

Nõo Reaalgümnaasium

Ott Eenmäe

11.c klass

**TARTU ÜLIKOOLI TARTU OBSERVATOORIUMI
1,5-MEETRISE TELESKOABI FOTOMEETRI FILTRITE
KARAKTERISEERIMINE**

Praktiline töö

Juhendaja Tõnis Eenmäe

Kaasjuhendaja Ruth Maal

Nõo 2025

Sisukord

SISSEJUHATUS	4
1 Fotomeetria kirjeldus	5
1.1 Fotomeetria põhimõte	5
1.2 Fotomeetriline süsteem	5
1.3 Johnson-Cousins'i <i>UBVRI</i> süsteem	6
1.4 Sloan'i teleskoop ja ugriz süsteem	7
1.5 Sünteetiline fotomeetria	7
2 Praktilise osa kirjeldus	8
2.1 Filtrite paigutamine filtriturelli	8
2.2 Filtrite asetus filtriturellis	8
2.3 Filtrite läbilaskvuse mõõtmine monokromaatoriga	9
2.4 Filtrite mõõtmistulemuste joonisteks tegemine	10
2.5 Sünteetiline fotomeetria	13
2.5.1 Värvülekande võrrandid	14
2.5.2 Värvusindeksite ülekandevõrrandid	16
2.5.3 Värvülekandevõrrandite ja värvusindeksite võrrandite kordajate leidmine	16
3 Tulemused	18
3.1 Tekkinud probleemid	18
3.2 Autori hinnang praktilisele tööle	19
KOKKUVÕTE	20
SUMMARY	21
KASUTATUD MATERJALID	23
LISAD	24
Lisa 1 Mõõdetud- ja standardfiltri läbilaskekõverad	24

Lisa 2	Filtrite värviülekanne võrrandid	26
Lisa 3	Standardsete ja instrumentaalsete värvusindeksite võrdlus	28
Lisa 4	Fotomeetriliste süsteemide välised filtrid	29
Lisa 5	Filtrite ülevaatlilikud läbilaskekõverad	30
Lisa 6	Elektroonilised lisad	32

Sissejuhatus

Teema on valitud selle tõttu, et Tartu Ülikooli Tartu Observatooriumi 1,5-meetrine teleskoop vajab korralikke fotomeetri filtreid. Käesoleva töö raames tuleb neid filtreid kalibreerida. See on oluline, sest siis saab 1,5-meetrilise teleskoobi fotomeetri filtrite karakteriseerimise tulemust kasutada teleskoobi fotomeetriliste mõõtmiste oodatavaks kvaliteedi hindamiseks ja sellest saavad kasu Tartu Ülikooli teadlased. Lisaks pole seda sorti tööd varem Nõo Reaalgümnaasiumis tehtud.

Töö eesmärkideks on filtrite läbilaskeribade mõõtmine ja nende tulemuste võrdlemine standardfiltrite läbilaske kõveratega ning seejärel nende filtrite kasutamine vaatlustel. Töö lõpuks saaks neid filtreid kasutada reaalsete vaatluste jaoks.

Töö teoreetilises osas antakse ülevaade sellest, mis on standardne fotomeetriline süsteem (filtrid ja standard tähed), miks neid kasutatakse, et erinevate teleskoopide andmeid oleks võimalik omavahel võrrelda, selleks on vaja teada, millised on kasutatavad filtrid (millised on läbilaske kõverad ja neid tuleb võrrelda standartsete filtritega), mingi teleskoobi mõõtmistulemusi teisendada standard süsteemi tuleb vaadelda standard tähti ja nende põhjal luua värvi ülekande võrrandid. Töö praktilises osas kirjeldab töö autor fotomeetri filtrite karakteriseerimist ja filtrite kasutamist vaatlustes.

Töö teoreetilise osa kirjutamiseks on kasutatud allikaid [Kitchin \(1998\)](#); [Bessell \(1990, 2005\)](#).

Praktilise töö läbiviimiseks tuli filtrid mõõta ([Bessell, 1990](#)) ja seejärel filtrite läbilaskvust võrrelda universaalfiltrite läbilaskeribadega, pärast kasutati neid kalibreeritud filtreid vaatluste tegemiseks standard tähtedele ja lõpuks võrreldakse, kas tulemused kattuvad.

1 Fotomeetria kirjeldus

1.1 Fotomeetria põhimõte

Fotomeetria on astronoomi üks tööriistadest, mida kasutatakse selleks, et uurida, millist valgust taevakeha kiirgab. Fotomeetrias vaieldamatu osa on filtrid. Neist ja standardtähtedest süsteeme on olemas aga üle mitmesaja. Filtrid, mida kasutatakse fotomeetrias, erinevad lainevahemike poolest ja ka kui täpselt nad mingit lainevahemikku läbi lasevad. Standardtähed on tähed, mida on väga kaua aega vaadeldud ja väga palju kordi mõõdetud.

1.2 Fotomeetriline süsteem

Fotomeetriline süsteem koosneb filtritest ja mingist hulgast konstantse heledusega standardtähtedest, mis on tehtud kindlaks eelnevalt läbi tähtede heleduste ning värvide mõõtmise. Kõiki fotomeetrilisi süsteeme kasutatakse selleks, et mõõta absoluutseid vooge, millest saab järeldada erinevaid asju vaadeldava objekti kohta, nagu näiteks temperatuur, gravitatsioon ja metallilisust. Osa fotomeetrilisi süsteeme on spetsialiseerunud soojade-, teised külmade tähtede mõõtmisele. Fotomeetrilistel süsteemidel on põhiliselt kolme sorti läbilaskeriba laiuseid. Esiteks on lai riba, mille mõõtevahemik on ($\Delta\lambda < 1000 \text{ \AA}$), teiseks on keskmise laiusega riba, mille mõõtevahemik on ($70 \text{ \AA} < \Delta\lambda < 400 \text{ \AA}$) ja kitsas riba, mille mõõtevahemik on ($\Delta\lambda < 70 \text{ \AA}$). (Bessell, 2005)

Fotomeetriliste süsteemide kasutamine algas 1950-ndatel aastatel, kui leiutati fotoelektronkordisti, mille abil sai hakata väga täpselt mõõtma valguses olevate footonite hulka. Tõsisem fotomeetriliste süsteemide areng sai alguse alates 1950. aastast, kui Johnson, Stebbins, Devitt ja Seyfert mõtlesid kamba peale välja, kuidas hakata mõõtmisi tegema, kasutades madala müra võimendamisetehnikat. 1955. aastaks mõtlesid Johnson, Morgan ja Harris välja UBV süsteemi, mis on tänapäevalgi kasutusel. Fotoelektronkordisti on seade, mida tollal kasutati, sest see oli tollel ajal hea vahend, millega sai mõõta üpris täpselt sinist valgust kiirgavate tähtede valguse lainepikkusi. Neid kasutati laialdaselt kuni CCD kaamerate tulekuni. (Bessell, 2005) Kuna CCD kaameratel oli suur eelis, milleks oli see, et nad said mõõta paljudes pikslites korraga, samal ajal kui fotoelektronkordisti saab mõõtmisi teha ainult ühes pikslis. Kuid juba 1950-ndate lõpuks

valmistas Kron esimese töötava fotoelektronkordisti, mis oli tundlik punase valguse suhtes ning tänu sellele saavutusele löid Johnson koos Stebbins'i, Kron'i ja Smith'i kaasabile Johnsoni *RI* süsteemi.

Fotomeetrilisi süsteeme liigitatakse ka kinnisteks ja lahtisteks süsteemideks. Lahtised süsteemid on sellised süsteemid, mille puhul selle tegijad kutsuvad kasutajaid üles tegema koopiaid nende läbilaskeribadest ja detektori süsteemist ning kasutama samu standardtähti, mida nemadki. Selle tõttu on aja jooksul tekkinud palju sarnaseid süsteeme, mis põhinevad kõik mingil algsel süsteemil, nagu on seda näiteks Johnson-Cousins'i *UBVRI* fotomeetiline süsteem. Kinnised süsteemid on aga sellised, kus kindel hulk inimesi on teinud oma süsteemi ja pakuvad inimestele oma mõõtmiste andmeid, kuid ei luba oma süsteemi jäljendada. Kuna tegemist on kindlate andmetega, siis tekib palju vähem vigu ja andmete kvaliteet on kõrgem kui lahtisel süsteemil, sest seal pole nii ranget kontrolli. Kinnise süsteemi andmete kasutamise puhul on nende andmetel ka sertifikaat kaasas, mis garanteerib andmete täpsuse. Üks laialdaselt levinud kinnine süsteem on Genfi Süsteem, mida kontrollib väike rühm Genfi observatooriumi teadlasi, ning see sisaldab informatsiooni 43931 tähe kohta. (Bessell, 2005)

1.3 Johnson-Cousins'i *UBVRI* süsteem

Kui teadusartiklites või lihtsalt teaduskirjanduses on mainitud Johnson-Cousins'i *UBVRI* filtrisüsteem, on tavaliselt selle all mõeldud Johnson-Cousins'i *UBV* süsteemi ja Cousins'i *RI* süsteemi, kuna Johnson'i *RI* süsteemi kasutatakse tänapäeval väga harva.

1970 *RI* filtrisüsteemi, mille Cousins valmistas, kasutatakse taevas E-regiooni vaatlemiseks, mis koosneb 570-st tähest, mille heledused jäävad vahemikku $2 < V < 11$ tähesuurst. Selles vahemikus on nii punaseid tähti, mis on väga külmad, kui ka siniseid tähti, mis väga kuumad. (Bessell, 2005)

Tabelis 2 on toodud Johnson-Cousinsi filtrite info. Tabelis on λ_{eff} filtri efektiivne raskuskeskmele vastav lainepikkus, see võtab arvesse filtri kuju valguse läbilaskmisel ja $\Delta\lambda$ tähistab filtri poolt läbilastava valguse lainepikkuste vahemiku laius. Mõlemad suurused on antud ühikus Å (ongström).

Tabel 1: UBVRI filtri

Filter	λ_{eff}	$\Delta\lambda$
U	3663	650
B	4361	890
V	5448	840
R	6407	1580
I	7980	1540

1.4 Sloan'i teleskoop ja ugriz süsteem

Sloan'i ugriz filtrid on tehtud selleks, et mõõta nõrku galaktikaid Sloani digitaalse taevaülevaate (*ingl Sloan Digital Sky Survey*), (SDSS) teleskoobiga. Fotomeetrilise süsteemi lühendina on kasutusel SDSS süsteem, mis on andnud suure panuse tähtede ja galaktikate fotomeetriliste vaatluste andmebaasile. Tegelikult võib öelda, et SDSS on loonud standardid kõigile tuleviku fotomeetrilistele uuringutele ja paljudele tuleviku fotomeetrilistele mõõtmistele.

