

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut
Füüsika eriala

Reelika Pärnpuu

Halo massifunktsiooni reprodutseerimine ja analüüs

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Elmo Tempel, PhD

Tartu 2023

Halo massifunktsiooni reprodutseerimine ja analüüs

Lühikokkuvõte:

Halo massifunktsioon on hea tööriist universumi evolutsiooni ja tumeaine uurimiseks. Käesoleva töö eesmärk on reprodutseerida artiklis Driver et al. (2022) toodud halo massifunktsiooni ning rakendada seda Tartu observatooriumis koostatud galaktikagruppide kataloogile, kus on täiustatud massihinnangud. Töös vaadatakse, kuidas mõjutab grupi piirsuuruse valik halo massifunktsiooni ning võrreldakse GAMA (*Galaxy And Mass Assembly*) andmete ja Tartu observatooriumi andmetega saadud tulemusi. Töö käigus selgus, et suurema grupi piirsuuruse korral langevad tulemused Λ CDM mudelist ennustavaga kõige paremini kokku. Tulemuste põhjal ei saa öelda, et Tartu observatooriumi galaktikagruppide kataloog annab paremaid tulemusi kui GAMA galaktikagruppide kataloog.

Võtmesõnad: Galaktikagrupid, galaktikad, tumeaine, kosmoloogia, tumeaine halod

CERCS: P520 - Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

Reproduction and analysis of halo mass function

Abstract:

The halo mass function is a good tool for studying the evolution of the universe and dark matter. The purpose of this work is to reproduce the halo mass function given in the article by Driver et al. (2022) and then apply it to the catalogue of groups compiled by the Tartu Observatory, which contains improved mass estimates. In this thesis, it will be investigated how the selection of the group size limit affects the halo mass function, and the results obtained with GAMA (*Galaxy And Mass Assembly*) data and Tartu Observatory data will be compared. It turned out that with a larger group size limit, the results coincided the best with predictions by the Λ CDM model. Based on the results that were obtained in this work, it cannot be said that the catalogue of galaxy groups by the Tartu Observatory gives better results than the catalogue of galaxy groups by GAMA.

Keywords: Galaxy groups, galaxies, dark matter, cosmology, dark matter halos

CERCS: P520 - Astronomy, space research, cosmic chemistry

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Ülevaade	5
1.1 Tumeaine	5
1.2 Λ CDM kosmoloogiline mudel	6
1.3 Galaktikagrupid	7
1.4 Galaktikagruppide masside hindamine	8
1.4.1 Dünaamiline meetod	8
1.4.2 Röntgenkiirguse meetod	9
1.4.3 Nõrga gravitatsiooniläätse efekt	10
2 Halo massifunktsioon	11
2.1 Andmed	12
2.2 Halo massifunktsiooni reprodutseerimine	14
3 Tulemused ja arutelu	17
Kokkuvõte	23
Tänuavaldused	24
Kirjandus	28
Lisad	29
Lisa A	29
Litsents	38

Sissejuhatus

Mitmed tõendid viitavad, et universumis peab olema olema mingisugune "nähtamatu" lisamass - tumeaine. Universumi arengu käigus on tumeaine koondunud filamentidesse ning moodustanud tumeaine halod, kuhu on kogunenud ka nähtav aine ja halodes on tekkinud galaktikad ja galaktikagrupid. Kaasaegne kosmoloogia põhineb universumi evolutsiooni kirjeldaval Λ CDM mudelil, mille üheks testiks on halo massifunktsioon. Λ CDM mudeli järgi tekkisid algselt väiksed halod ning hierarhilise kuhjumise järel moodustusid järjest suuremad halod. Selle mudeli järgi on universumis väikse massiga halosid rohkem kui suure massiga halosid. Halo massifunktsioon kirjeldab tumeaine halode arvtihedust massivahemiku või logaritmilise massivahemiku kohta. (Khochfar, 2007; Driver et al., 2022)

Töö eesmärk on reprodutseerida artikli Driver et al. (2022) järgi halo massifunktsiooni ning seejärel rakendada seda Tartu observatooriumi galaktikagruppide kataloogile, milles on täiustatud massihinnangud. Töö käigus tahetakse teada saada, kas Tartu observatooriumi galaktikagruppide kataloog annab paremaid tulemusi kui GAMA (*Galaxy And Mass Assembly*) gruppide kataloog, ning kuidas mõjutab grupi piirsuuruse valik halo massifunktsiooni. Hüpoteesideks on, et Tartu observatooriumis koostatud kataloogi andmetega saadav massifunktsioon on lähedasem Λ CDM mudelist ennustatavaga kui GAMA andmetega saadav massifunktsioon, ning et suurem grupi piirsuuruse valik annab paremaid tulemusi. Töö on aktuaalne, kuna töös kasutatavat metoodikat saab tulevikus rakendada 4MOST (*4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope*) vaatlusprogrammi andmetele.

Töö on jaotatud kolme osasse. Esimeses peatükis antakse ülevaade halo massifunktsiooni mõistmiseks vajalikest üldteadmistest. Teine peatükk selgitab täpsemalt halo massifunktsiooni ning kirjeldatakse ka selle reprodutseerimist artikli Driver et al. (2022) järgi. Kolmandas peatükis tutvustatakse saadud tulemusi ning arutletakse nende üle.

1 Ülevaade

1.1 Tumeaine

Universumis on suur osa ainest, ligi $5/6$, varjatud kujul ehk tumeaine kujul. Tumeaine on hüpoteetiline aine ning seda pole siiani suudetud detekteerida, kuid mitmed tõendid nagu galaktikate pöörlemiskõverad ja universumi struktuur viitavad, et universumis peab olema mingisugune nähtamatu mass. Tumeaine on mittebarüoniline ning arvatakse, et see võib olla nõrgalt interakteeruv. "Tume" ei viita värvile, vaid asjaolule, et tumeaine ei interakteeru elektromagnetväljaga ja seega pole seda näha. Tumeaine osakestele on mitmeid kandidaate, neist tuntuimad on nõrgalt interakteeruvad seisumassiga osakesed (WIMPs). Kandidaatideks on ka näiteks ürgsed mustad augud, aksioni sarnased osakesed (*axion-like particles*) ja hägune tumeaine (*fuzzy dark matter*). (Bahcall ja Kulier, 2014; Einasto, 2009; Wechsler ja Tinker, 2018; Bertone ja Tait, 2018)

Peidetud massi probleem kerkis esile 1930ndatel aastatel. 1932. aastal ilmnisid hollandi astronoomi Jan Henrik Oorti (1932) Linnutee galaktika dünaamilisest uurimusest esimesed märgid tumeaine võimaliku olemasolu kohta. Oort analüüsis tähtede vertikaalset liikumist galaktika tasandi lähedal ja arvutas nende andmete põhjal välja aine vertikaalse kiirenduse. Samuti arvutas ta kõikidest galaktika tasandi lähedal teadaolevatest tähtedest tingitud vertikaalkiirenduse ja selgus, et teadaolevate tähtede tihedustest ei piisa tähtede vertikaalse liikumise selgitamiseks. See viitab, et galaktika tasandi lähedal peab olema mingisugune nähtamatu aine. (Einasto, 2009)

1933. aastal šveitsi astronoomi Fritz Zwicky (1933) Coma parve uurimusest ilmnis, et parve kuuluvate galaktikate orbitaalkiirused on galaktikate masside summast tulenevast oodatud orbitaalkiirustest pea 10 korda suuremad ning seega parve koospüsümise ja kiiruste selgitamiseks on tarvis suures koguses lisamassi. Zwicky selgitas massi puudjääki tumeainega, mis on nii külm, et optilistel vaatlustel seda näha ei ole. (Einasto, 2009; Taylor, 2011)

