



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

Galactic substructures as tracers of dark matter and stellar evolution

Reino, S.

Citation

Reino, S. (2022, September 27). *Galactic substructures as tracers of dark matter and stellar evolution*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3464660>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3464660>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Eestikeelne kokkuvõte

Kaks kõige olulisemat küsimust tänapäeva astronoomias kõlavad nii:

- Mis on tumeaine olemus?
- Kuidas tekivad ja kujunevad galaktikad?

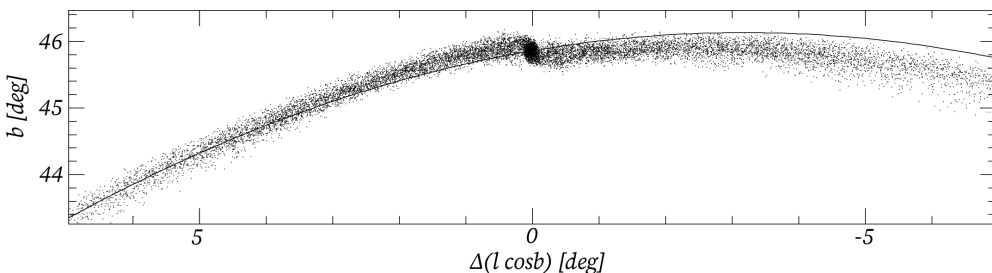
Erinevalt tavalisest ainest ei interakteeru tumeaine valgusega ja on seetõttu meile nähtamatu. Kuigi tumeaine mõjutab teisi aineid gravitatsiooni teel, ning standardse kosmoloogilise mudeli kohaselt on tumeaine avaldanud suurt mõju galaktikate ja Universumi struktuuri kujunemisele, on selle aine olemus endiselt teadmata. Samamoodi on meile müsteeriumiks suur osa protsessidest, mis reguleerivad galaktikate tekkimist ja kujunemist. Kuigi kosmoloogilised simulatsioonid on andnud olulise panuse nii tumeaine kui ka galaktikate tekkeprotsesside mõistmise edendamisse, suudavad teoreetilised mudelid ja simulatsioonid anda olukorrast vaid osalise pildi: vaja on vaatlusandmeid, mis võrdluses erinevate mudelite prognoosidega aitavad meil mõista, millised mudelid on tõelisusega paremini kooskõlas.

Meie enda galaktika, Linnutee, on ideaalne laboratoorium selliste küsimuste lahendamiseks, sest ainult Linnutee pakub meile ainulaadselt üksikasjalikku ülevaadet galaktika sisemusest ja võimalust koguda enneolematu täpsusega vaatlusandmeid. Selliste “kohalike” vaatluste mõju ulatub aga Linnuteest kaugemale ning aitab meil seada piirangud laiemale universumile ja füüsikale tervikuna.

Linnutee kogumass, kuju ja massijaotus on mõned tähtsaimatest omadustest, mis on vajalikud mis tahes mõtestatud võrdluseks teoreetiliste mudelitega. Linnutee, nagu kõik teisedki sarnased galaktikad, ei sisalda mitte ainult tavalist, nähtavat ainet, vaid ka suures koguses tumeainet. Täpsemalt öeldes ümbritseb galaktikate nähtavaid osi tohutu tumeaine halo. Seega tuleb galaktika massist rääkides arvesse võtta ka selle tumeaine hulka. Küsimus seisneb aga selles, kuidas tumeaine jaotust mõõta. Ning vastus on: mõõtes selle gravitatsioonilist mõju nähtavale ainele.

