



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
LOODUSTEADUSKOND
KÜBERNEETIKA INSTITUUT

**LINNUTEE GALAKTIKA KETTA KEEMILINE JA
KINEMAATILINE ANALÜÜS**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Ele-Liis Evestus

Üliõpilaskood: YAFB222989

Juhendajad: Sven Pöder, KBFI, Nooremteadur

María Benito Castaño, Instituto de Astrofísica de Canarias, Järel doktor

Õppekava: Rakendusfüüsika

Tallinn 2025

Autorideklaratsioon ja juhendaja resolutsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Ele-Liis Evestus

23.05.2025

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Sven Põder

23.05.2025

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsekomisjoni esimees:

23.05.2025

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Galaktiline arheoloogia	5
2 Linnutee galaktika	7
2.1 Tuum ja keskne mõhn	8
2.2 Spiraalharud	8
2.3 Halo	9
2.4 Ketas	9
3 Andmed	12
3.1 Gaia	12
3.1.1 Gaia kosmoseteleskoop	13
3.1.2 Astromeetria ja radiaalkiirus	14
3.2 APOGEE	16
3.3 FIRE-2 simulatsioon	17
4 Metoodika	20
4.1 Punaste hiidude selekteerimine	20
4.2 Andmete teisendamine	21
4.3 Bimodaalsusest tulenev ketta jaotus	22
4.4 Kinemaatilised ja geomeetrilised lõiked	23
5 Tulemused ja arutelu	25
5.1 Ketta kinemaatika	25
5.2 Ketta keemiline struktuur	28
Kokkuvõte	33
Kasutatud kirjandus	36
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	43

Lühendite ja mõistete sõnastik

APOGEE	Apache Pointi Observatooriumi Galaktilise Evolutsiooni Eksperiment (<i>Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment</i>)
ASPCAP	APOGEE Täheparameetrite ja Keemiliste Elementide Sisalduste Töövoog (<i>APOGEE Stellar Parameters and Chemical Abundance Pipeline</i>)
DR	Andmeväljalase (<i>Data Release</i>)
ESA	Euroopa Kosmoseagentuur (<i>European Space Agency</i>)
FIRE	Tagasiside Realistlikes Keskkondades (<i>The Feedback In Realistic Environments</i>)
GSP-Phot	Üldine Täheparameetrite Määraja Fotomeetriast (<i>The General Stellar Parametrizer from Photometry</i>)
ICRS	Rahvusvaheline Taevakoordinaatide Süsteem (<i>International Celestial Reference System</i>)
RVS	Radiaalkiiruse Spektromeeter (<i>Radial Velocity Spectrometer</i>)
SDSS	Sloani Digitaalne Taevaülevaade (<i>Sloan Digital Sky Survey</i>)

Sissejuhatus

Linnutee galaktika ketas on dünaamiline ja mitmekihiline struktuur, mille uurimine on tänapäeval aktiivne teadusvaldkond. Viimastel aastatel on see uurimisvaldkond märgatavalt laienenud ja muutunud eriti populaarseks tänu Euroopa Kosmoseagentuuri Gaia missiooni andmestiku olulisele täienemisele. Gaia andmed võimaldavad ennenägematult täpselt määrata tähtede (~ 1.8 miljardi tähe) asukohti, kiiruseid ja muid füüsikalisi omadusi. Kuna aga Galaktika ketas on keeruline struktuur, mille kujundavad mitmed protsessid (nt ühinemised, varbi ja spiraalharude kujunemine, gaasivood), siis pole siiani saavutatud üksmeelt selle komponentide päritolu ja dünaamilise evolutsiooni osas. Seetõttu tekib vajadus täiendavate andmepõhiste analüüside järele.

Käesoleva töö eesmärk on karakteriseerida Linnutee galaktika ketta tähtede keemilisi ja kinemaatilisi omadusi. Täpsemalt uuritakse Galaktika ketta erinevate komponentide tähtede liikumiskiiruste ja keemilise koostise jaotusi ning seda, kas nende jaotuste ja ketta komponentide vanuse vahel on seos. Uurimismeetodina kasutatakse kvantitatiivset andmeanalüüsi, mille aluseks on tähtede ruumiline ja kinemaatiline informatsioon, mis pärineb Gaia DR3 andmestikust, ning keemiline koostis, mis pärineb lähiinfrapunase spektraaluringu APOGEE DR17-st. Andmeid töödeldakse ja analüüsitakse statistiliste meetodite abil, mille käigus moodustatakse joonised, et tuvastada mustreid ja teha teaduslikke järeldusi ketta struktuuri ja võimaliku kujunemise kohta.

Töö koosneb viiest peatükist. Esimeses peatükis antakse ülevaade galaktilisest arheoloogiast ehk uurimisvaldkonnast, mis püüab tähtede omaduste põhjal kirjeldada Galaktika kujunemis- ja arengulugu. Teine peatükk keskendub lähemalt Linnutee galaktika struktuurile ja selle ketta moodustumise teooriatele. Kolmandas peatükis tutvustatakse töös kasutatud andmeid ning nende päritoluallikaid. Neljas peatükk kirjeldab töös rakendatud andmetöötlus- ja analüüsimeetodeid, sealhulgas andmete valikut, puhastamist ja visualiseerimist. Viiendas peatükis esitatakse töö tulemused ning arutletakse nende tähenduse üle Galaktika ketta struktuuri ja arenguloo kontekstis. Töö lõpetab kokkuvõtte, kus võetakse lühidalt kokku peamised järeldused ja antakse hinnang uurimuse piirangutele.

1. Galaktiline arheoloogia

Galaktiline arheoloogia uurib galaktikate ajalugu neid moodustavate tähtede omaduste põhjal. Teleskoopide abil saab mõõta nii tähtede kinemaatikat kui ka keemilist koostist, mis talletavad endas informatsiooni tähetekketingimuste kohta Galaktika arengu erinevatel ajajärgudel. [1] Kuigi senimaani on võimalik galaktilist arheoloogiat vaatuslikult uurida ja rakendada vaid meie Galaktikas¹ [1], võimaldavad moodsad hüdrodünaamilised galaktika simulatsioonid galaktikatekke teooriate kontrollimiseks uut tüüpi lähenemist [Benito jt ettevalmistamisel]. Analüüsides tähepopulatsioonide liikumist ja koostist ning kõrvutades vaatluslikke andmeid tänapäevaste simulatsioonidega, saame uurida Galaktika kui terviku kujunemislugu.

Tänapäevase tähetekke teooria kohaselt koosnesid kõige varasemad, esimese põlvkonna tähed ainult vesinikust ja Suure Paugu järel tekkinud heeliumist. Seetõttu olid I põlvkonna tähed arvatavasti sünnihetkel täiesti metallivabad ning enamasti ka väga massiivsed. Sellised tähed põlevad aga väga kiiresti ja nende elu lõppeb suure plahvatuse ehk supernoovana. Põlemisprotsessi käigus moodustub vesinikust heelium ning seejärel heeliumist süsinik ja muud raskemad elemendid. Tähtede tuumades on võimalik sünteesida elemente kuni rauani, raskemate elementide loomiseks on vaja äärmuslikke temperatuure ja rõhke, mis esinevad supernoovades ja tähepõrgetes. [2]

Esimese põlvkonna tähed rikastasid tähtede vahelist keskkonda nende plahvatamisel Universumisse paiskunud gaasi ja tähetolmuga, mis kandis endas nüüd ka raskemaid elemente. See sama protsess on toimunud Galaktika ajaloo jooksul korduvalt, seejuures muutes omakorda ka tähetekketingimusi. Suurema süsiniku sisalduse tõttu hakkasid lõpuks tekkima ka väiksemad ja pikema elueaga tähed. Näiteks meie Päikesesüsteemi planeetide tekkeks pidi selline tähetekke ja tähtedevahelise gaasi rikastumisprotsess korduma ligikaudu 1000 korda [2].

Metallide rikastumise mõõtmiseks kasutavad astronoomid sageli raua ja vesiniku suhet $[Fe/H]$, mida saab arvutada kui tähe ja Päikese rauasisalduse suhte logaritmina:

$$[Fe/H] = \log_{10}\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_{star} - \log_{10}\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_{sun}, \quad (1.1)$$

kus N_{Fe} ja N_H on vastavalt raua- ja vesinikuaatomite arv ruumalaühiku kohta [3]. Samuti

¹Galaktika suure algustähena viitab spetsiifiliselt just Linnutee galaktikale, väikese algustähena aga üldiselt kõikidele galaktikatele.

saab aga kasutada ka metallide ja vesiniku suhet $[M/H]$. Astronoomid jagavad Mendelejevi tabeli üldiselt kolmeks: 1. vesinik, 2. heelium ja 3. metallid (ehk kõik teised elemendid). Sellise lihtsustuse põhjuseks on Suure Pauguga seotud temperatuuride ja rõhkude suhe, mis võimaldas sünteesida vesinikust vaid heeliumi ja väga väikese koguse liitiumi. Ülejäänud elemendid moodustuvad juba tähtede sisemistes tuumaprotsessides või plahvatustes. Seega kirjeldab rauasisaldus raua aatomite hulka võrreldes vesinikuga ja metallisisaldus kõikide elementide, va vesiniku ja heeliumi, aatomite sisaldust võrreldes vesinikuga. Üldiselt kehtib, et mida suurem on metallilisus, seda vanem on täht [2].

Galaktilises arheoloogias samuti laialdaselt kasutatavad elemendid on alfa-elementid, nagu näiteks süsinik, hapnik, neon, magneesium. See keemiliste komponentide klass moodustub enamasti suurte tähtede supernoovade ja tuumasünteesi teel. Kuna alfa-elementid mõjutavad oluliselt ka tähtede ja tähtedevahelise aine koostist, on nende uurimine Galaktika keemilise evolutsiooni ja tähtede tekkeloo jaoks oluline. Alfa-elementide rohkus võib aidata meil määrata galaktika vanust. Samuti aitavad alfa-elementid luua kiviste planeetide ja bioloogilise elu nõ ehitusplokke, mistõttu on nad planeetide moodustumiseks ja arenguks hädavajalikud. [4]

Alfa-elementide ja raua suhet $[\alpha/Fe]$ saame arvutada alfa-protsessi² elementide ja Fe logaritmina võrreldes Päikese omaga:

$$[\alpha/Fe] = \langle [X/Fe] \rangle = \langle \log_{10} \left(\frac{N_X}{N_{Fe}} \right)_{star} - \log_{10} \left(\frac{N_X}{N_{Fe}} \right)_{sun} \rangle, \quad (1.2)$$

$$X \in [C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti],$$

kus N_X ja N_{Fe} on vastavalt alfa-protsessi elementide ja raua aatomite arv ruumalaühiku kohta [6]. Väiksema $[\alpha/Fe]$ sisaldusega tähed on üldiselt nooremad. Vanema tähepopulatsiooni puhul näeme aga suuremat alfa-elementide sisaldust ja madalamat metallirikastust. [7]

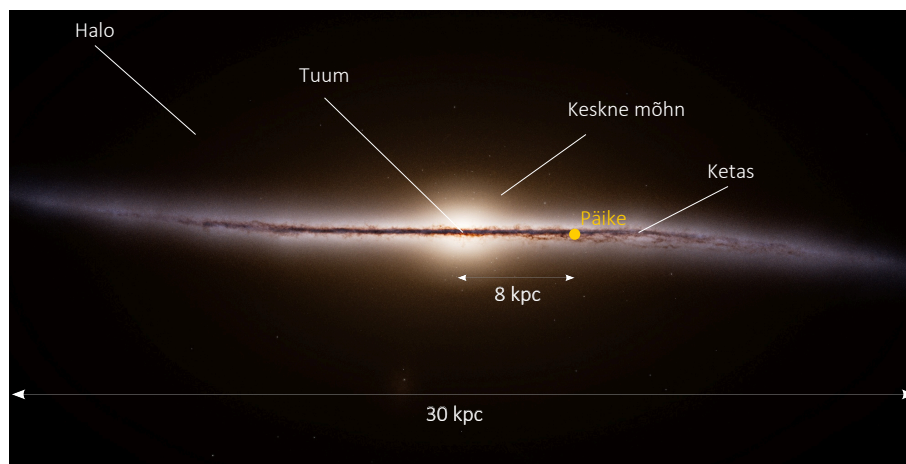
²Alfa-protsess on tuumareaktsioon, mille käigus sünteesitakse heeliumist raskemaid elemente [5].

2. Linnutee galaktika

Linnutee galaktika on tüüpiline spiraalgalaktika vanuselt umbes 13.6 miljardit aastat, mis võrreldes meie Universumi vanusega (13.8 miljardit) ei olegi niivõrd väike [8]. Galaktika saame jagada nii nähtavaks kui ka mitte nähtavaks osaks (tumeaine halo). Käesolevas töös aga käsitleme ja uurime vaid nähtavat Galaktikat.

Diameetriga pea 30 kiloparsekit, koosneb Linnutee galaktika tähtedest, udugogudest ehk tolmu- ja gaasipilvedest, planeetidest, asteroididest ja mustadest aukudest, mis kõik tiirlevad ümber galaktika keskme, moodustades pikad keerduvad spiraalharud [9]. Meie Päikesesüsteem asub Galaktika kettas ligikaudu 8 kiloparseki kaugusel Galaktika keskme. Eeldatav tiirlemisperiood ümber Galaktika keskme on 230 miljonit aastat, mille saavutame kiirusel umbes 828 000 km/h ehk 230 km/s. [9, 10]

Linnutee galaktika struktuuri saab enam-vähem jaotada neljaks eraldi osaks, mis võivad kohati üksteisega seguneda: tuum ja keskne mõhn, ketas (nii õhuke kui ka paks ketas), spiraalharud ja nähtav täheline halo (vt Joonis 1) [11].