Järgmised edasimineked toimusid 1970ndatel kui Rubin ja Ford (1970) avaldasid uurimuse Andromeeda galaktikast. Nad kaardistasid galaktika äärealadel olevate tähtede

kiirusi ja koostasid pöörlemiskõverad. Newtoni seaduse järgi on gravitatsiooniline jõud pöördvõrdelises seoses kauguse ruuduga ning seega galaktika ketta äärealade tähed peaksid tiirlema aeglasemalt kui sisealadel (mõhnale lähemal) olevad tähed. Vaatluste järgi aga ketta äärealadel ei olnud tiirlemiskiirused väiksemad, vaid ligikaudu konstantsed. Sellisel juhul (kui eeldada, et galaktika mõhnas olev mass hoiab galaktikat koos), ei tohiks galaktika koos püsida, vaid peaks laiali lendama. Eeldades, et Newtoni mehaanika seadused kehtivad galaktikatele, peab galaktikates olema lisamass. Tuldi välja ideega, et galaktikad paiknevad tumeaine halode sees. (Bahcall ja Kulier, 2014; Taylor, 2011)

70ndate keskpaigas avaldati eredate galaktikate punanihete andmed, millest selgus, et galaktikad ei paikne universumis suvaliselt, vaid moodustavad kette või filamente. Seda kõike aitab selgitada Λ CDM mudel. (Einasto, 2009)

1.2 Λ CDM kosmoloogiline mudel

Kaasaegne kosmoloogia põhineb universumi evolutsioneerumist kirjeldaval Λ CDM mudelil, kus Λ on kosmoloogiline konstant, mis iseloomustab tumeenergiat ning CDM (*cold dark matter*) tähistab külma tumeainet (Driver et al., 2022). "Külm" viitab siinkohal osakese madalale kineetilisele energiale. Arvatakse, et külm tumeaine koosneb mitte-relativistlikest seisumassiga osakestest, mis interakteeruvad üksteise ja tavalise ainega ainult läbi gravitatsioonilise jõu. Osakeste täpne olemus ja mass pole teada. (Taylor, 2011)

Tumeenergia (Λ) on Λ CDM mudelis kirjeldamiseks universumi kiirenevat paisumist. Nimelt avastati 2000ndate aastate paiku supernoovade vaatlustest, et universum paisub kiirenevalt ja selle selgitamiseks kasutavad teoreetikud tumeenergiat - käitumuslikult n-ö gravitatsiooni vastandit. (Perlmutter et al., 1999)

Λ CDM mudeli järgi on universum suurtel mastaapidel isotroopne (universum paistab kõikides suundades ühesugune, pole eelistatud suundi) ja homogeenne (sõltumata asukohast paistab universum igal pool samasugune); ning koosneb peale tavalise (barüonilise) aine, footonite ja neutriinode, ka külmast tumeainest (Cimatti et al., 2019). Mudel selgitab ära nii fluktuatsioonid kosmilises mikrolainelises taustkiirguses, galaktikate suuremastaabili-

se struktuuri kui ka universumi kiireneva paisumise (Taylor, 2011).

Λ CDM mudeli järgi sai universum alguse umbes 13,7 miljardit aastat tagasi Suurest Paugust, mil teadmata põhjustel lõpmatult tihe ja kõrge temperatuuriga singulaarsus hakkas väga kiiresti (eksponentsiaalselt) paisuma - toimus inflatsioon (Frenk ja White, 2012). Inflatsiooni käigus vähenesid universumi keskmiste häirituste amplituudid. Häiritused hakkasid kasvama peale inflatsiooni, kui gravitatsioon hakkas toimima. Esmalt kasvasid tumeaine häiritused ehk tumeaine hakkas koonduma. Tumeaine moodustas klompe - halosid. Tumeaine koondus enne kui barüonaine, kuna tumeaine on vähe interakteeruv. (Einasto, 2009; Cimatti et al., 2019)

Kui universum oli piisavalt paisunud ja jahtunud, sai eelnevalt ioniseeritud gaas hakkata rekombineeruma. Rekombinatsiooni käigus gaas muutus neutraalseks ning kiirgus vabanes ainest. Rekombinatsiooni ajal hakkasid kasvama barüonaine häiritused - gaasilisel kujul olevat tavalist ainet hakkas mõjutama tumeaine gravitatsioon. Tumeaine aga jätkas koondumist ning moodustus kosmiline võrgustik, mis koosneb tumeaine kettidest/filamentidest. Halodesse koondunud aine moodustas tähti ja galaktikaid ning tekkisid ka galaktikate grupid ja parved. (Einasto, 2009; Cimatti et al., 2019)

1.3 Galaktikagrupid

Galaktika on gravitatsiooniliselt seotud süsteem, mis koosneb tähtedest, tähtedevahelisest gaasist ja tolmust, tähtede jäänukitest (valged kääbused, neutrontähed ja mustad augud) ning suurest hulgast tumeainest (Cimatti et al., 2019). Gravitatsiooniliselt seotud galaktikad, galaktikatevaheline gaas ning tumeaine omakorda moodustavad galaktikagrupid. Suuri galaktikagruppe (ligikaudu sadadest kuni tuhandetest heledatest galaktikatest koosnevaid gruppe) nimetatakse galaktikaparvedeks. Kindlat piiri grupi ja parve vahel ei ole. Galaktikagrupid sisaldavad umbes 50% kõikidest universumis olevatest galaktikatest (Eke et al., 2004). Galaktikaparved on suurimad gravitatsiooniliselt stabiilsed süsteemid universumis.

Tumeaine paikneb galaktikate ümber ligikaudu sfääriliselt ning see moodustab tumeaine halo. Ka galaktikagrupid ja -parved tervikuna on mähitud tumeaine halosse. Tumeaine

ongi põhiliselt koondunud galaktikate ja galaktikagruppide halodesse. (Bahcall ja Kulier, 2014; Mo et al., 2010; Wechsler ja Tinker, 2018)

Galaktikaparved on suurusega $\sim 1 - 3 h^{-1} \text{Mpc}$ ja nende massid on $\sim 10^{14} - 10^{15} h^{-1} M_{\odot}$. Parvede massist $\sim 80\%$ on tumeaine mass, $\lesssim 20\%$ on galaktikatevahelise gaasi mass ning mürdosa massist moodustavad enamasti galaktikatesse kuuluvate tähtede, tolmu ja gaasi massid. (Diaferio et al., 2008)

Galaktikate nähtava osa suurus võib olla umbes 0,1 kiloparsekist kuni kümnete kiloparsekiteni. Linnutee galaktika ketta läbimõõt on umbes 20 kiloparsekit ja selle tumeaine halo suuruseks arvatakse olevat kuskil 300 kiloparsekit. Linnutee galaktika mass koos haloga on $\sim 10^{12} M_{\odot}$, millest tähtede mass on $\sim 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ ja gaasi mass on $\sim 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$. (Cimatti et al., 2019)

On olemas ka ülihõredad galaktikad, mis on Linnutee suurused, kuid neis on 1000 korda vähem tähti ja ainet. Neid on keeruline detekteerida, kuna nende pinna heledus on väike. Arvatavasti on Lokaalsest Rühmast veel mitmed ülihõredad galaktikad avastamata. (Newton et al., 2023)

1.4 Galaktikagruppide masside hindamine

Galaktikagruppide masse ei ole võimalik otseselt mõõta, küll aga saab neid hinnata. Vaatame lähemalt kuidas saab kasutada gruppide dünaamikat, röntgenkiirgust ning nõrka gravitatsiooniläätse efekti gruppide masside hindamiseks. Üldiselt täiendavad erinevad massihindamise meetodid üksteist ning parima ja usaldusväärseima tulemuse saab kui kombineerida kõiki meetodeid. Galaktikagruppide mass sisaldab tumeaine halo massi.