1.5 Sünteetiline fotomeetria

Sünteetiline fotomeetria kujutab endast arvutis tehtavaid mõõtmisi, mida tehakse juba varem olemas olevate andmete põhjal. Enamasti kasutatakse selleks standartseid andmeid, mis on saadud tähtedelt, mida on ekstra uuritud, et nad oleks stabiilsed ning neid on vaadeldud palju kordi.

Sünteetilise fotomeetria üks põhiülesanne on valgusspektri abil aru saada, millest koosneb vaatlusalune taevakeha. See tehakse kindlaks läbi võrdluse, kus võrreldakse mõõdetud andmeid ja standartseid andmeid. Tänapäeval käib enamus sünteetilisest fotomeetrist selle ümber, kui palju footoneid loetakse läbilaskeribal kokku mingi objekti vaatlemisel. Tänu sellele saab järeldada, milline on tähe temperatuur ja keemiline koostis.

Standardse süsteemi läbilaskeriba funktsioon $K(\lambda)$ saadakse tavaliselt, korrutades kokku filtri läbilaskvuskõvera (T_{filter}), teleskoobi peegli peegeldusteguri ($T_{\text{teleskoop}}$), kaamera optika läbilaskvuskõvera (T_{aken}) ja kasutatud detektori kvantefektiivsuse (QE_{CCD}) (vt valem 1), kuid kui teha mõõtmisi Maa peal, siis tuleb seda korrutada veel õhumassi (seniidis on see 1.0, kasvab horisondi poole) ja õhu neeldumiskoeffitsendi korrutisega (Bessell, 2005).

$$K(\lambda) = T_{\text{teleskoop}} \times T_{\text{filter}} \times T_{\text{aken}} \times QE_{\text{CCD}} \quad (1)$$

2 Praktilise osa kirjeldus

Töö praktilises osas pannakse kokku filtritürel, mõõdetakse filtrid monokromaatoriga ning seejärel tehakse saadud andmetega joonised, mida võrreldakse standardfiltri andmetega. Filtrite andmetega teostatakse sünteetiline vaatlus ja kõige lõpuks luuakse värvi ülekande võrrandid.

2.1 Filtrite paigutamine filtritürelli

Professionaalses astronoomias on fotomeetria üks olulistest mõõtmismeetoditest. Seda on vaja selleks, et saada teada, millistel lainepikkustel kui palju valgust mingi objekt kiirgab. Tähtede heleduse mõõtmiseks kasutatakse erinevaid filtreid, mis annavad infot vaadeldava tähe temperatuuri ja kiiratava energia koguse kohta.

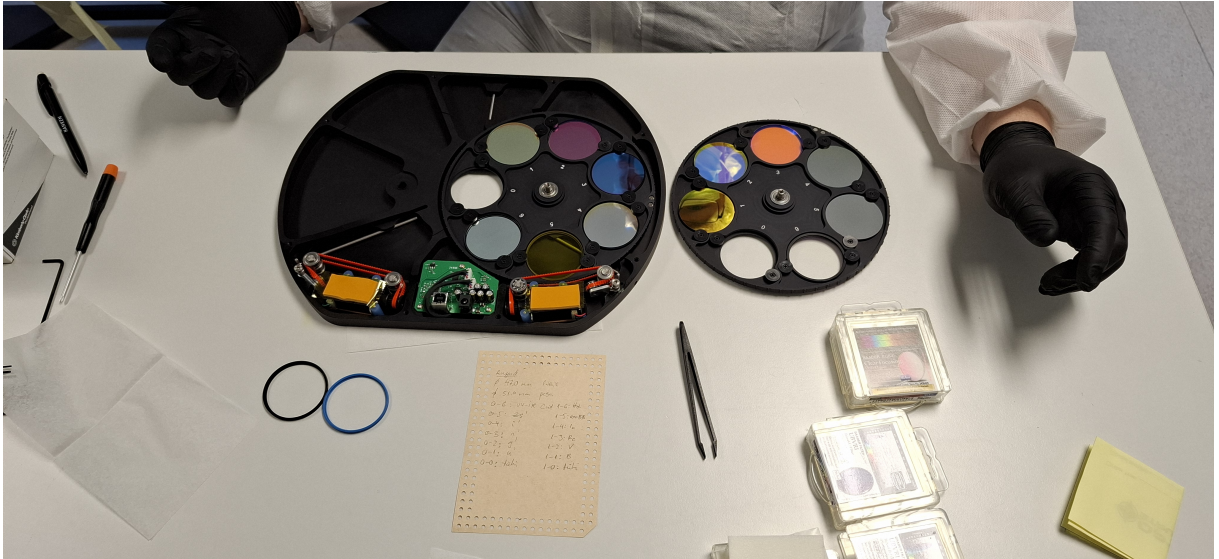
Töö praktilises osa tegemiseks käis töö koostaja käis Tartu Ülikooli Tartu Observatooriumi radiomeetrialaboris. Töö algas sellega, et pidime minema puhasruumi, kus sai tööga päriselt alustada. Töö eesmärk oli filtritürelli täitmine 12-ne filtriga, millest enamus on fotomeetrilised filtrid. Antud töö kontekstis on need Johnson-Cousins'i ja Sloan'i süsteemide filtrid, mis toodeti Baader Planetariumi¹ nimelise firma poolt. Ülejäänud filtritürelli paigaldatud filtrid on teistsuguste ülesannetega.

Töö algas filtritürelli lahti kruvimisega ning kui see sai tehtud, tuli filtrid panna filtritürelli ketastele, mille ümmarguste filtripesade läbimõõt oli 51 mm ja valgust läbi laskvate ümmarguste avade läbimõõt oli 47 mm (vt. Joonis 1). Filtrid, mis sinna pandi, olid kõik erineva läbilaskeribaga. Iga filter tuli paigutada ettevaatlikult filtritürelli pesadesse, mille järel tuli need kinnitada kinnitusklaambritega, puhastada filtritürell juhuslikest tolmu- ja õhusaastetest ja seejärel kruvida filtritürelli kaas uuesti kinni.

2.2 Filtrite asetus filtritürellis

Tabelis 2 on näha töös kasutatava filtritürelli filtrite asetus. Positsiooni lahter tabelis tähendab seda, mitmendal kohal asub filter filtritürelli kettal ning ratta veerg näitab seda, millisel kettal mingi filter asetseb ja mis nime ta kannab. Rattal 0 on Sloan'i süsteemi filtrid ja Luminance

¹<https://www.baader-planetarium.com/en/filters/photometric-filters.html>



Joonis 1: Lahtine filtriturell koos filtritega. Autor O. Eenmäe

filter. Rattal 1 on Johnson-Cousins'i süsteemi filtrid ja vesiniku $H\alpha$ spektrijoone kitsasribafilter ning eksoplaneetide üleminekute fotomeetrias kasutatav madalpääsfilter *exoBB*.

Tabel 2: Paigaldatud filtrite järjestus filtriturellil

Positsioon	Ratas 0	Ratas 1
1	u'	B
2	g'	V
3	r'	Rc
4	i'	Ic
5	zs'	exoBB
6	Luminance	$H\alpha$

2.3 Filtrite läbilaskvuse mõõtmine monokromaatoriga

Filtrite läbilaskvusribade mõõtmised tehti topeltmonokromaatoriga Bentham DTMS300 (S/N 14606) Tartu Ülikooli Tartu Observatooriumi radiomeetria laboris. Selleks oli vaja filtriturell paigutada optikalauale monokromaatori väljundi taha, et saaks filtrite läbilaskvust mõõta. Kõikidel filtritel, peale $H\alpha$ filtri, oli mõõtmisamm üks nanomeeter ja igas mõõtmispunktis tehti 25 mõõtmist ja ühes punktis tehtud mõõtmistulemused keskmistati. $H\alpha$ filtri mõõtmisamm oli 0.1 nm ja igas mõõtmispunktis tehti 25 mõõtmist ja ühes punktis tehtud mõõtmistulemused keskmistati. Igast filtrist tehti kaks mõõtmist, millest üks oli detailne mõõtmine ning teine oli ülevaatlilik mõõtmine. Töö alguses tehti 5 nm mõõtesammuga kiire mõõtmine, mille ülesandeks

oli välja selgitada, millises lainepikkuste vahemikus peaks tegema täpsed mõõtmised. Laborimõõtmiste käigus mõõdeti kokku 12 filtrit.

Ühe filtri mõõtmine mingis kindlas lainepikkuste vahemikus käis järgmiselt:

1. mõõta ilma filtrita, esimese referentsmõõtmine selleks, et kontrollida lambi tööd;
2. mõõta uuritava filtri läbilaskvust;
3. mõõta uuesti ilma filtrita selleks, et saada teine referents selle jaoks, et olla kindel, et lamp pole filtri mõõtmise käigus muutunud

Iga üksiku mõõtmise järel salvestati mõõdetud andmed unikaalsesse tekstifaili. Tekstifail sisaldas mõõtmispunktide lainepikkusi ja nendes punktides mõõdetud signaali väärtusi.