Joonis 1. Linnutee galaktika struktuur (kohandatud: [12])

Komponendid erinevad üksteisest nii ruumilise jaotuse, kinemaatika kui ka vanuse ja keemilise jaotuse poolest. Uurides Galaktika eriosi ja -omadusi, saame olulisi teadmisi Galaktika ülesehituse ja toimimise kohta terve tema eluea jooksul. [13]

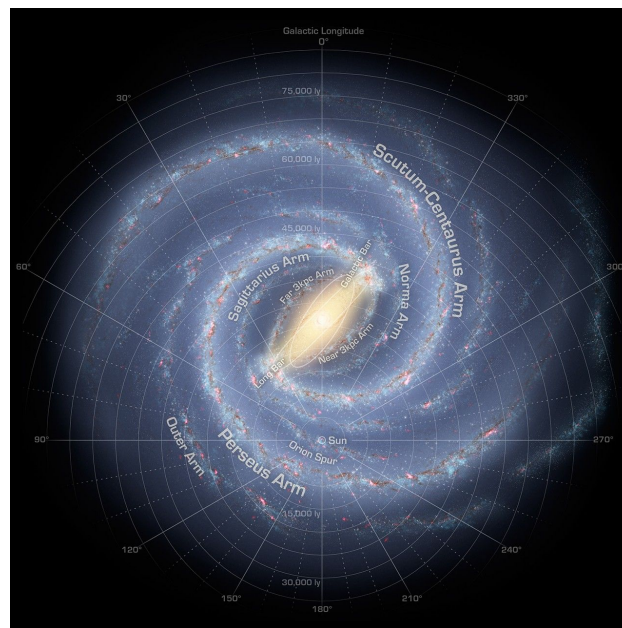
2.1 Tuum ja keskne mõhn

Linnutee galaktika nõ tuumaks on massiivne must auk (astronoomide poolt nimetatud kui Sagittarius A*), mille ümber tiirleb kõrge temperatuuriga gaasi akretsiooniketas. Tuuma ja selle ümbrust pole küll võimalik optiliste lainepikkuste juures vaadelda paksu tolmukatte tõttu, kuid raadiolainete abil on Galaktika keskme uurimine lihtsasti teostatav. Musta augu ümber olev akretsiooniketas koosneb gaasist, mis on surutud pöörlevaks kettaks. Vaatluste ja mõõtmiste tulemusena arvatakse musta augu mass olevat hinnanguliselt neli miljonit korda suurem Päikese omast. [11]

Tuuma ümbritsevat näivalt sfäärilist tähtede ja täheparvede kogumit nimetatakse keskseks mõhnaks. Selles asuvad enamasti II populatsiooni tähed ehk vanemad väikese metallilisusega tähed, millest moodustuvad enamasti galaktika halo või kerasparved. [11, 14] Mõhna kuju tõttu nimetatakse teda varbiks, mille tähed pöörlevad torukujulistel orbiitidel. See näitab, et varb on domineeriv struktuur ja peab pöörlema jäigalt, et säilitada oma kuju. [15]

2.2 Spiraalharud

Linnutee galaktikale annavad spiraalse kuju kaks põhilist spiraalharu (Scutum-Centaurus, Perseus), mis koosnevad nii vanadest kui ka noortest tähtedest. Samuti asetsevad nende vahel kaks nüüdseks degradeerunud väikeharu (Norma, Sagittarius), mis koosnevad põhiliselt gaasist ja aktiivsetest tähetekke piirkondadest (vt Joonis 2) [16].



Joonis 2. Illustratsioon Linnutee galaktika spiraalharudest ja varbist [16]

2.3 Halo

Halo on Galaktika kõige laiem komponent, sisaldades väga metallivaeseid ja vanu tähti [13]. Astronoomid on välja käinud halo kahekomponendilise struktuuri: sisemine tugevalt lame komponent ja välimine, eelmisele vastassuunas pöörlev, sfääriline halo [17].

Galaktikate ühinemised on halo peamiseks nõ toiteallikaks, mistõttu võib seda vaadelda kui olulist elementi Galaktika ühinemisajaloo ja struktuuri kirjeldamiseks [13]. Hierarhilise struktuuritekke teooria kohaselt hakkas Linnutee halo kasvama juba mõnisada miljonit aastat peale Suurt Pauku, neelates endasse selle tagajärjel moodustunud täheparved ja kääbusgalaktikad [18]. Gaia andmete analüüsid viitavad sellele, et varajaste ühinemiste epohh lõppes umbes 8–10 miljardit aastat tagasi olulise Gaia-Sausage-Enceladus (GSE) ühinemisega, mille nõ tähepuru moodustab nüüd umbes pool Linnutee galaktika halost [15]. Kuna varem oli ühinemiste sagedus suurem, siis alles peale ühinemiste epohhi hakkas tõenäoliselt täies ulatuses välja kujunema õhuke ketas [13].

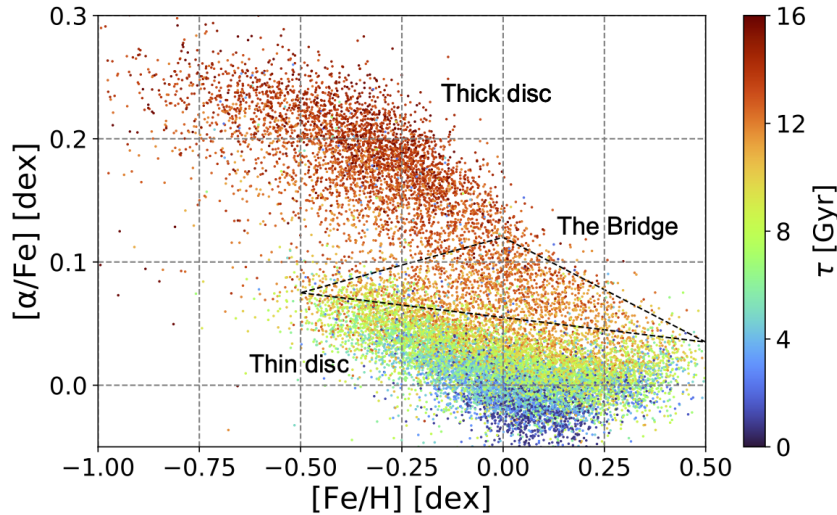
2.4 Ketas

Arusaadavalt on kõige suurem ja silmatorkavam Galaktika osa tema ketas, mis on paksuselt umbes 100 korda väiksem kui nähtava Galaktika diameeter. Ketta komponendid ehk tähed, gaas ja tolmu liiguvad ringikujulistel orbiitidel ümber Galaktika keskme. Eeldatavasti oli ketta tähed moodustanud gaas juba enne tähtede sündi ringikujulisel orbiidil, mis on üldiselt määratud Galaktika gravitatsioonilise potentsiaaliga. Seega, kui tähed ei asetse muid häiritusi põhjustavate struktuuride vahetus läheduses (nt varb), säilib ka nendele eelnenud gaasipilve trajektoor. [11, 19]

Galaktika ketta tähed saame jagada erinevateks komponentideks kasutades nii nende jaotuse geometriat kui ka tähtede keemilist koostist. Enamasti jaotakse ketas kaheks: paks ketas ja õhuke ketas [20]. Geomeetrilise ketta määramiseks kasutatakse vertikaalset jaotust [21]. Keemilist ketast saame iseloomustada põhiliselt metallilisuse alusel [13]. Oluline on siinkohal ka nentida, et geomeetriselt ja keemiliselt defineeritud ketta komponendid täielikult ei kattu. Selles töös uurime ja analüüsime Linnutee galaktika ketast selle keemilise koostise ja kinemaatika alusel.

Kõrge eraldusvõimega spektroskoopilised uuringud nii Päikese naabruskonnast kui kaugemalt on tuvastanud Galaktika ketta keemilise bimodaalsuse, mis on nähtav, kui võrrelda tähtede alfa-elementide ja metallide küllust (vt Joonis 3). $[\alpha/Fe] - [Fe/H]$ jaotuse kõige silmapaistvamad tunnused on kõrge $[\alpha/Fe]$, madalama $[Fe/H]$ sisaldusega regioon,

defineeritud kui keemiline paks ketas, ja madala $[\alpha/Fe]$, kõrgema $[Fe/H]$ sisaldusega region, defineeritud kui õhuke ketas. Nende kahe komponendi vahel on märgata ka ülemineku piirkonda ehk nn sillaregiooni. Selles piirkonnas on näha kasvavat $[Fe/H]$ väärtust vanuse vähenemisega. Sellest saab omakorda järeldada, et tegemist on üleminekufaasiga radiaalselt väiksemast keemiliselt homogeenest paksust kettast suurema õhukese kettani. [7]



Joonis 3. Linnutee galaktika ketta tähtede $[\alpha/Fe] - [Fe/H]$ jaotuse joonis, kus värviriba näitab tähtede vanust miljardites aastates (Gyr) (kohandatud: [7])

Linnutee ketta keemilise koostise uurimine on arenev valdkond, mille selgitamiseks on välja pakutud erinevaid mudeleid ja teooriaid. Üks esimesi ja ka populaarsemaid mudeleid Galaktika ketta bimodaalsuse selgitamiseks on kahe sissevoolu mudel (ingl *two-infall model*) [22]. Usutakse, et esimesest gaasi sissevoolust Galaktikasse moodustus algne kõrge $[\alpha/Fe]$ kontsentratsiooniga keemiliselt homogeenne paks ketas. Peale lühikest tähetekke pausi algas aga gaasi akretsiooni teine faas. Selle, palju pikemalt kestnud, madala metallilisusega gaasi sissevoolu tõttu langes metallide sisaldus ka tähtedevahelises keskkonnas, seejuures moodustades madala $[\alpha/Fe]$ sisaldusega õhukese ketta. [7, 22]

Lisaks eelmisele mudelile, on välja käidud ka poolanalüütiline lähenemisviis kahe erineva tähtede populatsiooni mõistmiseks. See väidab, et varakult intensiivse tähtede moodustumise perioodil tekib kõrge $[\alpha/Fe]$ väärtustega paks ketas, mille maksimaalne metallilisus on sarnane Päikesele. Järgmiseks areneb järk-järgult jääkgaasist õhuke ketas, millel on Päikesega sarnased $[\alpha/Fe]$ ja metallilisuse väärtused. Aja jooksul kujuneb järjestus, kus $[Fe/H]$ väheneb ja $[\alpha/Fe]$ suureneb. [7]

Teiste stsenaariumite kohaselt on pakutud välja, et galaktika sisemuses tekkivate kinemaatiliselt kuumade ehk suurte kiiruse dispersiooniga tähtede radiaalne migratsioon Galaktika keskmest väljapoole moodustab paksu ketta. Samuti on pakutud ka järgnevaid arengukäi-

ke nagu gaasirikad ühinemised, suure $[\alpha/Fe]$ suhtega tähtede lisandumine, satelliitide ühinemistest tingitud kiirusvälja häirimised ja turbulents suure punanihkega gaasirikastes ketastes. Üldiselt arvatakse aga, et paks ketas moodustus enne õhukest ketast. [7]

Seest-välja ja ülevalt-alla (ingl *inside-out and upside-down*) kujunemisprotsess kirjeldab väga hästi Galaktika ketta moodustumist, kus algne ketas on palju kompaktsem ja paksem, kuid aja jooksul venib järjest õhemaks. Galaktika ketta seesmised piirkonnad moodustuvad varem, sujuva gaasi akretsiooni tõttu ajapikku ka välimised. Esialgne ketas on kinemaatiliselt kuum ja seega ka geomeetriliselt paks, üle pika aja jätkub täheteke järjest külmemates ja õhemates gaasikihtides. [23]

3. Andmed

Tähtede omaduste mõõtmiseks kasutatakse erinevaid teleskoobe. Kuna Maa atmosfääri õhugaugud ja nende liikumine põhjustavad piltide hägusust, siis selgemate vaatluste saavutamiseks on eelis kosmoseteleskoopidel [24]. Selles töös kasutame Gaia ja APOGEE andmeid. Järgnevalt on kirjeldatud lähemalt nende andmekogumite isepärasusi.

3.1 Gaia

Gaia¹ oli Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) missioon, mille põhieesmärk oli kaardistada ja uurida Linnutee galaktika teket, struktuuri ja evolutsiooni, mõõtes tähtede kolmemõõtmelist ruumilist ja kiiruse jaotust. Tema eelkäijaks oli Hipparcose missioon (1989–1993), mis mõõtis üle 100 000 objekti absoluutset parallaksi millikaaresekundilise täpsusega. [26] Nüüdseks on Gaia oma eelkäija saavutused edukalt ületanud, avaldades kolm mahukat andmeväljalaset [27, 28, 29]. Kuigi Gaia lõpetas oma töö 2025. aasta jaanuaris, on oodata veel kahte andmeväljalaset: DR4 (ingl *Data Release 4*) (2026) ja DR5 (2030) [30].

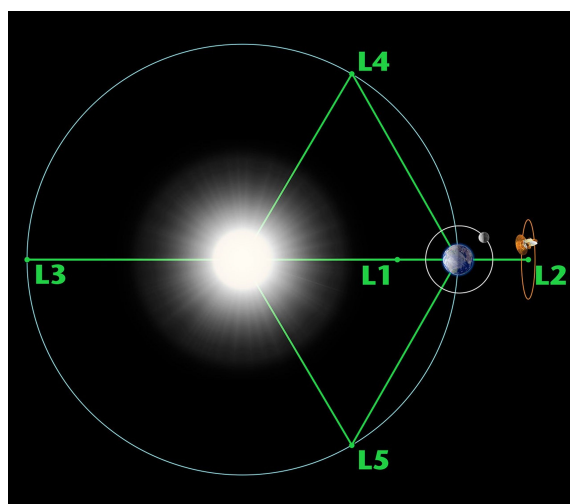
Käesolev töö kasutab 2022. aasta juunis avaldatud Gaia 3. andmeväljalaset (DR3). See põhineb peaaegu kolme aasta jooksul kogutud andmetel (2014–2017), milles on üle 1.8 miljardi täheobjekti. Võrreldes Gaia DR2 ja DR1-ga, sisaldab DR3 hulgaliselt rohkem radiaalkiiruste mõõtmisi. [29]

Gaia oli ainulaadne kosmoseaparaat, optimeerides täpsust, tundlikkust ja taeva katvust määral, mida pole varem realiseeritud ja mida peetakse maapealsete fotomeetriliste ja spektroskoopiliste süsteemide puhul lausa võimatuks. Fotomeetria käsitleb tähtede heledusi, spektroskoopia radiaalkiiruseid ja astrometria kaardistab taevaobjektide asukohti (vt ka ptk 3.1.2). Täpsed spektroskoopilised ja astrometrilised andmed lihtsustavad märkimisväärselt kõigi astrofüüsikaliste valdkondade uuringuid, sealhulgas eksoplaneetide ja kaksiktähesüsteemide avastamist ning galaktikate dünaamika uurimist. [26]

¹Nimi GAIA ehk Globaalne Astrometriline Interferomeeter Astrofüüsikaks on tulnud algsest meetodist paigaldada kosmoseaparaadile optiline interferomeetria seade. Hiljem muudeti küll teleskoobi mõõtmismeetodit, kuid see-eest nimi säilis. [25]

3.1.1 Gaia kosmoseteleskoop

Gaia teekond kosmosesse algas 2013. aasta detsembris Prantsuse Guajaanas asuvast Euroopa kosmosekeskusest. Tähtede vaatlust alustas ta aga alles 2014. aasta keskel, olles jõudnud Maast ligi 1.5 miljoni kilomeetri kaugusel asuvasse Lagrange'i punkti² L2 (vt Joonis 4). Gaia pöörleb koos Maaga tema üheaastasel orbiidil, paiknedes Päikese poolt vaadates Maa varjus, kattes enamiku päikesekiirgusest. Oma positsioonilt on L2 ideaalne koht vaatluste jaoks, tagades ühtlase soojus- ja kiirgustaseme ning stabiilse gravitatsioonikeskkonna. Viimane võimaldab kosmoseteleskoobil püsida aastaid ühe koha peal, ilma suurte orbiidi korrigeerimisteta. Gaia pöörleb kuuetunnise perioodiga, seejuures pidevalt taevast skaneerides. [26]

