

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Tartu observatoorium

Karl Nõupuu

**Tartu Observatooriumi ešell-spektrograafi võimekuse
karakteriseerimine**
Bakalaureusetöö (12EAP)

Juhendaja:
Tõnis Eenmäe, MSc (teaduskraad)

Tartu 2025

Tartu Observatooriumi ešell-spektrograafi võimekuse karakteriseerimine

Tartu Observatoorium sai mullu suvel uue ešell-spektrograafi, millega on võimalik teha tähtede vaatlus spektraalse lahutusega kuni $R = 33000$. Antud töös analüüsiti keskkonnamõjusid spektrograafi fookuses olevatele järkudele ja spektrijoonte ja ešell-spektri spektrijärkude nihetele spektrograafi CCD-sensoril. Leiti, et väikeste temperatuurimuutuste, kuni $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ vahemikus, on fookuses olnud järgud praktiliselt muutumatud. Suuremate temperatuurimuutuste puhul, $\Delta 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ei ole enam ükski varasemalt hästi fookuses järk fookuses. Temperatuuri- ja õhurõhu muutustest tulenevad spektrijoonte nihkumised ulatusid $\Delta x = 1.54(1)$ pikslini, vastav radiaalkiiruste nihe $\Delta RV = 6.6\text{ kms}^{-1}$. Spektrijärgud nihkusid maksimaalselt $\Delta y = 2.58(3)$ pikslit.

Tulemuste põhjal häälestati töö käigus välja töötatud tarkvara, millega on võimalik fokuseerimise katse näol määrata CCD-kaamera fokuseerija optimaalne positsioon. Võrreldes katse tulemuste põhjal valitud fokuseerija positsioonidel olevate järkude täis-laiuseid poolel signaali kõrgusel temperatuurimõjude analüüsis leiduvaga, täheldati tulemuste head paikapidavust.

Kaardistati spektrograafis leiduvat hajunud valgust ning leiti, et difraktsioonvõrele suunatud kollimaatorist väljuv valgusvihk on võrehoidja suhtes kaldu. Kalduvus optilisest teljest oli 0.81 ° . Selle korrigeerimiseks tuleks spektrograafi sisendpeegli keerata võre poole vähemalt 0.40 ° võrra.

Märksõnad: spektrograaf, spektrograafilised vaatlused, spektrograafilised meetodid.

CERCS: P520 - Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia; P180 - Metroloogia, instrumentatsioon.

Stability analysis of Tartu Observatory echelle-spectrograph

Last summer, Tartu Observatory received a new echelle-spectrograph, which allows for stellar observations with a spectral resolution of up to $R = 33000$. In this work, environmental effects on the echelle-spectrum order that were in focus, as well as the shifts of spectral lines and echelle-spectrum orders on the spectrograph's CCD-sensor, were studied.

It was found that with small changes in temperature (within 1°C), the focused orders remained virtually unchanged. However, with larger temperature changes ($\Delta 10^\circ\text{C}$), none of the previously well-focused orders were in focus.

Spectral line shifts caused by changes in temperature and air pressure reached $\Delta x = 1.54(1)$ pixels, corresponding to a radial velocity shift of $\Delta RV = 6.6 \text{ km s}^{-1}$. Spectral orders shifted up to a maximum of $\Delta y = 2.58(3)$ pixels

Based on these results, a piece of the software developed during the work was fine-tuned. This software allows for the determination of the optimal position of the CCD-camera focuser by means of a focusing test. Comparing the full-widths at half maximum of the orders at the focuser position chosen from the test results with those found in the thermal effect analysis showed good consistency.

Scattered light within the spectrograph was mapped, and it was found that the light beam exiting the collimator directed at the diffraction grating is tilted relative to the grating holder. The deviation from the optical axis was 0.81° . To correct this the input mirror of the spectrograph should be rotated towards the grating by at least 0.40° .

Keywords: instrumentation: spectrographs; methods: observational, data analysis; techniques: spectroscopic.

CERCS: P520 - Astronomy, space research, cosmic chemistry; P180 - Metrology, physical instrumentation

Sisukord

Sissejuhatus	6
1 Ülevaade	7
1.1 Ešell-spektrograaf	7
1.1.1 Kõrgete spektrijärkude kasutamine	7
1.1.2 Kõrgemate järkude kattuvuse lahendamine	8
1.1.3 Tsentraalne lainepikkus ja difraktsioonijärk	9
1.1.4 Difraktsioonijärkude vaheline kaugus	9
1.2 Spektrograafi stabiilsus	10
1.3 Spektrograaf ja keskkond	11
1.3.1 Uuritav spektrograaf	11
1.3.2 Temperatuur ja õhurõhk	12
1.3.3 Hajunud valgus	13
2 Andmete töötlus ja analüüs	16
2.1 Andmekaadrite tüübid	16
2.2 Andmete eeltöötlus	18
2.3 Andmete töötlus	20
2.3.1 Järkude tuvastamine	21
2.3.2 Järkude paiknemine sensoril	23
2.3.3 Järkude väljavõtmine	24
2.3.4 Korrelatsioon	25
2.3.5 Automaatne andmetöötlus	27
3 Tulemustest	29
3.1 Keskkonnatingimuste mõju fookusele	29

3.2	Keskkonnatingimuste mõju järkude paiknemisele sensoril	32
3.3	Kaamera fokuseerimise katse	36
3.4	Hajunud valguse kaardistamine spektrograafis	41
4	Kokkuvõte	43
	Kasutatud kirjandus	45
	Lisa A	47
	Lisa B	48
	Lisa C	49
	Lihtlitsents	50

Sissejuhatus

Tartu Observatoorium sai mullu suvel uue ešell-spektrograafi, millega on võimalik teha tähtede vaatlus spektraalse lahutusega kuni $R = 33000$. Seni kasutati observatooriumis spektrofotomeetrilise vaatluste jaoks 1.5-meetrise teleskoobi külge kinnitatud spektrograafi. Uus spektrograaf paikneb Tõravere teleskoobi maja sees oleva 2-korruselise maja suuruse korpuse teisel korrusel, mida nimetatakse kudee kambriks. See on vajalik, sest ešell-spektrograaf on kõrge spektraalse lahutuse tõttu väga tundlik igasugustele välistele mõjudele ning seetõttu peab see olema potentsiaalsetest vibratsiooniallikatest eraldatud. Kahjuks ei ole vibratsioon ainukene faktor, mis võib spektrograafi tööd segada. Nimelt on teada, et ešell-spektrograafid on tundlikud nii temperatuuri kui ka õhurõhu muutuste suhtes ning spektrograafi stabiilsuse analüüsi üheks eesmärgiks ongi selle tundlikkuse väljaselgitamine.

Töö tähtsus seisneb selles, et antud ešell-spektrograaf saab olema Tartu Observatooriumis peamine teaduslikus töös kasutatav spektromeeetriline tööriist. Seetõttu on vajada tagada selle optimaalne töö, et teaduslikus töös kasutatavad andmed oleksid parima kvaliteedi ja usaldusväärsusega. Spektrograafi stabiilsuse iseloomustuse alusel on võimalik teha järeldusi edasiste sammude osas, millega oleks võimalik spektrograafi tööd veelgi rohkem parandada.

Käesoleva töö eesmärk on analüüsida spektrograafi stabiilsust, s.t. uurida spektrograafi tundlikkust keskkonnatingimuste muutustele analüütilistel meetoditel. Selle jaoks kasutati pika ajavahemiku vältel ja laias vahemikus kudee kambri, ja sellest tulenevalt ka spektrograafi optikalaua, temperatuuridel kogutud ešell-spektreid. Antud ajavahemikul oli spektrograaf muutumatus seisundis ning kudee kambri keskkonnatingimused sõltusid ainult välistingimustest, sest ruumi ei sisenetud. Stabiilsuse analüüsist tulenevate järelduste põhjal häälestatakse töö käigus arendatav tööriist, millega on võimalik määrata spektrograafi kaamera fokuseerija optimaalne positsioon, mille puhul on võimalikult palju ešell-spektri järke hästi fokuseeritud. Tööriista efektiivsust hinnatakse fokuseerimise katse abil, mille vältel kogutakse andmeid erinevatel fokuseerija positsioonidel, eesmärgiga demonstreerida automaatika võimekust parima fookuse määramises. Kuna on ette teada, et antud spektrograafis esineb hajunud valgust, siis on ka töö üheks eesmärgiks selle allikas spektrograafis kaardistada.

1 Ülevaade

1.1 Ešell-spektrograaf

Ešell-spektrograafid on difraktsioon-spektrograafide alamtüüp, mida iseloomustab väikse joon-tihedusega fikseeritud difraktsioonivõred ja ristidisperseerivad lisandvõre(d) või -prisma(d). Ešell-spektrograafide eeliseks on kogu nähtava valguse spektri jäädvustamine ainult ühe konkreetse difraktsioonivõrega ning ühe säritusega.

1.1.1 Kõrgete spektrijärkude kasutamine

Selleks, et näha kuidas seda saavutada tuleb natukene rääkida ešell-spektrograafi alusest teooriast, peamiselt, kõrgetest järkudest. Üleüldiselt saab võrespektrograafide jaoks kirja panna võre võrrandi kujul ([Eversberg and Vollmann, 2015](#)):

$$n\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta), \quad (1)$$

kus α – valguse langemise nurk ja β – difraktsiooninurk on sellised parameetrid, mis rahuldavad interferentsi tingimust. Antud nurgad eksisteerivad tasandis, mis on risti võre pinnaga ning võre joonte suunas. Lisades antud võrrandile (1) nurga γ , mis näitab nurka langeva valguse ja eelmainitud tasandi vahel, mille tulemusena ([Eversberg and Vollmann, 2015](#))

$$n\lambda = d \cos \gamma \cdot (\sin \alpha + \sin \beta). \quad (2)$$

Saadud valemi (2) parem pool on lineaarne funktsioon difraktsioonijärgust n . Käsitleme nüüd olukorda, kus $\beta = \beta_c$ ehk difraktsiooninurk on konstantne. Sellisel juhul on võre võrrandi parem pool konstantne ning sellega seonduv lainepikkus $\lambda = \lambda_c$, kus λ_c näitab tsentraalset lainepikkust, sõltub difraktsioonijärgust n pöördvõrdeliselt ([Eversberg and Vollmann, 2015](#)):

$$\lambda_c(n) = \frac{1}{n} d \cos \gamma \cdot (\sin \alpha + \sin \beta). \quad (3)$$

Tsentraalse lainepikkuse muutus sõltuvalt difraktsioonijärgust on antud kui tuletis n -i suhtes ([Eversberg and Vollmann, 2015](#)):

$$\frac{d\lambda_c}{dn} \sim \frac{1}{n^2}.$$

Tehes lähenduse $\Delta\lambda_c \sim \frac{1}{n^2} \cdot \Delta n$ ning konkreetse valiku $\Delta n = 1$ (ehk tegemist on järjestikuste järkudega), siis selline sõltuvus viib tulemini, et järjestikuste difraktsioonijärkude tsentraalsete

lainepikkuste vaheline kaugus väheneb kui $\frac{1}{n^2}$ ning seetõttu järjestikuste kõrgemate difraktsioonijärkude lainepikkuste vahemikud hakkavad omavahel kattuma. Iga difraktsioonijärku puhul on nähtava valguse spekter kujutatud. Kusjuures, tsentraalne lainepikkus on aga geomeetriselt nihkes ning iga erinev difraktsioonijärk annab teistsuguse lainepikkuste vahemiku $\Delta\lambda$, mis on teatava konkreetse geomeetriselise alaga. Seetõttu, läbi kaalutletud erinevate difraktsioonijärkude valiku, mingisuguses konkreetsetes geomeetriselises aknas, on teoreetiliselt võimalik saada kõiki lainepikkusi nähtava valguse spektris ühe kaadriga. Spektroskoopias on kõrgematele difraktsioonijärkudele üleminek võrreldav dispersiooni suurendamisega ilma difraktsioonivõre vahetamata. Valemi (1) kohaselt, teine difraktsioonijärk annab kahekordse dispersiooni võrreldes esimese järguga ning kolmas järk kolmekordse dispersiooni. Mõistagi sellisel juhul on aga lainepikkuste vahemik väiksem, kuna vaateväli on konstantne (Eversberg and Vollmann, 2015).

1.1.2 Kõrgemate järkude kattuvuse lahendamine

Eelnevalt välja toodud probleemi, et kõrgemad difraktsioonijärgud kattuvad, lahendus tuleneb faktist, et iga difraktsioonijärk katab mingisugust konkreetset lainepikkuste vahemikku kindla dispersioonitelje jaoks. Antud difraktsioonivõre puudus on nüüd eshell tüüpi süsteemide eelis. Positsioneerides teise võre või prisma esimeselt võrelt tuleva valguse ette sedasi, et selle dispersioonitelg on risti esimese disperseeruva elemendi dispersiooniteljega, siis disperseerunud valguse erinevaid difraktsioonijärke on võimalik üksteisest eraldada. Kui sellise süsteemi esimene disperseeriv element on eshell-võre, mis töötab väga kõrgetes difraktsioonijärkudes kõrge spektraalse lahutusega, siis seda kutsutakse eshell-spektrograafiaks ning teist võre või prisma nimetatakse risti-disperseerivaks elemendiks. Selline lahendus eraldab kattuvad difraktsioonijärgud risti dispersiooniteljega ning antud eraldatud järgud registreeritakse sensoriga. Tulemiks on terve nähtava valguse spektri registreerimine ühe kaadriga (Eversberg and Vollmann, 2015).

Selliselt saadakse tasavälja- ja lainepikkuste kalibratsioonikaadritel leiduv iseloomulik kõverate kogum. Need on eshell-spektri difraktsioonijärgud või spektrijärgud. Edaspidi kasutatakse valdavalt mõistet ”järk”.

1.1.3 Tsentraalne lainepikkus ja difraktsioonijärk

Ešell-võre üks fundamentaalseid omadusi on selle difraktsioonijärgu ja tsentraalse lainepikkuse korrutis:

$$\lambda n = 2d \cos \gamma \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Theta_B = \textit{konst.} \equiv K. \quad (4)$$

Antud võrrandi parem pool kujutab endast konstanti konkreetse spektrograafi jaoks. Seega, lainepikkuse ja difraktsioonijärgu korrutis on konstant K lainepikkuse ühikutes. See aga kehtib ainult tsentraalsete lainepikkuste jaoks, mistõttu,

$$\lambda_c(n) = \frac{K}{n}. \quad (5)$$

Difraktsioonijärkude tsentraalsed lainepikkused $\lambda_c(n)$ on pöörd-võrdelised difraktsioonijärgust n (Eversberg and Vollmann, 2015).

1.1.4 Difraktsioonijärkude vaheline kaugus

Selleks, et eraldada ešell-süsteemi difraktsioonijärgud, piisab ristidisperseeriva elemendi asemel valguskimbu teekonna ette ešell-võre ja sensori vahel. Kui antud ristidisperseeriv element omab nurkdispersiooni $\frac{d\beta_c}{d\lambda}$, siis kahe järjestikuse difraktsioonijärgu i ja j kaugus peale eraldamist kaamera jaoks, mis omab fookuskaugust $f_{kaamera}$, on avaldatav kui,

$$\Delta x_{ij} = f_{kaamera} \cdot \Delta \lambda_{ij} \cdot \frac{d\beta_c}{d\lambda} \quad (6)$$

kus $\Delta \lambda_{ij}$ on vahe kahe järjestikuse difraktsioonijärgu tsentraalsete lainepikkuste vahel (Eversberg and Vollmann, 2015).

Kuna eelnevalt sai välja toodud, et difraktsioonijärkude ja nende tsentraalsete lainepikkuste korrutis on konstant, siis tähendab see ka seda, et kahe järjestikuse difraktsioonijärgu tsentraalsete lainepikkuste vahe $\Delta \lambda_{ij}$ peab olema konstant. Kui kaamera fookuskaugus ei muutu, siis on näha et difraktsioonijärkude vaheline kaugus sõltub täielikult ristidisperseeriva elemendi nurkdispersioonist $\frac{d\beta_c}{d\lambda}$. Antud juhul on selleks ristidisperseerivaks elemendiks kolm järjestikust prisma, mille omadused sõltuvad temperatuurist, mistõttu difraktsioonijärkude vaheline kaugus ei ole temperatuurist sõltumatu.

1.2 Spektrograafi stabiilsus

Tartu Observatooriumi ešell-spektrograaf on seda rakendavast teleskoobist eraldatud fiiberoptilise kaabliga. Kusjuures, spektrograaf asub ka eraldi ruumis, kudee kambris, kuhu ligipääs on üldjuhul piiratud tagamaks võimalikult stabiilset keskkonda. Antud ruum ei oma kliimakontrolli ning ruumi keskkonnatingimused sõltuvad väliskeskkonna tingimustest ning aparatuurist, mis ruumis asub. Sellest tulenevalt allub spektrograaf välistele mõjudele, mis võib mõõdetavaid tulemusi moonutada erinevatel ajahetkedel. Kusjuures, kuigi spektrograaf allub välistele mõjudele, siis kuna ruumi paksudel betoonist ja väljastpoolt vahtplastiga isoleeritud seintel on suur termiline inertsus, siis antud muutused on suuresti pikaajalised. Sellest tulenevalt on kõige kiireloomulisemad mõjud just ruumis sees asuvatest instrumentidest tulenev.

[Halverson et al. \(2016\)](#) kirjeldas määramatuste eelarvet potentsiaalsele seadmele (*NEID, NN-explore Exoplanet Investigations with Doppler spectroscopy*), mainib, et üheks tähtsaks stabiilsusega seonduvaks veallikaks on difraktsioonvõre mõõtmete muutumine temperatuurist. Väikesed temperatuurimuutused muudavad difraktsioonvõre efektiivset joontevahelist kaugust, millest tulenevalt tekivad ka spektraalsed nihked seadme fokaaltasandis. Nimelt 200×800 mm mõõtudega, 31.6 joont/mm R4 ešell-difraktsioonvõre puhul 1 mK suurune temperatuur muutus vastab spektraalsele nihkele 1.2 cm s^{-1} spektrograafi fokaaltasandis. Samas töös räägitakse ka sellest, et veakomponendiks on ka *NEID* seadme alumiiniumist optikalaua paisumine ja kokkutõmbumine temperatuurimuutuste tagajärjel, millest tulenevalt spektrijooned nihkuvad seadme fokaaltasandis.

Rääkides fiiber-optiliselt ühendatud spektrograafidest, Vainu Bappu Teleskoop (VBT) stabiilsuse analüüsis, [Chamarthi et al. \(2018\)](#) arutlevad, et kuigi spektrograafi stabiilsus ei ole kriitiline lühemate vaatluste puhul, siis ebastabiilsused muutuvad oluliseks, kui tegemist on kõrge täpsusega Doppleri spektroskoopias, kus nende teleskoobi jaoks on mõõtmistulemuste puhul vajalik tuvastada 0.04 pikslit nihet spektraaljoontes, mistõttu on vajalik kvantifitseerida temperatuurimuutustest tulenevaid nihkeid. Sarnaselt, [Hou et al. \(2012\)](#) väidavad, et LAMOST (*Large Sky Area Multi-Object Spectroscopic Telescope*) teaduslikuks eesmärgiks on nõutav joonte nihkumine vähem kui 0.05 pikslit tunnis.