2.4 Filtrite mõõtmistulemuste joonisteks tegemine

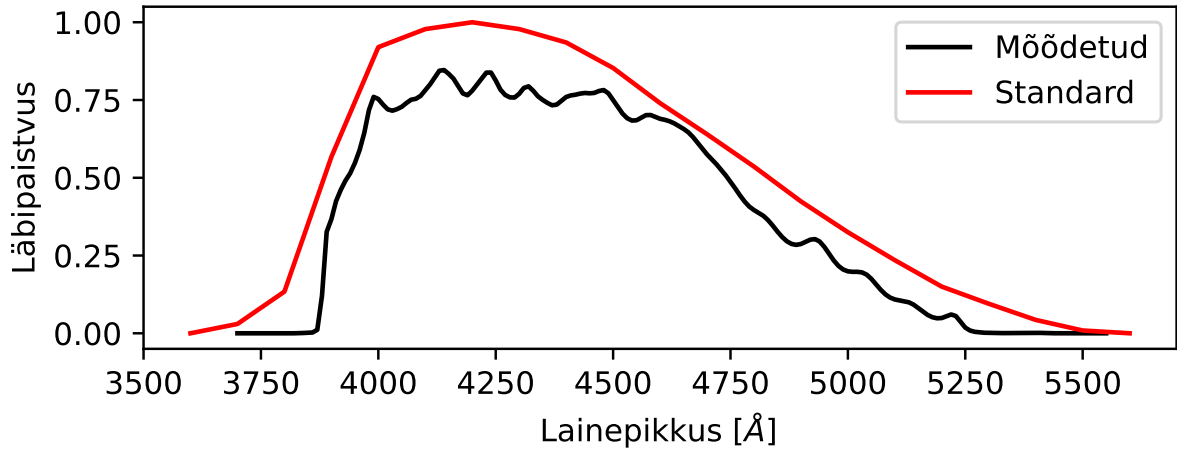
Kui filtrid olid mõõdetud, sai mõõtmistulemustest eraldada soovitud andmed kasutades programmi, mille autor kirjutas programmeerimiskeeles Python², kasutades selle lisapakette Pandas ja Matplotlib. Programmiga võeti filtrite ja neile vastavate referentside andmefailidest kaks andmetulpa – lainepikkus nanomeetrites ja signaali väärtused. Seejärel leiti filtri ja referentsi signaalide vaheline suhe, mis andis filtri läbilaskekõvera. Kasutades leitud filtrite läbilaskekõveraid, sai programmi abil moodustada joonised, mille x-teljel oli lainepikkus ongströmides ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$) ja y-teljel filtri läbipaistvus.

Igast filtrist tegi autor kaks joonist. Esimene oli tehtud ülevaatlike mõõtmiste andmetega lainepikkuste vahemikus $3000 \dots 12000 \text{ \AA}$. Selline joonis tehti kõigile 12-le filtrile, need joonised on leitavad lisast [Lisa 5](#). Lisaks salvestati ülevaatlike filtrite läbilaskekõverad kahetulbalistesse tekstifailidesse, mille esimene tulp on lainepikkus ongströmides ja teine läbipaistvus vahemikus 0 kuni 1.

Standardsete fotomeetriliste süsteemide filtritele tehti ka teine joonis. Need joonised olid tehtud detailsete mõõtmiste andmetega ja need sisaldasid iga standardfiltri läbilaskvuskõverat ja mõõdetud filtri läbilaskekõverat. Standardfiltrite andmed saadi Spanish Virtual Observatory

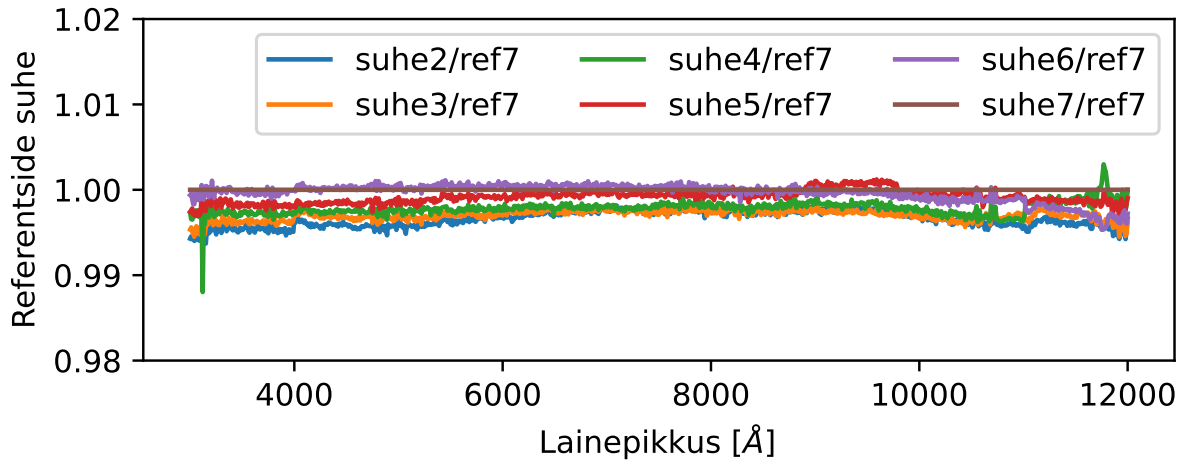
²<https://www.python.org>

(SVO) filtriprofiili teenuse andmebaasist³ Pythoni lisapaketi *Astroquery* abil. Sellised joonised tehti selleks, et oleks lihtsam aru saada, kui palju erinevad mõõdetud filtrid standardfiltritest. Näiteks on toodud Johnson-Cousins süsteemi B filtri läbilaskekõvera võrdlus mõõdetud



Joonis 2: Johnson B filtri standardfiltri ja mõõdetud filtri võrdlus.

B-filtriga (vt. Joonis 2). Kokku tehti selliseid jooniseid 9-le filtrile (vaata Lisa 1). Joonistest tehti ka PDF-failid ja salvestati läbilaskekõverate andmed tekstifailidesse nagu esimesel juhul.



Joonis 3: Kõikide filtrite ülevaatlike mõõtmiste referentside suhted viimase referentsi suhtes.

Lõpuks tehti joonis, mis näitas kõikide filtrite ülevaatlike mõõtmiste referentside suhteid viimase referentsi suhtes (vt. Joonis 3). Töös kasutatavate referentside mõõtmised olid tehtud ajavahemikus pikkusega 3 tundi ja 40 minutit. See nätab, kui stabiilne oli mõõtmise ajal monokromaatori mõõtmisseadmete komplekt ja valgusallikas. Y-telje suhete skaala näitab tegeli-

³<https://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/>

kult protsentuaalset muutust, jooniselt on näha, et muutuste amplituud oli mõõtmise ajal umbes pool protsenti. Kuna filtrite mõõtmiste leidmiseks kasutati neid samu referentsmõõtmisi siis on põhjust arvata, et filtrite läbilaskekõverate mõõtmise läbipaistvuse ebatäpsus on maksimaalselt kuni pool protsenti. Tõenäoliselt on tegelik täpsus aga suurem, sest iga filtri mõõtmisi võrreldi ajaliselt lähima referentsiga ning suurimat muutust põhjustava valgusallika ajaline muutlikkus on aeglane.

Kõikide selles tööetapis tehtud filtrite joonised on olemas lisades [Lisa 1](#), [Lisa 4](#) ja [Lisa 5](#).

2.5 Sünteetiline fotomeetria

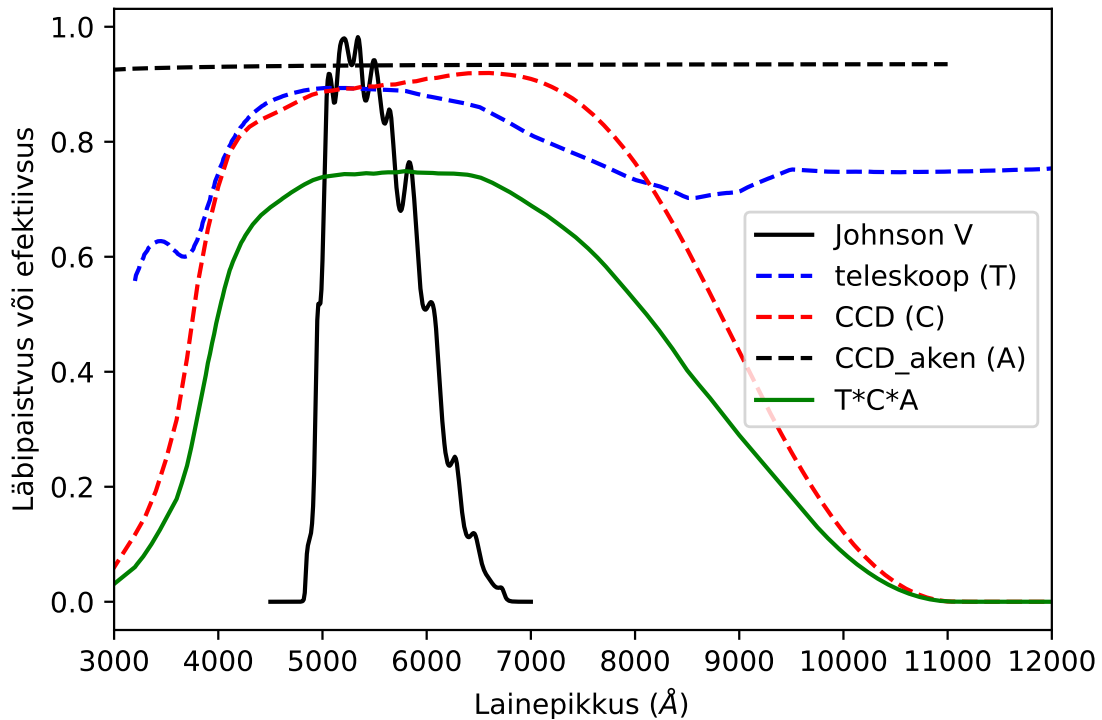
Kui kõikide filtrite mõõtmistulemustega olid valminud joonised, siis sai hakata tegelema sünteetilise fotomeetriaga. Seda tehti Pythoni lisapaketi Astrolib PySynphot⁴ (pysynphot) abil, kasutatud versiooni number oli 2.0.0 (STSci Development Team, 2013; Lim, 2015), lisaks sellele Pythoni pakatile kasutati selles töö etapis ka Matplotlib ja Pandase pakette.

Töö etapp algas sellega, et Internetist ja Synphoti enda andmebaasist tuli alla laadida tähtede mudelspektrid, standardtähtede mõõdetud spektrid ja filtrite läbilaskekõverate andmefailid Hubble'i kosmoseteleskoobi andmebaasist ja Synphoti enda andmebaasist. Seejärel tuli kirjutada JupiterLab'i keskkonnas kood selle jaoks, et saada kätte allalaaditud andmed ning nendega teha joonised, kasutades *for*-tsükli. Seejärel laaditi internetist alla andmefailid kaamera CCD sensori ja CCD akna läbipistvuse efektiivsuse kohta ning teleskoobi pea- ja sekundaarpeegli efektiivsuse andmetabelid. Teleskoobi peapeegel on magneesiumfloriidi (MgF_2) kattega alumiiniumipeegel ja sekundaarpeegel on peegeldusvõimet tõstava titaandioksiid (TiO_2) kattega alumiiniumipeegel, mõlemad on optimeeritud 500 nm jaoks. Seejärel vaadeldi graafiliselt, milline on erinevate efektiivsuste kogumõju lisades sinna veel Johnson V filtrikõvera ja teleskoobi, CCD ja CCD akna korrutised, tulemus on esitatud Joonisel 4.