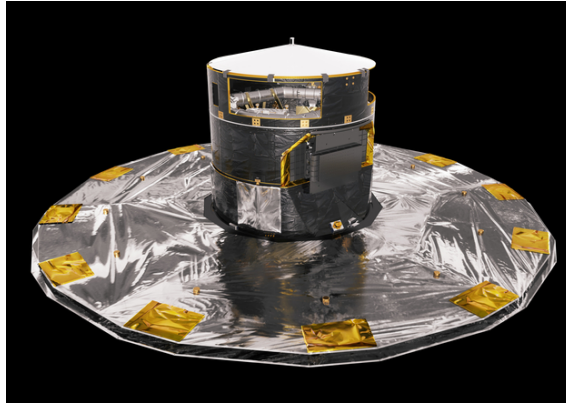


Joonis 4. Lagrange'i punktid Päikese, Maa ja Kuu suhtes [31]

Gaia satelliit (vt Joonis 5) koosneb kolmest moodulist: teleskoop, mehaaniline teenindusmoodul ja elektrihooldusmoodul. Kaks viimast vastutavad selle eest, et kosmoselaev püsiks töökorras, ja sisaldavad näiteks päikesevarju, termotelki, päikesepaneelid jne. Gaia päikesevari, diameetriga 10.2 meetrit, varjab kosmoseteleskoopi Päikese kiirguse eest, luues koos termilise telgiga stabiilse keskkonna tähevaatlusteks. Teleskoop vastutab missiooni vaatluste ja andmetöötluse eest ehk astrometria, fotomeetria ja spektroskoopia eest, mis on selle peamised funktsioonid. [26]

Astrometrilise instrumendi ülesandeks on vaadeldava objekti täpse asukoha määramine. Selleks mõõdab Gaia otsetõusu ja käände suunalised koordinaadid, omaliikumised nendel suundadel ja trigonomeetrilise parallaksi. [33] Fotomeetrilise instrumendiga saame vaadelda spektreid lainepikkustel 320–1000 nm. Sinine ja punane fotomeeter (BP/RP) võimaldavad täpsemalt määrata ka tähtede temperatuuri, massi, vanust ja keemiliste elementide

²Lagrange'i punktid on gravitatsiooniliselt stabiilsed punktid kahe taevakeha süsteemis (nt Päike ja Maa), kus kehade gravitatsioonilised tõmbejõud aitavad hoida objekti stabiilsel orbiidil [31].



Joonis 5. Gaia kosmoseteleskoop [32]

koostist. [34] Gaia spektroskoopiline instrument, nn. radiaalkiiruse spektromeeter (RVS), mõõdab tähtede radiaalkiiruse Doppleri nihete kaudu. Ühtlasi vastutab ta ka konkreetsete elementide arvukuse, astrofüüsikaliste andmete ja tähtede ligikaudsete parameetrite, nagu näiteks temperatuur, pinnagravitatsioon, esitamise eest. [26]

3.1.2 Astrometria ja radiaalkiirus

Astrometria on astronoomia haru, millel on kaks peamist eesmärki. Esiteks, luua staatiline taustsüsteem, mida saaks kasutada eri aegadel läbiviidud vaatluste tulemuste võrdlemiseks. Seejärel kasutada seda taustsüsteemi tähtede omaduste, ruumilise jaotuse ja liikumise kaardistamiseks ja uurimiseks. [35]

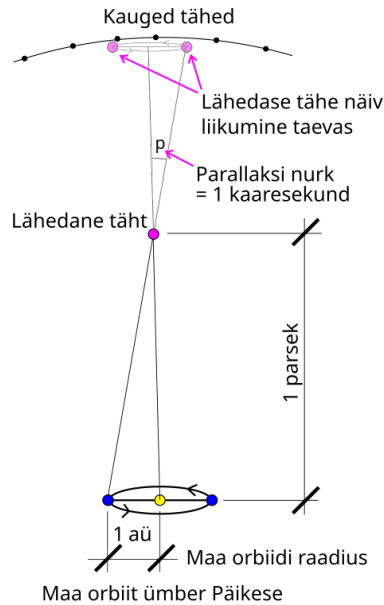
Gaia loob tähtedele astrometrilise 5D andmestiku, mõõtes tähe positsiooni taevas läbi otsetõusu ja käände, omaliikumisi nendel suundadel ja parallaksi millikaarsekundilise täpsusega [29]. Lisades sellele ka spektroskoopilised tähtede radiaalkiiruste väärtused, saame 6D andmestiku, mida kasutame ka järgnevalt andmeanalüüsiks.

Gaia vaatlusandmed on ICRS (ingl *International Celestial Reference System*) taustsüsteemis, mis on Rahvusvahelise Astronoomiaühingu poolt vastu võetud peamiselt kasutatav taevavõrdlussüsteem. ICRS taevakoordinaadite keskpunktiks on Päikesesüsteemi barütsenter³ ning koordinaatideks eelmainitud Gaia 6D andmed. [37]

Tähtede kauguste hindamine on üldjuhul keeruline ülesanne. Niisiis, võttis astronoomidel kaua aega, enne kui mõeldi välja trigonomeetiline mõõtmisviis. Parallaks ehk vaateleja vaatepunkti muutumisest tingitud objekti nihkumine, on nüüdseks saanud võtmemeetodiks

³Barütsenteri all mõeldakse süsteemi massikeset. Päikesesüsteemi puhul moodustab Päike umbes 99.8% süsteemi massist, ülejäänud planeedid 0.2%. Seetõttu asub Päikesesüsteemi barütsenter isegi Päikesest natuke väljapool [36].

tähtede kauguste arvutamiseks. [38] Üks parsek, mis võrdub ca 3.26 valgusaastaga, on kaugus objektist, mille parallaksinurk on üks kaaresekund (vt Joonis 6) [39].



Joonis 6. Tähtede kauguste trigonomeetriline mõõtmine, kus 1 aü on 1 astronoomiline ühik [40]

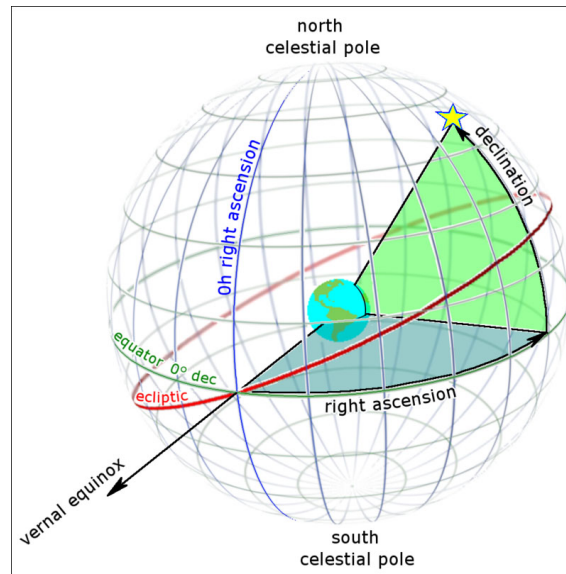
Valemina saab väljendada kaugusemõõtu parsekites kui:

$$kaugus = \frac{1 a}{parallaks}, \quad (3.1)$$

kus parallaks on antud kaaresekundites ning 1 aü on 1 astronoomiline ühik ehk keskmine kaugus Päikesest Maani.

Tähe positsiooni määramiseks taevasfääril, mõõdab Gaia tähe otsetõusu (ingl *right ascension*) ja käänet (ingl *declination*) ehk vastavalt taeva pikkus- ja laiuskraadi (vt Joonis 7). Käänet iseloomustatakse kraadides, kus 0° on määratletud kui ekvaator ning $+90^\circ$, -90° vastavalt põhja- ja lõunapoolused. Otsetõusu saab samuti väljendada kraadides, kuid enamasti on see defineeritud tundides, minutites ja sekundites: 24 h vastab 360-kraadisele pöördele taevasfääril, 1 tund 15-kraadisele pöördele. [41] Tähtede liikumist taevasfääril saame kirjeldada nende otsetõusu või käänte muuduga ajas, mida nimetatakse tähe omaliikumiseks. Tihti on selle liikumise ühikuks millikaaresekundit aastas ([mas/yr]), nii on ta ka Gaia andmete puhul. [43]

Radiaalkiirus on objekti kauguse suhteline muutus ajaühiku kohta [43]. Selle suuna määramiseks jälgitakse tähe spektri nihet - sininihe näitab, et täht liigub vaatleja suunas, punanihe korral see-eest vaatlejast kaugemale. Kombineerides radiaalse kiiruse tähe



Joonis 7. Taevasfääril määratud otsetõus ja kääne [42]

omaliikumise informatsiooniga, saame rekonstrueerida tähe 3D kiirusvektori. [44]

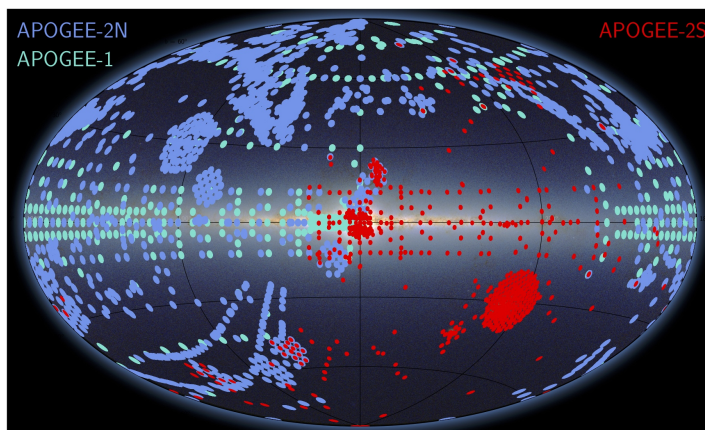
3.2 APOGEE

Apache Pointi Observatooriumi Galaktilise Evolutsiooni Eksperiment (APOGEE) on laiaulatuslik kõrge eraldusvõimega lähiinfrapunase tähtede uuring [45]. Alustades oma tegevust juba 2011. aasta kevadest on see üks neljast Sloani Digitaalse Taevaülevaate (SDSS) projektidest [46]. Peamiselt vaatleb APOGEE Linnutee galaktika punaste hiidude ja ka teiste heledamate tähtede spektreid. Tänu lähiinfrapunase spektriosas tegutsemisele (lainepikkuste vahemikus 15140 kuni 16960 Ongströmi⁴ (tähis Å)) on APOGEE-1 eriline eelis, kuna see võimaldab vaadelda tähti ka läbi tähtedevahelise tolmu. [45]

APOGEE-1 on üks kahest APOGEE projekti põlvkonnast, mis on katalogiseerinud üle 150 000 tähe radiaalkiiruse ja keemilise koostise [48]. Samasuguselt eelmisele, kaardistab ka APOGEE-2 Linnutee galaktika tähtede dünaamilisi ja keemilisi omadusi. Teine põlvkond aga jaguneb taeva vaatluste katvuse maksimeerimiseks veel omakorda kaheks. APOGEE-2N kasutab New Mexico osariigi ülikooli (NMSU) 1-meetrist ja Apache Pointi observatooriumis asuvat Sloani sihtasutuse 2.5-meetrist teleskoopi. APOGEE-2S aga 2.5-meetrist du Ponti teleskoopi, mis asub Tšiilis Las Campanas'i observatooriumis. [49]

APOGEE põhilised mõõtmistulemused on spektrid, radiaalkiirused, keemiliste elementide sisaldus ja ka muud tähtede parameetrid. Antud töö kontekstis on olulisemad APOGEE tä-

⁴Ongström on pikkusühik, mis võrdub ühe kümnendikuga nanomeetrist: $1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 100 \text{ pm} = 10^{-10} \text{ m}$ [47].



Joonis 8. APOGEE DR17 Linnutee galaktika infrapunapilt, kus APOGEE-1 väljad on illustreeritud tsüaanis, APOGEE-2N väljad sinises ja APOGEE-2S väljad punases [49]

heparameetrite ja keemiliste elementide sisalduse töövoo (ASPCAP) spektrid. Nagu nimigi ütleb, kasutatakse ASPCAP-i, et tuletada tähtede elementide sisaldused ja parameetrid, nagu näiteks temperatuur, pinna gravitatsioon, metallilisus. [50]

Selles töös kasutatav APOGEE DR17 põhineb kogu APOGEE-1 andmestikul, mida on täiendatud ka osaliste APOGEE-2 töödeldud andmetega (vt Joonis 8) [48]. Erinevate tähtede spektreid on andmeväljalaskes üle 600 000 [51]. Kui Gaia mõõdab enamjaolt Päikese ümbruskonna tähti, siis APOGEE pakub lisaks laiemat Galaktika tasandi kaardistamist [52].

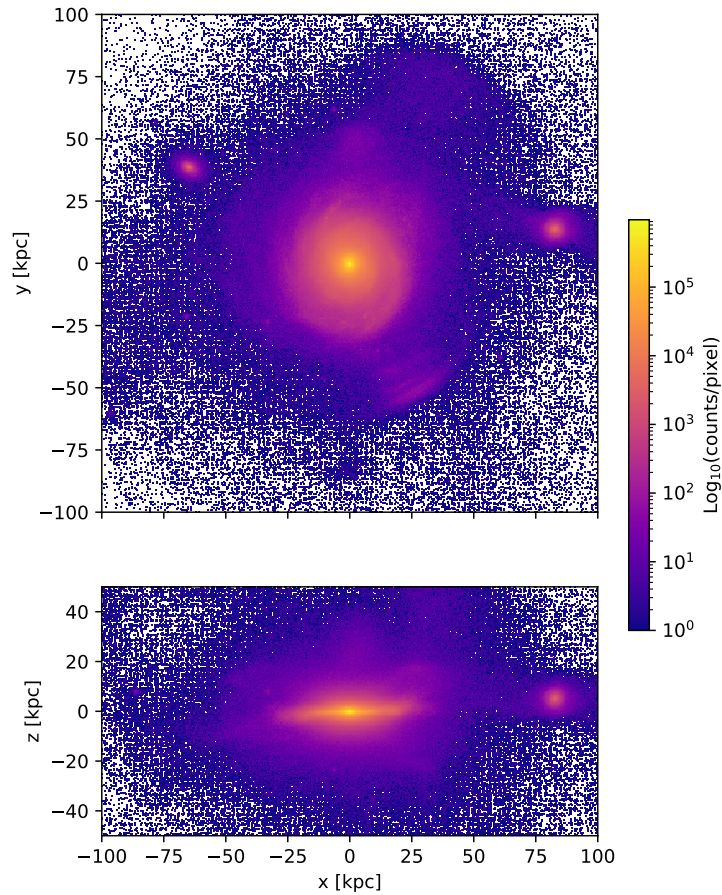
3.3 FIRE-2 simulatsioon

FIRE-2 on FIRE (ingl *Feedback In Realistic Environments*) projekti kosmoloogiliste simulatsioonide teine põlvkond. Selle eesmärk on simuleerida galaktikaid sarnases keskkonnas kui on Linnutee galaktika. FIRE-2 simuleerib galaktikaid kõrge ruumi- ja massilahutusega, kasutades selleks uudseid barüonaine⁵ protsesside mudeleid. Need viimased on galaktika-loomes olulised ja nende kaasamine simulatsioonides võimaldab luua realistliku välimuse ja koostisega galaktikate simulatsioone.