1.4.1 Dünaamiline meetod

Dünaamilise meetodiga galaktikagruppide masside hindamiseks kasutatakse galaktikate kiiruseid. Kõikide galaktikate kogumassi leidmiseks galaktikagrupis on võimalik kasutada viriaalteoreemi, mis võimaldab arvutada, kui rasked peavad grupid süsteemi koospüsümiseks olema. Viriaalteoreemi järgi on N punktmassist koosnev süsteem gravitatsioonilises tasakaalus, kui süsteemi kahekordne kineetiline energia on võrdne

potentsiaalse energiaga ehk $2T = U$. Kineetiline energia (T) ja potentsiaalne energia (U) on kujul

$$T = \frac{M\sigma^2}{2}, U = \frac{GM^2}{R},$$

kus σ on kiiruste jaotus grupis, M on grupi kogumass, G on gravitatsioonikonstant ning R on gravitatsiooniline raadius. Kasutades viriaalteoreemi, saame avaldada massi

$$M = \frac{R\sigma^2}{G}.$$

Näeme, et mass on ruutsõltuvuses kiiruse dispersiooniga ja lineaarses sõltuvuses grupi suurusega. Seega grupi massi hindamiseks on oluline leida korrektne grupi kiiruste dispersioon. (Tempel et al., 2014; Taylor, 2011)

1.4.2 Röntgenkiirguse meetod

Galaktikagruppide masse saab arvutada nende röntgenkiirguse põhjal. Universumis on enamus barüone hõreda gaasi kujul, mida on keeruline vaadelda. Galaktikagruppides surub gravitatsioon gaasi kokku ja seetõttu soojeneb see viriaalteratuurideni $10^7 - 10^8$ K. Sellist gaasi saab vaadelda musta kehana ja seega kiirgab see musta keha kiirgust. Antud temperatuuril on musta keha kiirguse maksimum röntgenpiirkonnas, mistõttu kiirgab see hästi vaadeldavat röntgenkiirgust. (Allen et al., 2011)

Nii masse kui ka massijaotust on võimalik leida, kui on teada röntgenkiirguse jaotus parves ning kiirguse spektrist saadav gaasi temperatuur. Arvutamisel eeldatakse, et kuum gaas ja grupi gravitatsiooniväli on hüdrostaatilises tasakaalus, mis tähendab, et gravitatsiooni poolt tekitatud kokkutõmbumine ja kuum gaasi poolt tekitatud gaasi rõhk on tasakaalus ning seega gaasiosakesed liiguvad grupi gravitatsiooniväljas kiirusega, mis vastab grupi massile. (Einasto, 2009; Allen et al., 2011)

Sfäärilise sümmeetria korral saab kasutada valemit

$$M(r) = -\frac{rkT(r)}{G\mu m_p} \left[\frac{d \ln n}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right],$$

kus $M(r)$ on raadiuse sees olev mass ja $T(r)$ on gaasi temperatuur. Gaasiosakeste tihedust väljendab $n(r)$, G on gravitatsioonikonstant, k on Boltzmanni konstant ja μm_p

on keskmine molekulaarne kaal. (Sarazin, 1988)

Röntgenkiirguse meetodil on mõningaid eeliseid viriaalteoreemi kasutamise ees. Röntgenkiirguse meetodi korral toimuvad gaasis põrked ja osakeste kiirused on isotroopiliselt jaotunud. See aga ei kehti viriaalteoreemi kasutamisel, mil galaktikaid kasutatakse testkehadena massi arvutamisel. Röntgenkiirguse meetodiga saab massi funktsioonina raadiusest, aga dünaamilise meetodiga saab vaid grupi kogumassi. Meetod sobib keskmiste ja suurte gruppide masside hindamiseks ($M \geq 10^{13} M_{\odot}$). (Einasto, 2009; Driver et al., 2022)

1.4.3 Nõrga gravitatsiooniläätse efekt

Ilmselt kõige otsesem moodus galaktikaparvede masside mõõtmiseks on nõrga gravitatsiooniläätse efekt, mille käigus moonduvad tuhmide taustgalaktikate kujutised (Applegate et al., 2014). Gravitatsiooniläätse efekti kasutades saab masse määrata läätse dünaamikat arvestamata (Hoekstra ja Jain, 2008). Üldrelatiivsusteooriast teame, et mass kõverdab aegruumi ning valguse jaoks kõige otsem tee on mööda aegruumi kõverat. See tähendab, et gravitatsiooniväljas valguskiirte trajektoorid kõverduvad ja mass toimib justkui kumerläätsena (Bartelmann ja Maturi, 2016).

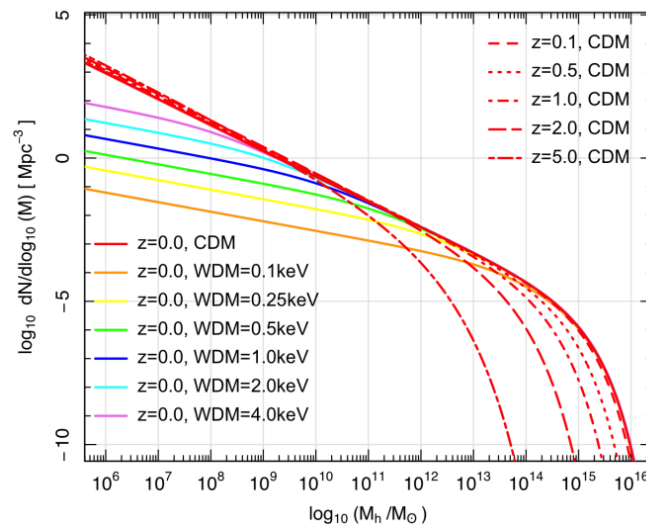
Kui tugeva läätse korral võivad kujutisse tekkida Einsteini rõnga kujutised ja kaared, mida on lihtne tuvastada, siis nõrga läätse korral ei ole läätseefekte nii lihtsasti näha. Nõrga läätse korral on moonutused palju väiksemad ja neid saab tuvastada analüüsides suurt hulka objektide moonutusi. (Einasto, 2009)

Need moonutused võimaldavad kaardistada nii nähtava aine kui ka tumeaine ruumilise jaotuse (Bartelmann ja Maturi, 2016). Gravitatsiooniläätse efekti mõõtmised on tundlikud geomeetria suhtes. Nõrk lääts muudab kujutise umbes 1% võrra elliptilisemaks. (Hoekstra ja Jain, 2008)

2 Halo massifunktsioon

Halo massifunktsioon kirjeldab tumeaine halode arvtihedust massivahemiku või logaritmilise massivahemiku kohta. Mõlemad versioonid on laialdaselt kasutusel. (Driver et al., 2022)

Halo massifunktsioonil on kosmoloogias tähtis koht, kuna seda saab kasutada kosmoloogiliste mudelite, nagu Λ CDM, testimiseks ja seega võimaldab uurida universumi arenemist. Halo massifunktsioon võimaldab saada infot näiteks galaktikate tekkimise ja evolutsiooni kohta, tumeaine olemuse kohta ning aitab mõista kosmilise struktuuri tekkimist. (Driver et al., 2022)



Joonis 1. Halo massifunktsiooni analüütilised ennustused laias halo massivahemikus, halo massifunktsiooni evolutsioon punanihkega ning massifunktsiooni sõltuvus tumeaine osakese massist. Joonis on võetud artiklist Driver et al. (2022). CDM tähistab külma tumeainet ning WDM tähistab sooja tumeainet.