Nende mõõtmiste tegemiseks on paljud teadlased pööranud pilgu tähevoolude poole. Tähevoolud on (enamasti) kitsad ja pikad tähtede joad, mis kulgevad mööda galaktikat peaaegu sama teed järgides. Tähevoolud pärinevad täheparvedest, näiteks kerasparvedest või kääbusgalaktikatest, mis Linnutee loodejõudude tõttu lahku rebiti: gravitatsioonijõu mõju on veidi tugevam parve selles osas, mis on Linnutee keskmee lähemal, ning pisut nõrgem parve teises osas, mis asub Linnutee keskmest kaugemal. Kui nende jõudude vahe on piisavalt suur, võivad tähed nii parve kaugemas kui ka lähemas osas parve mõjusfäärist välja pääseda ning parvest lahkuda. Kuna selliste tähtede liikumiskiirus on peaaegu võrdne parve kiirusega, hakkavad nad ümber galaktika tiirlema peaaegu samal trajektooril kui parv ise. Nõnda teevad ka kõik teised tähed, mis parvest sarnasel moel on põgenenud. Tähed, mis pääsevad parvest galaktika keskmee lähiküljel, on galaktikaga veidi tugevamalt seotud ja seega liiguvad algsest parvest ettepoole, samas kui kaugemal asuvad tähed jäävad parvest maha. Aja jooksul liiguvad tähed parvest üha kaugemale ja kaugemale, venitades ja pikendades nõnda joa kuju. Selle protsessi tulemuseks on kitsad tähekaarid, mida nimetame tähevooludeks. Tüüpilise tähevoolu struktuuri illustratsioon on ära toodud joonisel 5.6.3. Tähevoolude kõige huvitavam omadus ongi see, et iga voolu kuuluv täht langeb ligikaudselt samale orbiidile ümber galaktika. Kuna orbiidi trajektoor sõltub massist, mille ümber tiireldakse, on võimalik tähevoolude abil otseselt mõõta massi jaotust galaktikas ning, võrreldes neid tulemusi teoreetiliste mudelitega, kogu Universumi põhilisi omadusi.

Siiski pole tähevoolude näol tegemist ainsa galaktilise struktuuriga, mis meid suurte mõistatuste lahendusteni võivaid viia. Hajusparved, tähtede rühmad, mis liiguvad koos läbi galaktika, on tähtede evolutsiooni uurimise seisukohast sama olulised nagu tähevoolud on tumeaine ja galaktikate kujune-



Figuur 5.6.3: Tähevoolu mudel galaktilistes koordinaatides, algse täheparve orbiit on näidatud musta joonena. Pildi allikas: Dehnen et al. (2004).

mise uuringute jaoks. Kõik hajusparve kuuluvad tähed on tekkinud samal ajal samast molekulaarpilvest, mistõttu nende vanus, keemiline koostis, kaugus ja liikumiskiirus on peaaegu võrdsed. Ainuke erinevus tähtede vahel on nende individuaalne algmass: kuna tähed on sama vanuse ja keemilise koostisega, siis erinevused nende arengustaadiumis määrab üksnes nende algmass. Lisaks, kuna kõik samasse parve kuuluvad tähed on meist sisuliselt samal kaugusel, määrab nende suhtelise heleduse üksnes nende tõelise heleduse erinevus: tähed, mis paistavad eredamad, ongi olemuselt eredamad ja, seega, massiivsemad. Need asjaolud muudavad hajusparved ideaalseks kontroll-keskkonnaks, mille põhjal luua ja katsetada tähtede kujunemise teooriaid.

Käesolev töö

Käesoleva doktoritöö teemad võib jagada kahte leeri: esimene neist järgib meie püüdlusi tähevoolude kaudu Linnutee massijaotust mõõta ning teine kirjeldab Hüaadide hajusparve uuringut. Mõlemat uurimistemat ajendas värskete vaatlusandmete, mis on revolutsioonilised nii oma täpsuse kui ka mahu poolest, avaldamine. Me elame hetkel galaktilise astronoomia kulda-
jastul, mille on suures osas esile kutsunud Euroopa Kosmoseagentuuri Gaia kosmosemissioon. Gaia kaardistab enam kui miljardi Linnutee tähe asukoha ja liikumiskiiruse, andes nõnda meie käsutusse enneolematu Linnutee atlase. Seda atlast rikastavad veelgi mitmed kavas või käimasolevad maapealsed vaatlusprogrammid, mille hulka kuuluvad muuhulgas APOGEE, WEAVE, H3, S5, DESI, 4MOST ja SDSS-V.

