman arvon tulisi kasvaa siirryttäessä keskipisteestä pois päin, sillä vinosti ilmaisimen läpi kulkevan suihkun nopeuden x -suuntainen komponentti on pienempi kuin kohtisuoraan ilmaisimen läpi kulkevan suihkun. Tämä voisi selittää tarkistussumman kasvun ilmaisimen keskikohdan vasemmalla puolella. Tarkistussumman arvo ilmaisimen keskipisteen positiivisella puolella on kuitenkin pienempi kuin keskipisteen kohdalla. Tästä voidaan päätellä, että suihku mahdollisesti kulkee hieman vinottain ilmaisimen läpi heti ensimmäisen skaalauksen jälkeen, jolloin tarkistussumman arvo kasvaa jokaisen skaalauksen jälkeen.

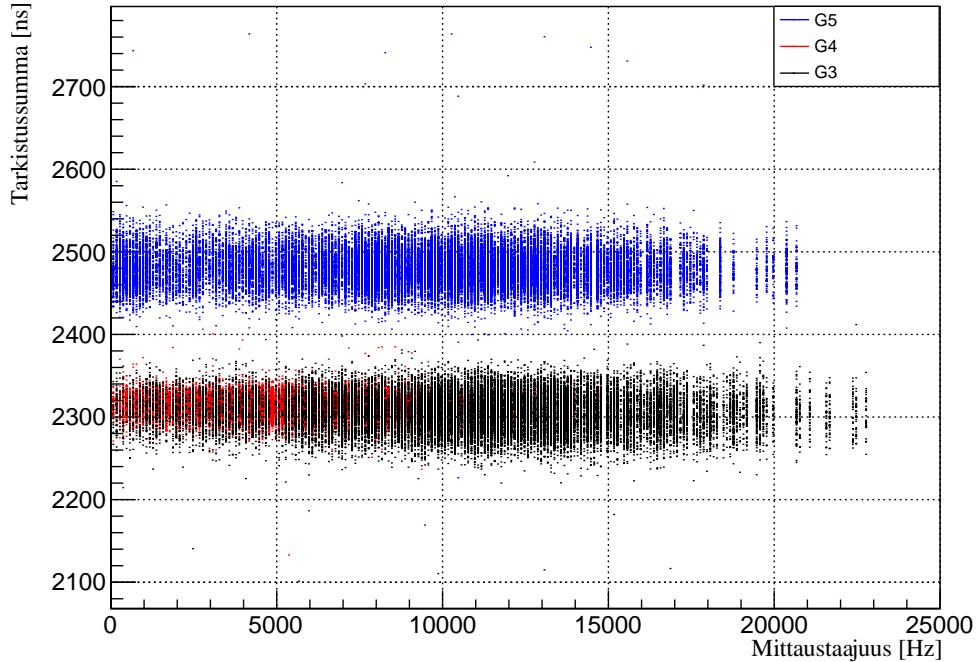
11 Tarkistussumma mittaustaaajuuden funktiona

Seuraavaksi tarkoitukseni on tutkia muuttuuko tarkistussumman arvo hiukkassuihkun mittaustaaajuuden funktiona. Super-FRS:ään liitettävien ilmaisimien tulee pystyä operoimaan aina 10^{11} ionia/s intensiteetteihin asti, joten ilmaisimen toimintakyvyn arvioinnissa oleellinen osa on tutkia, pysyykö mitaukset stabiileina, kun ilmaisimen mittaustaaajuutta kasvatetaan.

11.1 Eri vahvistuksilla

Ensimmäiseksi tutkin vaikuttaako käytettävä vahvistus tarkistussumman arvoon hiukkassuihkun mittaustaaajuuden funktiona. Kuvaajan 20 olen tehnyt taulukon 5 tiedostojen avulla, taulukossa 4 näkyvillä parametrien ehdoilla.

Tarkistussumma mittaustaaajuuden funktiona suihkun eri vahvistuksilla (sähkökenttä = 180 V/cm)

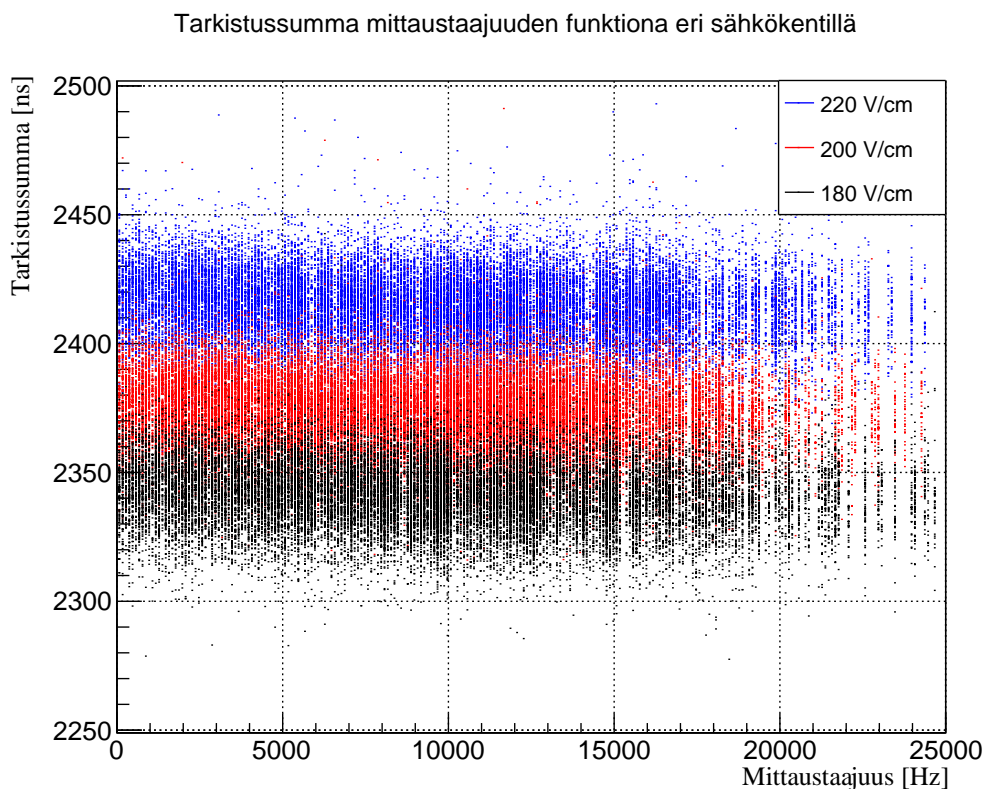


Kuva 20: Tarkistussumma mittaustaaajuuden funktiona eri vahvistuksilla. Kuvassa vahvistuksen G4 tarkistussumman arvo näkyy heikosti vahvistuksen G3 tarkistussumman alta.

Kuvan 20 perusteella tarkistussumman arvo pysyy suunnilleen vakiona hiukkassuihkun mittaustaaajuuden kasvaessa. Vahvistuksella G3 tarkistussumman arvo alkaa vaihdella hieman laajemmin noin 8 kHz jälkeen, kun taas vahvistuksella G5 tarkistussumman arvo pysyy likimain vakiona suihkun mittaustaaajuuden välillä 0 - 17 kHz. Kuvaaajan perusteella voidaan päätellä, ilmaismen toimivan hyvin näillä mittaustaaajuuksilla.

11.2 Eri sähkökentillä

Seuraavaksi tarkoitukseni on tutkia muuttuuko tarkistussumman arvo hiukkassuihkun mittaustaaajuuden funktiona käytettäessä eri sähkökenttiä GEM-TPC:ssä. Kuvaajassa olen käyttänyt taulukon 3 tiedostoja lukuunottamatta 160 V/cm sähkökenttään liittyvää dataa, taulukossa 4 näkyvien ehtojen avulla.



Kuva 21: Tarkistussumma mittaustaaajuuden funktiona eri sähkökentillä.

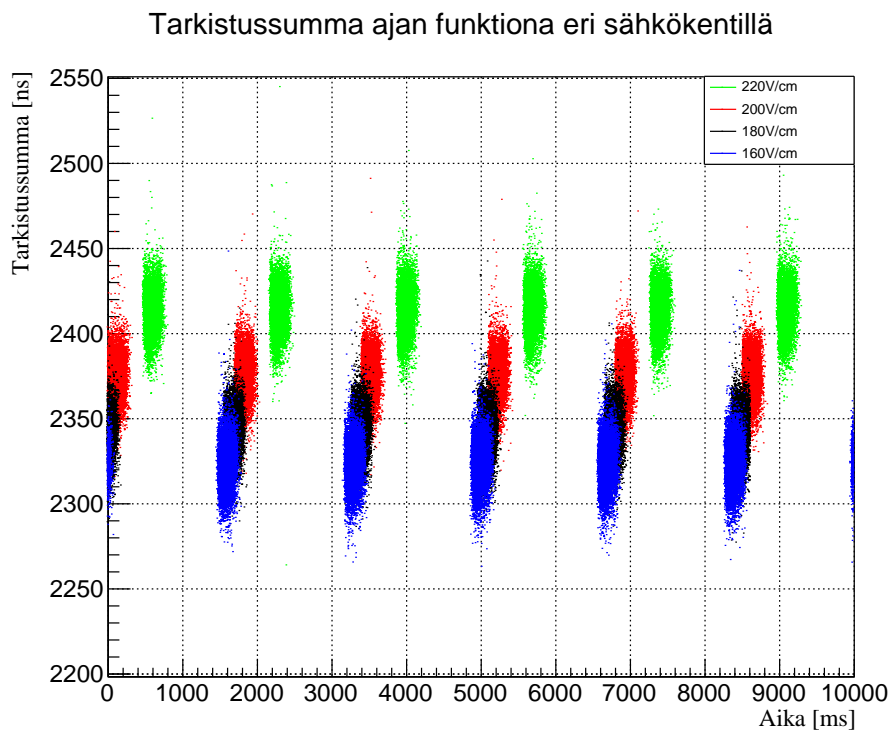
Kuvassa 21 näkyy tarkistussumma mittaustaaajuuden funktiona eri sähkökentillä. Kuvasta 21 nähdään, että tarkistussumma pysyy likimain vakiona mittaustaaajuuden funktiona käytettäessä GEM-TPC:ssä eri sähkökenttiä. Tämä on hyvä tulos sillä sen perusteella ilmaisin pystyy mittaamaan hyvin mittaustaaajuuden funktiona välillä 0 - 17 kHz ilman, että tarkistussumman arvot lähtisivät muuttumaan.