Üheks Λ CDM mudeli ennustuseks on tumeaine halo massifunktsiooni kuju ja amplituud ning selle evolutsioneerumine ajas. Seda on näha joonisel 1. Jooniselt on näha, et mida suurem on punanihe z , ehk mida kauem on möödunud universumi algusest, seda väiksemate massidega on halod. Jooniselt on ka näha (värvilised jooned), et tumeaine osakese

mass mõjutab halo massifunktsiooni madalate halo masside juures. CDM tähistab külma tumeainet ning WDM tähistab sooja tumeainet. Kui külma tumeaine korral on osakesed väheinterakteeruvad ja mitterelativistlikud, siis sooja tumeaine korral on tumeaine osakesed energeetilisemad, liiguvad kiiremini ja interakteeruvad rohkem. Ennustatakse, et suurem osa materiasist paikneb keskmiste ja madalate massidega tumeaine halodes - ligi 60% massivahemikus $10^{14,5} M_{\odot} - 10^{11} M_{\odot}$. (Driver et al., 2022)

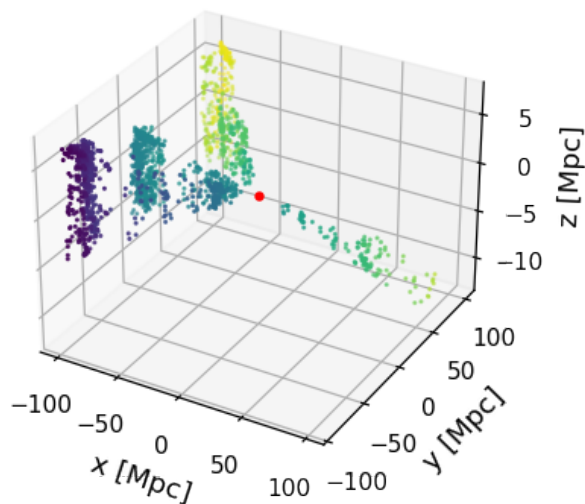
Andmete vaatepunktist sõltub halo massifunktsioon tugevasti gruppide defineerimisest, eriti kui massid on hinnatud gruppide suuruste ja kiiruste jaotuste järgi. Suurt ala katvate spektroskoopiliste vaatluste korral tuleb arvestada andmete spektroskoopilist täielikkust, see eelistab suuri gruppe. Röntgenkiirguse meetodiga ei saa väiksemate halode masse hinnata. (Driver et al., 2022)

2.1 Andmed

Antud töös kasutati massifunktsiooni reprodutseerimiseks GAMA (*Galaxy And Mass Assembly*) spektroskoopilise vaatluse neljanda andmeväljalaske (GAMA DR4) andmeid. Osa nendest andmetest on kujutatud joonisel 2, kus on kujutatud galaktikate koordinaate ning punase täpiga on ära märgitud koordinaatide nullpunkt.

Töös kasutati galaktikagruppide kataloogi "G3CFofGroupv10" ja galaktikate kataloogi "G3CGalv10", mis on kättesaadavad GAMA kodulehel (<http://www.gama-survey.org/dr4/>). Hiljem rakendati massifunktsiooni Tartu observatooriumis koostatud galaktikagruppide kataloogile "ggfind_paperv2_groups", mis põhineb GAMA galaktikate kataloogil, kuid seal on erinevused galaktikate grupeerimises ning gruppide massides.

GAMA vaatlusprogramm on galaktikate punanihete ülevaade, mille üheks eesmärgiks on galaktikagruppide detailne uurimine. GAMA DR 4 sisaldab kombineerituna eelnevate vaatlustega infot 5 taevaala kohta, mis sisaldab üle 300 000 punanihke. Taevaalad G02, G09, G12, G15 ja G23 katavad ligikaudu 250 deg^2 . Antud töös kasutatakse andmeid ekvatoriaalsetest taevaaladest (G09, G12 ja G15), kuna nende andmete täielikkus on väga



Joonis 2. GAMA DR4 galaktikate koordinaadid. Punase täpiga on tähistatud vaatleja asukohta.

kõrge - üle 98%. (Liske et al., 2015; Driver et al., 2022)

Mõlemates kataloogides on masse hinnatud dünaamilise meetodiga. GAMA andmestikus on galaktikad grupeeritud sõbra-sõber (*friends-of-friends*) meetodiga. See meetod seob galaktikad ühtseks süsteemiks kasutades kindlat naabruskonna raadiust LL (*Linking Length*) ehk sidumiskaugust. Iga galaktika jaoks loetakse kõik naabrid, mis mahuvad sidumiskauguse sisse, kuuluvaks samasse süsteemi. (Tempel et al., 2016)

Tartu gruppide kataloog põhineb GAMA galaktikate andmetel. Tartu gruppide kataloogi tegemiseks on kasutatud tõenäosuslikku sõbra-sõber meetodit. Selle meetodiga lubatakse ühel galaktikal kuuluda mitmesse gruppi ning grupi omadused arvutatakse algoritmi jooksumise ajal, mis võimaldab luua grupe, mis on päriselt ka gravitatsiooniliselt seotud.

Sõbra-sõber meetodi korral sõltub galaktikagrupi rikkus tugevasti valitud sidumiskau-

gusest. Üldjuhul on väikeste gruppide massivead suuremad kui suurte gruppide omad. (Driver et al., 2022)

2.2 Halo massifunktsiooni reprodutseerimine

Halo massifunktsiooni reprodutseerimiseks kasutati Jupyter Notebooki keskkonda, valminud koodi põhiosa on näha lisas A. Kuigi gruppide kataloog sisaldab andmeid, kus punanihe $z > 0,4$, kasutati massifunktsiooni koostamiseks andmeid, kus punanihe $z \leq 0,25$, et vähendada halo massifunktsiooni evolutsioneerumisest tulenevaid komplikatsioone ning punanihkest tulenevaid süstemaatilisi vigu masside hindamisel. Veel jäeti andmetest välja grupid, milles on vähem kui n liiget, sest nagu ka eelnevalt mainitud, on väikeste gruppide korral masside hindamise vead suured. Esialgu sai grupi piiriks valitud $n = 5$, kuna sellised andmed on artiklis Driver et al. (2022) arvudena välja toodud. Töös kasutati Planck 2018 kosmoloogiat, selles on Hubble'i konstandi väärtus $H_0 = 67,7 \frac{\text{km}}{\text{Mpc}\cdot\text{s}}$ ja sealt tulenevalt dimensioonitu suurus, Hubble'i parameeter, $h = 0,677$. Kasutati ekvatoriaalsete taevaalade andmeid - G09, G12 ja G15, mis hõlmavad kokku 180 deg^2 .

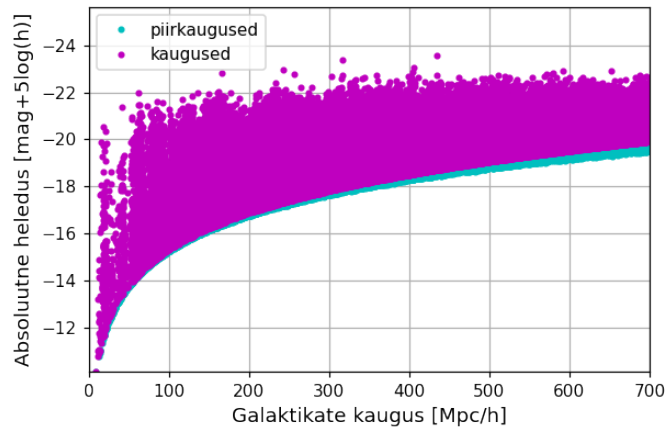
Kõigepealt leiti igale galaktikale absoluutne heledus valemiga

$$M = m - 25 - 5 \log_{10}(d(1+z)), \quad (1)$$

kus d on kaasaliikuv kaugus ühikutes $h^{-1}\text{Mpc}$, z on vaadeldud punanihe ning m on galaktika näiv heledus. Nii näivad heledused kui ka punanihked on kataloogides olemas. Kaasaliikuv kaugus arvutati punanihke abil. Kaasaliikuv kaugus arvestab ruumi paisumisega ning seega ei muutu ajas.