Nii [Chamarthi et al. \(2018\)](#) kui ka [Hou et al. \(2012\)](#) kasutavad temperatuurist tuleneva stabiilsuse määramiseks peamiselt spektraalseid nihkeid ajas. Kuigi nad on eraldiseisvalt välja toonud ka selle, et temperatuur on ajas muutuv, siis ei ole otseselt näitatud otsest nihete ja temperatuu-

rimuutuste vahelist sõltuvust. Käesolevas töös keskendutakse just rohkem otsesele seosele ning nihked ja muutuseid pool-laiustes (spektrijoone täislaius poole signaali kõrgusel, *full-width at half maximum, FWHM*) iseloomustatakse sõltuvana temperatuurist.

Samuti on stabiilsuse üheks komponendiks spektrograafi keskkonna rõhumuutused. Rõhumuutused muudavad spektrograafi optikat ümbritseva meediumi murdumisnäitajat, mille tulemusena tekivad spektrijoonte nihked dispersiooniteljes (Halverson et al., 2016; Chamarthi et al., 2018).

1.3 Spektrograaf ja keskkond

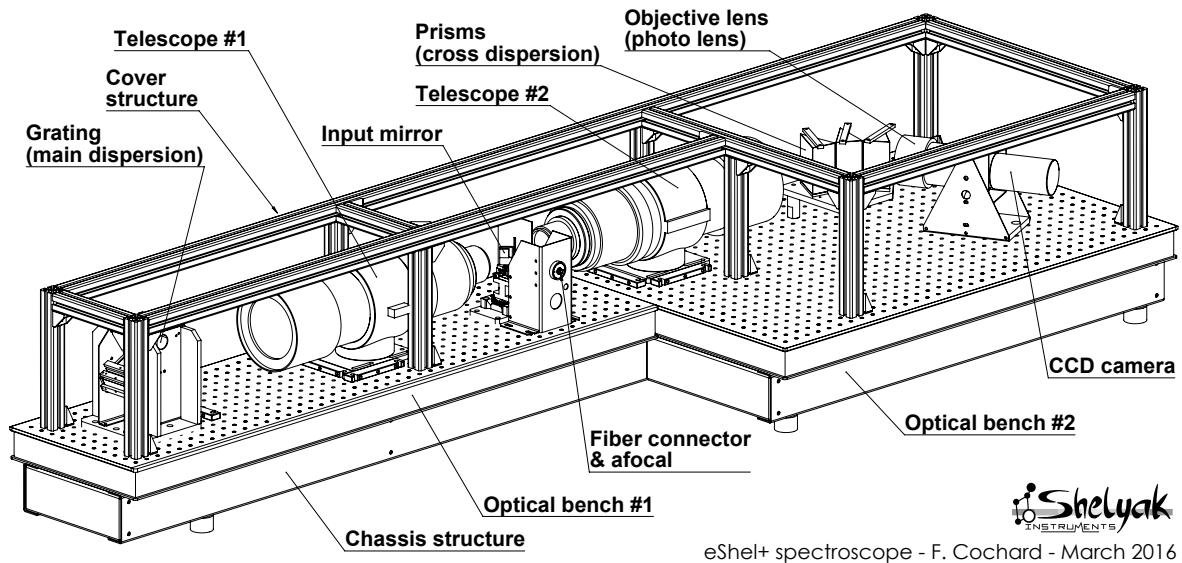
Nagu eelnevalt mainitud asub Tartu Observatooriumi fiiber-optiliselt ühendatud ešell-spektrograaf teleskoobist eraldatud ruumis, mida kutsutakse kudee kambriks. Ruumil küll puudub kliimakontroll, kuid ruumi proovitakse hoida võimalikult isoleeritud s.t. ka seda, et ruumis ei käida väga tihti. See on vajalik selleks, et ainukesed välised mõjutused spektrograafide oleksid kas suure termilise inertsiaga välismõjud või ruumisestest aparatuuridest tulenevad lühiajalised temperatuurkõikumised.

Sarnaselt Halverson et al. (2016) mainitud optikalaua temperatuurile kasutatakse ka käesoleva töö raames optikalaua mõõdetud temperatuuri. Koos sellega on ka olemas kudee kambri laealuse temperatuur, õhurõhk ning ka suhteline niiskus. Neist mõistagi primaarne on optikalaua temperatuur ning sealt edasi õhurõhk ja muud.

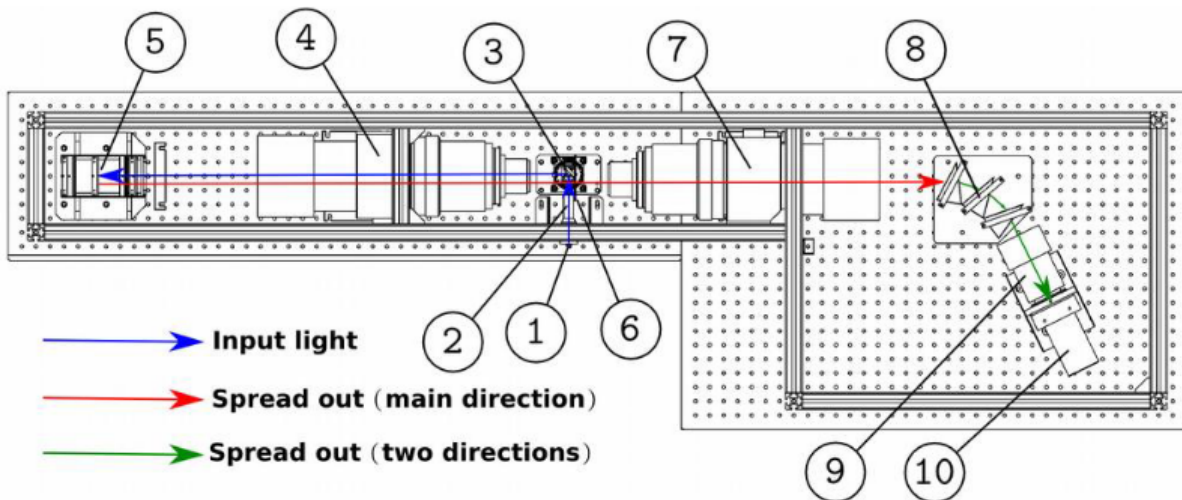
1.3.1 Uuritav spektrograaf

Käesoleva töö raames uuritakse spektrograafi *Whoppsel* firma *Shelyak Instruments* poolt. Spektrograafi põhikonstruktsioon on nähtav Joonisel 1 koos sellega kaasnevate põhikomponentidega. Spektrograaf koosneb kahest identsest konfokaalselt asutatud teleskoobist, sisendpeeglist, mille servale on optilisest fiibrist tulenev valgusvihk fokuseeritud, difraktsioonvõrest, risti-dispergeerivatest elementidest (prismadest) ning lõpuks CCD-sensorist. Mõlemad teleskoobid käituvad kui kollimaatorid, tagamaks et spektrograafis liigub kollimeeritud valgusvihk.

Spektrograafi valguskiirte käik on nähtav Joonisel 2.



Joonis 1: Firma *Shelyak Instruments* poolt toodetud ešell-spektrograafi Whoppsel põhikonstruktsioon ning põhikomponendid (Cochard, 2016).



Joonis 2: Valguskiirte käik Whoppsel spektrograafis (Cochard, 2016).

1.3.2 Temperatuur ja õhurõhk

Nii optikalaua mõõtude kui ka üksikute komponentide temperatuurikõikumistest tekkivad nihked mõjutavad spektrograafia kogutavaid tulemusi. Esiteks, spektrograafi konstruktsiooni kuuluvad kaks teleskoobi, mis on konfokaalsed, optikalaua mõõtmete muutusest võib tuleneda konfokaalsuse halvenemine. Teiseks, spektrograafi sisenev valgusvihk on fokuseeritud sisendpeegli servale; nihked konstruktsioonis võivad selle fookuspunkti asukohta muuta. Kolmandaks, spektrograafi kaamera asukoht saab nihkuda, mistõttu küll ei muutu kaamera fookus, vaid liigub

fokaaltasand.

Sellistest nihetest tulenevalt võib komposiitefekt lõpp-tulemusele olla märkimisväärne. Seetõttu on üheks tähtsaimaks uuritavaks asjaoluks just temperatuurimuutuste mõjud spektrograafidele. Selle saavutamiseks on mõistagi vaja olukorda, kus algselt fookuseeritud spektrograafi fookust ei muudeta ehk kogu spektritelt tuvastav mõju tekkib temperatuurkõikumistest ning sealt optilise laua ja spektrograafi komponentide mõõtmete muutustest.

Joonisel 3 on näha optikalaua temperatuuri ja kudee kambri õhurõhu pikaajalist muutumist. Töös tehtud stabiiluse analüüsi andmed koguti just välja toodud kuupäevade vahemikus. Kogutud andmete jaoks muutus temperatuur vahemikus 10.13 . . . 22.8 °C ning kudee kambri õhurõhk vahemikus 985.8 . . . 1031.2 hPa. Joonisel on mustade punktidega välja toodud konkreetset kuupäevad, mil andmekomplekte koguti. Punktid asuvad temperatuuri- ja õhurõhu muutuste kõverate peal. Sedasi on näha, et umbes millisel temperatuuril või õhurõhul mingil kuupäeval andmekomplekt koguti.

Optikalaua temperatuuri mõõdetakse pidevalt, 1 minutise lahutusega, digitaalse termomeetriga DS18B20 ¹. Termomeeteri töövahemik on -10 . . . + 85 °C ning temperatuur digitaliseeritakse sammuga 0.0625 °C. Käesolevas töös on temperatuurid esitatud 2-komakoha täpsusega.

Kudee kambri õhurõhku mõõdetakse pidevalt, 1 minutise lahutusega, õhuniiskuse sensoriga BME280 ², millega on võimalik mõõta ka õhurõhku.

Temperatuurandmed on kogutud kuupäevade vahemikus 28.08.2024 kuni 12.25.2025.

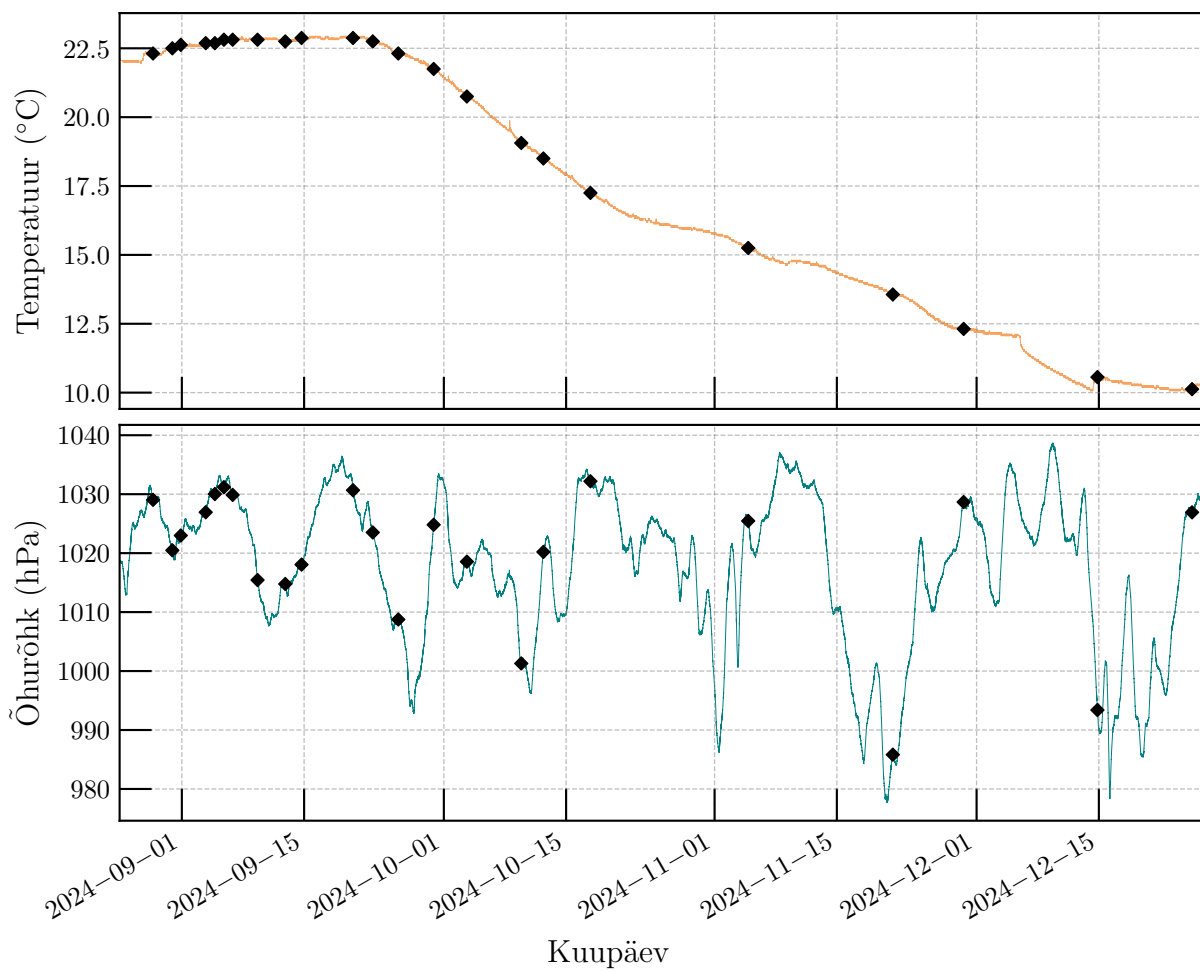
1.3.3 Hajunud valgus

Hajunud valgus on juba aegade hämarusest olnud spektrograafide puhul murekohaks ning selle allikad võivad olla erinevad, näiteks optiliste komponentide pinnadefektid või nende peal olevad tolmuterad. Hajunud valgus võib tekkida ka seetõttu, et valgus spektrograafis kaldub määratud optilisest teest kõrvale või langeb pinnale, kuhu see langeda ei tohiks (Ives, 1910; Donaldson, 1952; Fest, 2013).

Hajunud valgus moonutab süsteemaatiliselt spektrijoonte suhtelisi intensiivsusi ning see on

¹<https://www.analog.com/en/products/ds18b20.html>, vaadatud 30.05.2025

²<https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280>, vaadatud 30.05.2025



Joonis 3: Optikalaua temperatuur (ülemine) ja kudee kambri õhurõhk (alumine) andmete kogumise perioodi vältel.

võrdeline huvialuse objekti signaaliga. Olukordades kus uuritav objekt on hele ning tulemusena on ka kogutud signaali palju, siis ei ole hajunud valgus niivõrd suur murekoht. Kui tegemist on nõrkade objektide või ääre-alaste järkudega (mille signaal on väike) siis on see juba märgatav probleem ning seetõttu on tähtis spektrograafi jõudev või selles tekkiv hajunud valgus kõrvaldada või minimeerida ([Gong et al., 2021](#)).

Töö andmetöötluse osas on näha, et kahemõõtmelise ešell-spektri keskosas on hajunud valguse kindla struktuuriga signaal. Selle tugevus on 1 % suurusjärgus ning korrigeerimata jätmisel mõjutab see süstemaatiliselt töödeldud spektrites spektrijoonte suhtelisi intensiivsusi. Selleks, et võtta edasisi samme selle kõrvaldamiseks on, aga esmaselt vaja selle allikas tuvastada. Seetõttu üheks töö eesmärgiks on teha esmased analüüsid, et kus antud spektrograafis võiks hajunud valgus tekkida. Selliseid asukohti on valitud kaks: esimese kollimaatori ja difraktsioonvõre vahel ning teise kollimaatori ja esimese risti-dispergeeriva prisma vahel.

Esimese kollimaatori ja difraktsioonvõre juures on peamine kaalutlus see, et kollimaatorist väljuv valgus valgustaks ainult difraktsioonvõre ning ei langeks selle anodeeritud metallist hoidjale, edaspidi võrehoidja. Ka teise kollimaatori ja esimese prisma vahel on oluline, et kollimaatorist väljuv valgus valgustaks ainult prisma pinda s.t. ei liiguks prismast mööda ülejäänusse spektrograafi konstruktsiooni, kus see võib peegelduda ja hajuda.

2 Andmete töötlus ja analüüs

2.1 Andmekaadrite tüübid

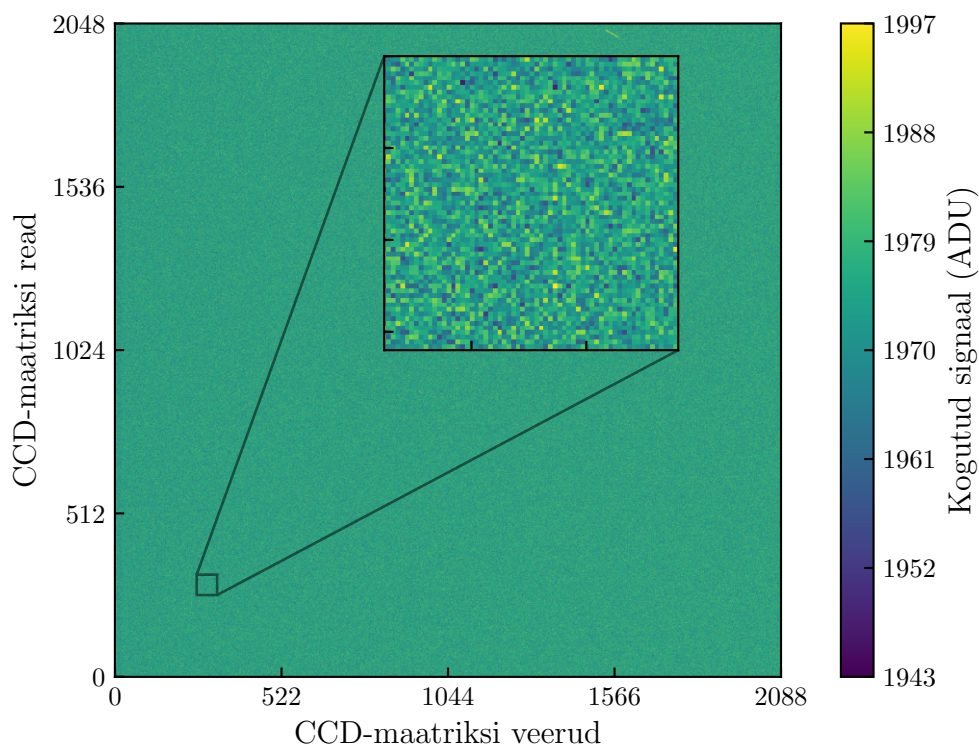
Käesoleva peatüki eesmärk on tutvustada töös kasutatud andmetöötamise meetodeid. Esimesena vaatleme toorete andmekaadrite eeltöötlust vastavalt CCD-sensoritega kogutud andmete töötamise heale tavale (Howell, 2006).

Töös kasutatud andmekaadrid on kogutud uuritava spektrograafia ning neid on kokku nelja tüüpi: eelpingekaadrid (ingl. *bias frame*), pimekaadrid (ingl. *dark frame*), tasaväljakaadrid (ingl. *flat frame*) ja lainepikkuste kalibratsioonikaadrid (ingl. *calibration frame*).

