

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond

Ann Alice Ehala

**TELESKOABI RAITIS SÜVAFOTOMEETRIA
GALAKTIKA NGC 3448 NÄITEL**

Bakalaureusetöö

Juhendajad: PhD Antti Tamm
MSc Tõnis Eenmäe

Tartu
25.05.2015

Sisukord

1	Sissejuhatus	4
2	Uurimismeetod	6
2.1	Teleskoop RAITS	6
2.2	Astronoomilised vaatlused	7
2.3	Galaktika NGC 3448	8
3	Vaatlusandmete töötlus	12
3.1	RAITSi vaatlusandmed	12
3.1.1	Kaadrite valik	12
3.2	Instrumentaalsete heleduste kalibreerimine	14
3.2.1	Instrumentaalsete heleduste mõõtmine	16
3.2.2	Instrumentaalne nullpunkt	17
3.2.3	Filtrid B ja V	18
3.2.4	Filtrid R ja I	18
3.3	Galaktika koguheleduse määramine	20
3.3.1	Galaktika koguheledus SDSS g_s , r_s , i_s ja z_s filtrites	22
3.4	SDSS vaatlusandmed	23
3.5	Galaktika pindheledus	23
4	Tulemuste analüüs	29
4.1	Galaktika koguheledus	29
4.2	Galaktika pindheledus ja süvafotomeetria	30
5	Kokkuvõte	34
	Kasutatud kirjandus	36
	Summary	38
6	Lisa 1	40
6.1	Tähtede instrumentaalsed heledused Johnson-Cousinsi B,V, R_c ja I_c filtrites	40

6.2	Instrumentaalse nullpunkti määramine B ja V filtrites	40
6.3	SDSS filtri heleduste teisenemine Johnson-Cousinsi filtri heledusteks .	41
6.4	Instrumentaalse nullpunkti ja määramatus R_c ja I_c filtris	41
7	Lisa 2	43
7.1	Galaktika NGC 3448 Johnson-Cousinsi B, V, R, I filtrites	43
7.2	Pindheledusjaotused B, V, R_c , I_c filtrites	46

1 Sissejuhatus

2014. aasta jaanuaris plahvatas Suure Vankri tähtkujus galaktikas NGC 3448 supernoova SN 2014G. Supernoova heleduse järkjärgulise kahanemise mõõtmiseks vaadeldi galaktikat pool aastat ka Tartu Observatooriumi automaattteleskoobiga RAITS¹. Kuna supernoova heleduse mõõtmisi tehti paljudel öödel, siis pikk summaarne säriaeg lõi hea võimaluse ebakorrapärase² galaktika NGC 3448 ehituse ning RAITS teleskoobi fotomeetriliste mõõtmiste küündivuse uurimiseks.

Tartu Observatooriumis on hetkel kasutusel kolm teleskoopi. Kuigi observatooriumis tegutseb ka galaktikate uurimisrühm, ei ole Eesti madala paiknemise merepinnast, valgusreostuse ning tagasihoidliku astrokliima tõttu peetud mõistlikuks väikse pindheledusega objektide nagu galaktikate vaatlemist. Seetõttu ei ole läbi viidud ühtegi põhjalikumat uurimust või analüüsi, mis kirjeldaks RAITS teleskoobiga nõrkade allikate vaatlemise piiranguid. Käesolev töö on ajendatud huvist vaatlusliku astronoomia ja galaktikate vastu ning võimalusest tegeleda sellega Tartu Observatooriumi enda teleskoobiga. Lisaks heale õppimisvõimalusele annab lõputöö ka ülevaate teleskoobi RAITS fotomeetria küündivusest, mis võiks, heade tulemuste korral, avardada Tartu Observatooriumis vaadeldavate objektide nimistut. Pikemas perspektiivis võib galaktikate vaatlemise võimalus Tartu Observatooriumis luua uusi uurimissuundi.

Käesoleva bakalaureusetöö peamine eesmärk on selgitada välja RAITS teleskoobi võimalused ja piirangud väga nõrkade taevaobjektide vaatlemiseks galaktika NGC 3448 näitel. Eelmainitud galaktika on suhteliselt vähe uuritud ja ebakorrapärase struktuuriga, tehes temast huvitava uurimisobjekti. Töö põhiliseks uurimisküsimuseks on, kuidas mõjutavad Eesti kesine astrokliima ja teleskoobi RAITS enda omadused (nt ava diameeter) süvafotomeetriaga tegelemist ning nõrkade allikate uurimist.

RAITS teleskoobi ning uuritava galaktika omadustega tutvumiseks:

- kombineeriti igas filtris paljud üksikud vaatluskaadrid üheks, pikema efektiivse säriajaga kaadriks;

¹RAITS ehk Raivo Annetatud Intelligentne Teleskoobi Süsteem

²Galaktikate peamised liigid struktuuri põhjal on: elliptilised, spiraalsed ja ebakorrapärsed.

- kalibreeriti mõõdetud heledused fotomeetriliselt kaadri vaatevälja jäänud võrdlustähtede abil;
- mõõdeti galaktika koguheledused RAITSi ja Sloani taevaülevaate (edaspidi SDSS e. *Sloan Digital Sky Survey*) vaatluskaadritelt ning võrreldi kirjandusest leitud tulemustega;
- mõõdeti galaktika pindheledusjaotused piki erinevaid läbilõikeid, et teha selgeks RAITSi kombineeritud kaadritega saavutatud fotomeetriline sügavus. Tulemusi võrreldi SDSS kaadritest määratud pindheledusjaotusega ning SDSS teleskoobi fotomeetrilise sügavusega.

Töö koosneb kolmest peatükist, millest esimeses antakse ülevaade uurimisobjektidest ja meetodikast. Sellele järgneb nii RAITSi kui SDSS andmetöötluse kirjeldus ning kolmandas peatükis analüüsitakse mõõtmistulemusi.

2 Uurimismeetod

2.1 Teleskoop RAITS

Teleskoobi RAITS kinkis Tartu Observatooriumile 2011. aastal hobiastronoom ja ettevõtja Raivo Hein. Teleskoopi täiendati täisautomatiseeritud kupliga, CCD-kaamera, filtrite, ilmajaamaga ja rakendati tööle 2012. aastal (*Tõravere observatooriumi aastaraamat 2012*). Esimesed vaatlused tehti 2013. aasta aprillis.

Teleskoobi RAITS optiliseks osaks on tasase väljaga³ peegelteleskoop Planewave CDK12.5. Tema Dall-Kirkhami optiline skeem koosneb elliptilise kumerusega pea-pegelist läbimõõduga 317 mm, sfäärilise kumerusega sekundaarpegelist ning kahest lisaläätsest, mis asuvad fokaaltasandi ees ja parandavad optilisest teljest kaugemal asetsevate kujutiste kvaliteeti.

Fookuskaugus, mis iseloomustab teleskoobi vaatevälja laiust, on RAITS teleskoobil 2540 mm ning suhteline ava⁴ $F/8$. RAITS on varustatud CCD-kaameraga Apogee Alta U42 D09, mille sensor on suurusega 2048×2048 pikslit. Pikslile vastav taevanurk on 1.095 kaaresekundit ning kogu välja suurus on $37' \times 37'$. Fotomeetri hulka kuuluvad Astrodon Photometrics B,V,R,I Johnson-Cousins filtrid, mille läbilaskvuse kõverad on toodud ära joonisel 2. Teleskoop RAITS on paigaldatud väga kõrge kvaliteediga ekvatoriaalsele monteeringule Paramount ME ning asub 3 m läbimõõduga automatiseeritud kupli all. Teleskoopi saab kogu vaatluse käigus juhtida programmiga ACP läbi veebiliidese.

Töös võrreldakse teleskoobi RAITS vaatlusi Sloani taevaülevaate kümnennda väljalakse (York et al. 2000) vaatlustega. SDSS teleskoop on 2.5 m diameetrilise avaga peegelteleskoop, mille suhteline ava on $F/5$ (Gunn et al. 2006). SDSS kasutab fotomeetrilist filtrite süsteemi *ugriz*, mille kostefunktsioonid on toodud ära joonisel 2.

³Teleskoopi, mille fokaaltasand ei ole kumer, nimetatakse tasase väljaga teleskoobiks

⁴Teleskoobi fookuskauguse suhet ava läbimõõtu nimetatakse teleskoobi suhteliseks avaks ja seda tähistatakse astronoomias F/n , kus n on fookuskauguse ja apertuuri jagatis.

⁵<http://planewave.com/products-page/telescopes/12-5-inch-cdk-optical-tube-assembly/>



Joonis 1: Teleskoop Planewave CDK12.5. Pilt pärineb firma PlaneWave Instruments veebilehelt⁵.

2.2 Astronoomilised vaatlused

Käesolevas töös uuritakse galaktikat NGC 3448 fotomeetriliselt. Fotomeetrilistel mõõtmistel registreeritakse valgusallika kiirgusvoo koguintensiivsus ja ruumiline jaotus, lahutamata saabuvat valgust spektriiks. Väga pikkade säriaegadega mõõtmisi nimetatakse omakorda süvafotomeetriaks (ing. k. *deep photometry*). Süvafotomeetria kaadritel ilmuvad pika säri tõttu nähtavale väga nõrgad objektid, milleks võivad olla galaktikate hõredad tähepiirkonnad, näiteks galaktikate kokkupõrgete tagajärjel tekkinud "sabad" ehk tähevoolus (ing. k. *stellar streams*). Tänapäeval kasutatakse fotomeetrite sensoriteks enamasti CCD-kaameraid. Teleskoobiga kogutud valguse tekitatud elektriline signaal CCDs teisendatakse digitaalses mõõtmisprotsessis objekti instrumentaalseks heleduseks.

Ajaloolistel põhjustel iseloomustatakse astronoomias valgusallika heledust tähesuurustes, mille logaritmilise skaala arendas välja Norman R. Pogson 19. sajandil, kuid mille esialgne idee pärineb juba vanakreeka astronoomilt Hipparchoselt teisest sajandist e.Kr. Pogson defineeris tähesuuruse m võrrandiga

$$m = -2.5 \log \left(\frac{F}{F_0} \right), \quad (1)$$

kus F on uuritava objekti kiirgusvoo tihedus ning F_0 on kokkuleppelise null tähesuurusega allika kiirgusvoo tihedus. Tähesuurused on ühikuteta ning seetõttu tähistatakse neid ülaindeksiga $m = 4^m$ või tähisega $m = 4 \text{ mag}$. Negatiivne kordaja pöörab heleduste skaala tagurpidi, mistõttu on heledatel tähtedel arvuliselt väiksem

(vahel isegi negatiivne) tähesuurus ja nõrkadel objektidel arvuliselt suurem tähesuurus. Kuna vaatlustes registreeritakse kiirgusvoo asemel footonite tekitatud signaali CCD sensoril, siis valem (1) muutub

$$m = -2.5\log(N) + C, \quad (2)$$

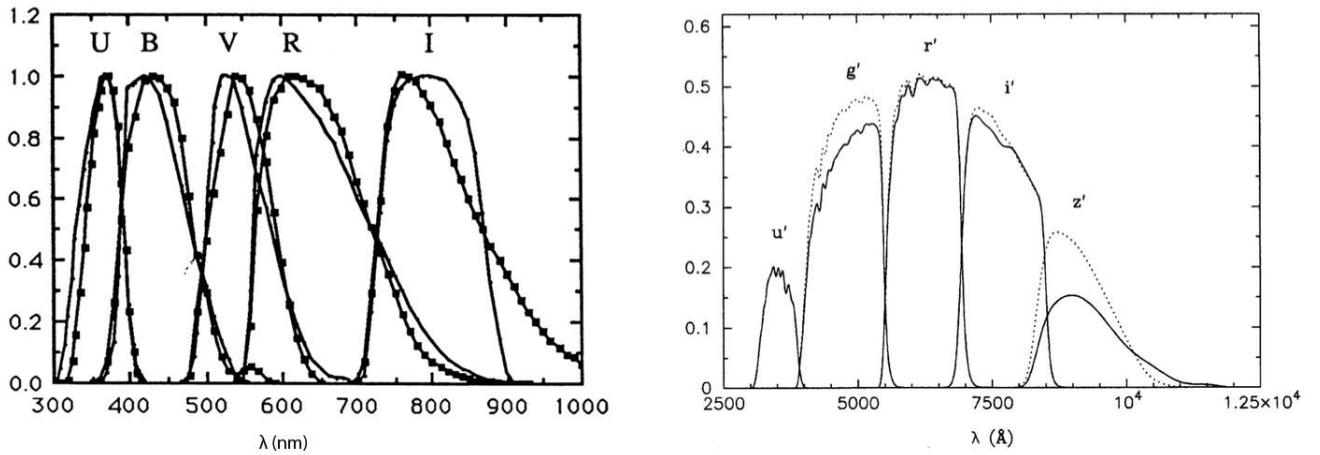
kus N tähistab allika fotomeetrilist kogusignaali ning C on konstant, mis määrab instrumentaalse fotomeetrilise süsteemi nullpunkti. Enamasti leitakse konstant C kaadrite heleduse kalibreerimise käigus standardsesse fotomeetrilisse süsteemi. Sellest on pikemalt juttu peatükis 3.2.

Käesoleva töö fotomeetrilistel vaatlustel kasutati erinevaid lairibafilteid, mis lahevad läbi ainult kindlat lainepikkuste vahemikku. Läbi erinevate filtrite mõõdetud heleduste erinevuste abil saab infot objekti kiirgusjaotuse kohta ilma valgust eraldi spektriiks lahutamata. Kindlas filtris mõõdetud objekti heledust arvutatakse sarnaselt valemitega (1) ja (2) ning tähistatakse lihtsalt vastava filtri tähisega (nt $B = 4^m$). Filtrite süsteemi on mitmeid ja neist levinumad on Johnson-Cousinsi UBVR_cI_c süsteem, mille ideaalsed läbilaskvusaknad on toodud ära joonisel 2. Lisaks on joonisel 2 toodud ka filtrite süsteem, mida kasutatakse Sloani taevaülevaates objektide heleduste määramiseks.

Süüfotomeetriliste vaatluste suurimateks piirajateks Eestis on madal paiknemine merepinnast, kehv astrokliima ning valgusreostus. Madala paiknemise tõttu läbib valgus enne teleskoopi jõudmist paksu õhumassi, milles õhu turbulentne liikumine tekitab kujutise värisemist ja vilkumist. See põhjustab uduseid ja laialimääritud kujutisi, mis näiteks galaktikate puhul takistab detailset siseehituse uurimist. Linnade valgusreostus teeb raskeks nõrkade objektide vaatlemise, sest uuritava allika signaali ei ole võimalik eristada taevafoonist. Mõlemat faktorit on töös arvesse võetud kaadrite valikus, millest on täpsemalt juttu alapeatükis 3.1.

