

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Kerttu Tilk

**GALAKTIKAGRUPPIDE TUVASTAMISE MEETODITE
VÕRDLUS 2MRS VAATLUSPROJEKTI GRUPPIDE
KATALOOGIDE PÕHJAL**

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Füüsika eriala

Juhendaja:
Moorits Mihkel Muru, MSc

Tartu 2021

Galaktikagruppide tuvastamise meetodite võrdlus 2MRS vaatlusprojekti gruppide kataloogide põhjal

Galaktikagruppide tuvastamiseks vaatlusprojektidest kasutatakse erinevaid grupeerimismeetodeid, mis annavad erinevaid tulemusi. Lõputöö eesmärk oli omavahel võrrelda Lambert et al. (2020), Saulder et al. (2016), Tempel et al. (2016), Lu et al. (2016), Lim et al. (2017) ning Tempel et al. (2018) artiklites kirjeldatud galaktikate grupeerimise meetodeid. Kõiki meetodeid oli rakendatud 2MRS vaatlusprojekti andmestikul. Kõikidest kataloogidest tehti lõige ning neisse jäi 10 835 erinevat galaktikat, millest moodustati 58 693 195 paari. Igale meetodipaarile arvutati kattuvuseprotsendid arvestades, kuidas meetodid galaktikapaare gruppidesse arvasid. Lisaks võrreldi kataloogides olevate gruppide arvu ning nende suuruseid. Galaktikapaare, mille kõik kuus meetodit ühisesse gruppi paigutasid, oli 4986 ehk 5,4% galaktikapaaridest, mis olid vähemalt ühe meetodi poolt ühisesse gruppi määratud. Lõputöö käigus leiti, et kõik grupeerimismeetodid kattuvad omavahel suurel määral, kusjuures enim kattusid Lambert et al. (2020) ja Lim et al. (2017) grupeerimismeetodid, täpsemalt 99,67%.

Märksõnad: galaktikagrupid, Universumi suureskaalaline struktuur, vaatluslik kosmoloogia
CERCS: P520 — Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

Comparison of galaxy group detection methods based on the 2MRS survey group catalogues

Many different grouping methods are used to identify galaxy groups from observations, each giving different results. The aim of the thesis was to compare six galaxy grouping methods, which are described in the following articles: Lambert et al. (2020), Saulder et al. (2016), Tempel et al. (2016), Lu et al. (2016), Lim et al. (2017) and Tempel et al. (2018). All these methods were implemented on the data from the 2MRS observational survey. All of the catalogues' data was cut so that 10 835 different galaxies remained, which were paired to form 58 693 195 pairs. Overlap percentages were calculated for each method pair, based on how the methods grouped the galaxy pairs. Additionally, the group number and size in the catalogues were compared. There were 4986 galaxy pairs that were grouped together by all six methods, which made up 5,4% of galaxy pairs that were grouped together by at least one method. In the course of the thesis, it was found that the grouping methods overlap to a large extent, with Lambert et al. (2020) and Lim et al. (2017) grouping methods overlapping the most, 99,67%.

Keywords: galaxy groups, large-scale structure of the Universe, observational cosmology
CERCS: P520 — Astronomy, space research, cosmic chemistry

Sisukord

| | |
|---|-----------|
| Sissejuhatus | 4 |
| 1 Ülevaade kosmoloogiast | 5 |
| 1.1 Kosmoloogia kui uurimisvaldkond | 5 |
| 1.2 Universumi suureskaalaline struktuur | 6 |
| 1.2.1 Galaktikagrupid | 6 |
| 1.2.2 Galaktikagruppide vaatlemine ja tuvastamine | 7 |
| 1.3 2MRS vaatlusprojekt | 9 |
| 2 Vaatluse all olevad grupeerimismeetodid | 11 |
| 2.1 Sõprade-sõbrad algoritmil põhinevad meetodid | 11 |
| 2.2 Halol põhinevad grupeerimise meetodid | 12 |
| 2.3 Bayesi meetod | 13 |
| 3 Grupeerimismeetodite võrdlus | 14 |
| 3.1 Võrdlusmeetodid | 14 |
| 3.2 Tulemused ja arutelu | 15 |
| Kokkuvõte | 21 |
| Tänuavaldused | 22 |
| Kirjandus | 23 |
| Lihtlitsents | 26 |

Sissejuhatus

Galaktikad ei ole Universumis ühtlaselt jaotunud. Need moodustavad grupe, mis omakorda moodustavad Universumi suureskaalalise struktuuri elemente. Galaktikagruppe kasutatakse näiteks uurimaks keskkonna mõju galaktikate evolutsioonile ning testimaks kosmoloogilisi mudeleid. Galaktikagruppide tuvastamine vaatlusprojektide andmetest on kosmoloogias tüüpiline ülesanne. Kuna galaktikagruppide leidmine visuaalselt on subjektiivne ja ebatõhus, on välja pakutud mitmeid erinevaid algoritme gruppide tuvastamiseks. (Lambert et al., 2020; Tempel et al., 2018)

Bakalaureusetöö eesmärk on võrrelda omavahel kuute erinevat galaktikate grupeerimise meetodit, selgitades välja, kas erinevad meetodid annavad samu tulemusi samade andmete põhjal. Meetodid võib jagada põhimõtte järgi kolmeks - sõprade-sõbrad algoritmil (ingl *Friends-of-Friends algorithm*, edaspidi FoF) põhinevad meetodid, tumeaine halosid kasutavad meetodid ning Bayesi meetod. Töös kasutatakse andmeid, mis on saadud kõikide eelnimetatud meetodite rakendamisel 2MRS vaatlusprojekti (ingl *Two Micron All-Sky Survey Redshift Survey*) andmestikule.

Käesolev bakalaureusetöö on jaotatud kolme ossa. Esimene peatükk tutvustab kosmoloogiat kui uurimisvaldkonda, Universumi suureskaalalist struktuuri ning 2MRS andmestikku. Teises peatükis antakse ülevaade võrreldavatest grupeerimismetoditest. Kolmandas peatükis selgitatakse võrdlusmeetodeid ning esitletakse nende tulemusi.

Peatükk 1

Ülevaade kosmoloogiast

1.1 Kosmoloogia kui uurimisvaldkond

Kosmoloogia on teadusharu, mille eesmärk on uurida Universumi päritolu, evolutsiooni ning füüsikalisi protsesse, mis selles aset leiavad. Kaasaegse kosmoloogia alguseks võib lugeda 1929. aastat, mil Edwin Hubble avaldas seose kosmoloogilise punanihke kohta, mida nüüd tuntakse Hubble'i seaduse nime all. Hubble'i seadus ütleb, et kaugete galaktikate kiirus suureneb lineaarselt kaugusega. Seda tõlgendati kui tõestust paisuvast Universumist. (Roos, 2003)

Kosmoloogia põhineb Λ CDM (*Λ cold dark matter* ehk külm tumeaine) mudelil. Λ on konstant, mis iseloomustab tumeenergiat, üht energiatiheduse vormi. Λ CDM mudeli järgi koosneb Universumis olev aine prootonitest, neutronitest, elektronidest, neutriinodest, footonitest ja külmast tumeainest ning suurtel skaaladel on Universum homogeenne ja isotroopne. Külm tumeaine moodustab 84% Universumis leiduvast ainest. (Cimatti et al., 2019)

Kosmoloogias kasutatakse mitmeid erinevad ühikuid kauguste kirjeldamiseks. Üheks levinuimaks neist on valgusaasta (ly) ehk kaugus, mille valgus läbib vaakumis ühe aastaga. Üks valgusaasta vastab $9,4607 \cdot 10^{15}$ m. Antud töös on enamik kaugusi väljendatud ühikuga parsek. Parsek on kaugus, millel 1 astronoomilise ühiku nurkläbimõõt on 1 kaaresekund. Astronoomiline ühik on Maa ja Päikese keskmine vahekaugus, $1,496 \cdot 10^{11}$ m. SI ühikutes on 1 parsek võrdne $3,086 \cdot 10^{16}$ m. Kaugusi on võimalik kirjeldada ka punanihkega. Objekti punanihe on tingitud Universumi paisumisest ning omaliikumisest ehk Doppleri nihkest, kusjuures esimene mõjutab objekti punanihet oluliselt rohkem. Väikesed punanihked (kuni umbes 0,1) sõltuvad kaugusest lineaarselt.