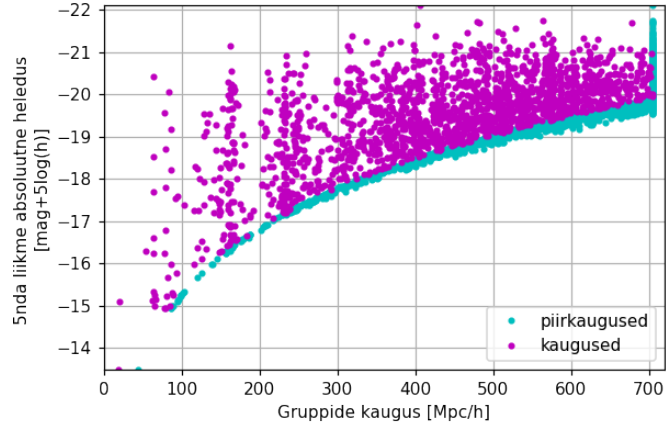
Saadud absoluutsete heledustega leiti valemi 1 abiga igale galaktikale piirkaugus ehk kaugus, mil galaktika heledus langeb alla teatud näiva heleduse, mis meie juhul on 19,8 mag. Seda illustreerib joonis 3, kus on kujutatud nii galaktikate kaugused kui ka leitud piirkaugused ning galaktikate absoluutsed heledused. Kujutatud on galaktikaid, mis kuuluvad gruppidesse, kus on vähemalt 5 liiget.

Seejärel leiti galaktikate heleduste ja piirkauguste abil galaktikagruppidele piirkaugused ehk kaugus, mil saame antud gruppi veel grupina vaadelda. Näiteks kui valitakse grupi



Joonis 3. Galaktikate absoluutse heleduse sõltuvus galaktika kaugusest ja piirkaugusest $n = 5$ korral.

piirarvuks $n = 5$ ja võetakse mingisugune 10-liikmeline grupp, siis seda kaugemale viies, hakkavad liikmed "kaduma" ja piirkauguseks on kaugus, kus grupis on nähtavaks jäänud 5 liiget. Grupi piirkauguse leidmiseks vaadati läbi iga grupi liikmete absoluutsed heledused ning järjestati need. Grupi piirkauguseks määrati n -nda absoluutse heledusega galaktika piirkaugus. Juhul kui grupile määratud piirkaugus oli suurem kui punanihkele $z = 0,25$ vastav kaugus ($\approx 704,3 h^{-1} \text{Mpc}$), siis määrati grupi piirkauguseks just $z = 0,25$ vastav kaugus. Seda illustreerib joonis 4, kus on kujutatud galaktikagruppide absoluutse heleduse poolest 5ndate liikmete absoluutsed heledused ning grupi kaugused ja piirkaugused.



Joonis 4. Galaktikagrupi 5nda liikme absoluutse heleduse sõltuvus kaugusest ja piirkaugusest. Punanihkele 0,25 vastavast kaugusest suuremad piirkaugused on võrdseks võetud punanihkele 0,25 vastava kaugusega.

Grupi piirkauguste abil leiti gruppidele kaasaliikuvad ruumalad. Selleks leiti esmalt sfääri ruumala, kus raadiuseks on piirkaugus ehk $V_{sf} = \frac{4\pi R^3}{3}$ ning see korrutati läbi vaatluse all olevale taevalale vastava osakaaluga. Osakaalu saamiseks jagati taevala (180 deg^2) sfääri pindalaga ruutkraadides ($360^2/\pi$). Seega otsitav ruumala on leitav kujul

$$V_{max} = V_{sf} \cdot \frac{180\pi}{360^2}. \quad (2)$$

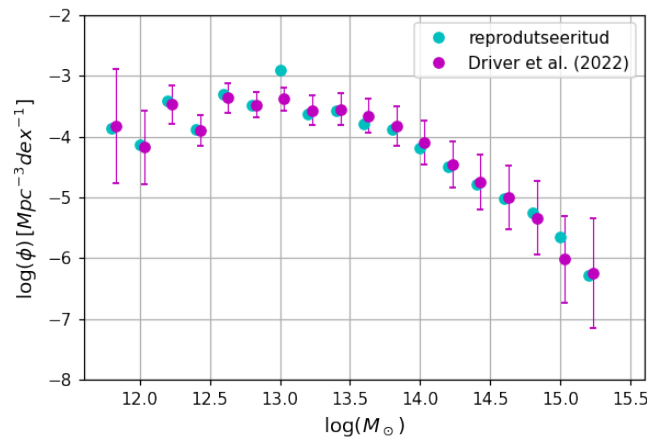
Seejärel sai rakendada lihtsustatud massifunktsiooni, kus Eddingtoni kallutatuse (*bias*) korrigeerimiseks massivahemiku kohta võeti $w_i = 1$. Halo massifunktsioon avaldub kujul

$$\phi(\log_{10}[M/M_{\odot}]) = \sum_{i=0}^{N_{group}} \left(\frac{w_i}{V_{max}^i \Delta \log_{10} M} \right), \quad (3)$$

kus $\Delta \log_{10} M$ on logaritmiline massivahemik ja V_{max}^i tähistab valemiga 2 leitavat ruumala. Halo massifunktsiooni leidmiseks võeti galaktikagruppide halode massidest kümnendlogaritm ning jaotati need vahemikesse. Igas vahemikus olevad pöödruumalad liideti kokku ning ruumala korrutati valitud vahemiku logaritmilise laiusga.

3 Tulemused ja arutelu

Reprodutseerimise õigsuse kontrollimiseks arvutati halo massifunktsioon grupi piirsuuruse $n = 5$ korral ja kanti saadud tulemused ning artiklis Driver et al. (2022) toodud tulemused ühele graafikule. Ilmnes, et tõenäoliselt on artiklis toodud tulemustes Hubble'i parameetritega kuskil viga tehtud ja seetõttu korrigeeriti neid andmeid. Saadud tulemust on näha jooniselt 5. Graafiku y-teljel on toodud halode arvtihedus logaritmilises skaalas ning x-teljel on halo massid logaritmilises skaalas. Artiklis toodud andmed on x-teljel $+\log(h)$ võrra korrigeeritud. Sellisel juhul langesid reprodutseeritud tulemused ja artiklis esitatud tulemused üldjuhul hästi kokku.



Joonis 5. Halo massifunktsiooni graafik $n = 5$ korral. Artikli Driver et al. (2022) andmeid on x-teljel korrigeeritud $+\log(h)$ võrra.