Üks suuremaid galaktikaid eelmainitud simulatsioonis on Romeo galaktika, mille tähtede ja gaasi jaotus nii x - y kui ka x - z teljestikus on illustreeritud vastavalt Joonistel 9 ja 10. FIRE-2 simulatsioonidest on Romeo galaktika üks parimaid Linnuteega võrdlemiseks, sest lisaks muudele ühistele joontele on nende galaktikate kettad sarnase vanusega: Romeo ketas moodustus ~ 11 Ga tagasi ning Linnutee ketas arvatakse olevat moodustunud umbes 10–

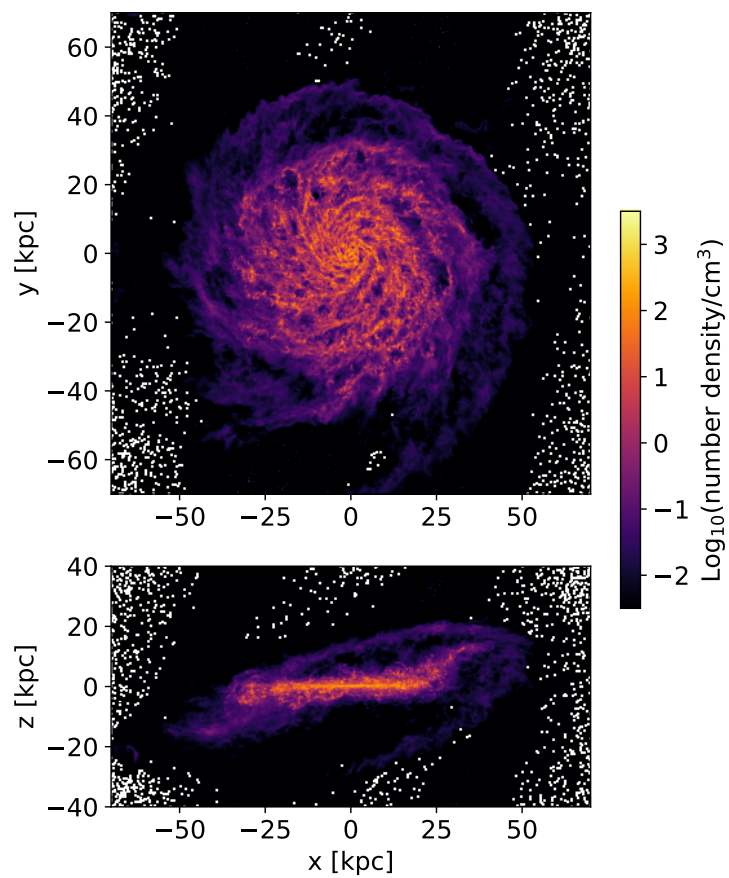
⁵Barüonaine on aine, mis koosneb vaid barüonidest. Astronoomias defineeritud kui aine, mis moodustab nähtava Universumi (võttes arvesse prootonid, neutronid ja ka nendega kaasaskäivad elektronid) [53].

13 Ga tagasi. [54] FIRE andmeid kirjeldame üksikasjalikumalt omakorda veel avaldamata



Joonis 9. Romeo galaktika tähtede projekteeritud jaotus vastavalt x-y (ülemine) ja x-z (alumine) koordinaadistikus [Benito jt ettevalmistamisel]. Värviriba näitab tähtede arvtihedust

artiklis Benito jt [Benito jt ettevalmistamisel]. Samaselt artiklile kasutame ka käesolevas töös galaktikate vaheliseks võrdluseks simuleeritud Romeo galaktika andmeid.



Joonis 10. Romeo galaktika gaasi projekteeritud jaotus vastavalt x-y (ülemine) ja x-z (alumine) koordinaadistikus [Benito jt ettevalmistamisel]. Värviriba näitab gaasi arvtihedust

4. Metoodika

Antud lõputöös karakteriseerime Linnutee galaktika ketta tähtede keemilisi ja kinemaatilisi omadusi. Tähtede keemiliste omaduste ühendamiseks kinemaatilistega kasutame täheobjektide 3D kiiruseid ja 3D asukohti. Andmeanalüüs põhineb Gaia DR3 [55] ja APOGEE DR17 [56] andmekogumite kombineeritud valimil.

4.1 Punaste hiidude selekteerimine

Edasise analüüsi ja tulemuste kvaliteedi tagamiseks rakendame valimile andmekärped, eemaldades analüüsiks vajaminevate parameetrite puuduvate väärtustega tähed ning keskendudes vaid punastele hiidudele. Esialgses filtreerimata valimis¹ on kokku 206 226 täheobjekti. Sellest eemaldame tähed, millel ei ole mõõdetud radiaalkiirust. See on oluline etapp, sest ilma radiaalkiirusteta ei ole võimalik tuletada tähtede 3D kiiruseid, mis on vajalikud hilisemaks analüüsiks. Samuti sorteerime välja tähed, millel pole mõõdetud magneesiumi ja raua arvsuhet $[Mg/Fe]$ ja/või metallilisust $[M/H]$, sest just neid parameetreid kasutame bimodaalsuse tuvastamiseks ja ketta komponentide määramiseks.

Järgmisena rakendame GSP-Phot (ehk Üldise Fotomeetria Täheparameetrite Määraja) mooduli pinnagravitatsiooni parameetri tingimust [58, 59]: $1 < \log g_{\text{gspphot}} < 3.5$, et selekteerida valimist punased hiidud. Viimaste puhul on tegemist peajada järgsete tähtedega (ingl *post-main sequence stars*), mis on ammendanud vesiniku varud oma tuumas. Vesinikkütuse lõppemisel tuumade ühinemise kiirus langeb, tähe tuum tõmbub kokku ning vesiniku põlemine jätkub vaid tuuma pealiskihis. Sellise protsessi tulemusena tähe välimised kihid paisuvad ja jahtuvad, muutes tähe oluliselt suuremaks ja punasemaks, moodustades punase hiidu. [60]

Galaktika ketta kaardistamisel on punastel hiidudel mitmeid soodsaid omadusi. Hilises evolutsioonietapis saavutavad hiidud kõik sarnase heleduse ning on üldiselt väga heledad. See tähendab, et neid on võimalik tuvastada ka Galaktika kaugetes piirkondades. Seetõttu käituvad nad kui standardsed küünlad kinemaatilisteks uuringuteks. [60]

Peale esialgsete andmefiltrite rakendamist jääb meie andmestikku 82 074 tähte. Järgnevalt teeme ka galaktotsentrilistes koordinaatides täiendavaid lõikeid. Seda kirjeldame juba järgnevas alapeatükis 4.4.

¹Algne valim on pärit artiklist Fernández-Alvar jt [57], kus kirjeldatakse ka täpsemalt valimi selekteerimist.

4.2 Andmete teisendamine

Andmete teisendamine on oluline samm järgneva andmeanalüüsi lihtsustamiseks. Selle protsessi eesmärk on teisendada andmekogumi sisu ühest vormingust või struktuurist teise, ilma selle sisu muutmata [61]. Koordinaatide ja kiiruste teisendamiseks ühest taustsüsteemist teise on aga vaja teada iga tähe 6D parameetreid (vt ptk 3.1.2). Kuigi Gaia andmed sisaldavad mõõdetud parallaksi, siis käesolevas töös kasutame analüüsiks hoopis GSP-Phot kauguseid. Viimased on üldiselt vähem müra, eriti suurte kauguste puhul, kuna nende arvutamisel kasutatakse lähenemisviisi, mis hõlmab nii fotomeetrilist, spektroskoopilist kui ka eelnevat tähtede ruumilise jaotuse teavet [62].

Gaia vaatlusandmed on ICRS taustsüsteemis (vt selgituseks ptk 3.1.2). Galaktika ketta kiirusvälja ja keemilise jaotuse hõlpsamaks iseloomustamiseks on vajalik koordinaatide teisendamine galaktotsentrilisse taustsüsteemi, kus koordinaatteljestiku keskpunkt on Galaktika tsepter. Taustsüsteemi muutmiseks on kasutatud `gaia-tools` tarkvarateeki, mis võimaldab Gaia andmete teisendamist esialgselt ICRS-ist galaktotsentrilisteks ristkoordinaatideks ja silindrilisteks koordinaatideks [63].

Galaktiliste parameetrite valik on kriitilise tähtsusega galaktotsentrilise teisenduse juures. Andmete teisenduseks kasutame järgnevaid parameetreid: Päikese kaugus Galaktika tsepterist $R_0 = 8.277$ kpc [64], Päikese kõrgus galaktilisest tasandist $z_0 = 25$ pc [65] ja Päikese kiirusvektor vastavalt x-, y-, z-suunal ehk Galaktika keskme suunal, pöörlemise suunal ja ketta vertikaalkomponendi suunal:

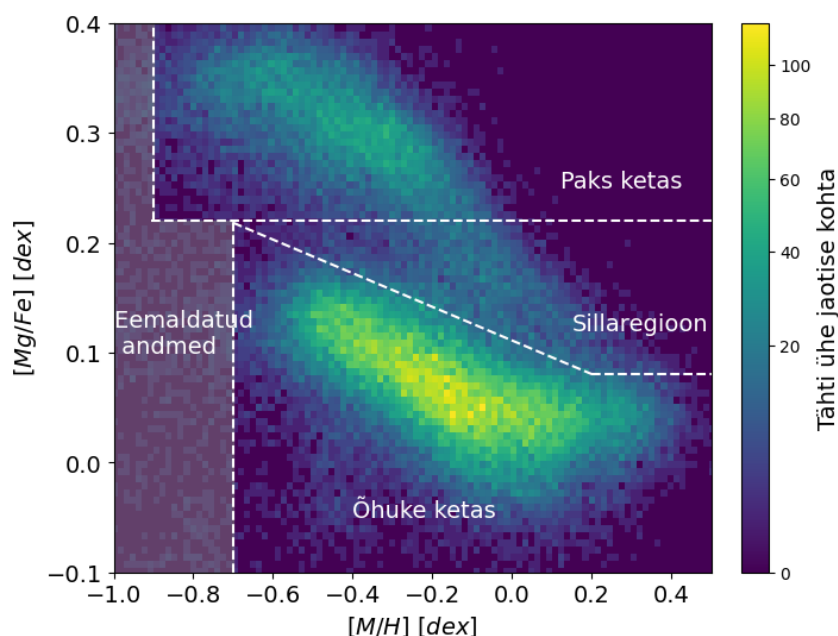
$$v_{Sun} = \begin{bmatrix} 11.1 \\ 251.5 \\ 8.59 \end{bmatrix} \text{ km/s} \quad (4.1)$$

Vektori x-komponent on võetud artiklist Schönrich jt [66] ning y-, z-komponendid on tuletatud Sagittarius A* ülimateerilise musta augu omaliikumise [67].

Eelnevat kirjeldatud koordinaatide teisenduse tulemuseks saame galaktotsentrilised tähekoordinaadid (x, y, z) ja kiirused (v_x, v_y, v_z). Lisaks ristkoordinaadistikule saame valimit kirjeldada ka silindrilistes koordinaatides, kus tähe positsioon on määratud galaktika keskme kauguse R, pöörlemisnurga φ ja galaktilise ketta vertikaalsuunalise kauguse z abil.

4.3 Bimodaalsusest tulenev ketta jaotus

Tähepopulatsioonide keemilise koostise uurimisel on tavaks kujutada ühel diagrammil alfa-elementide ja rauasisaldust. Antud töös aga kasutame $[\alpha/Fe]$ asemel parameetrit $[Mg/Fe]$, tuginedes teadmisele, et magneesium on üks olulisemaid alfa-elemente varajaste Galaktika arenguetappide jälgimiseks. Samuti on Mg valdavalt ainult tüüp II supernoovade² produkt, mis omakorda tähendab, et $[Mg/Fe]$ parameetri kasutamine on kindlam viis uurida kunagiseid aktiivseid tähetekke perioode. [6] Ühtlasi on kasutatud tüüpilise $[Fe/H]$ asemel $[M/H]$ parameetrit. Kuna need parameetrid on üksteisega väga sarnased, eeldame $[Fe/H]$ ja $[M/H]$ vahel üks-ühele samasuse [69]. Need asendused on rakendatud selleks, et saada selgem vaade ketta tähtede bimodaalsusest.



Joonis 11. Galaktilise ketta komponentide jagunemine $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ alusel ning valimist eemaldatud tähed. Ühik [dex] tähendab kümnendeksponenti

Käesoleva töö valimi keemiline koostis on kujutatud Joonisel 11, mis võrdleb tähtede $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ jaotust. Galaktika ketta bimodaalsus on silmaga selgelt nähtav ning kahe komponendi vahel on märgata ka ülemineku ehk sillaregiooni. Seega, jaotame ketta eelneva alusel kolmeks komponendiks: paks ketas, sillaregioon ja õhuke ketas. Jaotuste inspiratsiooniks oli Ciuca jt [7] artikkel, kuid erinevalt artiklist kasutasime hoopis eelmainitud $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ parameetreid. Sellest tulenevalt nihutasime silma järgi ka ketta komponente eraldavaid regioone.

²Tüüp II supernoova on piisavalt suure tähetuuma kokkukukkumisele järgnev plahvatus, mida iseloomustavad vesinikjooned spektris [68].