Taevakehade, sealhulgas galaktikate asukohta taevatasandis märgitakse taevakoordinaatidega. Üheks levinumaks neist on otsetõus ja kääne. Otsetõus on nurk piki taevaekvaatorit ning kääne

nurkkaugus taevaekvaatori ja mingi teise punkti vahel põhjapoolse taevapooluse suunas.

Galaktikate masse hinnates leitakse mingi määratud raadiuse sees oleva aine mass. See tähendab, et hinnang galaktika massile on alati galaktika kogumassi alampiiir. Galaktikate masse võib hinnata udukogu ja/või tähtede spektrijoonte Doppleri nihete kaudu. Ka on levinud galaktika heleduse massiks teisendamine, milleks kasutatakse teadaolevat suhtarvu. Kosmoloogias on levinud massiühikuks Päikese mass M_{\odot} , mis on võrdne $1,9891 \cdot 10^{30}$ kg. (Courteau et al., 2014)

Galaktikate kiirused on mõjutatud nii Universumi paisumisest kui ka ümbritseva keskkonna gravitatsioonilisest mõjust. Keskkonna gravitatsioonilisest mõjust tulenevat kiirust nimetatakse omaliikumiskiiruseks. Universumi paisumisest tulenev kiirus on kirjeldatav Hubble'i seadusega. Galaktika kogukiirus leitakse eelnimetatud kiiruste kokku liitmisel. (Davis ja Scrimgeour, 2014)

1.2 Universumi suureskaalaline struktuur

1.2.1 Galaktikagrupid

Galaktika on gravitatsiooniliselt seotud süsteem tähtedest, nende jäänukitest, tähtedevahelisest gaasist, tolmust ning tumeainest (Cimatti et al., 2019). Galaktikate suurus ulatub sadadest parsekitest kümnete kiloparsekiteni ning nende mass 10^3 kuni 10^{12} Päikese massini (Willman ja Strader, 2012). Galaktikate tekkes on põhiline roll tumeaine jaotustel, mida nimetatakse tumeaine halodeks (Wechsler ja Tinker, 2018). Halod moodustuvad tumeaine kobarasse kogunemisel. Kui tumeaine halosse jäänud gaas jaheneb, tekib molekulaarne vesinik, mis on aluseks tähetekkele. Nii moodustuvad galaktikate silmaga nähtavad osad. Galaktikad kasvavad põhiliselt tähtedevahelise gaasi juurdevoolul, millest tekivad uued tähed. Galaktikad kaotavad oma massi planetaarudu, noovade ja supernoovade tõttu. Tähtedevahelisse keskkonda sattunud aine käivitab uuesti galaktika tekkimise tsükli. (Cimatti et al., 2019; Mo et al., 2010)

Vähemalt 50% kõikidest galaktikatest kuulub galaktikagrupidesse (Muñoz et al., 2013). Galaktikagrupid võivad koosneda kuni tuhandetest galaktikatest ning ulatuda kuni 100 megaparsekini. (Bahcall, 1988) Galaktikagrupil ei ole ühest definitsiooni, see varieerub artiklist artiklisse. Tinker (2020) artiklis on galaktikagrupp defineeritud kui galaktikate kogum, mis asub ühes ja samas tumeaine halos. Huchra ja Geller (1982) FoF meetodi alusel on galaktikagrupid defineeritud kui galaktikad, mille omavaheline kaugus on väiksem kui määratud piirkaugus ning mille kiiruste erinevus on väiksem kui määratud piirkiirus.

Galaktikagrupid on osa suureskaalalisest struktuurist. Suureskaalaline struktuur tuleneb galaktikate ebahütlasest jaotumisest Universumis. Ilmneb, et megaparseki skaalal moodustavad galaktikad kosmilise võrgustiku, mis koosneb galaktikagrupidest, piklikutest filamentidest,

galaktikavallidest ning tühimikest nende vahel. Suureskaalalise struktuuri olemasolu tuli esile esimestest püüetest Universumit kaardistada. Mitmed järgnenud suuremahulised uurimused on kinnitanud, et võrgustik eksisteerib. (Libeskind et al., 2017; Coil, 2013)

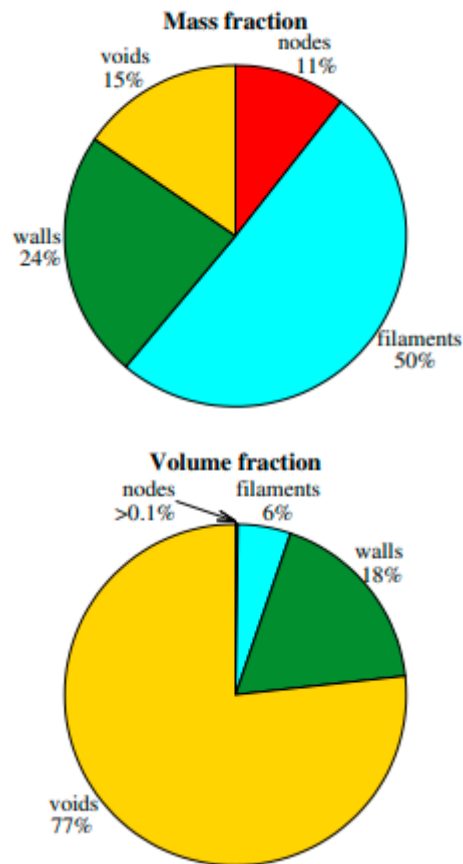
Kosmilises võrgustikus on ühtedeks paremini väljajoonistuvateks struktuuri elementideks filamendid. Filamendid on piklikud galaktikate ahelad, mis ühendavad omavahel galaktikagruppe, nende pikkus ulatub sadade megaparsekiteni. Nende kaudu liiguvad galaktikad ja galaktikatevaheline aine kosmilises võrgustikus parvedesse. Filamentide ristumiskohtades on galaktikatest moodustunud superparved, mis on tihedaimad kosmilise võrgustiku struktuuri elemendid. Filamentide ja superparvede kõrval joonistuvad välja ka tühimikud. Tühimikud on ülisuured väikese ainetihedusega piirkonnad, mille diameetrid ulatuvad kümnetesse megaparsekitesse. Need on tavaliselt sfäärilise kujuga ning täidavad enamiku universumist. Tühimikke ümbritsevad tasapinnalised galaktikavallid. (Noh, 2013; Weygaert, 1998; Cautun et al., 2014; Malavasi et al., 2020)

Joonisel 1.1 on näidatud, mitu protsenti moodustavad suureskaalalise struktuuri elemendid Universumi kogumassist ning koguruumalast. Kuigi filamenides sisaldub lausa 50% Universumi kogumassist, moodustab nende ruumala vaid 6% koguruumalast. Enamiku ruumalast hõivavad tühimikud, 77%, kuid väikese ainetiheduse tõttu kuulub neile vaid 15% kogumassist. Superparved sisaldavad 11% Universumi kogumassist ning oma suure tiheduse tõttu hõivavad vaid veidi üle 0,1% ruumalast.

1.2.2 Galaktikagruppide vaatlemine ja tuvastamine

Esimese galaktikagrupi avastas enesele teadmata Charles Messier, kes 18. sajandil märkis üles Virgo galaktikaparve 11 udukogu asukohad. Galaktikagruppide olemasolu tõendasid hiljem Harlow Shapley ja Adelaide Ames 1930. aastatel. Galaktikagruppide tuvastamise teerajajaks peetakse George Abelli, kes 1950. aastate lõpus tuvastas galaktikagruppe kasutades fotoplaate. 2000. aastatel läbi viidud mahukaid galaktikate vaatlusprojekte peetakse suurimateks edusammudeks galaktikagruppide tuvastamisel. Vaatlusprojektide andmetest saab tuvastada galaktikagruppe mitmete erinevate automatiseeritud algoritmidega, mis vähendavad analüüsija subjektiivsust. (Farrens et al., 2011)

Galaktikagruppide vaatlemiseks on mitmeid erinevaid meetodeid. Gruppide optilises ja lähinfrapuna spektripiirkonnas nähtav kiirgus pärineb valdavalt tähtedelt. Eriti suure heledusega on galaktikagruppide tuumad, kus asuvad kõige suuremad ja heledamad galaktikad. Optilistel vaatlustel on põhilisteks vaadeldavateks galaktikate rohkus, nende heledus ja värvus. Vaadeldes galaktikagruppe röntgeni piirkonnas, on näha röntgenkiiri kiirgavat kuuma plasmat. Plasma tekib galaktikagruppide gravitatsioonilisest mõjust, mis gaasi kokku surub, tõstes selle temperatuuri