2.3 Galaktika NGC 3448

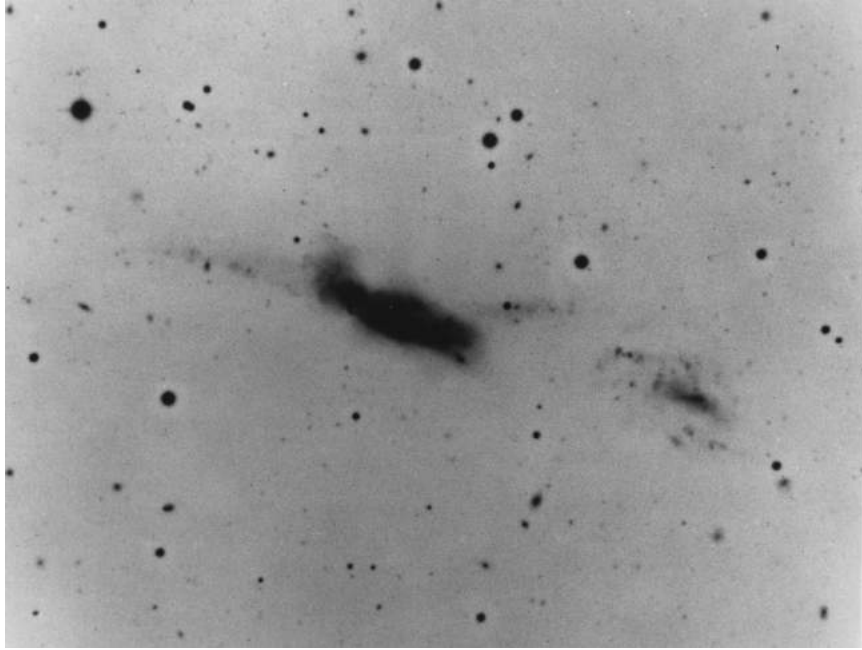
Galaktika NGC 3448 asub Suure Vankri (*Ursa Major*) tähtkujus koordinaatidel $\alpha = 10^h54^m39^s$, $\delta = +54^\circ18'18''$. Galaktika arvatav kaaslane UGC 6016 asub koordinaatidel $\alpha = 10^h54^m12^s$, $\delta = +54^\circ17'13''$. Koos moodustab paar kataloogis *Atlas of Peculiar Galaxies* süsteemi Arp 205 (Arp 1966), mille pilt on toodud joonisel 3.



Joonis 2: Erinevad fotomeetrilised süsteemid. Vasakul on filtrite $UBVR_cI_c$ läbilaskvus (Bessell 1990). Fotomeetrilise süsteemi defineerimiseks kasutatud läbilaskvusprofiil on märgitud pideva joonega ning seda on kõrvutatud reaalsete filtritega mõõdetud läbilaskvustega. Paremalt on Sloani taeväülevaate lairibafiltrite läbilaskvuskõverad (Fukugita et al. 1996). Punktiiriga on märgitud ideaalsed Sloani filtrite läbilaskvusprofiilid ning pideva joonega on märgitud SDSS teleskoobi CCD-kaamerale vastav kostefunktsioon. RAITS teleskoobi juures kasutatavatele BVR_cI_c filtrite kohta ei ole koostatud läbilaskvusgraafikuid.

NGC 3448 on üks lähimatest ebakorrapärase ehitusega galaktikatest, mida on põhjapoolkeralt kerge vaadelda. Sellest hoolimata on galaktikat ja tema kaaslast suhteliselt vähe uuritud ning viimased detailsed artiklid galaktika füüsikaliste omaduste kohta pärinevad 1970ndatest ja 1980ndatest. Vähesse huvi ning galaktika korrapäratu ehituse tõttu ei ole galaktika kaugust ega massi täpselt mõõdetud. Erinevad autorid on määranud NGC 3448 kuuluvat Ursa Major I (X) galaktikagruppi (Noreau and Kronberg 1986), kuid hilisemates galaktikaparve uurimustes ei ole loetud teda parve hulka (Tully et al. 1996).

Arp H.C. ei liigitanud galaktikasüsteemi ühtegi seni teadaolevatesse galaktikaklassi, sest sellel ei esinenud ei elliptilistele ega spiraalgalaktikatele iseloomulikku väljanägemist. Praeguseks on teada, et enamus kataloogi kummalistest galaktikatest on tekkinud kahe või enama galaktika vastastikulisel mõjul. Seega on alust arvata, et NGC 3448 võis kunagi olla tavaline spiraalgalaktika, mille korrapärast ehitust häiris lähedale sattunud kaaslase UGC 6016 loodelised jõud (Noreau and Kronberg



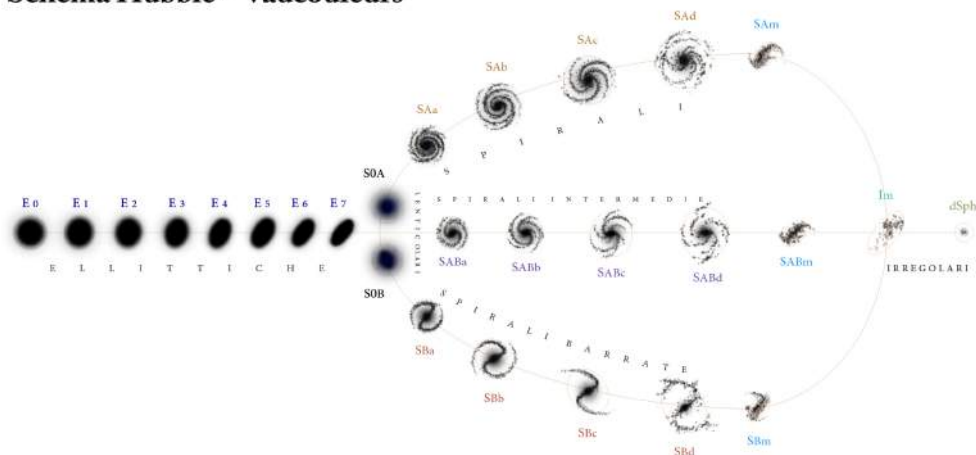
Joonis 3: Galaktikasüsteem Arp 205: vasakul galaktika NGC 3448, paremal UGC 6016. Pilt on tehtud Paloma observatooriumi 5.1 meetrise Hale teleskoobiga, kasutades negatiiv-fotoplaate, mida säritati 30 minutit.

1986). Seda kinnitavad galaktikate radiaalkiirused, mis NGC 3448 on 1350 km/s ning UGC 6016 1493 km/s (de Vaucouleurs et al. 1991), asetades galaktikad enam vähem samasse tasandisse. Noreau, L. ja Kronbergi, P. P. (1986) arvutisimulatsioonide kohaselt ei arvatavasti olnud tegemist täieliku ega osalise kokkupõrkega, vaid arvatavasti põhjustas NGC 3448 aine väljapaiskumist UGC 6016 lähedane möödumine.

Sellise struktuuri deformatsiooni tõttu on NGC 3448 liigitatud Holmbergi Irr II klassi, mille alla kuuluvad galaktikad, millel puuduvad täielikult omadused paigutamaks teda Hubble jadale (vt joonis 4). Hiljem on galaktikat määratud ka de Vaucouleursi I0 klassi (de Vaucouleurs et al. 1991) ja amorfsete galaktikate hulka (Sandage and Tammann 1981). Mõlemad klassifikatsioonid olid esialgse Irr II tüübi alajaotused ja õigupoolest iseloomustab kõiki neid klasse nähtavate spiraalharude puudumine, korrapäratute aine väljapaiskumised, nähtavad tähetekkepiirkonnad. Detailsem alaliigitus põhineb galaktika värvusindeksitel ning neeldumisspektril, kuid vähese uurimise tõttu ei saa neid otseselt NGC 3448 puhul rakendada. Kaaslasgalaktikat UGC 6016 on liigitatud kääbus-irregulaarset (dIrrs) (Nilson 1973) tüüpi kui

ka de Vaucouleursi Im tüüpi (Noreau and Kronberg 1986; de Vaucouleurs et al. 1991) galaktikaks.

Schema Hubble – Vaucouleurs



Joonis 4: Hubble - de Vaucouleursi galaktikate morfoloogiline klassifitseerimine. Jaotus algab elliptiliste galaktikatega, mis hargnevad spiraal ja varbspiraalseks galaktikateks. Sellele lisandub veel kahe eelneva vahepealsed galaktikad ja eraldi klassina ebakorrapäraseid galaktikad. Kuna galaktikate klassifitseerimine sõltub suuresti vaatenurgast, võiks galaktikat NGC 3448 mõne teise vaatenurga alt liigitada mitte ebakorrapäraseks, vaid näiteks varbspiraalseks.

3 Vaatlusandmete töötlus

3.1 RAITSi vaatlusandmed

RAITSi vaatlusandmed koguti 2014. aasta jaanuarist maini, kokku 23 ööl. Vaatluste esialgne eesmärk oli jälgida galaktikas plahvatanud supernoova SN 2014G heleduse kahanemist. Vaatlusi tehti Johnson-Cousinsi B, V, R_c ja I_c filtrites. Kõikide kaadrite säriajaks oli 300 sekundit välja arvatud esimesel ööl, kui säritus kestis 180 s.

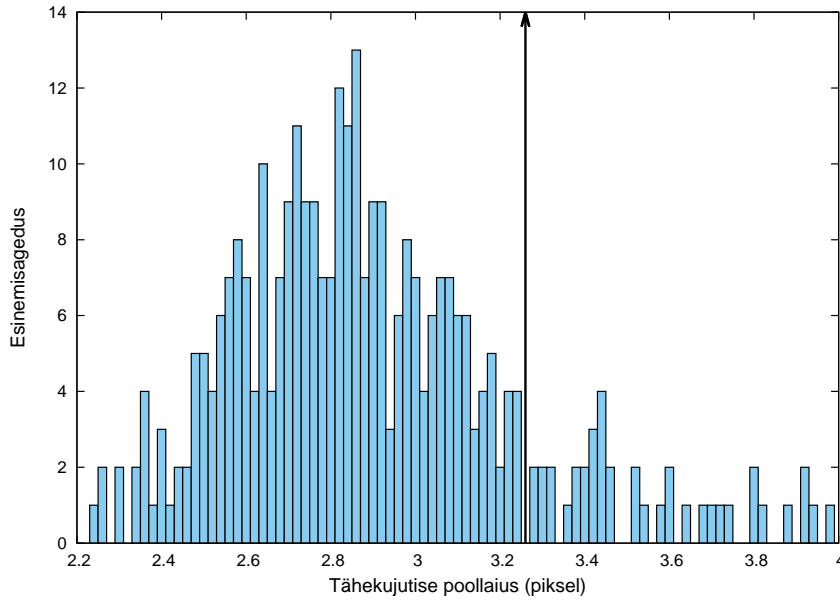
Andmekaadritega oli enne käesolevat töö algust tehtud eelpinge- ja tasavälja-kaadrite töötlus, mistõttu seda osa andmetööstusest ei käsitleta.

3.1.1 Kaadrite valik

Detailse kujutise saamiseks ei piisanud RAITS teleskoobi ühest vaatluskaadrist, sest nõrgad galaktika osad ei olnud taevafoonist eristatavad. Seetõttu valiti iga filtri vaatluskaadrite seast välja hulk kaadreid, mida omavahel ühendades saadi kunstlikult pikema säriajaga kaader. Pikem säritus tagab, et galaktika nõrgematest piirkondadest jõuab sensorile piisavalt palju valgust, et ületada taevafooni heleduse väärtus. Kõikide kaadrite kasutamine säriaja efektiivseks pikendamiseks ei olnud mõistlik, kuna esialgne vaatluseesmärk oli supernoova heleduse jäädvustamine, mistõttu tehti vaatlusi ka öödel, mis muidu oleks nõrkade pindobjektide vaatlemiseks ebasobilikud. Kaadrite valikul toetuti eelkõige kahele kriteeriumile:

- Pildi lahutus, mida hinnati kaadris paikneva tähekujutise poollaiuse (edaspidi: FWHM ehk *Full-Width-Half-Maximum*) järgi, oleks võimalikult suur.
- Kaadrilt mõõdetud taevafooni signaali väärtus oleks võimalikult väike.

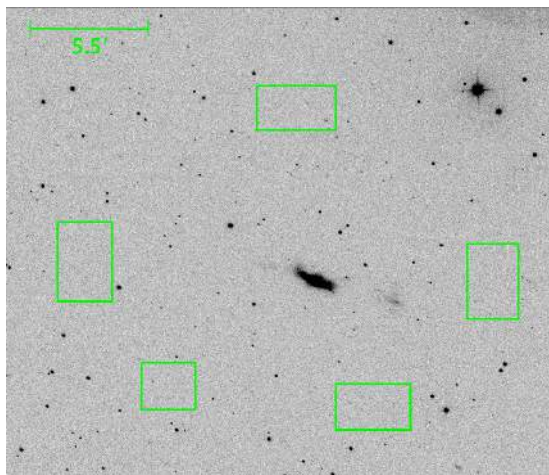
Tähekujutise poollaius määrati kaadrite tegemisel teleskoobi juhttarkvaras ning salvestati andmekaadri päisesse märksõna FWHM alla. Mida väiksemad on kaadris olevate tähtede poollaiused, seda teravam on uuritava pindobjekti kujutis. Parima lahutusega kaadrite hindamiseks koostati kõikide kaadrite FWHM histogramm, mis on toodud ära joonisel 5. Jaotuse järgi määrati poollaiuse ülempiiriks 3.3 pikslit, lõigates nii ära poollaiuste suurematest väärtustest moodustuva saba.



Joonis 5: Kaadrite FWHM jaotus. Käesolevas töös kasutati kaadreid, mille $\text{FWHM} < 3.3$ pikslit.

Taevafoon on paratamatu osa astronoomilistest vaatlustest, sest võimatu on CCD sensorile koguda valgust ainult uuritavalt objektilt ja ümberpaiknevatelt tähtedelt. Taevafooni põhjustab tehisvalguse ning lähedaste väga heledate allikate valguse hajumine atmosfääris. Taevafooni mõõtmine ja hindamine on oluline, et välistada kaadrid vaatlusöödest, millal taevas paistis Kuu, või teleskoobi vaatevälja jäi mõni väga hele täht. Taevafooni määramiseks valiti galaktika NGC 3448 ümber 5 ristkülikukujulist taevaala ning leiti piirkonda jäävate pikslite signaali mediaan. Kogu kaadri taevafooni väärtus saadi piirkondade signaali mediaanide keskväärtusest. Tulemustest koostati histogramm, mis on toodud joonisel 7. Fooni ülempiiriks määrati 700 ADU (*Analog Digital Unit*), jättes nii võimalikult suure osa kaadritest kõlblikuks, kuid visates kõige halvematel tingimustel tehtud kaadrid minema.

B filtris valiti välja 65 ülalnimetatud tingimustele vastavat kaadrit, mis seejärel kombineeriti. Kuna V, R_c ja I_c filtrites langes kaadrites lahutus oluliselt, seati taevafooni tingimus tähtsamaks, sest süvafotomeetria seisukohast on olulisem välistada kaadrid, mis tõstaksid ühendkaadri taevamüra, kui kaadreid, mis kahjustaksid lahutusvõimet. V filtris kombineeriti vastavalt 68 kaadrit, R filtris 36 ja I filtris 45 kaadrit. Kombineeritud kaadritel viidi läbi heleduse kalibreerimine ning kõik galaktika pind- ja koguheleduse mõõtmised.