Seejärel tuli leida teleskoobi peegli peegeldava ala pindala mõõtmisteks. Seda leitakse niimoodi, et leitakse peapeegli ja sekundaarpeegli pindalade vahe, mis kasutataval teleskoobil olid vastavalt 17662.5 cm^2 ja 1256 cm^2 ning nende vahe, ehk teleskoobi peegli valgust koguv pindala, on 16407 cm^2 .

Peale seda tuli varem tehtud filtrite läbilaskvusekõverad sisse lugeda Pythonisse, kasutades selleks *for*-tsükli. *For*-tsükli kasutati töö käigu lihtsustamiseks, sest see kaotas vajaduse kõikide andmete käsitsi sisse trükkimise järele. Peale seda defineeris autor mudelspektritega esitatud tähtede heleduseks Veega heleduste süsteemis kümme tähesuurst (stmag), filtrikõvera ja teleskoobi ning kaamera efektiivsuste korrutise (vt. roheline joon Joonisel 4) abil vaatluse, kasutades taaskord *for*-tsükli. Selliselt määratud sünteetiliste vaatlustega leiti seejärel töös mõõdetud filtrite ja standardfiltrite jaoks instrumentaalsed heledused (instrumentaalne tähesuurus) ja standardheledused.

⁴<https://pysynphot.readthedocs.io/en/latest/>



Joonis 4: Teleskoobi peegeldusteguri, CCD kvantefektiivsuse ja CCD akna läbilaskvuse kogumõju ja mõõdetud Johnson V filtri võrdlus.

Töö autor tegi teise etapi jooksul saadud instrumentaalse heleduse andmete jaoks Panda-se andmetabeli selleks, et andmetega oleks võimalikult lihtne arvutusi teha. Tabelis on vastavalt tähe mudelspektri temperatuurile kõikide filtrite mõõtmistulemused. Mõõdetud andmetele ja standard andmetele olid eraldi tabelid. Kasutatud mudeltähtede temperatuuride vahemik oli 4000 kelvinist kuni 16000 kelvinini, kuni 8000 kelvinini oli temperatuuri samm 500 K ja kuumematel tähtedel 1000 K. Neid heleduste väärtusi, mis tabelisse said sisse kantud, kasutatakse seejärel värviülekanne ja värvusindeksite võrrandites 2 ja 4 olevate kordajate ja konstantide määramiseks.

2.5.1 Värvülekanne võrrandid

Värvülekanne nimetatakse protsessi, mille abil teisendatakse mingi teleskoobi ja filtrite abil tehtud vaatlused standardsesse fotomeetrilisse süsteemi. Alles seejärel on võimalik erinevate teleskoopidega tehtud vaatlusi omavahel võrrelda.

Igas värviülekanne võrrandis olev kordaja on standardse süsteemiga täpselt kokku langeva

mõõtesüsteemi korral täpselt 0. Värvülekande kordaja erineb nullist seda rohkem, mida rohkem erineb mõõtmiseks kautatud filter standardfiltrist. Mõõtesüsteemi peetakse piisavalt heaks, kui kordaja on $|0.1|$, kui väärtus on suurem, ei saa mõõtmistulemusi igat tüüpi tähtede jaoks usaldusväärseks lugeda. Võrrandis olev konstant sõltub mõõtmiseks kasutatavast instrumendist. Värvülekande võrrandid pannakse kirja järgnevalt:

$$\begin{aligned}
B &= b + a_B(B - V) + c_B, \\
V &= v + a_V(B - V) + c_V, \\
V &= v + a_V(V - I_c) + c_V, \\
V &= v + a_V(V - R_c) + c_V, \\
R_c &= r_c + a_{Rc}(V - R_c) + c_{Rc}, \\
I_c &= i_c + a_{Ic}(R_c - I_c) + c_{Ic}, \\
I_c &= i_c + a_{Ic*}(V - I_c) + c_{Ic*}, \\
u' &= u + a_{u'}(u' - g') + c_{u'}, \\
g' &= g + a_{g'}(g' - r') + c_{g'}, \\
r' &= r + a_{r'}(r' - i') + c_{r'}, \\
i' &= i + a_{i'}(i' - zs') + c_{i'}, \\
zs' &= zs + a_{zs'}(i' - zs') + c_{zs'},
\end{aligned} \tag{2}$$

kus võrdusmärgist vasakul pool on standardheledused, paremal pool on mõõdetud heledused, a_X on värvülekande kordajad ja c_X on nullpunktid. Tärn tähistab sama nimega erinevat muutujat.

Värvülekande võrrandites 2 mõõdetud heledused viiakse vasakule poole võrdusmärgi, siis saadakse võrrandid kujul:

$$X - x = a_X(X - Y) + c_X, \tag{3}$$

kus X ja Y on standardheledused kahes filtris ja x on mõõdetud heledus uuritavas filtris. Võrrandiga 3 esitatud seos on sirge võrrand kujul $y = ax + b$.

2.5.2 Värvusindeksite ülekandevõrrandid

Värvusindeksite ülekande võrrandid kirjeldavad, kui lähedased on instrumentaalsed värvusindeksid standartsetele värvusindeksitele. Ideaalsel juhul peaks olema tegu 1:1 seosega – võrrandi tõus on 1.0 ja vabaliige on 0. Värvusindeksite ülekandevõrrandid pannakse kirja järgnevalt:

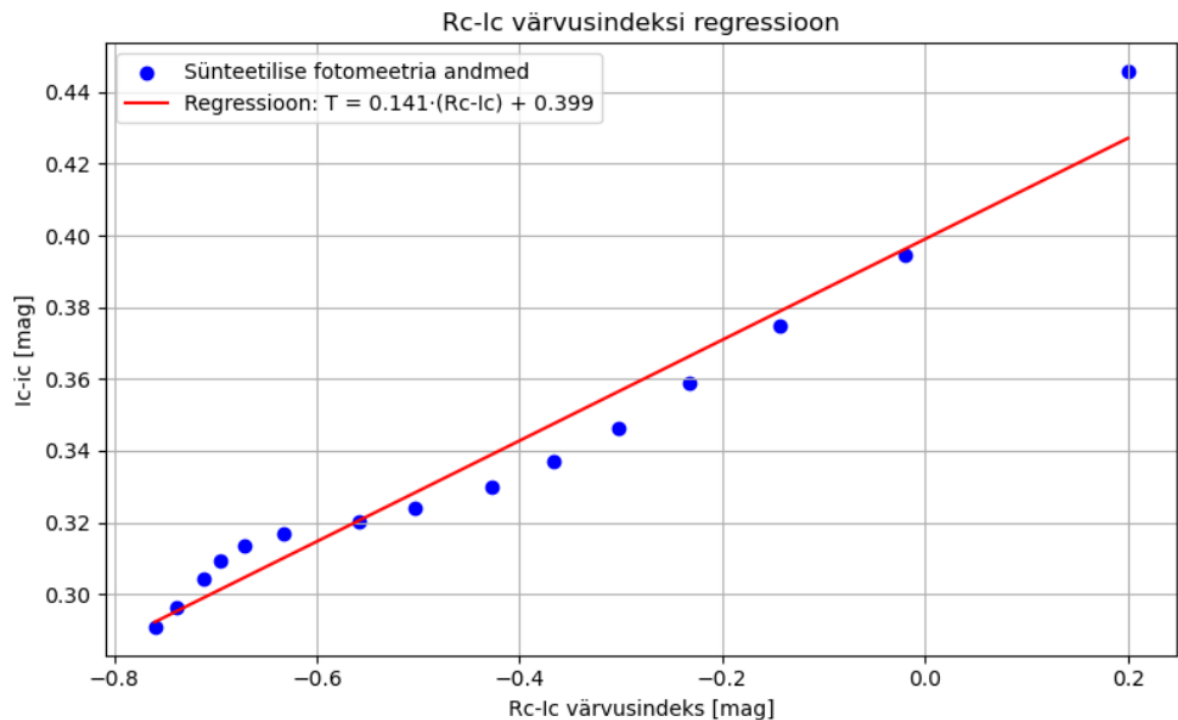
$$\begin{aligned}(b - v) &= \mu_{BV}(B - V) + c_{BV}, \\(v - r) &= \mu_{VR}(V - R_c) + c_{VR}, \\(r_c - i_c) &= \mu_{IRc}(R_c - I_c) + c_{IRc}, \\(v - i_c) &= \mu_{VIc}(V - I_c) + c_{VIc}, \\(u'' - g'') &= \mu_{ug'}(u' - g') + c_{ug'}, \\(g'' - r'') &= \mu_{gr'}(g' - r') + c_{gr'}, \\(r'' - i'') &= \mu_{ri'}(r' - i') + c_{ri'}, \\(i'' - zs'') &= \mu_{isz'}(i' - zs') + c_{isz'},\end{aligned}\tag{4}$$

kus võrdusmärgist vasakul pool on instrumentaalne ehk mõõdetud värvusindeks ja paremal pool on standardsed värvusindeksid, μ_{XY} on värvusindeksi ülekandekordajad ja c_{XY} on nullpunktid. X ja Y tähistavad kahte erinevat, värvusindeksi leidmiseks kasutatud standardfiltrit. Sloan'i filtrite puhul tähistab kaks ülakoma, et tegu on instrumentaalsete heledustega.

2.5.3 Värvülekandevõrrandite ja värvusindeksite võrrandite kordajate leidmine

Värvülekande võrrandid ja filtrite regresioonid tegi autor kasutades lisapakette SciPy, Numpy ja Matplotlib. Värvusindeksit arvutati kasutades kahe filtri väärtuste vahesid, seejärel arvutati standard- ja mõõdetud filtri väärtuste vahe. Saadud andmetega tehti lineaarne regressioon ning kasutades seda, sai leida sirge tõusu ja vabaliikme. Regressioonisirged koos andmepunktidega on toodud näiteks Joonisel 8g. Ülejäänud värvülekande ja värvusindeksite regressioonid on toodud lisades Lisa 2 ja Lisa 3.

