

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Füüsika instituut

Piia Maria Tomberg

**TÄHEVOOLUDE GD-1 JA PALOMAR 5 UURIMINE**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja:  
Taavi Tuvikene

Tartu 2019

# Tähevoolude GD-1 ja Palomar 5 uurimine

Tähevoolud on tähesüsteemid, mis on orbiidil ümber galaktika ning lagunevad galaktika graviatsiooniliste mõjutuste tõttu pikaks tähtedest koosnevaks ribaks mööda süsteemi orbiiti ümber galaktika. Viimaste aastakümnete jooksul on tähevoole aina enam avastatud tänu tundlike teleskoopide arengule. Bakalaureusetöös eristatakse esiplaani tähtedest võimalikult efektiivselt tähevoolud GD-1 ja Palomar 5 ning leitakse nende joon- ja ruumtihedused. Andmetöötlus sisaldab tähtede valikut nii nende omaliikumiste kui ka värvus-heledus diagrammi põhjal. Lõputöö tulemusena leiti, et valitud tähevoolud ei ole homogeense tihedusega, ning vähendati esiplaani moodustavaid tähti algsest valimist olulise protsendi võrra.

Märksõnad: Tähed, tähevoolud, meetod: andmeanalüüs, astrometria, fotomeetria

CERCS: P520 - Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

## A Study of the Stellar Streams GD-1 and Palomar 5

Stellar streams are systems of stars that are in orbit around a galaxy and are torn apart by the galaxy. As a result the stars of the original system form a collection of stars of the same origin in a ribbon at the system's orbit around the galaxy. During the last decades there have been increasingly more discoveries of stellar streams due to the improvement of highly accurate telescopes. In the given study the stellar streams GD-1 and Palomar 5 are separated from a significant amount of foreground stars between the streams and the Earth. The linear and volume densities of the chosen streams are also calculated. The data processing of the study comprises of filtering stars using both their proper motions and their positions on the colour-magnitude diagram. The results of the study show a significant decrease of the number of foreground stars and confirm that the chosen streams do not have constant densities.

Keywords: Stars, stellar streams, methods: data analysis, techniques: photometric and spectroscopic

CERCS: P520 - Astronomy, space research, cosmic chemistry

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>5</b>
<b>1 Tähevoolud</b>	<b>6</b>
1.1 Tähevoolude teke ja teadaolevad voolud Linnutee galaktikas . . . . .	6
1.2 Tähevoolude eristamine esiplaanil olevatest tähtedest . . . . .	7
1.2.1 Omaliikumine ja radiaalkiirus . . . . .	7
1.2.2 Peajada, isokroon, metallilisus . . . . .	8
1.3 Tähevool GD-1 . . . . .	10
1.4 Tähevool Palomar 5 . . . . .	11
<b>2 Andmeallikad</b>	<b>13</b>
2.1 Gaia DR2 . . . . .	13
2.2 PanSTARRS DR1 . . . . .	14
<b>3 Andmetöötlus</b>	<b>15</b>
3.1 Andmetöötluse etapid . . . . .	15
3.2 GD-1 . . . . .	16
3.2.1 Omaliikumiste löige . . . . .	17
3.2.2 Isokrooni leidmine . . . . .	18
3.2.3 Isokrooni ja omaliikumiste rakendamine . . . . .	19
3.2.4 Lõplik andmetöötlus . . . . .	20
3.2.5 Joontihedus . . . . .	20
3.2.6 Ruumtihedus . . . . .	22
3.3 Palomar 5 . . . . .	22
3.3.1 Omaliikumiste löige . . . . .	23
3.3.2 Isokrooni leidmine . . . . .	23
3.3.3 Isokrooni rakendamine . . . . .	25
3.3.4 Lõplik andmetöötlus . . . . .	26
3.3.5 Joontihedus . . . . .	27

3.3.6	Ruumtihedus . . . . .	27
3.4	Määramatus ja süstemaatiline viga . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Tulemused</b>	<b>30</b>
4.1	GD-1 töötamise tulemused . . . . .	30
4.2	Palomar 5 töötamise tulemused . . . . .	31
4.3	Tiheduste suhestamine kasutatud andmebaasidega . . . . .	33
4.4	Tulemused võrreldes varasemate töödega . . . . .	33
4.4.1	GD-1 . . . . .	33
4.4.2	Palomar 5 . . . . .	33
	<b>Tänuavaldused</b>	<b>34</b>
	<b>Kirjandus</b>	<b>35</b>
	<b>Lihtlitsents</b>	<b>37</b>

# Sissejuhatus

Aina paremate teleskoopide kasutusele võtmine on võimaldanud viimastel aastakümnetel aina paremini mõista, et Linnutee struktuur on välja kujunenud arvukate kokkupõrgete tulemusena. Aravavasti on iga Universumis oleva galaktika ümber orbiidil väiksemaid tähesüsteeme, mis lagunevad selle galaktika gravitatsiooni mõjul pikkadeks tähtede ribadeks. Kirjeldatud ribad nimetatakse tähevooludeks (Tenjes, 2018).

Tähevoolude uurimine aitab määrata voolude allikaks olevate kerasparvede tegelikke orbiite ja kerasparvede omadusi, nagu need olid miljardeid aastaid tagasi. Lisaks annavad tähevoolude mittehomoogeensed alad teavet tumeaine jaotuse kohta Linnutee galaktikas. Bakalaureusetöö teema suhestub hästi uurimissuundadega, mida käsitletakse Tartu observatooriumi galaktikate füüsika ja kosmoloogia osakonnas.

Bakalaureusetöö eesmärgiks on Linnutee kerasparvedest pärinevate tähevoolude GD-1 ja Palomar 5 tähtede eristamine arvukatest esi- ja tagaplaani tähtedest. Üheks lõputöö eesmärgiks on ka tähevoolude joon- ja ruumtiheduste leidmine ning nende võrdlemine varasemate töödega. Sobivate vaatlusandmete saamiseks on tarvis kasutada Gaia astromeetrilist kataloogi koos täiendavate fotomeetriliste andmetega Pan-STARRSi kataloogist. Lõputöö on lähtepunktiks tähevoolude GD-1 ja Palomar 5 modelleerimiseks ja mudeliga võrdlemiseks. Samuti on uurimus oluline ka uute tähevoolude leidmiseks, kuna lõputöö tulemusena saab teada, kuidas eristuvad tähevoolud kasutatavates andmebaasides.

Üle 90 protsendi Linnutee galaktikast moodustab tumeaine, mida on võimalik uurida vaid selle gravitatsiooniliste mõjutuste abil. Galaktika halost moodustab tumeaine veelgi suurema osa kui galaktika tasandist ning halos leidub mitmeid tähevoole, mis tekivad Linnutee gravitatsiooniväljas lõksus olevate kerasparvede ja kääbusgalaktikate koostlagunemisel. Tähevoole mõjutanud tumeaine on põhjustanud vooludes tiheduse erinevusi, mille abil on võimalik tuvastada tumeaine paiknemist Linnutee halos.

# Peatükk 1

## Tähevoolud

Tähevoolud tekivad tähesüsteemide gravitatsioonilisel häiritusel, mida põhjustab galaktika, mille ümber tähesüsteem tiirleb. Selle häirituse tulemusena tekkinud tähevoolud on eri paikades erineva tihedusega, mis aitab tuvastada massi paiknemist Linnutee galaktikas, sealhulgas ka tumeaine asetsemist (Price-Whelan ja Bonaca, 2018).

Kaks kõige tuntumat tähevoolu, mis tulenevad kerasparvedest, on GD-1 ja Palomar 5. Kuna mõlemad asuvad Linnutee galaktika halos, siis sobivad nad hästi selleks, et tumeaine asukohti tuvastada. (Nende lähimad kaugused galaktika keskmest (*pericentric distance*) on vastavalt 7,8 (Price-Whelan ja Bonaca, 2018) ja 23,2 kpc (Grillmair ja Carlin, 2016)).

GD-1 arvatakse olevat hea tähevoolu tumeaine paiknemise uurimiseks, kuna selles tähevoolus tekkinud tiheduse varieeruvus ei oleks saanud tekkida suurte molekulaarpilvedega interakteerumisest, kuna voolu peritsentriline kaugus on selleks liiga suur. Galaktika halos ei asetse piisavalt molekulaarpilvi, et põhjustada nii suuri tiheduse muutusi, kui tähevooludes on näha. Sellest tulenevalt võib järeldada, et tiheduse erinevused on tekkinud kunagisest vastastikmõjust tumeainega. (Küpper *et al.*, 2015)

### **1.1 Tähevoolude teke ja teadaolevad voolud Linnutee galaktikas**

Tähevoolu moodustavad tähed, mis on väljunud lagunevast tähesüsteemist ning paiknevad selle süsteemi orbiidil ümber suurema galaktika (Tenjes, 2018). Tähevoolud tekivad, kui tähesüsteem on orbiidil ümber galaktika, mis mõjutab süsteemi loodeliste jõududega. Sellest tulenevalt asetsevad tähevoolud tavapäraselt galaktika tähelises halos ehk galaktika sfäärilises välimises

osas (Price-Whelan ja Bonaca, 2018).

Linnutee galaktikas teadaolevad tähevoolud jaotatakse üldiselt kaheks alagrupiks, millest ühed moodustavad taevakaarel laiema näilise riba, ning teised peenikese riba. Laiema riba moodustavad tähevoolud tulenevad üldiselt kääbusgalaktikate laiali rebimisest ning kitsam riba tekib kerasparvede sarnasest välja venitamisest (Grillmair ja Carlin, 2016). Siinses töös käsitletakse vaid kerasparvedest tulenevaid tähevoole.

Kääbusgalaktikad ja kerasparved lagunevad peamiselt kahel põhjusel: tähtede süsteemi loomulikul aurumisel ja suurema galaktika põhjustatud loodeliste jõudude mõjumisel. Kääbusgalaktikad lagunevad peamiselt loodeliste jõudude tõttu ja kerasparved aurumisel. Kerasparvest tähtede aurumine leiaks aset sõltumata mõjutava massiivse keha olemasolust; parve välisosas olevad väiksema massiga tähed saavad ka väga väikeste kiiruseliste mõjutuste toimele kerasparve mõjuväljast lahkuda. Need tähed triivivad edasi kerasparve endisel orbiidil ümber massiivse galaktika massikeskme, moodustades peenikese tähtede riba galaktika halos (Tenjes, 2018).

## **1.2 Tähevoolude eristamine esiplaanil olevatest tähtedest**

Tähevoolud asetsevad nii teiste galaktikate kui ka Linnutee halodes, mis on enamasti Maast nii kaugel, et neist on keeruline saada piisava ulatusega kvaliteetseid astromeetrilisi vaatlusandmeid. Seetõttu on tähevoole hakatud avastama alles käesoleval sajandil. Nende leidmise teevad keeruliseks tähevoolu ja vaateleja vahelised tähed, mis moodustavad mürarikka esiplaani. Samuti on üle suure taevaala asetsevate tähevoolude avastamist varasemalt takistanud kogu taevast katvate uuringute puudumine. Ilmselt jääb olemasolevate tähevoolude täie ulatuse tuvastamine samuti tulevikku, mis võib osutuda sama tähtsaks kui uute leidmine, kuna pikemate tähevoolude tuvastamine võimaldab kahandada nende orbiidi kuju määramatust (Grillmair ja Carlin, 2016).

### **1.2.1 Omaliikumine ja radiaalkiirus**

Kõik tähed on pidevas liikumises ning see, kui kiiresti need taevakaarel liiguvad, sõltub nende kaugusest vaatelehest - mida kaugemal on täht, seda statsionaarsem see näib olevat. Tähtede omaliikumine kirjeldab, mitu kaaresekundit liigub täht aasta jooksul mööda taevakaart, seega tegemist on vaatesuunaga risti oleva kiiruse komponendiga. Üldiselt kirjeldatakse omaliikumist ühikutes millikaaresekundeid aasta kohta.