Joonisel 4 on toodud pimekaadri näide. Samuti on joonisel suurendus andmekaadri väikesest lõigust, et paremini visualiseerida signaali, mis kaadris leidub. Pimekaadreid kasutatakse CCD-sensori pikslites tekkiva pimevoolu ehk termiliste elektronide tekke hindamiseks ja teistelt andmekaadritelt kõrvaldamiseks. Pimevool sõltub kaadri säriajast: mida pikema on säriaeg, seda suurem on pimevoolu osakaal, mis on esimese lähenduses võrdeline säriajaga. Kui CCD-sensori on jahutatud väga madalele, on pimevoolu hulk väga väike, jäädes oluliselt alla ühele digitaliseeritud signaaliühikule (*ADU, analog-to-digital unit*) vastava signaalihulga. Antud spektrograafi CCD-kaamera on jahutatud -85°C juurde, mis on piisavalt madal töös kasutatud andmekaadrite säriaegade jaoks, et see kehtiks.

Joonisel 5 on toodud näide eelpingekaadrist. Saranaselt pimekaadri demonratsioonile on ka siin suurendus väikesest lõigust. Eelpingekaadreid tehakse nii-öelda nullise säriajaga, mille tulemusena jäädvustatakse kaadri CCD-sensori eelpingenivoo, mis esineb kõikides andmekaadrites. Täpsemalt, CCD-sensor eelpingestatakse konkreetse alalisvooluga (mida kutsutakse eelpingeks) selleks, et tagada kogutud signaali digitaliseerimisel analoog-digitaalmuunduriga (*ADC, analog-to-digital converter*) positiivsed väärtused (millest termin eelpingenivoo), et ei tekiks olukorda, kus ADM müra tekivad kõikumised annavad negatiivseid piksliväärtusi. Ideaalsel juhul on eelpingenivoo kõikide pikslite jaoks sama, tegelikkuses nii ei ole ja seetõttu eelpingekaadrite komplekt keskmistatakse.

Suurem osa antud töös kasutatud andmekaadritest on tehtud 20...30 sekundilise säriajaga, mistõttu ei ole pimemüra osakaal niivõrd suur ning sellest tulenevalt on ka pimekaadrite kasutus vajaduspõhine. Kui pimekaadrite kasutus on vajaduspõhine, siis eelpingekaadreid kasutatakse

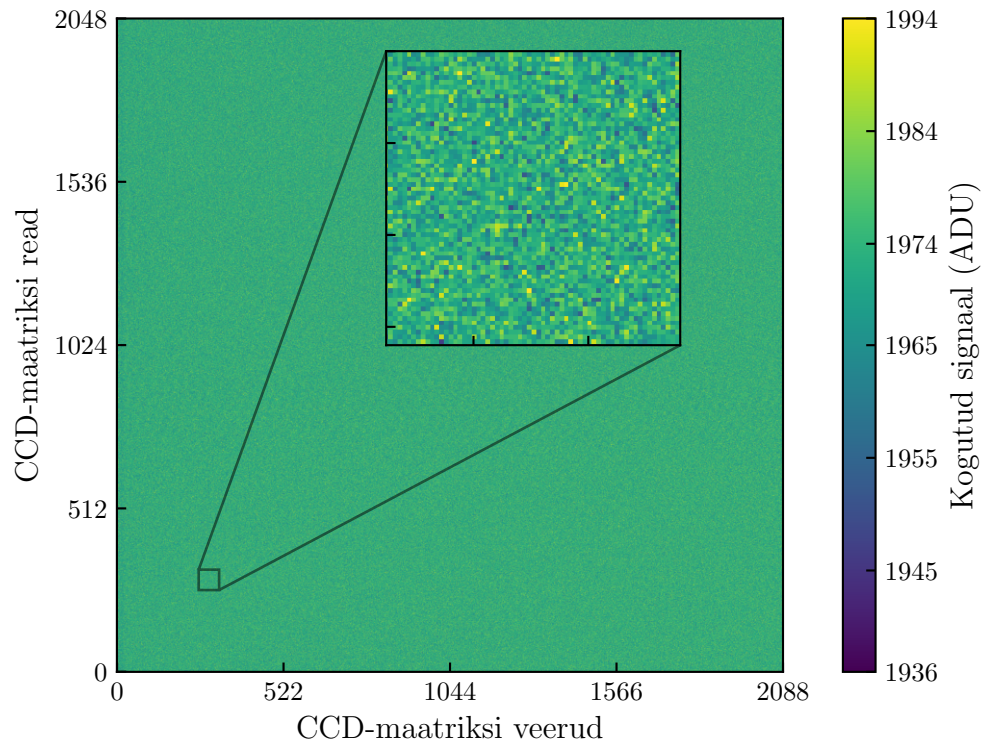


Joonis 4: Demonstratsioon ühest toorest pimekaadrist.

kõikide andmekaadrite puhul just eelnevas lõigus välja toodud põhjustel.

Tasaväljakaadreid (Joonis 6) kasutatakse CCD-sensori tundlikkuse ebahütluste ja defektide ning spektrograafi optikasüsteemis tekkivate signaali moonutuste korrigeerimiseks. Tasaväljakaadreid kasutatakse ka igapäevases ešell-spektrite töötlemises järkude tuvastamiseks. Antud spektrograafi kalibratsioonimoodulis kasutatakse tasaväljakaadrite jaoks halogeenlampi koos sinise LED-valgusallikaga, mis aitab laiendada ešell-spektri järkude ulatust sinistes lainepikkustes.

Lainepikkuste kalibratsioonikaadreid (Joonis 7) kasutatakse kogutud tähekaadritest (peamised andmekaadrid, mida kogutakse vaatlusööl; antud töö raames neid ei kogutud ega kasutatud) saadud üherealiste spektrite kalibreerimiseks CCD-sensori koordinaatmastaabist lainepikkustemastaapi. Kuigi kutsutakse kalibratsioonikaadriteks nii lainepikkuste kalibratsioonikaadreid, eelpingekaadreid kui ka pimekaadreid, siis käesoleva töö raames, kui mainitakse kalibratsioonikaadrit, viidatakse just lainepikkuste kalibratsioonikaadriks. Vastasel juhul on konkreetne kaader otse välja toodud. Tartu Observatooriumis kasutatakse kalibratsioonikaadrite tegemiseks toorium-argoon (ThAr) spektraallampi, mis on astronoomilises spektroskoopias laidselt kasutatud. ThAr spektris on väga palju spektrijooni üle kogu spektrograafi lainepikkuste töövahemiku ning nende spektrijoonete lainepikkused on väga suure täpsusega teada ($\sim 0.001 \text{ \AA}$ täpsusega).



Joonis 5: Demonstratsioon ühest töös kasutatud eelpingekaadrist.

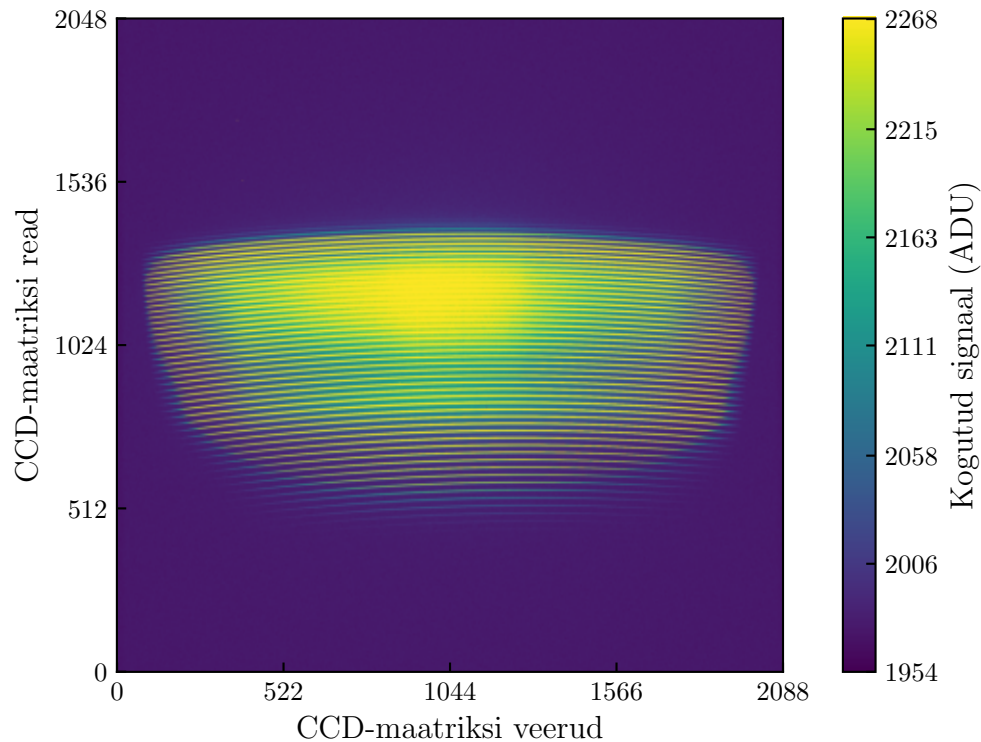
Antud töös kasutati kalibratsioonikaadreid peamiste andmekaadritena, millele on analüüs ja arendatud automaatika ehitatud.

2.2 Andmete eeltöötlus

Andmete eeltöötlus on astronoomiliste vaatluste käigus saadud andmekaadrite puhul suure tähtsusega. Rakendades erinevaid kaadreid teleskoobi optilise süsteemi ning CCD-sensori defektide, artefaktide või moonutuste eemaldamiseks või vähendamiseks, on võimalik konkreetse kaadri signaal-müra suhet suurendada ning sellest tulenevalt mõõtmistulemusi parandada. Käesoleva töö puhul on andmete eeltöötlus suuresti lihtsustatud kalibratsioonikaadrite iseloomu ja kasutuse tõttu.

Andmete eeltötluse puhul on põhijoontes järgitud [Massey \(1997\)](#), juhendit, mis on astronoomiliste andmete töötlemiseks kasutatava programmi *IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)* ([Tody, 1986](#)) jaoks. Antud töölusetapid kehtivad ka selle töö raames, sest need on väga standardsed ning eeltötluseks kasutatud *Python*'i tarkvarapaketi moodul *ccdproc*³ on üles ehi-

³<https://ccdproc.readthedocs.io/en/latest>, vaadatud 30.05.2025



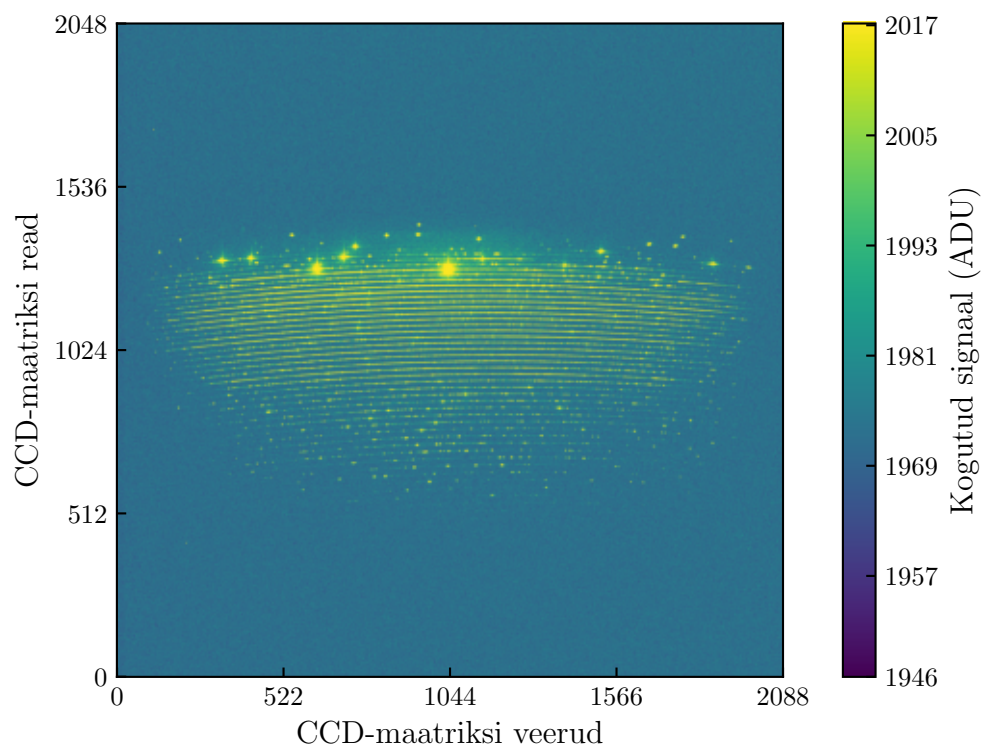
Joonis 6: Näide ühest töös kasutatud töötlemata tasaväljakaadrist. Kaadri keskkohas ligikaudu ristkülikukujulise heleda laigus juures on mägitav hajunud valguse panus.

tatud just lähtuvalt selle laialt kasutatud *IRAF*-i paketi töövoost lähtuvalt.

Kõikidelt andmekaadritelt tuleb maha lahutada virtuaalveergude (ingl. *overscan*) keskmistatud signaal ning seejärel kaadrid kärpida (ingl. *trim*). Kärpimine on andmekaadri suuruse vähendamine, eemaldades sealt ebavajalikud andmeveerud ja -read, millel ei ole meile huvipakkuvat signaali. Väga tihti on kärpeala määratletud astronoomiliste *FITS*-failide päistes *TRIMSEC* parameetriga. See aga ei tähenda, et võimalikud kärped on sellega piiritletud. Nagu on näha Jooniselt 6, siis piisavat signaali omav ala on umbes pool (vähemalt y-telje suunas) tervest CCD-sensori alast, s.t. sellest alast välja jäävad veerud ja read saaks ära kärpida. Selliselt on võimalik vähendada andmete töötlemisele kuluvat aega. Antud töö raames ei ole seda vajadust täheldatud.

Spektrograafis kasutatava CCD-sensori virtuaalveerud on määratletud parameetriga *BIASSEC* (*bias section*) ning selliseid virtuaalveergude alasid on kaks: sensori veergudel 1...20 ning 2069...2088. *TRIMSEC* parameeter omab väärtust 21...2069, mille tulemusena on eeltöötlust läbinud andmekaadrite suuruseks 2048×2048 pikslit.

Kuna rakendatavad tasavälja- ja kalibratsioonikaadrid olid tehtud võrdlemisi lühikese säriajaga,



Joonis 7: Demonstratsioon ühest töös kasutatud toorest kalibratsioonikaadrist

mis tähendab, et pimekaadrite kasutamine ei olnud vajalik, siis eeltötluse eelviimaseks etapiks on eelpingekaadri mahalahutamine. Nullkaader, mida kasutatakse eeltötluses, on mitmest nullkaadrist keskmistatud. Nullkaader lahutati maha kõikidest andmekaadritest.

Viimasena kombineeriti kaadrid, s.t. kõikide kaadrite samad pikslid (CCD-matriksi koordinaadi x ja y järgi) keskmistati. Sellist kombineerimist rakendati kõikidele kalibratsiooni- ja tasaväljakaadritele, mille tulemusena saadi veelgi parem signaal-müra suhe.

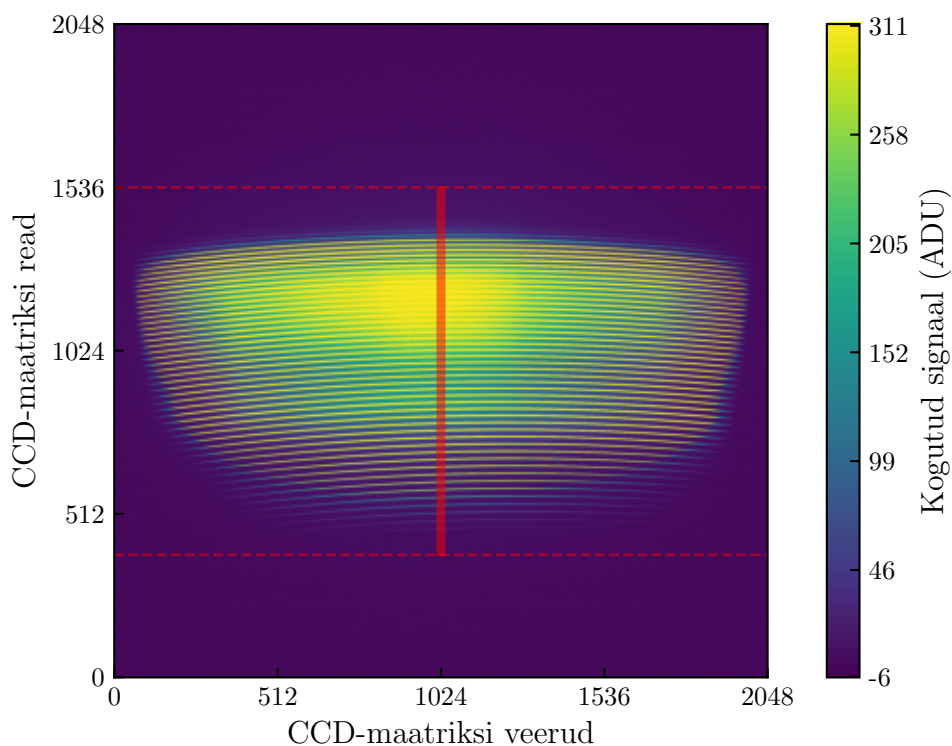
2.3 Andmete töötlus

Peale andmete eeltötlust on võimalik asuda analüüsi juurde, mille saab jagada järgnevateks etappideks: järkude tuvastamine, järkude paiknemise määramine, üherealiste spektrite eraldamine ning järkudest eraldatud üherealiste spektrite korreleerimine võimalike nihete tuvastamiseks. Uurime neid etappe lähemalt.