12 Tarkistussumma ajan funktiona

Nyt tarkoitukseni on tutkia muuttuuko tarkistussumma ajan (time bin) funktiona. Time bin vastaa V830 skaalaimen liitetyn 1 kHz kellon mitattaamaa aikaa. Yksi time bin on suuruudeltaan 1 ms.

12.1 Eri sähkökentillä

Kuvaajassa olen käyttänyt taulukon 3 tiedostoja ja taulukossa 4 näkyvien parametrien ehtojen lisäksi ehtoa $ev_time > 0$ eli, että aika on suurempaa kuin nolla.

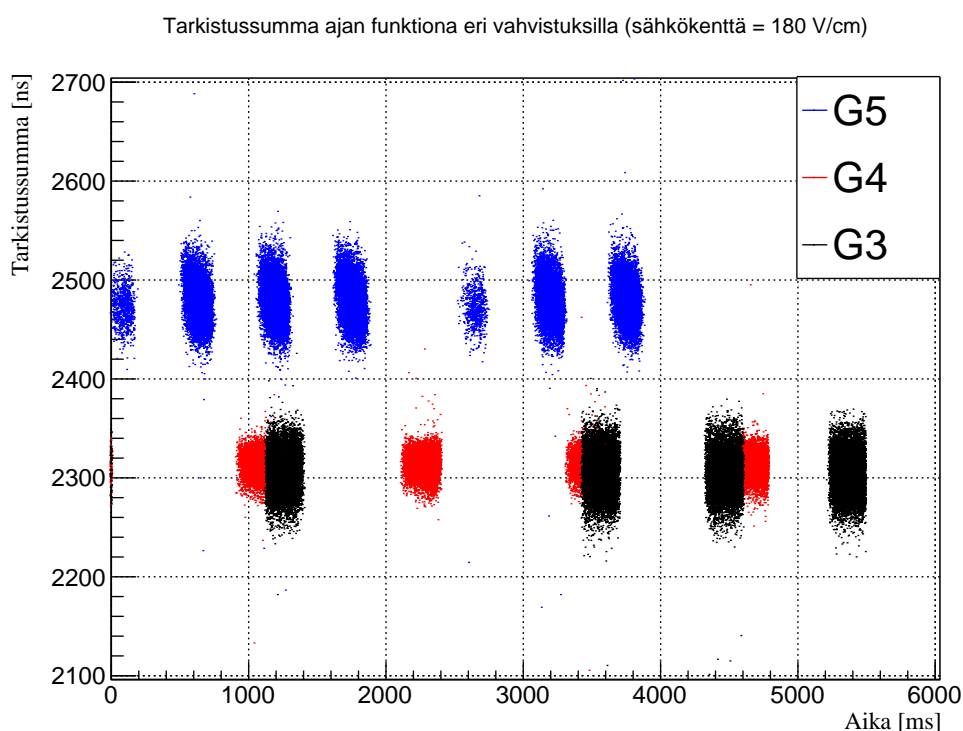


Kuva 22: Tarkistussumma ajan funktiona eri sähkökentillä.

Kuvasta 22 nähdään, että tarkistussumman arvo pysyy vakiona ajan funktiona käytettäessä eri sähkökenttiä. Tästä voidaan päätellä, ettei mittausajalla ole vaikutusta tarkistussumman arvoon tällä aikavälillä.

12.2 Eri vahvistuksilla

Viimeisenä tarkoitukseni on tutkia muuttuuko tarkistussumma ajan funktiona GEM-TPC:n eri vahvistuksilla. Kuvaajassa olen käyttänyt taulukon 5 tiedostoja ja samoja ehtoja parametreille kuin kuvan 21 kuvaajassa.



Kuva 23: Tarkistussumma ajan funktiona GEM-TPC:n eri vahvistuksilla.

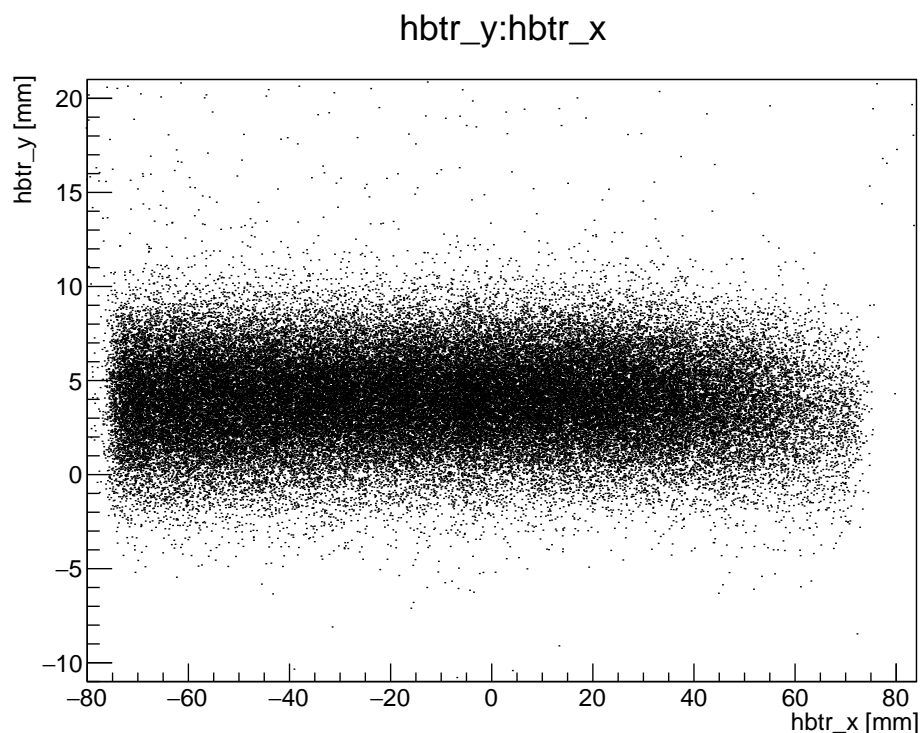
Kuvassa 23 näkyy tarkistussumma ajan funktiona eri vahvistuksilla. Kuvasta 23 nähdään, että tarkistussumman arvo pysyy vakiona vahvistuksilla G3 ja G4 ajan funktiona, mutta eri vahvistuksilla saatavien tarkistussumman arvojen välillä on eroja. Mielenkiintoinen huomio kuvaajasta on, että mittauksessa G3 hiukkassuihkussa on ollut yksi noin 2 s mittainen tauko, kun taas vahvistuksella G4 ja G5 suihkun pulssitukset ovat olleet säännöllisempiä. Jostain syystä vahvistuksella G5 on mitattu ajan arvoilla noin 2800 ms ja 200 ms tarkistussumman arvoksi pienemmät arvot kuin muissa saman mittauksen pulsseissa.

13 Analyysi Xe-suihkusta

Vielä lopuksi teen analyysin Xe-suihkulla tehdyistä mittauksista. Jotta analyysi on mieluinen ja seuraa tutkielman rakennetta, niin ensimmäiseksi tutkin hieman Xe-suihkun profiilia, minkä jälkeen teen suihkusta vastaavia kuvaajia kuin C-suihkusta.

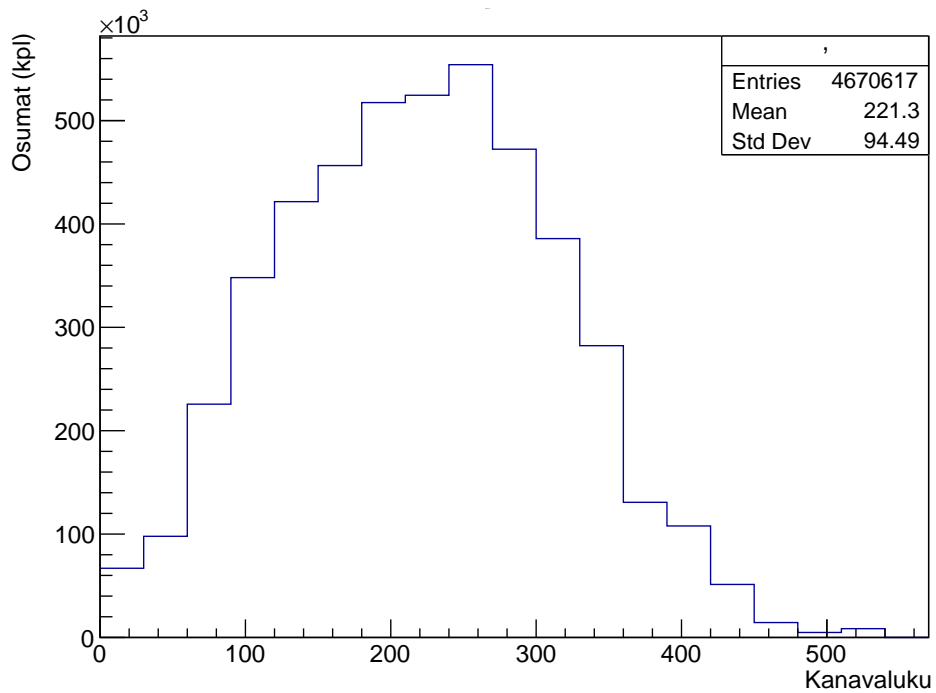
13.1 Xe-suihkun profiili

Määrittääkseni Xe-suihkun muotoa tein alkuun kuvaajaan osumista x - ja y -suunnassa GEM-TPC:ssä paikan funktiona. Kuvaajassa käyttämäni datatiedosto on `cal_xe_def_0105.root`, jossa ilmaisimessa käytetty sähkökenttä oli 180 V/cm . Kuvaajan dataan on tehty sama kalibraatio kuin C-suihkun datatiedostoiille, mutta erillisiä ehtoja kuvaajassa käyttämälleni datalle en antanut. Tekemäni kuvaaja suihkun paikkajakaumasta GEM-TPC-ilmaisimessa näkyy kuvassa 24.