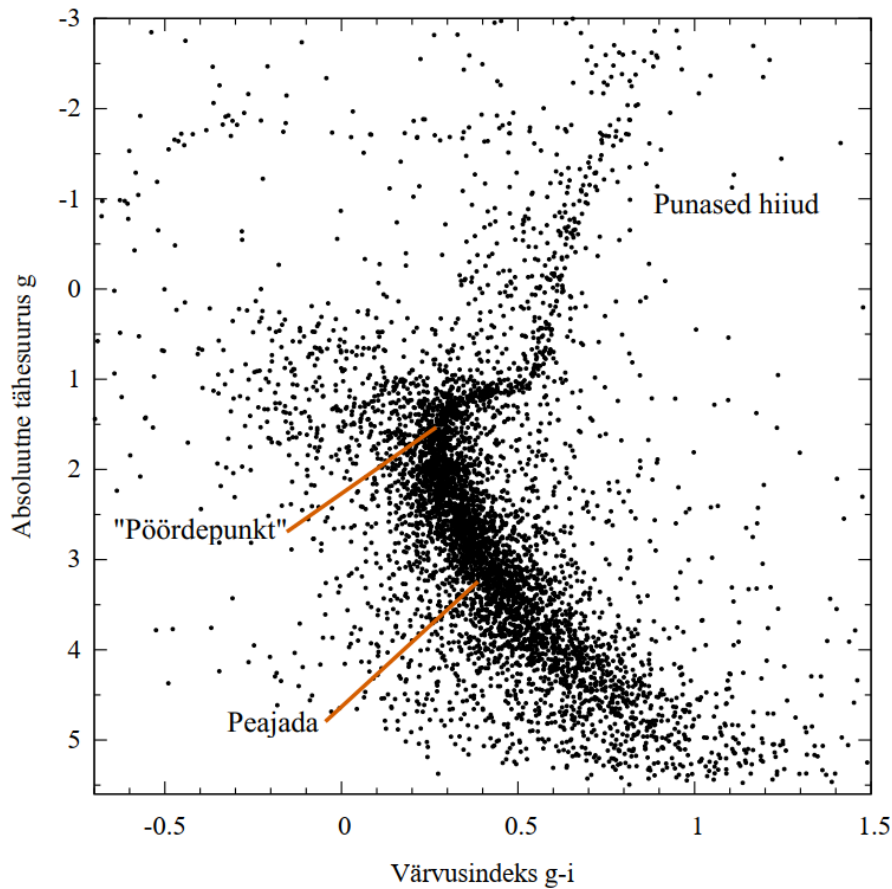
Kui Linnutee galaktikas paiknevad teavakehad liiguvad ühtset omaliikumist omava foonina ümber galaktika keskme, siis tavapäraselt eristuvad tähevoolud sellest foonist omaliikumise poolest. See tuleneb asjaolust, et Linnutee ümber orbiidil olevad tähesüsteemid ei tiirle ümber galaktika keskme ilmtingimata galaktika tasandis ega galaktikaga samas suunas või sama kiirusega. Säärane efekt tuleneb sellest, et kerasparv võib sattuda galaktika gravitatsioonivälja lõksu, liikudes juhuslikust suunast juhusliku kiirusega. Tähevoolu omaliikumise eristumine esiplaani tähtede omast võimaldab ülitäpsete uuringute abil eristada tähevoolude tähti galaktika tähtedest (Grillmair ja Carlin, 2016).

Täpsemad tähevoolude uuringud sisaldavad ka ruumkiiruste arvesse võtmist, mis kirjeldab kolmedimensionaalselt tähe liikumiskiirust, võttes lisaks omaliikumisele arvesse ka vaatleja suunalise liikumise ehk radiaalkiiruse. Samas, radiaalkiiruste mõõtmine ei ole eriti tulus, sest ainult 10% nähtavatest tähtedest on piisavalt heledad, et nende spektritest saaks radiaalkiiruseid määrata (Grillmair ja Carlin, 2016). Sellest tulenevalt on vaja eesrindlikult kõrge täpsusega astromeetrilisi uuringuid nagu Gaia kosmoseteleskoobi vaatlused, mida käsitletakse täpsemalt peatükis 2.1.

## **1.2.2 Peajada, isokroon, metallilisus**

Hertzsprung-Russelli diagramm on astronoomias kasutuses olev tähtede kogumit iseloomustav graafik. Selle horisontaalteljele on kantud tähtede temperatuur ehk spektriklass ja vertikaalsele teljele nende absoluutne tähesuurus. Hertzsprungi-Russelli diagrammil (edaspidi HR-diagramm) on iga suure tähtede valimi korral näha, et suurem osa tähti koonduvad diagrammil diagonaalile, mida nimetatakse peajadaks. Suurema osa tähe elueast möödub peajadal ning massiivsemad ja seetõttu heledamad tähed evolutsioneeruvad rutemini punasteks hiidudeks ning liiguvad peajada heledamast ja kuumemast osast külmemasse serva, moodustades peajadalt ära pööratud hiidude jada. Seda efekti on kõige selgemini näha just kerasparvede tähtedega, kuna neil võib parve tähti lugeda samal ajal tekkinuiks, mistõttu moodustub hiidude jada eriti selgelt, nagu näha joonisel 1.1 (Veskimäe, 1997).

Nii nagu kerasparvede kuju HR-diagrammil on eripärane, on seda ka kerasparvedest tulenevad tähevoolud. Nimelt on kerasparved väga vanad tähtede kogumid, seega neid sisaldavatest tähtedest koostatud HR-diagrammil on samuti heledamad tähevoolu tähed pöördunud peajadast maha madalama temperatuuriga alasse nagu on näha joonisel 1.1 (Astrobites, 2018). Valim, mis sisaldab keskpärasest rohkem vanu tähti, pöördub kõrge heleduse ja temperatuuriga osast madalamate temperatuuride poole ning mida kõrgema vanusega on tegu, seda nõrgema heleduse korral toimub peajadast kõrvale pöördumine (Jaaniste, 2018).

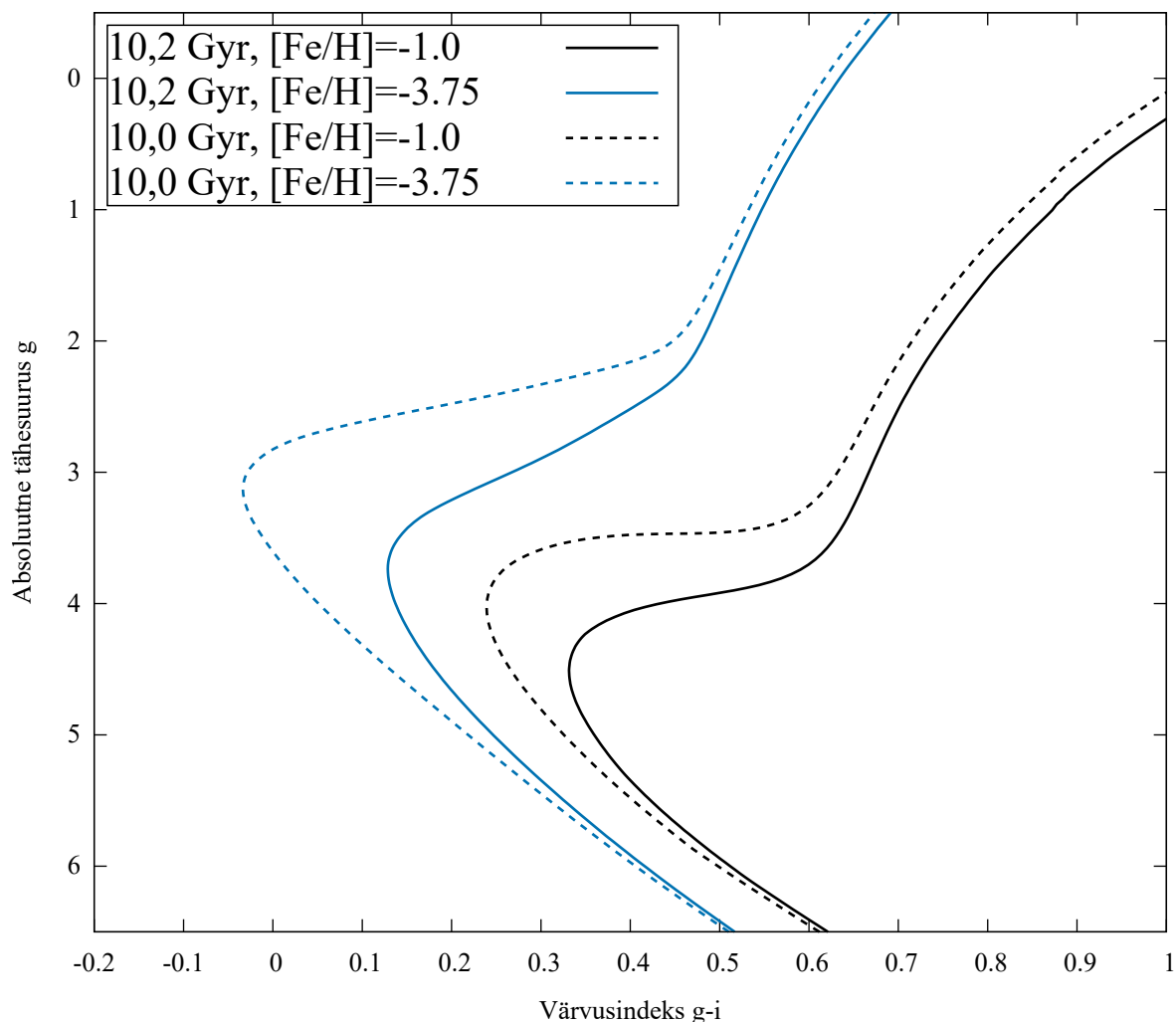


Joonis 1.1: Tavapärane kerasparve HR-diagramm, kus on heledamad tähed peajadalt maha pöördunud ja hiidude alla liikunud.

Metallilisus kirjeldab tähes või tähtede kogumis keemiliste elementide kogust, mille aatommass on suurem kui vesinikul ja heeliumil. Üks levinuimaid viise metallilisuse kvantitatiivseks hindamiseks on tähe raua ja vesiniku sisalduse suhe, mille kümnendlogaritmi tähistatakse kui  $[Fe/H]$ . Mida vanem on tähtede kogum, seda madalam on selle metallilisus, sest neis on oluliselt vähem varasemate põlvkondade tähtede raskeid elemente, mis satuvad tähetekke keskkonda varasemate tähtede tuumadest supernoovaplahvatuste tulemusena. Algselt avastati tähevoole fotomeetriselt, valides värvus-heledus diagrammilt galaktika halos asetsevad madala metallilisusega tähti, täpsemalt sinisemaid peajadalt lahkunud tähti. Metallilisust saab tuvastada värvus-heledus diagrammi kujust, mis sõltub ka vaadeldava tähtede hulga elueast. Ainult fotomeetria põhineval metallilisusel võib olla väga suur määramatus, mis on varasemaid uuringuid muutnud ebatäpsemaks (Grillmair ja Carlin, 2016).

Sama metallilisuse ja vanusega tähtede kogumikule vastavast HR diagrammist interpoleeritud funktsiooni nimetatakse isokrooniks. Teades isokrooni kuju, saab selle abil leida konkreetse vanusega tähevoolu tähti. Metallilisus mõjutab isokrooni asetsemist ja kuju vertikaalsel

heleduse teljel ja vanus mõjutab kerasperve ärapöördepunkti asetsemist peajadal - mida vanem, seda madalama temperatuuriga alas pööre toimub ning seda väiksem osa parve tähtedest asetseb peajadal.



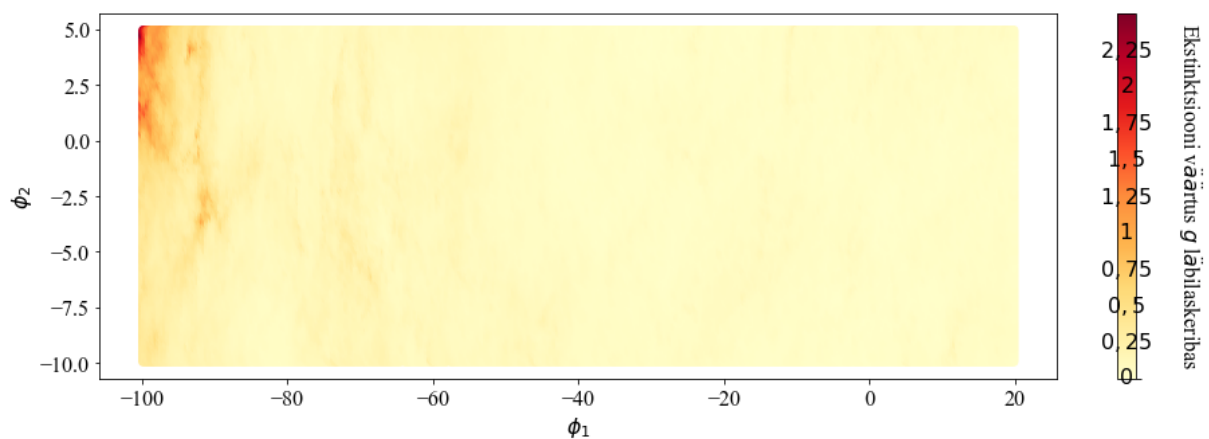
Joonis 1.2: Erinevate metallilisuste ja vanustega isokroonide näited, millest kahel ühtib vanus ja kahel metallilisus. On näha, et sama algse metallilisusega isokroonide peajada ühtib ja sama vanusega isokroonidel toimub ära pöördumine peajadalt sarnase absoluutse tähesuuruse juures.

### 1.3 Tähevool GD-1

GD-1 on seni avastatud keraspervede tähevooludest kõige pikem, ulatudes 80-kraadise taevaulatuse pikkuseni. Sellel on ühtlasi tuvastatud väga suure täpsusega kerasperve orbiit. Antud tähevoolu pindtihedus on võrdlemisi suur ning selle vanust hinnatakse väga kõrgeks.

Kõik see muudab GD-1 suurepäraseks kandidaadiks, et selle abil uurida galaktilise halo tumeainet (Grillmair ja Carlin, 2016).