2.3.1 Järkude tuvastamine

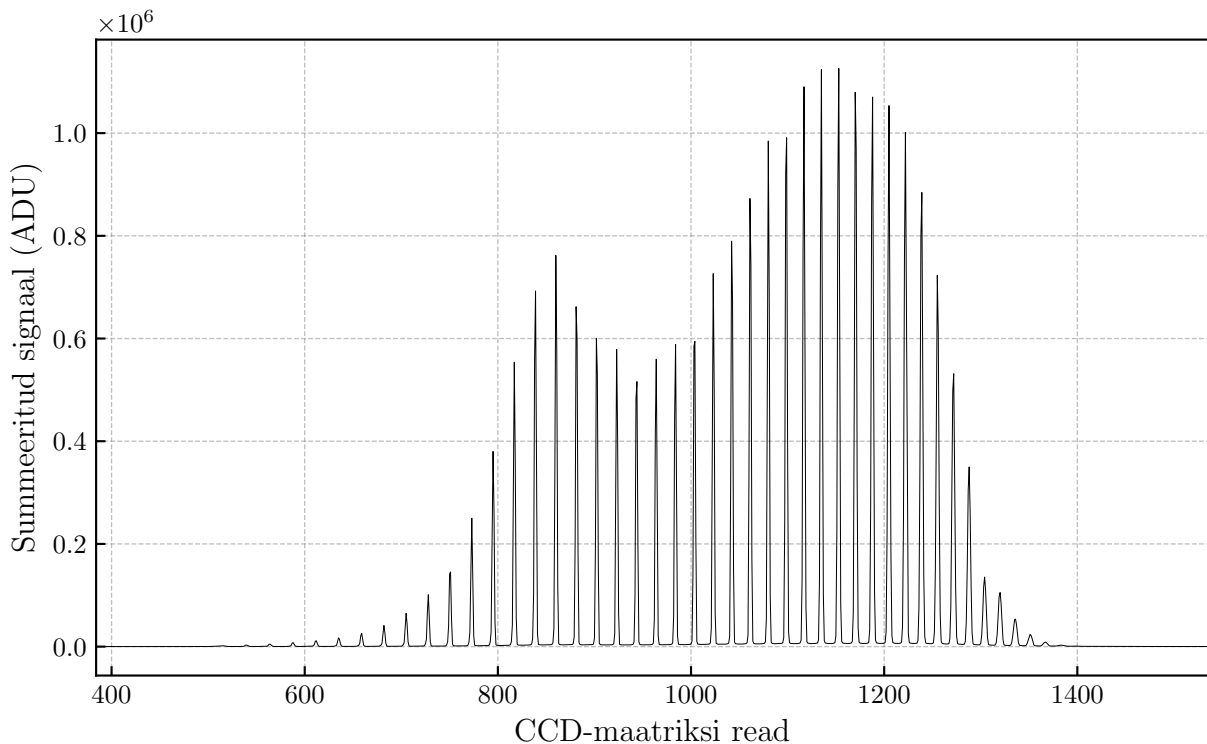
Kuigi eell-spektrograafi spektrijärgud on tuvastatavad nii tasavälja- kui ka kalibratsioonikaadritelt, on tasaväljakaadrite eeliseks tugevam signaal, suurem signaal-müra suhe ning spektrijärkudes oleva pidevspektri signaali tuvastamine on lihtsam. Tänu pidevspektrile on tasaväljakaadritelt võimalik tuvastada rohkem järke kui kalibratsioonikaadritelt. Seda seetõttu, et pidevspektri puhul on praktiliselt igas CCD-sensori veerus mõõdetav ja üldjuhul tugev signaal (ei pruugi kehtida järkude otstes). Kalibratsioonikaadritel, mille järkudes on ThAr spektraallambi kiirgusjooned, ei pruugi igal veerul esineda kõikides järkudes piisavat signaali, mistõttu jäävad mõned vahepealsed järgud tuvastamata. See-eest tasaväljakaadritelt jäävad suuresti tuvastamata vaid äärmised järgud, mille signaal ei ole piisav järkude tuvastamisalgoritmile seatud piirangute jaoks.

Tasaväljakaadri keskelt (visualiseeritud Joonisel 8) summeeriti mööda dispersioonitelge (CCD-sensori x-telg) 20 sensori veergu, mille tulemiks on Joonisel 9 nähtav profiil, mis kirjeldab järkude paiknemist CCD-sensoril. Nagu eelnevalt mainitud, siis risti-dispersioonitelge (CCD-sensori y-telg) on signaaliga ala umbes pool telje pikkust. Seetõttu on ka valitud lõik selles teljes piiritletud.



Joonis 8: Eeltöötuse läbinud tasaväljakaader koos markeeritud lõiguga.

Joonisel 9 nähtavad tipud on määratud spektrogrammi ehituse, kasutatavast difraktsioonvõre ja selle asetuse poolt, s.t. järgud ei muutu.



Joonis 9: Tasaväljakaadrist lõigu alusel eraldatud järkude profiil.

Järgnevalt tuvastati saadud järkude profiililt kõikvõimalikud tipud, kasutades *Python*'i tarkvarapaketti *scipy*⁴ ja funktsiooni *find_peaks*. Funktsiooni puhul võeti, et tippude väljapaistvus (ingl. *peak prominence*), signaali tugevus võrreldes taustasignaali tugevusega, on vähemalt kümnekordne taustasignaali mediaanväärtusest. Kuna antud spektrogrammi puhul on tasavälja- ja kalibratsioonikaadrites väljapaistev hajunud valguse piirkond, siis selline piiritletus on vajalik, sest vastasel juhul hakkab funktsioon tuvastama tippe seal, kus neid tegelikult ei ole, mis aitab tagada automaatika robustsust. Kuigi Joonisel 9 on näha ka järke risti-dispersioonitelje äärmistes alades, siis selline piiritletus välistab nende tuvastamine, sest neid järke esindav signaal ei ole piisavalt tugev.

Tuvastatud tippudele sobitati normaaljaotust

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (7)$$

kasutades samast tarkvarapaketi tulenevat funktsiooni *curve_fit*. Normaaljaotust sobitati, sest

⁴<https://scipy.org/>, vaadatud 30.05.2025

tuvastatud tipud ei pruugi olla parimad hinnangud järgu keskkohale, kuna profiili ristlõige ei pruugi olla ideaalselt Gaussi funktsiooni kujuga. Sellise olukorra vähendamiseks sobitatakse suurema lahtusega Gaussi funktsiooni, mille sobituse alusel saab ka määrata risti-dispersioonitelge vahemiku, milles järgu signaal üherealiseks spektriks summeeritakse. Vahemiku määramiseks mõõdeti profiilile sobitatud normaaljaotuse pool-laiust.

2.3.2 Järkude paiknemine sensoril

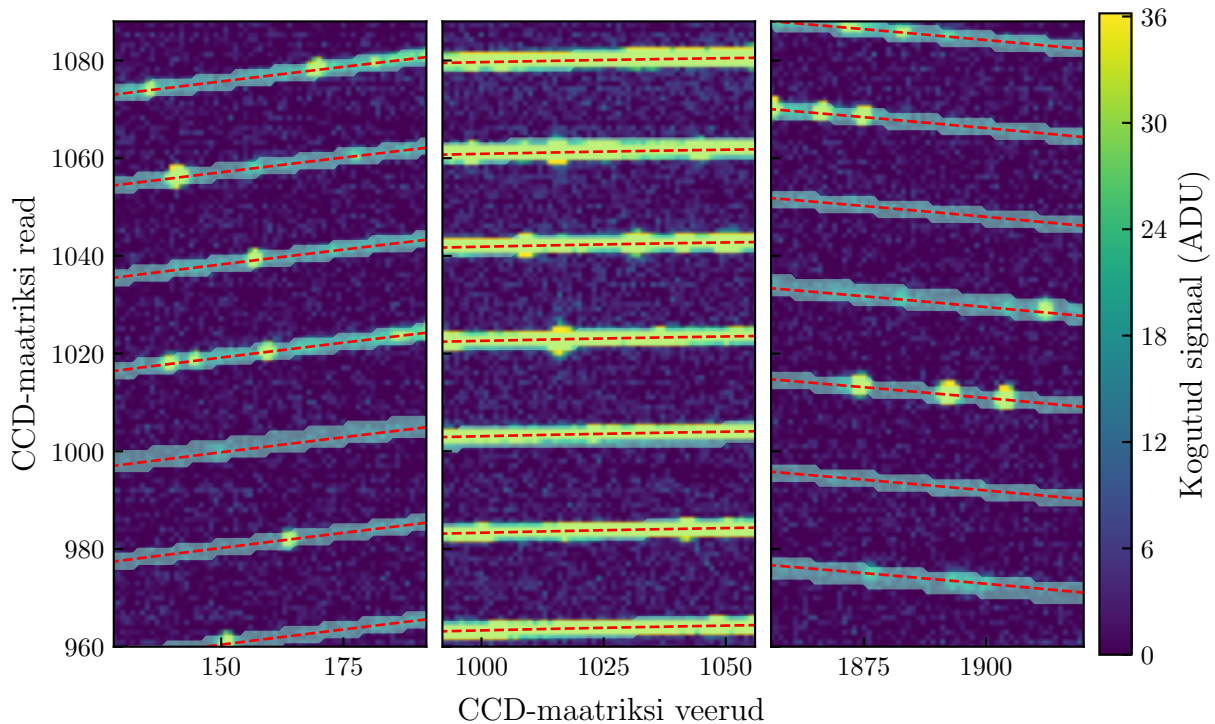
Kasutades leitud järkude asukohti, saab liikuda edasi järgmise etapi juurde, milleks on järkude kahemõõtmelise kuju ja asukoha tuvastamine. Järkudele otsitakse funktsionaalset kuju, s.t. lähendusfunktsiooni, mis kirjeldab järgu paiknemist CCD-sensoril. Joonistelt 6 ja 7 on näha, et järgud paiknevad CCD-sensoril kõveralt.

Võttes suvalise järgu keskkoha eelnevalt leitud keskkohadest. Kasutades libisevat akent, mis määratud dispersioonitelje vahemikus (esmaselt piiratud keskosasse, sest seal on järgud sirgjoonelised) võtab risti-dispersioonitelge 20 piksli laiuse järgu profiili. Profiilile normaaljaotust lähendades määrati profiili tipu asukoht risti-dispersioonitelge. See asukoht vastab järgu keskkohale valitud veerus. Sedasi liigutakse üle terve määratud vahemiku. Saadud andmekogumik kirjeldab valitud järgu keskkoha sõltuvust sensori veerust ning lähendades seda teise astme polünoomiga, saadi esmane lähendusfunktsioon.

Esmane lähendusfunktsioon on küll adekvaatne järkude keskkosas, kus kaardumine ei ole niivõrd tugev, aga järkude otstes see nii ei ole. Seepärast korratakse asukohtade leidmisprotsessi iteratiivselt suuremas dispersioonitelje vahemikus nii mitu korda, kui on algoritmile ette antud. Iga järjestikuse iteratsiooni vahel laiendatakse määramisvahemikku ning katsetuste käigus leiti, et sobivaks andmepunktide kogumise vahemikuks on 100 pikslit (vajadusel on kasutajal võimalik seda muuta). Saadud andmekogumit lähendati neljanda astme polünoomiga.

Iteratiivsest protsessist saadud neljanda astme polünoom ongi vastava järgu lähendusfunktsioon. Rakendades kirjeldatud alogritmi kõikidel tuvastatud järkudel saadakse neile vastavad lähendusfunktsioon. Just neid lähendusfunktsioone kasutatakse edasises analüüsis.

Joonisel 10 on toodud välja suurendatud väljalõiked kalibratsioonikaadrist koos järkudele vastavate lähendusfunktsioonidega (punane punktiirjoon). Funktsioonid on hea lähendusega nii järkude keskkosas kui ka ääre-alades.



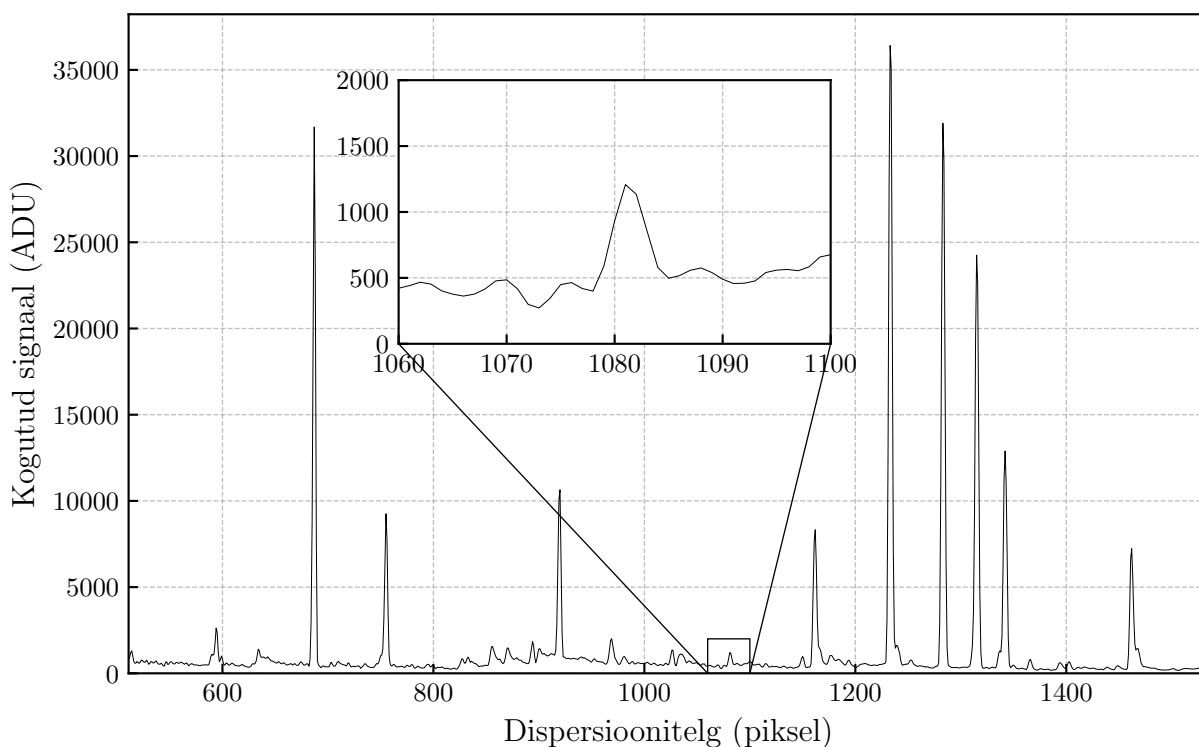
Joonis 10: Suurendused tasaväljakaadris järke kirjeldavate neljanda astme polünoomidega (punased punktiirjooned) ja summeerimisapertuuridega (helesiniselt).

2.3.3 Järkude väljavõtmine

Leitud järkude paiknemist kirjeldavate funktsioonidega eraldatakse kalibratsioonikaadrist vastavad üherealised spektrid. Seda tehti piiratud ulatuses dispersioonitelje keskosas, sest aktuaalsed spektrid asuvad järkude keskosades, kus on tugevam signaal. Eraldamiseks koostatakse summeerimisapertuur mille keskkohas asub järgu keskkohas ning laius on määratud eelnevalt välja toodud järku kirjeldava normaaljaotuse pool-laiusega. Kusjuures nende laius (risti-dispersioonitelge) ei pea olema piiratud järgu profiili pool-laiusega. Antud töös on seda tehtud automaatika robustsuse huvides. Joonisel 10 on summeerimisapertuure näha (sinised jooned).

Liites kokku summeerimisapertuuri jäävate pikslite väärtused risti-dispersioonitelge, saadakse üherealised spektrid konkreetsetest ešell-spektri järkudest. Töös tehtud analüüs põhinebki sellisel viisil saadud üherealistel järkude spektritel, millest räägitakse lähemalt järgnevas alamosas.

Joonisel 11 on ka näha demonstratsiooni ühest sellisest üherealisest spektrist. Tegemist on ešell-spektri 52. järkule vastava spektriga, mille keskele jääb ka hästi-tuntud Balmeri joonte $H\alpha$.



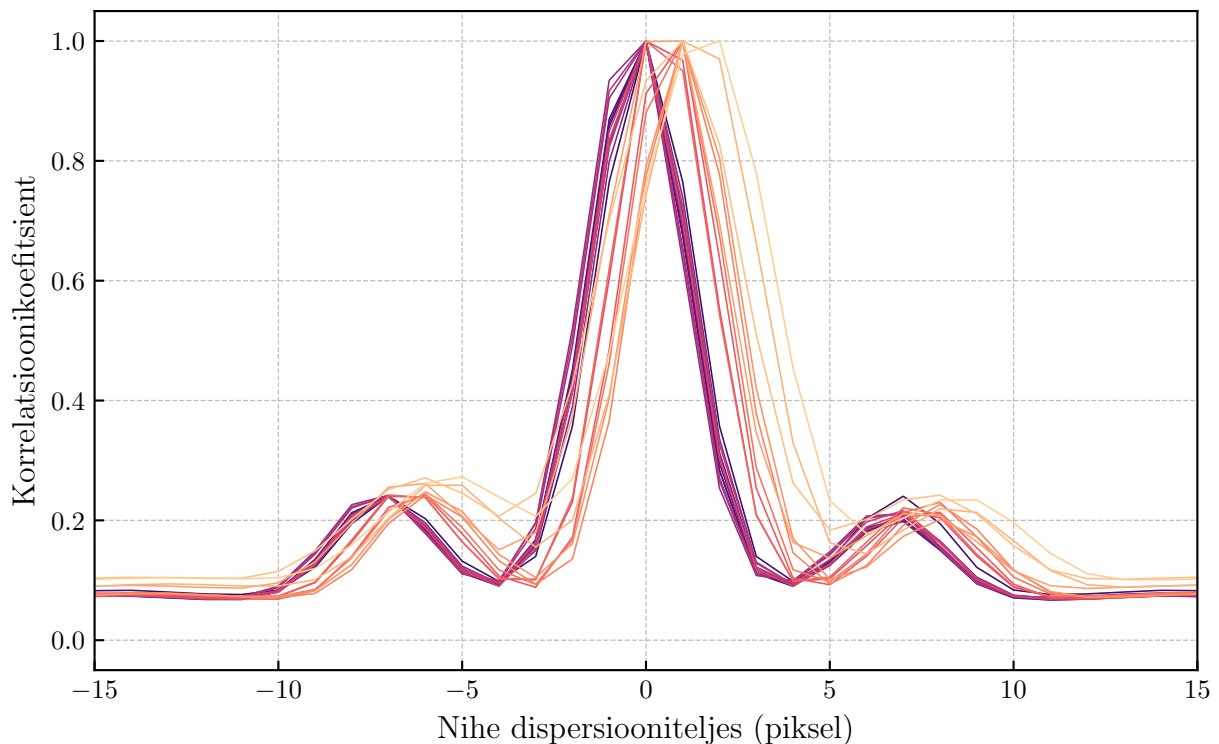
Joonis 11: Üherealine spekter ešell-spektri 52-st järgust. Suurendatud alal visualiseeritud, et madala signaaliga piirkonnas on leidub hästi defineeritud ThAr spektri jooni.

2.3.4 Korrelatsioon

Analüüsid keskkonnamõjusid fookusele või kaamera fokuseerija parima positsiooni määramisel kasutatakse tasaväljakaadritega tuvastatud ja kalibratsioonikaadritelt eraldatud ešell-spektri järkude üherealiseid spektreid. Selle analüüsi teostamiseks rakendatakse korrelatsiooni (ingl. *cross-correlation*), mis mõõdab matemaatiliselt signaalide sarnasust. Kuna ešell-spektri järkud on määratud füüsiliselt ja seetõttu ei muutu, siis on selline meetodika antud ülesande lahendamiseks sobiv ja automaatika suhtes robustne.

Korrelatsiooni olemus on kahe signaali võrdlemine, mille tulemusena saadakse korrelatsioonigraafik, mis näitab, kui sarnased antud kaks signaali on. Selliselt on võimalik tuvastada nihkeid dispersiooniteljes ja risti-dispersioonitelge ning ka spektrijoonte laienemisi fookuse nihkumisest. Korreleerides kahte spektrit saadakse graafik, mille x-teljel on spektris esinevate joonte nihked ning y-teljel korrelatsioonikoefitsient, mis iseloomustab kahe võrdlusspektri kokkulangevust. Spektrijoonte loomulik kuju, seetõttu ka korrelatsioonigraafiku keskjoon, järgib Gaussi funktsiooni. Lähendades korrelatsioonigraafikut suurema lahutusega normaaljaotusega, saadakse korrelatsioonigraafiku pool-laius, millest omakorda arvutati keskkoh. Mõõdetud pool-laiust

kasutati selles töös fookuses olevate järkude hindamiseks. Normaalkaotuse keskohta kasutati nihete analüüsimiseks nii dispersiooniteljes ja risti-dispersioonitelje.