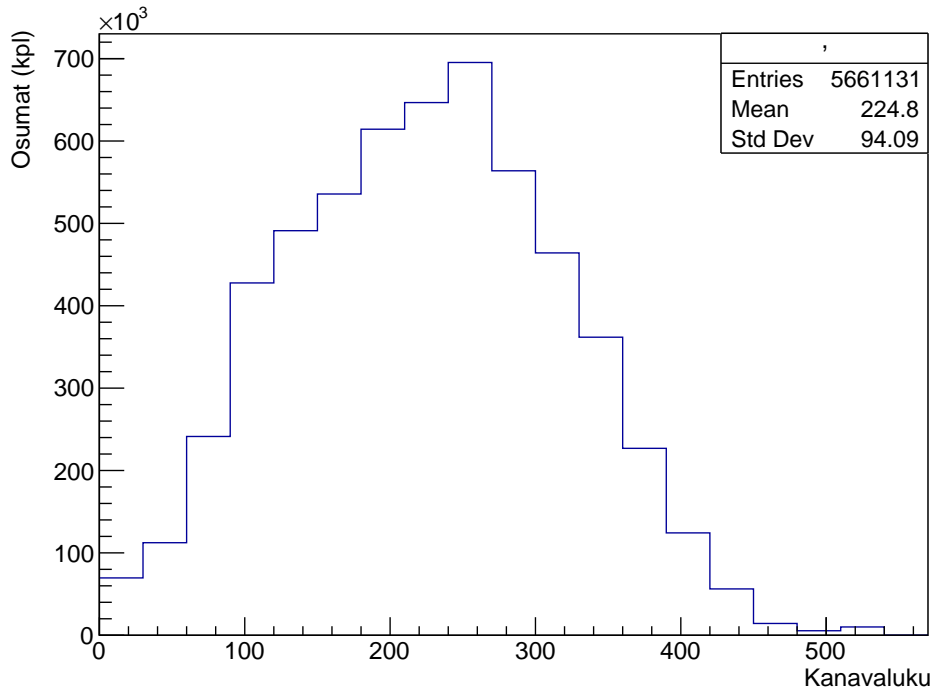
Kuva 24: Xe-suihkun paikkajakauma y- ja x-suunnassa GEM-TPC-ilmaisimessa.

Kuvassa 24 näkyy suihkun paikkajakauma GEM-TPC-ilmaisimessa, missä mitatut paikat jakautuvat kohtuullisen tasaisesti x-suunnassa välille -70 - 70 mm ja y-suunnassa välille 0 - 10 mm. Seuraavaksi haluan tutkia mittaako ensimmäiseen ja toiseen GEM-TPC-ilmaisimeen liitettyjen korttien kanavat osumia samalla kohtaa ilmaisinta. Kumpaankin GEM-TPC:hen on yhdistetty 4 kappaletta n-Xyter-korttia, jossa yhdessä kortissa on 128 kanavaa eli yhteen GEM-TPC:hen liitettyjä kanavia on näin ollen yhteensä 512.



Kuva 25: GEM-TPC:n ensimmäisessä yksikössä mitatut osumat kanavaluvun funktiona.

Kuvassa 25 näkyy GEM-TPC:n ensimmäisen yksikön ja kuvassa 26 toisen yksikön mitaamat osumat kanavaluvun funktiona. Kuvaajista 25 ja 26 nähdään, että ilmaisimen kanaviin osuneet hiukkaset asettuvat kohtalaisen hyvin samalle kohtaa ilmaisimen ensimmäisessä- ja toisessa yksikössä. Eroa mitattujen osumien paikkajakaumien keskikohtilla GEM-TPC:n yksiköiden välillä on kuvaajien 25 ja 26 perusteella 3,5 kanavan verran.



Kuva 26: GEM-TPC:n toisessa yksikössä mitatut osumat kanavaluvun funktiona.

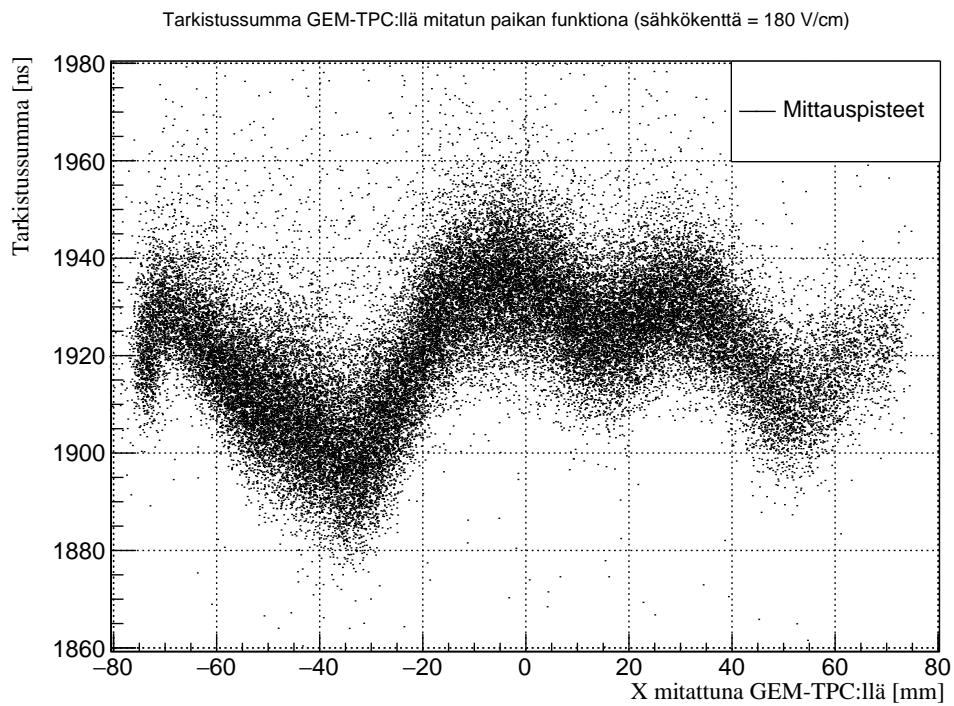
13.2 Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona Xe-suihkulla

Vielä viimeisenä haluan tutkia tarkistussumman arvoa GEM-TPC:n paikan funktiona Xe-suihkulla tehdyissä mittauksissa, sillä C-suihkun analyysissä huomio kiinnittyi joissakin kohtaa tarkistussumman arvon vaihteluihin GEM-TPC:n paikan funktiona. Analyysin tein `cal_xe_def_0105.root`-tiedoston avulla ja parametreille käytin taulukossa 8 näkyviä ehtoja. Ensimmäiseksi tein kuvaajan 27, jossa näkyy mitattu tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona.

Taulukko 8: *Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona*
-analyysissä parametreille annetut ehdot.

Parametri	Ehto	Sisältö
hbcs	> 1800	Tarkistussumma
hbcs	< 2000	Tarkistussumma
hbtr_x	> -100	GEM-TPC:llä mitattu paikka x-suunnassa
hbtr_x	< 100	GEM-TPC:llä mitattu paikka x-suunnassa
nscl	1	Osumien lukumäärä tuikeilmaisimessa
ndt1	1	Rekisteröidyt osumat ajautumisajoista ensimmäiseen GEM-TPC:hen liitetyn V1290 10 μ s aikaikkunassa
ndt2	1	Rekisteröidyt osumat ajautumisajoista toiseen GEM-TPC:hen liitetyn V1290 10 μ s aikaikkunassa

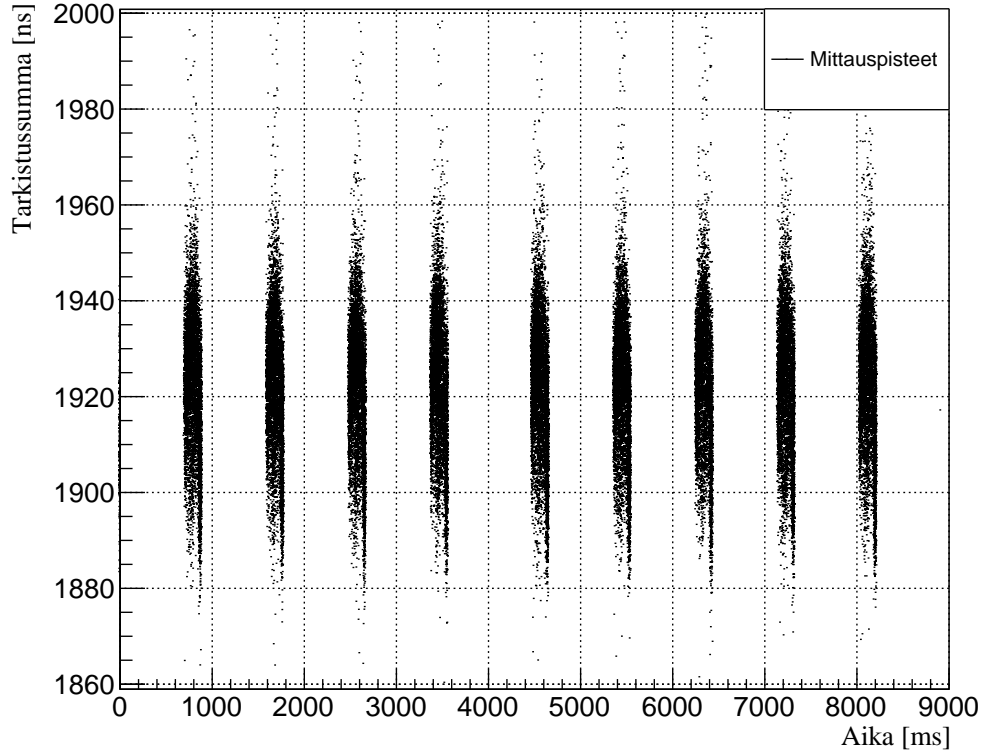
Kuvaajasta 27 nähdään, että tarkistussumman arvo vaihtelee jostain syystä GEM-TPC:n paikan funktiona. Tämä sama ilmiö ei näy kuvassa 17, mutta siinä C-suihkun leveys onkin suhteessa huomattavasti paljon pienempi. Toisaalta kuvista 18 ja 19 nähdään, että myös C-suihkulla esiintyy hieman samaa tarkistussumman arvon vaihtelua GEM-TPC:n paikan funktiona.



Kuva 27: Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona.

Kuvaajassa 27 näkyvän mitatun tarkistussumman vaihtelun paikan funktiona vuoksi, haluan vielä tutkia muuttuuko tarkistussumman arvo mittauksessa ajan funktiona. Kuvaajan tarkistussummasta ajan funktiona tein taulukosta 8 löytyvien ehtojen avulla. Tekemäni kuvaaja näkyy kuvassa 28.