Päikesesüsteemist vaadeldavana jääb suurem osa GD-1-st galaktika tasandist välja, asetsedes galaktika tasandiga peaaegu risti. Linnutee tasandile on lähedal vaid tähevoolu üks ots, kus tähevool ei ole nii hästi nähtav kui voolu keskosas. Teave tähevoolu asetsemise kohta galaktika tasandi suhtes on oluline, kuna Linnutee ketta lähedal on ekstinktsioon suurem kui tasandist kaugemal. Ekstinktsioon on tähe ja vaatlaja vahelise kosmilise tolmu tõttu tekkiv tähe värvuse näiv muutus hajumise ja neeldumise mõjul. Tähevoolu GD-1 ekstinktsiooni väärtusi iseloomustab joonis 1.3.



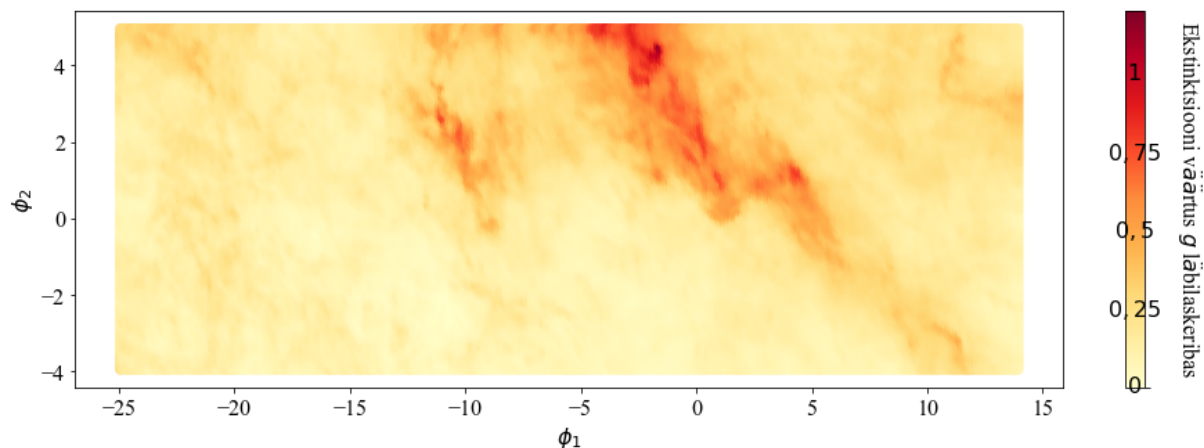
Joonis 1.3: Tähevoolu GD-1 ekstinktsiooni väärtused valitud taevaala ulatuses. Suures osas on ekstinktsiooni väärtused väikesed, kuid valitud taevaala otsas, mis läheneb galaktika tasandile on ekstinktsioon kõrgem.

Kuna varasemates töodes määratud nii GD-1 vanuse kui ka metallilisuste määramatused on suured, siis määratakse lõputöös isokrooni valimisel need iseseisvalt, sobitades andmete sobivaimate parameetritega mudel. Varasemates uurimustes on määratud GD-1 metallilisuseks  $[Fe/H] = -1,4$ , mida kasutatakse andmetöötluses lähtepunktina isokrooni leidmiseks (Price-Whelan ja Bonaca, 2018).

## 1.4 Tähevool Palomar 5

Palomar 5 tähevool on seotud samanimelise kerasparvega ja on üks paremini nähtavaid tähevoolusid. See on selgelt seotud täheparvega ning asub Maast 23,2 kpc kaugusel. Kuna selles on tuvastatud erinevusi tiheduses, siis on seda kasutatud galaktilises halos asuvate tumeaine kogumite uurimiseks (Grillmair ja Carlin, 2016).

Palomar 5 asetseb Linnutee tasandiga paralleelselt ning sellele piisavalt lähedal, et üksikud galaktika tasandi tihedamad alad põhjustaksid oluliselt ekstinktsiooni. Ekstinktsiooni väärtusi Palomar 5-l iseloomustab joonis 1.4.



Joonis 1.4: Tähevoolu Palomar 5 ekstinktsiooni väärtused valitud taevaala ulatuses. Kuna tähevool paikneb galaktika tasandiga paralleelselt ning selle läheduses, siis on ekstinktsiooni väärtused üle kogu valitud taevaala erinevad.

Palomar 5 metallilisuseks on varasemates uurimustes hinnatud  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,38$  (Harris, 1996) ja  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,43$  (Price-Whelan ja Bonaca, 2018), millel põhinedes leitakse kasutatud andmete le sobivaim isokroon.

Üks olulisemaid erinevusi GD-1 ja Palomar 5 vahel seisneb selles, et Palomar 5 näiv pikkus taevakaarel on väiksem kui GD-1-l.

# Peatükk 2

## Andmeallikad

Lõputöös on kasutatud kahte suurt andmekataloogi, ühest saadavaid andmeid kasutati fotomeetriliseks ja teisest astromeetiliseks analüüsiks. Fotomeetrilised andmed hõlmavad endas tähtede heledusi erinevates läbilaskeribades ning astromeetrilised tähtede täpseid asukohti ja omaliikumisi.

### 2.1 Gaia DR2

Gaia kosmoseteleskoop lennutati orbiidile 2013. aastal ning selle missiooni eesmärk on luua suurim ja täpsem kolmedimensiooniline mudel Linnutee galaktikast. Selle käigus tuvastatakse umbes miljardi taevaobjekti asukoht, heledus ja värvus, millest saab arvutada nende kaugused, kiirused ja liikumise suuna. Gaia teleskoobi abil saavutatakse haruldaset täpsed astromeetrilised andmed (European Space Agency, 2018).

Gaia teleskoop mõõdab tähti, mille näiv tähesuurus on Sloani läbilaskeribades  $g < 22$  ja  $i < 21$  tähesuurust ning tähti, millel määratakse nii asukoht, parallaksinurk kui ka omaliikumine, on umbes 1,3 miljardit. Kõrge täpsusega radiaalkiirusi määratakse tähtedel näiva tähesuuruseni  $V < 17$  tähesuurust ehk umbes seitsmel miljonil tähel (Cropper *et al.*, 2018). Gaia fotomeetrilised andmed ei ole sobilikud tähevoolude tähtede eristamiseks esiplaani tähtedest, kuna Gaia BP ja RP läbilaskeribad on väga laiad ja nõrkade heledustega tähtedel suure määramatusega.

Uurimusmissiooni lõppedes, mida ennustatakse umbes aastaks 2020, avaldatakse kõigi vaadeldud tähtede astromeetrilised ja fotomeetrilised andmed, kuid seni avaldatakse paariaastaste intervallide tagant olemasolevaid andmeid (European Space Agency, 2018). Lõputöös on kasutatud Gaia teist andmete väljalaset (DR2 ehk inglise k. *data release 2*), mis avaldati 2018. aasta kevadel.

## 2.2 PanSTARRS DR1

PanSTARRS on Hawaii Haleakala saarel töötav visuaalse ja lähis-infrapuna spektriosa uurimus, mille vaatlused on tehtud Sloani fotomeetriliste filtrite süsteemis. PanSTARRSiga vaadeldakse tähti laiades läbilaskeribades  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$  ja  $y$  ning need küündivad kasutatavates läbilaskeribades kuni tähesuurusteni  $g = 23,2$  ja  $i = 22,7$  (Mulgrew, 2018). PanSTARRSi teleskoop, peapeegli läbimõõduga 1,8 meetrit, alustas tööd 2009. aastal (Hans-Walter Rix, 2018). Tegemist on uurimusega, mis katab peaaegu kogu taevasfääri, jättes katmata vaid alad, mis on lõuna pool käändest väärtusega  $\delta = -30^\circ$ , ning täites vajaliku ulatuse kriteeriumi, et selle abil tähevoole otsida (Hans-Walter Rix, 2018).

Lõputöös kasutatakse kahte läbilaskeriba, täpsemalt  $g$  ja  $i$ , sest nendega defineeritud värvusindeks vahena  $g - i$  sobib kõige paremini tähevoolude tähtede eristamiseks esiplaani tähtedest. Ühtlasi kasutati PanSTARRSi esimest andmete väljalaset (DR1 ehk inglise k. *data release 1*), mis avaldati 2016. aasta detsembris.

# Peatükk 3

## Andmetöötlus

### 3.1 Andmetöötluse etapid

Selleks et GD-1 ja Palomar 5 tähevoole hõlpsamini uurida, on loodud koordinaatsüsteemid, mis põhinevad taevakoordinaatide pööramisel. Pööramise tulemusena saadakse kaks telge, millest  $\phi_1$  telg kulgeb ligikaudu piki tähevoolu trajektoori ja  $\phi_2$  sellega risti ning kaks telge ristuvad tähevoolu arvatava kerasparve asukohas. Nii GD-1 kui ka Palomar 5 tähevoolude andmetele rakendati pythoni programmeerimiskeele teeki nimega Gala, et käsitleda andmepunkte kirjeldatud koordinaatsüsteemis (Price-Whelan, 2019). Kasutades täheparve enda koordinaatsüsteemi, said valitud ka uuritavad taevaalad, et valimid oleksid taevakoordinaatide telgedega määratud graafikutel risküliku-kujulised. Sama paketti kasutati ka mõlema tähevoolu omaliikumiste teisendamiseks  $\phi$ -de koordinaatsüsteemi.

Mõlema tähevoolu andmetele rakendati mitmeid parandeid eesmärgiga leida tähtede absoluutsed tähesuurused, kasutades selleks nii tähevoolude kaugust kui ka ekstinktsiooni. Tähtede ja vaateleja vahelise kauguse põhjal saab arvutada absoluutse tähesuuruse kui

$$M = m - \log(D) + 5 + E, \quad (3.1)$$

kus  $M$  on absoluutne tähesuurus,  $m$  on näiv tähesuurus, millisena on olemasolevad andmed,  $D$  on vaadeldava tähe ja vaateleja vaheline kaugus kiloparsekites ning  $E$  on igale läbilaskeribale vastav ekstinktsiooni koefitsient.

Ekstinktsioon tekib kosmilise tolmu tõttu vaateleja ja vaadeldava taevakeha vahel ning selle arvesse võtmiseks kasutati (Schlegel *et al.*, 1998) kaarti, mille põhjal loodi ideaalsest vähendatud detailsusega taevakaart, jaotades kogu taevafäär  $12 \cdot 1024^2 = 12\,582\,912$ -ks võrdse

pindalaga nelinurgaks ning omistades igale nelinurgale ekstinktsiooni koefitsiendi. Kirjeldatud kaardis kasutatud sfäärilisi nelinurki kutsutakse HEALPixideks.

GD-1 jaoks kasutati olemasolevate (Price-Whelan ja Bonaca, 2018) artikli andmete koordinaatteisendusi ja ekstinktsiooni väärtusi, kuna mõlemaks kasutati samu allikaid ja meetodeid. Lõputööks sai siiski ekstinktsiooni arvutav programm kirjutatud ka Palomar 5 andmetele rakendamiseks, kuid kontrolliks rakendati seda ka GD-1 andmetele. Sellest tulenevalt oli võimalik võrrelda artikli ekstinktsioone arvutatutega ning erinevus oli küllaltki väike, millest võib järeldada, et kirjutatud programm on korrektne ning vähesed erinevused tulenevad erinevatest HEALPixide suuruste valikutest.

Paranditest koosneva eeltöötuse järgselt tehti mõlemale tähevoolule esmane andmetöötlus kitsaste lõigetega, mille eesmärgiks oli leida võimalikult selge tähevoolu HR-diagramm, et leida sobilik isokroon. Pärast sobiliku isokrooni leidmist tehti korrektsed laiemad lõiked, mille sisse jäi suurima tõenäosusega võimalikult palju tähevoolude tähti.

## 3.2 GD-1

Tähevoolu GD-1 uurimiseks sai valitud taevaala, mis on ekvatoriaalses koordinaatsüsteemis defineeritud punktidega  $(\alpha; \delta)$ :  $(125, 0^\circ; -20^\circ) - (111, 5^\circ; -12, 5^\circ) - (233, 6^\circ; 48, 5^\circ) - (243, 0^\circ; 62, 5^\circ)$ . Tähevoolu enda koordinaatsüsteemis on valitud taevaala piire näha joonisel 3.3. Algne valim sisaldas 7 248 422 tähte.