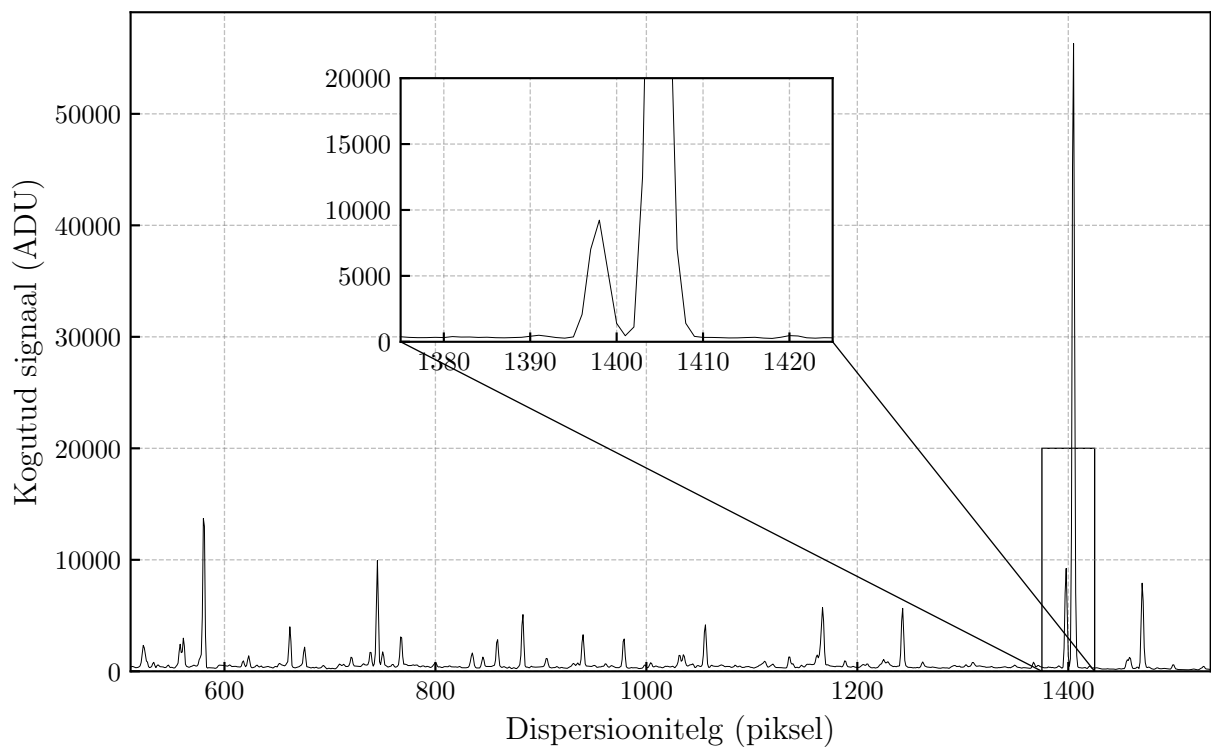
Joonis 12: Ešell-spektri 60. järgu korrelatsioonigraafikud kõigi erineva temperatuuriga tehtud mõõtmiste jaoks.

Antud meetodika välistab ka mõned silmapaistvad hädad, mis kaasnevad lihtsalt spektrijoonte mõõtmisest üherealistelt spektritelt. Nimelt ei nõua korrelatsiooni kasutamine, et mõõdetavad spektrijooned oleksid niivõrd isoleeritud (võrreldes otseselt spektrijoontele normaalkaotuse sobitamisega). Sealhulgas ei ole vajalike võrdlusspektritelt mitmete tippude tuvastamine, sest korrelatsiooni tulemusena saadakse graafik, kus keskmine joon kirjeldab kõige tugevama signaaliga spektrijoone korreleeritust.

Joonisel 12 on toodud välja temperatuurimõjude analüüsist üks korrelatsioonigraafik. Graafik näitab kõikide 60. järkude üherealiste spektrite korreleeritust ühe konkreetse (kasutaja poolt täpsustatav) suhtes. Korrelatsiooni teostamiseks kasutati *Python*'i tarkvarapaketi *scipy* funktsiooni *correlate*. Normaalkaotuse lähendamiseks kasutati sama tarkvarapaketi funktsiooni *curve_fit*. Normaalkaotuse variatsioon σ^2 on seotud pool-laiusega:

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2 \cdot \sigma^2}. \quad (8)$$

Muidugi ei ole meetodika vigadeta. Kui võrdlusspektri kõige tugevama signaaliga spektrijoon vahetus ümbruses asub mõni teine tugeva signaaliga spektrijoon, siis on seda ka näha korrelatsioonigraafikutes. Joonisel 12 on sellist olukorda näha. Keskjoone kõrval on sekundaarsed tipud, mis segavad normaaljaotuse sobitamist, sest normaaljaotuse parima lähenduse jaoks sobitatakse seda koos taustafunktsiooniga. Joonisel toodud korrelatsioonigraafik vastab 60. järgele, Joonisel 13 on näha selle järgu võrdlusspektrit koos suurendatud alaga. Suurendatud ala rõhutab seda, et kõige tugevama signaaliga spektrijoon kõrval on madalama kuid võrreldava signaaliga spektrijoon. Joonte keskkohad on üksteisest ~ 8 piksli kaugusel ning ka korrelatsioonigraafikust on näha, et sekundaarne tipp tekib just sellisel kaugusel. See tähendab, et mõndade järkude puhul on mõõdetud pool-laiused suurema hajuvusega ning süstemaatiliselt probleemsed.



Joonis 13: Ešell-spektri 60. järgu võrdlusspekter. Suurendatud alal on näha suurema signaaliga sekundaarset spektrijoont.

2.3.5 Automaatne andmetöötlus

Kõik antud osas välja toodu on üles ehitatud selliselt, et töö käigus arendatav programm saaks sellega hakkama võimalikult vähese välise sekkumisega. Kui väline sekkumine on vajalik, siis programmi kasutaja saab praktiliselt kõikide koostatud *Python*'i funktsioonide parameetreid

muuta. Funktsioonide parameetrid on häälestatud antud töö alusel ning annavad adekvaatseid tulemusi. Programmi tööks koostatud funktsioonid jagunevad töö alamosade järgi.

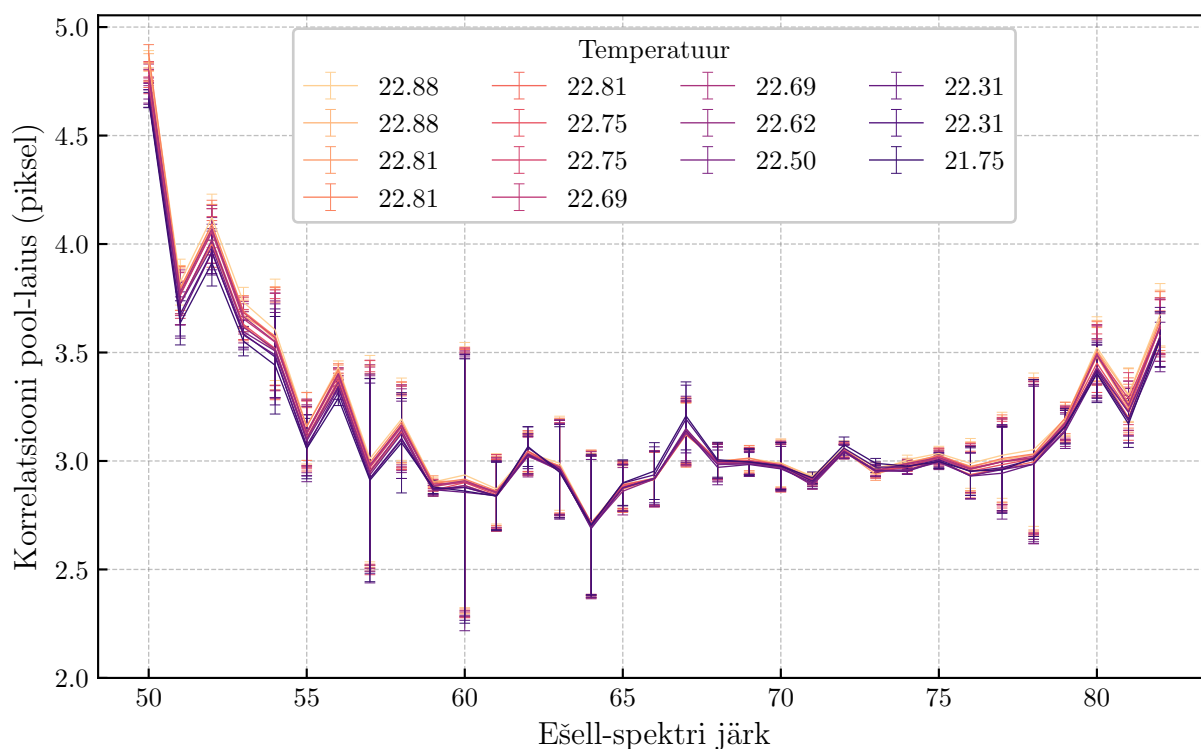
Suure tõenäosusega esineb andmekomplektides selliseid andmeid, mille puhul ei ole võimalik mõne järgu asukohta optimaalselt määrata. See on tõenäolisem just madalamate ja kõrgemate järkude juures ning sellisel juhul jäetakse need automaatselt analüüsist välja.

Samuti esinevad mõndade järkude korrelatsioonigraafikutes süstemaatilised (tegemist on võrdlusspektri spektrijoonte lähedase paiknemisega) sekundaarsed jooned, mille tõttu ei saa normaaljaotust ja taustafunktsiooni adekvaatselt sobitada. Selliste andmepunktide välja jätmine on tinglik ning sõltub sellest, kas programm suudab normaaljaotust ja taustafunktsiooni andmetele lähendada. Neid järke iseloomustab pool-laiuste väärtuste kõrvalekalduvus oodatavast ja suur määramatus.

3 Tulemustest

3.1 Keskkonnatingimuste mõju fookusele

Käesoleva töö üks eesmärkidest on uurida, kuidas mõjutavad keskkonnatingimused spektrograafi kaamera fokaaltasandit, s.t. kuidas muutuvad fookuses olnud järgud. Selle analüüsimiseks koguti spektrograafiga andmeid 2024. augustikuu lõpust 2024. detsembrikuu lõpuni. Andmete kogumise perioodil oli spektrograaf muutumatus seisundis, s.t. et kudee kambrisse ei sisenatud, spektrograafi ei katsutud ning kaamera fokuseerija asendit ei muudetud. Seega antud andmetega on võimalik kirjeldada välismõjudest tingitud muutusi andmetes.

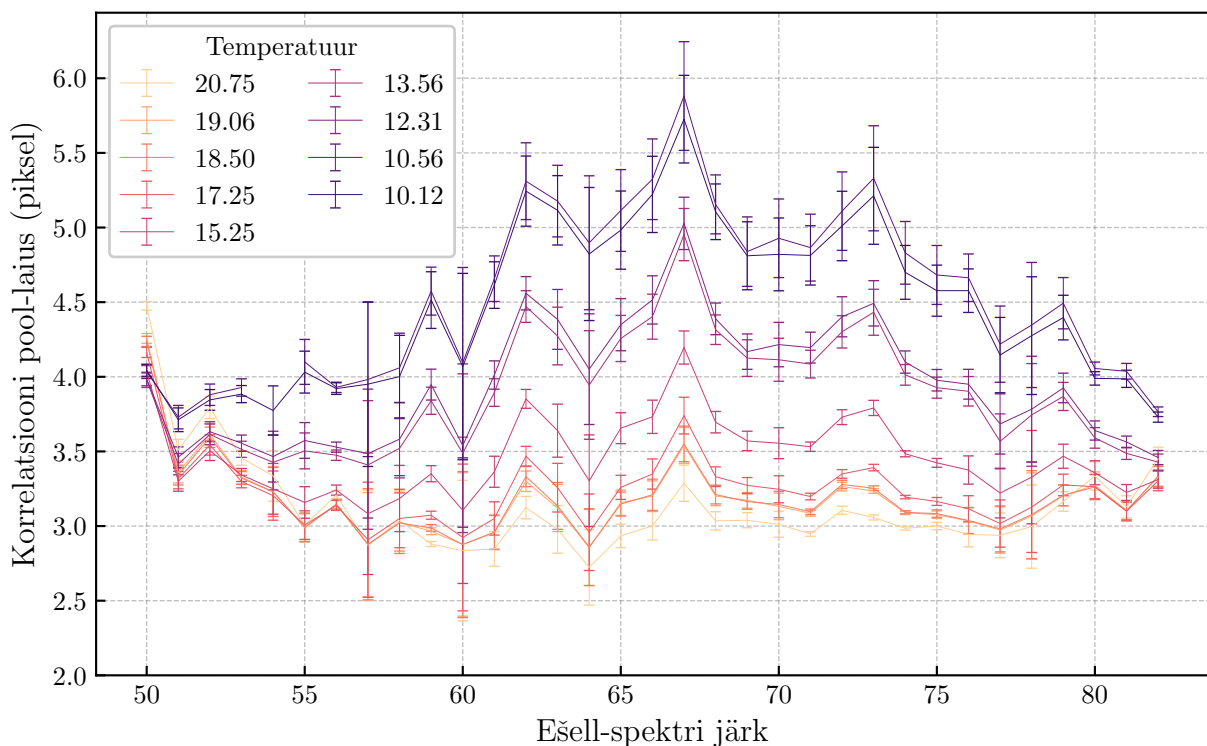


Joonis 14: Sarnaste temperatuuride, 1 °C vahemikus, jaoks korrelatsioonist mõõdetud pool-laiused erinevatel järkudel. Legendis toodud vastavad optikalaua temperatuurid Celsiuse kraadides.

Analüüsis kasutatud andmekomplektid on valitud sedasi, et olema oleks eelpingekaadrid, tasaväljakaadrid ja kalibratsioonikaadrid. Esines ka olukord, kus tasaväljakaadrite tegemisel kasutatav halogeenlamp lakkas töötamast. Kuna kalibratsioonimoodulis kasutatakse sellega koos ka LED-valgusallikat, siis suurem osa eshell-spektre järke on ikkagi tuvastatavad, lihtsalt pu-

nastes lainepikkustes on järgud madalama signaaliga ja mõned neist ei ole enam tuvastatavad. Analüüsi käigus on jooksvalt kontrollitud ka automaatika poolt saadud tulemusi, et veenduda nende korrektsuses.

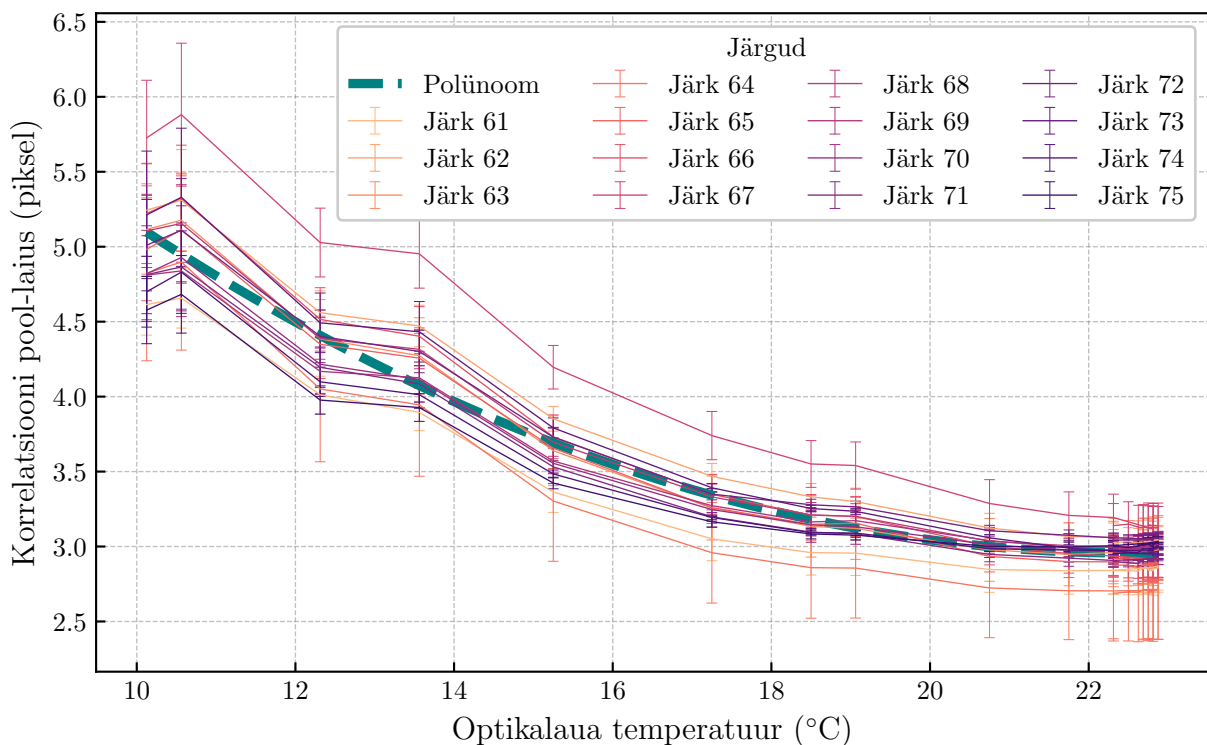
Joonisel 14 on näha korrelatsioonist mõõdetud pool-laiuste sõltuvust ešell-spektri järkudest erinevate optikalaua temperatuuridel. Need andmekomplektid jäävad temperatuurivahemikku 21.75 . . . 22.88 °C. Temperatuuride erinevate andmekomplektide jaoks on vägagi sarnased. Jooniselt on näha, et algselt oli spektrograaf kõige paremini fookuseeritud järkude 60 . . . 75 jaoks, suuresti saab öelda, et antud vahemik on platoo, kuigi seal on silmapaistvalt hälbivaid punkte. Nende hälbivate punktide olemusest sai räägitud andmetötluse osa alamosades [2.3.5 Automaatne andmetöötlus](#) ja [2.3.4 Korrelatsioon](#). Sealhulgas on näha, et selles vahemikus on mõõdetud pool-laiused praktiliselt muutumatud, millest saab järeldada, et fookuses ümbruses olevad järgud jäävad ka fookusesse väiksemate temperatuurimuutuste puhul 1 °C vahemikus. Fookusest kaugemal asuvates järkudes on täheldada pool-laiuste kahanemist, sellest saab järeldada, et need järgud liiguvad fookusele lähemale.



Joonis 15: Suure temperatuurimuutuse mõju ešell-spektri järkude korrelatsioonist mõõdetud pool-laiustele. Graafiku legendis olevad arvud vastavad optikalaua temperatuuridele Celsiuse kraadides.

Joonisel 15 on toodud andmekomplektide teine pool, kus on näha suuremaid temperatuurimuutusi. Temperatuurid jäävad vahemikku 10.12...20.75 °C ning on näha väga tugevat pool-laiuste muutust kõikides järkudes. Varem hästi fookused olnud järkud on madalaima temperatuuri puhul täielikult fookusest välja nihkunud ning äärmised järkud on just paremini fookuses. Ka siin on näha, et väiksemate temperatuurimuutustega, näiteks 18.50...19.06 °C ja 12.31...13.56 °C, andmekomplektide puhul ei muutu pool-laiused niivõrd palju. Üleüldiselt on graafikult täheldada ka fookusest väljas olnud järkude puhul suurt hajuvust, mis on loomulik.