Paks ketas, sillaregioon ja õhuke ketas on valitud vastavalt vahemikes:

$$\text{Paks ketas: } [M/H] > -0.9, [Mg/Fe] > 0.22 \quad (4.2)$$

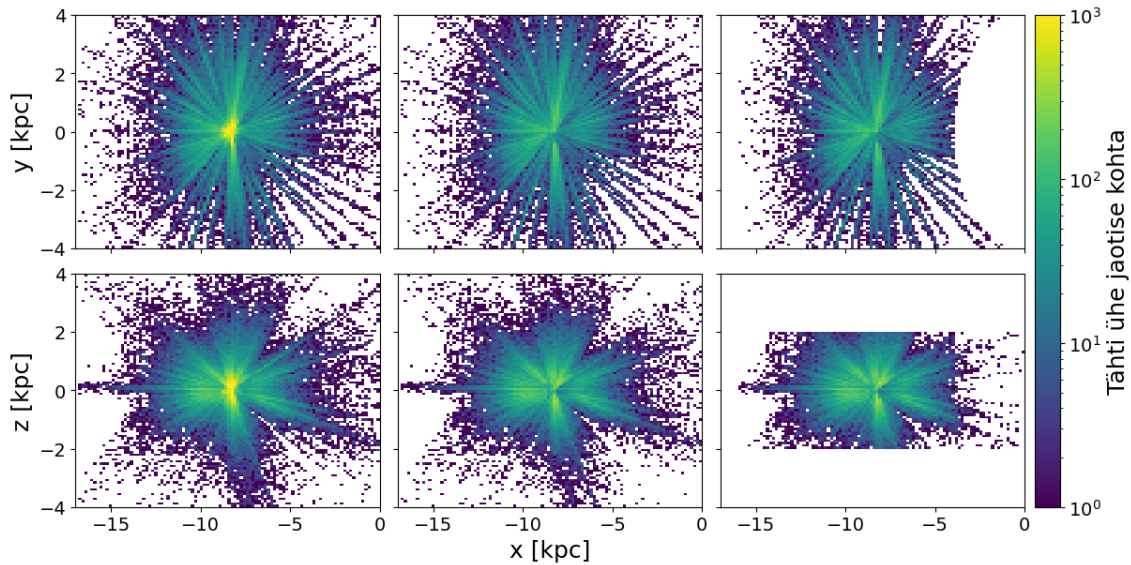
$$\text{Sillaregioon: } 0.08 < [Mg/Fe] < 0.22, [Mg/Fe] > -0.153 \cdot [M/H] + 0.111 \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Õhuke ketas: } & 1) \text{ kui } -0.7 < [M/H] < 0.2, \text{ siis } [Mg/Fe] < -0.153 \cdot [M/H] + 0.111 \\ & 2) \text{ kui } [M/H] \geq 0.2, \text{ siis } [Mg/Fe] < 0.08 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Jaotuste tulemusel on paksu ketta tähti 17 929, sillaregiooni tähti 6307 ja õhukese ketta tähti 53 951.

4.4 Kinemaatilised ja geomeetrilised lõiked

Antud töö eesmärk on karakteriseerida vaid Linnutee kettasse kuuluvaid tähti. Selle teostamiseks rakendame järgmised andmelõiked. Esiteks, võtame valimist välja tähed, mis pöörlevad vastassuunas enamik tähtedele ehk $v_\varphi > 0$. See samm on vajalik, kuna sellised kõrvalekalded enamiku väärtustest häirivad tulemuste täpsust ning eeldatavalt ei kuulu üldse ketta tähtede hulka.

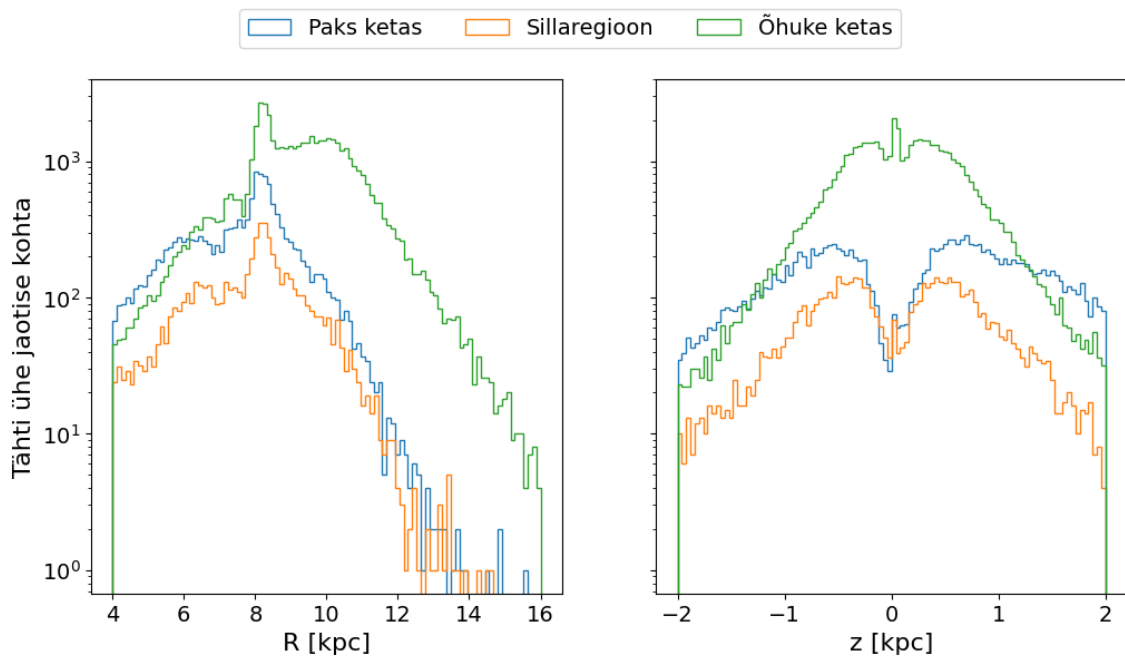


Joonis 12. Valimi puhastamise etapid, vastavalt üleval x-y ja all x-z teljestikus. Värviriba näitab mitu tähte jaotisse kuulub

Seejärel selekteerime tähed, mis asuvad galaktotsentrilises kaugusvahemikus $4 \text{ kpc} < R < 16 \text{ kpc}$, ja ei ulatu Galaktika ketta tasandist kaugemale kui $|z| < 2 \text{ kpc}$ (vt Joonis 12). Viimane täpsustus on oluline, et z-suunal kindlalt valida just ketta komponendid,

mitte näiteks halo tähed. Vaadates näiteks Yoachim jt [70] artiklit, on seal välja toodud õhukese ja paksu ketta paksused vastavalt ligikaudu 610 pc ja 1400 pc. Seega, ka artiklis käsitletavaid paksuseid arvesse võttes, näeme, et käesolevas töös valitud z-kõrgusvahemik on piisavalt laia ulatusega, et hõlmata kõikide kettakomponentide tähti. Galaktotsentriline kaugus R on valitud vahemikus 4 kuni 16 kpc, kuna selle ülemisest piirist kaugemal jääks valimisse liiga vähe täheobjekte, mille tõttu oleks tulemused ebausaldusväärsed. Galaktika keskmele lähemal kui 4 kpc mõjutab kinemaatikat galaktiline varb.

Joonisel 12 on kujutatud andmete puhastamise etapid. See aitab visuaalselt paremini mõista teatud lõigete mõju valimile. Vasakpoolsed joonised näitavad valimit peale radiaalkiiruste, $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ puuduvate väärtustega tähtede eemaldamist. Keskmised joonised näitavad valimit peale punaste hiidude selekteerimist. Parempoolsed joonised illustreerivad valimit peale $v_\varphi > 0$ ning $4 \text{ kpc} < R < 16 \text{ kpc}$ ja $|z| < 2 \text{ kpc}$ lõigete rakendamist. Geomeetriliste ja kinemaatiliste lõigete rakendamise järel jääb galaktotsentrilisse valimisse 14 595 paksu ketta tähte, 5900 sillaregiooni tähte ja 52 072 õhukese ketta tähte, kokku 72 567 täheobjekti.



Joonis 13. Kolme komponendi tähtede jaotus vastavalt vasakul galaktilise tsentri suhtes ja paremal galaktika ketta vertikaalkomponedi suhtes

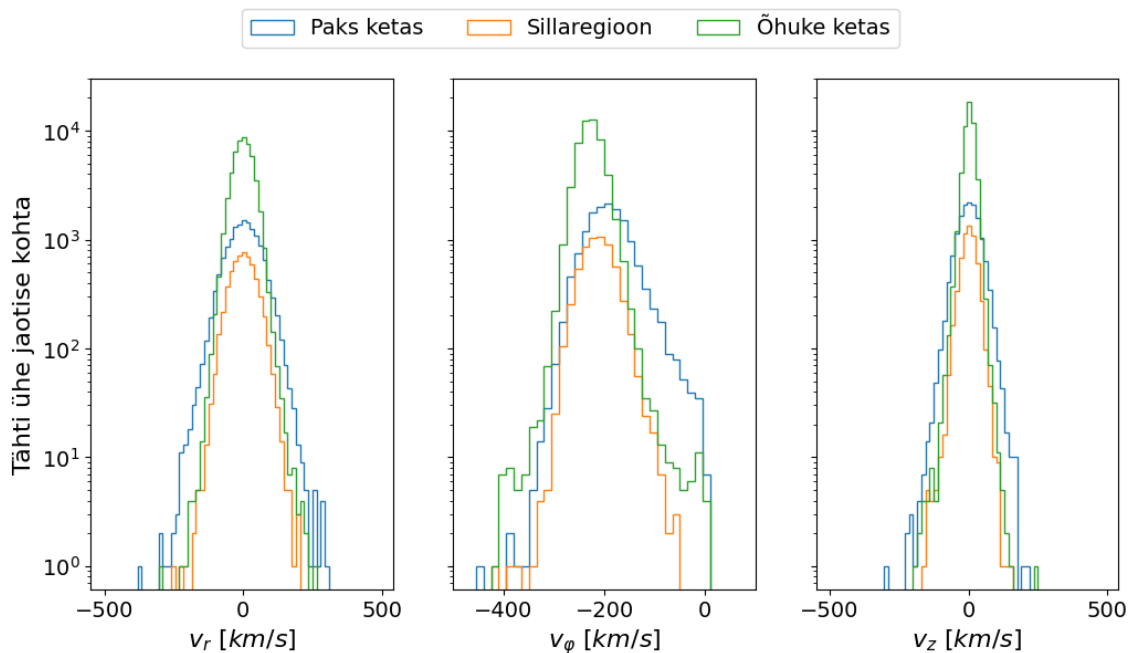
Lisaks, kujutame Joonisel 13 erikomponentide tähtede jaotust vastavalt galaktotsentrilisele kaugus- ja vertikaalkoordinaadile. Illustreeritud jaotused aitavad paremini visualiseerida ja mõista iga kettakomponendi tähtede paiknemist Galaktikas.

5. Tulemused ja arutelu

Eelnevalt jagasime Galaktika ketta keemilise koostise alusel kolmeks komponendiks: paks ketas, sillaregioon ja õhuke ketas. Lisaks transformeerisime andmed ICRS koordinaatsüsteemist galaktotsentrilisteks Decartes' i ja silindrilisteks koordinaatideks ning rakendasime valimile täiendavad lõiked andmeanalüüsi lihtsustamiseks ja täpsemate tulemuste saavutamiseks.

5.1 Ketta kinemaatika

Galaktika ketta kolme komponendi kinemaatilisi erinevusi saame uurida võrreldes nende kiirusjaotusi. Selleks saame moodustada 1D kiirusjaotuste histogrammid.



Joonis 14. Paksu ja õhukese ketta ning sillaregiooni tähtede kiiruste jaotused. Vasakult paremale on kujutatud vastavalt radiaalkiiruse, pöörlemiskiiruse ja vertikaalkiiruse histogrammid

Joonisel 14 on näha kolme kettakomponendi tähtede kiiruste jaotused. Pöörlemiskiiruse positiivsed väärtused on töös rakendatud lõigetega eemaldatud. Eelneva eesmärk oli saada puhtam valim, eemaldades tähed, mis pöörlevad Galaktika kettale vastassuunas. Kiiruste mediaanide ja dispersioonide arvutamiseks on kasutatud Numpy¹ teeki ja vastavalt selles sisalduvaid funktsioone `np.median()` ja `np.std()`. Saadud väärtused on toodud

¹Numpy on Pythoni teadusliku andmetöötamise põhipakett [71].

Tabelis 1, koos teiste sarnaste artiklite tulemustega. Ootuspäraselt on keskmised radiaal- ja vertikaalkiiruste väärtused nullilähedased, mis kinnitab, et ketta tähed liiguvad ringsetel orbiitidel ümber Galaktika keskmeks.

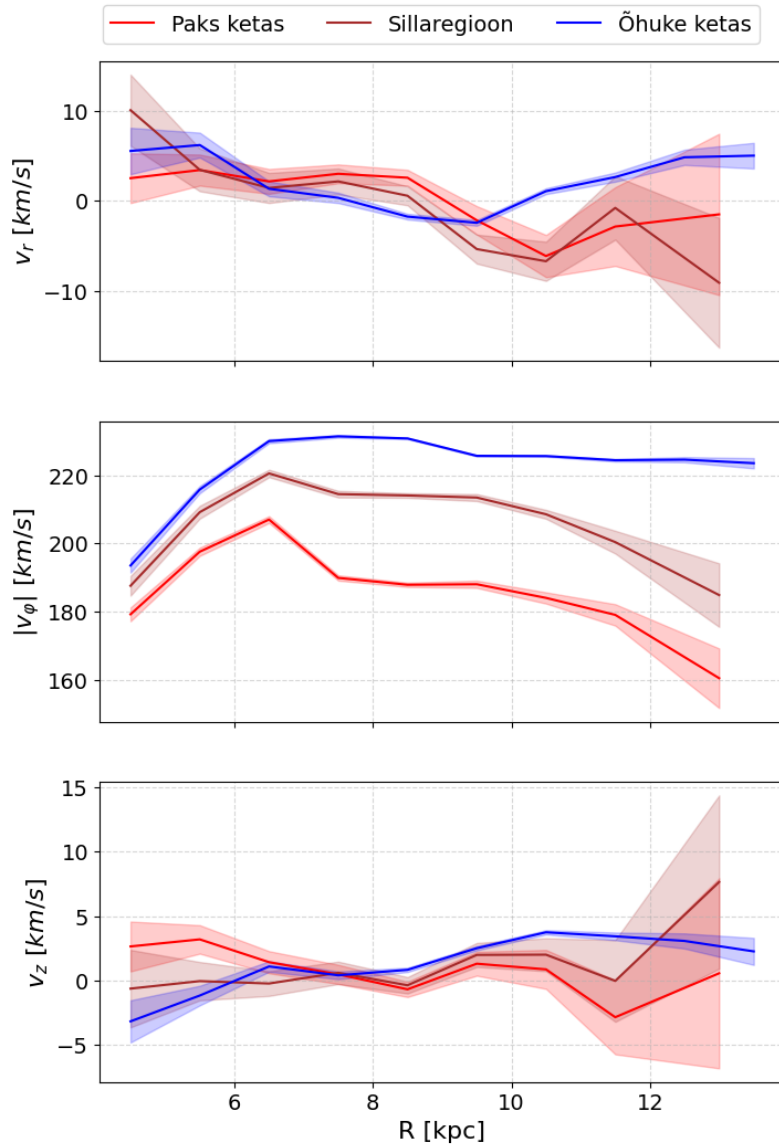
Tabel 1. Ketta komponentide kinemaatiliste omaduste tabel

Allikas	Komponent	v_r [km/s]	σ_r [km/s]	v_φ [km/s]	σ_φ [km/s]	v_z [km/s]	σ_z [km/s]
Käesolev lõputöö	Paks ketas	2.08	62.54	-194.05	45.85	1.08	41.61
	Sillaregioon	0.36	47.71	-212.90	32.97	0.71	29.29
	Õhuke ketas	-0.07	36.96	-227.18	26.14	2.53	19.96
Anguiano et al.	Paks ketas	-	64.68	191.82	50.82	-	43.60
	Õhuke ketas	-	37.61	229.43	25.01	-	18.53
Vieira et al.	Paks ketas	1	49	-225	35	0	22
	Õhuke ketas	-1	31	-239	20	0	11

Võrreldes meie saadud tulemusi Anguiano jt [72] artikli omadega, näeme, et need on kooskõlalised (vt ka Joonis 2 artiklis [72]). Kasutatud on sarnast meetodikat ehk keemilise koostise alusel valitud ketta populatsioonide kiiruste karakteriseerimine. Analoogiliselt antud lõputööle on ka eelnimetatud artiklis valitud bimodaalsuse tuvastamiseks ja alfa-elementide mõõdikuks $[Mg/Fe]$ parameeter. Taoline valik julgustab valimi analüüsi tulemuste üks-ühele võrdlemist. See-eest on mainitud artiklis kasutatud mõnevõrra erinevaid andmelõikeid ($5 < R < 12 \text{ kpc}$, $-1.5 < z < 2.5 \text{ kpc}$) ning Galaktilisi ja Päikese parameetreid (R_0, z_0, v_{Sun}) (antud töös kasutatud parameetrid on kirjeldatud peatükis 4.2), mis võivad selgitada väikseid varieeruvusi.