Joonis 1.1: Kosmilise võrgustiku struktuuride elementide osakaalud Universumi massis ja ruumalas. Massiosa (ingl *Mass fraction*) näitab, mitu protsenti Universumi kogumassist kuulub tühimike (ingl *voids*), superparvede (ingl *nodes*), filamentide (ingl *filaments*) ning galaktikavallide (ingl *walls*) alla. Ruumalaosa (ingl *Volume fraction*) näitab, mitu protsenti Universumi koguruumalast hõivavad viimati loetletud struktuuri elemendid. Massi ja ruumala jaotuste suured erinevused tulenevad elementide tiheduste erinemisest. (Cautun et al., 2014)

10^7 kuni 10^8 kelvinini. Põhilisteks vaadeldavateks röntgeni piirkonnas on ruumiline ulatus ning kiirgusvood. Kaasaegsed röntgenteleskoobid mõõdavad spektreid piisavalt täpselt, et on võimalik mõõta galaktikagruppide tihedust ning temperatuuri. Galaktikagruppide mass on piisav, et kõverdada aegruumi nende ümber, tekitades gravitatsiooniläätse, mis võib suurendada ja moonutada taustal olevaid galaktikaid. Moonutuse ja suurenduse põhjal saab teha järeldusi galaktikagrupi massi kohta. (Allen et al., 2011)

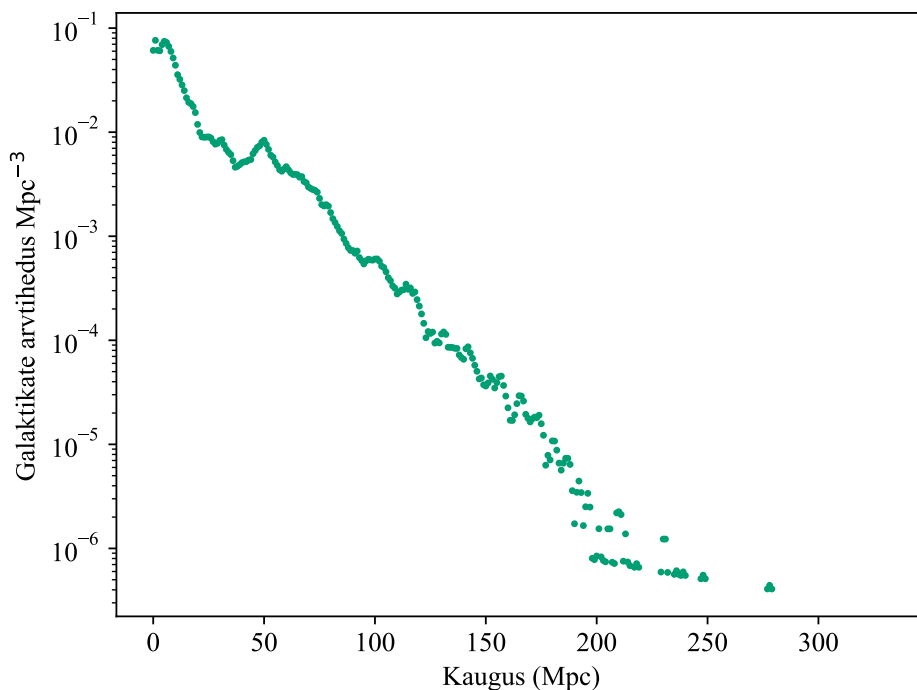
Galaktikagruppide kaugusi saab hinnata nende punanihke järgi. Punanihe ning kaugus on omavahel seotud Hubble'i seadusega. Galaktikagruppide vaatlemisel tuleb arvestada jumala sõrmede efektiga (ingl *Fingers of God effect*). Vaadeldes galaktikate ruumijaotust punanihke domeenis, on galaktikad vaatesuunas justkui pikemaks venitatud. Efekt tekib galaktikagrupi kuuluvate galaktikate erinevatest punanihetest, mis tulenevad galaktikate

erinevatest omaliikumise kiirustest. (Hogg, 1999; Coil, 2013)

1.3 2MRS vaatlusprojekt

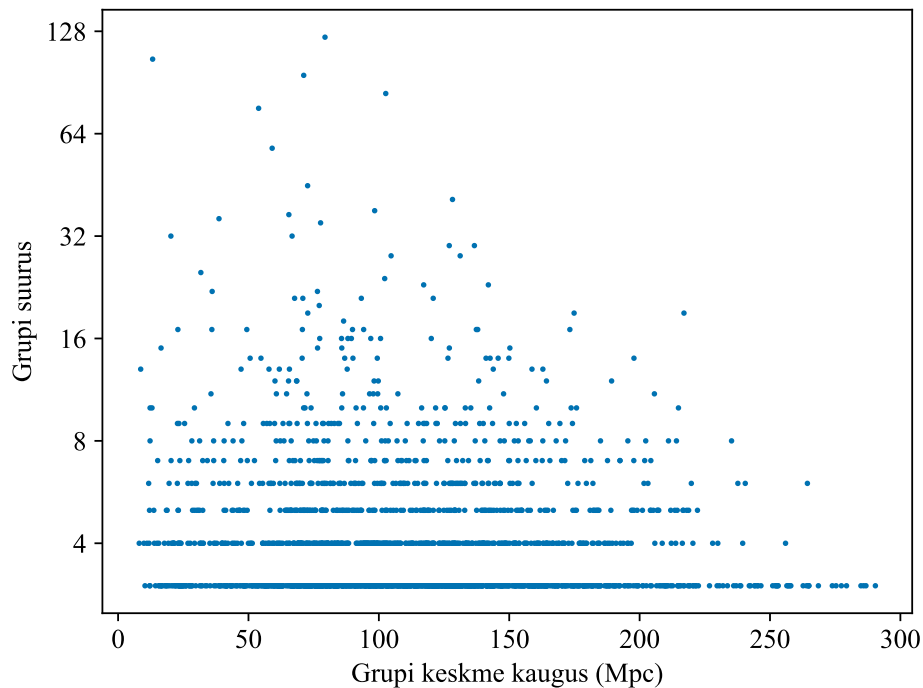
2MRS (ingl *Two Micron All-Sky Survey Redshift Survey*) vaatlusprojekti põhiline eesmärk oli kaardistada galaktikate jaotust lokaalses Universumis, täiendades varasemaid vaatlusprojekte. 2MRS kataloogis on kirjeldatud 43 533 ehk 97,6% lähteandmete galaktikate punanihkeid, mis annab lokaalsest Universumist tervikliku ülevaate kuni punanihkeni $z \sim 0,08$. (Huchra et al., 2012)

Algne lähteandmete valik põhines varasemalt läbi viidud vaatlusprojekti kataloogil, millest valiti välja 45 086 galaktikat, mille omadused vastasid vajalikele kriteeriumitele. 324 kiirgurit jäeti kõrvale, sealhulgas galaktikate osad, mis olid tuvastatud kui eraldiseisvad galaktikad. Lisaks märgiti ära 314 galaktikat, mille spektrite mõõtmisi on tulevikus vajalik korrata automatiseeritud analüüsi puudujääkide tõttu. Lõplik lähteandmete kataloog koosnes 44 599 kirjest. (Huchra et al., 2012)



Joonis 1.2: Galaktikate arvtiheduse ja kauguse suhe Tempel et al. (2018) kataloogis. Galaktikate arvtiheduse telg ehk y-telg on logaritmilises skaalas.

Septembris 1997 alustati galaktikate spektroskoopiliste andmete kogumisega. Vaatlused viidi läbi viies erinevas observatooriumis ning andmeid koguti 2011. aasta jaanuarini. Kogumise



Joonis 1.3: Grupi suuruse ja grupi keskme kauguse suhe Tempel et al. (2018) kataloogis. Grupi suuruse telg ehk y-telg on logaritmilises skaalas.

käigus mõõdeti 11 000 galaktika spektrid; ülejäänud galaktikate punanihked omandati varem leitud kiiruste põhjal. Saadud galaktikate punanihete kataloogi võrreldi varem läbi viidud vaatlusprojektide kataloogidega, et andmeid optimeerida. Valminud 2MRS kataloog katab umbes 91% taevalaotusest kuni punanihkeni 0,08. (Huchra et al., 2012)

Teleskoopidel on kindel piirheledus, millest tuhmimaid objekte ei ole võimalik tuvastada. Kuna näivheledus väheneb kaugusega, on kaugemal näha vaid heledaimaid galaktikaid. Seda illustreerib joonis 1.2, kus on toodud galaktikate arvtihedus Tempel et al. (2018) kataloogis, mis kaugusega väheneb. See tähendab, et ka kaugemates gruppides tuvastatakse galaktikatest kõige heledamad ning jääb mulje, nagu oleksid grupid kaugemal väiksemad, kuigi tegelikkuses ei ole enam kõiki grupi liikmeid võimalik tuvastada. Seda võib märgata joonisel 1.3, kus on toodud Tempel et al. (2018) grupi suuruse suhe grupi keskme kaugusega.