Regressioonis kasutatava sirge võrrandi lahendas autor kasutades SciPy lisapaketti, mis arvutas ära värvülekande võrrandi ja selle abil sai joonestada sirge, mida saab kasutada ideaal-



Joonis 5: Johnson Ic filtri regressiooni graafik. Joonisel olevad sinised punktid esitavad standardfiltri ja mõõdetud filtri sünteetiliste fotomeetriliste mõõtmiste vahet.

väärtuse näitajana. Joonisel 5 oleva värviülekanne võrrandi järgi võib järeldada, et värvusindeks on liiga väike ja võrrandi koefitsent on liiga suur. See tähendab seda, et vastava filtri andmed ei kattu ideaalselt standardfiltri andmetega.

Võttes kokku kõik värviülekanne võrrandite tulemused, võib väita, et kõik filtrid on vastavalt lubatud normide piires, kuna kõikide andmed jäävad lubatud piirkonda, milleks loetakse kuni 10% suurust erinevust võrreldes standardandmetega.

3 Tulemused

Töö käigus valmisid andmefailid mõõdetud filtrite läbilaskekõrveratega, erinevate graafikutega filtrite ja nende võrdlusega standardfiltritega. Need andmefailid ja joonised on kättesaadavad [Lisa 6](#) kaudu.

Töö arvuliseks lõpptulemuseks on värviülekande võrrandid, mis näitavad standardfiltrite mõõdetud filtrite vahe ning värvusindeksite omavahelist korrelatsiooni, mida kirjeldati valemitega [2](#). Arvutustest tuli välja tõsiasi, et filtrite mõõdetud andmed jäid lubatud vahemikku, milleks oli $\pm 10\%$ standardväärtusest. Värvusülekande kordajal oli selleks väärtuseks 1 ja värvusindeksi kordaja standardväärtuseks oli 0. Lõpuks pandi need väärtused kahte tabelisse. Esimesse tabelisse pandi tulemused, mis saadi värviülekande regresioonide abil, mis on näidatud Tabelis [3](#). Tabelis [4](#) on vastavalt värvusindeksile värvusindeksi ülekande kordaja ja vabaliikme väärtused, mis leiti valemite [4](#). Tabelites olevaid andmeid saab kasutada selleks, et viia läbi vaatlusi päris tähtedega.

Tabel 3: Värvülekande kordajad (vt. valemid [2](#)) vastavalt kasutatud filtrile ja värvusindeksile

Filter	Värvusindeks	Värvülekande kordaja
Johnson B	(B-V)	-0.0451 ± 0.0014
Johnson V	(B-V)	0.0286 ± 0.0008
Johnson V	(V-Ic)	0.0252 ± 0.0004
Johnson V	(V-Rc)	0.0545 ± 0.0009
Johnson Rc	(V-Rc)	-0.2700 ± 0.0006
Johnson Rc	(Rc-Ic)	-0.0232 ± 0.0005
Johnson Ic	(Rc-Ic)	0.1406 ± 0.0079
Johnson Ic	(V-Ic)	0.0755 ± 0.0046
Sloan u	(u-g)	-0.1310 ± 0.0258
Sloan g	(g-r)	0.0395 ± 0.0050
Sloan r	(r-i)	0.0847 ± 0.0043
Sloan i	(i-zs)	0.2512 ± 0.0053
Sloan zs	(i-zs)	-0.0101 ± 0.0019

3.1 Tekkinud probleemid

Tööd tehes tekkisid erinevad probleemid. Mõned neist olid väiksemad ja teised suuremad. Esimene tekkinud probleem oli see, et monokromaatori lamp põles läbi just sel hetkel, kui taheti alustada mõõtmistega. Probleemi lahendas ära Tartu Observatooriumi teadlane Ilmar

Tabel 4: Filtrite värvusindeksi ülekande kordaja (vt. valemid 4) ja vabaliige vastavalt värvusindeksile

Värvusindeks	Vabaliige	Värvusindeksi ülekande kordaja
(B-V)	0.5301	1.0795 ± 0.0018
(V-Rc)	-0.3292	0.9246 ± 0.0013
(Rc-Ic)	0.7093	1.1944 ± 0.0118
(V-Ic)	0.2193	1.0526 ± 0.0048
(u-g)	-0.2535	1.0342 ± 0.0271
(g-r)	-0.5758	0.9983 ± 0.0068
(r-i)	0.3443	1.0593 ± 0.0118
(i-zs)	0.9660	0.7926 ± 0.0036

Ansko, vahetades ära spetsiaalse lambipirni. Teine probleem kerkis siis, kui autor jäi haigeks jõuluvahetajal, sest selleks ajaks oli planeeritud suurem hulk töö tegemist. Töö käigus tekkis probleem veel sellega, et andmed, mis olid toleks hetkeks saadud, olid valedes ühikutes ning need oli vaja teisendada õigetes ühikutesse.

Lisaks ei töödanud PySynphot nii nagu juhend ette nägi, seetõttu tuli teha kood teistmoodi mis võttis kauem aega.

Töö käigus tekkis segadus filtrite referentside mõõtmisel, kuna üks referentside mõõtmisfail oli salvestatud imelikult ja vale nimega. Probleem lahendati andmete käsitsi üle vaatamisega.

3.2 Autori hinnang praktilisele tööle

Töö praktiline osa kulges võrdlemisi hästi. Kuna autor polnud varem sellist asja teinud, siis võib öelda, et töö on tehtud üpris hästi olgugi, et arenguruumi on kõvasti. Töö esimene pool, mis algas filtriturelli kokkupanekust ja lõppes mõõdetud läbilaskeribade võrdlusega standardsete läbilaskeribade andmetega graafiliselt, läks hästi. Olgugi et esimene pool võttis natuke rohkem aega, kui alguses oli plaanis, sest andmete mõõtühikud olid vajalikest erinevad ja programmeerimiskeelt Python tuli alles õppida. Töö teist poolt tehes oli autor kerges ajahädas, kuna töö esimene pool osutus mahukamaks, kui autor oli esialgu arvanud ning teine töö pool osutus veelgi mahukamaks. Peale selle ei saanud töö autor kõige paremini hakkama Pythoni kasutamisega, mille tõttu pidurdas see töö teist etappi ning see kujunes väga ajamahukaks.

KOKKUVÕTE

Töös püstitatud eesmärgid said täidetud edukalt, sest filtrite läbilaskekõverate mõõtmine sai tehtud kasutades monokromaatorit. Mõõtmiste andmeid kasutati selleks, et teha joonised iga filtri kohta. Andmeid, mis saadi jooniste tegemisest kasutati selleks, et moodustada Pythonis dict, mis sisaldab neid filtrite läbilaskekõveraid ning antud andmetega sai defineerida vaatlused. Selleks kasutati filtrikõverate andmeid, defineeritud Vega spektrit ja teleskoobi, CCD kaamera ja CCD kaamera akna efektiivsuste korrutist. Pannes need kolm andmehulka kokku, oli võimalik arvutada igast filtrist läbimineva valguse heleduse. Kui filtrite heledused olid leitud, sai hakata looma tabelit, kus olid filtrite heledused antud vastavalt neile mõjuvate temperatuuridele. Tabel tehti selle jaoks, et andmed oleks visuaalselt hästi näha. Kui tabel sai valmis, tehti filtrite regressiooni joonised, mis näitasid, kui täpsed on mõõtmisandmed võrreldes lineaarse sirgega.

Ülesanded said tehtud korralikult ning neid võiks hinnata kõrgelt, kuna filtrite läbilaskeribade mõõtmine läks edukalt, sest igale filtrile valmis joonis tema läbilaskekõvera kohta ning lisaks valmisid joonised, kus olid koos mõõdetud läbilaskekõvera joonis ja standardfiltri läbilaskekõvera joonis, mida sai visuaalselt võrrelda. Lõpuks valmisid iga filtri kohta värviülekande võrrandid, kasutades sünteetilist fotomeetriat.

Tulevikus saaks seda tööd edasiarendada mitut moodi. Näiteks võiks töö käigus mõõdetud filtreid kasutada selleks, et vaadelda päris tähti võrdluseks autori tehtud sünteetilistele vaatlustele nagu tegi seda töö autor ja teha andmete töötlemine automaatsemaks.

Töö käigus loodud elektroonilised andmefailid on kättesaadavad lisas [Lisa 6](#) viidatud viisil.

SUMMARY

Characterization of photometer filters of the 1.5-meter telescope of the Tartu Observatory of University of Tartu. This project for Tartu University's observatory is focused on measurements of photometric filters bandpasses which are compared to the standard bandpass filter information. Both measured filter and standard bandpasses were used in synthetic observations using Python package PySynphot. This project also gives a quick summary about the theoretical part of the research and a overview about the practical side of the project.

Photometry is a research technique which is used in astronomy. It's used to measure the amount and what kind of light that is registered by the photometer. Oftentimes the observations are done to stars which can be compared with standard stars.

Standard stars are stars which have been observed for a long time. Over the time, these stars have been used as a standard for observations. That's because their values have been agreed upon by scientists all over the world, because the brightness of those stars hasn't changed over the years.

The practical part of the research contained a step by step guide how the job was done. It showed how the filters are installed onto the filter wheel and then calibrated in the observatory's radiometry lab. Then the results are compared with standard filter information.

After that the data is used for plotting figures. Afterwards filter bandpasses made by the author are used in synthetic photometry, in which they are used to define synthetic observations.

Then along side with the brightnesses in stellar magnitudes from synthetic observation data, colour indices are found both from measured and standard filters. Colour transformation and colour index transformation equations were solved.