Vieira jt [73] artikli tulemusi vaadates on märgata, et erinevus meie tulemustega on suurem. See tuleneb tõenäoliselt sellest, et artiklis kasutatud valim hõlmab endas väiksemat piirkonda Päikese vahetus läheduses (1 kpc raadius Päikesest, $|z| \leq 0.5 \text{ kpc}$). Kasutatud on teistsuguseid Päikese asukohta (R_0, z_0) ja kiirusvektorit (v_{Sun}) iseloomustavaid väärtuseid. Samuti kasutatakse artiklis kinemaatilisel defineeritud paksu ja õhukest kettast, mitte keemilise koostise alusel iseloomustatud komponente nagu käesolevas töös. See-eest saame ikkagi öelda, et tulemused on kvalitatiivsete sarnasustega. Näiteks on näha, et paks ketas pöörleb mõlemal juhul aeglasemalt ja on suuremate kiiruste dispersioonidega kui õhuke ketas.

Nii Anguiano jt [72] kui ka Vieira jt [73] artikli puhul tuleneb pöörlemiskiiruste mediaanide märgi vahe, võrreldes käesoleva tööga, nende koordinaatsüsteemide käelisuse erinevusest (parema- või vasakukäeline koordinaatsüsteem). Samuti märkame, et kummaski artiklis pole arvesse võetud ülemineku ehk sillaregiooni. Põhjuseks on arvatavasti see, et arusaam on aja jooksul muutunud. Kuna Gaia andmed on andnud meile järjest rohkem ja täpsemaid andmeid, on hakatud hilisemalt käsitlema ka kahe ketta vahelist komponenti. Varem liigitati sellise ülemineku regiooni tähed enamasti lihtsalt paksu ketta tähtede alla, kuni Ciuca jt [7] artikkel sillaregiooni mõistet uuesti tutvustas.



Joonis 15. Ketta komponentide kiiruste jaotus vastavalt galaktotsentrilisele kaugusele. Ülevalt esimene joonis näitab radiaalkiiruste jaotust, teine pöörlemiskiiruste absoluutväärtuste jaotust ja kolmas vertikaalkiiruste jaotust

Joonis 15 illustreerib tähtede kiirusjaotust Linnutee galaktika kettas vastavalt nende kaugusele galaktilisest keskmest. Näeme, et radiaal- ja vertikaalkiirused püsivad kauguse suurenedes enam-vähem nullilähedased. Üldjoontes on iga komponendi puhul näha, et mida kaugemale Galaktika keskmest minna, seda suurem on kiiruste dispersioon. Nimetatud efekt on eriti tugev alates 12 kpc, kus see avaldub selgelt nii paksu ketta kui ka sillaregiooni profiilis. Tõenäoliselt on eelnev tingitud sellest, et viimases jaotises on vähem tähti kui teistes. Paneme aga tähele, et radiaal- ja vertikaalkiiruste puhul on ka Galaktika keskmel lähedal suuremad dispersioonid. Nende põhjuseks on eeldatavalt varbi gravitatsiooniline häiritus.

Pöörlemiskiiruste profile vaadates näeme, et õhukese ketta pöörlemiskõver püsib teiste

komponentidega võrreldes laugem. Pöörlemiskõver iseloomustab tegelikult ka tähepopulatsioonide vanust. Üle pika perioodi toimunud mitmete teiste tähtede gravitatsiooniliste häirituste tagajärjel kaotab tähepopulatsioon järjest oma pöörlemiskiirust - protsess, mida kutsutakse asümmeetriliseks triiviks (ingl *asymmetric drift*) [74, 75]. Näeme Jooniselt 15, et õhukese ketta tähed pöörlevad kiiremini kui sillaregiooni tähed, mis omakorda pöörlevad kiiremini kui paksu ketta tähed. Seda on näha ka Tabeli 1 väärtustest. Samuti on see kooskõlaline varasemate uuringutega, näiteks Helmi jt [13]. Niisiis, võime sellest järeldada, et õhukese ketta tähed on nooremad kui sillaregiooni tähed, mis on omakorda nooremad kui paksu ketta tähed. Eelnevalt on seda nenditud ka Ciuca jt [7] artiklis ning seda illustreerib samuti käesoleva töö Joonis 3 (ptk 2.4).

Kokkuvõttes eristub kinemaatiliste omaduste põhjal paks ketas õhukesest aeglasemate tähtede pöörlemiskiiruste ($\sim 30 - 50$ km/s [13]) ja suuremate kiiruse dispersioonide poolest. Jooniste 14, 15 ja Tabeli 1 alusel saame väita, et paksu ketta kiiruste dispersioonid on suuremad kui sillaregiooni omad, mis omakorda on suuremad kui õhukese ketta dispersioonid:

$$\sigma_{\text{paks ketas}} > \sigma_{\text{sillaregioon}} > \sigma_{\text{õhuke ketas}} \quad (5.1)$$

Samuti saame öelda, et pöörlemiskiirus väheneb vastavavalt järjestusele:

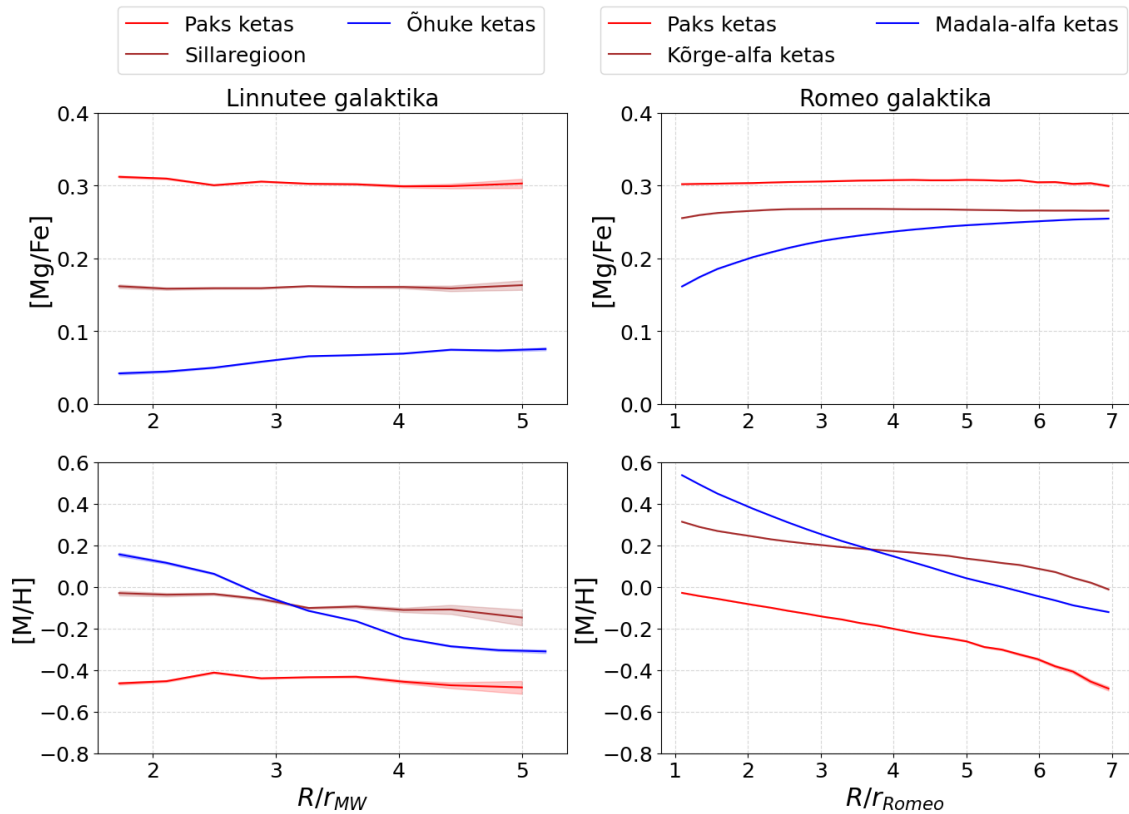
$$v_{\varphi_{\text{paks ketas}}} < v_{\varphi_{\text{sillaregioon}}} < v_{\varphi_{\text{õhuke ketas}}} \quad (5.2)$$

5.2 Ketta keemiline struktuur

Ketta komponentide keemilise koostise uurimiseks kasutame APOGEE DR17-st võetud tähepopulatsioonide $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ parameetreid. Nende abil moodustame graafikud, kust saame näha nii paksu kui õhukese ketta ja sillaregiooni alfa-elementide, täpsemalt magneesiumi ja metallide sisaldust.

Järgnevates joonistes kasutame ka simuleeritud Romeo galaktika andmeid (vt ka ptk 3.3). Romeo galaktika on simuleeritud kosmoloogilises kontekstis, kus ta asub Linnutee galaktikaga sarnases keskkonnas. Sealhulgas on Romeo galaktikal sarnaselt Linnutee galaktikale kolm kettafaasi. Eelnevat arvesse võttes ja komponentide üks-ühele võrdelisust eeldades, saame võrrelda nii vaadeldud Linnutee galaktika kui ka simuleeritud Romeo galaktika sarnasusi ja erinevusi. Lisaks mõlema galaktika paksule kettale, eeldame vastavuse ka simuleeritud galaktika kõrge-alfa ketta ja Linnutee galaktika sillaregiooni vahel. Samamoodi võtame vastavalt madala-alfa ketta võrdeliseks õhukese kettaga.

Joonisel 16 on kujutatud Linnutee ja võrdluseks ka simuleeritud Romeo galaktika $[Mg/Fe]$



Joonis 16. Linnutee galaktika ja simuleeritud Romeo galaktika $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ rohkuse varieeruvus erinevates ketta komponentides vastavalt galaktotsentrilisele kaugusele, mis on jagatud vastava galaktika skaala pikkusega

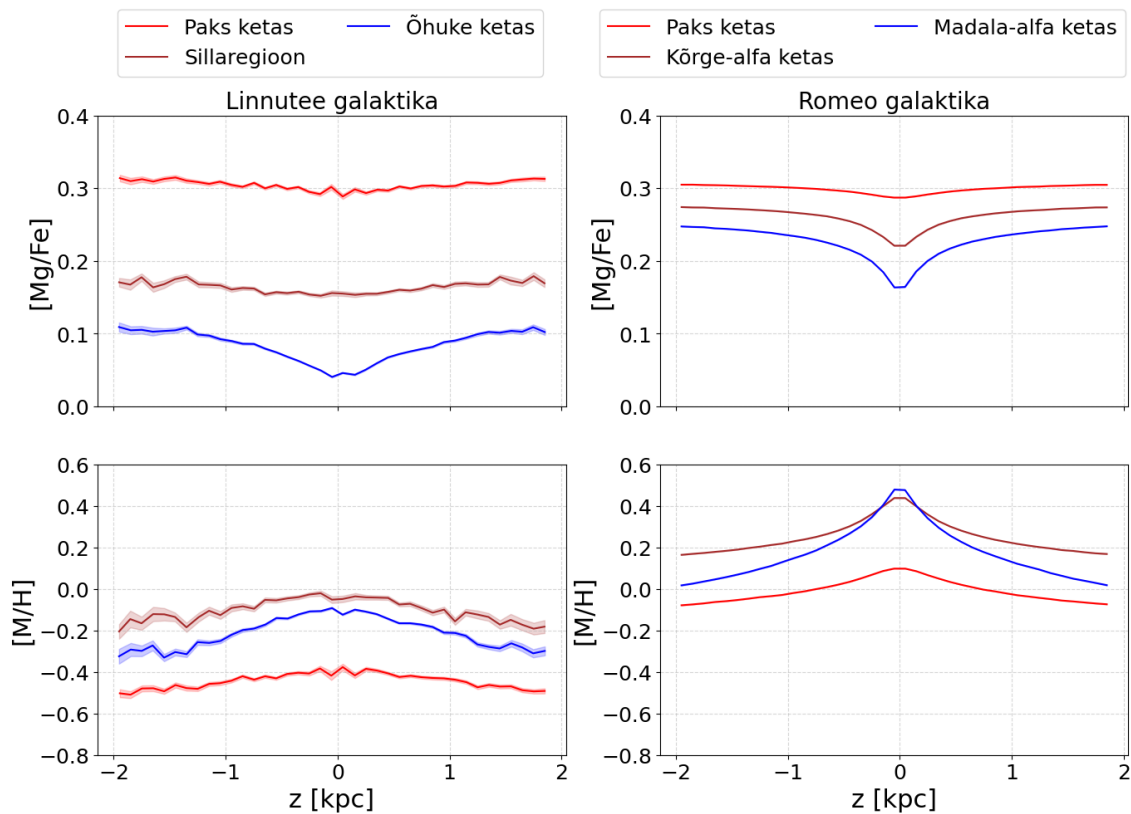
ja $[M/H]$ graafikud vastavalt galaktotsentrilisele kaugusele, mis on jagatud vastava galaktika skaala pikkusega. Skaala pikkus kirjeldab galaktika massijaotust ehk tähtede jaotust kettas [76]. Kuna galaktikad on kõik erineva suurusega, siis kasutame skaala pikkuseid galaktikate paremaks omavaheliseks võrdluseks. Linnutee ja Romeo galaktika skaala pikkusteks oleme võtnud vastavalt $r_{MW} = 2.6$ kpc ja $r_{Romeo} = 4.1$ kpc [Benito jt ettevalmistamisel].