Samuti on Jooniselt 15 näha, et kuigi varasemalt fookusest väljas olnud järkude pool-laiused vähenevad mingil määral, siis temperatuuri edasise langemisega liiguvad ka need järkud jälle fookusest välja. Temperatuurivahemiku lõpuks ei saa ühegi järku kohta öelda, et need oleks adekvaatselt fookuses, vaid et on järke, mis on mõnevõrra paremini fookuses kui teised. Seetõttu on tähtis, et spektrograafi puhul kliimakontrolli puudumisel tehakse aegsasti kaamera fokuseeri- ja optimaalse positsiooni määramine, et kindlustada spektrograafiga kogutud andmete kvaliteet.



Joonis 16: Hästi fookuses olnud järkude korrelatsioonist mõõdetud pool-laiuste sõltuvus optikalaua temperatuurist.

Joonisel 16 on näha Jooniselt 14 kõige paremini fookuses olnud järke. Graafik näitab nende järkude korrelatsioonidest mõõdetud pool-laiuste sõltuvust optikalaua temperatuurist. On näha, et valitud järjed käituvad temperatuuri muutumisel sarnaselt ning see sõltuvus on mitte-lineaarne. Sealhulgas on ka näha, et erinevate järkude puhul on see sõltuvus erinev, s.t. erinevate järkude puhul muutub pool-laius natukene erinevalt, kuid suuresti on muutused määramatuste poolest kooskõlas. Antud juhul on sobitatud teise astme polünoom selle sõltuvuse kirjeldamiseks. Sobitatud polünoomist saame, et väikeste temperatuurimuutuste ($22 \dots 23 \text{ }^\circ\text{C}$) juures suureneb pool-laius $\Delta\text{FWHM} = 0.0002 \pm 0.9798$ pikslit ($k = 1$).

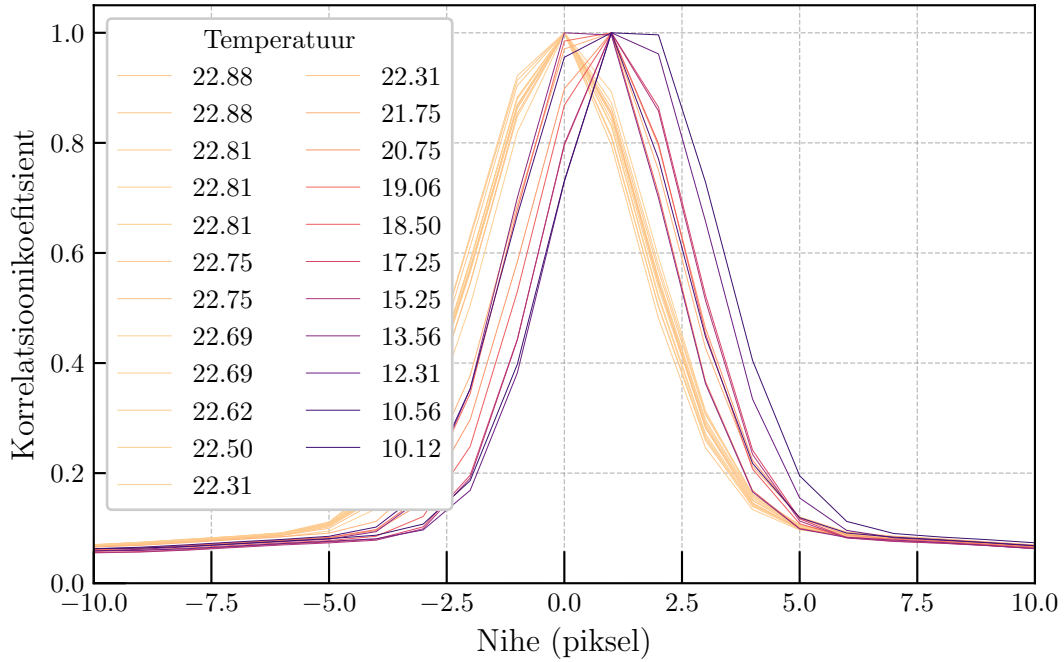
Antud nihe on kooskõlas Joonisel 14 nähtavaga, aga kuna vahemikku jäävad andmepunktid, mis on hälbinud ja ka suure hajuvusega, siis määramatuse koha pealt ei ole antud tulemus usaldusväärne. Seega on sobitatud polünoom hea kvalitatiivne kinnitus sellele, et järkude pool-laiused väikeste temperatuurimuutuste puhul on praktiliselt muutumatud. Näiteks temperatuuri viie kraadise muutuse jaoks annab polünoom, et pool-laiused suurenevad $\Delta\text{FWHM} = 0.28 \pm 0.89$ pikslit ($k = 1$), mis jällegi on graafikult nähtavaga heas kooskõlas, kuid ei ole usaldusväärne määramatuse poolest.

3.2 Keskkonnatingimuste mõju järkude paiknemisele sensoril

Andmeanalüüsi osas sai räägitud sellest, et korrelatsiooni abil on võimalik tuvastada nihkeid dispersiooniteljes ja risti-dispersioonitelge, s.t. spektrijoonte ja järkude asukohtade nihkeid. Antud osas vaatleme just neid tulemusi.

Dispersioonitelje suunaliste nihete määramine on ilmne, juba varasemastest tulemustest on neid nihkeid näha (näiteks Joonis 12). Selliste nihete määramiseks piisab samade järkude korreleerimisest erinevatel optikalaua temperatuuridel kogutud andmete vahel. Selle osa raames on korreleerimine piiratud ühe järgu jaoks, milleks on 52. järk. Andmekomplekt, mille vastu korreleeriti, oli esimene kõikidest kogutud andmekomplektidest (kogutud 28.08.2024). Saadud korrelatsioonigraafik on nähtav Joonisel 17. Joonisel on täheldada korrelatsioonide nihkeid dispersiooniteljes, väikeste temperatuurimuutuste puhul küll väikesed, kuid kui arvestada, et nihkeid hinnatakse radiaalkiirusest (kms^{-1}), siis on need vägagi arvestatavad (Jooniselt 19, 1 pikslisele nihkele vastab radiaalkiiruste nihe 4.387 kms^{-1}).

Risti-dispersioonitelge korreleerimine erineb selle poolest, et korreleerimiseks kasutatakse andmeanalüüsis välja toodud ešell-spektri järkude profiile (Joonis 9) kõikidest andmekomplekti-



Joonis 17: Ešell-spektri 52. järgu võrdlusspektri korrelatsioonigraafikud kõigi erineva temperatuuriga tehtud mõõtmiste jaoks. Legendis vastavad temperatuurid Celsiuse kraadides.

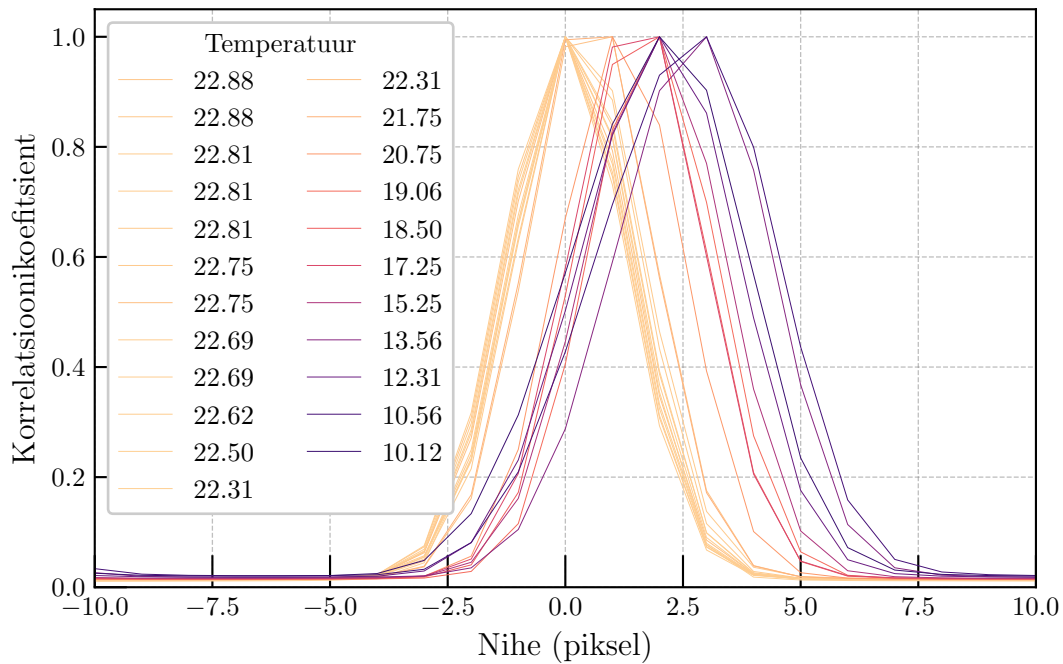
dest. Joonisel 18 on näha korrelatsioonigraafikut järkude paiknemisest risti-dispersioonitelge.

On näha, et võrreldes nihete ulatusega pikki dispersioonitelge on nihete ulatus risti-dispersioonitelge suurem. Sarnaselt eelneva joonisega on ka siin näha nihkeid nii sarnaste kui ka suurte temperatuurimuutuste puhul.

Viies nihete mõõtmistulemused kokku, saame Joonisel 19 kujutatud graafiku, kus x-teljel on nihked dispersiooniteljes ning y-teljel nihked risti-dispersioonitelge. Samuti on ka x-telje jaoks toodud välja sekundaarne telg, millel on näha nihkeid radiaalkiiruste mastaabis. Pikslite nihete teisendamine radiaalkiirustesse tehti 2024. aasta juunis tehtud proovimõõtmiste käigus määratud dispersioonikõvera abil (Eenmäe, 2024). Võttes 52. järgule vastava keskmise lainepikkuse muutuse pikki dispersioonitelge oli võimalik nihked pikslites teisendada radiaalkiirustesse, kasutades seost

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}c, \quad (9)$$

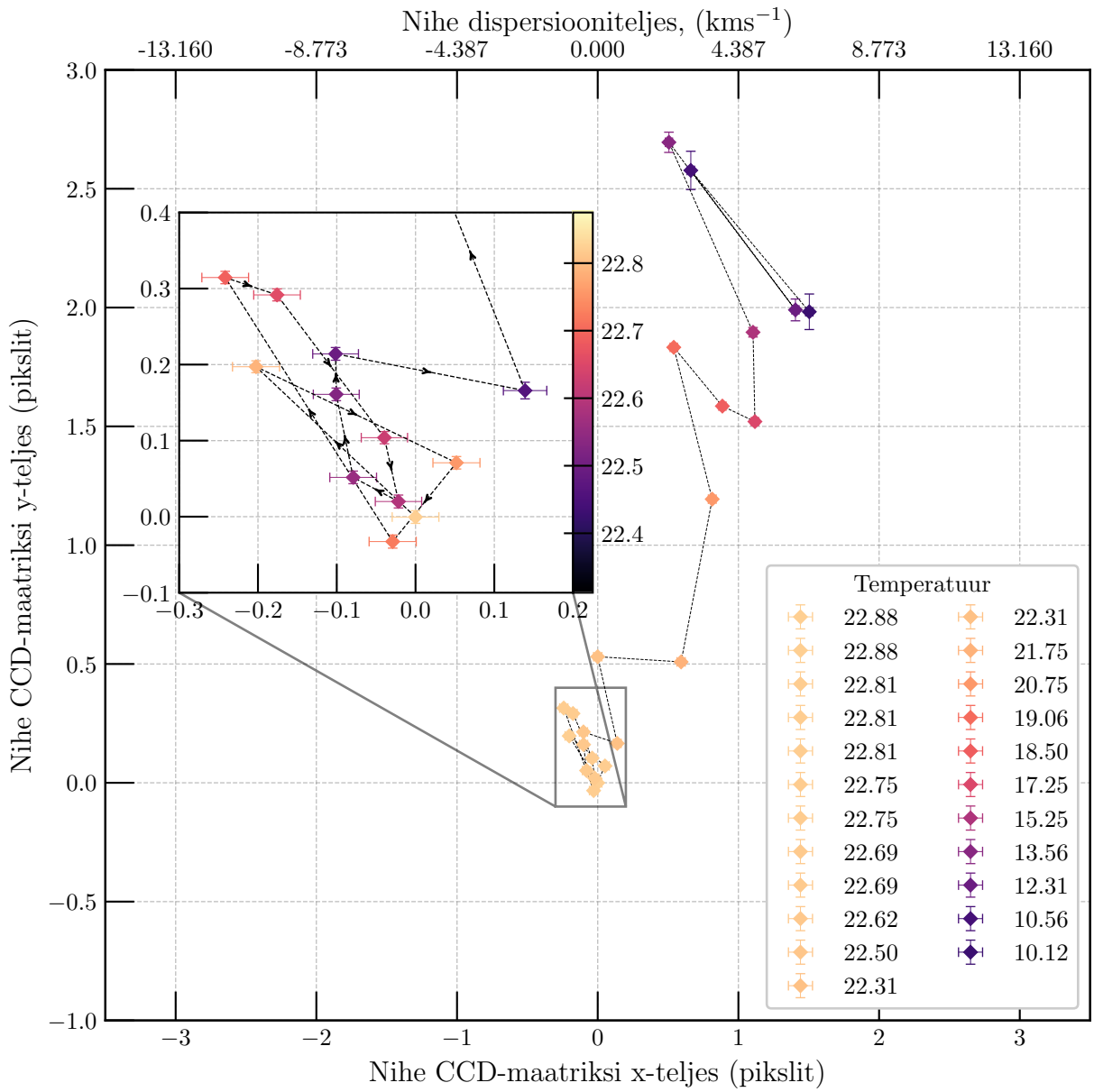
kus $\Delta\lambda$ saadakse esmasel teisendusel pikslitest lainepikkuste mastaapi. λ vastab siin Balmer-alfa joonele lainepikkusel $\lambda = 6562.79(3) \text{ \AA}$ (Mitchell, 1947, viidatud Kramida (2010) kaudu).



Joonis 18: Ešell-spektri järkude profiili korrelatsioonigraafikud kõigi erinevate temperatuuriga tehtud mõõtmiste jaoks. Legendis on antud temperatuurid Celsiuse kraadides.

Saab öelda, et nihked mõlemas teljes järgivad sirgjoonelist trendi. Joonisel on ka näha mõningaid tavapärasest trendist hälbinud punkte. Kuigi joonisel ei ole õhurõhku välja toodud. Kui temperatuur muutub suuresti ühes suunas, siis on õhurõhu muutus pigem kaootiline ning suuresti seotud välise õhurõhuga (nähtav Joonisel 3). Vaatleme asjaolu täpsemalt. Joonistel, mis kirjeldavad nihkeid dispersioonitelje suunas ja risti-dispersioonitelge on näha, et otsest erinevust nihetes sarnaste temperatuuride puhul ei ole. Sobitades sinna aga suurema lahutusega normaaljaotust, mille alusel tippude asukohad arvutatakse, saadi täpsemad tippude asukohad. Näiteks, dispersioonitelje suunas vastab temperatuurimuutusele $12.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja õhurõhkude erinevusele 36.8 hPa nihe $\Delta x = 0.66(1)$ pikslit. Temperatuurimuutusele $12.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja õhurõhkude erinevusele 5.6 hPa , aga nihe $\Delta x = 1.50(1)$ pikslit. Siit on juba näha, et õhurõhu erinevus mängib suurt rolli nihetes. Sarnaselt risti-dispersioonitelge, temperatuurimuutusele $12.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja õhurõhkude erinevusele 36.8 hPa vastab nihe $\Delta y = 2.58(3)$ pikslit ning temperatuurimuutusele $12.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja õhurõhkude erinevusele 5.6 hPa nihe $\Delta y = 1.98(3)$ pikslit. On ka näha, et dispersiooniteljes loob madalam õhurõhk paremad tingimused, vähendades nihet, risti-dispersioonitelge on aga vastupidine efekt.

Pöördudes tagasi Joonise 19 juurde, on näha, et järjestikuste andmepunktide vahel on must nool, mis rõhutab seda, et nihked hälbibid kohati tavapärasest trendist. Suurendatud alal on näha,



Joonis 19: Nihked CCD-sensori x- ja y-teljes, sekundaarsel x-teljel dispersioonitelje nihked radiaalkiirustes, paremal tabelis vastavad temperatuurid ($^{\circ}\text{C}$)

et temperatuurid langevad $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ vahemikku, ($22.31 \dots 22.88\text{ }^{\circ}\text{C}$), õhurõhu väärtused langevad seal aga suuremasse vahemikku ($1015.3 \dots 1032.5\text{ hPa}$). Sealhulgas, madalamate temperatuuride juures ($10.12 \dots 13.56\text{ }^{\circ}\text{C}$) on kaks punkti silmapaistvalt hälbinud. Nende andmepunktide õhurõhud on tavalisest ($1020 \dots 1030\text{ hPa}$) kõvasti hälbinud. Näiteks, temperatuuril $13.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ on õhurõhu väärtuseks 985.4 hPa , kusjuures antud andmekomplekt on kogutud 2024. aasta 21. novembril kella 12 paiku, sellel päeval ulatus Eesti kohale aktiivne madalrõhuala ⁵. Sarnaselt, andmepunkt temperatuuril $10.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ omab õhurõhu väärtust 995.7 hPa , mis oli mõõdetud 14. detsember 2024. aastal kella 21 paiku, kus Eesti keskmine õhurõhk oli taas normaalrõhust oluliselt madalam ⁶.