Selleks, et teisendada HR-diagrammiks kasutatavad heledused absoluutsetesse tähesuurustesse, leiti kaugusmoodul, mis on tähevooluga ühtiva  $\phi_1$  koordinaatteljega defineeritud võrrandis 3.2 (de Boer *et al.*, 2018).

$$f(\phi_1) = 14,58 + (2,923 \cdot 10^{-4} \cdot (\phi_1 + 44,66)^2) \quad (3.2)$$

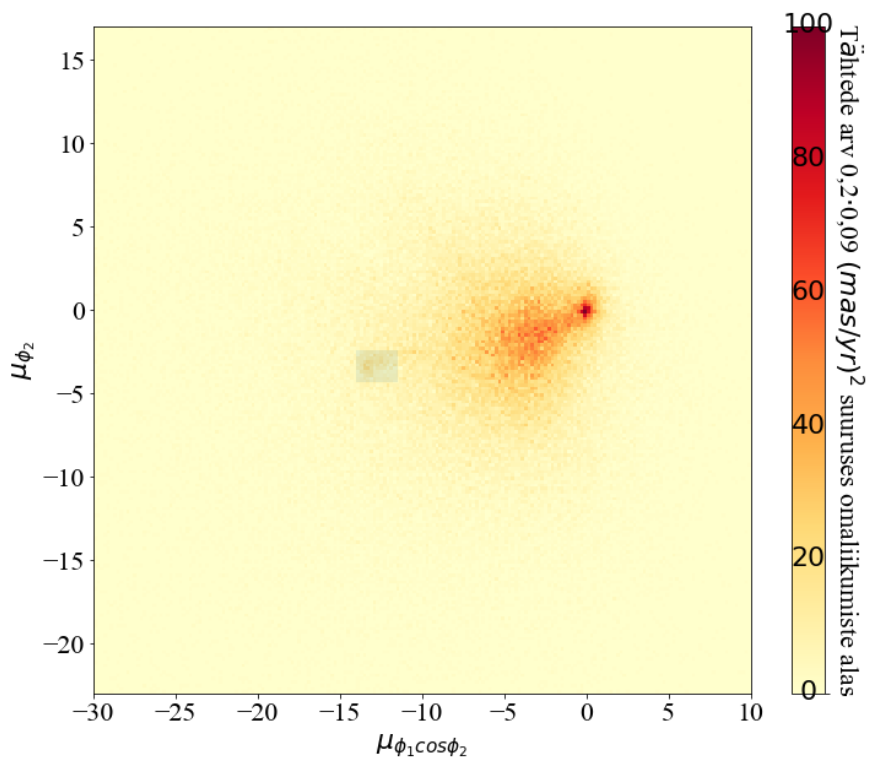
Selleks, et leida tähevoolu isokrooni kuju, tehti esmalt kitsas lõige GD-1 koordinaatide graafikul, jättes alles kõik andmepunktid, mis jäid vahemikku  $\phi_2 \in [-1^\circ; 1^\circ]$  ja  $\phi_1 \in [-55^\circ; -10^\circ]$ . Vahemiku koordinaadid valiti artikli (de Boer *et al.*, 2018) põhjal. Ühtlasi jääb tähevoolu koordinaatsüsteemi definitsiooni järgi just nendesse vahemikesse kõige tihedamalt tähevoolu enda tähti. Lõike tulemusena jäi alles 102 298 tähte.

Teine lõige, mille eesmärgiks oli leida tähevoolu isokroon, tehti allesjäänud tähtedest parallaksinurga põhjal. Kuna GD-1 asetseb Maast kaugel, siis eemaldati valikust tähed, mille

parallaksinurk oli suurem kui 1 millikaaresekund (mas). Varasematest kitsastest lõigetest alles jäänud tähtedest tehtud parallaksinurgal põhineva lõike tulemusena jäi alles 95 091 tähte.

### 3.2.1 Omaliikumiste lõige

Tehtud lõigetest alles jäänud tähtedega tehtud omaliikumiste joonisel oli selgelt näha esiplaani tähtede tihedamast alast eristuv väiksem tihedam ala, mis on tähevoolu GD-1 tähtedest koosnev nagu näha joonisel 3.1.

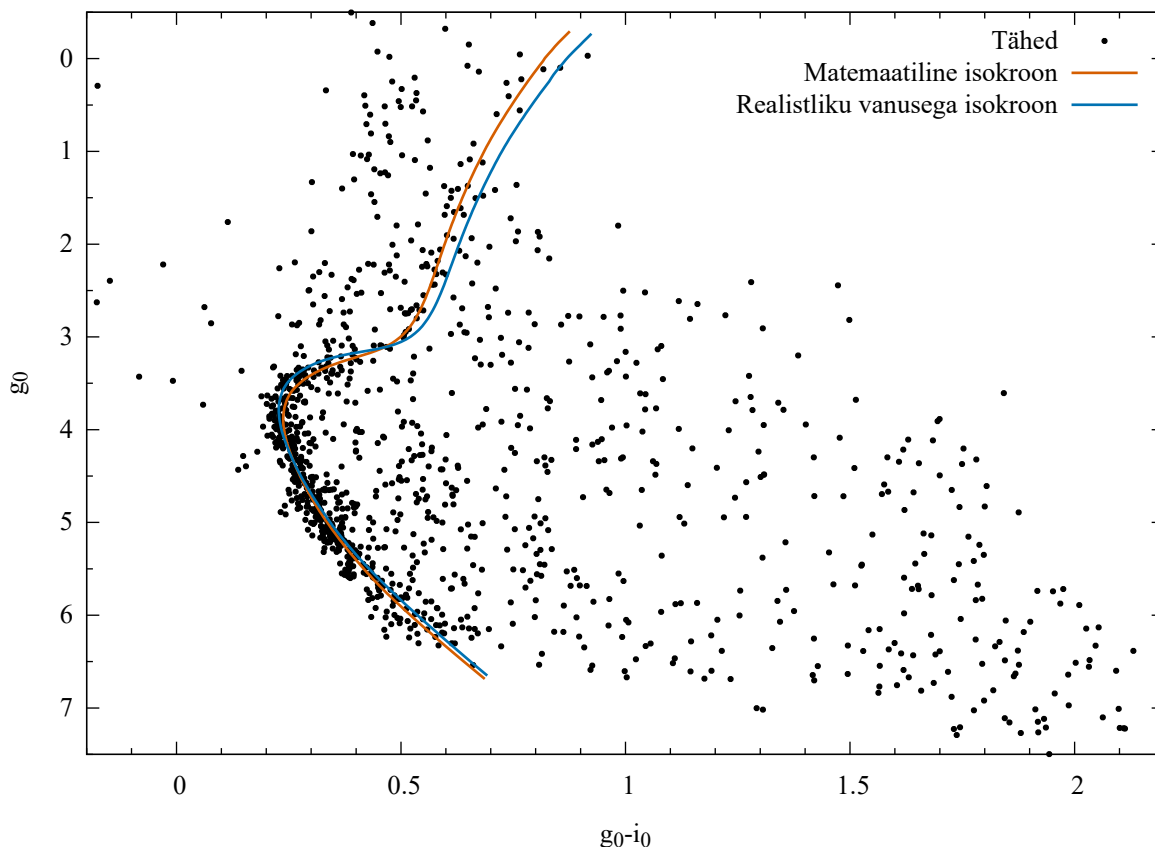


Joonis 3.1: Tähevoolu GD-1 omaliikumised tähtedest, mis jäid valikusse pärast taevaalal ja parallaksinurgal põhinevaid lõikeid. Valitud arvatavad tähevoolu omaliikumised, mis jäävad kõige tihedamat ala iseloomustava fooni tähtedest väljapoole on märgitud hulknurgaga.

Omaliikumiste lõige tehti tihedat ala lähedalt ümbritseva kastina, jättes lõike sisse tähed, mille omaliikumiste väärtused jäid vahemikku  $\mu_{\phi_1 \cos(\phi_2)} \in [-14, 0; -11, 5]$  ja  $\mu_{\phi_2} \in [-4, 3; -2, 4]$ . Kolmanda kitsa lõike tulemusena jäi alles 1157 tähte.

### 3.2.2 Isokrooni leidmine

Varasematest kitsastest lõigetest alles jäänud tähtedest tehti HR-diagramm, mille y-teljel Sloani värvusfiltrite  $g$  heledus ning x-teljel sama filtrite süsteemi värvusindeksit  $g - i$ . Diagrammil 3.2 on selgelt näha tähevoolu isokroon nii peajadal kui ka peajadalt maha pööranud hiidude osas, mis teeb valitud tähtede kogumis tähevoolu osa piisavalt selgesti nähtavaks parima isokrooni sobitamiseks.



Joonis 3.2: Tähevoolu GD-1 kitsaste lõigetega valitud tähtede HR-diagramm koos mõlema isokrooniga (sinine - parim matemaatiline, oranž - parim reaalse vanusega).

Kasutades (Dotter, 2019) isokroonide interpolatsiooni rakendust sobitus kõige paremini tähevooluga GD-1 isokroon, mille algne metallilisus on  $[Fe/H] = -1,60$ , pöörlemiskiirus  $v/v_{crit} = 0$  ja vanus  $10^{10,15}$  aastat  $= 14,125 \cdot 10^9$  aastat, mis on küll suurem universumi eeldatavast vanusest (13,8 miljardit aastat), kuid kuna tegemist on parima sobiva matemaatilise mudeliga, siis kasutatakse seda isokrooni siiski tähtedest lõike tegemiseks. Kõige paremini andmetega sobiv isokroon leiti varieerides nii metallilisust kui ka vanust ning valides visuaalselt HR-diagrammil andmetega kõige paremini sobiv. Valitud isokroon sobitus andmetega kõige paremini kui selle HR-diagrammil kaugusmoodulit vähendada 0,3 võrra ehk heledamaks,

millest saab järeldada, et (de Boer *et al.*, 2018) töös leitud kaugusmoodul võib olla ebatäpne. See-eest (de Boer *et al.*, 2018) töös leitud kauguste määramatused jäävad vahemikku [0,34; 0,79] kiloparsekit, mis teisendub absoluutse tähesuuruse valemiga heleduse määramatuseks, mis on oluliselt suurem kui leitud 0,3 tähesuuruse suurune erinevus seega muudatus jääb eeltöötuse määramatuse piiresse.

Lisaks primale matemaatiliselt andmetega sobivale isokroonile leiti ka realistlikku kerasparve vanust eeldav isokroon, mis sobis realistlike vanustega isokroonidest andmetega kõige paremini. Nimetatud isokrooni (joonisel 3.2 sinine) parameetriteks olid algne metallilisus  $[Fe/H] = -1,35$ , pöörlemiskiirus  $v/v_{crit} = 0$  ja vanus  $1,2 \cdot 10^{10}$  aastat =  $12 \cdot 10^9$  aastat ehk 12 miljardit aastat. Nagu näha jooniselt 3.2 ei ühti parim realistliku vanusega isokroon andmetega piisavalt hästi, et seda edasiseks andmetöötuseks kasutada. Realistliku vanusega isokroon ei ühti andmetega kõige paremini nii peajada pöördepunktis kui ka hiidude osas. Sellest tulenevalt kasutatakse lõplikuks andmetöötuseks vaid esimese matemaatilise isokrooniga valitud tähti.

Kuna HR-diagrammi moodustamiseks kasutatakse ainult PanSTARRSi andmeid, siis on võimalik uurida mitte ainult tähti, mis kahe andmebaasiga ühtivad, vaid lisada andmestikku ka vastava taevaala PanSTARRSi tähed. Andmebaaside tiheduste erinevus tuleneb sellest, et PanSTARRS suudab tuvastada nõrgema heledusega tähti kui Gaia. Kui lisada Gaiaga ühtivatele andmetele ülejäänud sama taevaala tähed PanSTARRSi kataloogist, siis selgub, et ilma omaliikumiste lõiketa muudab PanSTARRSi tähtede lisamine HR-diagrammi liiga mürarikaks. PanSTARRSi nõrgema heledusega tähtede lisamine ei ole siinkohal õigustatud.

### 3.2.3 Isokrooni ja omaliikumiste rakendamine

Kitsaste valikute tulemusena eristus GD-1 omaliikumiste graafikult oluliselt selgemini ning selle põhjal tehti ka omaliikumiste põhjal valik kogu valimi tähtedest, mis jäid järgmiste punktidega defineeritud hulknurga sisse:  $(\mu_{\phi_1 \cos(\phi_2)}; \mu_{\phi_2})$ :  $(-14,00; -2,00) - (-14,00; -4,50) - (-11,80; -4,60) - (-11,10; -3,40) - (-7,30; -2,80) - (-7,20; -1,10) - (-9,70; -1,10)$ . Valikut tehes arvestati ka tähevoolu erinevate alade erinevaid omaliikumisi. Defineeritud hulknurga rakendamisel omaliikumistele jäi valimisse 74 468 tähte ehk 1,03% kogu valimist, mida on näha jooniselt 3.3 (b).

Omaliikumiste valikuga alles jäänud tähtedele rakendati isokrooni g läbilaskeribas vahemikus 0–7 tähesuurust (mag) ning sellele piisavalt lähedasteks tähtedeks arvestati need, mis olid isokrooni igast punktist värvusindeksi teljel 0,1 tähesuuruse kaugusel ja heleduse teljel 0,15 tähesuuruse kaugusel. Pärast isokrooni põhjal ebasobivate tähtede elimineerimist jäi alles 14 265 tähte ehk algsest 0,2%. Kuna enamus tähevoolu tähti asetsevad peajadal ning hiidude alas

põhjustab tehtud valik rohkem müra esiplaani tähtedest, siis arvatakse tähevoolu tähtede hulka need, mille  $g_0 > 2,5 \text{ mag}$ . Selle tulemusena jäi alles 9 413 tähte, mis toob taevakoordinaatidel põhineval joonisel 3.3 tähevoolu oluliselt paremini välja.