In the research practical part the installation of filters to the filter wheel went smoothly and the filter measuring went excellently. When the filter data was made into figures it took quite a bit time because a few sets of data had mistakes in them and the sorting took some time. When the figures were completed, the data from them was used in the next process called synthetic photometry which was made inside Python using packages like Matplotlib, Pandas and PySynphot. The observed regression was done by using same packets as named previously

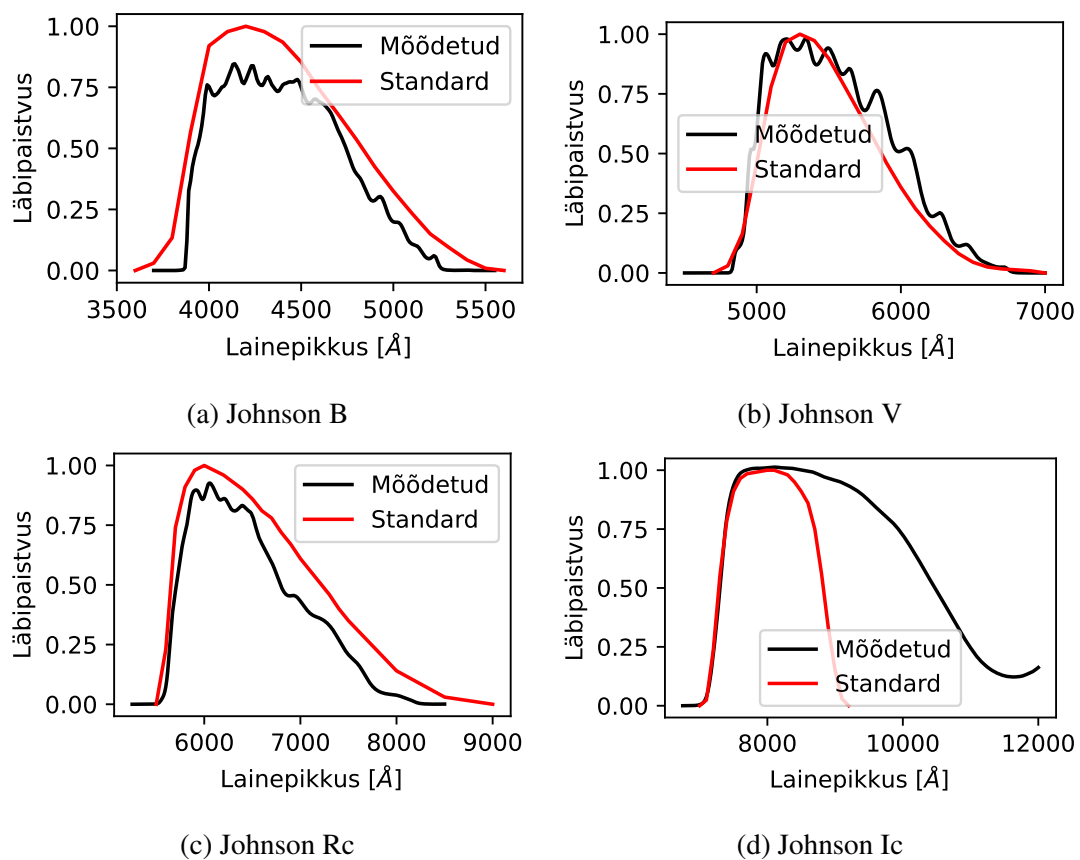
with the addition of a package called SciPy.

Materials from this work are accessible from electronic appendix referenced in [Lisa 6](#).

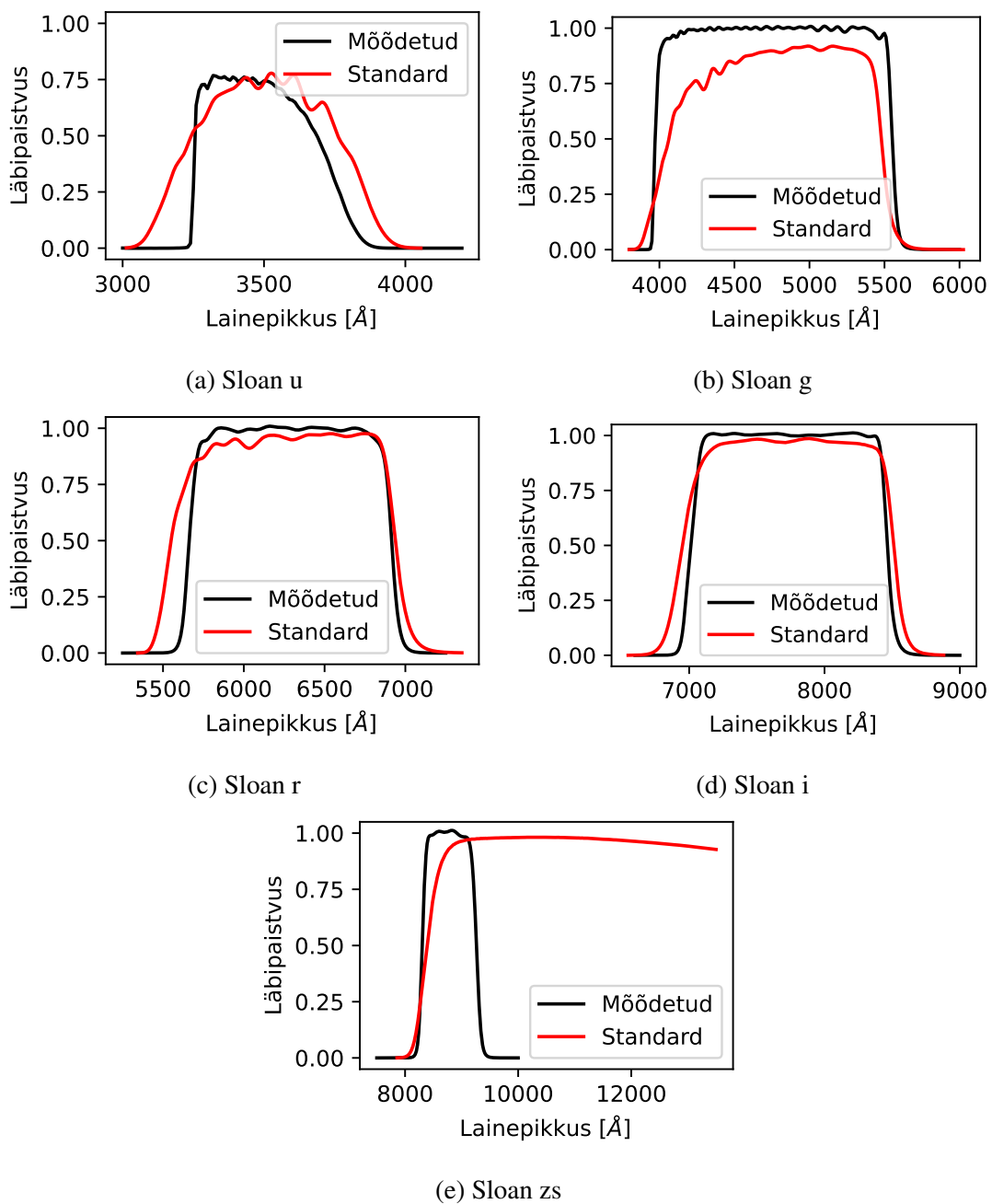
Viited

- M. S. Bessell. UBVRI passbands. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 102: 1181–1199, October 1990. doi:[10.1086/132749](https://doi.org/10.1086/132749).
- M. S. Bessell. Standard Photometric Systems. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 43(1):293–336, September 2005. doi:[10.1146/annurev.astro.41.082801.100251](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.082801.100251).
- O. Eenmäe. Gümnaasiumi uurimistöö elektrooniline lisa. Zenodo andmekogu, 2025. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.15446635>.
- C. R. Kitchin. *Astrophysical Techniques*. IOP Publishing Ltd, 1998.
- Diaz R. I. Laidler V. Lim, P. L. *PySynphot User's Guide*. Baltimore, MD: STScI, 2015. URL <https://pysynphot.readthedocs.io/en/latest/>.
- STScI Development Team. pysynphot: Synthetic photometry software package. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1303.023, March 2013.

Lisa 1 Mõõdetud- ja standardfiltri läbilaskekõverad

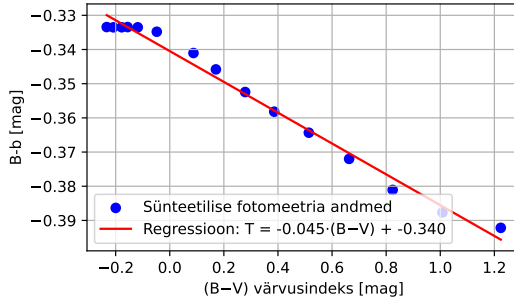


Joonis 6: Johnson-Cousins'i filtrite joonised, kus punasega on esitatud standardfiltrite ja mustaga mõõdetud filtrite läbilaskekõverad.

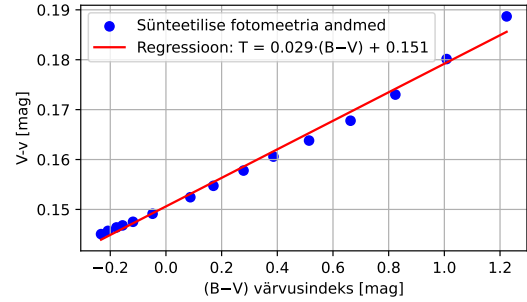


Joonis 7: Sloan'i filtrite joonised, kus punasega on esitatud standardfiltrite ja mustaga mõõdetud filtrite läbilaskekõverad.

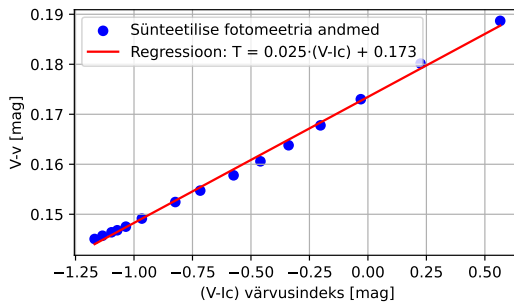
Lisa 2 Filtrite värviülekande võrrandid



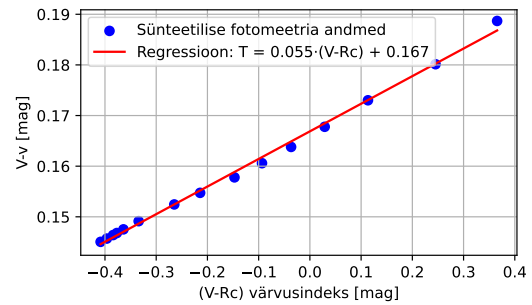
(a) Johnson B (B-V)



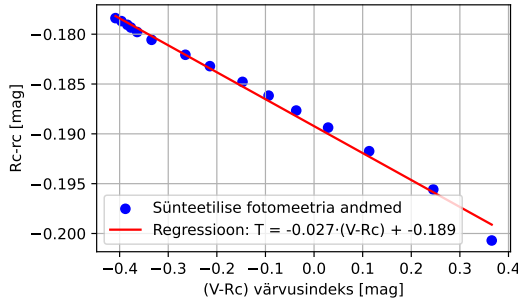
(b) Johnson V (B-V)



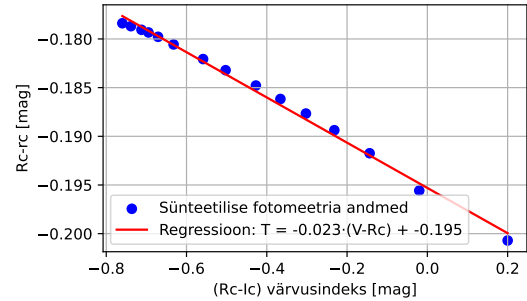
(c) Johnson V (V-Ic)