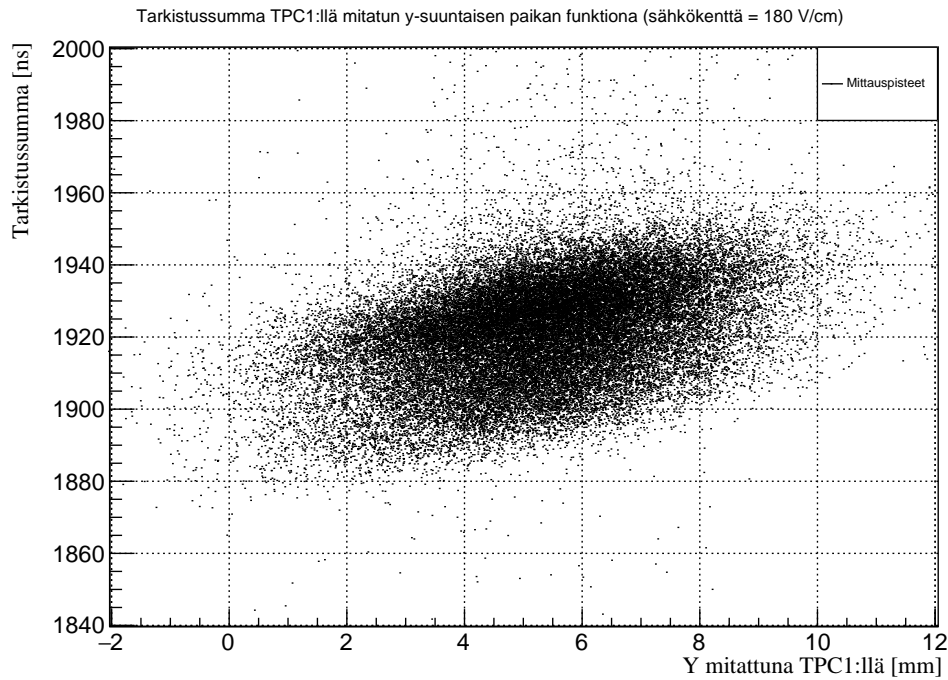
Tarkistussumma ajan funktiona (sähkökenttä = 180 V/cm)



Kuva 28: Tarkistussumma ajan funktiona Xe-suihkulla.

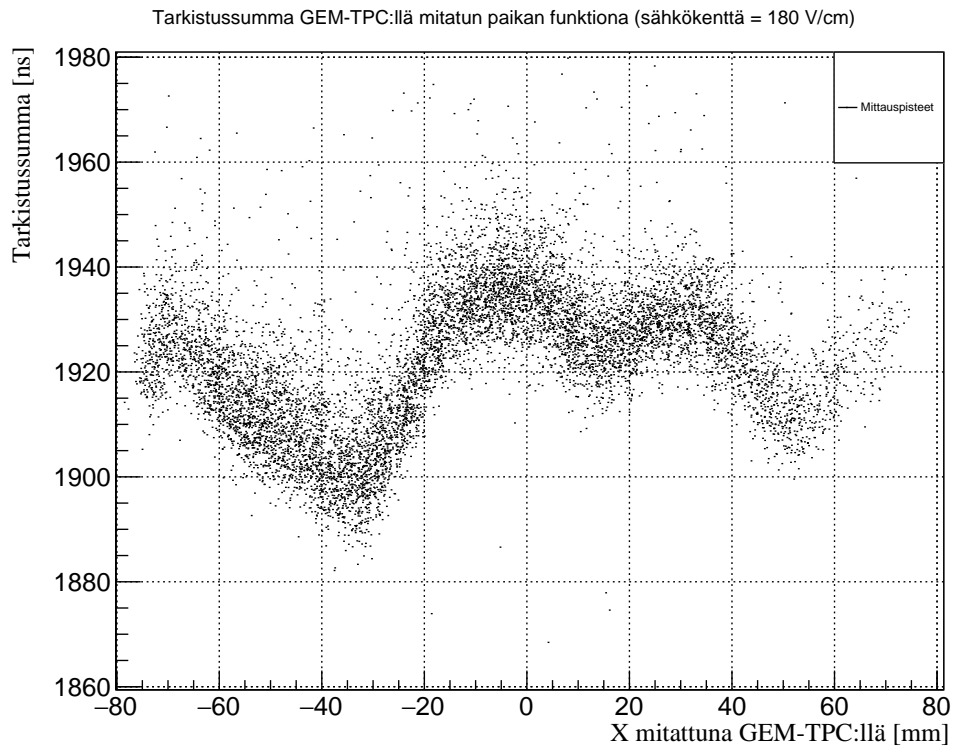
Kuvasta 28 nähdään, että mitattu tarkistussumman arvo pysyy ajan funktiona likimain vakiona, mutta sen vaihteluväli on suunnilleen (1880 - 1960) ns. Tämä voisi kertoa suihkulla olevan y-suunnassa jonkin verran korkeutta, sillä luonnollisesti y-suunnassa korkeammalta GEM-TPC-ilmaisimeen osuvien hiukkasten ajautumisajat ensimmäisessä GEM-TPC-ilmaisimessa ovat suurempia kuin ilmaisimen alareunaan osuneiden hiukkasten lentoajat, mutta tämä ilmiö huomioonottaen ilmaisimeen on rakennettu kaksi yksikköä, joiden sähkökenttien suunnat ovat vastakkaiset, jolloin jälkimmäisessä GEM-TPC:n yksikössä ajautumisaikojen tulisi olla puolestaan pienempiä.

Tutkiakseni onko suihkun y-suuntaisella paikalla vaikutusta tarkistussumman arvoon teen seuraavaksi kuvaajan tarkistussumman arvoista TPC1:llä mitatun paikan funktiona käyttäen edelleen parametreille taulukossa 8 näkyviä ehtoja. Tekemäni kuvaaja näkyy kuvassa 29.



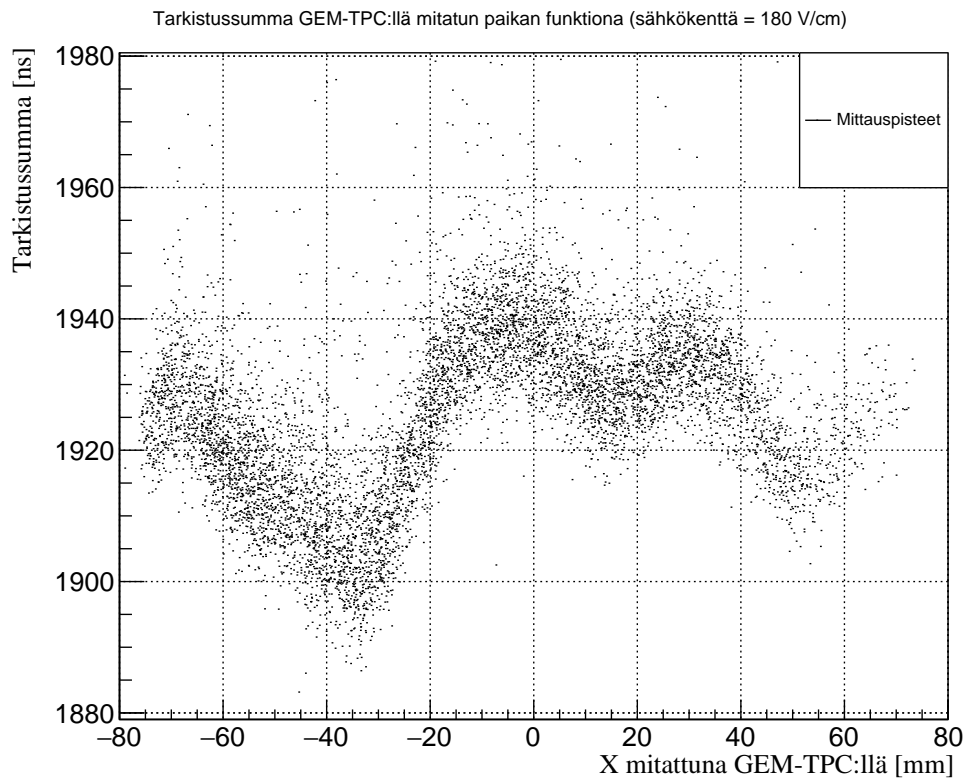
Kuva 29: Tarkistussumma TPC1:llä y-suunnassa mitattujen osumien funktiona.

Kuvasta 29 nähdään, että tarkistussumman arvo kasvaa TPC1:llä mitatun paikan funktiona. Ja, että kuten kuvan 24 perusteella katsoin suurimman osan paikan mittauksesta osuvan välille 3 - 9 mm, niin myös kuvan 29 perusteella suurin osa mitatuista tarkistussumman arvoista osuu tälle välille. Vielä viimeisenä teen kuvaajat tarkistussummasta GEM-TPC:n paikan funktiona siten, että kuvaajiin piirretään vain ne hiukkaset, jotka osuvat TPC1:ssä y-suunnassa väleille 5 - 6 mm, 6 - 7 mm ja 7 - 8 mm. Tällä tavalla saan selville, onko TPC1:ssä mitatulla paikalla vaikutusta tarkistussumman mittaukseen.



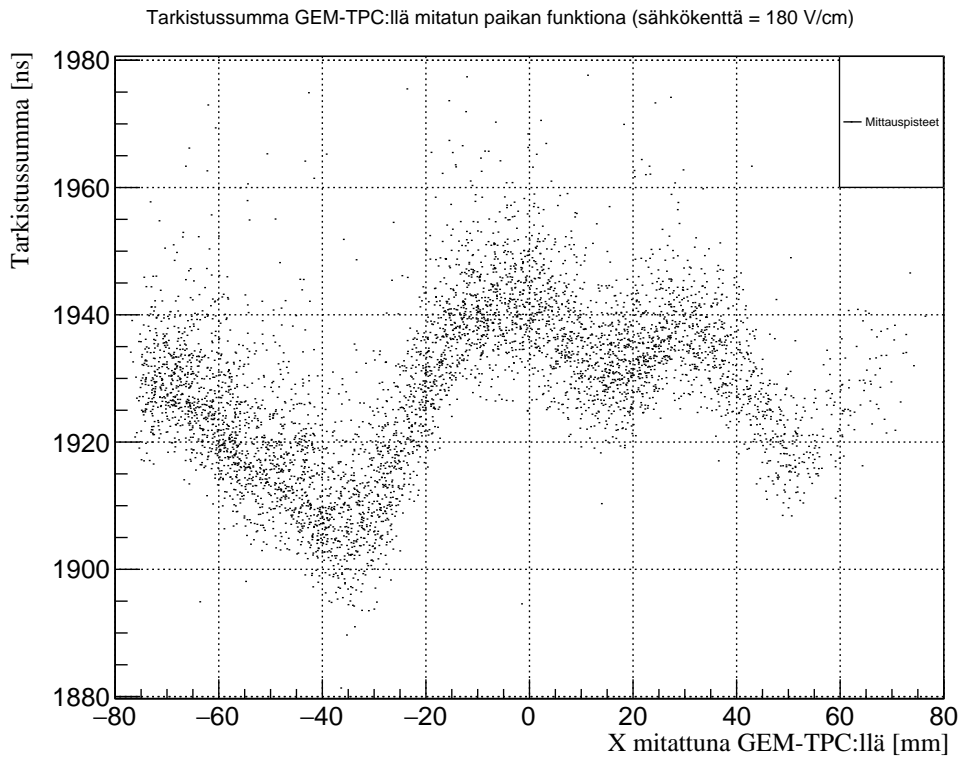
Kuva 30: Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona. Kuvaaja on piirretty vain niistä osumista, jotka osuvat TPC1:ssä y-suunnassa välille 5 - 6 mm.