Joonis 6: Taevafooni määramiseks valitud ristkujulised taevaalad.

3.2 Instrumentaalsete heleduste kalibreerimine

Iga teleskoobi jaoks valmistatud lairibafiltrid ei vasta kahjuks ideaalselt Johnson-Cousinsi filtritele. See teeb vajalikuks teleskoobi kalibreerimise standardsetele filtritele vastavaks. Selleks valitakse enamasti uuritava objekti kaadritest tähti, mille heledused on sarnased või lähedased uuritava objekti heledusega, ning mõõdetakse nende instrumentaalne heledus⁶. Olenevalt kaadri laiuusest ja vaatevälja jäävate võrdlustähtede arvust võib standardtähtede instrumentaalseid heledusi mõõta eraldi tehtud kalibreerimiskaadritelt või otse uuritava objekti kaadritelt.

Esimesel juhul leitakse kalibreerimiskaadritelt võrdlustähtede instrumentaalsete ja standardheleduste abil filtrite värviülekandekordajad a_B, a_{bv} ja konstandid c_b, c_{bv} . Värviülekandekordajaid leitakse lineaarvõrrandisüsteemist (näite on toodud B filtri jaoks)

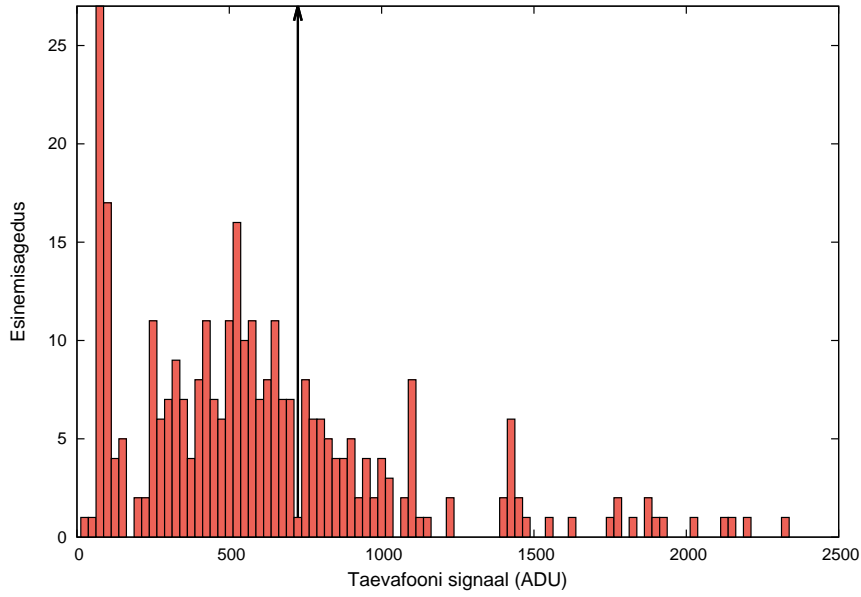
$$B - b = a_B(B - V) + c_B \quad (3)$$

ja

$$B - V = a_{bv}(b - v) + c_{bv}, \quad (4)$$

kus suurte tähtedega on tähistatud võrdlustähtede standardheledused ja väikeste tähtedega instrumentaalsed heledused. Uuritava objekti standardheledused leitakse

⁶Objekti instrumentaalne heledus sõltub spetsiifilistest mõõtevahenditest (CCD-kaamerast, filtritest, teleskoobi optikast), millega heledus on mõõdetud. Objekti instrumentaalset heledust ei saa võrrelda teiste teleskoopidega tehtud mõõtmistega, sest identseid instrumente ei ole olemas. Sellest tulenevalt on vaja kõiki mõõtmisi kalibreerida ühtsesse standardheleduste süsteemi.



Joonis 7: Taevafooni signaali jaotus. Käesolevas töös kasutati kaadreid, mille taevafooni signaal oli väiksem 700 ADUst.

seejärel võrrandite (3) ja (4) kaudu seosega

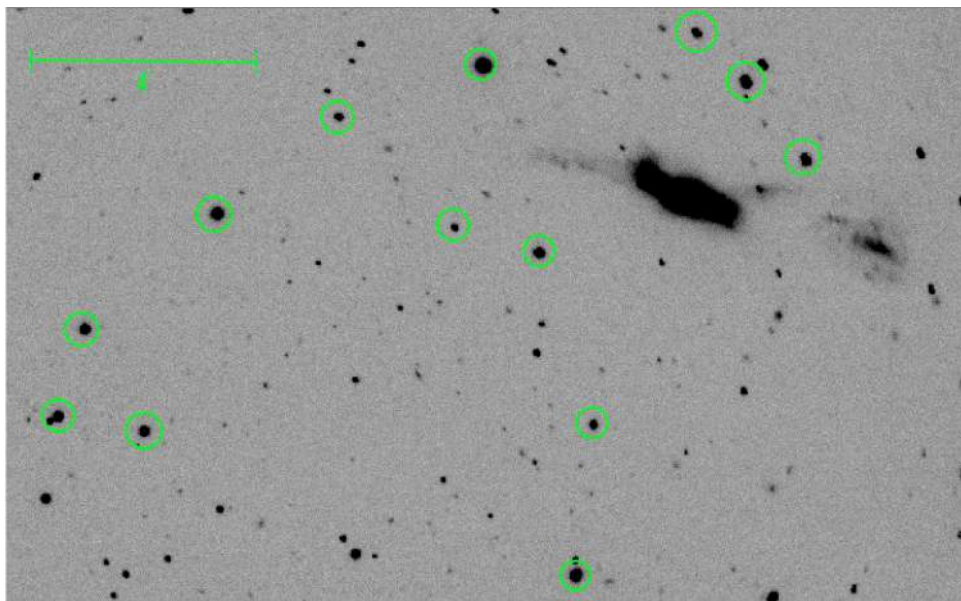
$$B = a_B(a_{bv}(b - v) + c_{bv}) + c_B + b. \quad (5)$$

Õnneks oli käesoleva töö RAITSi kaadrites palju tähti, mille standardheledused Johnson-Cousinsi ja SDSS filtrites olid antud taevaülevaate UCAC4 (*Fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalogue*) kataloogis. Seetõttu sai kalibreerimiseks kasutada ainult võrrandit (3), arvutades selle abil konstandi c_B , mis määrab instrumentaalse fotomeetrilise süsteemi nullpunkti (vt ka valem (2)).

Kalibreerimiseks kasutatavate tähtede valikul peeti silmas järgnevaid kriteeriume:

- Täht asuks galaktikale võimalikult lähedal.
- Tähe läheduses ei oleks teisi tähti.
- UCAC4 kataloogis on tähe heleduste kohta märgitud vähemalt 3 mõõtmist.

Esimesed kaks tingimust on olulised piisavalt täpse tähefotomeetria läbiviimiseks. Tähekujutised on esmajoonel moonutatud atmosfääri turbulentsse liikumise tõttu aga ka mitme kaadri kombineerimise ebatäpsustest. RAITS teleskoop määrab kaadris olevate kujutiste taevakoordinaadid vaatlusalasse jäävate tähtede abil. Üldjuhul



Joonis 8: Kalibreerimiseks valitud võrdlustähed. Valitud tähed jäid suures osas galaktikast vasakule, sest kaadri paremas ülemises nurgas paiknes väga hele täht (vt joonis 18), mis V, R ja I filtrites oli selle osa kaadrist ülevalgustanud (vt ka jooniseid 20, 21, 22 Lisas 2).

on CCD piksli lineaarmõõtmel ja taevakoordinaatide vaheline seos lineaarne, kuid laia vaateväljadega teleskoopide puhul, nagu seda on RAITS, võib kaadri äärealades seos olla mittelineaarne. Käesolevas töös kasutatavate kaadrite eeltöötluses määrati kujutiste taevakoordinaadid lineaarse seosega. Seetõttu võis sama tähe taevakoordinaat kaadrist kaadrisse pisut erineda. Kaadreid kokku kombineerides lähtutakse aga koordinaatidest ja sellepärast ei pruugi tähed kombineeritud kaadril üksteisega ideaalselt kattuda, tekitades ovaalse tähekujutise või halvemal juhul kaks kõrvuti asetsevat tähekujutist.

Kataloogis leitava standardheleduse usaldusväärsus sõltub, mitu korda on tähe heledust mõõdetud. Seda võtab arvesse viimane valikutingimus. Kokku valiti kalibreerimiseks välja 12 tähte, mis on toodud ära joonisel 8.

3.2.1 Instrumentaalsete heleduste mõõtmine

Tähtede instrumentaalseid heledusi mõõdeti töö käigus tarkvaraprogrammiga IRAF⁷, mis võimaldab analüüsida CCD kaadreid. IRAFi DAOPHOT pakett on mõeldud

⁷IRAF e. *Image Reduction and Analysis Facility* www.iraaf.net

tähefotomeetriaks ja sisaldab nii apertuurfotomeetria algoritme kui ka võimalust mõõta heledusi, lähendades tähe profiili kahemõõtmelise heledusjaotusfunktsiooniga.

Valitud tähtedele rakendati IRAFi apertuurfotomeetria PHOT algoritmi. Apertuurfotomeetrias määratakse tähe heledus, liites kokku tähe ümber teatava raadiusega piirkonnas ehk apertuuris olevate pikslite signaal. Sellest kogusignaalist lahutatakse apertuuri ümber oleva taevaapertuuri sisse jääv taevafoon ning leitakse seejärel tähe instrumentaalne heledus. Algoritmi parameetreid nagu apertuuri raadius, taevaapertuuri raadius ja laius ning kaadri säriaeg saab ise määrata.

PHOT käsk arvutab tähe instrumentaalse heleduse m_{inst} ja määramatuse u_m tehtega (Massey and Davis n.d.)

$$m_{inst} = -2.5 \log \left(\frac{(N_s - P \cdot N_f)}{t_e} \right) + z_{mag} \quad (6)$$

$$u_m = 1.0857 \frac{\sqrt{\frac{(N_s - P \cdot N_f)}{g} + P \cdot \sigma^2 + P^2 + \frac{\sigma^2}{n_f}}}{(N_s - P \cdot N_f)}, \quad (7)$$

kus N_s on tähe apertuuri jääv kogusignaal

P on tähe apertuuri pindala (ühikuks ruutpiksel),

N_f on taevafooni väärtus piksli kohta,

$t_e = 300\text{s}$ on ekspositsiooniaeg,

$z_{mag} = 25$ on esialgnelt valitud heledusskaala nullpunkt,

$g = 1.43 \frac{e^-}{ADU}$ on CCD võimendustegur⁸,

σ on taevafooni väärtuse standardhälve,

n_f on taevaapertuuri jäävate pikslite arv.

Sarnaselt arvutati kõigis filtrites võrdlustähtede instrumentaalsed heledused ning määramatused. Vastavad tulemused on toodud ära Lisas 1 tabelis 5.

3.2.2 Instrumentaalne nullpunkt

Valitud võrdlustähtede standardheledused võeti taevaülevaate UCAC4 (Zacharias et al. 2012) kataloogist, kuhu on kogutud info tähtedest, mille heledused on vahemikus 8 kuni 16 tähesuurust. Lisaks on kataloogis umbes 110 miljoni tähe fotomeetria

⁸Võimendustegur näitab kui mitu elektroni moodustavad pärast signaali digitaliseerimist 1 ADU

2MASS (*Two Micron All-Sky Survey*) vaatlustest ning tähtede heledused viies eri lairibafiltris B,V, g_s,r_s,i_s ⁹ APASSi (*AAVSO Photometric All-Sky Survey*) vaatlustest.

3.2.3 Filtrid B ja V

Teades tähtede instrumentaalseid ja heledusi standardses fotomeetrilises süsteemis, saab arvutada instrumentaalse heleduse nullpunkti z , mis on kalibreeriv parand ja võimaldab mõõta galaktika heledust vastavalt ideaalsetele Johnson-Cousinsi filtritele. B ja V filtri instrumentaalne nullpunkt on antud seostega

$$z_b = B - b - a_B(B - V), \quad (8)$$

$$z_v = V - v - a_V(B - V). \quad (9)$$

B, V tähistavad kataloogi kogutud tähtede standardheledusi B ja V filtris, b, v on instrumentaalsed heledused B ja V filtris ning kordajad a_B ja a_V on teleskoobi fotomeetrilise süsteemi kalibreerimiskordajad, mis olid määratud varem (Eenmäe 2015). Instrumentaalse nullpunkti määramatused on leitavad valemitega

$$u_{zb} = \sqrt{[(1 - a_B)u_B]^2 + u_b^2 + [(V^* - B^*)u_{aB}]^2 + (a_B u_V)^2} \quad (10)$$

$$u_{zv} = \sqrt{[(1 + a_V)u_V]^2 + u_v^2 + [(V^* - B^*)u_{aV}]^2 + (a_V u_B)^2}. \quad (11)$$

Kaheteistkümne võrdlustähele leitud instrumentaalsetest nullpunktidest leiti filtrile kehtiv instrumentaalne nullpunkt kaalutud keskmise meetodil. Üksikasjalikumad arvutused ja tulemused on toodud ära Lisas 1 tabelis 6.

3.2.4 Filtrid R ja I

APASSist leitavate tähtede absoluutsed heledused on antud ainult kahes Johnson-Cousinsi filtris, mistõttu filtrite R_c ja I_c instrumentaalset nullpunkti ei saanud leida sarnaselt B ja V filtri nullpunktiga. Alternatiivina otsustati teisendada kataloogist leiduvad g_s, r_s, i_s ja z_s filtrite heledused Johnson-Cousinsi süsteemi ning seejärel leida instrumentaalne nullpunkt ka R_c ja I_c filtrite jaoks. Tasub meeles pidada, et

⁹Siin ja edaspidi on Sloani filtrite tähistele lisatud alaindeks s , et eristada neid R ja I filtrite instrumentaalsetest heledustest r ja i .

lisateisendus teeb R_c ja I_c filtrites mõõdetud heledused ebatäpsemaks, sest ei lähtuta konkreetse objekti spektriiks.

SDSS filtrites mõõdetud heleduste teisendusi Johnson-Cousinsi filtritesse kasutati (Lupton 2005) avaldatud võrrandeid, mis on saadaval ka SDSS DR10 veebilehelt¹⁰:

$$R = r_s - 0.2936(r_s - i_s) - 0.1439 \quad (12)$$

standardhälbega $\sigma_R = 0.0072$.

$$I = r_s - 1.2444(r_s - i_s) - 0.3820 \quad (13)$$

standardhälbega $\sigma_I = 0.0078$. Võrdlustähtede heleduste teisenemise tulemused Johnson-Cousinsi süsteemi on toodud Lisa 1 tabelis 7.

R_c ja I_c filtrite instrumentaalse heleduse nullpunktid arvutati sarnaselt B ja V filtritega. Lisaks arvutati filtri R_c teisenenud andmetega instrumentaalne nullpunkt ka filtri V jaoks, et kontrollida kahel eri meetodil leitud tulemuste kokkulangevust.