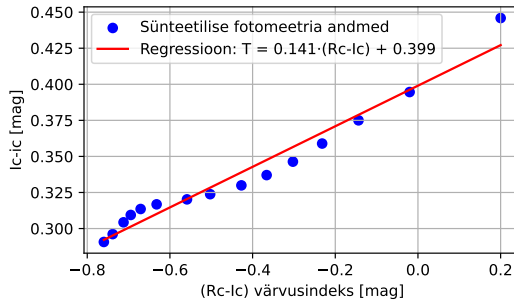
(d) Johnson V (V-Rc)



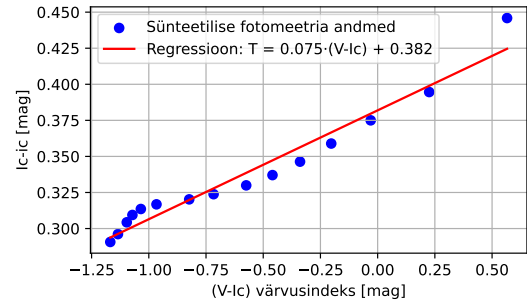
(e) Johnson Rc (V-Rc)



(f) Johnson Rc (Rc-Ic)

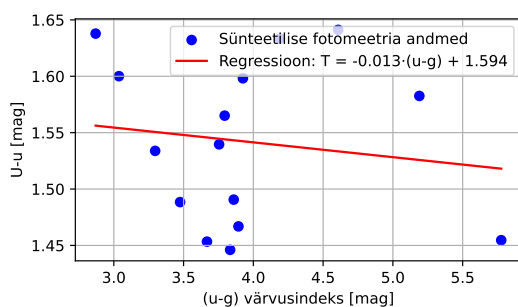


(g) Johnson Ic (Rc-Ic)

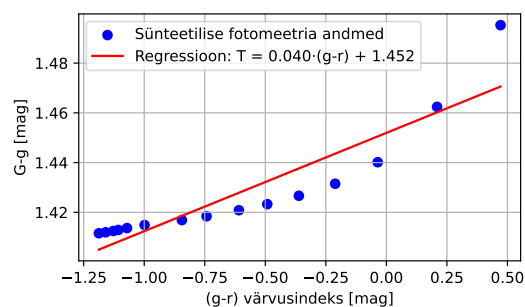


(h) Johnson Ic (V-Ic)

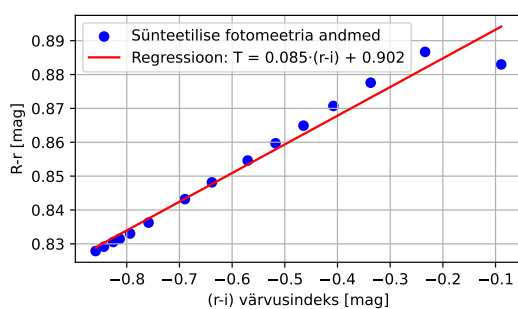
Joonis 8: Johnson-Cousinsi filtrite värviülekande regressiooni kõverad.



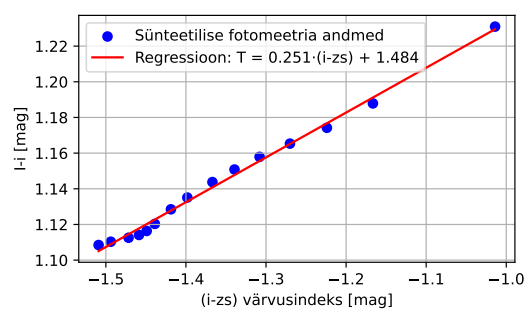
(a) Sloan u



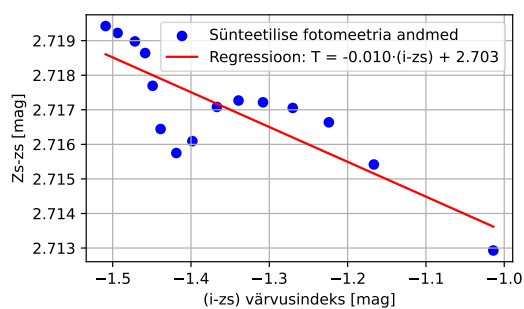
(b) Sloan g



(c) Sloan r



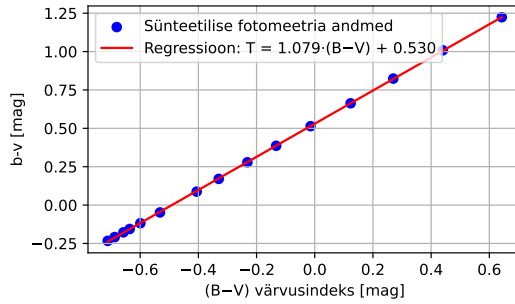
(d) Sloan i



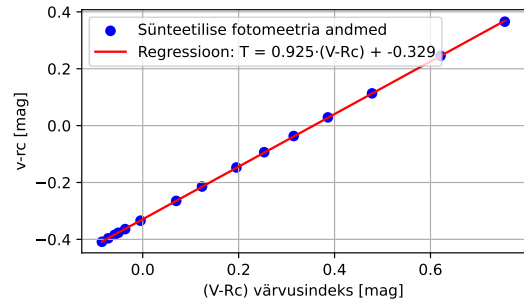
(e) Sloan zs

Joonis 9: Sloan'i filtrite värvivõlekanade regressiooni kõverad.

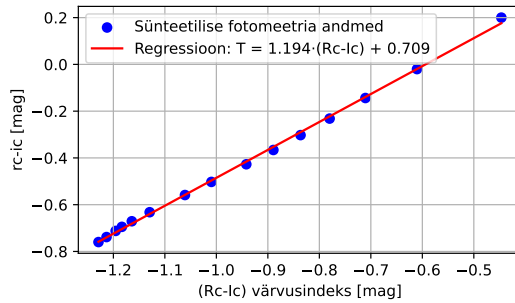
Lisa 3 Standardsete ja instrumentaalsete värvusindeksite võrdlus



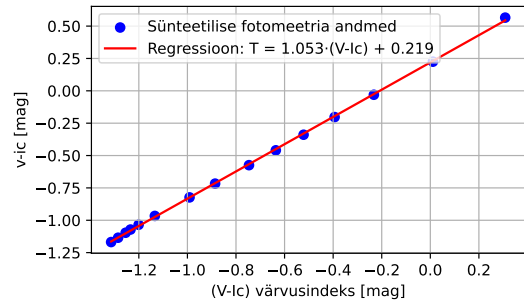
(a) Johnson B (B-V)



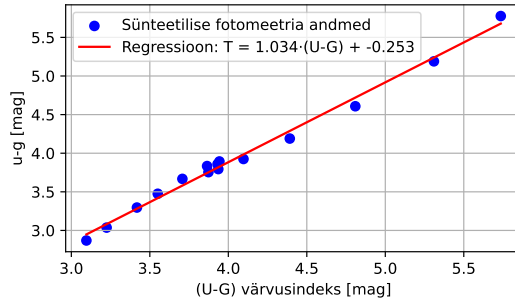
(b) Johnson Rc (V-Rc)



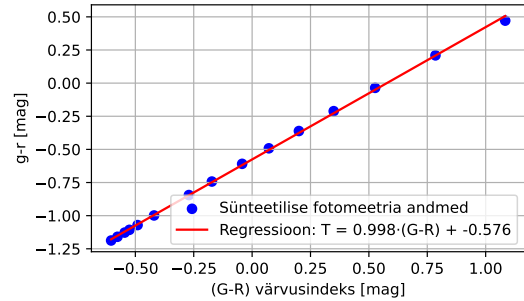
(c) Johnson Ic (Rc-Ic)



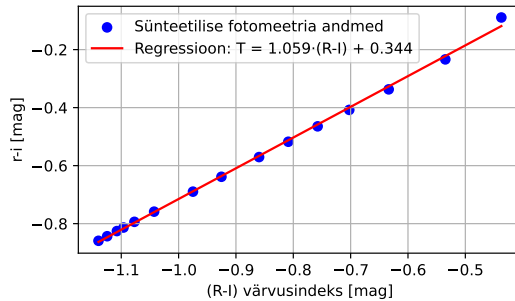
(d) Johnson Ic (V-Ic)



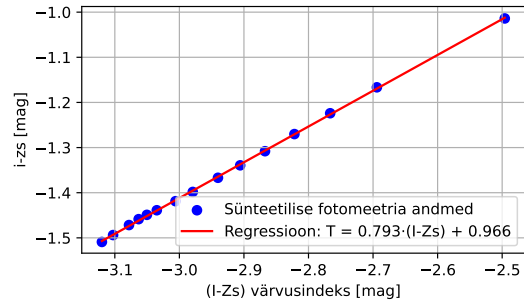
(e) Sloan u (u-g)



(f) Sloan g (g-r)



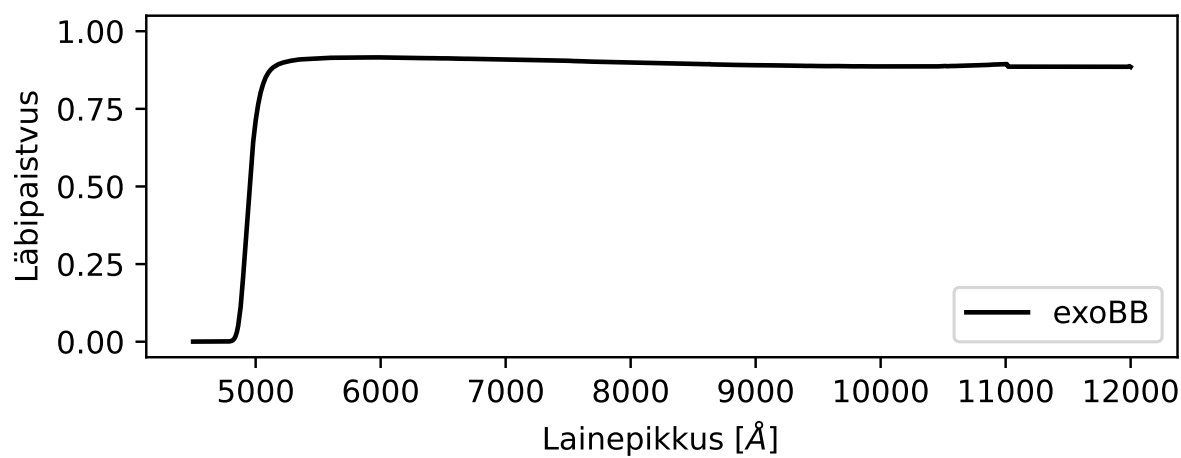
(g) Sloan r (r-i)