Kuvasta 30, johon on piirretty vain niiden hiukkasten ajautumisajat, jotka osuvat TPC1:ssä välille 5 - 6 mm nähdään, että tarkistussumman arvo ei vaihtele ihan niin paljoa kuin kuvassa 27, mutta edelleen tarkistussumman mitatuissa arvoissa on eroavaisuuksia. Seuraavaksi teen kuvaajan siten, että siihen piirretään tarkistussumman arvot niistä suihkun hiukkasista jotka osuvat TPC1:ssä välille 6 -7 mm.



Kuva 31: Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona. Kuvaaja on piirretty vain niistä osumista, jotka osuvat TPC1:ssä y-suunnassa välille 6 - 7 mm.

Kuvassa 31 näkyy tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona siten, että kuvaajaan on piirretty niiden hiukkasten ajautumisajat, jotka osuvat TPC1:ssä välille 6 - 7 mm. Kyseinen kuvaaja ei juuri eroa kuvasta 30, mutta verrattuna kuvaan 27 tarkistussumman arvo -40 mm kohdalla on suurempi. Seuraavaksi teen vielä yhden samanlaisen kuvaajan TPC1:llä välillä 7 - 8 mm mitatuista hiukkasista.



Kuva 32: Tarkistussumma GEM-TPC:n paikan funktiona. Kuvaaja on piirretty vain niistä osumista, jotka osuvat TPC1:ssä y-suunnassa välille 7 - 8 mm.

Kuvasta 32 nähdään, että tälle määritellylle välille TPC1:ssä osuneiden hiukasten tarkistussumman arvo ei vaihtele enää niin paljon kuin kuvaajassa 27. Nyt GEM-TPC:ssä suunnilleen -45 mm kohdalla tarkistussumman arvo on jälleen suurempi kuin kuvissa 30, 31 ja 27. Vaikka suihkun paikalla y-suunnassa ei teorian mukaan tulisi olla vaikutusta tarkistussumman arvoon, niin jostain syystä nyt kuitenkin näyttää, että sillä olisi hieman vaikutusta.

14 Johtopäätökset

Tekemäni analyysin perusteella GEM-TPC-ilmaisimien ei vaikuta suihkun paikkaan, mikä on hyvä asia, sillä se kuuluu ilmaisimelle asetettuihin laatukriteereihin. Tekemässäni analyysissä GEM-TPC-ilmaisimissa käytettiin TPC-ilmaisimien avulla laskettua paikkatietoa. GEM-TPC-ilmaisimien on kuitenkin kykenevä mittaamaan suihkun paikan itsenäisesti, minkä vuoksi tulevaisuudessa ei oletettavasti ole tarpeen tehdä, TPC-ilmaisimien avulla tehtyjä paikkakalibraatioita GEM-TPC-ilmaisimelle.

Kaikki ilmaisimella mitatut hiukkasten ajautumisajat, eli tarkistussumma sähkökentän funktiona C-suihkulla, noudattaa hienosti teorian antamaa ennustetta. Ensin tarkistussumman arvot lähtevät pienenemään sähkökentän funktiona suunnilleen 150 V/cm asti, minkä jälkeen ajautumisajat lähtevät kasvamaan. Mitattujen ajautumisaikojen keskihajonnat asettuvat virheineen välille 13,11 - 13,83 ns (kuva 16), mikä kertoo aikojen mittauksen resoluution pysyvän tasaisena, vaikka ilmaisimissa käytettävää sähkökenttää kasvatetaan. Tästä voidaan päätellä, että ilmaisimen toiminta pysyy stabiilina, vaikka siinä käytettävää sähkökenttää kasvatetaan.

Tarkistussumma GEM-TPC:ssä paikan funktiona analyysissä ilmaisimen vaatimuksiin kuuluu, että koko ilmaisimen aktiivisella alueella tulisi mitata elektroneille yhtenevät ajautumisajat. Sain C-suihkulla hieman odottamattomia tuloksia, joissa ajautumisajat vaihtelevat mitatun paikan funktiona. Esimerkiksi kuvassa 18 näkyvässä kuvaajassa, johon on piirretty eri vahvistuksilla määritetty tarkistussumma GEM-TPC:ssä paikan funktiona, perusteella tarkistussumman arvot vaihtelevat, vaikka kaikissa mittauksissa käytettävän sähkökentän pitäisi olla yhtä suuri. Sama ilmiö tarkistussumman arvojen vaihtelusta paikan funktiona esiintyy vielä selvemmin vastaavassa Xe-suihkun analyysissä (kuva 27). Xe-suihkulla mitattuja hiukkasia oli melkein koko ilmaisimen aktiivisella alueella, kun taas C-suihkun mittauksissa suihkun leveys kattoi siitä maksimissaan vain noin kymmenesosan. Kuvaajat 30, 31 ja 32 tein siten, että otin niissä huomioon vain TPC1-ilmaisimeen y-suunnassa yhden millimetrin välille osuneet hiukkaset. Näissä kuvaajissa

tarkistussumman vaihteluväli oli hieman kapeampi kuin kuvaajassa 27. Jostain syystä GEM-TPC-ilmaisimessa noin -45 mm kohdalla tarkistussumman arvot ovat pienempiä kuin muualla ilmaisimen aktiivisella alueella. Tämä huomio vaatii mahdollisesti jatkossa lisäselvityksiä, joita voisivat olla ilmaisintestimittaukset mahdollisimman leveällä suihkulla suhteessa ilmaisimen aktiiviseen alueeseen ja tämän suihkun skaalaus y-suunnassa GEM-TPC-ilmaisimeen nähden. Tällöin saataisiin selville vaikuttaako suihkun paikka y-suunnassa GEM-TPC:llä mitattuihin tarkistussumman arvoihin paikan funktiona.

Tekemäni analyysin perusteella laskentataajuuden kasvaessa ilmaisimella mitatut hiukkasen ajautumisajat pysyvät likimain vakioina. Tämäkin on hyvä havainto, sillä ilmaisimen tulee pystyä operoimaan vielä huomattavasti suuremmilla taajuuksilla. Tässä tutkielmassa analysoitujen datojen laskentataajuuDET ovat luokkaa 10^4 Hz, kun ilmaisimen tulee pystyä operoimaan aina 10^{11} ionia/s intensiteetteihin asti. Tulevaisuudessa tulee siis ilmaisimella vielä suorittaa uusia mittauksia suuremmilla laskentataajuuksilla, jotta voidaan varmistua ilmaisimen toimintakyvystä maksimi-intensiteeteillä.

Ajautumisaikojen suuruus ajan funktiona näyttää analyysin pohjalta pysyvän stabiilina. Super-FRS:ään asennettavien GEM-TPC-ilmaisimien tulee pystyä operoimaan stabiileina ilman, että ilmaisimen lähelle tarvitsee mennä. Tämä vaikuttaa hyvältä ajatellen ilmaisimen toimintavarmuutta. Tosin GSI:ssä suoritettut mittaukset eivät yhtäjaksoisesti kestäneet useita viikkoja, ilman, että kukaan olisi mennyt ilmaisimen lähelle. Näin ollen ilmaisimen pitkäaikaista stabiiliutta tulee vielä myös testata tulevaisuudessa.

Tutkielmassa analysoiduille mittausdatoille ei vielä ole tehty korjauksia klustereille, eli hiukkasille, jotka aiheuttavat sähköisen signaalin useaan signaalinlumentalinjaan. Tämä korjaus ei kuitenkaan olisi vaikuttanut tutkielman analyysin, sillä analyysissä käytettävät suihkun paikkatiedot on määritetty TPC-ilmaisimien avulla. Tulevaisuudessa klusterikorjauksen avulla on kuitenkin mahdollista saada tarkennettua GEM-TPC:n paikan mittausta.

Ilmaisimella mitatut kaikki elektronien ajautumisajat, eli tarkistussumman arvot, asettuvat myös hyvin pienen vaihteluvälin sisään. Tosin tekemäni analyysin pohjalta näyttää, että tarkistussumman mittaus vaihtelee hieman paikan funktiona, mikä vaatii vielä lisätutkimuksia. Kokonaisuutena näyttäisi kuitenkin pääosin siltä, että ilmaisimien toimii kuten sen pitääkin ja, että se täyttää ne laatukriteerit ja vaatimukset, joita tässä tutkielmassa tutkin. Tulevaisuudessa GEM-TPC-ilmaisimet tulevat varmasti ottamaan paikkansa säteilynilmaisimien joukosta pienen kokonsa, kyvyn mitata hyvin pieniä sähköisiä signaaleja ja todella hyvän paikkaresoluution vuoksi.