V filtri instrumentaalne nullpunkt avaldub R_c filtri standardheleduste kaudu:

$$z_v = V - v - a_V(V - R). \quad (14)$$

Filtri R_c instrumentaalne nullpunkt ja selle määramatus

$$z_r = R - r - a_R(V - R), \quad (15)$$

$$u_{zr} = \sqrt{[(1 + a_R)\sigma_R]^2 + u_r^2 + [(R^* - V^*)u_{aR}]^2 + (a_R \cdot u_V)^2}. \quad (16)$$

Filtri I_c instrumentaalne nullpunkt ja selle määramatus

$$z_i = I - i - a_I(V - I), \quad (17)$$

$$u_{zi} = \sqrt{[(1 + a_I)\sigma_I]^2 + u_i^2 + [(I^* - V^*)u_{aI}]^2 + (a_I \cdot u_V)^2}. \quad (18)$$

Instrumentaalse nullpunkti arvutused on toodud ära Lisas 1 tabelis 8. Kaalutud keskmise tulemused:

Teades iga filtri jaoks instrumentaalset nullpunkti, saab galaktika NGC 3448 kogu- ja pindheledusi arvutada otse standardheleduste skaalas.

¹⁰<https://www.sdss3.org/dr10/algorithms/sdssUBVRITransform.php>

Tabel 1: Johnson-Cousinsi filtrite instrumendaalsed nullpunktid, mille abil saab mõõdetud heledusi viia standardsesse fotomeetrilisse süsteemi.

Filter	B	V	R _c	I _c
Instrumentaalne nullpunkt	20.118±0.005	20.463±0.018	20.728 ± 0.003	19.519 ± 0.003

3.3 Galaktika koguheleduse määramine

Galaktikate heledusi saab mõõta sarnaselt tähtede heledusega, kuid piirkond, millest loetakse kokku pikslite signaal, ei pruugi olla ringikujuline. Kõige lihtsamal lähenduses võib valitud piirkonnaks olla riskülik, mille sisse jääb suurem osa galaktikast nagu näidatud joonisel 9. Galaktika nõrkade alade mitteametamine ja tumeda taevaala sisselugemine ei tohiks suurel määral galaktika koguheledust mõjutada, sest taevafoon on kombineeritud kaadritelt maha lahutatud. Küll aga tuleks maha lahutada galaktikas plahvatanud supernoova signaal. Mõõtepiirkonda jäävate pikslite kogusignaali ja mõõdetud supernoova signaali väärtused eri filtrites on toodud tabelis 2.

Tabel 2: Ristkülikuga määratud galaktikapiirkonna kogusignaali ning supernoova signaali

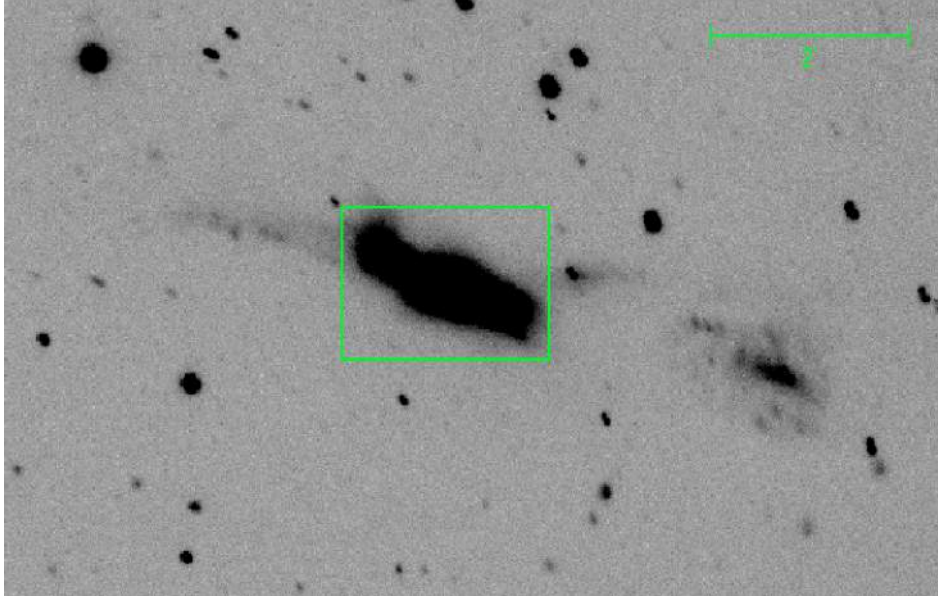
Filtrid	B	V	R	I
Galaktika kogusignaali N_s (ADU)	315960.5	1242441	1240755	624017.3
Supernoova signaali N_{sn} (ADU)	4854.93	21697.58	29079.64	12278.34

APASSi dokumentatsioonis on märgitud, et Johnson-Cousinsi filtri heledused on antud Vega süsteemis¹¹, Sloani filtrite heledused AB süsteemis¹². Vega ja AB fotomeetrilised süsteemid on seotud teisendustega (Frei and Gunn 1994)

$$B_{Vega} = B_{AB} + 0.163 \quad (19)$$

¹¹Fotomeetriline süsteem, mille nullpunkt on defineeritud tähe α Lyrae spektriga. See tähendab, et tähe α Lyrae heledused kõikides filtrites on 0^m.

¹²AB fotomeetrilise süsteemi aluseks on monokromaatiline allikas, mille heledus on igas filtris ühesugune ja mille värvused on 0^m.



Joonis 9: Koguheleduse mõõtmiseks valitud piirkond - 93×128 pikslit ehk 102×140 kaaresekundit.

$$V_{Vega} = V_{AB} + 0.044. \quad (20)$$

Galaktika AB heledus B ja V filtris, arvestades ka teisendust Vega fotomeetrilisest süsteemist AB süsteemi, avaldub:

$$B_{AB} = -2.5 \log \frac{N_s - N_{sn}}{t_e} + C_B \quad (21)$$

ning

$$V_{AB} = -2.5 \log \frac{N_s - N_{sn}}{t_e} + C_V, \quad (22)$$

kus konstandid C_B ja C_V on vastavalt

$$C_B = z_b - 0.163 \quad (23)$$

$$C_V = z_v - 0.044 \quad (24)$$

Galaktika heledused R_c ja I_c filtris avalduvad

$$R_{AB} = -2.5 \log \frac{N_s - N_{sn}}{t_e} + z_r \quad (25)$$

$$I_{AB} = -2.5 \log \frac{N_s - N_{sn}}{t_e} + z_i. \quad (26)$$

3.3.1 Galaktika koguheledus SDSS g_s , r_s , i_s ja z_s filtrites

RAITSi kaadritelt mõõdetud galaktika koguheleduse võrdlemiseks SDSS andmetega teisendati Johnson-Cousinsi filtrites mõõdetud heledused SDSS filtrite heledusteks. Teisenemisvõrrandid (Blanton and Roweis 2007) koos määramatustega avalduvad

$$g_s = B_{AB} - 0.2354 - 0.3411 [(B_{AB} - V_{AB}) - 0.5870], \quad (27)$$

$$u_{g_s} = \sqrt{(1 - 0.3411)^2 u_{B_{AB}}^2 + 0.3411^2 u_{V_{AB}}^2}, \quad (28)$$

$$r_s = V_{AB} - 0.2585 - 0.5003 [(V_{AB} - R_{AB}) - 0.3161], \quad (29)$$

$$u_{r_s} = \sqrt{(1 - 0.5003)^2 u_{V_{AB}}^2 + 0.5003^2 u_{R_{AB}}^2}, \quad (30)$$

$$i_s = R_{AB} - 0.2000 - 0.4248 [(R_{AB} - I_{AB}) - 0.2651], \quad (31)$$

$$u_{i_s} = \sqrt{(1 - 0.4248)^2 u_{R_{AB}}^2 + 0.4248^2 u_{I_{AB}}^2}, \quad (32)$$

$$z_s = R_{AB} - 0.4088 - 1.2495 [(R_{AB} - I_{AB}) - 0.2652], \quad (33)$$

$$u_{z_s} = \sqrt{(1 - 1.2495)^2 u_{R_{AB}}^2 + 1.2495^2 u_{I_{AB}}^2}. \quad (34)$$

RAITSi kaadritelt mõõdetud galaktika koguheledused Johnson-Cousinsi ja SDSS filtrites koos võrdlusandmetega on toodud tabelis 3. B ja V filtrites mõõdetud heledusi on võrreldud kataloogi RC3 (*Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*) (de Vaucouleurs et al. 1991) andmetega, mis on saadud fotoelektrilise apertuurfotomeetriaga. R_c ja I_c filtrite heleduste kohta eelnevad andmed puuduvad. SDSSi filtritesse teisendatud heledusi on võrreldud SDSSi kümnnenda väljalaske (York et al. 2000) andmetega.

Tabel 3: RAITSi kaadritelt mõõdetud NGC 3448 koguheledused. Johnson-Cousinsi filtrites mõõdetud tulemusi võrreldi kataloogi RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991) andmetega ning SDSS filtritesse teisendatud heledusi võrreldi Sloani taevaülevaate andmebaasi koguheledustega (York et al. 2000).

Filtrid	Mõõdetud koguheledus	Võrdlusandmed
B	12.416 ± 0.005	12.48 ± 0.13
V	11.395 ± 0.018	12.05 ± 0.13
R	11.712 ± 0.003	-
I	11.245 ± 0.003	-
g_s	12.032 ± 0.007	12.744 ± 0.012
r_s	11.453 ± 0.009	12.370 ± 0.052
i_s	11.426 ± 0.002	12.117 ± 0.012
z_s	11.051 ± 0.003	12.154 ± 0.042

3.4 SDSS vaatlusandmed

Galaktika koguheledust mõõdeti ka SDSSi kaadrite pealt, mis on eeltöödeldatuna avalikult saadaval DR10 veebilehelt¹³. SDSS kaadritel on piksli signaali väärtus antud *nanomaggy*'des. $1 Mg$ on on valgusallika heledus, mis vastab 0^m tähesuurusele AB fotomeetrilises süsteemis,

$$1Mg = 0^{m_{AB}}. \quad (35)$$

Seetõttu on SDSS kaadritel objektide heledused väga kergesti arvutatavad seosega

$$m_{SDSS} = 22.5 - 2.5 \log(N). \quad (36)$$

SDSS igas filtris mõõdeti galaktika koguheledus RAITSi kaadritega sarnase taevaala seest. Tulemused on toodud tabelis 4.

3.5 Galaktika pindheledus

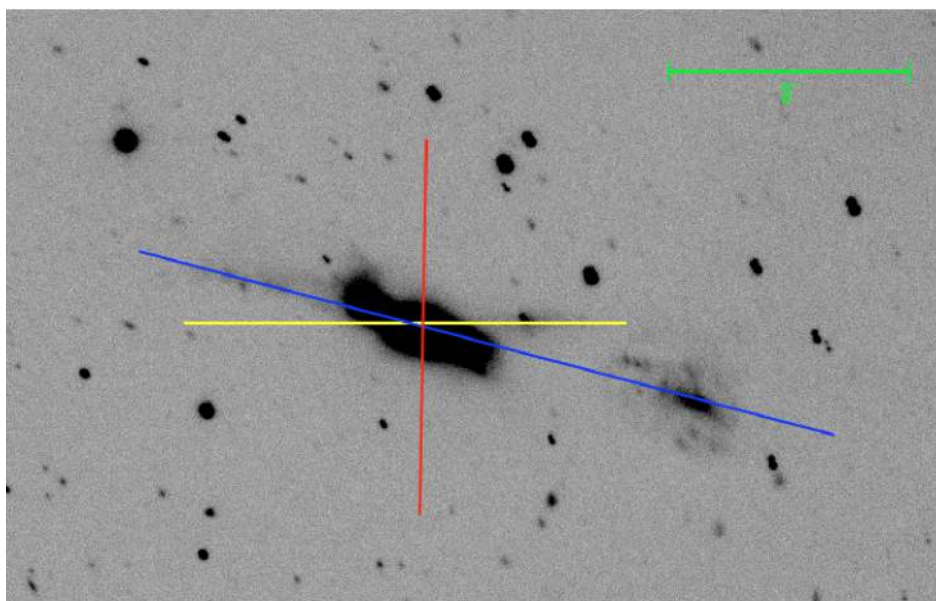
Kaadrite fotomeetrilist sügavust hinnatakse selle järgi kui nõrku objekte on võimalik eristada üleüldisest taevafoonist. Selle hinnangu andmiseks sobivad hästi NGC 3448

¹³<http://skyserver.sdss.org/dr12/en/tools/explore/Summary.aspx?id=1237657591928651813>

Tabel 4: SDSS kaadritelt mõõdetud galaktika koguheledus. Võrdluseks on toodud galaktika koguheledused SDSS DR10 andmebaasist (York et al. 2000) ning RAITSi kaadritelt mõõdetud galaktika koguheledused

Filter	u_s	g_s	r_s	i_s	z_s
Kogusignaal nMg	5172.56	12925.2	17866.5	21116.5	23994.1
SDSSi kaadrilt mõõdetud heledus	13.21	12.221	11.870	11.688	11.550
Koguheledus SDSS andmebaasist	13.72	12.74	12.37	12.12	12.15
RAITSi kaadrilt mõõdetud heledus	-	12.032	11.453	11.426	11.051

hõredad tähepiirkonnad. Uurides kombineeritud RAITSi kaadritelt löikeid (vt joonis 10), mis läbivad galaktika hõredamaid tähepiirkondi ja kaaslast UGC 6016 ning kõrvutades neid SDSS kaadritel sama piirkonna läbilõigetega, on näha, milliste heleduste juures ei ole võimalik signaali taevamürast eristada.



Joonis 10: Galaktika läbilõiked pindheleduste arvutamiseks. Sinise ja kollase joonega tähistatud lõiked läbivad galaktika kahte hõredamat tähepiirkonda. Punasega märgitud lõige tehti taevafooni müra hindamise kontrolliks.