Tähevoolude uuringute teiseks inspiratsiooniallikaks on uudne tähevoolude analüüsi meetod. Tähevoolude põhjal galaktika massijaotuse tuletamine on suur väljakutse ja kuigi selliseks analüüsiks on välja pakutud mitmesuguseid erinevaid meetodeid, on neil kõigil üks ja sama oluline piirang: neid ei saa (praktilises mõttes) rakendada üheaegselt mitme tähevoolu analüüsimiseks. Selline seisukord on aga suureks probleemiks, kui tahame maksimaalselt ära kasutada seda tohutult väärtuslikku uut andmehulka. Kõnealune uus meetod on aga loodud nimelt mitmete tähevoolude samaaegseks analüüsiks.

Selle meetodi raames ei kirjeldata tähtede liikumisteid mitte nende positsiooni ega kiiruse, vaid liikumisintegraalide abil. Liikumisintegraalid on füüsikalised suurused, mis püsivad muutumatuna tähe kogu orbiidi ulatuses. Mis orbiidi omadused muutumatuna püsivad, sõltub käsitletava süsteemi geomeetriast. Näiteks on sfääriliselt sümmeetrilise massijaotuse korral liikumisintegraalideks energia, impulsimoment ja impulsimoment vektori z-suunaline komponent. Nende konkreetset väärtused sõltuvad nii tähe algpositsioonist

ja -kiirusest, kui ka massi jaotusest galaktikas.

Liikumisintegraale saab kasutada mitte ainult üksiku tähe trajektoori täielikuks kirjeldamiseks, vaid ka mõõdupuuna iseloomustamiseks samas tähevoorus asuvate tähtede orbiitide sarnasust. Kui kõik tähed jagaksid täpselt sama orbiiti, oleksid ka nende liikumisintegraalid võrdsed. Ligidastel orbiitidel olevad tähed aga moodustavad liikumisintegraalide ruumis tiheda parve. See loomupärane kalduvus liikumisintegraalide parvi moodustada ongi käesolevas doktoritöös kasutatava galaktika massiprofiili mõõtmise meetodi võti. Selle meetodi põhimõte kõlab järgnevalt. Kui teame tähevoolu tähtede asukohti ja kiirusi, on liikumisintegraalide arvutamisel tundmatuks vaid galaktika massijaotus. Massijaotuse kirjeldamiseks võime kasutada näidismudelit ja nõnda arvutada liikumisintegraalid. Kui integraalid ei koondunud parveks, võime järeldada, et valitud massijaotuse näidismudel ei kajasta hästi galaktika tegelikku massijaotust. Me jätkame katsetamist erinevate näidismudelitega, kuni leiame sellise, mis liikumisintegraalid tihedasse kobarasse koondab – see mudel esindabki kõige paremini galaktika tõelist massijaotust.

Seda koondamis põhist meetodit on varem demonstreeritud ainult kunstlikult loodud tähevoolude peal, aga **2. peatükis** rakendame meetodit esmakordselt ka tõeliste tähevoolude andmestike peal. Me määrame Linnutee massijaotuse nelja erinevat tähevoolu, nii eraldi kui ka ühiselt, analüüsid. Leiame, et erinevad tähevoolud hindavad galaktika massijaotust erinevalt, mis osutab süstemaatilisele veale. Samuti on näha viiteid sellele, et mõned tähevoolud võivad olla rohkem mõjutatud süstemaatilistest hälvetest kui teised. Kuigi leiame, et üksikute tähevoolude mõõtetulemused on ebausaldusväärsed, selgub ka, et neist tulenevat süstemaatilist hälvet saab tasakaalustada sellega, kui analüüsida samaaegselt mitut tähevoolu. See tulemus viitab tugevalt järeldusele, et Linnutee massijaotuse konsensusliku hinnangu saavutamiseks tuleks analüüsida mitmeid tähevoolusid korraga.