### 3.2.4 Lõplik andmetöötlus

Pärast nimetatud lõikeid omaliikumiste ja isokrooni põhjal kasutati esiplaani tähtede eemaldamiseks valitud taevaala jaotamist väiksemateks osadeks kasutades võrdsete pikkustega vahemikke. Taevaala jaotati  $\phi_1$  järgi viiekraadisteks ribadeks, millest igas ribas hinnati arvatav tähevoolu asukoht punktiga  $\phi_2$  suunas iga viiekraadise riba keskel. Selle tulemusena tuvastati 24 punkti, millel tähevool arvatavasti asetseb.

Jättes välja igas ribas tähevoolu arvatavat asukohta märkiva punkti ümbruse vahemikus  $\phi_2 = [\text{punkt} - 1^\circ; \text{punkt} + 1^\circ]$ , kasutati ümbritsevaid tähti esiplaani moodustavate tähtede arvu hindamiseks, lähendades punktidele esimest järku polünoomi. Polünoomi punktideks kujuteldaval x-teljel kasutati  $\phi_2$  väärtuseid sammuga 0.5 kraadi ning y-teljel vastavate poolekraadiste vahemike sisse jäävate tähtede arvu. Saadud polünoomi väärtused lahutati tähevoolu punkti ümbruse tähtede arvust ning eeldatav vahe annab tähevoolu tähtede arvu igas  $\phi_1$  ribas.

Kasutades määratud punkte, mis kirjeldavad  $\phi_1$  ja  $\phi_2$  teljel tähevoolu asukohta, leiti neljandat järku polünoom voolu kirjeldamiseks, mis on välja toodud võrrandis 3.3.

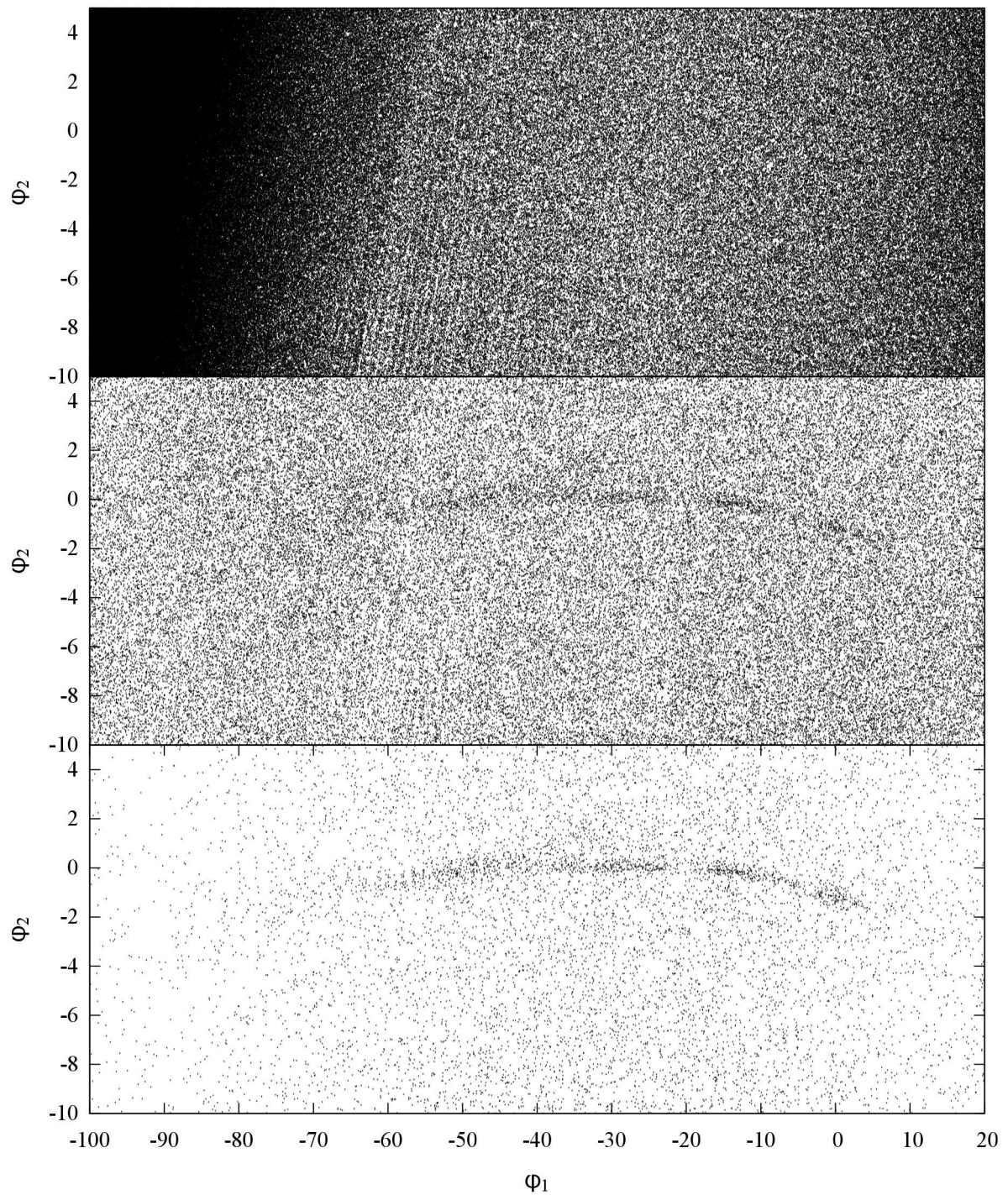
$$f(\phi_1) = -2,1604 \cdot 10^{-7} \cdot \phi_1^4 - 3,4031 \cdot 10^{-5} \cdot \phi_1^3 - 2,7776 \cdot 10^{-3} \cdot \phi_1^2 - 1,0674 \cdot 10^{-1} \cdot \phi_1 - 1,3734 \quad (3.3)$$

Leitud polünoomi kasutatakse eeldatavate tähevoolu jäävate tähtede kataloogi loomiseks, määrates tähevoolu tähtedeks need, mis jäävad polünoomist  $\phi_2$  telje suunas mitte kaugemale kui  $0,75^\circ$ . Omaliikumiste ja isokrooni peajada rakendamise tulemusena saadud 9 413-st tähest jääb pärast polünoomi rakendamist alles 1944 tähte. Tulemus on võrreldav (Price-Whelan ja Bonaca, 2018) tööga, kus leiti sarnase kolmekordse töötuse tulemusena 1985 tähevoolu tähte.

### 3.2.5 Joontihedus

Tähevoolu joontiheduse taevakraadi kohta saab kui jagada viiekraadisesse vahemikku jääva tähevoolu tähtede arvu  $N$  viie kraadiga

$$\rho_{j,\text{deg}} = \frac{N}{5^\circ} \quad (3.4)$$



Joonis 3.3: Tähevoolu GD-1 eristamine esiplaani tähtedest. Üleval: kogu valim. Keskkel: omaliikumiste rakendamisel alles jäänud tähevoolu tähed. All: omaliikumiste ja isokrooni peajada rakendamisel alles jäänud tähevoolu tähed.

Kasutades varasemalt välja toodud GD-1 kaugusmooduli funktsiooni 3.2, on võimalik arvutada ka joontihedus mitte taevakraadi, vaid tähevoolu pikkuse kohta kiloparsekites. Täpsemalt, teades et vaatlejast kaugusel  $D$  (ehk kaugus vaatlejast viiekraadise ruuminurga keskpunktini) moodustab ruuminurk  $5^\circ$  tundmatu pikkuse  $x$  tähevoolu pikkusest. Moodustub kolmnurk, mida saab kirjeldada kui  $\tan(2,5^\circ) = \frac{x}{2D}$  seega iga viiekraadise voolu osa pikkus sõltuvana vahemiku keskpunkti kaugusest vaatlejast on  $x(D) = 2 \cdot D \cdot \tan(2,5^\circ)$ . Sellest tulenevalt kui igasse vahemikku  $\Delta\phi_1 = 5^\circ$ ,  $\Delta\phi_2 = 4^\circ$  jääb  $N$  tähevoolu tähte, siis saab vastava vahemiku joontiheduse kiloparseki kohta kui

$$\rho_j = \frac{N}{x(D)} = \frac{N}{2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right)} = \frac{N}{2 \cdot D(\phi_1) \cdot \tan(2,5^\circ)}, \quad (3.5)$$

kus  $D(\phi_1)$  on sama, mis  $f(\phi_1)$  võrrandis 3.2.

### 3.2.6 Ruumtihedus

Eeldades, et tähevoolu kuju on silinder raadiusega  $\alpha = 0,25^\circ$ , saame joontihedusest igas viiekraadises vahemikus ruumtiheduse kui

$$\rho_r = \frac{\rho_j}{\pi \cdot (\tan(\alpha) \cdot D)^2} = \frac{N}{2\pi \cdot D^3 \cdot \tan(2,5^\circ) \cdot \tan^2(0,25^\circ)}, \quad (3.6)$$

ehk jagades joontiheduse kiloparsekite kohta eeldatava silindri pindalaga.

## 3.3 Palomar 5

Tähevoolu Palomar 5 andmetöötlus erines mõneti GD-1 töötlustest, kuna Palomar 5 omaliikumine ei erinenud erilisel määral esiplaani moodustavate tähtede omaliikumisest.

Palomar 5 uurimiseks sai valitud taevaala, mille piirasid Palomar 5 koordinaatsüsteemi telgedel vahemikud  $\phi_1 = [-25; 14]$ ,  $\phi_2 = [-4; 5]$ . Andmete kaevandamiseks konverteeriti need vahemikud tagasi ICRS ehk ekvatoriaalsesse koordinaatsüsteemi nelja punktiga määratud taevaalaks, mis on määratud kui  $(\alpha; \delta)$ :  $(248,5^\circ; 16,0^\circ) - (253,0^\circ; 9,0^\circ) - (215,5^\circ; -5,0^\circ) - (220,5^\circ; -12,5^\circ)$ .

Andmete kaevandamiseks kasutati ümardatud otsetõusu ja käände väärtusi ning algses valimis oli 5 273 690 tähte.

Eeldame, et Palomar 5 on Päikesest konstantsel kaugusel 23,2kpc (Maunder *et al.*, 2014), siis saame lõpliku arvutuse näivate tähesuuruste  $m$  viimiseks absoluutsesse tähesuurusesse  $M$  kui

$$M = m - 5 \log(23,2) + 5 - E_{PS}, \quad (3.7)$$

kus  $E_{PS}$  on vastavale PanSTARRSi andmebaasi läbilaskeribale vastav ekstinktsioon tähesuurustes (Schlegel *et al.*, 1998).

### 3.3.1 Omaliikumiste lõige

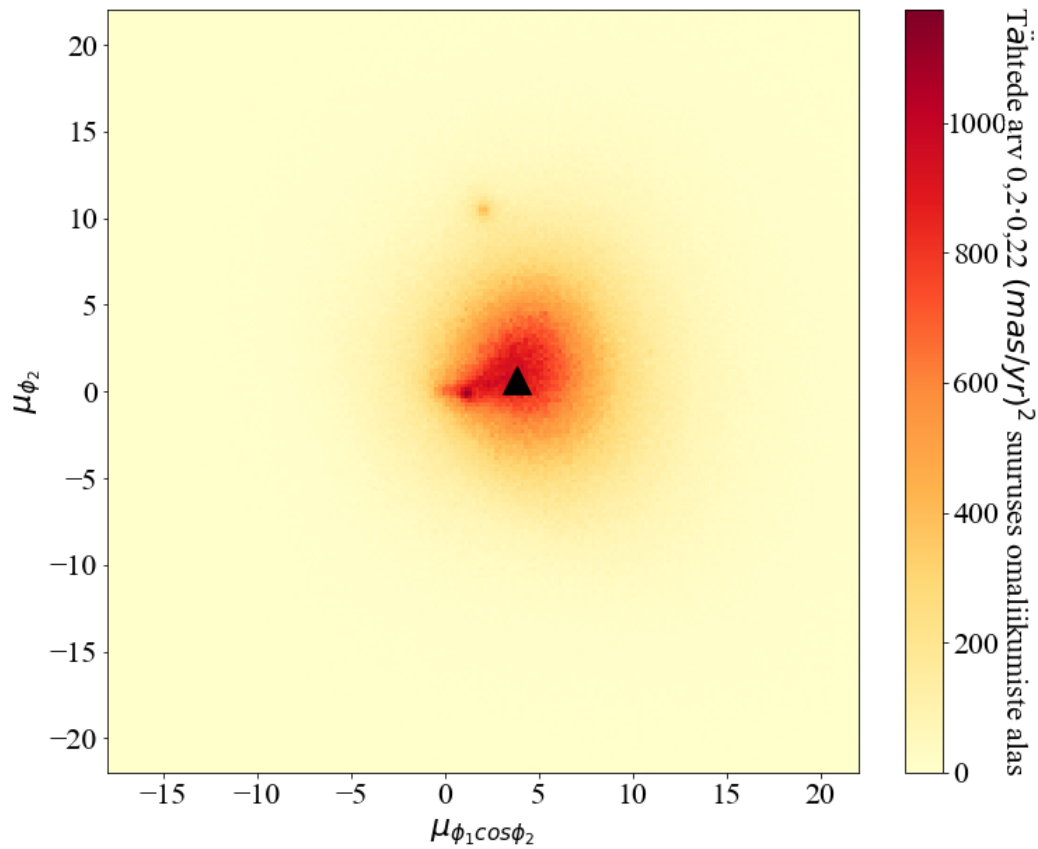
Nagu varasemalt mainitud, ei erine tähevoolu Palomar 5 enese omaliikumine oluliselt esiplaani moodustavate tähtede omaliikumiste väärtustest. Kerasparvede kataloogist (Baumgardt, 2019) leitud Palomar 5 kerasparve omaliikumise väärtus on  $\mu_\alpha \cos(\delta) = -2,77$  ja  $\mu_\delta = -2,67$  millikaaresekundit aastas, mis on Palomar 5 koordinaatsüsteemis  $\mu_{\phi_1} \cos(\phi_2) = 3,7836$  mas/yr ja  $\mu_{\phi_2} = 0,6970$  mas/yr.