Pikema läbilõike (tähistatud sinisega), mis läbis ka kaaslasgalaktikat, mõõtmed olid RAITSi kaadritel 16×600 pikslit ehk 17.5×657 kaaresekundit ning SDSS kaad-

ritel 44×900 pikslit ehk 17.5×356 kaaresekundit. Läbilõike lühema külje ulatuses signaali väärtus keskmistati ning seejärel arvutati pindheledus SDSS kaadrite jaoks valemiga

$$m_{SDSS} = 22.5 - 2.5 \log \left(\frac{N_s}{P} \right) \quad (37)$$

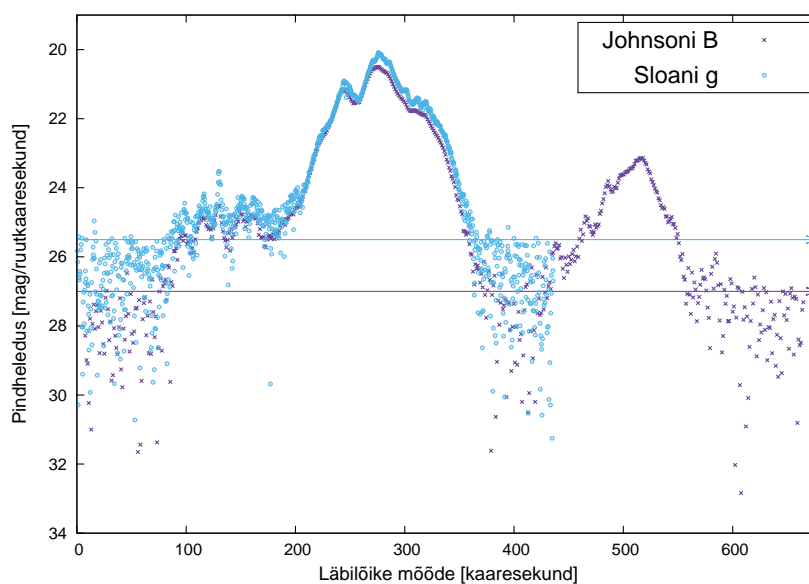
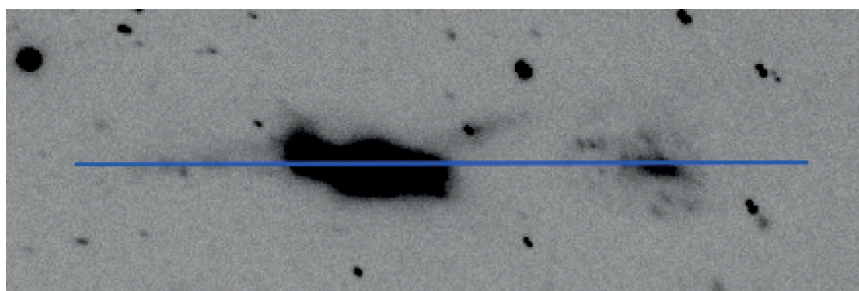
ning RAITSi kaadrite jaoks valemiga

$$m_{RAITS} = C - 2.5 \log \left(\frac{N_s}{t_e P} \right), \quad (38)$$

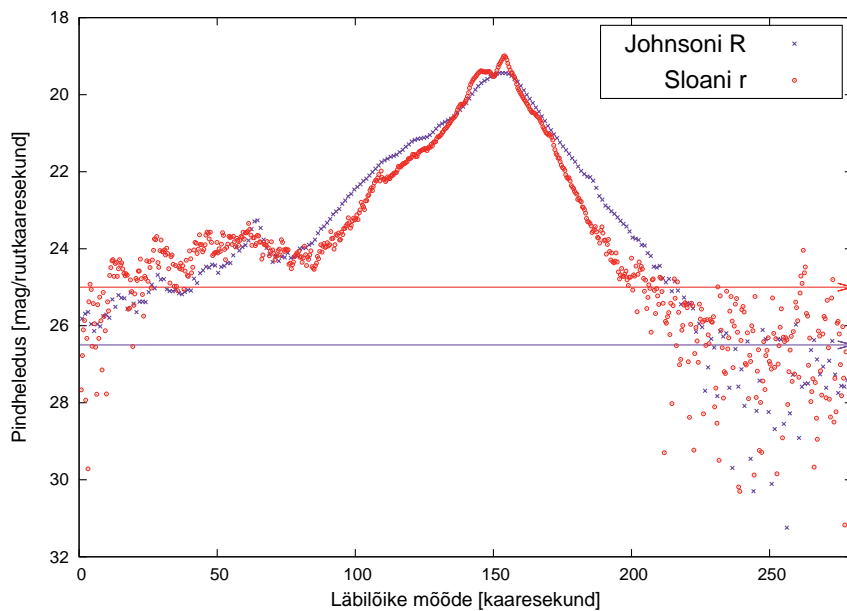
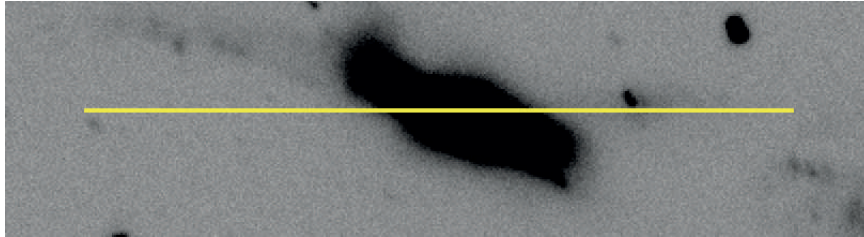
kus P on ühe piksli pindala ruutkaaresekundites. RAITSi kaadritel oli see 1.199 ruutkaaresekundit ning SDSS kaadritel 0.157 ruutkaaresekundit. Lühema läbilõike (tähistatud kollasega) pikkus oli RAITSi kaadritel 16×253 pikslit ning SDSS kaadritel 44×700 pikslit ehk 17.5×277 kaaresekundit. Lisaks tehti veel üks lõige, mis ei läbinud ühtegi galaktika hõredamat tähepiirkonda, vaid ainult väga heledat keskohta. See lõige oli vajalik, et kontrollida, kas selgelt eristuva signaali ja müra piiri puhul on taevafooni heledus samas vahemikus nagu hõredate tähepiirkondadega läbilõigetel. Selle kontrolliläbilõike suurus oli RAITSi kaadritel 16×280 pikslit ning SDSS kaadritel 44×774 pikslit ehk 17.4×306 kaaresekundit.

Pikslite heledustest koostati pindheledusjaotuse graafikud, mis on toodud ära joonistel 11, 12, 13. RAITSi B ja V filtri pindheledusi kõrvutati Sloani g_s filtris mõõdetud pindheledustega, sest vastavad läbilaskvuse maksimumid (vt joonis 2) langesid kõige paremini kokku. R_c filtris tehtud kaadrite pindheledusjaotused kõrvutati Sloani r_s filtris tehtud pindheledustega ning I_c filtri ja i_s filtri mõõtmised kõrvutati üksteisega.

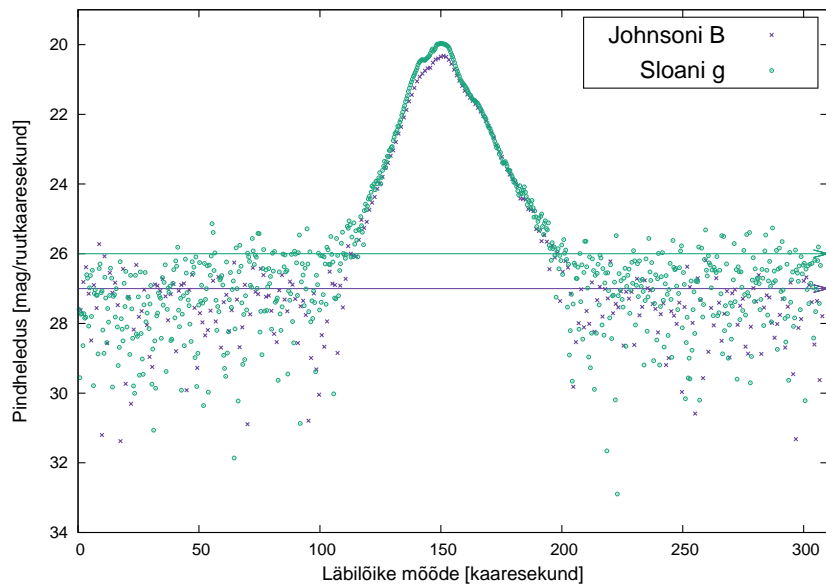
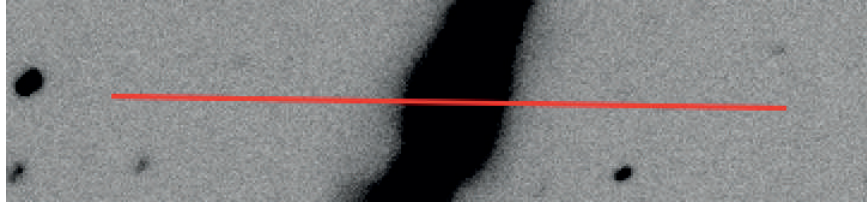
Pikem pindheledusjaotuste analüüs ja sellest lähtuvad uurimistulemused on sõnastatud järgmises peatükis. Kõik läbilõigete graafikud on toodud ära Lisas 2.



Joonis 11: Pindheledusjaotus g_s ja B filtris. Graafiku kohal on toodud ära galaktika läbilõige, millele pindheledused vastavad. Läbilõike mõõtmed on RAITSi kaadritel 16×600 pikslit ehk 17.5×657 kaaresekundit ning SDSS kaadritel 44×900 pikslit ehk 17.5×356 . Graafikul on värviliste joontena toodud ära taevamürale vastav heleduse piir, millest nõrgemaid objekte ei ole võimalik taevafoonist eristada. RAITSi kaadritel on selleks 27 mag ja SDSS kaadritel 25 mag .



Joonis 12: Pindheledusjaotus r_s ja R_c filtris. Graafiku kohal on toodud ära galaktika läbilõige, millele pindheledusjaotus vastab. Läbilõike mõõtmed on RAITSi kaadritel 16×253 pikslit ning SDSS kaadritel 44×700 pikslit ehk 17.5×277 kaaresekundit. Graafikul on värviliste joontega toodud ära taevamürale vastav heleduse piir, millest nõrgemaid objekte ei ole võimalik taevafoonist eristada. RAITSi kaadritel on selleks 26.5 mag ja SDSS kaadril 24.5 mag .



Joonis 13: Pindheledusjaotus g_s ja B filtris. Graafiku kohal on toodud ära galaktika läbilõige, millele pindheledusjaotus vastab. Läbilõike mõõtmed on RAITSi kaadritel 16×280 pikslit ning SDSS kaadritel 44×774 pikslit ehk 17.4×306 kaaresekundit. Graafikul on värviliste joontega toodud ära taevamürale vastav heleduse piir, millest nõrgemaid objekte ei ole võimalik taevafoonist eristada. RAITSi kaadritel on selleks 26.5 mag ja SDSS kaadril 25 mag .

4 Tulemuste analüüs

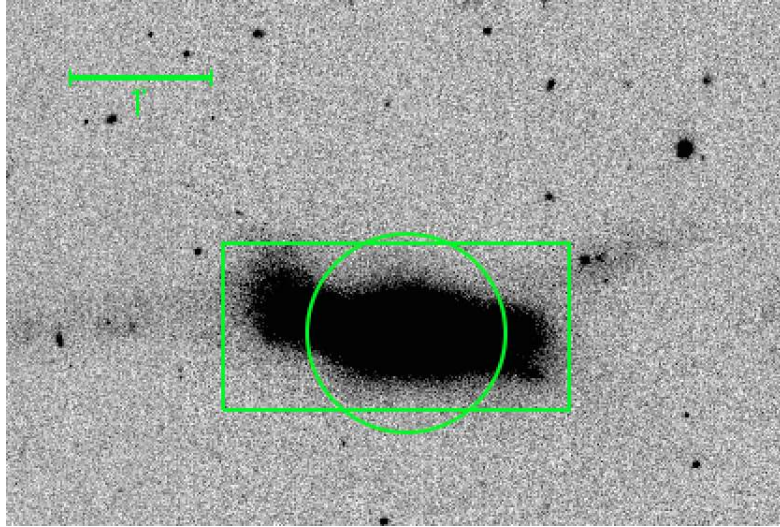
4.1 Galaktika koguheledus

Kõige usaldusväärsemad mõõtmistulemused saadi RAITSi B ja V filtri kaadritest. B ega V filtrites ei tehtud heleduskalibreerimise käigus lisateisendusi nagu R_c ja I_c filtrite juhul. Summeeritud säriaeg oli B ja V filtris kõige pikem ning kaadri kvaliteet ei olnud moonutatud valguse hajumisel teleskoobi optilises süsteemis või interferentsist CCD-kaameras.

Galaktika koguheledus langes B filtris (vt tabel 3) hästi kokku RC3 kataloogi andmetega. V filtris oli aga mõõtmiste erinevus 0.65 mag . Kahjuks ei õnnestunud välja uurida, millise meetodiga de Vaucouleurs et al. (1991) oma mõõtmisi sooritasid ning seetõttu polnud võimalik erinevuse põhjuseid täpsemalt analüüsida. B ja V filtris leitud heleduste teisendamisel valemiga (27) saadi galaktika koguheledus g_s filtris 12.032 mag . SDSS kaadrilt mõõdetud tulemuseks oli 12.221 mag . Viieendikuline tähesuuruseline erinevus tähendab 0.5 kordset kiirgusvoode erinevust.

Sloani taevaülevaate andmebaasi kohaselt on galaktika koguheleduseks g_s filtris 12.744 mag , mis tähendab umbes 1.3 kordset kiirgusvoogude erinevust RAITSi mõõtmistulemusest. Erinevus on tingitud mõõtmismeetodite erinevusest, kuna Sloani taevaülevaates määratakse galaktikate koguheledusi ringikujulise apertuuri seest, mis määratakse iga galaktika jaoks lokaalse pindheleduse ja keskmise pindheleduse suhtega (Blanton, Dalcanton, et al. 2001). NGC 3448 puhul oli raadiuseks 43.92 kaaresekundit. Apertuuri pindalaks, mille seest mõõdeti galaktika koguheledust, oli 6065 ruutkaaresekundit, jättes välja olulise osa galaktika äärealadest (vt joonis 14). See annab alust arvata, et käesolevas lõputöös määratud galaktika koguheledused on täpsemad ja reaalsemad tulemused kui Sloani taevaülevaate andmed.