Peatükk 2

Vaatluse all olevad grupeerimismeetodid

2.1 Sõprade-sõbrad algoritmil põhinevad meetodid

FoF algoritm on üks enimkasutatavaid gruppide tuvastamise algoritme. See on kiire, kergesti hoomatav ning lihtsal viisil rakendatav. Kosmoloogias leiab algoritm kasutust nii tumeaine halode kui ka galaktikagruppide tuvastamisel. Esimest korda kasutasid FoF algoritmi galaktikagruppide leidmiseks Huchra ja Geller (1982). FoF algoritm grupeerib omavahel punkte (näiteks galaktikaid), mille omavaheline kaugus on väiksem kui määratud piirkaugus. Sobiv piirkaugus valitakse vastavalt algoritmi rakendamise eesmärgile. FoF algoritmi kasutavad kolm võrreldatavat galaktikagruppide tuvastamise meetodit, mida on täpsemalt kirjeldatud Lambert et al. (2020), Saulder et al. (2016) ja Tempel et al. (2016) artiklites. (Feng ja Modi, 2017; Botzler et al., 2004; Tempel et al., 2018)

Lambert et al. (2020) artiklis kirjeldatud meetod kasutas piirkaugustena kahte suurust - vaatesuuna suunalist kiirust ning sellega ristuvat kaugust. Viimati mainitud kaugust ei hoitud konstantsena, vaid muudeti vastavalt kaugusele Maast, et vabaneda erinevatest süstemaatilistest vigadest. Mõlemale suurusele seati piirväärtus, mis piiras gruppide kasvu, kuna ilma piirideta kasvasid grupid ebalooslikult suureks ning ei olnud enam gravitatsiooniliselt seotud. See võimaldas leida suuremaid gruppe ilma neid mitmeks väiksemaks grupiks pidamata. Lisaks aitas see gruppidest välja arvata galaktikad, mis ei olnud grupiga gravitatsiooniliselt seotud. Algoritmi jooksutati mitu korda erinevate piirväärtustega, et üle nende keskmistades saada parimad tulemused. Antud meetodit rakendati 44 572 galaktikast koosnevale andmestikule, millest leiti 3022 kolme või enam liikmega gruppi. Suurim leitud galaktikagrupp koosnes 163 galaktikast ning see identifitseeriti kui Neitsi ehk Virgo galaktikaparv.

Tempel et al. (2016) grupeerimismeetod jagas samuti piirkauguse kaheks osaks, kuid mõlemad leitud suurused olid kaugused. Vaatesuunaga ristuvat kaugust muudeti samuti olenevalt kaugusest

Maast, et võtta arvesse Malmquisti kallutatust. Kuna FoF algoritm võib ekslikult pidada mitmeid erinevaid gruppe üheks suureks grupiks, otsiti tuvastatud gruppidest alamgrupe. Lisaks arvati grupist välja galaktikad, mille paakiirus oli piisav grupist lahkumiseks. Grupeerimismeetodit rakendati 43 480 galaktika andmetele ning tuvastati 6282 kahe või enam liikmega galaktikagrupi. Leiti 580 gruppi, milles oli kolm või enam galaktikat. Suurim neist koosnes 92 galaktikast.

Saulder et al. (2016) meetod leidis esmalt esialgse hinnangu piirkaugusele kasutades tehiskataloogi, mis oli vaba süstemaatilistest vigadest. Piirkaugus defineeriti kui tehiskataloogi kõigi piisavalt heledate galaktikate ja nende lähima naabri vaheliste kauguste keskmine. Leitud piirkaugust korrigeeriti, et vabaneda Malmquisti kallutatusest ning hoida ära gruppide fragmenteerumist. Nagu ka eelmiste, Lambert et al. (2020) ja Tempel et al. (2016), meetodite korral, jagati piirkaugus kaheks üksteisega risti olevaks osaks, et saada parimad tulemused. Seda meetodit rakendati 43 508 galaktika andmetel ning leiti 31 506 gruppi, mis sisaldasid ühte või enam galaktikat. Kolme või enam galaktikat sisaldanud grupe oli kokku 469. Suurimas tuvastatud galaktikagrupis oli 205 galaktikat.

2.2 Halol põhinevad grupeerimise meetodid

Tumeaine halodel põhinevate grupeerimismeetodite eesmärk ei ole leida üksteise lähedal asuvaid galaktikaid, vaid leida tumeaine halosid ning tuvastada, millised galaktikad asuvad nende keskmes. Arvatakse, et galaktikad tekivad tumeaine halodes ning grupid moodustavad galaktikad, mis asuvad ühes ja samas tumeaine halos. Yang et al. (2005) välja töötatud grupeerimismeetod, millel põhinevad ka Lu et al. (2016) ja Lim et al. (2017) grupeerimismeetodid, töötab järgmiselt. Esmalt otsitakse FoF algoritmi abil galaktikagruppe, et teha kindlaks võimalikud gruppide tuumikud. Seejärel mõõdetakse iga grupi heledus, et teadaolevast suhtarvust leida grupiga seostatava tumeaine halo mass ning ka muud omadused. Kui on teada grupi tuumik, esialgsed hinnangud grupi suurusele, massile ja muudele omadustele, saab galaktikaid sinna gruppi liigitada seostatavate halode omaduste põhjal.

Lu et al. (2016) grupeerimismeetod kasutas teadmist, et tumeaine halo mass ning sellele vastava grupi liikmete heledus on omavahel tugevas korrelatsioonis. Kuna 2MRS vaatlusprojekt oli võimeline tuvastama vaid heledamaid galaktikaid, ei ole kõikide grupi liikmete heledused teada ning halo masse leiti muul viisil. Algne hinnang halo massile anti eeldades, et suurema heledusega galaktika asub suurema massiga halos. Esmalt grupeeriti galaktikad gruppidesse üksinda ning igale grupile leiti vastav halo mass. Järgmisena sorteeriti halod massi järgi ning alustades massiivseimast, leiti nende suurused ja kiiruse dispersioonid. Selle põhjal leiti iga galaktikagrupi tuumikud. Uusi liikmeid liideti gruppidesse grupi tuumiku ja halo suuruse ning kiiruse dispersiooni järgi. Leitud gruppidele vastavate tumeaine halode masse hinnati ümber

ja halo massi ning grupi heleduse suhet uuendati igal iteratsioonil. Tumeaine halode masse hinnati ümber kasutades grupi tsentraalse ehk heledaima galaktika ning teatud satelliitgalaktika heledusi. Algoritmi itereeriti seni, kuni tulemused ei muutunud ehk grupid jäid samasugusteks järgnevatel iteratsioonidel. Antud meetodit rakendati 43 246 galaktikal ning leiti 29 904 gruppi, mis sisaldasid ühte või enam galaktikat. Kolme või enam galaktikat sisaldanud grupe oli 504 ning suurim leitud grupp koosnes 222 galaktikast.

Lim et al. (2017) grupeerimismeetod põhines Lu et al. (2016) meetodil. Lim et al. (2017) meetod arvas samuti esmalt kõik galaktikad üksinda gruppidesse. Kõikidele gruppidele vastas algne eraldiseisev tumeaine halo. Halodele leiti esialgne mass galaktika heleduse ja halo massi suhte põhjal. Igal iteratsioonil leiti tuvastatud gruppide suurus ja kiiruse dispersioon. Selle põhjal otsustati, millised galaktikad kuuluvad teatud gruppidesse. Seejärel leiti gruppidele uued halo massid, mis asendasid esialgsed. Need leiti sarnaselt Lu et al. (2016) meetodile kasutades heledaima galaktika ning teatud satelliitgalaktika heledusi, kuid valem halo massi arvutamiseks oli erinev. Seda protsessi korrati seni, kuni grupid ja nende liikmed jäid muutumatuks. Grupeerimismeetodit rakendati 43 249 galaktikale ning tuvastati 30 937 gruppi, mis sisaldasid ühte või enam galaktikat. 519 gruppi koosnesid kolmest või enamast galaktikast. Suurimas grupis oli 109 liiget ning see identifitseeriti kui Neitsi ehk Virgo galaktikaparv, sarnaselt Lambert et al. (2020) tulemusele.