Kahe galaktika võrdluses saame täheldada, et Linnutee ja Romeo ketta komponentide, nii $[Mg/Fe]$ kui ka $[M/H]$ graafikud järgivad ühtset trendi. $[Mg/Fe]$ jooniselt on mõlema galaktika puhul selgelt eristatav kettakomponentide järjestus ülevalt alla ehk $[Mg/Fe]$ kahanevas suunas: paks ketas, sillaregioon ja õhuke ketas. Näeme, et nii Linnutee galaktika kui ka simuleeritud galaktika paksu ketta profiilid on väga sarnased. Teisi komponente üksteisega võrreldes, saame tõdeda, et Galaktika sillaregiooni ja õhukese ketta $[Mg/Fe]$ küllus on oluliselt madalam kui Romeo galaktika kõrge- ja madala-alfa kettal. Samuti on Galaktika õhukese ketta ja Romeo galaktika madala-alfa ketta profiilides märgata kasvavat $[Mg/Fe]$ trendi galaktotsentrilise kauguse suurenemisega.

Vaadates nüüd $[M/H]$ graafikuid, näeme üldjoontes, et Romeo galaktika komponentide

metallilisus on kõrgem võrreldes Linnutee galaktika komponentide omadega. Mõlema galaktika puhul on ilmselge, et vähima metallilisusega komponent on paks ketas. Huvitav nähtus on aga Galaktika puhul õhukese ketta ja sillaregiooni, simuleeritud galaktika korral madala-alfa ja kõrge-alfa ketta metallilisuse profiilide ristumine. Teisisõnu on õhuke ketas ja sellega võrdeliseks võetud madala-alfa ketas algul suurema metallilisusega kui vastavalt sillaregioon ja kõrge-alfa ketas, peale komponentide ristumist aga madalamate $[M/H]$ väärtustega. Olukorra teeb veel huvitavamaks see, et nimetatud komponentide ristumiskoht asub mõlema galaktika puhul 3-4 raadiuse vahel.

Võrreldes Joonisel 16 Romeo galaktika $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ profiile ka Benito jt [Benito jt ettevalmistamisel] artikli Joonisega 7, näeme sarnaseid trende, mis toetavad antud töö tulemuste kvaliteeti.



Joonis 17. Linnutee galaktika ja simuleeritud Romeo galaktika $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ varieeruvus erinevates ketta komponentides galaktika vertikaalkomponendi suhtes

Joonisel 17 on samuti illustreeritud Linnutee galaktika ja simuleeritud Romeo galaktika $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ graafikud, kuid seekord vastavalt galaktotsentrilisele vertikaalkoordinaadile. Vaadates mõlema galaktika $[Mg/Fe]$ graafikuid, saame analoogselt eelmisele joonisele öelda, et ketta komponentide järjestus on vastavalt $[Mg/Fe]$ kahanemise suunale sama: paks ketas, sillaregioon ja õhuke ketas. Niisamuti on mõlema galaktika paksu ketta profiilid väga sarnased ning Galaktika sillaregiooni ja õhukese ketta $[Mg/Fe]$ väärtused madalamad kui Romeo galaktika kõrge- ja madala-alfa ketta $[Mg/Fe]$ väärtused. See-eest

on nendele joonistele isepärane nähtav $[Mg/Fe]$ väärtuste langus $z = 0$ läheduses. Seda on eriti hästi märgata simuleeritud galaktika profiilides.

Võrreldes ülemisi $[Mg/Fe]$ graafikuid alumiste $[M/H]$ joonistega, näeme, et komponentide järjestus on teistsugune. Suurima $[M/H]$ väärtusega komponent on Linnutee galaktika puhul hoopiski sillaregioon, Romeo galaktikal enamasti kõrge-alfa ketas, va $z = 0$ vahetus läheduses. Nendele järgneb vastavalt õhuke ketas ja madala-alfa ketas. Madalaima metallilisusega on mõlema galaktika paks ketas. Iga komponendi puhul on märgata $[M/H]$ väärtuste tõusu vertikaalkoordinaadi nullpunkti lähedal, ehkki Linnutee galaktika profiilide puhul vähem kui simuleeritud galaktikal. Romeo galaktika metallilisuse graafiku z -nullpunkti lähedal on eriti huviäratav õhukese ketta ja sillaregiooni hetkeline $[M/H]$ väärtuste vahetumine.

Seda, et Romeo galaktika metallilisus on kõrgem kui Linnutee galaktikal, saame näha ka Benito jt [Benito jt ettevalmistamisel] artikli Joonisel 2. Galaktilisest arheoloogiast lähtuvalt (ptk 1), saame eeldada, et mida noorem on Universum, seda metallivaesem on üldiselt ka tähtede ja galaktikate moodustumise keskkond. Seega saame Linnutee galaktika ketta madalamat metallilisust kirjeldada asjaoluga, et see on moodustunud varem kui arvatakse olevat moodustunud Romeo galaktika ketas.

Selgitame ka jooniste $[M/H]$ graafikute teisi huvitavaid tähelepanekuid. Nagu varasemaltki kirjeldatud, näeme Joonisel 16 Linnutee ja Romeo galaktikate $[M/H]$ graafikutelt vastavalt sillaregiooni ja õhukese ketta ning kõrge- ja madala-alfa ketta komponentide ristumist. Joonisel 17 aga Galaktika sillaregiooni ja enamjaolt ka simuleeritud galaktika kõrge-alfa ketta suuremat metallilisust võrreldes galaktikate teiste komponentidega. Üks võimalus nende nähtuste kirjeldamiseks on näiteks artiklis Benito jt [Benito jt ettevalmistamisel] uuritud radiaalsed gaasivood. Artiklis leiame, et vertikaalsed gaasivood toimuvad hilisematel aegadel järjest suurematel galaktotsentrilistel kaugustel, mis viitab seest-välja moodustumise stsenaariumile. Vertikaalselt galaktikasse langenud gaasil on väiksem impulsimoment kui kettas oleval gaasil. Selle tõttu toimub metallivaese gaasi radiaalne sissevool ehk gaas liigub galaktika ketta välimistest osadest sisemistesse, vähendades seejuures üldist metallilisust. Lisaks saime teada, et vertikaalselt kogunev gaas pärineb gaasirikastest ühinemistest, toetades seega sissevoolu stsenaariumit: Romeo puhul on kolm peamist vertikaalse gaasi kogunemise perioodi (ingl *three-infall model*), kuid Linnutee galaktika ketta puhul arvatakse olevat vaid kaks peamist sissevoolu (ingl *two-infall model*) (vt ptk 2.4). Seega viitavad galaktikate $[M/H]$ joonised sellele, et enne madala-alfa ketta (Linnutee galaktika puhul õhukese ketta) moodustumist pidid toimuma metallivaesed gaasivood, mis vähendasid eelnimetatud galaktika komponendi üldist metallilisust.

Võrreldes keemilisi jooniseid 16, 17 võib näha galaktikate profiilide vahel mitmeid erinevusi. Teame, et Linnutee galaktika joonised põhinevad vaatlemiste käigus kogutud Gaia ja APOGEE andmetel. Romeo galaktika on aga FIRE-2 simulatsiooni abil modelleeritud galaktika. Üks võimalus nende kahe galaktika graafikute vaheliste isepärasuste kirjeldamiseks on asjaolu, et hüdrodünaamilises galaktika simulatsioonis kasutatakse lihtsustatud numbrilisi võtteid, mille tõttu võib tekkida mittefüüsikalisi efekte. Samuti võivad erisused tuleneda ühinemisajaloo erinevusest ning asjaolust, et Romeo galaktikal pole nn varbi, mis Linnutee galaktika puhul põhjustab erinevaid gravitatsioonilisi häiritusi, eelkõige galaktika keskme lähedal.

Üleüldiselt aga on nii Joonisel 16 kui ka Joonisel 17 näha selget korrelatsiooni Linnutee galaktika ja Romeo simulatsioonigalaktika $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ graafikute vahel. Nende sarnaste omaduste põhjal saame öelda, et modernsed galaktikate simulatsioonid on vaatlusandmetega võrreldes märkimisväärselt täpsemaks arenenud. Antud töö Linnutee galaktika uurimuslikke tulemusi on kasutatud ka võrdluseks peagi ilmuvas artiklis Benito jt [Benito jt ettevalmistamisel], kus kirjeldame keemilist bimodaalsust Romeo galaktikas radiaalsete gaasivoogude abil. Sellest järeldame, et Romeo ketas on kujunenud seest-välja viisil. Käesoleva töö Linnutee galaktika ja Romeo galaktika ketta võrdluse tulemused viitavad sellele, et ka meie Galaktika on kujunenud seest-välja (ingl *inside-out*) viisil: metallirikkamad tähed paiknevad pigem sisemises õhukeses kettas ja ketta tasapinna lähedal, samas kui metallivaesemad, suurema $[Mg/Fe]$ väärtustega tähed on tüüpiliselt hajusamas paksus kettas. Simulatsioonide ja vaatlusandmete kooskõla võimaldab paremini mõista, lisaks Linnutee galaktikale, ka üldisemalt spiraalgalaktikate struktuuride moodustumist ja arengut.

Kokkuvõte

Spiraalgalaktikate keemilise bimodaalsuse päritolu ei ole siiani üheselt selge. Käesoleva lõputöö eesmärk oli karakteriseerida Linnutee galaktika ketta tähtede keemilisi ja kinemaatilisi omadusi, et seekaudu uurida Galaktika tekke ja arengu ajalugu. Selleks saame kõrvutada vaadeldud Galaktika andmeid modernsete galaktika tekke simulatsioonidega.

Galaktika ketta tähtede omaduste uurimiseks kasutati antud töös andmeanalüüsi, mis põhineb Gaia DR3 ja APOGEE DR17 kombineeritud andmestikul. Andmeanalüüsi käigus puhastati valimit ja transformeeriti andmed galaktotsentrilisse taustsüsteemi. Lisaks kasutati ka geomeetrilisi ja kinemaatilisi lõiked. Kasutades ära ketta tähtede bimodaalsust 2D tasandil, jaotati ketas keemilise koostise ($[Mg/Fe]$, $[M/H]$ parameetrite) alusel kolmeks: paks ketas, sillaregioon ja õhuke ketas.

Ketta komponentide kiirusjaotustest on näha pöörlemiskiiruse kahanemist vastavalt järjestuses: õhuke ketas, sillaregioon ja paks ketas. Need kinemaatilised tulemused viitavad üheselt teooriale, et nooremad tähed asetsevad õhukeses kettas, vanemad tähed üldiselt paksemas kettas. Sellele viitab ka kiiruste dispersiooni kasv vastavalt järjestusele: õhuke ketas, sillaregioon, paks ketas, mis on kooskõlas ka eelnevate uuringutega.

Keemilise struktuuri uurimiseks on Linnutee galaktikale võrdluseks toodud ka simuleeritud Romeo galaktika. $[Mg/Fe]$ küllastatus on suurim mõlema galaktika paksum kettas ja madalaim vastavalt Galaktika õhukeses ja Romeo galaktika madala-alfa kettas. $[M/H]$ graafikute puhul on märgata, et mõlema galaktika madalaima metallilisusega ketta komponent on paks ketas. Keemiliste omaduste puhul on seega näha selgeid korrelatsioone vaadeldud Linnutee galaktika ja simuleeritud Romeo galaktika $[Mg/Fe]$ ja $[M/H]$ jaotuste vahel. Antud töö tulemusi on kasutatud ka Benito jt artiklis. Võrdlus artiklis kirjeldatud Romeo galaktika ja käesoleva lõputöö Linnutee galaktika vahel viitab Galaktika seest-välja kujunemisviisile.

Tulevikus saaks käesolevat uurimust edasi arendada. Näiteks, kasutati antud töös tähtede kauguste iseloomustamiseks vaid üht-tüüpi kaugushinnangut (GSP-Phot). Huvitav oleks näha, kuidas tulemused muutuksid, kui kasutada teistsugusel meetodil tuletatud kaugusi, seejuures võttes arvesse ka nende süsteematilisi vigu. Samuti on oodata järgmisi Gaia andmepakette (DR4 ja DR5), mille mahukamad kataloogid aitaks kindlalt kaardistada kettast veel suurema lahutusvõimega.

Annotatsioon

Käesolev bakalaureusetöö uurib Linnutee galaktika ketta tähtede keemilisi ja kinemaatilisi omadusi. Töö eesmärk on keemilise koostise alusel jaotatud kettakomponentide ja nende kiiruste abil iseloomustada Galaktika struktuuri. Seejuures hinnates, kuivõrd hästi ühtivad satelliitmissiooni Gaia ja spektroskoopilise uuringu APOGEE andmetest saadud tulemused galaktikate simulatsioonimudelitega.

Uurimistöö meetodiks on andmeanalüüs, mille käigus võetakse Gaia andmetest ICRS taustsüsteemis olevad tähekoordinaadid ja -kiirused ning transformeeritakse need galaktotsentrilisse koordinaatsüsteemi. Galaktika ketas jaotatakse APOGEE andmetest võetud keemiliste parameetrite jaotuse alusel kolmeks: paks ketas, sillaregioon, õhuke ketas.

Analüüsi tulemused näitavad selget seost Galaktika ketta tähepopulatsioonide kiiruste ja vanuse vahel: õhukeses kettas paiknevad nooremad tähed, paksus kettas enamasti vanemad tähed. Samuti on näha selget korrelatsiooni vaadeldud Linnutee galaktika ja simuleeritud Romeo galaktika keemiliste profiilide vahel. Töö tulemused seega toetavad Galaktika nn seest-välja ja ülevalt-alla kujunemisviisi. Sarnasused galaktikate vahel näitavad, et tänapäevased simulatsioonid võimaldavad üllatavalt realistlikult selgitada galaktikate arengut, võimaldades ka paremat mõistmist nende tekkemehhanismidest.

Abstract

A chemo-kinematic data analysis of the Milky Way disk

This bachelor's thesis studies the chemical and kinematic properties of stars in the disk of the Milky Way. The aim of the thesis is to characterize the structure of the Galaxy using disk components and their velocities, distributed based on chemical composition. In doing so, it assesses how well the results obtained from the Gaia satellite mission and the spectroscopic survey APOGEE data match the simulation models of galaxies.

The research method is data analysis, for which we take the stellar coordinates and velocities in the ICRS background from the Gaia data and transform them into galactocentric coordinates. The disk of the Galaxy is divided into three based on the distribution of chemical abundances taken from the APOGEE data: thick disk, bridge region and thin disk.

The results of the analysis show a clear relationship between the velocities and ages of the stellar populations in the disk of the Galaxy: younger stars are located in the thin disk, older stars mostly in the thick disk. There is also a clear correlation between the chemical profiles of the observed Milky Way and the simulated Romeo galaxy. The results thus support the so-called inside-out and upside-down formation of the Galaxy. The similarities between the galaxies show that modern simulations can explain the evolution of galaxies in a surprisingly realistic way and allow a better understanding of their formation mechanisms.