R_c ja I_c filtris määratud koguheledustele ei leitud kirjandusest ühtegi võrdlusmõõtmist. I_c filtri kogu- ja pindheleduse mõõtmisi raskendas oluliselt kaadris esinenud samapaksusinterferents. Pikema lainepikkusega valguse interferents teleskoobi kaamera sensoris tekitab interferentsi maksimumide ja miinimumide vaheldumise kaadris, põhjustades taevafooni heleduse kõikumise. Galaktika NGC 3448 sattus interferentsi maksimumi piirkonda, mistõttu ei ole I_c filtris näha galaktika hõredaid



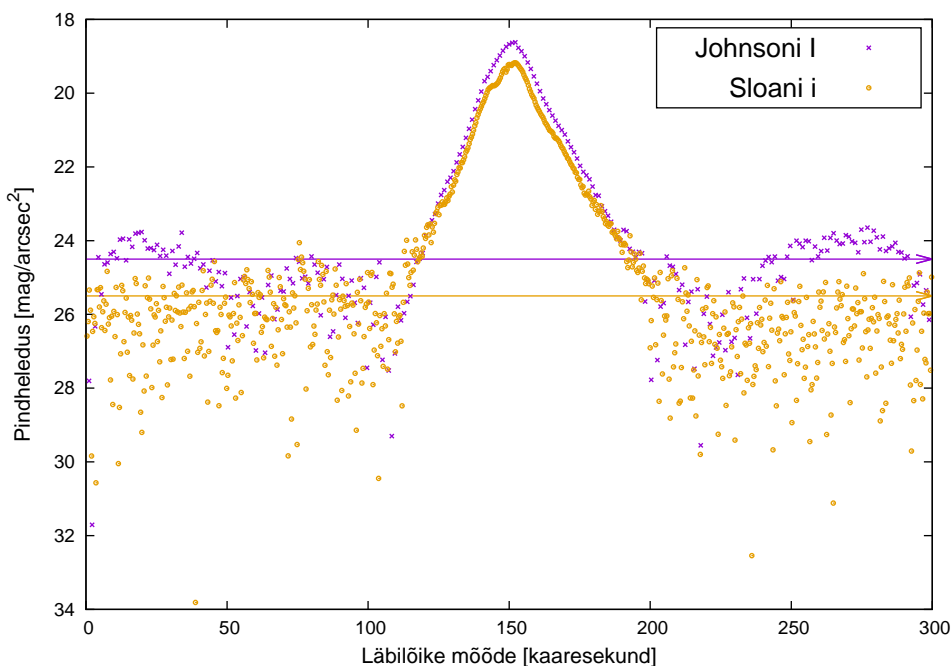
Joonis 14: g_s filtri tehtud SDSS vaatluskaader. Rohelise ringiga on märgitud apertuur, mille sisse jääva signaali põhjal arvutati galaktika koguheledus Sloani taevaülevaate andmetöötleses. Apertuuri raadiuseks on 43.92 kaaresekundit ning see jätab välja osa heledaid galaktika äärealasid. Käesolevas töös kasutatud ristkülik galaktika koguheleduse määramiseks jätab välja ainult väga hõredad ja väikse heledusega galaktika osad. Ristküliku mõõtmed oli 185×384 kaaresekundit.

sabasid (vt joonis 22) ja vaevu kaaslasgalaktika UGC 6016 keskosa. I_c filtris tehtud pindheledusjaotus graafikul (joonis 15) on näha interferentsist põhjustatud taevafooni heleduse kõikumine.

4.2 Galaktika pindheledus ja süvafotomeetria

Pindheledusjaotuste põhjal võib väita, et galaktikal NGC 3448 on lisaks galaktika tsentrile kaks heledamat tähetekke piirkonda kummalgi pool keskosa. Hõredate tähepiirkondade pindheledused on vahemikus 25 mag kuni 24 mag ja galaktika maksimaalne pindheledus 21 mag B filtris kuni 20 mag V ja R_c filtris. Kaaslasgalaktika UGC 6016 hõredamad piirkonnad ei eristunud pindheledusgraafikul taevamürast kuid maksimaalseks pindheleduseks saadi 23 mag .

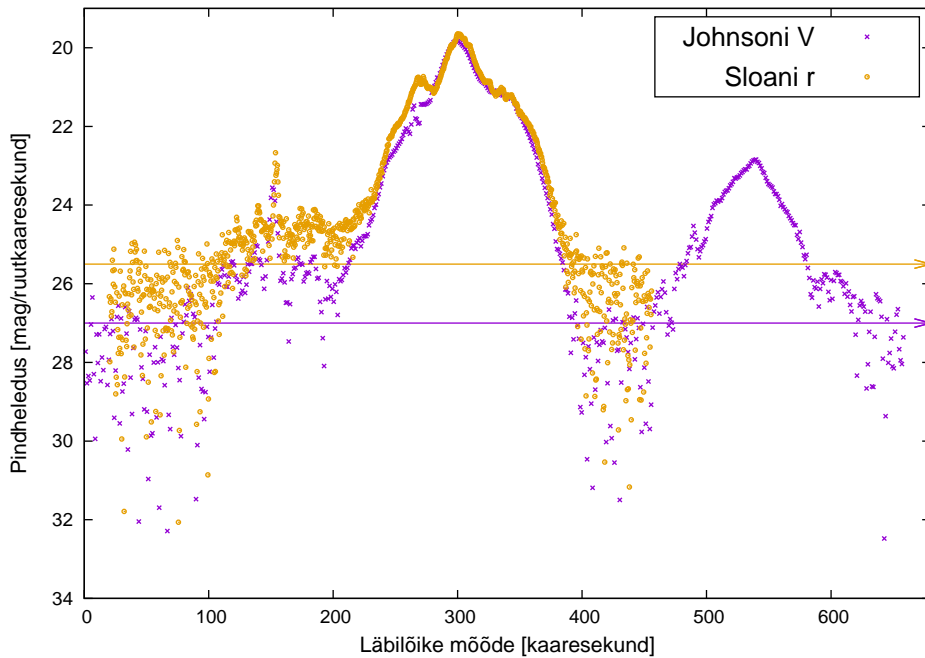
RAITSi filtri B ühendkaader koosnes 65 kaadrist, mille säriaeg oli 300 s, seega kombineeritud säriaeg oli 19 500 s ehk umbes 5 tundi ja 25 minutit. Taevafooni müra hakkab signaali mõjutama 27 mag heledusest, mis tähendab, et allikad, mille heledused on 26.5 mag on kaadril mürast hästi eristatavad. V filtri 15 minutit pi-



Joonis 15: Johnson-Cousinsi I_c ja Sloani i_s filtris tehtud galaktika läbilõike pindheledusgraafik. I_c kaadri halva kvaliteedi tõttu ei ole saavutatud suuremat sügavust kui SDSS vaatlustes. Graafikul on näha ka interferentsi maksimumist tekitatud müra-signaali kõikumine.

kema säriaaja puhul oli taevamüra heleduse piiriks samuti $27\ mag$ (vt joonis 16). V filtris suurendab taevafooni heledust kõige enam tänavalampide valguses olevad kaks intensiivset naatriumi kiirgusjoont. R_c filtris oli ühendkaadri summeeritud säriaeg kõigest 3 tundi, kuid taevamüra maksimaalseks heleduseks saadi samuti $27\ mag$ (vt joonis 17). R_c filtris ei mõjuta taeva heledust tugevaid inimtekitatud kiirgusallikaid nagu V filtris, mistõttu on lühema säritusega saadud sama hea kaader nagu B ja V filtrites. I_c filtris oli summaarne säriaeg 3 ja pool tundi ning taevamüra maksimaalseks heleduseks saadi $25\ mag$.

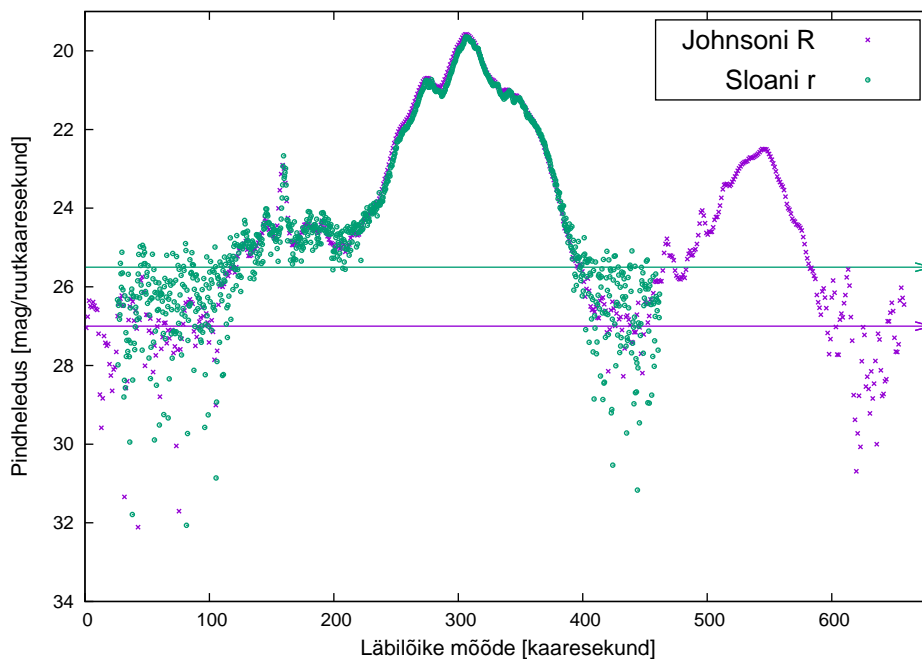
SDSS kõikide kaadrite säriaeg oli $54\ s$ ning taevafooni heleduse piiriks oli kõikide filtrite puhul $25.5\ mag$. Hoolimata suurest säriaegade erinevusest on RAITSi vaatlustega suudetud tungida 1.5 tähesuuruse võrra sügavamale. Läbilõigete pindheledusjaotuste põhjal saab öelda, et SDSSi teleskoobi 1 sekundilisele säritusele peab RAITS teleskoobiga vaatlema 1.5 minutit, et saada uurimisobjektist sama signaalmüra suhtega kujutis. Kui RAITS ja SDSS teleskoobid asuksid samal kõrgusel merepinnast ning samadel ilmastikutingimustel iseloomustaks nende valgujõudude erine-



Joonis 16: Pindheledusjaotus r_s ja V filtris. Selgelt eristuvad galaktika kolm heledamat piirkonda - galaktika tsepter ja kummalgi pool asuvad tähetekkepiirkonnad. RAITSi sügavamast küündivusest SDSS kaadritega võrreldes annab märku vasakul paikneva hõredama tähepiirkonna selge eristumine taeva üleüldisest taustheledusest. RAITSi kaadritel on selleks 27 mag ja SDSS kaadril 25.5 mag, mis on märgitud värviliste joontega.

vust üksnes peapeeglite pindalade suhe, milleks on 62. Peapeeglite suhtest tulenevalt peaks RAITS teleskoobiga vaatlema 62 sekundit, et saada sama signaali-müra suhtega kujutis nagu saadakse ühe sekundilise säriajaga SDSS vaatlustest. Järelikult Eesti kehvema astrokliima ja paiknemise tõttu peab RAITSi säriaega pikendama üksnes poole minuti võrra, et juba saada SDSS vaatlustele vastav signaal-müra suhe.

Uurimine kinnitas, et RAITS teleskoobiga on võimalik tegeleda nõrkade pindheledustega objektide süvafotomeetriaga. Kõige efektiivsema tulemuse annavad vaatlused B filtris, kus atmosfääri mõjutused on kõige minimaalsemad, kuid V ja R_c filtrite tulemused on samuti head. I_c filtris mõjutab pikaajalisi vaatlusi oluliselt samapaksusinterferentsi tekitatud lis signaal. Uuritava objekti lahutus on see-eest kõikides filtrites suhteliselt halb - galaktika siseehituse kohta pole RAITSi vaatluste põhjal midagi uut võimalik teada saada, võrreldes SDSS vaatlustega.



Joonis 17: Pindheledusjaotus r_s ja R_c filtris. Selgelt eristuvad galaktika kolm heledamat piirkonda - galaktika tsenter ja kummalgi pool asuvad tähetekkepiirkonnad. Graafikul on värviliste joontena toodud ära taeva taustheledusele vastav nivoo, millest nõrgemaid objekte ei ole võimalik taevafoonist eristada. RAITSi kaadritel on selleks 27 mag ja SDSS kaadril 25.5 mag.

5 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida, kas Tartu Observatooriumi teleskoobiga RAITS on võimalik tegeleda nõrkade pindheledusega objektide süvafotomeetriaga ning kuidas mõjutab tulemusi vaatluste säriaeg, astrokliima ja teleskoobi enda omadused. Uurimine viidi läbi galaktika NGC 3448 põhjal, mida vaadeldi 2014. aastal viie kuu jooksul. Vaatluse esmane eesmärk oli jälgida galaktikas plahvatanud supernoova heleduse järgulist kahanemist. NGC 3448 on ebakorrapärase ehitusega, milles esinevad aine väljapaiskumisest tekkinud hõredad tähepiirkonnad ehk galaktikasabad, mis teevad objekti süvafotomeetrilise uurimise huvitavaks.

Töö käigus moodustati igas fotomeetrilises filtris paljudest üksikkaadrist koosnevad ühendkaadrid, et saada pikem summaarne säriaeg. Kaadritel sooritati standardheleduse kalibreerimine, lahutati maha taevafoon ning mõõdeti galaktika koguheledused Johnson-Cousinsi B, V, R_c, I_c ning Sloani u_s, g_s, r_s, i_s, z_s filtrites. Galaktika erinevate piirkondade läbilõigete abil koostati pindheledusjaotuse graafikud, millelt määrati teleskoobi RAITS fotomeetriline küündivus.

Kõige efektiivsemad olid mõõtmised B filtris ning, valguse interferentsi tõttu teleskoobi CCD-kaamera struktuuris, kõige kehvemad I_c filtris. B, V ja R_c filtris määrati läbilõigete abil kaadri taevafooni heleduse maksimaalseks väärtuseks 26.5 mag , mis tähendab, et nõrgimad allikad, mis sellise säriaaja puhul RAITSiga vaadeldavad on, omavad heledusi 26 mag . Sloani taevaülevaate teleskoobiga tehtud kaadritel on nõrgim eristatav allikas heledusega 24.5 mag ning taeva taustheleduse maksimaalne väärtus 25 mag . RAITSi viie ja pooletunnise vaatlusega saavutati 1.5 mag suurem sügavus kui SDSS vaatlustes. Läbilõigete heledusjaotuste põhjal saab öelda, et SDSS teleskoobi 1 sekundilisele säritusele peab sama objekti RAITS teleskoobiga vaatlema 1.5 minutit, et saavutada sama signaal-müra suhtega kaader. Teleskoopide peapeeglite suhte järgi peaks 1 sekundilisele SDSS säriaajale vastama RAITSi 1 minutiline säriaeg. Pooleminutiline erinevus näitab, et Eesti astrokliima ja madal paiknemine merepinnast küll mõjutab süvafotomeetrilisi vaatlusi, kuid olulisem tegur on siiski teleskoobi ava diameeter. Uurimine kinnitas, et RAITS teleskoobiga on võimalik tegeleda nõrkade pindheledustega objektide süvafotomeetriaga, kuid selleks on vajalikud pikad säriajad. Erinevalt SDSS teleskoobist on pikaajalisi vaatluseid RAITS

teleskoobiga hea läbi viia, sest vaatlusaega on kerge saada.

Lisaks süvafotomeetrilistele tulemustele mõõdeti käesolevas lõputöös esmakordselt galaktika NGC 3448 koguheledust Johnson-Cousinsi R_c ja I_c filtrites ning täpsustati SDSSi määratud galaktika koguheledusi g_s, r_s, i_s ja z_s filtrites. RAITS teleskoobi tagasihoidliku lahutuse tõttu polnud võimalik galaktika struktuuri kohta midagi uut teada saada.