2.3 Bayesi meetod

Tempel et al. (2018) Bayesi meetodi eesmärk on tuvastada ruumi piirkondi, kuhu galaktikad kuuluvad. Kogu meetod on tõenäosuslik ning kasutab juhuslikkust. Meetodiga mudeldati galaktikate grupeerumise mustrit, kasutades omavahel interakteeruvaid objekte. Objektidel oli eriline kuju, et vabaneda moonutustest, näiteks jumala sõrmede efektist. Mudeldatud mustri abil määrati galaktikaid gruppidesse. Esmalt määrati kõik galaktikad eraldi gruppidesse ning seejärel leiti, millised grupid liidetakse kokku. Kuna gruppide kokku liitmine oli hierarhiline, koosnes enamik esialgu leitud grupe kahest kõige tugevamalt seotud galaktikast. Järgmisel sammul jäid eraldiseisvad grupid eraldatuks ning üksteisele lähemal asuvad grupid moodustasid ühe grupi. Leitud gruppidest arvati välja galaktikad, mis ei olnud grupiga gravitatsiooniliselt seotud. Antud meetodit rakendati 42 620 galaktikast koosnevale andmestikule ning leiti 7755 galaktikagruppi, millel on kaks või enam liiget. Leiti 449 kolme või enama galaktikaga gruppi. Suurim leitud grupp koosnes 123 galaktikast.

Peatükk 3

Grupeerimismeetodite võrdlus

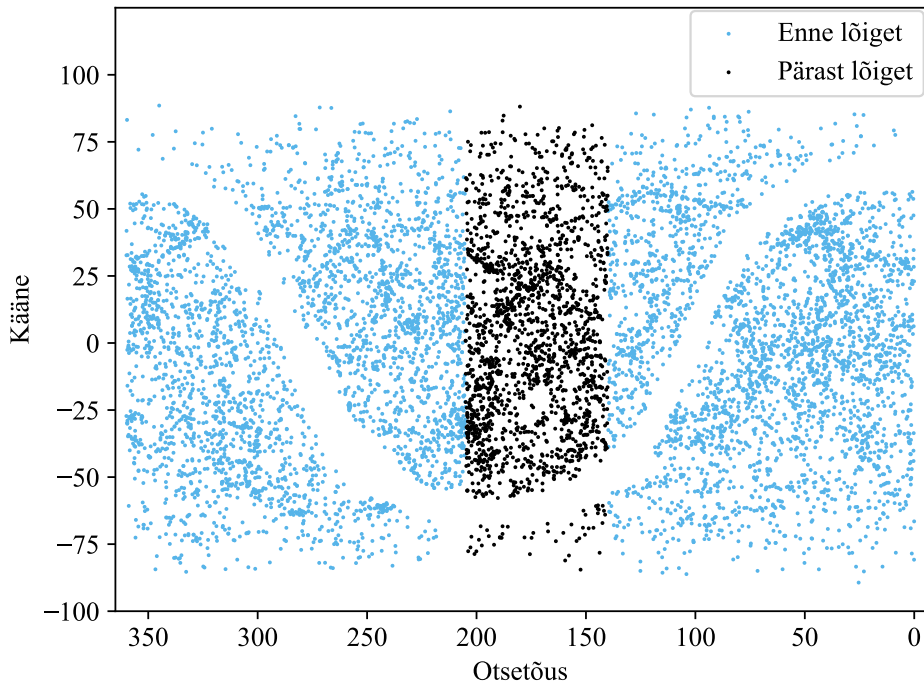
3.1 Võrdlusmeetodid

Grupeerimismeetodite abil koostatud kataloogidest tehti otsetõusu järgi lõige. Lõigatud kataloogidesse valiti kõik galaktikad, mille otsetõus jäi 140 kuni 205 kraadi vahele. Joonisel 3.1 on näha galaktikate jaotust Lim et al. (2017) kataloogis enne ja pärast lõike tegemist. Lõigatud kataloogides oli kokku 10 835 erinevat galaktikat, otsetõus ja kääne ümardati nelja komakohani. Joonisel 3.2 on iga kataloogi galaktikate arv enne ning pärast lõiget. Lõige teostati nii, et igasse kataloogi jääks umbes 10 000 galaktikat. Tempel et al. (2016) ning Tempel et al. (2018) lõigatud kataloogidesse jäi galaktikaid vähem, kuna sealt eemaldati galaktikad, mis ei kuulunud ühtegi gruppi.

Käesolevas töös on galaktikagruppideks arvatud kataloogides esinevad grupid, mis koosnevad kolmest või enamast galaktikast. Seda arvestades leiti iga kataloogi kohta grupis olevate galaktikate arv, galaktikagruppide koguarv ning keskmine ja maksimaalne galaktikagrupi suurus. Joonisel 3.3 näidatud, mitu kolme või enama liikmega galaktikagrupi sisaldus kataloogides enne ja pärast lõiget. Lambert et al. (2020) paistab silma teistest kataloogidest suurema galaktikagruppide arvuga, nii lõigatud kui ka lõikamata kataloogis. Samas on alles jäänud gruppide protsent Lambert et al. (2020) kataloogil väikseim. Suurim protsent gruppe jäi alles Lim et al. (2017) lõigatud kataloogis.

Kataloogide omavaheliseks võrdlemiseks moodustati eelmainitud 10 835 galaktikast paarid, kokku 58 693 195 paari. Kontrolliti, kas igas kataloogis eraldi on galaktikapaar olemas. Galaktikapaari olemasolu korral leiti, kas paar kuulub kataloogis samasse gruppi või mitte. Et grupeerimismeetodeid omavahel võrrelda, leiti iga kataloogipaari jaoks järgmised väärtused:

1. galaktikapaaride arv, mis oli mõlemas kataloogis arvatud ühte gruppi,



Joonis 3.1: Galaktikate jaotus enne ning pärast lõiget Lim et al. (2017) kataloogis. Kuvatud on iga viies galaktika.

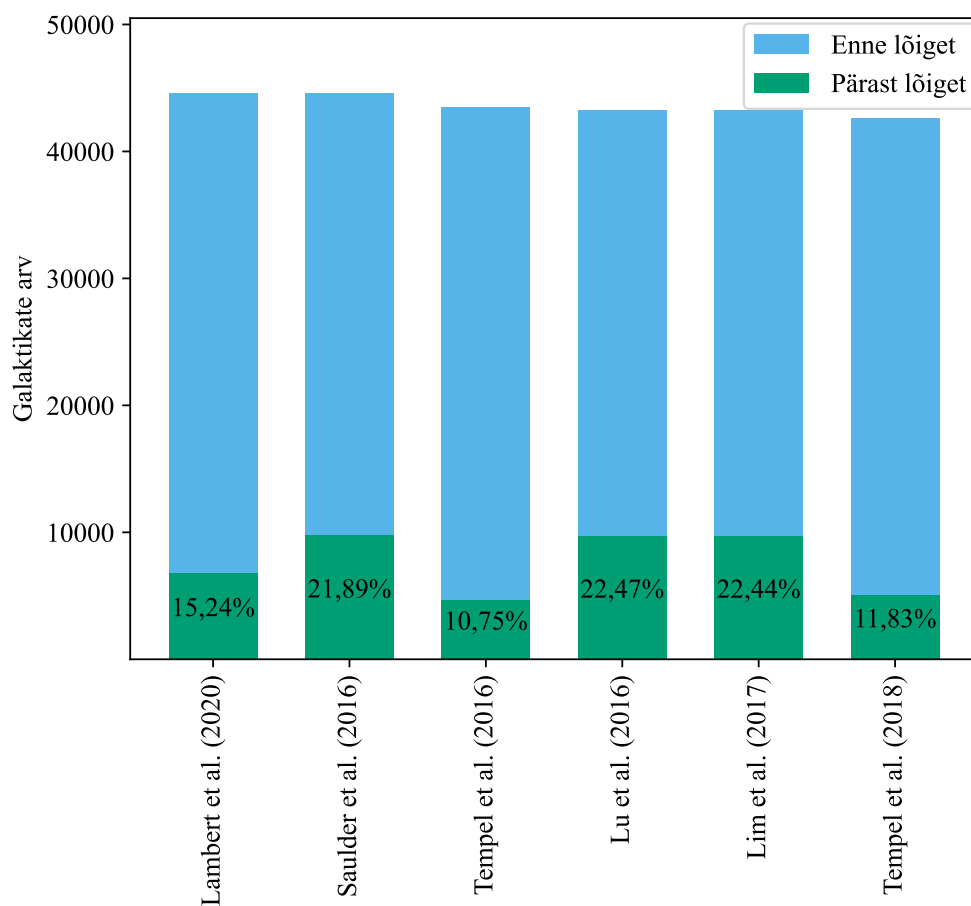
2. galaktikapaaride arv, mis oli esimeses kataloogis arvatud ühte gruppi, kuid mitte teises,
3. galaktikapaaride arv, mis oli teises kataloogis arvatud ühte gruppi, kuid mitte esimeses,
4. galaktikapaaride arv, mis ei olnud nii esimeses kui ka teises kataloogis arvatud ühte gruppi.