3. peatükis uurime põhjalikumalt tähevooludega seonduvat süstemaatilist mõõtemääramatust. Täpsemalt on meie eesmärgiks kindlaks teha, millised tähevoolude omadused suurendavad tõenäosust süstemaatiliste hälvete esinemiseks arvutustulemustes. Selleks võtame oma analüüsis kasutusele FIRE galaktikate evolutsiooni simulatsioonis leiduvad simuleeritud tähevoolud. Simuleeritud voolude kasutamine võimaldab meil otseselt võrrelda oma tulemusi simuleeritud galaktika teadaoleva massijaotusega ning seega lihtsasti tuvastada tähevoolud, mille analüüsi tulemused on väärad. Meie analüüs näitab selget seost tähevoolu tulemuste kvaliteedi ja hetke-asukoha vahel: tähevoolud, mis on oma orbiidil galaktika keskmele lähimas punktis (ehk orbiidi peritsentris), annavad järjepidevalt kehvemaid tulemusi. Meie hüpoteesi kohaselt on see nähtus seotud peritsentri tähevoolu fundamentaalse võime-

tusega tõhusalt erinevaid galaktika massijaotuse mudeleid eristada.

Kui eelmistes peatükkides oleme käsitlenud selgelt piiritletud tähevoolude analüüsi, kus tähevoolu liikmed on teada, siis **4. peatükis** läheme üle keerulisemale ülesandele: meie analüüsi sihiks on üldine galaktiline tähtede halo. Kuigi tähtede halo koosneb arvukatest ristuvatest tähevooludest, on enamik neist moodustunud nii ammu, et neid on äärmiselt raske üksteisest lahti harutada ja selgeks teha, milline täht kuulub millise tähevoolu koosseisu või milline täht pole üldse pärit ühestki tähevoolust. Seetõttu rakendame käesolevas peatükis koondamispõhist meetodit tähtede halo valimi suhtes sisuliselt “pimesi”. Teiseks raskendavaks teguriks on see, et tähtede halo hulka kuuluvad galaktika kõige kaugemad tähed ning nende asukohta ja kiirust on sageli raske täpselt täheldada. Tulemuste õigeks tõlgendamiseks rakendame oma koondamispõhist meetodit ka FIRE simulatsioonist pärinevatele tähevoolude kogumile, mille puhul (i) kogumile on kunstlikult lisatud märkimisväärne hulk tuvastamata päritoluga tähti ja/või (ii) igale tähele on omistatud märkimisväärsed mõõtemääramatused.

5. peatükis liigume tähevoolude temalt hajusparvede uurimise juurde. Konkreetsemalt uurime selles peatükis meile kõige lähemal asuvat hajusparve ehk Hüaadide parve Gaia andmeid kasutades. Analüüsides tähtede liikumiskiirust ja otsides ühiseid mustreid, tuvastame mitmeid uusi Hüaadide liikmeid. Seejärel tuletame kinemaatiliste argumentide põhjal uute parveliidmete täpsed kaugused: eeldades, et kõik parve tähed liiguvad samal suunal sama kiirusega, võib kõik sellest kiirusest täheldatud erisused omistada tähtede kaugusete erinevustele. Need kinemaatiliselt modelleeritud kaugused võimaldavad meil kalibreerida tähtede heledust: igasugune erinevus heledus, mis tuleneb üksnes tähtede endi kauguse erinevustest, eemaldatakse, ja alles jääb ainult tähtede olemuslik heledus. See olemuslik heledus sõltub nüüd üksnes iga tähe arengustaadiumist, mis võimaldab tõhusat mitmete tähtede arengumudelite võrdlust.