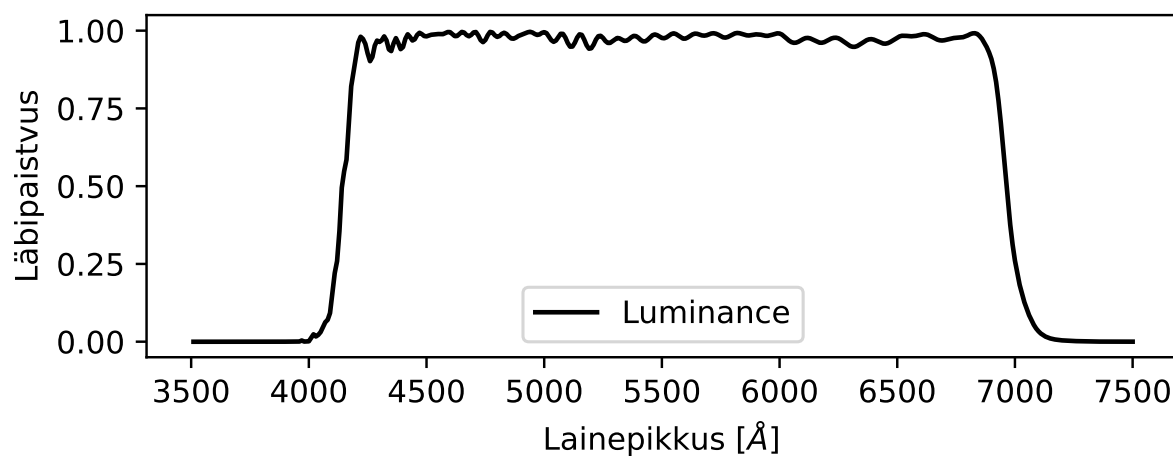
(h) Sloan i (i-zs)

Joonis 10: Johnson-Cousinsi filtrite värvusindeksite regressiooni kõverad.

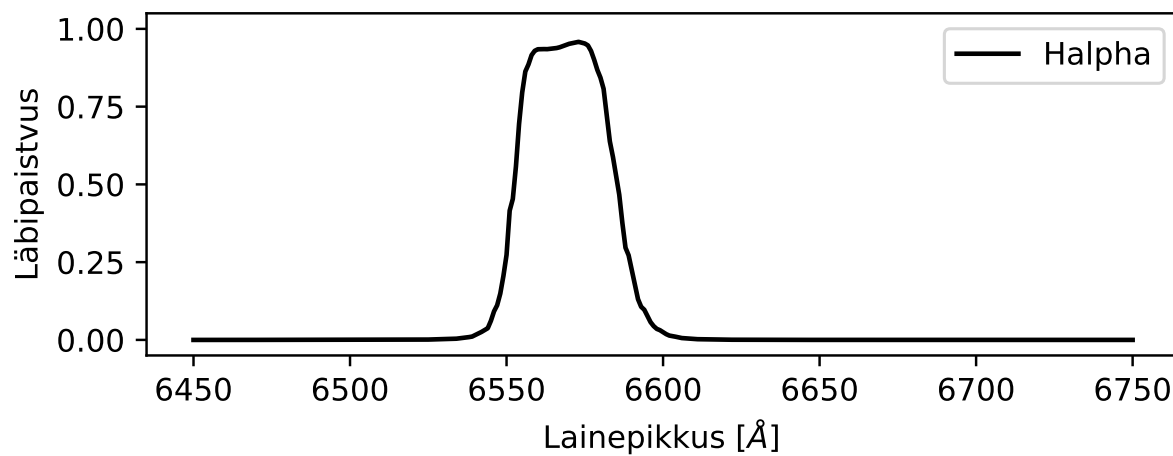
Lisa 4 Fotomeetriliste süsteemide välised filtrid



(a)



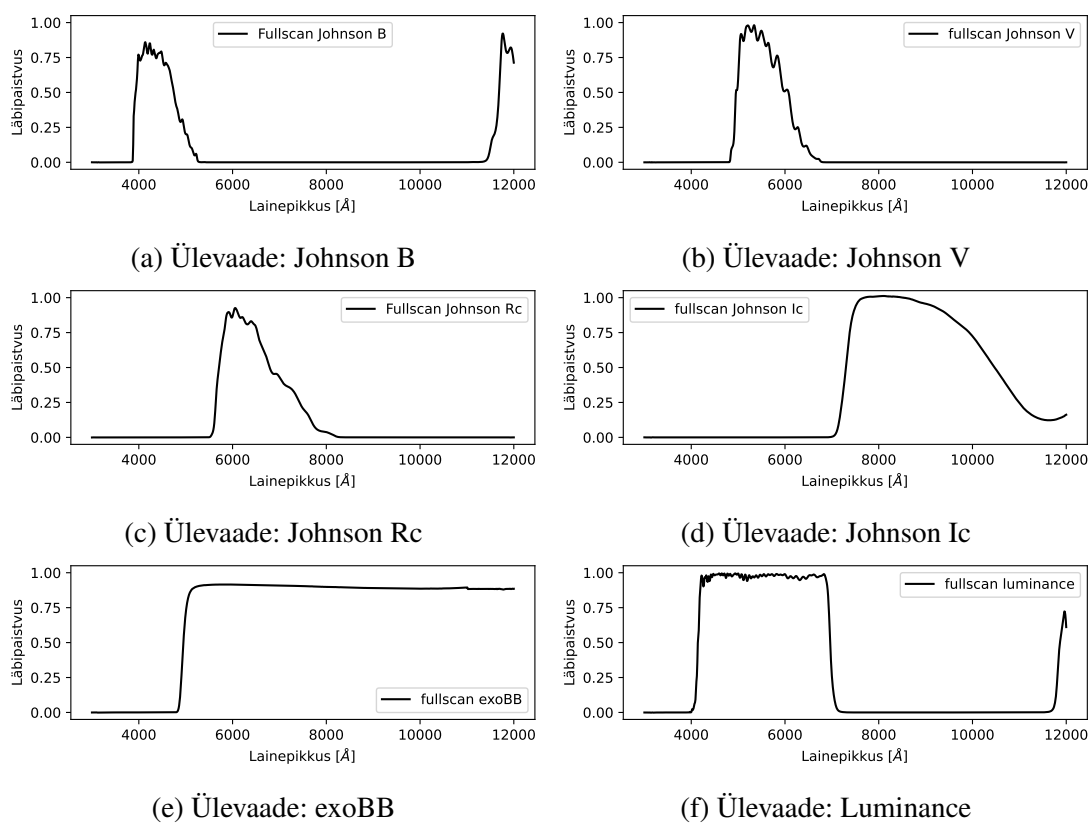
(b)



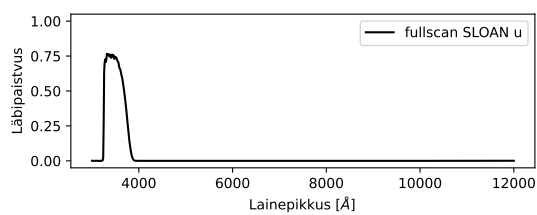
(c)

Joonis 11: Fotomeetriliste süsteemide välised filtrid: Halpha, Luminance ja exoBB.

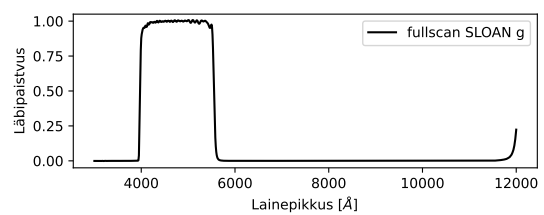
Lisa 5 Filtrite ülevaatlikud läbilaskekõverad



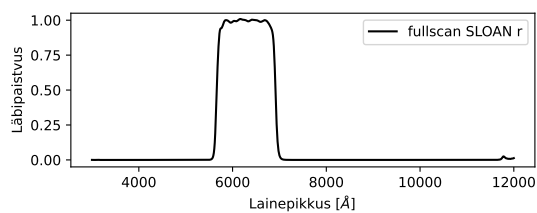
Joonis 12: Johnson-Cousinsi, exoBB ja Luminance filtrite ülevaatekõverad.



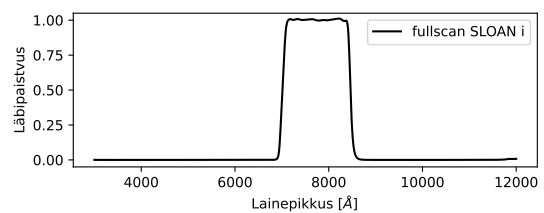
(a) Ülevaade: Sloan u



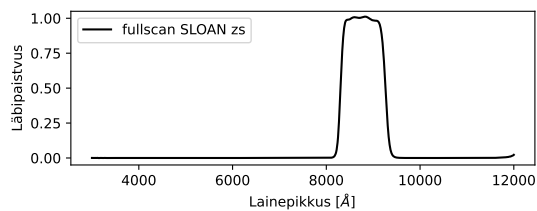
(b) Ülevaade: Sloan g



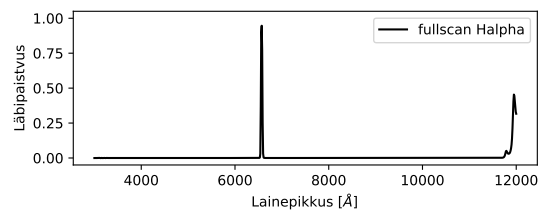
(c) Ülevaade: Sloan r



(d) Ülevaade: Sloan i



(e) Ülevaade: Sloan zs



(f) Ülevaade: Halphi

Joonis 13: Sloan'i ja Halphi filtrite ülevaatekõverad.

Lisa 6 Elektroonilised lisad

Töoga seotud elektroonilised lisad on kättesaadavad allika (Eenmäe, 2025) kaudu andmerekopisitooriumist Zenodo aadressilt <https://doi.org/10.5281/zenodo.15446635>.