Need väärtused jagati läbi mõlemas kataloogis esinevate galaktikapaaride arvuga. Et leida kahe kataloogi kattuvust, liideti kokku loetelu 1. ja 4. punkti protsendid.

Kõiki mainitud võrdlusmeetodeid rakendati andmetele kasutades programmeerimiskeelt Julia (Bezanson et al., 2015). Kõik joonised on kujundatud programmeerimiskeele Python mooduliga matplotlib (Hunter, 2007).

3.2 Tulemused ja arutelu

Tabelist 3.1 on näha, et kuigi keskmine grupi suurus on kataloogides üsna sarnane kõikudes viie-kuue ümber, on maksimaalne grupi suurus väga erinev. Enim erinevad Tempel et al. (2016) ning Lu et al. (2016) kataloogide maksimaalsed galaktikagrupi suurused, nende vahe on 128 galaktikat. Tõenäoliselt tuleneb see sellest, et Tempel et al. (2016) meetodika jagab suured grupid väiksemateks alamgruppideks. Kõikide kataloogide minimaalne grupi suurus on kolm



Joonis 3.2: Galaktikate arv kõigis kuues kataloogis enne ja pärast lõiget. Tulpadel on toodud, millise osa moodustasid pärast lõiget alles jäänud galaktikad esialgsest galaktikate arvust.

eelmainitud galaktikagrupi määratluse tõttu. Lambert et al. (2020) kataloog paistab silma teistest suurema grupis olevate galaktikate arvuga, mis peegeldub ka suuremas galaktikagruppide koguarvus. Kõige vähem on galaktikaid Tempel et al. (2016) ning Tempel et al. (2018) lõigatud kataloogides kuna, nagu enne mainitud, eemaldati neist ka galaktikad, mis ei kuulunud mitte ühtegi gruppi.

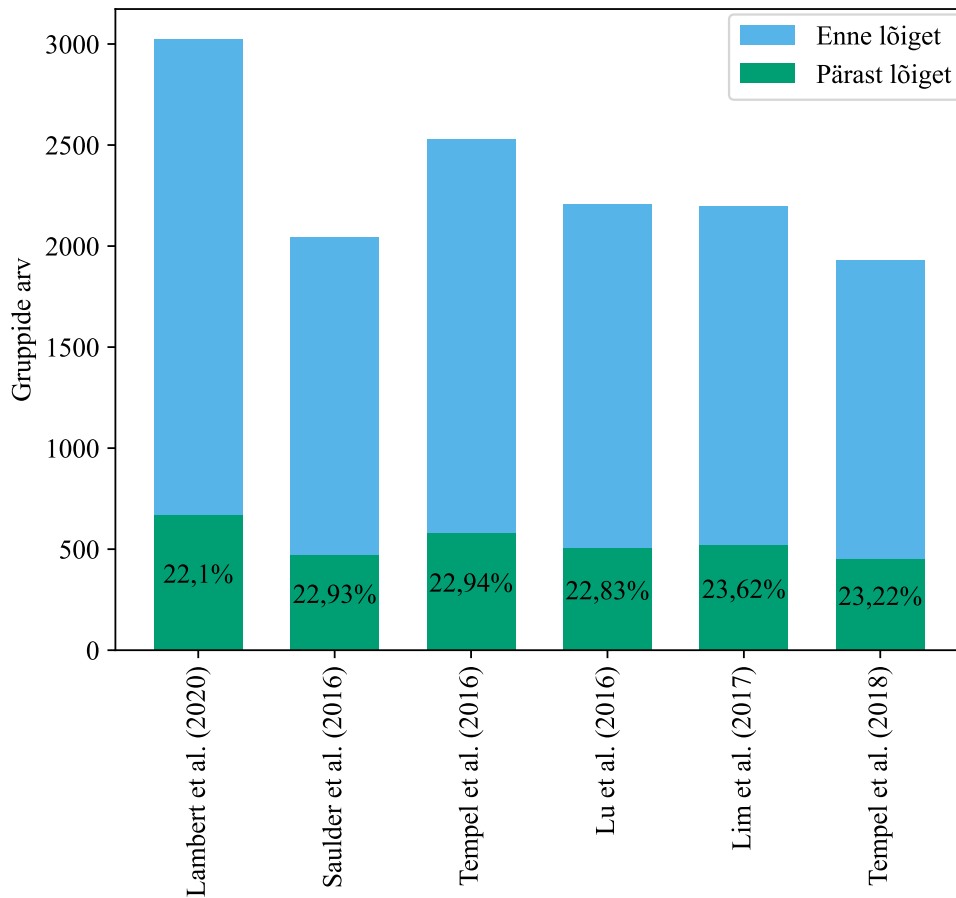
Tabelis 3.2 on toodud võrdlused iga kataloogipaari vahel. Enamik galaktikapaaridest ei kuulunud ühisesse gruppi, kuna kasutati kõikvõimalikke paare galaktika vahel. See tähendab, et suurem osa paare on üksteisest niivõrd kaugel, et ei saagi ühisesse gruppi kuuluda. Ka on näha, et galaktikapaaride protsendid, mille üks kataloogidest arvas ühisesse gruppi ning teine mitte, on väikesed, jäädes alla või pisut üle ühe kõikide kataloogide puhul. Liites kokku galaktikapaaride protsendid, mille mõlemad kataloogid arvasid kas ühisesse gruppi kuuluvaks või mitte ühisesse gruppi kuuluvaks, on suurim kattuvusprotsent, 99,67%, Lambert et al. (2020) ja Lim et al. (2017) kataloogide vahel. Väikseim kattuvus on Lu et al. (2016) ning Tempel et al. (2018) kataloogide vahel, 98,98%. Saadud tulemuste põhjal ei saa öelda, et samasuguse põhimõttega (näiteks FoF

Tabel 3.1: Lõigatud kataloogide andmete ülevaade.

| kataloog | galaktikate arv lõigatud kataloogis | gruppides olevate galaktikate arv | gruppide arv | maksimaalne grupi suurus | keskmine grupi suurus | puuduolevate galaktikate arv |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Lambert et al. (2020) | 6795 | 4358 | 668 | 163 | 6,52 | 6477 |
| Saulder et al. (2016) | 9739 | 2770 | 469 | 205 | 5,91 | 8065 |
| Tempel et al. (2016) | 4674 | 3002 | 580 | 92 | 5,18 | 7833 |
| Lu et al. (2016) | 9716 | 3276 | 504 | 220 | 6,5 | 7559 |
| Lim et al. (2017) | 9707 | 2844 | 519 | 109 | 5,48 | 7991 |
| Tempel et al. (2018) | 5045 | 2486 | 449 | 106 | 5,54 | 8349 |

Tabel 3.2: Iga kataloogipaari (kat. 1 ning kat. 2) omavaheline võrdlus. Sinisega (ülemisel real vasakul) on toodud galaktikapaaride protsent, mis on mõlemas kataloogis ühte gruppi arvatud. Lillaga (ülemisel real paremal) on kirjas galaktikapaaride protsent, mis oli ühte gruppi arvatud kataloog 1 poolt, kuid mitte kataloog 2 poolt. Kollasega (alumisel real vasakul) on märgitud galaktikapaaride protsent, mille arvas ühte gruppi kataloog 2, aga mitte kataloog 1. Rohelisega (alumisel real paremal) on galaktikapaaride protsent, mis ei olnud arvatud ühte gruppi mõlemas kataloogis.