3.3 Kaamera fokuseerimise katse

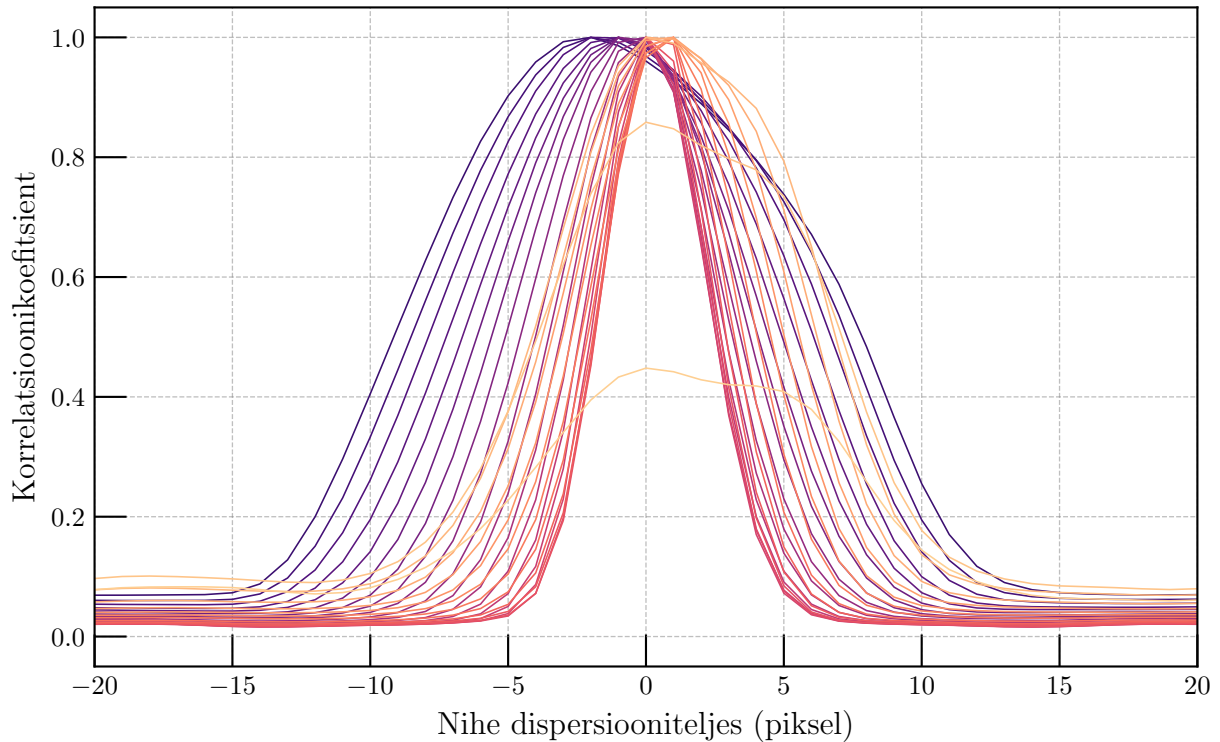
Töö peamine eesmärk oli läbi spektrograafi stabiilsuse analüüsi koostada automaatika, millega oleks võimalik määrata spektrograafi kaamera fokuseerija optimaalne positsioon hetkelisele optikalaua temperatuurile ja selle laiendusena kudee kambri keskkonnatingimustele. Selleks rakendati andmeanalüüsis kirjeldatud põhimeetodeid ning ka laiendavat meetodit optimaalse positsiooni määramiseks. Fokuseerimise katse eesmärk on näidata, et automaatikaga on võimalik määrata fokuseerija positsiooni.

Fokuseerimise katse teostamiseks ajatakse kaamera fokaaltasand sihipäraselt oma tavalisest positsioonist välja. Fokuseerija on võimeline nihutama CCD-sensorit fokaaltasandi suhtes $0.04\text{ }\mu\text{m}$ sammuga, seetõttu on ka tulevastel graafikutel näha arvuliselt suuri positsiooniväärtusi. Katse jaoks liigutati fokuseerijat sammuga 2000 ühikut vahemikus $134000 \dots 190000$ ühikut. Igal positsioonil koguti kalibratsioonikaadrite ja tasaväljakaadrite komplekt. Nagu ka varasemalt on tööst läbi käinud, siis ka antud andmekomplektide kogumisel puudus ühest hetkest halogeenlambi panus tasaväljakaadritesse. Halogeenlambi tööefektiivsus on hetkel kaheldav, sest peale pikemat mõõtmisessiooni on suur tõenäosus, et see lakkab töötamast. Sellest tingituna kasutati eraldiseisvate tasaväljakaadrite komplektide asemel ainult ühte, mis valiti võimalikult fokuseerija positsioonivahemiku keskelt. Andmekomplektide kogumise lõpuks oli optikalaua temperatuurimuutus $\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mis jääb eelnevalt välja toodud sarnaste temperatuuride ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$)

⁵<https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed>, 21.11.2024 12:00, vaadatud 25.05.2025

⁶<https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed>, 24.12.2024 21:00, vaadatud 25.05.2025

vahemikku. Samuti muutus kudee kambri õhurõhk andmete kogumise vältel ~ 2 hPa. Eelnevate järelduste kohaselt saab öelda, et andmete kogumise vältel olid temperatuurimõjude kaamera fookusele väikesed.

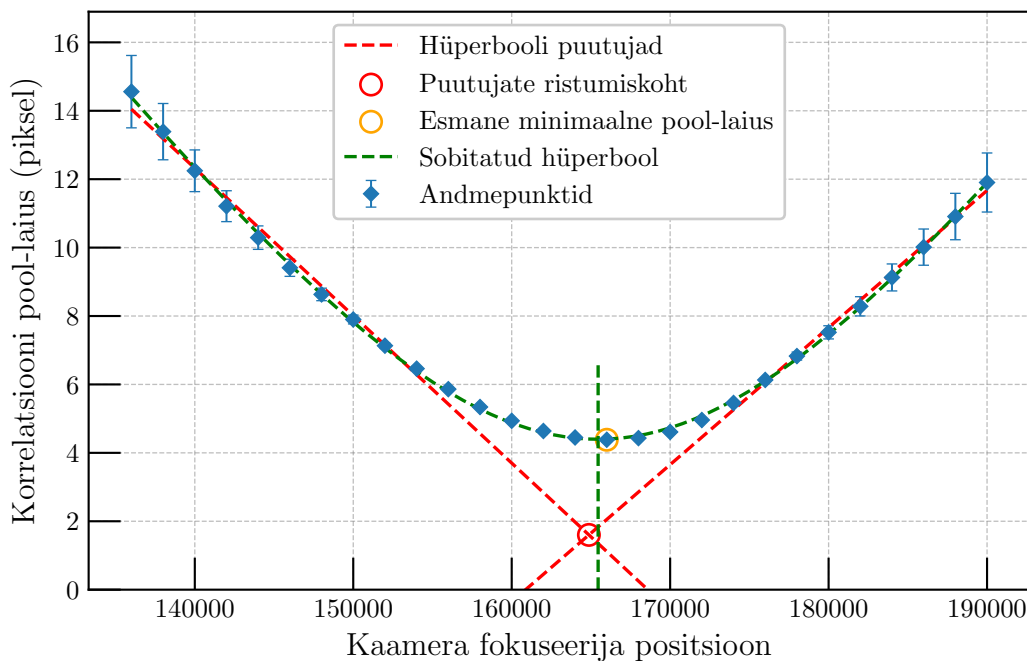


Joonis 20: Fokuseerimise katsest kogutud andmete põhjal koostatud 50. järgu korrelatsioon. Värviskaala tähistab andmete optikalaua temperatuuri andmete kogumise vältel. Külmemad toonid viitavad madalamale ja soojemad suurematele temperatuuridele.

Kõik andmekomplektid läbisid eeltötluse osas kirjeldatud protsessi. Töödeldud tasaväljakaadri ja kalibratsioonikaadrite abil eraldati ešell-spektri järkude üherealised spektrid vastavalt andmetötluse osas kirjeldatud etappidele. Tulemuseks on 29 üherealiste spektrite andmekomplekti erinevatel fokuseerijate positsioonidel. Järgnevalt korreleeriti järke, Joonisel 20 on näha ühte sellist järku. Tegemist on ešell-spektri 50. järguga ning graafik on valitud eesmärgiga demonstreerida korrelatsiooni võimalikult laialdaselt. Joonisel on näha, et suuresti on korrelatsiooni tulemused head. Puuduvad sekundaarsed tipud, mis võivad normaaljaotuse sobitust segada. On ka näha jaotusi, mida ei saa enam kuidagi normaaljaotusega kirjeldada ning need on suuresti sellistest andmekomplektidest, mis on väga fookusest väljas.

Korrelatsioonigraafikutele sobitatud normaaljaotuse alusel leitud pool-laiused viidi vastavusse fokuseerija positsiooniga, mis on kujutatud Joonisel 21 sinistest andmepunktidest koosne-

va kõveraga. Järgnevalt liigume edasi fookuseerimise katsele omapärase analüüsi juurde. Kuigi kõver on märgatavalt parabooli kujuga, on tegelikkuses pool-laiuste sõltuvus fookuseerija positsioonist määratud hüperboolse funktsiooniga. Nagu on näha joonisel toodud hüperbooli puutujatest, muutub optimaalsest fookusest kaugemale liikudes pool-laiuste sõltuvus positsioonist lineaarseks, omades ainult fookusele lähedal sellist paraboolset kuju. Seetõttu lähendatakse ka antud andmepunkte just hüperboolse funktsiooniga, mille miinimum vastabki optimaalsele fookuseerija positsioonile.



Joonis 21: Fokuseerimise katsest saadud andmetest koostatud kõver, mis kirjeldab 50. järgu fookuseeritust erinevatel fookuseerija positsioonidel.

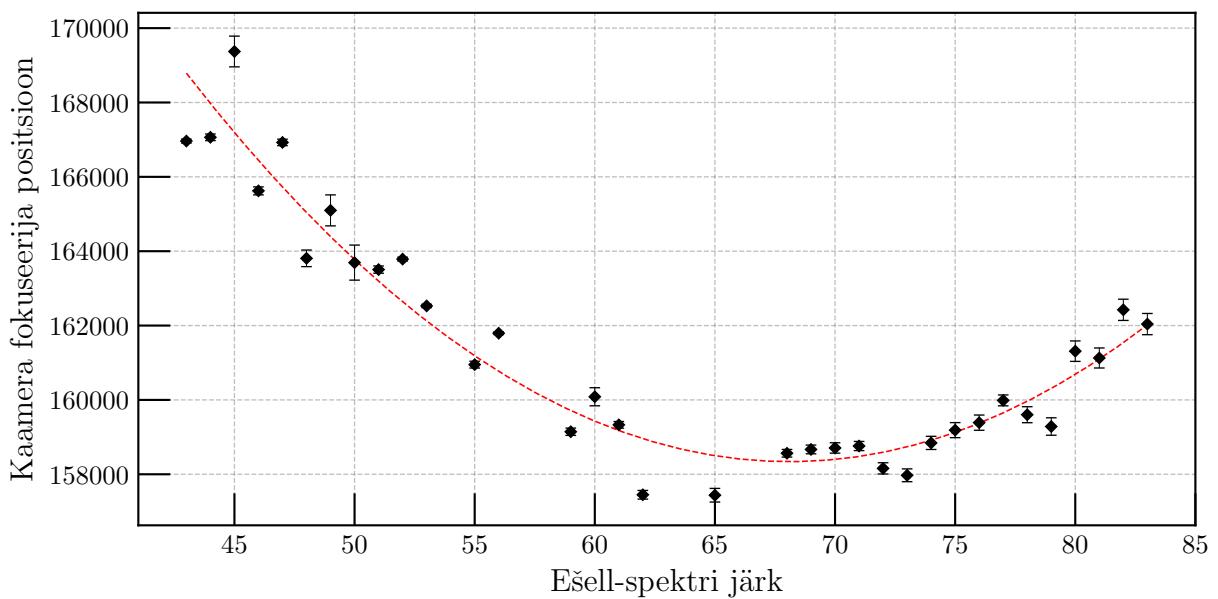
Kasutatav hüperboolne funktsioon omab kuju

$$H(x, a, b, c, d) = b \cdot \sqrt{1 + \frac{(x - c)^2}{a^2}} + d, \quad (10)$$

kus x on fookuseerija mingi positsioon ning parameetrid a ja b kirjeldavad hüperbooli „avanemisnurka”, c kirjeldab hüperbooli keskkoha ja d kirjeldab hüperbooli keskkohale vastava pool-laiuse erinevust puutujate ristumiskohaga määratud pool-laiusest. Kirjeldatud funktsiooni parameetrite minimeerimiseks kasutati Levenberg-Marquardt algoritmi, mida kasutatakse mitte-lineaarsete vähimruutude minimeerimisprobleemide lahendamiseks. Eesmärk on minimeerida Jakobiaan kujuga (Carsten, 2018)

$$J = \left(\frac{\partial H}{\partial a}, \frac{\partial H}{\partial b}, \frac{\partial H}{\partial c}, \frac{\partial H}{\partial d} \right). \quad (11)$$

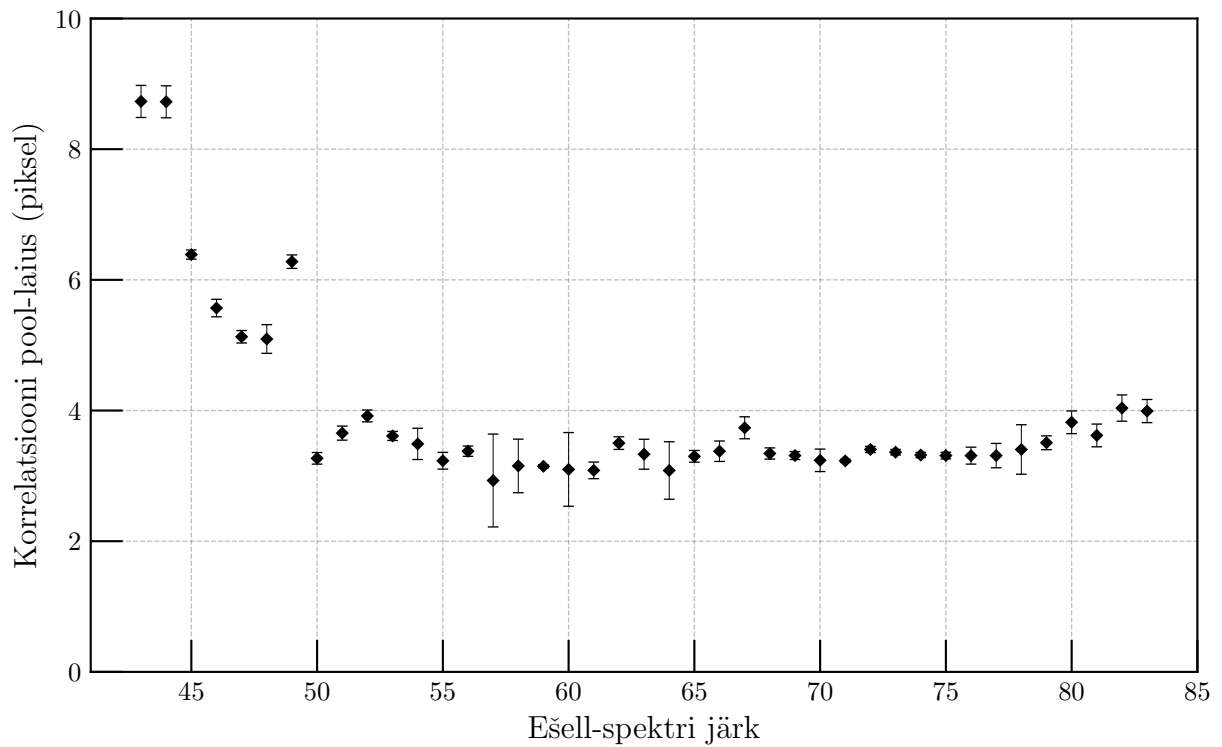
Antud meetod vajab algparameetrite (a_0, b_0, c_0, d_0) määramist ning on ka nende suhtes tundlik. Parameeter a_0 vastab neljandikule maksimaalse ja minimaalse fokuseerija positsiooni erinevusest. Parameeter b_0 on erinevus maksimaalse ja minimaalse pool-laiuse vahel. Parameeter c_0 vastab esmasele minimaalsele pool-laiusele, mida on ka näha Joonisel 21. Parameeter d_0 on pool-laius, mis on määratud hüperbooli puutujate ristumiskohast, samuti nähtav välja toodud joonisel. Levenberg-Marquardt algoritmi teostamisel kasutati *Python*'i tarkvarapaketi *scipy* leiduvat funktsiooni *least_squares*. Saadud lähendus on toodud välja Joonisel 21, roheline punktiirjoonega.



Joonis 22: Fokuseerija parima positsiooni sõltuvus ešell-spektri järkudest.

Tehes äsjakirjeldatud etapid läbi kõikide tuvastatud järkude jaoks, jõuti tulemuseni, mida on näha Joonisel 22. Antud graafik kirjeldab järkudele vastavat parimat fokuseerija positsiooni mingil konkreetsel optikalaua temperatuuril, andmete kogumise ajal oli selleks temperatuuriks keskmiselt $15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Antud graafik lubab valida fokuseerija positsiooni selliselt, et võimalikult palju järke oleks fookuses. Valime selleks positsiooniks 162000 (antud analüüsis on see piiritletud andmekomplektide vahelise fokuseerija positsiooni sammuga), mille puhul on näha, et hästi fokuseeritud järkude vahemikuks võiks olla $60 \dots 75$. Valitud positsioonile vastavate ešell-spektri järkude pool-laiuste sõltuvus on toodud välja Joonisel 23. Kõverast on näha, et valitud fokuseerija positsioon on väga hea ning kõvera kuju on sarnane Joonisel 15 temperatuuri $22.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures leitava kõveraga. Ka pool-laiuste väärtused antud järkude vahemikus tunduvad olevat väga sarnased. On ka näha pool-laiuse kasvu kõrgemate ja madalamate järkude juures,

nagu on ka eelnevalt täheldatud.



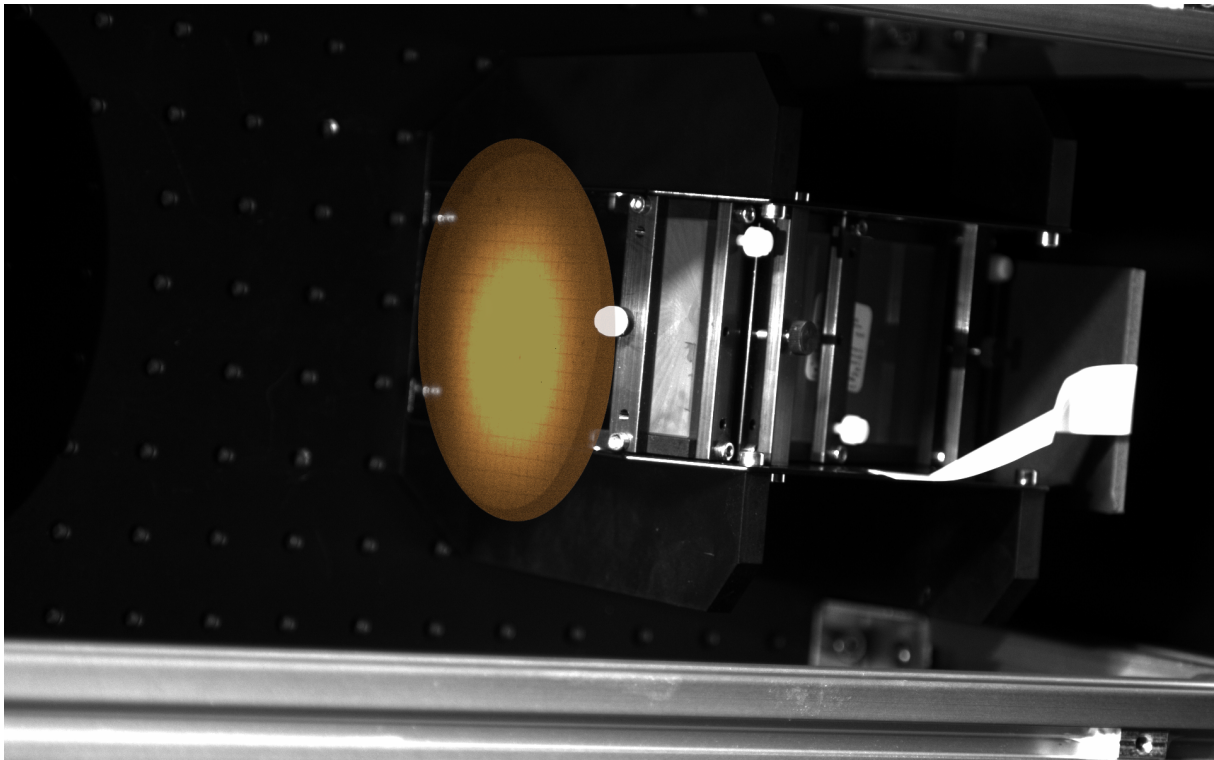
Joonis 23: Pool-laiuste sõltuvus ešell-spektri järkudest fokuseerija positsioonil 162000.