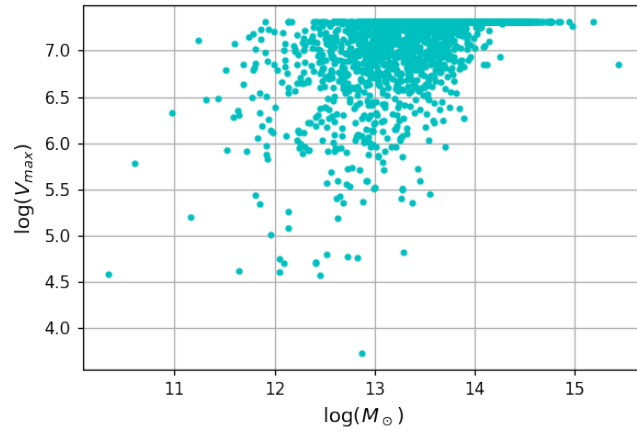
Tulemuste (logaritmiliste arvtiheduste) erinevused on toodud tabelis 1. Tulemuste erinevuse leidmiseks jagati reprodutseeritud tulemused Driver et al. (2022) tulemustega, lahutati vastav osamäär ühest ja teisendati tulemused protsentideks. Väikesed erinevused esinevad, kuna reprodutseerimine ei ole täiesti identne, järgiti reprodutseerimise ideed. Näiteks võivad erinevused tulla massivahemike defineerimisest. Kõige halvemini langevad reprodutseeritud tulemused ja Driver et al. (2022) tulemused kokku massi $\log(M_\odot) = 13,0$ juures, kus tulemuste erinevus on 13,86%. Seda selgitab joonis 6.

Tabel 1. Reprodutseerimise ja Driver et al. (2022) tulemuste erinevus.

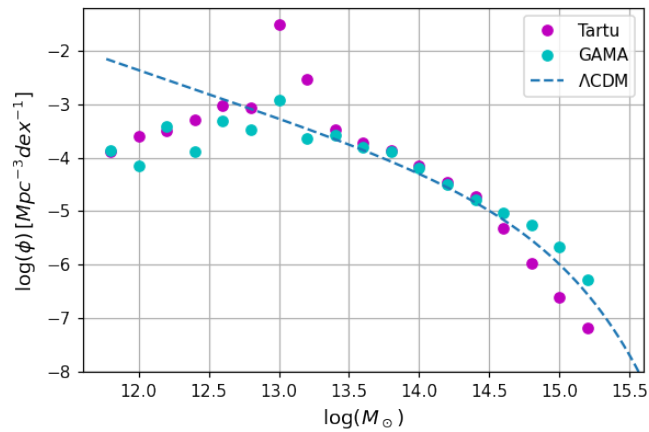
Logaritmilise massivahemiku keskkohk	Logaritmiliste arvutiheduste erinevus (%)
11,8	-0,98
12,0	0,82
12,2	1,79
12,4	0,59
12,6	1,54
12,8	0,10
13,0	13,86
13,2	-1,82
13,4	-0,62
13,6	-3,76
13,8	-1,45
14,0	-2,25
14,2	-0,80
14,4	-0,67
14,6	-0,42
14,8	1,60
15,0	5,93
15,2	-0,71

Joonisel 6 on kujutatud reprodutseerimisel kasutatavate galaktikagruppide logaritmilised massid ja logaritmilised ruumalad. On näha, et $\log(M_{\odot}) = 13,0$ lähedal on grupp, mille ruumala on teistest väiksem. Tõenäoliselt see grupp põhjustabki joonisel 5 massifunktsioonis $\log(M_{\odot}) = 13,0$ juures suuremat tulemuste erinevust. Üldiselt saab järeldada, et tulemuste reprodutseerimine õnnestus ning seetõttu saab valminud koodi kasutada ka teiste andmetega.

Rakendades koodi Tartu observatooriumi galaktikagruppide kataloogi andmetele, juhul kui grupi piirsuuruseks võeti $n = 5$, saadi joonis 7. Graafikule on võrdluseks pandud



Joonis 6. Logaritmilise massi sõltuvus logaritmisest ruumalast grupi piirarvu $n = 5$ korral. Kujutatud on GAMA andmeid.

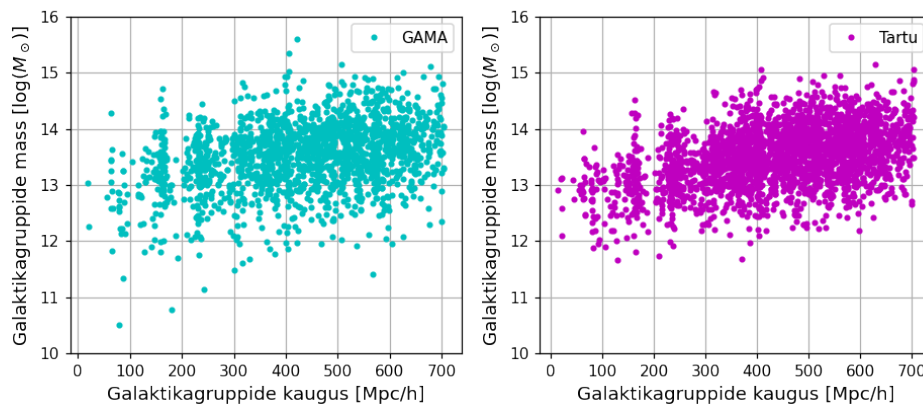


Joonis 7. Halo massifunktsioon Tartu observatooriumi andmete ja GAMA andmetega $n = 5$ korral. Λ CDM mudelist tulenev punktiirjoon vastab efektiivsele punanihkele $z = 0,1$.

GAMA andmetega saadud reprodutseeritud tulemused ja lisatud on ka Λ CDM mudelist tulenev joon, mis vastab külmale tumeainele efektiivsel punanihkel $z = 0,1$. Selle joone tegemiseks kasutati allikaid Murray et al. (2013) ja Murray et al. (2021). Teljed on samad,

mis joonisel 5.

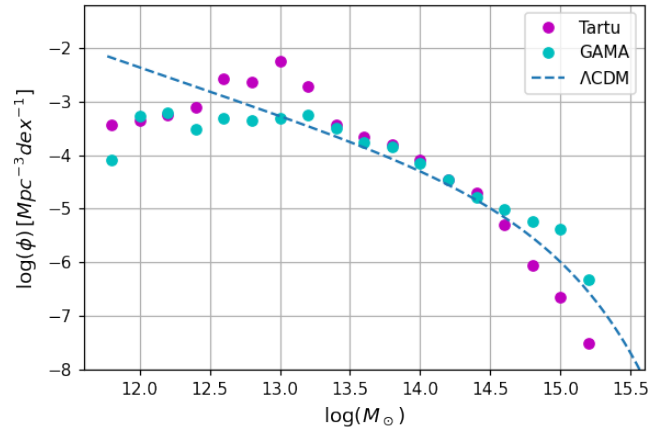
Joonisel 7 logaritmilises massivahemikus $\log(M_{\odot}) = 13,4 \dots 14,4$ on GAMA andmetega ja Tartu andmetega saadud tulemused praktiliselt samad ja järgivad Λ CDM mudeli joont hästi. GAMA andmed järgivad joont hästi ka suuremate masside korral. Tartu andmed jäävad suurte masside korral ennustatava joone alla. Need andmed järgiks nagu suurema punanihkega Λ CDM mudeli joont. Tartu andmetes on näha "hüpe" $\log(M_{\odot}) = 13,0$ juures. Seda selgitab joonis 8.



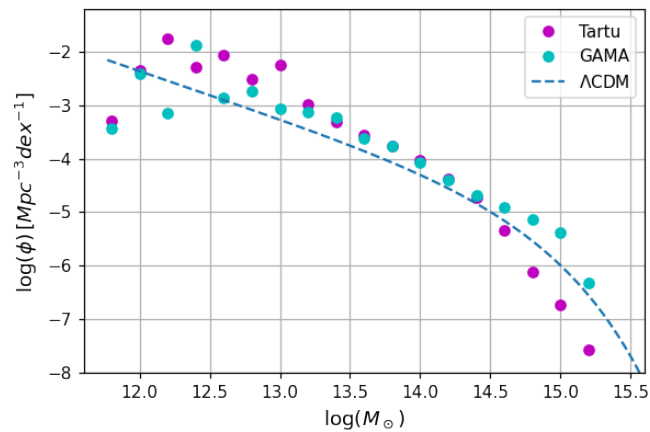
Joonis 8. Galaktikagruppide masside sõltuvus galaktikagruppide kaugustest. Vasakpoolisel graafikul on kujutatud GAMA andmeid ning parempoolisel graafikul on kujutatud Tartu observatooriumi andmeid $n = 5$ korral ja $z \leq 0,25$.