Lähteet

- [1] Matti Kalliokoski. *GEM-TPC detectors for Super-FRS at FAIR*. Sisäinen raportti, Fysiikan tutkimuslaitos, Helsinki, 2012.
- [2] F. Garcia ym. *The Super-FRS GEM-TPC prototype development*, Sisäinen raportti, Fysiikan tutkimuslaitos, Helsinki, 1.6.2015.
- [3] M. Kalliokoski ym. *GEM-TPC trackers for the Super-FRS at FAIR*, MOPD082, Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010.
- [4] F. Sauli. *GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 386 (1997) 531-534.
- [5] H.H. Gutbrod ym. *FAIR Baseline Technical Report*, Tekninen raportti, 09/2006. Vapaasti saatavilla: [http : //www.fair – center.eu/fileadmin/fair/publications_FAIR/FAIR_BTR_1.pdf](http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/publications_FAIR/FAIR_BTR_1.pdf). Haettu 15.10.2017.
- [6] F. Sauli. *The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 805 (2016) 2-24.
- [7] Gabriele Croci. *Development and Characterization of Micro-Pattern Gaseous Detectors for HEP applications and beyond*. PhD thesis, University of Siena, Faculty of Mathematical, Physical and Natural Sciences, Department of Physics, 2010.
- [8] F. Garcia. *GEM-TPC Prototypes Development for the Super-FRS*, Technical Report Meeting at GSI, 3.7.2015.
- [9] Tomas Balog. *Development of detector systems for CBM and SFRS at FAIR*. PhD thesis, Comenius University in Bratislava, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, 2013.

- [10] C. Nociforo. *Time-of-flight measurements at the Super-FRS*. 13th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors 7 - 10 October 2013, Siena, Italy. Published by IOP Publishing for Sissa Medialab.
- [11] Antoine Bacquias. *Kinematical properties of spectator fragments in heavy-ion collisions at relativistic energies*. PhD thesis, University of Strasbourg, Institute of Nuclear Physics, 2008.
- [12] John Lilley. *Nuclear Physics, Principles and Applications*, John Wiley Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 2002.
- [13] O. Kiselev ym. *Si detectors for Time of Flight measurements at the Super-FRS*. GSI scientific report 2012, 172 p.
- [14] R. Janik ym. *Time Projection Chambers with C-Pads for heavy ion tracking*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 640 (2011) 54-57, 2011.
- [15] F. Garcia ym. *Twin GEM-TPC Prototype (HGB4) Beam Test at GSI - a Development for the Super-FRS at FAIR*, GSI Report, 2015-1, 140 p. (2015).
- [16] A.S. Brogna ym. *The n-XYTER Reference Manual*, Document version: 1.50 (draft) 15.12.2009. Vapaasti saatavilla: <https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/pub/Public/PublicNxyter/nXYTER.pdf>. Haettu 21.8.2017.

A CAL ROOT-tiedoston sisältämät parametrit

Taulukoissa 9 ja 10 näkyy kalibraatiossa mittausdatalle annettujen parametrien nimet ja niiden sisällöt. Jokaisen tehdyn mittauksen sisältö on määritetty CAL ROOT-tiedostoksi, joka pitää sisällään taulukoiden sisältämät parametrit.

Taulukko 9: CAL ROOT-tiedostojen sisältämät parametrit

Parametrin numero	Parametri	Parametrin sisältö
1	ev	Tapahtuman numero
2	trigger	Triggeri
3	top_ch	Kanavaluku ilmaisimen toisesta yksiköstä
4	top_adc	ADC-muuntimet ilmaisimen toisesta yksiköstä
5	top_time	Aika ilmaisimen toisesta yksiköstä
6	top_tref1	Ensimmäinen aikareferenssivektori ilmaisimen toisesta yksiköstä
7	top_tref2	Toinen aikareferenssivektori ilmaisimen toisesta yksiköstä
8	bottom_ch	Kanavaluku ilmaisimen ensimmäisestä yksiköstä
9	bottom_adc	ADC-muuntimet ilmaisimen ensimmäisestä yksiköstä
10	bottom_time	Aika ilmaisimen ensimmäisestä yksiköstä
11	bottom_tref1	Ensimmäinen aikareferenssivektori ilmaisimen ensimmäisestä yksiköstä
12	bottom_tref2	Toinen aikareferenssivektori ilmaisimen ensimmäisestä yksiköstä
13	top_nhit	Osumien lukumäärä ilmaisimen toisesta yksiköstä
14	top_ntref1	Ilmaisimen toisen yksikön ensimmäinen aikareferenssivektori, johon on laskettu vektorin koko
15	top_ntref2	Ilmaisimen ensimmäisen yksikön toinen aikareferenssivektori, johon on laskettu vektorin koko
16	bottom_ntref1	Ilmaisimen toisen yksikön ensimmäinen aikareferenssivektori, johon on laskettu vektorin koko
17	bottom_ntref2	Ilmaisimen toisen yksikön toinen aikareferenssivektori, johon on laskettu vektorin koko
18	bottom_nhit	Osumien lukumäärä ilmaisimen toisesta yksiköstä
19	rate1	Keskimääräinen taajuus V830:n yhdestä pinistä
20	rate2	Keskimääräinen taajuus V830:n kolmesta pinistä
21	ev_time	Aika (time bin)
22	nscl	V1290:n tuikeaineisen kanavan ikkunassa mitattu osumien lukumäärä vasemmalla puolella
23	nscr	V1290:n tuikeaineisen kanavan ikkunassa mitattu osumien lukumäärä oikealla puolella

Taulukko 10: CAL ROOT-tiedostojen sisältämät parametrit

Parametrin numero	Parametri	Parametrin sisältö
24	tref	Aikareferenssivektori
25	tpc1_x	X-paikkakoordinaatti TPC1:ssä
26	tpc1_y	Y-koordinaatti TPC1:ssä
27	tpc1_nx	Osumien lukumäärä x-suunnassa TPC1:ssä
28	tpc1_ny	Osumien lukumäärä y-suunnassa TPC1:ssä
29	tpc1_dt	FRS:n standardin TPC:n data, ajautumisaika
30	tpc1_lt	FRS:n standardin TPC:n data, aika vasemmalta puolelta viivästyslinjaa
31	tpc1_rt	FRS:n standardin TPC:n data, aika oikealta puolelta viivästyslinjaa
32	tpc2_x	X-koordinaatti TPC2:ssa
33	tpc2_y	Y-koordinaatti TPC2:ssa
34	tpc2_nx	Osumien lukumäärä x-suunnassa TPC2
35	tpc2_ny	Osumien lukumäärä y-suunnassa TPC2
36	tpc2_dt	FRS:n standardin TPC:n data, ajautumisaika
37	tpc2_lt	FRS:n standardin TPC:n data, aika vasemmalta puolelta viivästyslinjaa
38	tpc2_rt	FRS:n standardin TPC:n data, aika oikealta puolelta viivästyslinjaa
39	hbtr_x	Interpoloitu x-suuntaisen osuman paikka GEM-TPC:ssä
40	hbtr_y	Interpoloitu y-suuntaisen osuman paikka GEM-TPC:ssä
41	hbtr_a	Osuman paikan määrittämisessä käytetty vektori
42	hbtr_b	Osuman paikan määrittämisessä käytetty vektori
43	sc41l	Skaalaimena käytetyn tuikeilmaisimen data vasemmalta
44	sc41r	Skaalaimena käytetyn tuikeilmaisimen data oikealta
45	hbdt1	Tuikeilmaisimen aika vasemmalta
46	hbdt2	Tuikeilmaisimen aika oikealta
47	hbcs	Tarkistussumma (control sum) eli kaikki mahdolliset kombinaatiot hiukkasen lentoajoista

B GEM-TPC-ilmaisimesta mitatut virrat ja jännitteet ilmaisimen eri osista

Taulukoissa 33 ja 34 näkyy kesän 2016 mittauksissa GEM-TPC-ilmaisimesta mitatut virrat ja jännitteet ilmaisimen eri osista.

POWER SUPPLY			GEM 1				TRANSFER 1		
HV, V	Current uA	Drop V	Field kV/cm	Top V	Drop V	Bottom V	Field, kV/cm	Drop V	Field, kV/cm
100	18.079	18.08	0.060	81.9	9.94	72.0	1.989	18.08	0.090
200	36.229	36.23	0.121	163.8	19.93	143.8	3.985	36.23	0.181
300	54.423	54.42	0.181	245.6	29.93	215.6	5.987	54.42	0.272
400	72.602	72.60	0.242	327.4	39.93	287.5	7.986	72.60	0.363
500	90.783	90.78	0.303	409.2	49.93	359.3	9.986	90.78	0.454
600	109.001	109.00	0.363	491.0	59.95	431.0	11.990	109.00	0.545
700	127.212	127.21	0.424	572.8	69.97	502.8	13.993	127.21	0.636
800	145.426	145.43	0.485	654.6	79.98	574.6	15.997	145.43	0.727
900	163.641	163.64	0.545	736.4	90.00	646.4	18.001	163.64	0.818
1000	181.902	181.90	0.606	818.1	100.05	718.1	20.009	181.90	0.910
1100	200.084	200.08	0.667	899.9	110.05	789.9	22.009	200.08	1.000
1200	218.309	218.31	0.728	981.7	120.07	861.6	24.014	218.31	1.092
1300	236.520	236.52	0.788	1063.5	130.09	933.4	26.017	236.52	1.183
1400	254.756	254.76	0.849	1145.2	140.12	1005.1	28.023	254.76	1.274
1500	272.994	272.99	0.910	1227.0	150.15	1076.9	30.029	272.99	1.365
1600	291.233	291.23	0.971	1308.8	160.18	1148.6	32.036	291.23	1.456
1700	309.474	309.47	1.032	1390.5	170.21	1220.3	34.042	309.47	1.547
1800	327.733	327.73	1.092	1472.3	180.25	1292.0	36.051	327.73	1.639
1900	345.976	345.98	1.153	1554.0	190.29	1363.7	38.057	345.98	1.730
2000	364.197	364.20	1.214	1635.8	200.31	1435.5	40.062	364.20	1.821
2100	382.432	382.43	1.275	1717.6	210.34	1507.2	42.068	382.43	1.912
2200	400.656	400.66	1.336	1799.3	220.36	1579.0	44.072	400.66	2.003
2300	418.910	418.91	1.396	1881.1	230.40	1650.7	46.080	418.91	2.095
2400	437.000	437.00	1.457	1963.0	240.35	1722.7	48.070	437.00	2.185
2500	455.389	455.39	1.518	2044.6	250.46	1794.1	50.093	455.39	2.277
2600	473.616	473.62	1.579	2126.4	260.49	1865.9	52.098	473.62	2.368
2700	491.834	491.83	1.639	2208.2	270.51	1937.7	54.102	491.83	2.459
2800	510.062	510.06	1.700	2289.9	280.53	2009.4	56.107	510.06	2.550
2900	528.282	528.28	1.761	2371.7	290.56	2081.2	58.111	528.28	2.641
3000	546.504	546.50	1.822	2453.5	300.58	2152.9	60.115	546.50	2.733
3100	564.713	564.71	1.882	2535.3	310.59	2224.7	62.118	564.71	2.824
3200	582.924	582.92	1.943	2617.1	320.61	2296.5	64.122	582.92	2.915
3300	601.122	601.12	2.004	2698.9	330.62	2368.3	66.123	601.12	3.006
3400	619.345	619.35	2.064	2780.7	340.64	2440.0	68.128	619.35	3.097
3500	637.554	637.55	2.125	2862.4	350.65	2511.8	70.131	637.55	3.188