Kasutatud kirjandus

- Arp, H. (1966). *Atlas of peculiar galaxies*.
- Bessell, M. S. (1990). “UBVRI passbands”. In: 102, pp. 1181–1199. DOI: 10.1086/132749.
- Blanton, M. R., J. Dalcanton, et al. (2001). “The Luminosity Function of Galaxies in SDSS Commissioning Data”. In: 121, pp. 2358–2380. DOI: 10.1086/320405. eprint: astro-ph/0012085.
- Blanton, M. R. and S. Roweis (2007). “K-Corrections and Filter Transformations in the Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared”. In: 133, pp. 734–754. DOI: 10.1086/510127. eprint: astro-ph/0606170.
- de Vaucouleurs, G. et al. (1991). *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h. Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h*.
- Eenmäe, T. (2015). Personaalne vestlus.
- Frei, Z. and J. E. Gunn (1994). “Generating colors and K corrections from existing catalog data”. In: 108, pp. 1476–1485. DOI: 10.1086/117172.
- Fukugita, M. et al. (1996). “The Sloan Digital Sky Survey Photometric System”. In: 111, p. 1748. DOI: 10.1086/117915.
- Gunn, J. E. et al. (2006). “The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey”. In: 131, pp. 2332–2359. DOI: 10.1086/500975. eprint: astro-ph/0602326.
- Lupton, R. (2005). *Transformations between SDSS magnitudes and other systems*. URL: <https://www.sdss3.org/dr10/algorithms/sdssUBVRITransform.php#Lupton2005>.
- Massey, Philip and Lindsey E. Davis. *A User’s Guide to Stellar CCD Photometry with IRAF*.
- Nilson, P. (1973). *Uppsala general catalogue of galaxies*.
- Noreau, L. and P. P. Kronberg (1986). “The amorphous galaxy NGC 3448. I - Photometry, dynamics, and modeling”. In: 92, pp. 1048–1067. DOI: 10.1086/114236.
- Sandage, A. and G. A. Tammann (1981). *A revised Shapley-Ames Catalog of bright galaxies*.

- Tõravere observatooriumi aastaraamat* (2012). URL: <http://to.ee/est/meist/arengusuunad/aastaraamatud>.
- Tully, R. B. et al. (1996). “The Ursa Major Cluster of Galaxies.I.Cluster Definition and Photometric Data”. In: 112, p. 2471. DOI: 10.1086/118196. eprint: [astro-ph/9608124](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9608124).
- York, D. G. et al. (2000). “The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary”. In: 120, pp. 1579–1587. DOI: 10.1086/301513. eprint: [astro-ph/0006396](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006396).
- Zacharias, N. et al. (2012). “VizieR Online Data Catalog: UCAC4 Catalogue (Zacharias+, 2012)”. In: *VizieR Online Data Catalog* 1322,

RAITS Telescope's Deep Photometry of Galaxy NGC 3448

Ann Alice Ehala

Summary

The aim of the Bachelor thesis RAITS Telescope's Deep Photometry of Galaxy NGC 3448 is to investigate the possibility of doing deep photometry imaging with Tartu Observatory's telescope RAITS. No similar study of RAITS telescope's ability in deep photometry has previously been conducted and positive outcomes could lead to new possibilities in research and telescope usage. The study used observations of the galaxy NGC 3448 that were made in 2014 over a period of 5 months. During that time the gradual decrease in supernova SN 2014G's brightness was measured. The galaxy itself is irregular in structure and thought to have interacted with a nearby dwarf galaxy UGC 6016 in the past. Evidence of this interaction is seen as faint stellar streams pointing both away and toward the dwarf companion. These faint areas were used to test RAITS telescope's abilities in deep photometry imaging by comparing the surface brightness distribution of cross-sections that included these stellar streams.

Among all frames received from observations with RAITS a selection was made based on the sky background brightness and the frame's resolution. In each Johnson-Cousins' filter a combined frame was made to lengthen the total exposure time. These combined frames were calibrated and the galaxy's total brightness was measured. Two initial cross-sections were made - the first passing from the longer tidal tail through the galaxy centre and the companion galaxy; and the second passing through the shorter tidal tail and galaxy centre (see figure 10 blue and yellow lines). Results in both total brightness and surface brightness were compared with data from the Sloan Digital Sky Survey 10th Data Release (York et al. 2000).

The total brightness of the galaxy was measured from a rectangular aperture of $384 \times 185 \text{ arcsec}^2$. The results in Sloan photometric filters were: $g = 12.^m032$, $r = 11.^m453$, $i = 11.^m426$ and $z = 11.^m051$. These differed greatly from the SDSS data due to their smaller aperture that excluded the outer parts of the galaxy (see figure 14). The surface brightnesses in Johnson-Cousins' B and V filters were compared

to The Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (de Vaucouleurs et al. 1991) but no previous measurements for R_c and I_c filters were found.

The surface cross-sections were compared with similar sections from SDSS frames. The surface brightness distribution showed that observations with RAITS telescope in filters B, V, R_c reached to a brightness of $26.^m5$ which is $1.^m5$ more deeper than the observations of the SDSS. This proved that the RAITS telescope can be used in deep photometry imaging. The combined exposure time of the B and V band observations were 5.5 hours. This means that 1 second exposure with SDSS telescope needs a 1.5 minute exposure with RAITS. Corresponding exposure times based on the telescopes' primary mirror ratio are 1 second with SDSS and 62 seconds with RAITS. This result shows that Estonian's poor climate and low altitude affects observations less than the telescopes own properties.

Although the numerous observation available for everyone from large sky surveys, such as SDSS, the RAITS telescope is useful for observations of specific objects over longer periods of time because of its many available observation times.

6 Lisa 1

6.1 Tähtede instrumentaalsed heledused Johnson-Cousinsi B,V, R_c ja I_c filtrites

Tabel 5: Intrumentaalsed heledused Johnson-Cousinsi süsteemis

Tähe UCAC4-ID	b	v	r	i
722-050949	19.903 ± 0.005	18.777 ± 0.003	18.165 ± 0.002	18.939 ± 0.004
722-050944	19.187 ± 0.004	18.072 ± 0.002	17.449 ± 0.002	18.217 ± 0.003
722-050943	21.749 ± 0.016	20.458 ± 0.008	19.702 ± 0.006	20.337 ± 0.009
722-050939	18.141 ± 0.002	17.212 ± 0.001	16.686 ± 0.001	17.595 ± 0.002
722-050938	20.045 ± 0.006	18.794 ± 0.003	18.085 ± 0.002	18.775 ± 0.003
722-050936	21.042 ± 0.010	20.021 ± 0.006	19.439 ± 0.005	20.208 ± 0.008
721-051501	19.161 ± 0.004	18.112 ± 0.002	17.534 ± 0.02	18.324 ± 0.003
722-050940	22.566 ± 0.027	21.001 ± 0.011	20.068 ± 0.007	20.602 ± 0.011
722-050935	21.196 ± 0.011	19.914 ± 0.006	19.224 ± 0.004	19.921 ± 0.007
722-050934	19.778 ± 0.005	18.661 ± 0.003	18.072 ± 0.002	18.844 ± 0.004
722-050932	20.361 ± 0.007	19.269 ± 0.004	18.698 ± 0.003	19.490 ± 0.005
722-050948	20.156 ± 0.006	19.108 ± 0.004	18.494 ± 0.003	19.253 ± 0.005

6.2 Intrumentaalse nullpunkti määramine B ja V filtrites

Nullpunkti kaalutud keskmise arvutati valemitega (näide toodud B filtri jaoks)

$$z_{bkesk} = \frac{\sum_{j=1}^{12} k_{bj} \cdot z_{bj}}{\sum_{j=1}^{12} k_{bj}}, \quad (39)$$

kus k_b on määramatuse kaalud

$$k_b = \frac{1}{u_{zb}^2}. \quad (40)$$

Kaalutud keskmise määramatus leiti

$$U_{zb} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^{12} k_{bj}}}. \quad (41)$$

Tabel 6: Instrumentaalsed nullpunktid ja määramatused B ja V filtris

Tähe UCAC4-ID	$z_b \pm u_{zb}$	$z_v \pm u_{zv}$
722-050949	-4.892 ± 0.021	-4.48 ± 0.051
722-050944	-4.875 ± 0.011	-4.568 ± 0.091
722-050943	-4.876 ± 0.044	-4.572 ± 0.091
722-050939	-4.9 ± 0.011	-4.572 ± 0.071
722-050938	-4.882 ± 0.012	-4.575 ± 0.071
722-050936	-4.894 ± 0.062	-4.565 ± 0.051
721-051501	-4.895 ± 0.021	-4.541 ± 0.071
722-050940	-4.833 ± 0.049	-4.581 ± 0.122
722-050935	-4.876 ± 0.033	-4.575 ± 0.091
722-050934	-4.896 ± 0.021	-4.584 ± 0.061
722-050932	-4.861 ± 0.012	-4.581 ± 0.051
722-050948	-4.881 ± 0.021	-4.527 ± 0.101

6.3 SDSS filtri heleduste teisenemine Johnson-Cousinsi filtri heledusteks

Teisendusi tehti valemiga 12 ja 13 ning tulemused on toodud tabelis 7. Määramatused teisenenud heledustele on määratud teisenduse määramatusega σ .

6.4 Instrumentaalse nullpunkti ja määramatus R_c ja I_c filtris

Instrumentaalsed nullpunktid R_c ja I_c filtris leiti valemiga (39) ja nende määramatused valemitega

$$u_{zr} = \sqrt{[(1 + a_R)\sigma_R]^2 + u_r^2 + [(R - V)u_{aR}]^2 + (a_R \cdot u_V)^2} \quad (42)$$

$$u_{zi} = \sqrt{[(1 + a_I)\sigma_I]^2 + u_i^2 + [(I - V)u_{aI}]^2 + (a_I \cdot u_V)^2}, \quad (43)$$

mida hiljem kasutati kaalutud keskmise meetodil filtri instrumentaalse nullpunkti leidmiseks.

Tabel 7: Tabel Sloani heleduste teisendumisest Johnson-Cousinsi süsteemi

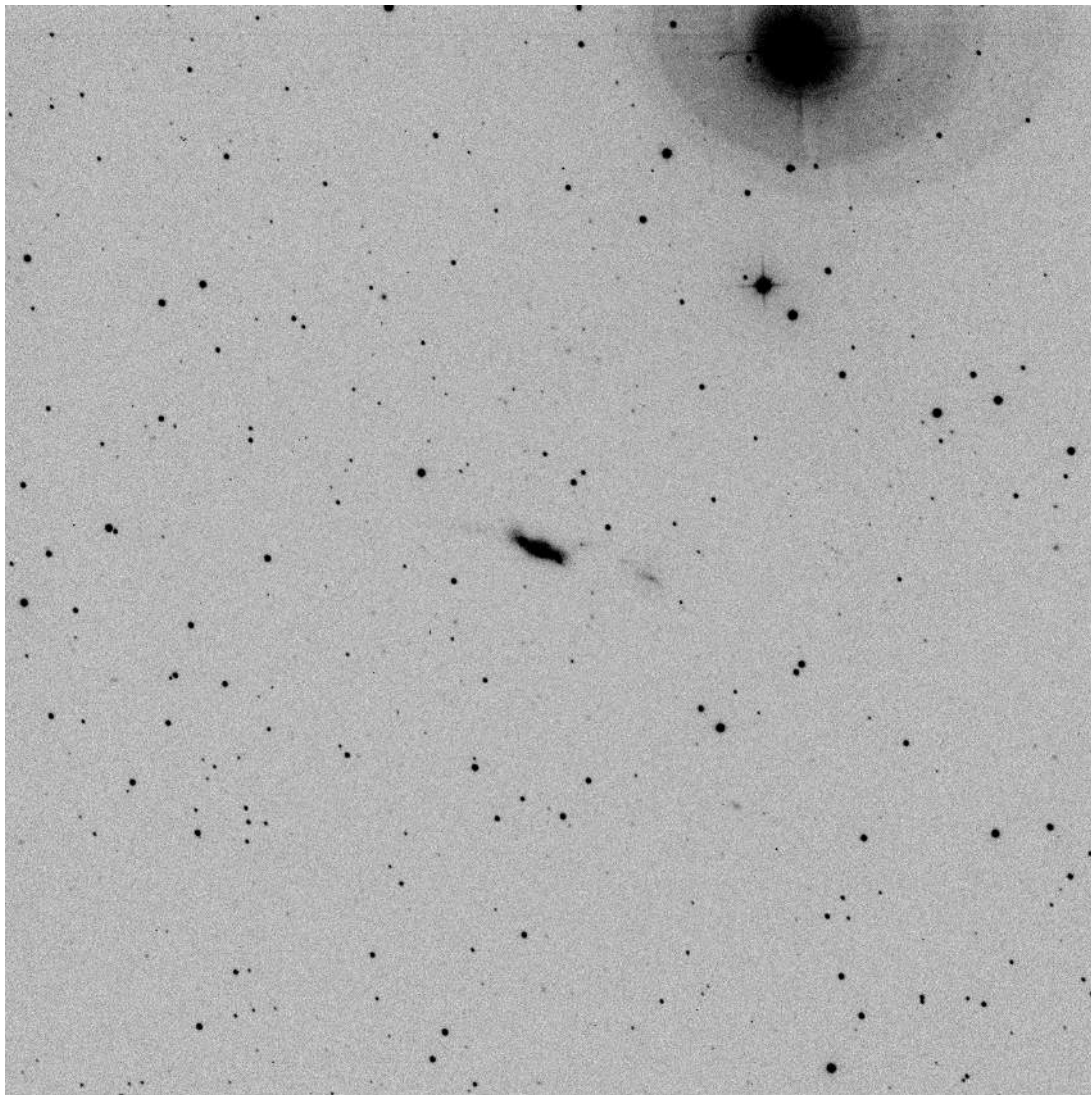
Tähe UCAC4-ID	r_s	R_c	i_s	I_c
722-050949	14.136	13.946	13.979	13.559
722-050944	13.308	13.126	13.178	12.764
722-050943	15.59	15.342	15.237	14.764
722-050939	12.513	12.342	12.419	12.014
722-050938	13.952	13.748	13.746	13.314
722-050936	15.323	15.159	15.254	14.855
721-051501	13.402	13.226	13.294	12.886
722-050940	15.987	15.754	15.683	15.227
722-050935	15.067	14.852	14.828	14.388
722-050934	12.873	13.7	13.773	13.367
722-050932	14.491	14.324	14.414	14.013
722-050948	15.261	14.827	14.272	13.648