Antud fokuseerija positsioonil on näha, et suurem osa järke on hästi fookuses. Antud positsioonil on ka hästi fookuses järgud 58. ja 70., milles asuvad vastavalt Na D ja $H\beta$ spektrijooned. Antud fokuseerija positsioonil on 80. järk hästi fookuses, mille keskel asub lainepikkus 4200 Å. Ka 52. järk on hästi fookuses.

3.4 Hajunud valguse kaardistamine spektrograafis

Spektrograafis hajunud valguse kaardistamise eesmärk oli saada teada, kust võib andmekaadri-telt nähtav (vt Joonis 6) hajunud valgus tekkida.

Joonisel 24 on toodud välja esimesest kollimaatorist väljuvat valgusvihku, mis on siis suunatud difraktsioonvõrele. Kuna difraktsioonvõre hoidja on anodeeritud metallist, siis on sellelt valguse peegeldumise tõenäosus üsnagi suur. Ekraan on asetatud võrehoidjale võimalikult lähedale, seega ekraanil paikne valgus kirjeldab üsnagi hästi ka võrehoidjani jõudvat valgust. On näha, et valgusvihk on kallutatud võrehoidja suunas. Kusjuures on ka näha, et valgusvihu valgustus ei ole ühtlane. Need asjaolud võivad viidata sellele, et kollimaatorist tulev valgusvihk on optilise telje suhtes liigselt kaldu ning vajaks korrigeerimist.

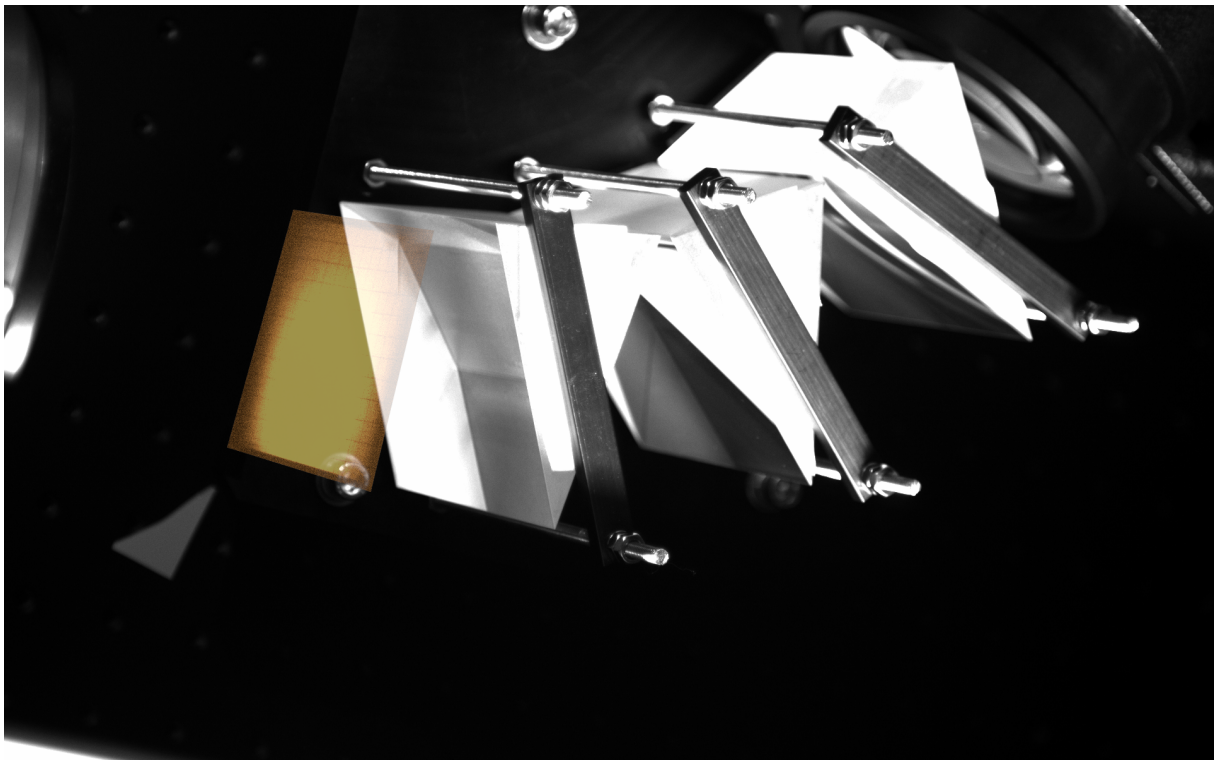


Joonis 24: Spektrograafis liikuv valgusvihk, ekraan asetatud esimese kollimaatori ja difraktsioonvõre vahele.

Valgusvihu mõõtmiseks ekraanile asetatud paberi, ruutude laius on 5 mm, mille põhjal on võimalik määrata valgusvihu kõrvalekalduvust difraktsioonvõre keskkohast. See kalduvus on ~ 2.5 ruudu suurune ehk 12.5 mm. Spektrograafi sisendpeegli serv (millele sisenev valgusvihk on fokuseeritud) ja võrehoidja keskkohast on üksteisest 825mm kaugusel. See tähendab, et kollimaatorist väljuv valgusvihk on optilise telje suhtes 0.81° võrra kaldu. Selle korrigeerimiseks peab spekt-

roograafi sisendpeeglit keerama difraktsioonvõre poole vähemalt 0.40° võrra.

Sarnaselt eelnevale joonisele on Joonisel 25 välja toodud ekraanile langev valgus, mis väljub teisest kollimaatorist ning on suunatud risti-dispergeerivatest prismadest esimesele. Kui difraktsioonvõrelt difrageerunud valgus liigub tagasi esimesse kollimaatorisse, siis sellest uuesti väljudes, on valgusvihk suunatud sisendpeeglist natukene kõrvale selleks, et see sealt mööda saaks minna. Samuti on valguse liikumise teele asetatud pilu, mis lõikab üleliigse valguse ära, tagamaks selle, et teise kollimaatorisse jõub ainult ešell-spekter. Seetõttu on ka jooniselt näha, et teisest kollimaatorist väljuv valgusvihk on ruudukujuline, kuna teine kollimaator käitub ka nagu dispergeeriv element. Sarnaselt eelnevale joonisele on näha, et ekraanile langev valgus ei ole ühtlane. Samas on näha, et kollimaatorist väljuv valgus katab ainult esimest prisma ehk siin suure tõenäosusega ei saa mingisugune valgus prismast mööda minna ja ka seetõttu sealpool spektrograafis teistel komponentidelt peegelduda.



Joonis 25: Spektrograafis liikuv valgusvihk, ekraan asetatud teise kollimaatori ja esimese risti-dispergeeriva prisma vahele.

4 Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli uurida, kuidas mõjutavad kudee kambri keskkonnatingimused Tartu Observatooriumi uue ešell-spektrograafi *Whoppsel* poolt kogutavaid andmeid. Selle jaoks uuriti kuidas optikalaua temperatuuri ja ka kudee kambri õhurõhu kõikumised ja muutused mõjutavad spektrograafi kaamera fokaaltasandit ja sellest tulenevalt ka kõige paremini fookuses olnud ešell-spektri järke. Samuti, kuidas mõjutavad sellised muutused spektraaljoonte asukohti dispersiooniteljes ja järkude paiknemist risti-dispersioonitelge. Viimaseks kaardistati ka andmekaadritel esineva hajunud valguse potentsiaalseid allikaid.

Leiti, et väikesed temperatuurimuutused, kuni $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ vahemikus, ei oma suuremat mõju just paremini fookuses olnud järkudele. Järkude puhul, mis ei olnud juba alguses nii hästi fookuses, oli täheldada märgatavat mõju ning piisavalt suurte temperatuurimuutuste ($\sim \Delta 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) puhul oli märgata, et fookusest väljas olnud järgud liikusid fookuse poole ning vastupidi fookuses olnud järkude puhul. Piisavalt suure temperatuurimuutuse puhul ($\sim \Delta 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) ei saa ühegi järgu kohta öelda, et see need on mõistlikult fookuses. Õhurõhk ei omanud tähelepanavat mõju fookuses olnud järkudele. Kui kudee kambri temperatuuri mitte kontrollida, siis on kindel, et ühel hetkel ei ole fookuses olnud järgud enam fookuses. Sestap on mõistlik aegsasti ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ületavate temperatuurimuutuste puhul) korrata spektrograafi fokuseerimise katset, et määratleda uus fokuseerija positsioon huvipakkuvate järkude parima fookuse oleku saavutamiseks.

Rääkides spektrijoonte ja järkude nihkumisest sensoril. Temperatuurimuutusele $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastas maksimaalne dispersioonitelje suunaline nihe $\Delta x = 0.59(1)$ pikslit ning risti-dispersioonitelge $\Delta y = 0.51(0.03)$ pikslit. Dispersiooniteljeline nihe radiaalkiirustes oli vastavalt $\Delta RV = 2.6\text{ kms}^{-1}$. Maksimaalne dispersioonitelje suunaline nihe oli $\Delta x = 1.54(1)$ pikslit, radiaalkiirustes vastavalt $\Delta RV = 6.6\text{ kms}^{-1}$. Radiaalkiirustele ei olnud võimalik adekvaatsed standardhälvet parameetrite standardhälvete puudumise tõttu. Maksimaalne nihe risti-dispersioonitelge oli $\Delta y = 2.70(2)$ pikslit. Sealhulgas oli täheldada ka õhurõhu mõju nihetele. Temperatuuri- $12.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja õhurõhu muutusele 36.8 hPa vastas dispersioonitelje suunaline nihe $\Delta x = 0.66(1)$ pikslit. Samas, temperatuuri- ja õhurõhu muutusele 5.6 hPa nihe $\Delta x = 1.50(1)$ pikslit. Risti-dispersioonitelge olid nendeks niheteks $\Delta y = 2.58(3)$ pikslit ja $\Delta y = 1.98(3)$ pikslit vastavalt. Seetõttu tuleb kaaluda lahendusi õhurõhu mõjude kõrvaldamiseks. Spektrograafi saaks asetada kontrollitud rõhuga kasti.

Fokuseerimise katse oli edukas ning näitas, et töös kasutatud funktsioonid ja algoritmid on

võimelised määrama parimat fokuseerija positsiooni erinevate otstarvete jaoks.

Viimaseks suudeti ka kaardistada potentsiaalne hajunud valguse allikas spektrogaafis, milleks on esimesest kollimaatorist väljuva valgusvihu langemine võrehoidjale, millelt see peegeldub ilma difraktsioonvõrele jõudmata kaamera poole. Valgusvihk on arvatavasti ka optilise telje suhtes kaldu, mis põhjustab difraktsioonvõre ebahürtlase valgustatuse. Seetõttu tuleb kollimaatorist väljuva valgusvihu käiku korrigeerida sedasi, et maksimaalne hulk valgust langeks difraktsioonvõrele. Hajunud valguse kaardistamisest saadi, et selle korrigeerimiseks on vaja sisendpeeglit keerata (arv) kraadi võrra vastupäeva. Tuleks uurida võimalusi anodeeritud metallist võrehoidjani jõudva valguse kõrvaldamisele või minimeerimisele. Näiteks asetades difraktsioonvõre ette väga madala peegeldusteguriga musta mattvärviga kaetud vinjeteerimisvaba diafragama, mille ava suurus on määratud kollimaatorist tuleva ja võret täitva valgusvihu suurusega.

Viited

- Carsten. Finding perfect focus with v-curve fitting based on a hyperbolic function, 2018. URL <https://www.lost-infinity.com/v-curve-fitting-with-a-hyperbolic-function/>.
- Sireesha Chamarthi, Ravinder K. Banyal, S.Šriram, and Gajendra Pnadey. Stability analysis of vbt echelle spectrograph for precise radial velocity measurements. *Journal of Optics*, 47: 195–201, 2018. doi: 10.1007/s12596-017-0422-1.
- F. Cochard. *Eshel + spectroscope, Assembling the instrument*, 2016. URL https://www.shelyak.com/wp-content/uploads/Assembling_Whoopshel.pdf.
- R Donaldson. Stray light in monochromators. *Journal of Scientific Instruments*, 29(5):150, 1952. doi: 10.1088/0950-7671/29/5/306.
- Tõnis Eenmäe. To spektrograafi whoppsel dispersioonikõver. Privaatkommunikatsioon, 2024.
- Thomas Eversberg and Klaus Vollmann. *Spectroscopic Instrumentation, Fundamentals and Guidelines for Astronomers*. Springer Berlin, Heidelberg, 2015.
- Eric Fest. *Stray Light Analysis and Control*. The International Society for Optical Engineering, 2013. ISBN 978-0-8194-9325-5. doi: 10.1117/3.1000980.
- Miaoxin Gong, Haisol Kim, Jim Larsson, Torsten Methling, Marcus Aldén, Elias Kristensson, Christian Brackmann, Tina Eschrich, Matthias Jäger, Wolfgang Kiefer, and Andreas Ehn. Fiber-based stray light suppression in spectroscopy using periodic shadowing. *Opt. Express*, 29(5):7232–7246, 2021. doi: 10.1364/OE.410517.
- Samuel Halverson, Ryan Terrien, Suvrath Mahadevan, Arpita Roy, Chad Bender, Gudmundur K. Stefánsson, Andrew Monson, Eric Levi, Fred Hearty, Cullen Blake, Michael McElwain, Christian Schwab, Lawrence Ramsey, Jason Wright, Sharon Wang, Qian Gong, and Paul Roberston. A comprehensive radial velocity error budget for next generation doppler spectrometers. In Christopher J. Evans, Luc Simard, and Hideki Takami, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*. SPIE, 2016. doi: 10.1117/12.2232761.

- YongHui Hou, Lei Wang, Zhongwen Hu, Jianing Wang, Zhen Tang, Mingda Jiang, and Yongtian Zhu. The LAMOST low resolution spectrograph stability performance. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, volume 8446, page 844660. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012. doi: 10.1117/12.925640.
- Steve B. Howell. *Handbook of CCD Astronomy*. Cambridge University Press, 2 edition, 2006. ISBN 9780511807909. doi: 10.1017/CBO9780511807909.
- Herbert E. Ives. Scattered light in spectrophotometry and a new form of spectrophotometer. *Phys. Rev. (Series I)*, 30:446–452, 1910. doi: 10.1103/PhysRevSeriesI.30.446.
- A.E. Kramida. A critical compilation of experimental data on spectral lines and energy levels of hydrogen, deuterium, and tritium. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 96(6):586–644, 2010. ISSN 0092-640X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adt.2010.05.001>.
- Philip Massey. A user’s guide to ccd reductions with iraf, 1997. URL <https://home.ifa.hawaii.edu/users/meech/a399/handouts/ccduser3.pdf>.
- Doug Tody. The iraf data reduction and analysis system. In *Instrumentation in Astronomy VI*, volume 0627, pages 733 – 748. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1986. doi: 10.1117/12.968154. URL <https://doi.org/10.1117/12.968154>.

Lisa A

Kaustas *Lisad* on töö jooksul arendatud põhifunktsioonide pakett, mis kannab nime *Whoppsel.py*. Põhifunktsioonid on kirjutatud programmeerimiskeeles *Python* (versioon 3.13.2). *order_detector* on funktsioon, mille abil määrati töös tasaväljakaadritelt järkude asukohad. *order_tracer* on funktsioon, millega määrati eelneva funktsiooni poolt väljastatud andmemaatriksi alusel tasaväljakaadritelt järkude funktsionaalsed kujud. *order_tracer* on funktsioon, millega eraldati kalibratsioonikaadritelt ešell-spektri spektrijärgud eelnevast funktsioonist väljastatud andmemaatriksi põhjal. Funktsioon *cross_correlate* on funktsioon, millega korreleeriti eelnevast funktsioonist väljastatud ešell-spektri üherealiseid spektreid. Funktsioon *v_curve_fitting* on funktsioon, mis korrelatsioonitulemuste põhjal määrab parima fokuseerija positsiooni, sobitades andmetele hüperboolset funktsiooni kasutades Levenberg-Marquardt algoritmi. Pakettis leidub ka hulk lisafunktsioone, mille eesmärk on lihtsustada põhifunktsioonide tööd ja sealhulgas piiritleda põhifunktsioonide mahte. Funktsioonide tööks on vajalikud *Python*'i tarkvarapaketid *numpy*, *scipy*, *pandas* ja *matplotlib*. Samuti on tööks vajalikud *Python*'i vaikepaketid *warnings* ja *os*.

Lisa B

Kaustas *Lisad* on töö jooksul eeltöötuseks kasutatud põhifunktsioonide pakett, mis kannab nime *Pipeline.py*. Põhifunktsioonid on kirjutatud programmeerimiskeeles *Python* (versioon 3.13.2). *overscan* on funktsioon, mille abil lahutati andmekaadritest virtuaalveergude keskmistatud signaal. *trim* on funktsioon, mille abil kärbiti andmekaadrid õigesse suurusesse. *zerocombine* on funktsioon, mida kasutati eelpingekaadrite kombineerimiseks. *procimage* on funktsioon, millega lahutati andmekaadritelt eelpingekaadreid, kuid funktsiooniga on võimalik ka lahutada pimemekaadreid ja teostada tasaväljakaadriga jagamist. Funktsioonide tööks on vajalikud *Python*'i tarkvarapaketid *numpy*, *ccdproc* ja *astropy*. Samuti on tööks vajalik *Python*'i vaikepakett *os*.

Lisa C

Kaustas *Lisad*, alamkaustas *Graafikute koostamine* on töös tehtud analüüsiks ja graafikute koostamiseks kirjutatud programmid, Programmid põhinevad programmeerimiskeelel *Python* (versioon 3.13.2). ning on kirjutatud *Jupyter Notebook* keskkonnas, et tagada üksikute graafikute ja põhifunktsioonide parameetrite muutmine. Programmis, mis kannab nime *FocusTest_Graphing.ipynb* on tehtud fokuseerimise katse analüüs ja graafikud. *TemperatureEffects_Graphing.ipynb* kasutati temperatuurianalüüsiks ja sellega seonduvate graafikute koostamiseks. *TempEffects_CCDPixelShift.ipynb* kasutati temperatuurianalüüsi dispersioonitelje ja risti-dispersioonitelge nihete analüüsiks ja seonduvate graafikute koostamiseks. *Other_Graphing.ipynb* kasutati muude töös esinevate graafikute koostamiseks. *FT_Pipeline.py* ja *FT_Pipeline.py* rakendavad põhifunktsioone paketist *Pipeline.py*, et sooritada andmekaadrite eeltöötlus.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karl Nõupuu,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Tartu Observatooriumi ešell-spektrograafi võimekuse karakteriseerimine“, mille juhendaja(d) on Tõnis Eenmäe, MSc (teaduskraad), reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
3. olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karl Nõupuu

30.05.2025