Kirjeldatud Palomar 5 omaliikumiste kehv eristatavus esiplaani tähtedest tuleb hõlpsasti esile joonisel 3.4.

### 3.3.2 Isokrooni leidmine

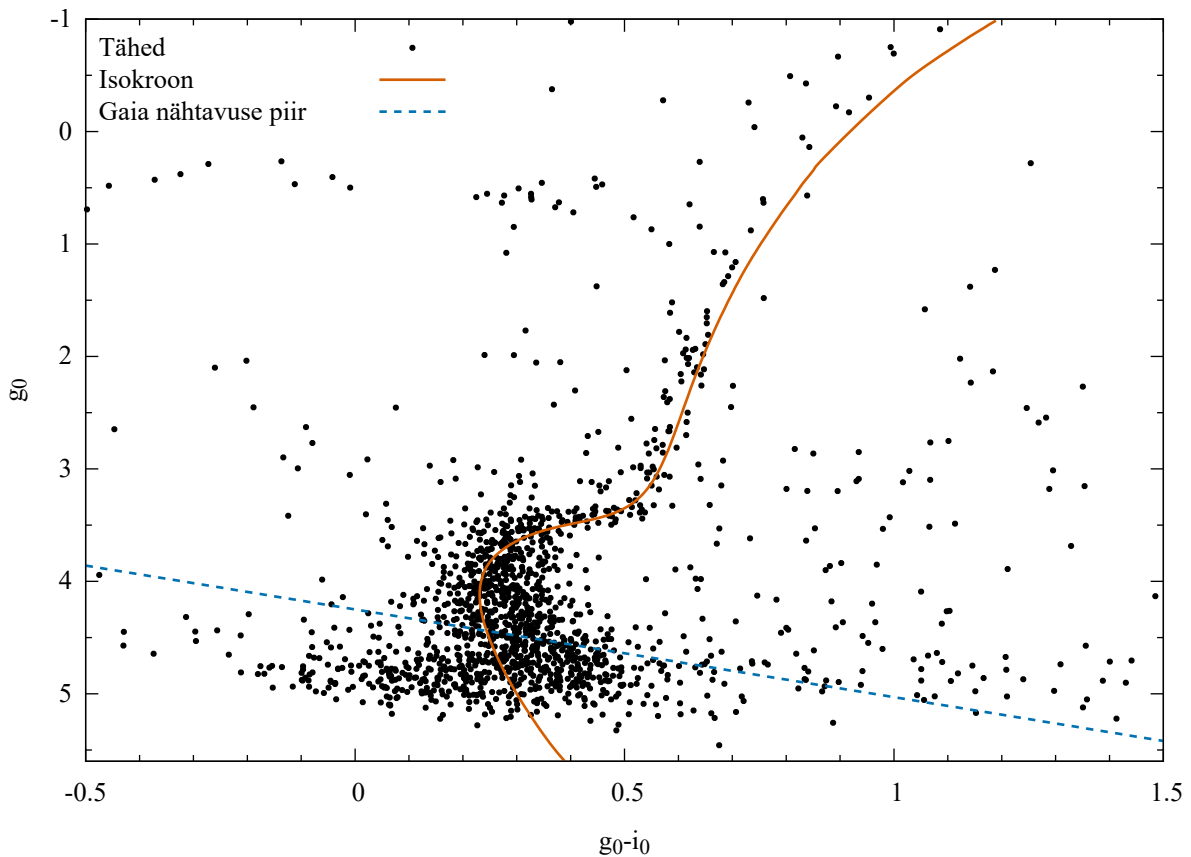
Kuna Palomar 5-l ei ole otstarbekas kasutada omaliikumisi võimalike tähevoolu kuuluvate tähtede filtreerimiseks, siis tuleb kasutada ainult värvus-heledus diagrammi. Ainult PanSTARRSi fotomeetrilisi andmeid on samuti seetõttu etem kasutada, et võrreldes Gaia andmetega jääb HR-diagrammil näha suurem osa Palomar 5 kerasparvest. Kuna Palomar 5 on Maast väga kaugel, siis on selle heledus nii väike, et Gaia ja PanSTARRSi andmete ühisosas HR-diagrammil jääb Palomar 5-st näha ainult peajadast maha pöördunud osa ning nõrgema heledusega peajada osa jääb puudu. Kasutades ainult PanSTARRSi andmeid, mille piirnähtavus on parem, saab terve kerasparve HR-diagrammi põhjal isokrooni valida.

Eeldame, et tähevoolule eellaseks oleva kerasparve isokroon ühtib kogu tähevoolu tähtede isokrooniga. Sellisel juhul saab valida graafikult vaid kerasparve enda andmepunktid, saades nii võrdlemisi vähe taustsüsteemi tähti mürana lisaks. Kerasparvede kataloogist (Baumgardt, 2019) on teada, et kerasparve koordinaatideks on ekvatoriaalsetes koordinaatides  $\alpha = 229,02^\circ$  ja  $\delta = -0,11^\circ$  ning PanSTARRSi andmetes oli vastavas alas kerasparv samuti nähtav. Valik sai võetud järgnevate punktidega defineeritud kuusnurgana kujul  $(\alpha; \delta)$ :  $(229,018^\circ; -0,032^\circ)$  –  $(229,104^\circ; -0,084^\circ)$  –  $(229,106^\circ; -0,158^\circ)$  –  $(229,016^\circ; -0,209^\circ)$  –  $(228,936^\circ; -0,165^\circ)$  –  $(228,926^\circ; -0,079^\circ)$ .



Joonis 3.4: Tähevoolu Palomar 5 omaliikumised ning kerasparve enda omaliikumise väärtus märgituna kolmnurgaga.

Palomar 5 kerasparve järgi valitud tähtedest moodustav isokroon selgelt nähtav isokroon nii peajada kui ka hiidude osas, mida sai kasutada isokrooni parameetrite leidmiseks. Selgus, et Palomar 5-le sobivaima isokrooni algne metallilisus on  $[Fe/H] = -1,41$ , pöörlemiskiirus  $v/v_{crit} = 0$  ja vanus  $10^{10,1}$  aastat  $= 12,589 \cdot 10^9$  aastat ehk 12,589 miljardit aastat. Isokrooni sobivust andmepunktidega iseloomustab joonis 3.5. Metallilisuse valimisel põhineti andmebaasil (Harris, 1996), kus oli tähevoolu algseks metallilisuseks määratud  $[Fe/H] = -1,38$  ja artiklil (Price-Whelan ja Bonaca, 2018), kus määrati metallilisuseks  $[Fe/H] = -1,43$ .



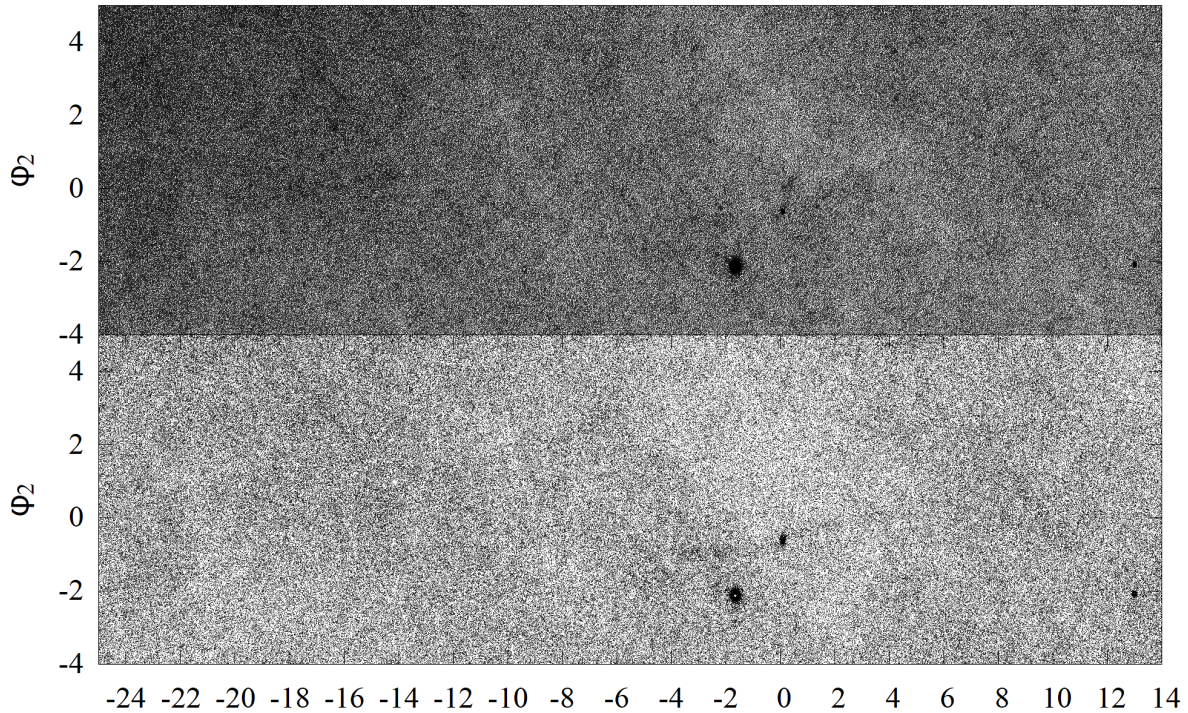
Joonis 3.5: Tähevoolu Palomar 5 kera sparve tähtede HR-diagramm koos parima sobiva isokrooniga. Joonisele on märgitud Gaia andmebaasi nähtavuse piir, millest nõrgema heledusega tähti andmebaasis ei leidu.

### 3.3.3 Isokrooni rakendamine

Kuna omaliikumiste järgi ei olnud võimalik Palomar 5 andmeid analüüsida, siis jääb tähevoolu ainsaks võimalikuks laiaks lõikeks isokrooni lõige, milles valiti punktid, mis olid igast isokrooni punktist värvusindeksi teljel 0,1 tähesuuruse ja heleduste teljel 0,2 tähesuuruse kaugusel. Sobivad vahemikud valiti selliselt, et valikusse jääks maksimaalselt tähevoolu enda tähti.

Pärast isokrooni järgi ebasobivate tähtede elimineerimist jäi alles 766 784 tähte ehk 14.5% algsest valimist. Kuna võimalik oli teha vaid üks lai lõige, siis ei eristu lõplikusse valikusse jäänud tähtedest tähevool Palomar 5 nii selgelt kui GD-1. Selle parendamiseks sai valitud vaid isokrooni peajada ja pöördepunkt ehk väärtused, kus  $g_0 < 3,02 \text{ mag}$ , kuna neis alades asetseb tähevoolust suurim osa. Valides isokroonist vähendatud osa eristus tähevool mõnevõrra selgemini kuid eristatavus selle äärealadel ei paranenud. Jättes isokrooni valikust välja hiidude osa, jäi alles 560 466 tähte, mida näitlikustab joonis 3.6. Võrdluseks teostati sama tähtede elimineerimine isokrooni ja peajada järgi ka Gaia ja PanSTARRSi andmete ühisosal,

tuvastamaks kui palju tähti jääks Gaia väiksema kuuendivuse tõttu kaduma. Kahe andmeallika ühisosa kasutamisel jäi tähevoolu 153 268 tähte seega mõlema andmeallika kasutamine oleks kaotanud ligikaudu kolmandiku potentsiaalsetest tähevoolu tähtedest.



Joonis 3.6: Tähevoolu Palomar 5 eristamine esiplaani tähtedest. Üleval: Kogu valitud taevaala, mis sai valitud Palomar 5 uurimiseks. All: kerasparve Palomar 5 jäänud tähed pärast valikut isokrooni järgi ning eemaldades hiidude osa.