| kat. 2 kat. 1 | Saulder et al. (2016) | | Tempel et al. (2016) | | Lu et al. (2016) | | Lim et al. (2017) | | Tempel et al. (2018) | |
|-----------------------|-----------------------|--------|----------------------|--------|------------------|--------|-------------------|--------|----------------------|--------|
| Lambert et al. (2020) | 0,81% | 0,26% | 0,53% | 0,41% | 0,69% | 0,18% | 0,49% | 0,3% | 0,75% | 0,48% |
| | 0,17% | 98,76% | 0,02% | 99,04% | 0,32% | 98,81% | 0,03% | 99,18% | 0,01% | 98,76% |
| Saulder et al. (2016) | | | 0,58% | 0,53% | 0,94% | 0,25% | 0,59% | 0,48% | 0,75% | 0,53% |
| | | | 0,05% | 98,84% | 0,44% | 98,37% | 0,08% | 98,85% | 0,04% | 98,68% |
| Tempel et al. (2016) | | | | | 0,56% | 0,1% | 0,42% | 0,16% | 0,54% | 0,14% |
| | | | | | 0,76% | 98,58% | 0,2% | 99,22% | 0,2% | 99,12% |
| Lu et al. (2016) | | | | | | | 0,57% | 0,47% | 0,75% | 0,88% |
| | | | | | | | 0,09% | 98,87% | 0,14% | 98,23% |
| Lim et al. (2017) | | | | | | | | | 0,58% | 0,18% |
| | | | | | | | | | 0,24% | 99% |

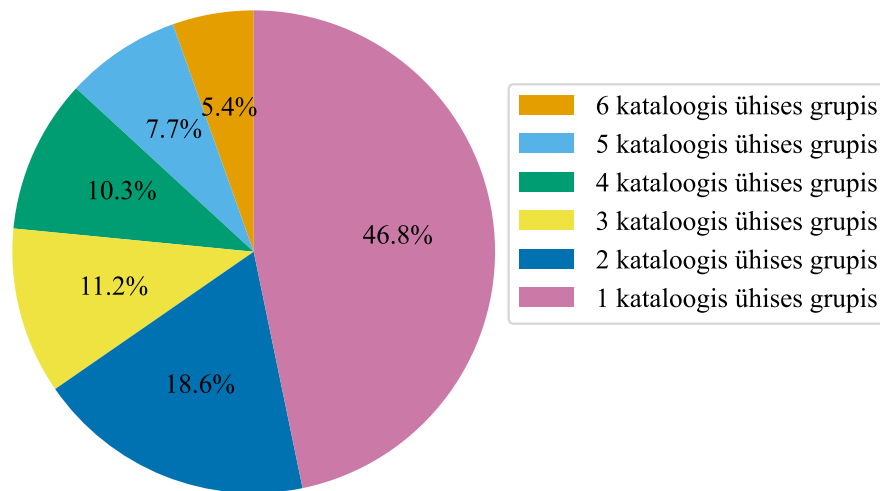


Joonis 3.3: Kolme või enamat liiget omavate galaktikagruppide arv kõigis kuues kataloogis enne ja pärast lõiget. Tulpadel on toodud, mitu protsenti moodustasid pärast lõiget alles jäänud grupid esialgselt gruppide arvust.

algoritmi abil koostatud kataloogid Tempel et al. (2016), Saulder et al. (2016) ning Lambert et al. (2020)) koostatud kataloogide vahel oleks suurem kattuvus kui erineva põhimõttega koostatud kataloogide vahel.

Joonisel 3.4 on toodud, milline osa galaktikapaaridest on arvatud ühte gruppi ühes, kahes, kolmes, neljas, viies ja kuues kataloogis. Arvesse on võetud ainult neid paare, mis on vähemalt ühes kataloogis ühises grupis. Umbes pooled galaktikapaaridest, 46,8%, olid vaid ühe meetodi poolt arvatud ühte gruppi. See näitab, et need tõenäoliselt ei olnud väga tugevalt omavahel seotud. 5,4% galaktikapaaridest olid aga olenemata grupeerimismeetodist ühises grupis ehk "tugevalt seotud" paarid.

Joonisel 3.4 võib ka näha, et on üsna vähe galaktikapaare, mis on kõigis kuues kataloogis arvatud ühte gruppi. Umbes pool paaridest on ühisesse gruppi paigutatud vaid ühes kataloogis ning vähemalt kolmes kataloogis ühisesse gruppi paigutatuid on umbes kolmandik, 34,6%. See tähendab, et meie meetodil leitud tulemuste põhjal on grupid vähem sarnased kui eeldatud.



Joonis 3.4: Galaktikapaaride osakaal galaktikapaaridest, mis on ühte gruppi arvatud vähemalt ühes kataloogis (kokku 91 471 ehk 100%). Ühes kataloogis ühte gruppi arvatud galaktikapaaride arv oli 42 892, (46,8%), kahes kataloogis 17 079 (18,6%), kolmes kataloogis 10 246 (11,2%), neljas kataloogis 9453 (10,3%), viies kataloogis 7085 (7,7%) ning kõigis kuues kataloogis 4986, (5,4%).

Näiteks on Tempel et al. (2018) artiklis kirjeldatud kataloogi võrreldud Tempel et al. (2016) kataloogiga. Ühest kataloogist valiti grupp, millele otsiti vastet teisest kataloogist ja vastupidi. Vaste loeti leituks, kui sellel oli suurim ühiste galaktikate arv vastava grupiga. Omavahel võrreldi galaktikagruppe, mis koosnesid kolmest või enamast galaktikast. 96% protsendile gruppidest Tempel et al. (2018) kataloogis leiti Tempel et al. (2016) kataloogis selge vaste. Samuti võrreldi tulemusi Lambert et al. (2020) artiklis, täpsemalt Tempel et al. (2016), Tempel et al. (2018) kui ka Lim et al. (2017) kataloogidega. Leiti, et Lim et al. (2017) kataloog sarnaneb enim artiklis kirjeldatuga, kui võeti arvesse galaktikagruppe, kus oli kolm või enam liiget. Selline lahknevus võib tuleneda asjaolust, et üksikuid galaktikaid võrreldes on kattuvus väiksem, kuid grupid on siiski pigem sarnased. On võimalik, et grupi äärealadel olevate galaktikate osas on kataloogidel suuremad erinevused, kuid grupi tuumikud kattuvad. Antud hüpoteesi selgitamiseks on vaja läbi viia nii visuaalne kui ka matemaatiline analüüs.

Antud töös määramatusi ei leitud. Tulemuste usaldusväärsust saaks hinnata Monte Carlo meetodi abiga järgmiselt. Kui kataloogide jaoks on leitud, kas galaktikapaar on selles olemas või mitte, tuleb olemasolevatele paaridele anda juhuslikult uus väärtus, mis näitab, kas galaktikapaar esineb kataloogis või mitte. Seejärel tuleb analüüs läbi viia tavapäraselt, kuid uute juhuslike andmetega. See tähendab, et kattuvuse protsendid oleksid samuti juhuslikud. Seda protsessi viidaks läbi vähemalt tuhat korda ning iga lõputöös leitud kattuvuse protsendi kohta oleks mitmeid juhuslikke tulemusi. Kui juhuslikest tulemustest eemaldada 2,5% väiksematest ja suurematest tulemustest,

jääks neist alles 95%. Kui antud lõputöös saadud tulemus ei jää 95% juhuslike tulemuste vahemikku, saab öelda, et päris andmetega leitud tulemus erineb juhuslikult saadud tulemustest 95% usaldusnivool. See tähendab, et lõputöös saadud seos ei ole juhuslik, vaid tõeline.

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli omavahel võrrelda kuut galaktikate grupeerimise meetodit, milleks olid Lambert et al. (2020), Saulder et al. (2016), Tempel et al. (2016), Lu et al. (2016), Lim et al. (2017) ning Tempel et al. (2018) artiklites kirjeldatud meetodid. Need meetodid võib jagada kolmeks: FoF algoritmil põhinevad meetodid, tumeaine halol põhinevad meetodid ning Bayesi meetod. Esimene neist grupeerib omavahel galaktikaid, mis on üksteisele lähemal kui mingi määratud piirkaugus. Tumeaine halodel põhinevad meetodid kasutavad teadmist, et galaktikad, mis asuvad ühes ja samas tumeaine halos kuuluvad ühte gruppi ning kasutavad galaktikate heledusi, et hinnata tumeaine halode masse. Viimane ehk Bayesi meetod mudeldab galaktikate grupeerumise mustrit ning leiab selle põhjal galaktikagruppe.