Tabel 8: Instrumentaalsed nullpunktid Johnson-Cousinsi filtrite V, R_c , I_c

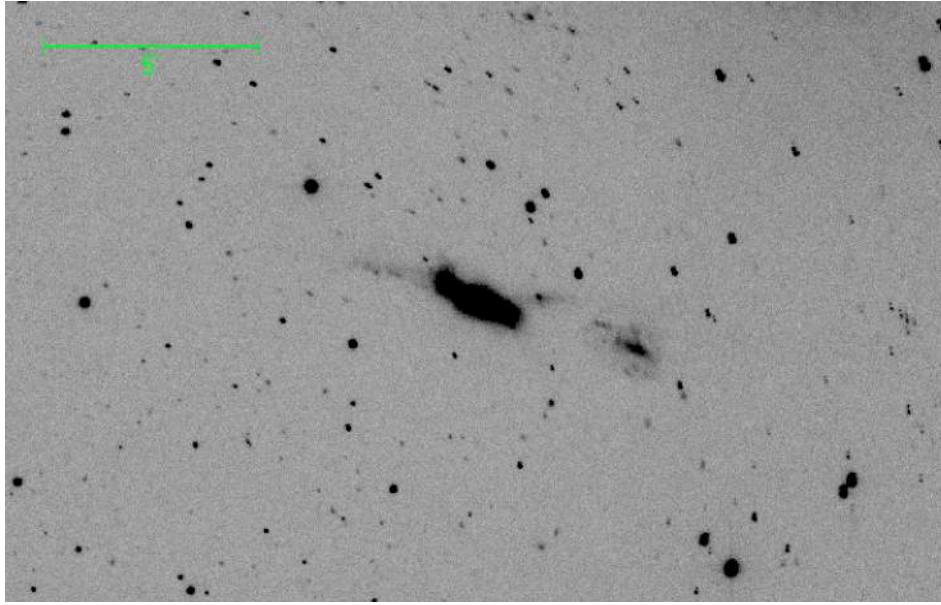
Tähe UCAC4-ID	$z_v \pm u_{zv}$	$z_r \pm u_{zr}$	$z_i \pm u_{zi}$
722-050949	-4.481 \pm 0.049	-4.229 \pm 0.008	-5.405 \pm 0.009
722-050944	-4.569 \pm 0.088	-4.333 \pm 0.008	-5.477 \pm 0.009
722-050943	-4.531 \pm 0.089	-4.376 \pm 0.012	-5.606 \pm 0.013
722-050939	-4.573 \pm 0.069	-4.535 \pm 0.008	-5.502 \pm 0.009
722-050938	-4.576 \pm 0.069	-4.35 \pm 0.009	-5.491 \pm 0.009
722-050936	-4.565 \pm 0.049	-4.288 \pm 0.010	-5.373 \pm 0.013
721-051501	-4.542 \pm 0.069	-4.317 \pm 0.008	-5.461 \pm 0.009
722-050940	-4.582 \pm 0.118	-4.332 \pm 0.014	-5.415 \pm 0.015
722-050935	-4.576 \pm 0.088	-4.384 \pm 0.010	-5.565 \pm 0.012
722-050934	-4.585 \pm 0.059	-4.383 \pm 0.008	-5.501 \pm 0.010
722-050932	-4.581 \pm 0.049	-4.383 \pm 0.009	-5.499 \pm 0.010
722-050948	-4.516 \pm 0.098	-3.661 \pm 0.009	-5.635 \pm 0.010

7 Lisa 2

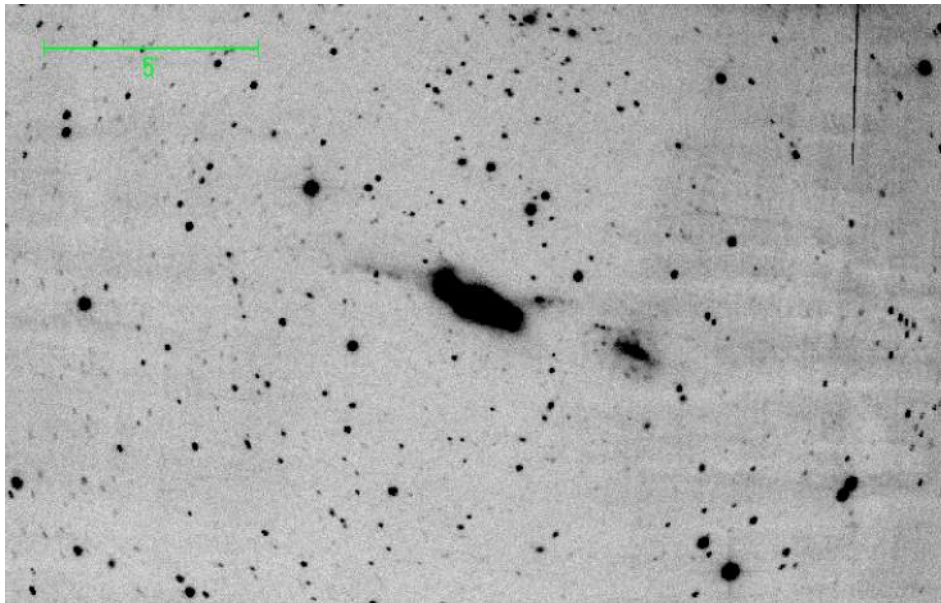
7.1 Galaktika NGC 3448 Johnson-Cousinsi B, V, R, I filtrites



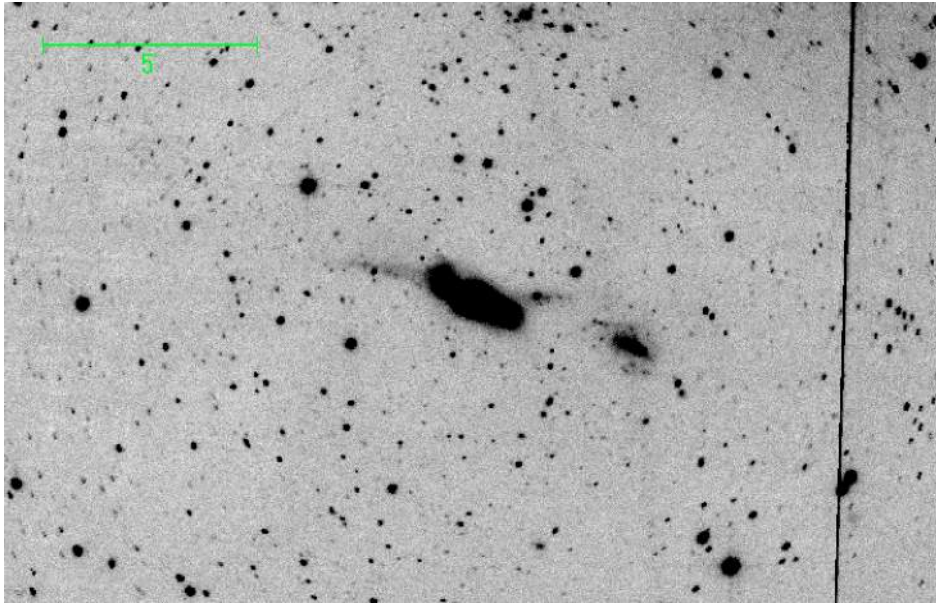
Joonis 18: RAITSi üksikkaader B filtris, säriajaga 300 s. Kaadri mõõtmed on 2048×2048 pikslit ehk 37×37 kaareminutit. Kaadri paremas nurgas on ülesäritatud hele täht, mis põhjustas selles taevas heledama taevafooni.



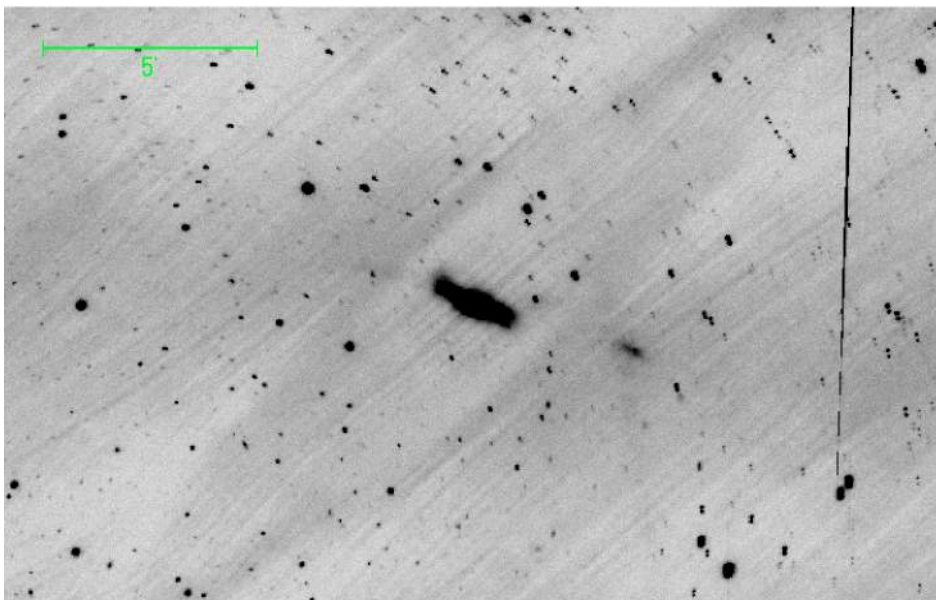
Joonis 19: RAITSi ühendkaader B filtris, summeeritud säriaeg on 5 tundi ja 25 minutit. Pildi äärtes on näha kaadrite kombineerimise ebatäpsustest tulenevad tähekujutiste väljavenimine.



Joonis 20: RAITSi ühendkaader V filtris summeeritud säriajaga 5 tundi ja 40 minutit. Pildi äärtes on näha kaadrite kombineerimise ebatäpsustest tulenev tähekujutiste väljavenimine. Pildi paremas nurgas on väga heleda tähe põhjustatud heledam taevafoon ning ülesäritusest tekkinud heledate pikslite joon.

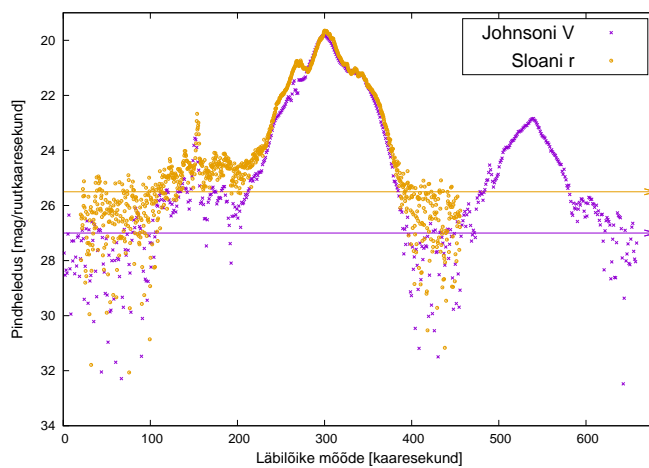


Joonis 21: RAITSi ühendkaader R_c filtris summeeritud säriaajaga 3 tundi. Pildi äärtes on näha kaadrite kombineerimise ebatäpsustest tulenev tähekujutiste väljavenimine. Pildi paremas nurgas on väga heleda tähe põhjustatud heledam taevafoon ning ülesäritusest tekkinud heledate pikslite joon.

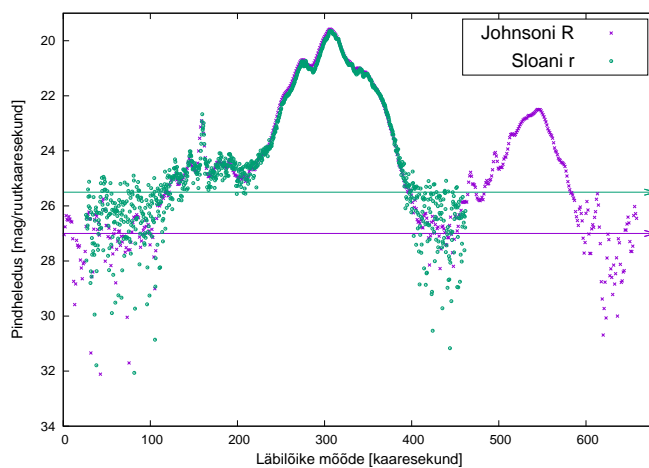


Joonis 22: RAITSi ühendkaader I_c filtris. Galaktika nõrgemad osad on vaevu märgatavad ning kogu kaader on kahjustatud *fringing* efektist. Pildi äärtes on näha kaadrite kombineerimise ebatäpsustest tulenev tähekujutiste väljavenimine. Pildi paremas nurgas on väga heleda tähe ülesäritusest tekkinud heledate pikslite joon.

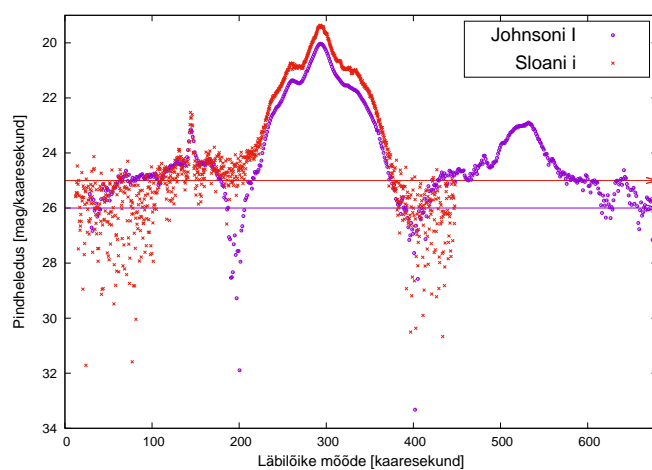
7.2 Pindheledusjaotused B, V, R_c, I_c filtrites



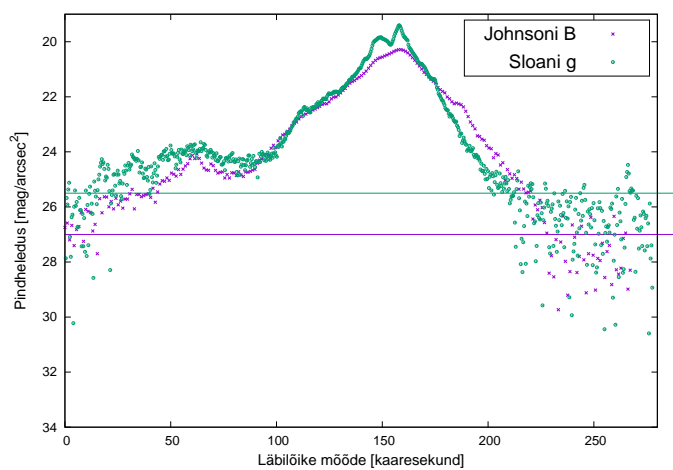
Joonis 23: Pindheledusjaotus r_s ja V filtris



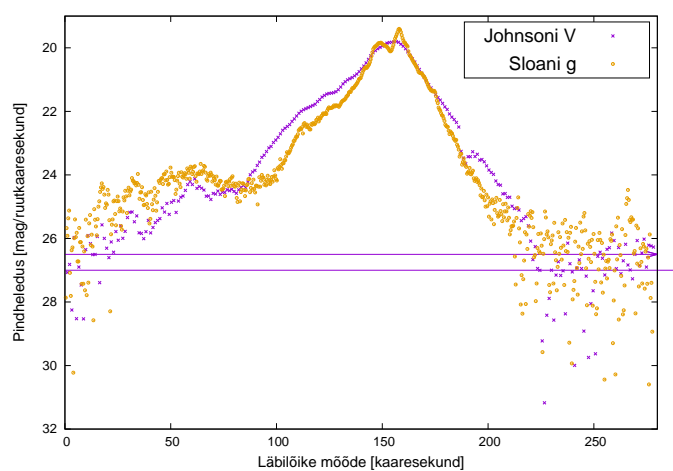
Joonis 24: Pindheledusjaotus r_s ja R_c filtris.



Joonis 25: Pindheledusjaotus i_s ja I_c filtris



Joonis 26: Pindheledusjaotus g_s ja B filtris



Joonis 27: Pindheledusjaotus g_s ja V filtris