### 3.3.4 Lõplik andmetöötlus

Sarnaselt GD-1 töötusega kasutatakse ka Palomar 5 tähtede arvu ja joon- ja ruumtiheduste leidmiseks taevaala jaotamist võrdsete pikkustega ribadeks  $\phi_1$  järgi ning nende ribade omakorda jaotamist võrdseteks vahemikeks  $\phi_2$  järgi. Ka siin valiti iga  $\phi_1$  riba keskel  $\phi_2$  väärtus, kus tähevool asetseb. Selleks, et valimis sisalduvad teised kerasparved ei moonutaks foonile lähendatava esimest järku polünoomi kuju, jäeti funktsiooni leidmisest need välja.

Kuna Palomar 5 juhul jäi valikusse nii palju tähti, siis on võimalik teha  $\phi_1$  järgi kitsamad ribad nii, et foonile lähendatav funktsioon jääks täpseks -  $\phi_1$  vahemikud tehti ühe kraadi laiused.  $\phi_2$  järgi jaotati iga ühekraadine  $\phi_1$  riba 0,25 kraadi laiusteks ribadeks.  $\phi_1$  ribades eeldatakse tähevoolu laiuseks  $\phi_2$  suunas  $0,5^\circ$ . Erinevalt GD-1 lõplikust andmetöötusest lähendati Palomar 5 korral esiplaani moodustavate tähtede arvule teist järku polünoomi, sest valitud taevaala  $\phi_2$

kahes otsas oli n.ö. tausta tähtede arv suurem kui keskel ning taustale lähendatava funktsiooni standardhälve saadi sel viisil oluliselt väiksem.

Nagu GD-1 korral leitakse ka Palomar 5-1 tähevoolu tähtede arv, lahutades tähevoolu vahemikku jäävate tähtede arvust tausta moodustavate tähtede arv, kasutades taustale lähendatava funktsiooni väärtust tähevoolu punktides.

### 3.3.5 Joontihedus

Palomar 5 joontiheduse leidmiseks taevakraadi kohta ei ole tarvis teostada arvutusi kuna joontihedus leitigi ühe kraadi kohta. Teades, et tähevool Palomar 5 on vaatlejast konstantsel kaugusel 23,2 kpc (Maunder *et al.*, 2014), saab leida selle joontiheduse kiloparseki kohta sarnaselt võrrandile 3.4 kui

$$\rho_j = \frac{N}{x} = \frac{N}{2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right)} = \frac{N}{2 \cdot (23,2 \text{ kpc}) \cdot \tan(0,5^\circ)}, \quad (3.8)$$

kus  $N$  on ühekraadilisse vahemikku jäävate tähevoolu tähtede arv.

### 3.3.6 Ruumtihedus

Palomar 5 ruumtiheduse saab leida sarnaselt GD-1 jaoks kasutatud valemile 3.6 eeldades, et tähevool on silindri kujuline ning silindri raadius on  $\alpha = 0,06^\circ$ , millele vastab 24 parsekit kaugusel 23,2 kpc:

$$\rho_r = \frac{\rho_j}{\pi \cdot (D \cdot \tan(\alpha))^2} = \frac{N}{2\pi \cdot (23,2 \text{ kpc})^3 \cdot \tan(0,5^\circ) \cdot \tan^2(0,06^\circ)}. \quad (3.9)$$

## 3.4 Määramatus ja süstemaatiline viga

Kõige otsesem määramatus tuleneb nii tiheduste kui ka tähevoolu tähtede määramisel kauguse määramatusest, milleks on GD-1-1 vastavalt kaugusmooduli osale erinevad väärtused ning Palomar 5-1  $U_{D,Pal5} = 2,3$  kiloparsekit (Odenkirchen *et al.*, 2002). Kauguse määramatus mõjutab nii tähtede absoluutseid tähesuuruseid kui ka tihedusi. Kuigi tegemist on kõige hõlpsamini määratava veaga, moodustab see kogu mõõtemääramatusest kõige väiksema osa.

Ühe osa nii tähevoolu tähtede arvu kui ka tiheduste määramatusest moodustab süstemaatiline viga isokrooni ja omaliikumiste rakendamisel. Süstemaatilisse veasse panustab tähevoolu

tähtede väljajätmine nii hiidude piirkonnast HR-diagrammil kui ka valikupiirkonnast välja jäävate omaliikumistega tähtede eemaldamine. Süstemaatiline viga, mis tuleneb hiidude eemaldamisest, on võrreldes teiste veakomponentidega tühiselt väike, sest tähevoolust moodustavad hiidud väga väikse osa. Hiidude tähevoolu arvestamisest suureneks tähevoolu tähtede arvu viga seetõttu, et seeläbi sisalduks valimis oluliselt esiplaani tähtede arv, põhjustades tarbetut fooni tõusu.

Suurima osa tähevoolude tiheduste määramatustes panustab valitud taevaala vahemikesse jaotava programmi fooni kirjeldav funktsioon, mis põhjustab tähevoolude hõredamates alades negatiivseid  $N_{\text{vool}}$  väärtusi. Nimetatud efekt tuleneb esiplaani tähtede ebahühtlasest jaotumisest üle valitud taevaala seega  $N_{\text{taust}}$ -i ja taustaunktsiooni ennustatud fooni väärtuste erinevusi saab samuti kasutada vea hindamiseks.

Üldised joon- ja ruumtiheduste valemid on näha võrrandis 3.10 ning nende koondmääramatuse moodustavad tähevoolu kauguse hinnang  $D$  ja antud  $\phi_1$  vahemikku arvatav tähevoolu tähtede arv  $N_{\text{vool}}$ .

$$\rho_j = \frac{N_{\text{vool}}}{2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right)} \quad \rho_r = \frac{N_{\text{vool}}}{2\pi \cdot D^3 \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right) \cdot \tan^2(\alpha)} \quad (3.10)$$

Võrrandis 3.10 tähistab  $\Delta\phi_1$  ühe telje suunalise vahemiku nurkpikkust ja  $\alpha$  tähistab tähevoolu arvatavat nurkraadiust.

Tähevoolude kauguse määramatused on teada kui Palomar 5-l 2,5 kpc ja voolul GD-1 artiklist (de Boer *et al.*, 2018). Arvatavast tähevoolu tähtede arvust tulenevad määramatust saab hinnata statistiliselt, leides tausta hindava funktsiooni ja igasse  $\phi_1$  vahemikku jäävate tähtede arvu vahe. Nimetatud vahe standardhälve  $\sigma$  kirjeldab ühe  $\phi_1$  vahemiku laiendmääramatust 95%-lisel usaldusnivool võrrandis 3.11.

$$U_{C,N} = 1,96\sigma \cdot \sqrt{\text{voolu binnide arv}} \quad (3.11)$$

Tähevoolude ruumtiheduste suurim määramatuse allikas tuleneb ilmselt tähevoolu nurkraadiuse  $\alpha$  valikust ning seda iseloomustab vastavalt GD-1-l ja Palomar 5-l määramatuse hinnang 3.12.

$$U_{\alpha,\text{GD-1}} = 0,05^\circ \quad U_{\alpha,\text{Palomar 5}} = 0,01^\circ \quad (3.12)$$

Kuna tähevoolude joon- ja ruumtiheduste määramatused tulenevad nii kaugusest  $D$ , tausta hinnangust tähtede arvu  $N$  hindamisel kui ka tähevoolu raadiuse hinnangust, siis sisaldab nende

koondmääramatus tuletisi tihedustest nende parameetrite järgi. Tuletised leitakse võrrandis 3.13.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho_j}{\partial N_{vool}} &= \frac{1}{2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right)} \\
 \frac{\partial \rho_j}{\partial D} &= \frac{-N_{vool}}{2 \cdot D^2 \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right)} \\
 \frac{\partial \rho_r}{\partial N_{vool}} &= \frac{1}{2\pi \cdot D^3 \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right) \cdot \tan^2(\alpha)} \\
 \frac{\partial \rho_r}{\partial D} &= \frac{-3 \cdot N_{vool}}{2\pi \cdot D^4 \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right) \cdot \tan^2(\alpha)} \\
 \frac{\partial \rho_r}{\partial \alpha} &= \frac{-N_{vool} \cdot \cos(\alpha)}{\pi \cdot D^3 \cdot \tan\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right) \cdot \sin^3(\alpha)}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Arvutatavad joon- ja ruumtiheduste laiendmääramatused leitakse iga  $\phi_1$  vahemiku jaoks üldvalemitega, mida kirjeldab võrrand 3.14.

$$\begin{aligned}
 U_{\rho_j} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_j}{\partial N_{vool}} \cdot U_{C,N}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_j}{\partial D} \cdot U_D\right)^2} \\
 U_{\rho_r} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_r}{\partial N_{vool}} \cdot U_{C,N}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_r}{\partial D} \cdot U_D\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_r}{\partial \alpha} \cdot U_\alpha\right)^2}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

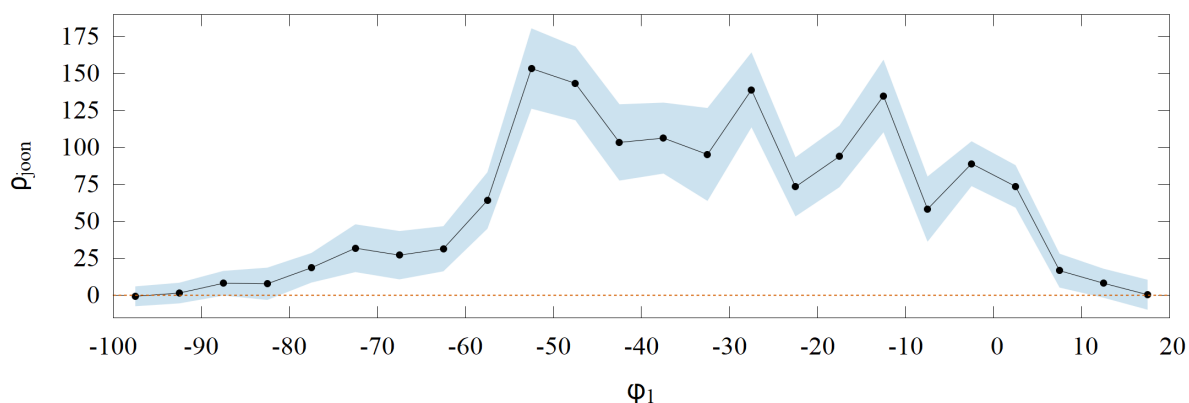
# Peatükk 4

## Tulemused

### 4.1 GD-1 töötluse tulemused

Töötluse tulemusena saadi tähevoolu GD-1 kohta tabel 4.1. Määramatuste arvutamisel tuvastati, et nii kaugusest kui ka taustafunktsiooni lähendamisest tulenevad vead panustavad olulisel määral koondmääramatusesse. Tabelis 4.1 olev negatiivne tähevoolu tähtede arv on tingitud tausta ülehindamisest.

Tähevoolu GD-1 joontiheduse näitlikustamiseks sobib määramatustega joontihedusi väljendav joonis 4.1. Joonisel on märgitud vaid joontihedus kiloparseki kohta, sest nii joontihedus taevakraadi kohta kui ka ruumtihedus parseki kuubi kohta on sellega võrdelised suurused. GD-1 ruumtiheduse arvutamisel on arvestatud, et tähevoolu raadius on  $\alpha = 0,25^\circ$ , millele vastab 34 parsekit tähevoolu kaugusel 7,8 kiloparsekit.



Joonis 4.1: Tähevoolu GD-1 joontihedused kiloparseki kohta koos määramatustega mööda tähevoolu.

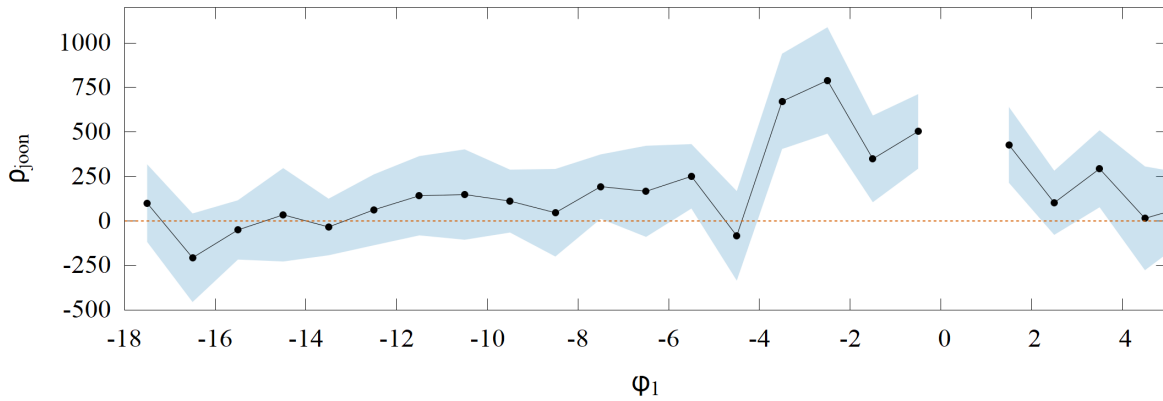
Tabel 4.1: Tähevoolu GD-1 eeldatavad tähtede arvud ja tihedused viiekraadiste  $\phi_1$  vahemike kaupa.