Kõigist kuuest kataloogist tehti lõige, kus esines 10 835 erinevat galaktikat. Et grupeerimismeetodeid võrrelda, moodustati galaktikatest 58 693 195 paari ning uuriti, kas meetodid grupeerisid neid samamoodi. Iga kataloogipaari kohta leiti galaktikapaaride arv, mis olid mõlemas kataloogis grupeeritud ühisesse gruppi, mis ei kuulunud ühisesse gruppi ning mis olid esimeses kataloogis grupeeritud ühisesse gruppi, aga teises mitte ning vastupidi. Need arvud jagati galaktikapaaride arvuga, mis olid olemas mõlemas kataloogis. Et leida kahe kataloogi kattuvusprotsente, liideti kokku ühisesse gruppi määratud galaktikapaaride ning ühisesse gruppi mitte kuuluvaks määratud galaktikapaaride protsendid. Lisaks võrreldi omavahel kataloogides olevat galaktikagruppide arvu ja ka nende suurusi pärast lõike tegemist. Enim grupe oli Lambert et al. (2020) kataloogis, kokku 668. Vähim grupe leidis Tempel et al. (2018) kataloogis, 449. Suurim grupp 220 liikmega sisaldus Lu et al. (2016) kataloogis. Kõikide kataloogide gruppide keskmised suurused jäid viie-kuue juurde.

Lõputöö tulemused näitavad, et grupeerimismeetodite tulemused kattuvad suures osas. Lisaks on näha, et samasuguse põhimõttega meetodite tulemused ei kattu üksteisega suuremal määral kui erineva põhimõttega meetodite tulemused. Enim kattusid omavahel Lambert et al. (2020) ja Lim et al. (2017) kataloogid ning vähim Lu et al. (2016) ja Tempel et al. (2018).

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajat Moorits Mihkel Muru astronoomilise kannatuse eest. Lisaks tänan oma elukaaslast ning kursusekaaslast, kes töö kirjutamisele kaasa elasid.

Kirjandus

- Allen, S. W., Evrard, A. E., ja Mantz, A. B. (2011). Cosmological parameters from observations of galaxy clusters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49(1):409–470.
- Bahcall, N. A. (1988). Large-scale structure in the universe indicated by galaxy clusters. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 26:631–686.
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., ja Shah, V. B. (2015). Julia: A fresh approach to numerical computing.
- Botzler, C.Š., Snigula, J., Bender, R., ja Hopp, U. (2004). Finding structures in photometric redshift galaxy surveys: an extended friends-of-friends algorithm. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 349(2):425–439.
- Cautun, M., Weygaert, R., Jones, B., ja Frenk, C. (2014). Evolution of the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441:2923.
- Cimatti, A., Fraternali, F., ja Nioti, C. (2019). Introduction to Galaxy Formation and Evolution. From Primordial Gas to Present-Day Galaxies.
- Coil, A. L. (2013). The large-scale structure of the universe. *Planets, Stars and Stellar Systems*, page 387–421.
- Courteau, S., Cappellari, M., de Jong, R.Š., Dutton, A. A., Emsellem, E., Hoekstra, H., Koopmans, L. V. E., Mamon, G. A., Maraston, C., Treu, T., ja et al. (2014). Galaxy masses. *Reviews of Modern Physics*, 86(1):47–119.
- Davis, T. M. ja Scrimgeour, M. I. (2014). Deriving accurate peculiar velocities (even at high redshift). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442(2):1117–1122.
- Farrens, S., Abdalla, F. B., Cypriano, E.Š., Sabiu, C., ja Blake, C. (2011). Friends-of-friends groups and clusters in the 2SLAQ catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417(2):1402–1416.
- Feng, Y. ja Modi, C. (2017). A fast algorithm for identifying Friends-of-Friends halos.

- Hogg, D. W. (1999). Distance measures in cosmology. *arXiv e-prints*.
- Huchra, J. P. ja Geller, M. J. (1982). Groups of Galaxies. I. Nearby groups. *The Astrophysical Journal*, 257:423–437.
- Huchra, J. P., Macri, L. M., Masters, K. L., Jarrett, T. H., Berlind, P., Calkins, M., Crook, A. C., Cutri, R., Erdođdu, P., Falco, E., ja et al. (2012). The 2MASS redshift survey—description and data release. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 199(2):26.
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science Engineering*, 9(3):90–95.
- Lambert, T.Š., Kraan-Korteweg, R. C., Jarrett, T. H., ja Macri, L. M. (2020). The 2MASS redshift survey galaxy group catalogue derived from a graph-theory based friends-of-friends algorithm. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(3):2954–2973.
- Libeskind, N. I., van de Weygaert, R., Cautun, M., Falck, B., Tempel, E., Abel, T., Alpaslan, M., Aragón-Calvo, M. A., Forero-Romero, J. E., Gonzalez, R., ja et al. (2017). Tracing the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(1):1195–1217.
- Lim, S. H., Mo, H. J., Lu, Y., Wang, H., ja Yang, X. (2017). Galaxy groups in the low-redshift universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470(3):2982–3005.
- Lu, Y., Yang, X., Shi, F., Mo, H. J., Tweed, D., Wang, H., Zhang, Y., Li, S., ja Lim, S. H. (2016). Galaxy groups in the 2MASS redshift survey. *The Astrophysical Journal*, 832(1):39.
- Malavasi, N., Aghanim, N., Tanimura, H., Bonjean, V., ja Douspis, M. (2020). Like a spider in its web: a study of the large-scale structure around the Coma cluster. *Astronomy & Astrophysics*, 634:A30.
- Mo, H., van den Bosch, F., ja White, S. (2010). *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press.
- Muñoz, R. P., Motta, V., Verdugo, T., Garrido, F., Limousin, M., Padilla, N., Foëx, G., Cabanac, R., Gavazzi, R., Barrientos, L. F., ja et al. (2013). Dynamical analysis of strong-lensing galaxy groups at intermediate redshift. *Astronomy & Astrophysics*, 552:A80.
- Noh, Y. (2013). *The Large-scale Structure of the Universe: Probes of Cosmology and Structure Formation*. PhD thesis, University of California.
- Roos, M. (2003). *Introduction to Cosmology*. John Wiley Sons, Ltd.
- Saulder, C., van Kampen, E., Chilingarian, I. V., Mieske, S., ja Zeilinger, W. W. (2016). The matter distribution in the local Universe as derived from galaxy groups in SDSS DR12 and 2MRS. *Astronomy & Astrophysics*, 596:A14.

- Tempel, E., Kipper, R., Tamm, A., Gramann, M., Einasto, M., Sepp, T., ja Tuvikene, T. (2016). Friends-of-friends galaxy group finder with membership refinement. *Astronomy & Astrophysics*, 588:A14.
- Tempel, E., Kruuse, M., Kipper, R., Tuvikene, T., Sorce, J. G., ja Stoica, R.Š. (2018). Bayesian group finder based on marked point processes. *Astronomy & Astrophysics*, 618:A81.
- Tinker, J. L. (2020). A self-calibrating halo-based galaxy group finder: Algorithm and tests.
- Wechsler, R. H. ja Tinker, J. L. (2018). The connection between galaxies and their dark matter halos. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1):435–487.
- Weygaert, R. (1998). Large Scale Structure: Setting the Stage for the Galaxy Formation Saga.
- Willman, B. ja Strader, J. (2012). “galaxy,” defined. *The Astronomical Journal*, 144(3):76.
- Yang, X., Mo, H. J., van den Bosch, F. C., ja Jing, Y. P. (2005). A halo-based galaxy group finder: calibration and application to the 2dFGRS. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 356(4):1293–1307.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kerttu Tilk,

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

Galaktikagruppide tuvastamise meetodite võrdlus 2MRS vaatlusprojekti gruppide kataloogide põhjal,

mille juhendaja on Moorits Mihkel Muru, MSc, 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.

Kerttu Tilk,

Tartu, 16. august 2021. a.