Joonisel 8 on vasakpoolisel paneelil on kujutatud GAMA andmeid ja parempoolisel Tartu andmeid. Kujutatud on galaktikagruppide masside sõltuvust galaktikagruppide kaugustest, juhul kui grupi piirarv on $n = 5$. Sealt on näha, et GAMA andmestiku massid on hajusamad kui Tartu andmestiku massid. GAMA kataloogis on rohkem väikseid ja suuri masse, Tartu andmed on keskmiste masside juures tihedamad. See selgitabki hüpet $\log(M_{\odot}) = 13,0$ juures.

Vaatame, kuidas sõltuvad tulemused grupi piiri n valikust. Kui valida piiriks $n = 4$, saame Tartu observatooriumi ja GAMA andmetega joonise 9. Kasutades andmeid ka kolmeliikmelistest gruppidest saame joonise 10. Mõlemal joonisel Λ CDM mudelist



Joonis 9. Halo massifunktsioon Tartu observatooriumi andmete ja GAMA andmetega $n = 4$ korral. Λ CDM mudelist tulenev punktiirjoon vastab efektiivsele punanihkele $z = 0,1$.



Joonis 10. Halo massifunktsioon Tartu observatooriumi andmete ja GAMA andmetega $n = 3$ korral. Λ CDM mudelist tulenev punktiirjoon vastab efektiivsele punanihkele $z = 0,1$.

tulenev joon vastab efektiivsele punanihkele $z = 0,1$. On näha, et kõige rohkem muutub massifunktsiooni väikeste masside ots, mis on loogiline, sest väikseid grappe on rohkem ja enamasti on väikestel gruppidel ka väikesed massid ning nagu eespool mainitud, on väikeste masside hindamisel vead suured. Suuremate masside ots muutub suhteliselt vähe.

Küll aga on GAMA andmete puhul näha joonistel 9 ja 10 väikest "hüpet" $\log(M_{\odot}) = 15,0$ juures. Tartu massifunktsioon on suuremate masside juures stabiilsem ja siledam.

Joonistel 9 ja 10 langevad GAMA andmestiku ja Tartu andmestiku tulemused keskmiste masside juures endiselt hästi kokku. Küll aga võib täheldada, et grupi piirarvu vähenedes eemalduvad keskmiste massidega tulemused Λ CDM mudelist ennustatavast. Seega saab järeldada, et $n = 5$ korral järgivad andmed kõige paremini Λ CDM mudelist ennustavat, eriti keskmiste ja suurte masside korral.

Kokkuvõttes, massifunktsiooni reprodutseerimine õnnestus, kuna artiklis Driver et al. (2022) toodud tulemused langesid reprodutseeritavatega hästi kokku, kui artikli andmeid nihutada x-teljel $+\log(h)$ võrra, mis võimaldas kasutada massifunktsiooni ka Tartu andmetega. GAMA andmestiku ja Tartu andmestikuga saadud massifunktsioonide võrdlusest ilmnas, et tuues sisse väiksemate gruppide andmeid, muutub massifunktsioon ebatäpsemaks. Kõige suuremad muutused ilmnevad väikeste masside otsas. GAMA ja Tartu andmed langevad hästi kokku keskmiste masside juures. Küll aga grupi piirsuuruse vähenedes eemalduvad need veidi Λ CDM mudeli ennustatavast joonest, mistõttu saab järeldada, et suuremate grupi piirsuurustega saab paremaid tulemusi kui väiksemate grupi piirsuurustega. Grupi piirsuuruse vähenedes on Tartu andmed keskmiste ja suurte masside korral siledamad kui GAMA andmed. Antud töö tulemuste põhjal ei saa öelda, et Tartu observatooriumi gruppide kataloog annab paremaid tulemusi kui GAMA galaktikagruppide kataloog.

Tööd saab edasi arendada, kui arvestada ka masside veahinnanguid. Artikli Driver et al. (2022) järgi saaks leida ka Eddingtoni kallutatuse ja seejärel saab parandatud massifunktsiooni kasutada. On võimalik välja selgitada, kui suurt mõju omab korrektne masside hindamine halo massifunktsioonile.

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli reprodutseerida artikli Driver et al. (2022) järgi halo massifunktsiooni ning seejärel rakendada seda Tartu observatooriumis koostatud galaktikagruppide kataloogile ning võrrelda ja analüüsida saadud tulemusi. Töö eesmärgid täideti.

Lugejale anti esimeses peatükis halo massifunktsiooni mõistmiseks ülevaade tumeainest. Tutvustati universumi evolutsioneerumist kirjeldavat Λ CDM mudelit. Räägiti lähemalt ka galaktikagrupidest ning nende masside hindamise viisidest.

Töö teises peatükis tutvustati lähemalt halo massifunktsiooni ning kirjeldati ka töös kasutatavaid andmeid. Anti ülevaade halo massifunktsiooni reprodutseerimisest GAMA neljanda väljalaske andmetega Driver et al. (2022) järgi.

Kolmandas peatükis kirjeldati ja arutati saadud tulemuste üle. Massifunktsiooni reprodutseerimine õnnestus - reprodutseeritud tulemused langesid artiklis Driver et al. (2022) saadud tulemustega hästi kokku, kui sisse viidi parandus $+\log(h)$ võrra. Selgus, et suurema grupi piirsuuruse n korral langevad tulemused Λ CDM mudelist ennustatavaga kõige paremini kokku - eelkõige keskmiste ja suurte masside puhul. Saadud tulemuste põhjal ei saa öelda, et Tartu observatooriumis koostatud galaktikagruppide kataloog annab paremaid tulemusi kui GAMA galaktikagruppide kataloog - seega vastav hüpotees ei osutunud tõseks.

Tänuavaldused

Soovin avaldada tänu oma juhendajale Elmo Templile, kes pühendunult juhendas mind töö koostamisel ja andis väärtuslikke nõuandeid. Samuti tänan Tartu observatooriumi töötajaid ettepanekute ja tagasiside eest ning kursusekaaslaseid toetuse eest.

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. arXiv:1103.4829 [astro-ph].
- Applegate, D. E., von der Linden, A., Kelly, P. L., Allen, M. T., Allen, S. W., Burckhardt, P. R., Burke, D. L., Ebeling, H., Mantz, A., ja Morris, R. G. (2014). Weighing the Giants - III. Methods and Measurements of Accurate Galaxy Cluster Weak-Lensing Masses. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439(1):48–72. arXiv:1208.0605 [astro-ph].
- Bahcall, N. A. ja Kulier, A. (2014). Tracing mass and light in the Universe: where is the dark matter? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439(3):2505–2514. arXiv:1310.0022 [astro-ph].
- Bartelmann, M. ja Maturi, M. (2016). Weak gravitational lensing. arXiv:1612.06535 [astro-ph].
- Bertone, G. ja Tait, T. M. P. (2018). A new era in the search for dark matter. *Nature*, 562(7725):51–56. Number: 7725 Publisher: Nature Publishing Group.
- Cimatti, A., Fraternali, F., ja Nipoti, C. (2019). Introduction to Galaxy Formation and Evolution. From Primordial Gas to Present-Day Galaxies. arXiv:1912.06216 [astro-ph].
- Diaferio, A., Schindler, S., ja Dolag, K. (2008). Clusters of galaxies: setting the stage. *Space Science Reviews*, 134(1-4):7–24. arXiv:0801.0968 [astro-ph].
- Driver, S. P., Robotham, A. S. G., Obreschkow, D., Peacock, J. A., Baldry, I. K., Bellstedt, S., Bland-Hawthorn, J., Brough, S., Cluver, M., Holwerda, B. W., Hopkins, A., Lagos, C., Liske, J., Loveday, J., Phillipps, S., ja Taylor, E. N. (2022). An empirical measurement of the Halo Mass Function from the combination of GAMA DR4, SDSS DR12, and REFLEX II data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515(2):2138–2163. arXiv:2203.08540 [astro-ph].
- Einasto, J. (2009). Dark Matter. arXiv:0901.0632 [astro-ph] version: 1.