Kasutatud kirjandus

- [1] Rebecca Forsberg. *Galactic Archaeology*. URL: <https://www.eso.org/public/blog/galactic-archaeology/>.
- [2] Jaan Pelt. *Taevane arheoloogia*. URL: <https://www.sirp.ee/s1-artiklid/c21-teadus/taevane-arheoloogia/>.
- [3] Wikipedia. *[α /Fe] versus [Fe/H] diagram*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/\(\[%CE%B1/Fe\]\)_versus_\(Fe/H\)_diagram?useskin=vector](https://en.wikipedia.org/wiki/([%CE%B1/Fe])_versus_(Fe/H)_diagram?useskin=vector).
- [4] Fiveable. *Alpha-elements*. URL: <https://library.fiveable.me/key-terms/astrophysics-ii/alpha-elements>.
- [5] Wikipedia. *Alpha process*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_process.
- [6] Andrea Gebek ja Jorjyt Matthee. „On the Variation in Stellar α -enhancements of Star-forming Galaxies in the EAGLE Simulation“. *The Astrophysical Journal* 924.2 (jaanuar 2022), lk. 73. DOI: 10.3847/1538-4357/ac350b. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac350b>.
- [7] Ioana Ciucă *et al.* „Unveiling the distinct formation pathways of the inner and outer discs of the Milky Way with Bayesian Machine Learning“. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 503.2 (märts 2021), lk. 2814–2824. ISSN: 1365-2966. DOI: 10.1093/mnras/stab639. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stab639>.
- [8] NASA Space Place. *How Old Are Galaxies*. URL: <https://spaceplace.nasa.gov/galaxies-age/en/>.
- [9] NASA. *The Milky Way Galaxy*. URL: https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/featured_science/milkyway/.
- [10] NASA; Amber Straughn; Dr. Laura A. Whitlock. *StarChild Question of the Month for February 2000*. URL: <https://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/questions/question18.html>.
- [11] Britannica. *The structure and dynamics of the Milky Way Galaxy*. URL: <https://www.britannica.com/place/Milky-Way-Galaxy/The-structure-and-dynamics-of-the-Milky-Way-Galaxy>.
- [12] ESA. *Gaia's Milky Way map*. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/milky-way#>.

- [13] Amina Helmi. „Streams, Substructures, and the Early History of the Milky Way“. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 58.1 (august 2020), lk. 205–256. ISSN: 1545-4282. DOI: 10.1146/annurev-astro-032620-021917. URL: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-032620-021917>.
- [14] ScienceDirect. *Population II stars*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/population-ii-stars>.
- [15] Daisuke Kawata *et al.* *Milky Way Disk*. 2024. arXiv: 2412.12252 [astro-ph.GA]. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.12252>.
- [16] NASA; Dana Bolles. *The Milky Way Galaxy*. URL: <https://science.nasa.gov/resource/the-milky-way-galaxy/>.
- [17] Sofia Feltzing ja Masashi Chiba. „Elemental abundances in the Milky Way stellar disk(s), bulge, and halo“. *New Astronomy Reviews* 57.3 (2013). Galactic Archaeology, lk. 80–99. ISSN: 1387-6473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.newar.2013.06.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387647313000055>.
- [18] NASA; ESA; A.Feild; J.Kalirai. *Stellar Archaeology Traces Milky Way’s History*. URL: <https://hubblesite.org/contents/news-releases/2012/news-2012-25>.
- [19] Joshua E. Barnes. *GALAXIES, DISK, EVOLUTION*. URL: https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay_barnes_disk.html.
- [20] Gerard Gilmore ja Neil Reid. „New light on faint stars – III. Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc“. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 202.4 (aprill 1983), lk. 1025–1047. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/202.4.1025. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/202/4/1025/18194490/mnras202-1025.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/202.4.1025>.
- [21] Lekshmi Thulasidharan *et al.* *The Age-Thickness Relation of the Milky Way Disk: A Tracer of Galactic Merging History*. 2024. arXiv: 2412.12304 [astro-ph.GA]. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.12304>.
- [22] C. Chiappini, Gratton ja R. „The Chemical Evolution of the Galaxy: The Two-Infall Model“. *The Astrophysical Journal* 477.2 (märts 1997), lk. 765. DOI: 10.1086/303726. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/303726>.
- [23] Jonathan C. Bird *et al.* „INSIDE OUT AND UPSIDE DOWN: TRACING THE ASSEMBLY OF A SIMULATED DISK GALAXY USING MONO-AGE STELLAR POPULATIONS“. *The Astrophysical Journal* 773.1 (juuli 2013), lk. 43. DOI: 10.1088/0004-637X/773/1/43. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/773/1/43>.

- [24] NASA; ESA; Andrea Gianopoulos; Dana Bolles. *Why Have a Telescope in Space?* URL: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/overview/why-have-a-telescope-in-space/>.
- [25] ESA. *Gaia overview*. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia_overview.
- [26] Gaia Collaboration *et al.* „The Gaia mission“. *A&A* 595 (2016), A1. DOI: 10.1051/0004-6361/201629272. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272>.
- [27] ESA. *Gaia Data Release 1 (Gaia DR1)*. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr1>.
- [28] ESA. *Gaia Data Release 2 (Gaia DR2)*. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>.
- [29] ESA. *Gaia Data Release 3 (Gaia DR3)*. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>.
- [30] ESA. *gaia: The mission*. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia.
- [31] NASA; Colleen Kaiser; Dana Bolles. *What is a Lagrange Point?* URL: <https://science.nasa.gov/resource/what-is-a-lagrange-point/>.
- [32] ESA. *ESA's Gaia satellite*. URL: <https://sci.esa.int/web/hubble/-/59818-esa-s-gaia-satellite>.
- [33] Gaia Collaboration *et al.* „Gaia Data Release 2 - Summary of the contents and survey properties“. *A&A* 616 (2018), A1. DOI: 10.1051/0004-6361/201833051. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>.
- [34] Wikipedia. *Gaia (spacecraft)*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_(spacecraft)).
- [35] ESA. *What is Astrometry?* URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/astrometry>.
- [36] Tõrva Astronoomiaklubi. *Päikesesüsteemi keskpunkt*. URL: <https://www.astromaania.ee/2020/07/paikesesusteemi-keskpunkt.html>.
- [37] Astronomical Applications Department of the U.S. Naval Observatory. *International Celestial Reference System (ICRS)*. URL: https://aa.usno.navy.mil/faq/ICRS_doc.
- [38] Jim Lucas. *What Is Parallax?* URL: <https://www.space.com/30417-parallax.html>.

- [39] NASA. *June 2019: Distances in space*. URL: <https://www.nasa.gov/space-science-and-astrobiology-at-ames/interesting-fact-of-the-month-current/interesting-fact-of-the-month-2019/>.
- [40] Wikipedia. *Parsek*. URL: <https://et.wikipedia.org/wiki/Parsek>.
- [41] NASA; Amanda Barnett; Dana Bolles. *June 2019: Distances in space*. URL: <https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter2-2/>.
- [42] Bob King. *Right Ascension & Declination: Celestial Coordinates for Beginners*. URL: <https://skyandtelescope.org/astrophysics-resources/right-ascension-declination-celestial-coordinates/>.
- [43] Lennart Lindegren. *GAIA DATA RELEASE DOCUMENTATION: Standard model of stellar motion*. URL: https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/Data_processing/chap_cu3ast/sec_cu3ast_intro/ssec_cu3ast_intro_motion.html.
- [44] Michael Endl ja William D. Cochran. „CHAPTER 47 - Extrasolar Planets“. Teoses: *Encyclopedia of the Solar System (Second Edition)*. Toim. Lucy-Ann McFadden, Paul R. Weissman ja Torrence V. Johnson. Second Edition. San Diego: Academic Press, 2007, lk. 887–902. ISBN: 978-0-12-088589-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012088589-3/50051-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120885893500517>.
- [45] Steven R. Majewski *et al.* „The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)“. *The Astronomical Journal* 154.3 (august 2017), lk. 94. ISSN: 1538-3881. DOI: 10.3847/1538-3881/aa784d. URL: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aa784d>.
- [46] G. Zasowski *et al.* „TARGET SELECTION FOR THE APACHE POINT OBSERVATORY GALACTIC EVOLUTION EXPERIMENT (APOGEE)“. *The Astronomical Journal* 146.4 (august 2013), lk. 81. ISSN: 1538-3881. DOI: 10.1088/0004-6256/146/4/81. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/146/4/81>.
- [47] Wikipedia. *Ongström*. URL: <https://et.wikipedia.org/wiki/Ongstr%C3%B6m>.
- [48] SDSS. *APOGEE: Probing the Evolution of the Milky Way*. URL: <https://www.sdss4.org/surveys/apogee/>.
- [49] SDSS. *APOGEE-2*. URL: <https://www.sdss4.org/surveys/apogee-2/>.

- [50] SDSS. *APOGEE*. URL: <https://www.sdss4.org/dr17/irspec/>.
- [51] Jason A. S. Hunt ja Eugene Vasiliev. *Milky Way dynamics in light of Gaia*. 2025. arXiv: 2501.04075 [astro-ph.GA]. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.04075>.
- [52] Cantat-Gaudin, Tristan *et al.* „Uniting Gaia and APOGEE to unveil the cosmic chemistry of the Milky Way disc“. *A&A* 683 (2024), A128. DOI: 10.1051/0004-6361/202348018. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348018>.
- [53] Swinburne University of Technology. *Baryonic Matter*. URL: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/baryonic+matter>.
- [54] Philip F Hopkins *et al.* „FIRE-2 simulations: physics versus numerics in galaxy formation“. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 480.1 (juuni 2018), lk. 800–863. ISSN: 1365-2966. DOI: 10.1093/mnras/sty1690. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/sty1690>.
- [55] Gaia Collaboration *et al.* „Gaia Data Release 3 - Summary of the content and survey properties“. *A&A* 674 (2023), A1. DOI: 10.1051/0004-6361/202243940. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940>.
- [56] Abdurro'uf *et al.* „The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data“. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 259.2, 35 (aprill 2022), lk. 35. DOI: 10.3847/1538-4365/ac4414. arXiv: 2112.02026 [astro-ph.GA].
- [57] Emma Fernández-Alvar *et al.* „The metal-poor edge of the Milky Way’s “thin disc”“. 685, A151 (mai 2024), A151. DOI: 10.1051/0004-6361/202348918. arXiv: 2402.02943 [astro-ph.GA].
- [58] Max Planck Institute For Astronomy. *GSP-Phot (Generalized Stellar Parametrizer)*. URL: <https://www.mpia.de/gaia/projects/gsp>.
- [59] ESA. *gaia data release 3 documentation: astrophysical_parameters*. URL: https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/Gaia_archive/chap_datamodel/sec_dm_astrophysical_parameter_tables/ssec_dm_astrophysical_parameters.html.
- [60] ESA/Hubble. *Red Giant*. URL: <https://esahubble.org/wordbank/red-giant/>.
- [61] Chiradeep BasuMallick. *What Is Data Transformation? Types, Tools, and Importance*. URL: <https://www.spiceworks.com/tech/big-data/articles/what-is-data-transformation/>.

- [62] R. Drimmel *et al.* „Gaia Data Release 3: Mapping the asymmetric disc of the Milky Way“. *Astronomy & Astrophysics* 674 (juuni 2023), A37. ISSN: 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/202243797. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202243797>.
- [63] Sven Pöder; Maria Benito. *Gaia Tools*. URL: <https://github.com/HEP-KBFI/gaia-tools>.
- [64] GRAVITY Collaboration *et al.* „Mass distribution in the Galactic Center based on interferometric astrometry of multiple stellar orbits“. *A&A* 657 (2022), lk. L12. DOI: 10.1051/0004-6361/202142465. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142465>.
- [65] Mario Jurić *et al.* „The Milky Way Tomography with SDSS. I. Stellar Number Density Distribution“. *The Astrophysical Journal* 673.2 (veebbruar 2008), lk. 864. DOI: 10.1086/523619. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/523619>.
- [66] Ralph Schönrich, James Binney ja Walter Dehnen. „Local kinematics and the local standard of rest“. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403.4 (aprill 2010), lk. 1829–1833. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16253.x. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/403/4/1829/18575828/mnras0403-1829.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16253.x>.
- [67] M. J. Reid ja A. Brunthaler. „The Proper Motion of Sagittarius A*. III. The Case for a Supermassive Black Hole“. *The Astrophysical Journal* 892.1 (märts 2020), lk. 39. DOI: 10.3847/1538-4357/ab76cd. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab76cd>.
- [68] NASA/GSFC; Barbara Mattson; J.D. Mayers; Andy Ptak. *Supernovae*. URL: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/supernovae2.html>.
- [69] SDSS. *APOGEE*. URL: <https://www.sdss4.org/dr17/irspec/parameters/>.
- [70] Peter Yoachim ja Julianne J. Dalcanton. „Structural Parameters of Thin and Thick Disks in Edge-on Disk Galaxies“. *The Astronomical Journal* 131.1 (jaanuar 2006), lk. 226–249. ISSN: 1538-3881. DOI: 10.1086/497970. URL: <http://dx.doi.org/10.1086/497970>.
- [71] Charles R. Harris *et al.* „Array programming with NumPy“. *Nature* 585.7825 (september 2020), lk. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

- [72] Borja Anguiano *et al.* „The Stellar Velocity Distribution Function in the Milky Way Galaxy“. *The Astronomical Journal* 160.1 (juuni 2020), lk. 43. DOI: 10.3847/1538-3881/ab9813. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab9813>.
- [73] Katherine Vieira *et al.* „Milky Way Thin and Thick Disk Kinematics with Gaia EDR3 and RAVE DR5“. *The Astrophysical Journal* 932.1 (juuni 2022), lk. 28. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.3847/1538-4357/ac6b9b. URL: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac6b9b>.
- [74] Pöder, Sven *et al.* „A Bayesian estimation of the Milky Way’s circular velocity curve using Gaia DR3“. *A&A* 676 (2023), A134. DOI: 10.1051/0004-6361/202346474. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346474>.
- [75] Jo Bovy. *Dynamics and Astrophysics of Galaxies: Equilibria of galactic disks*. URL: <https://galaxiesbook.org/chapters/II-04.-Equilibria-Flattened-Collisionless-Systems.html>.
- [76] Kambiz Fathi *et al.* „Scalelength of disc galaxies“. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 406.3 (august 2010), lk. 1595–1608. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16812.x. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/406/3/1595/2992156/mnras0406-1595.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16812.x>.

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks²

Mina, Ele-Liis Evestus

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “Lin-
nutee galaktika ketta keemiline ja kinemaatiline analüüs”, mille juhendajad on
Sven Pöder and María Benito Castaño
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil,
sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna
kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni
autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka
autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

23.05.2025

²Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepää-
supiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus
lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma
ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpi-
lasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt
lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.