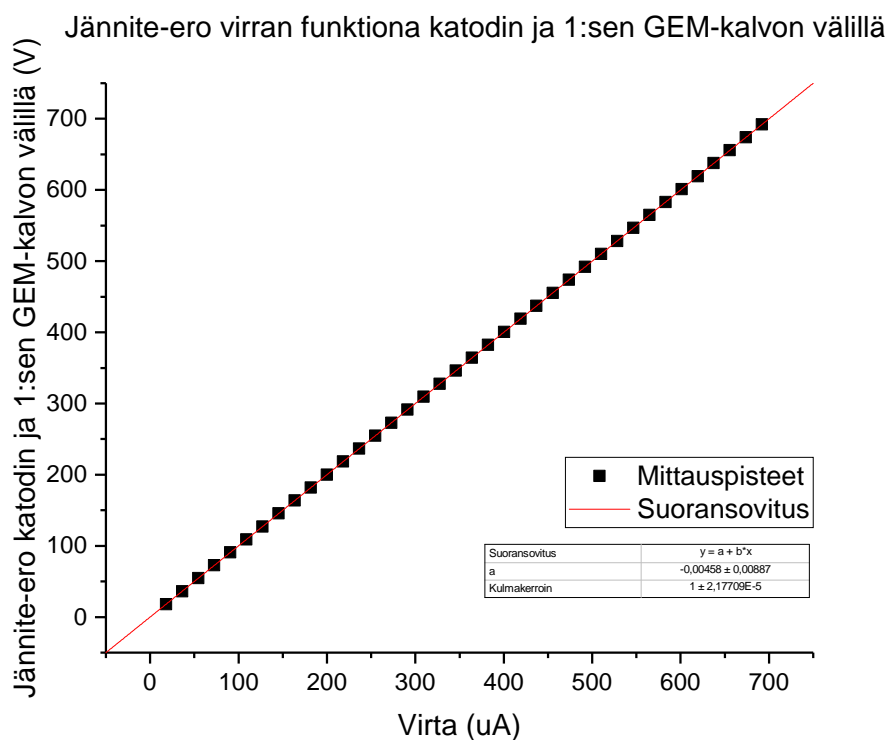
Kuva 33: GEM-TPC:stä mitatut virrat ja jännitteet ilmaisimen eri osista. Taulukko saatu mittauksissa mukana olleelta Francisco Garciaalta.

GEM 2				TRANSFER 2				GEM 3				INDUCTION				TOTAL	TOTAL
Top	Drop	Bottom	Field, kV/cm	Drop	Field, kV/cm	Top	Drop	Bottom	Field, kV/cm	Drop	Field, kV/cm	Drop	Field, kV/cm	Teo. Res. kΩ	Meas. Res. kΩ		
V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V				
53.9	9.04	44.9	1.808	18.08	0.090	26.8	8.14	18.6	1.627	18.08	0.090	55.00	55.00	55.00			
107.6	18.11	89.5	3.623	36.23	0.181	53.3	16.30	37.0	3.261	36.23	0.181	55.00	55.00	55.00			
161.2	27.21	134.0	5.442	54.42	0.272	79.6	24.49	55.1	4.898	54.42	0.272	55.00	55.00	55.00			
214.9	36.30	178.6	7.260	72.60	0.363	106.0	32.67	73.3	6.534	72.60	0.363	55.00	55.00	55.00			
268.9	45.39	223.5	9.078	90.78	0.454	132.9	40.85	91.5	8.170	90.78	0.454	55.00	55.00	55.00			
322.0	54.50	267.5	10.900	109.00	0.545	158.5	49.05	109.5	9.810	109.00	0.545	55.00	55.00	55.00			
375.6	63.61	312.0	12.721	127.21	0.636	184.8	57.25	127.5	11.449	127.21	0.636	55.00	55.00	55.00			
429.2	72.71	356.5	14.543	145.43	0.727	211.0	65.44	145.6	13.088	145.43	0.727	55.00	55.00	55.00			
482.7	81.82	400.9	16.364	163.64	0.818	237.3	73.64	163.6	14.728	163.64	0.818	55.00	55.00	55.00			
536.1	90.95	445.2	18.190	181.90	0.910	263.3	81.86	181.4	16.371	181.90	0.910	55.00	55.00	55.00			
589.8	100.04	489.7	20.008	200.08	1.000	289.7	90.04	199.5	18.008	200.08	1.000	55.00	55.00	55.00			
643.3	109.15	534.2	21.831	218.31	1.092	315.8	98.24	217.6	19.648	218.31	1.092	55.00	55.00	55.00			
696.9	118.26	578.6	23.652	236.52	1.183	342.1	106.43	235.7	21.287	236.52	1.183	55.00	55.00	55.00			
750.4	127.38	623.0	25.476	254.76	1.274	368.2	114.64	253.6	22.928	254.76	1.274	55.00	55.00	55.00			
803.8	136.50	667.4	27.299	272.99	1.365	394.4	122.85	271.5	24.569	272.99	1.365	55.00	55.00	55.00			
857.4	145.62	711.7	29.123	291.23	1.456	420.5	131.05	289.5	26.211	291.23	1.456	55.00	55.00	55.00			
910.8	154.74	756.1	30.947	309.47	1.547	446.6	139.26	307.4	27.853	309.47	1.547	55.00	55.00	55.00			
964.3	163.87	800.4	32.773	327.73	1.639	472.7	147.48	325.2	29.496	327.73	1.639	55.00	55.00	55.00			
1017.8	172.99	844.8	34.598	345.98	1.730	498.8	155.69	343.1	31.138	345.98	1.730	55.00	55.00	55.00			
1071.3	182.10	889.2	36.420	364.20	1.821	525.0	163.89	361.1	32.778	364.20	1.821	55.00	55.00	55.00			
1124.8	191.22	933.6	38.243	382.43	1.912	551.2	172.09	379.1	34.419	382.43	1.912	55.00	55.00	55.00			
1178.3	200.33	978.0	40.066	400.66	2.003	577.3	180.30	397.0	36.059	400.66	2.003	55.00	55.00	55.00			
1231.8	209.46	1022.3	41.891	418.91	2.095	603.4	188.51	414.9	37.702	418.91	2.095	55.00	55.00	55.00			
1285.7	218.50	1066.7	43.700	437.00	2.185	630.2	196.65	433.5	39.330	437.00	2.185	55.00	55.00	55.00			
1338.8	227.69	1111.1	45.539	455.39	2.277	655.7	204.83	450.7	40.985	455.39	2.277	55.00	55.00	55.00			
1392.3	236.81	1155.5	47.362	473.62	2.368	681.9	213.13	468.7	42.625	473.62	2.368	55.00	55.00	55.00			
1445.8	245.92	1199.9	49.183	491.83	2.459	708.1	221.33	486.7	44.265	491.83	2.459	55.00	55.00	55.00			
1499.3	255.03	1244.3	51.006	510.06	2.550	734.2	229.53	504.7	45.906	510.06	2.550	55.00	55.00	55.00			
1552.9	264.14	1288.7	52.828	528.28	2.641	760.5	237.73	522.7	47.545	528.28	2.641	55.00	55.00	55.00			
1606.4	273.25	1333.2	54.650	546.50	2.733	786.7	245.93	540.7	49.185	546.50	2.733	55.00	55.00	55.00			
1660.0	282.36	1377.6	56.471	564.71	2.824	812.9	254.12	558.8	50.824	564.71	2.824	55.00	55.00	55.00			
1713.5	291.46	1422.1	58.292	582.92	2.915	839.2	262.32	576.8	52.463	582.92	2.915	55.00	55.00	55.00			
1767.1	300.56	1466.6	60.112	601.12	3.006	865.5	270.50	595.0	54.101	601.12	3.006	55.00	55.00	55.00			
1820.7	309.67	1511.0	61.935	619.35	3.097	891.7	278.71	612.9	55.741	619.35	3.097	55.00	55.00	55.00			
1874.2	318.78	1555.5	63.755	637.55	3.188	917.9	286.90	631.0	57.380	637.55	3.188	55.00	55.00	55.00			
1927.8	327.88	1599.9	65.576	655.76	3.279	944.2	295.09	649.1	59.018	655.76	3.279	55.00	55.00	55.00			
1981.5	336.97	1644.5	67.394	673.94	3.370	970.5	303.27	667.3	60.655	673.94	3.370	55.00	55.00	55.00			
2035.1	346.06	1689.0	69.212	692.12	3.461	996.9	311.45	685.5	62.291	692.12	3.461	55.00	55.00	55.00			

Kuva 34: GEM-TPC:stä mitatut jännitteet ilmaisimen eri osista. Taulukko saatu mittauksissa mukana olleelta Francisco Garciaalta.

C Katodin ja ensimmäisen GEM-kalvon välisen resistanssin määrittäminen

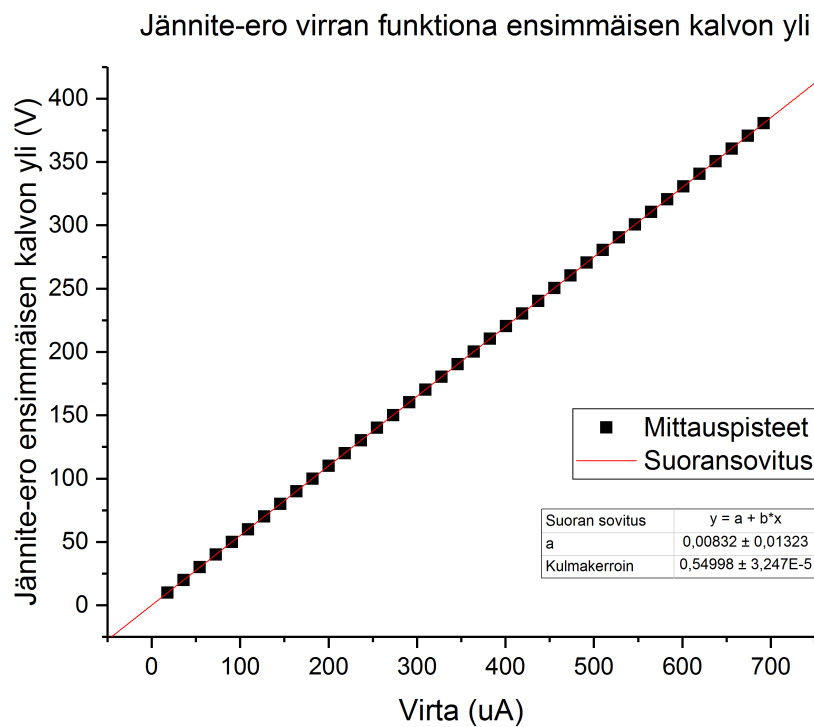
Kuvassa 35 näkyy kuvissa 33 ja 34 olevien taulukoiden tietojen avulla Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona katodin ja 1:sen GEM-kalvon välillä.