$\phi_1$ (deg)	$N$	$N_{\text{vool}}$	$\rho_j$ (deg $^{-1}$ )	$\rho_j$ (kpc $^{-1}$ )	$U_j$ (kpc $^{-1}$ )	$\rho_r$ ( $10^{-6}$ pc $^{-3}$ )	$U_r$ ( $10^{-6}$ pc $^{-3}$ )
-100 ... -95	74	-1	0	-1	7	-0,1	0,9
-95 ... -90	59	1	0	2	7	0,3	1,1
-90 ... -85	96	7	1	8	8	1,4	1,5
-85 ... -80	147	7	1	8	11	1,5	2,1
-80 ... -75	173	15	3	19	10	3,7	2,6
-75 ... -70	247	25	5	32	16	6,8	4,7
-70 ... -65	292	21	4	27	16	6,1	4,7
-65 ... -60	319	23	5	32	15	7,4	5,0
-60 ... -55	410	47	9	64	19	15,5	8,8
-55 ... -50	497	111	22	153	27	38	19
-50 ... -45	584	103	21	143	25	35	18
-45 ... -40	564	75	15	103	26	25	14
-40 ... -35	605	78	16	106	24	26	14
-35 ... -30	670	71	14	95	31	22	13
-30 ... -25	645	105	21	139	25	31	16
-25 ... -20	600	57	11	73	20	15,4	8,4
-20 ... -15	651	76	15	94	21	18,5	9,6
-15 ... -10	641	113	23	135	25	25	12
-10 ... -5	543	51	10	58	22	9,8	5,8
-5 ... 0	448	81	16	89	15	13,7	6,7
0 ... 5	406	70	14	73	14	10,3	5,1
5 ... 10	284	17	3	17	11	2,1	1,7
10 ... 15	231	9	2	8	10	0,9	1,2
15 ... 20	227	1	0	0	10	0,1	1,0

## 4.2 Palomar 5 töötluse tulemused

Töötluse tulemusena saadi tähevoolu Palomar 5 kirjeldav tabel 4.2. Kuna Palomar 5 ei olnud andmetest nii hästi esile tulev kui GD-1, siis esines Palomar 5 korral rohkem negatiivseid tähevoolu tähtede väärtusi. Palomar 5 joontihedus on suurem kui GD-1-l, sest GD-1 korral kasutati kahe andmeallika ühisosa ning Palomar 5 korral ainult PanSTARRSi andmebaasi.

Tähevoolu Palomar 5 leitud joontihedusi erinevate tähevoolu osade kohta iseloomustab joonis 4.2, millel on ruumtiheduste leidmiseks eeldatud tähevoolu raadiust 0,06 teavakraadi ehk 24,3 parsekit.



Joonis 4.2: Tähevoolu Palomar 5 joontihedused kiloparseki kohta koos määramatustega mööda tähevoolu. Kerasparve sisaldav  $\phi_1$  vahemik on välja jäetud.

Tabel 4.2: Tähevoolu Palomar 5 eeldatavad tähtede arvud ja tihedused ühekraadiste  $\phi_1$  vahemike kaupa. Kuna vahemikus  $0 < \phi_1 < 1$  paikneb kerasparv Palomar 5, siis on selle vahemiku tihedus kirjeldavast tabelist välja jäetud.

$\phi_1$ (deg)	$N$	$N_{\text{vool}}$	$\rho_j$ (kpc $^{-1}$ )	$U_j$ (kpc $^{-1}$ )	$\rho_r$ ( $10^{-5}$ pc $^{-3}$ )	$U_r$ ( $10^{-5}$ pc $^{-3}$ )
-18 ... -17	15 806	41	100	218	5,4	12
-17 ... -16	15 770	-84	-207	249	-11	14
-16 ... -15	15 989	-20	-50	167	-2,7	9,1
-15 ... -14	16 241	14	35	262	1,9	14
-14 ... -13	15 498	-14	-34	159	-1,8	8,6
-13 ... -12	15 494	25	63	199	3,4	11
-12 ... -11	15 383	57	142	223	7,6	12
-11 ... -10	14 365	60	148	254	8,0	14
-10 ... -9	14 095	45	112	177	6,0	9,9
-9 ... -8	13 747	18	46	246	2,5	13
-8 ... -7	13 542	78	192	181	10	11
-7 ... -6	14 195	67	166	256	9,0	14
-6 ... -5	14 135	102	251	181	13	12
-5 ... -4	13 874	-34	-84	252	-4,5	14
-4 ... -3	13 429	272	672	268	36	22
-3 ... -2	13 077	319	790	299	42	25
-2 ... -1	15 701	141	349	243	19	16
-1 ... 0	11 394	203	503	209	27	17
0 ... 1	12 456	—	—	—	—	—
1 ... 2	11 174	173	428	213	23	16
2 ... 3	11 627	41	102	180	5,5	10
3 ... 4	12 797	119	293	216	16	14
4 ... 5	13 732	6	15	292	0,8	16
5 ... 6	13 876	36	88	174	4,8	9,6

## 4.3 Tiheduste suhestamine kasutatud andmebaasidega

Tähevoolude GD-1 ja Palomar 5 leitud joon- ja ruumtihedusi ei saa otseselt omavahel suhestada, sest kasutatud andmebaaside tähtede arv sama suurusega taevas ulatusel on erinev. Ühtlasi on ka kasutatud andmebaaside küündivus erinev ja sõltub tähevoolude korral tugevalt nende kaugusest. Palomar 5 jaoks kasutati ainult andmebaasi PanSTARRS, mille tihedus on suurem kui Gaial, sest Gaia detekteeritava tähesuuruse küündivus on väiksem.

Lõputöö tulemusena on võimalik ka edasistes tähevoolude uurimustes suhestada voolude joon- ja ruumtihedusi nii kasutatud andmebaaside ühisosaga kui ka ainult PanSTARRSi uurimusega. Lõputöös leitud tähevoolude tihedused võimaldavad samu andmebaase kasutades leida ka uusi tähevoole teades, mis suurusjärgus võivad leitavate voolude tihedused olla.

## 4.4 Tulemused võrreldes varasemate töödega

### 4.4.1 GD-1

Lõputöös leitud tähevoolu GD-1 tähtede arv (1944 tähte) leiti väga sarnaselt (Price-Whelan ja Bonaca, 2018) töös leitud voolu tähtede arvuga, kus arvati tähevoolu 1985 tähte. Lõputöös läbi viidud töötlus GD-1 tähtede arvu leidmiseks erines (Price-Whelan ja Bonaca, 2018) töös tehtust peamiselt eeltöötluses rakendatud dünaamilise kaugusmooduli poolest, nimetatud artiklis eeldati tähevoolu konstantset kaugust.

Lõputöös leiti lisaks veel tähevoolu GD-1 tähtede arv ka pärast esiplaani moodustavate tähtede eemaldamist. Selle tulemusena saadi tähevoolu GD-1 tähtede arvuks 1161,3, summeerides tabeli 4.1 tähevoolu tähtede arvu positiivseid väärtusi.

Lõputöös leitud tähevoolu joontihedus, nähtuna joonisel 4.1, on kujult sarnane (Price-Whelan ja Bonaca, 2018) töös leitud pindtiheduse väärtustega erinevates tähevoolu osades.

### 4.4.2 Palomar 5

Lõputöös leiti, et pärast esiplaani moodustavate tähtede eemaldamist on tähevoolus Palomar 5 arvutatud tabeli 4.2 põhjal 1817 tähte, mitte arvestades kerasparve sisaldavat vahemikku.

Kuna lõputöös kasutati tähevoolu Palomar 5 koordinaatsüsteemi teisiti kui (Erkal *et al.*, 2017) töös, siis on keeruline tulemusi otseselt võrrelda. Küll aga tuleb lõputöös välja, et tähevool ei ole konstantse tihedusega.

# Tänuavaldused

Lõputöö valmimise eest tänan eelkõige juhendajat Taavi Tuvikest, kes võimaldas teha tööd põneva teemaga, saamaaegselt andes ohtralt head nõu ja teadmisi, millest on ka edasistel õpingutel kasu. Tänu Taavi Tuvikesele sain oluliselt targemaks nii valitud teemas kui ka andmetöötluses, programmeerimises ja Topcati rakenduse kasutamises. Samuti tänan Peeter Tenjest algse teema väljapakkumise eest ja nõuannete eest tähevoolude omadusi puudutavates küsimustes.

Piia Maria Tomberg

# Kirjandus

- Astrobites (2018). Clearing Up Stellar Streams with Gaia. <https://aasnova.org/2018/06/26/clearing-up-stellar-streams-with-gaia/>.
- Baumgardt, H. (2019). Orbital parameters of Galactic Globular Clusters. <https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/orbits.html>.
- Cropper, M., Katz, D., Sartoretti, P., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Chassat, F., Charvet, P., Boyadjian, J., Perryman, M., Sarri, G., Gare, P., Erdmann, M., Munari, U., Zwitter, T., Wilkinson, M., Arenou, F., Vallenari, A., Gómez, A., Panuzzo, P., Seabroke, G., Allende Prieto, C., Benson, K., Marchal, O., Huckle, H., Smith, M., Dolding, C., Janßen, K., Viala, Y., Blomme, R., Baker, S., Boudreault, S., Crifo, F., Soubiran, C., Frémat, Y., Jasniewicz, G., Guerrier, A., Guy, L. P., Turon, C., Jean-Antoine-Piccolo, A., Thévenin, F., David, M., Gosset, E., ja Damerdji, Y. (2018). Gaia Data Release 2. Gaia Radial Velocity Spectrometer. *Astronomy & Astrophysics*, 616:A5.
- de Boer, T. J. L., Belokurov, V., Koposov, S. E., Ferrarese, L., Erkal, D., Côté, P., ja Navarro, J. F. (2018). A deeper look at the GD1 stream: density variations and wiggles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477:1893–1902.
- Dotter, A. (2019). Isochrone Interpolation. <http://waps.cfa.harvard.edu/MIST/interp<sub>i</sub>isos.html>.
- Erkal, D., Koposov, S. E., ja Belokurov, V. (2017). A sharper view of Pal 5's tails: discovery of stream perturbations with a novel non-parametric technique. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470(1):60–84.
- European Space Agency (2018). Gaia. <http://sci.esa.int/gaia/>.
- Grillmair, C. J. ja Carlin, J. L. (2016). Stellar Streams and Clouds in the Galactic Halo. *Astrophysics and Space Science Library*, 420:87–114.
- Hans-Walter Rix, Thomas K. Henning, W. B. B. G. F. W. (2018). The Pan-STARRS1 Survey. <http://www.mpia.de/pan-starrs1>.

- Harris, W. E. (1996). A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way. *Astronomical Journal*, 112:1487.
- Jaaniste, J. (2018). Tähtede füüsika. <http://opik.obs.ee/osa3/ptk05/tekst.html>.
- Küpper, A. H. W., Balbinot, E., Bonaca, A., Johnston, K. V., Hogg, D. W., Kroupa, P., ja Santiago, B. X. (2015). Globular Cluster Streams as Galactic High-Precision Scales - the Poster Child Palomar 5. *The Astrophysical Journal*, 803:80.
- Maunder, E., Da Costa, G.Š., Keller, S. C., ja Kuzma, P. B. (2014). Palomar 5 and its tidal tails: a search for new members in the tidal stream. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(4):3297–3309.
- Mulgrew, P. (2018). Pan-STARRS1 data archive home page. <https://outerspace.stsci.edu/display/PANSTARRS/Pan-STARRS1+data+archive+home+page>.
- Odenkirchen, M., Grebel, E. K., Dehnen, W., Rix, H.-W., ja Cudworth, K. M. (2002). Kinematic Study of the Disrupting Globular Cluster Palomar 5 Using VLT Spectra. *The Astronomical Journal*, 124(3):1497–1510.
- Price-Whelan, A. M. (2019). Coordinate Systems (gala.coordinates). <https://gala-astro.readthedocs.io/en/latest/coordinates/>.
- Price-Whelan, A. M. ja Bonaca, A. (2018). Off the Beaten Path: Gaia Reveals GD-1 Stars outside of the Main Stream. *The Astrophysical Journal*, 863(2):L20.
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., ja Davis, M. (1998). Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *The Astrophysical Journal*, 500:525–553.
- Tenjes, P. (2018). Tähevoolud - meie Linnutee tormilise mineviku tunnistajad. *Horisont*, 52(5):48–52.
- Veskimäe, R. (1997). *Universum*. Tallinna raamatutrukikoda, Tallinn, Eesti.

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Piia Maria Tomberg,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

## **Tähevoolude GD-1 ja Palomar 5 uurimine,**

mille juhendaja on Taavi Tuvikene, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Piia Maria Tomberg,

Tartu, 30. mai 2019. a.