Kuva 35: Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona katodin ja ensimmäisen GEM-kalvon välillä

D Ensimmäisen GEM-kalvon yli olevan resistanssin määrittäminen

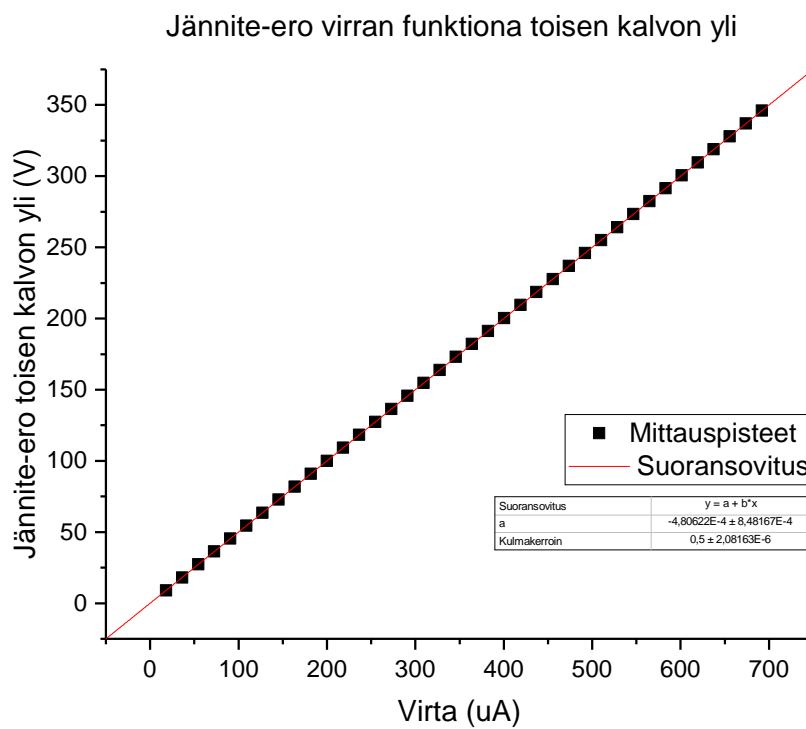
Kuvassa 36 näkyy kuvissa 33 ja 34 olevien taulukoiden tietojen avulla Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona ensimmäisen GEM-kalvon yli.



Kuva 36: Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona ensimmäisen GEM-kalvon yli.

E Toisen GEM-kalvon yli olevan resistanssin määrittäminen

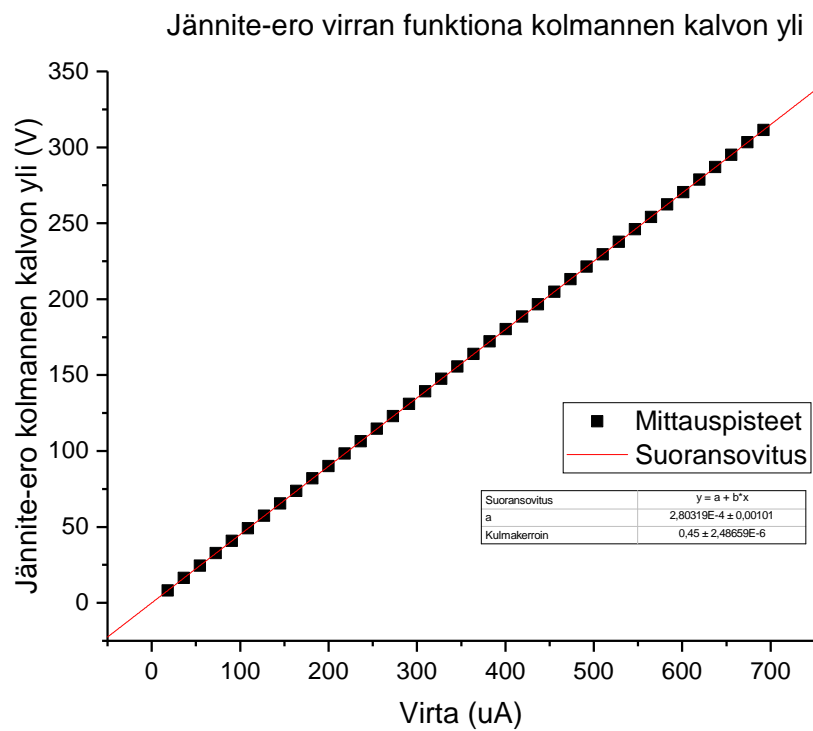
Kuvassa 37 näkyy kuvissa 33 ja 34 olevien taulukoiden tietojen avulla Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona toisen GEM-kalvon yli.



Kuva 37: Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona toisen GEM-kalvon yli.

F Kolmannen GEM-kalvon yli olevan resistanssin määrittäminen

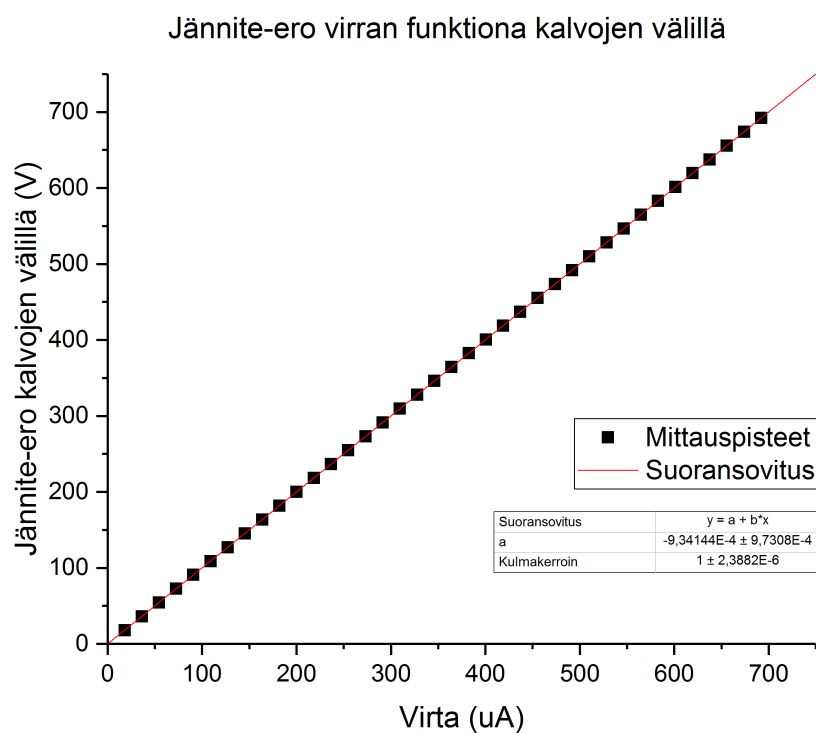
Kuvassa 38 näkyy kuvissa 33 ja 34 olevien taulukoiden tietojen avulla Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona kolmannen GEM-kalvon yli.



Kuva 38: Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona kolmannen GEM-kalvon yli.

G Kalvojen välisen tilavuuden resistanssin määrittäminen

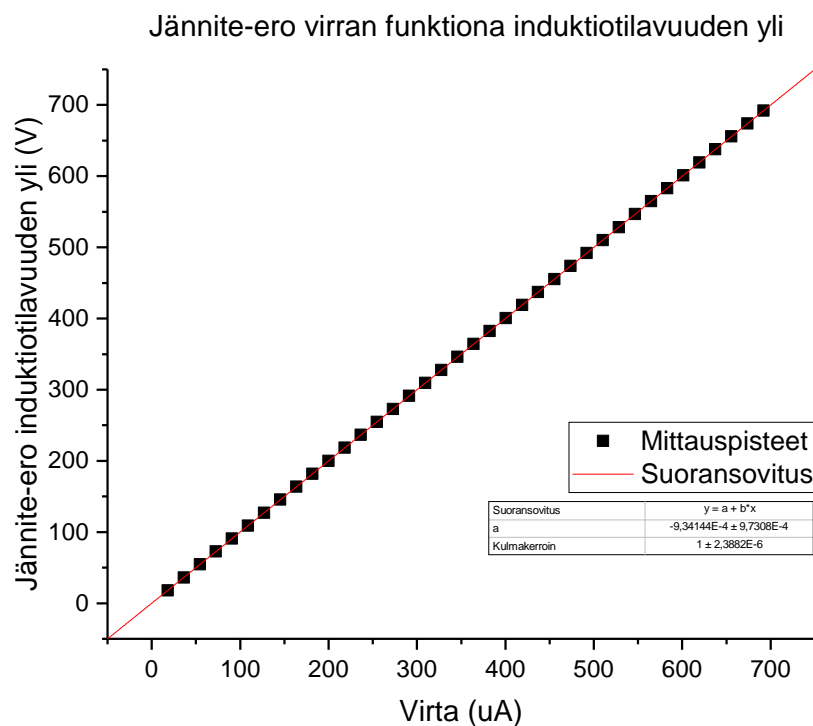
Kuvassa 39 näkyy kuvissa 33 ja 34 olevien taulukoiden tietojen avulla Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona GEM-kalvojen välillä.



Kuva 39: Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona GEM-kalvojen välillä.

H Resistanssi alimman GEM-kalvon ja anodin välillä

Kuvassa 40 näkyy kuvissa 33 ja 34 olevien taulukoiden tietojen avulla Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona alimmaisen GEM-kalvon pohjan ja anodin välillä.



Kuva 40: Origin-ohjelmistolla tehty kuvaaja jännite-erosta virran funktiona alimmaisen GEM-kalvon pohjan ja anodin välillä.