- Eke, V. R., Baugh, C. M., Cole, S., Frenk, C.Š., Norberg, P., Peacock, J. A., Baldry, I. K., Bland-Hawthorn, J., Bridges, T., Cannon, R., Colless, M., Collins, C., Couch, W., Dalton, G., De Propris, R., Driver, S. P., Efstathiou, G., Ellis, R.Š., Glazebrook, K., Jackson, C., Lahav, O., Lewis, I., Lumsden, S., Maddox, S., Madgwick, D., Peterson, B. A., Sutherland, W., ja Taylor, K. (2004). Galaxy groups in the 2dFGRS: the group-finding algorithm and the 2PIGG catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 348(3):866–878. arXiv:astro-ph/0402567.
- Frenk, C.Š. ja White, S. D. M. (2012). Dark matter and cosmic structure. *Annalen der Physik*, 524(9-10):507–534. arXiv:1210.0544 [astro-ph, physics:hep-th].
- Hoekstra, H. ja Jain, B. (2008). Weak Gravitational Lensing and its Cosmological Applications. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 58(1):99–123. arXiv:0805.0139 [astro-ph].
- Khochfar, S. (2007). The hierarchical build-up of bulges in CDM. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 3(S245):55–58. Publisher: Cambridge University Press.
- Liske, J., Baldry, I. K., Driver, S. P., Tuffs, R. J., Alpaslan, M., Andrae, E., Brough, S., Cluver, M. E., Grootes, M. W., Gunawardhana, M. L. P., Kelvin, L.Š., Loveday, J., Robotham, A. S. G., Taylor, E. N., Bamford, S. P., Bland-Hawthorn, J., Brown, M. J. I., Drinkwater, M. J., Hopkins, A. M., Meyer, M. J., Norberg, P., Peacock, J. A., Agius, N. K., Andrews, S. K., Bauer, A. E., Ching, J. H. Y., Colless, M., Conselice, C. J., Croom, S. M., Davies, L. J. M., De Propris, R., Dunne, L., Eardley, E. M., Ellis, S., Foster, C., Frenk, C.Š., Häußler, B., Holwerda, B. W., Howlett, C., Ibarra, H., Jarvis, M. J., Jones, D. H., Kafle, P. R., Lacey, C. G., Lange, R., Lara-López, M. A., López-Sánchez, R., Maddox, S., Madore, B. F., McNaught-Roberts, T., Moffett, A. J., Nichol, R. C., Owers, M.Š., Palamara, D., Penny, S. J., Phillipps, S., Pimblet, K. A., Popescu, C. C., Prescott, M., Proctor, R., Sadler, E. M., Sansom, A. E., Seibert, M., Sharp, R., Sutherland, W., Vázquez-Mata, J. A., van Kampen, E., Wilkins, S. M., Williams, R., ja Wright, A. H. (2015). Galaxy And Mass Assembly (GAMA): end of survey report and data release 2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(2):2087–2126.

- Mo, H., van den Bosch, F. C., ja White, S. (2010). *Galaxy Formation and Evolution*. Publication Title: Galaxy Formation and Evolution ADS Bibcode: 2010gfe..book.....M.
- Murray, S., Power, C., ja Robotham, A. (2013). HMFcalc: An Online Tool for Calculating Dark Matter Halo Mass Functions. arXiv:1306.6721 [astro-ph].
- Murray, S. G., Diemer, B., Chen, Z., Neuhold Jr., A. G., Schnapp, M. A., Peruzzi, T., Blevins, D., ja Engelman, T. (2021). TheHaloMod: An online calculator for the halo model. *Astronomy and Computing*, 36:100487. arXiv:2009.14066 [astro-ph].
- Newton, O., Cintio, A. D., Cardona–Barrero, S., Libeskind, N. I., Hoffman, Y., Knebe, A., Sorce, J. G., Steinmetz, M., ja Tempel, E. (2023). The Undiscovered Ultradiffuse Galaxies of the Local Group. *The Astrophysical Journal Letters*, 946(2):L37. Publisher: The American Astronomical Society.
- Oort, J. H. (1932). The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 6:249. ADS Bibcode: 1932BAN.....6..249O.
- Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., Knop, R. A., Nugent, P., Castro, P. G., Deustua, S., Fabbro, S., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I. M., Kim, A. G., Kim, M. Y., Lee, J. C., Nunes, N. J., Pain, R., Pennypacker, C. R., Quimby, R., Lidman, C., Ellis, R.Š., Irwin, M., McMahon, R. G., Ruiz-Lapuente, P., Walton, N., Schaefer, B., Boyle, B. J., Filippenko, A. V., Matheson, T., Fruchter, A.Š., Panagia, N., Newberg, H. J. M., ja Couch, W. J. (1999). Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517(2):565–586. arXiv:astro-ph/9812133.
- Rubin, V. C. ja Ford, Jr., W. K. (1970). Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. *The Astrophysical Journal*, 159:379. ADS Bibcode: 1970ApJ...159..379R.
- Sarazin, C. L. (1988). *X-ray emission from clusters of galaxies*. Publication Title: Cambridge Astrophysics Series ADS Bibcode: 1988xrec.book.....S.
- Taylor, J. E. (2011). Dark Matter Halos from the Inside Out. *Advances in Astronomy*, 2011:1–17.

- 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. Application to the local Universe. *Astronomy & Astrophysics*, 588:A14. arXiv:1601.01117 [astro-ph].
- Tempel, E., Tamm, A., Gramann, M., Tuvikene, T., Liivamägi, L. J., Suhhonenko, I., Kipper, R., Einasto, M., ja Saar, E. (2014). Flux- and volume-limited groups/clusters for the SDSS galaxies: catalogues and mass estimation. *Astronomy & Astrophysics*, 566:A1. arXiv:1402.1350 [astro-ph].
- 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. arXiv:1804.03097 [astro-ph].
- Zwicky, F. (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6:110–127. ADS Bibcode: 1933AcHPh...6..110Z.

Lisad

Lisa A

Pythoni kood halo massifunktsiooni reprodutseerimiseks ning rakendamiseks Tartu observatooriumi andmetele.

```
1 from astropy.table import Table
2 from astropy.table import Column
3 from astropy import units as u
4 import numpy as np
5 from astropy.cosmology import Planck18 as cosmo
6 from matplotlib.pyplot import*
7 from hmf import MassFunction
8
9 mf=MassFunction(cosmo_model=cosmo,z=0.1, Mmin=11.6, Mmax=16)
10
11 n=5 #grupi piirarv
12
13 gr=Table.read('G3CFoFGroupv10.fits') #galaktikate kataloog
14
15 gr_new=gr[ gr['Nfof'] >= n ] #eemaldab gruppide kataloogist liiga
    ↪ väiksed grupid
16
17 gr_new=gr_new[ gr_new['Zfof'] <= 0.25 ] #eemaldab liiga väikese
    ↪ punanihkega grupid
18
19 gr_new=gr_new[gr_new['IterCenRA']>100] #eemaldab G02
20
21 gr_new=gr_new[ gr_new['MassA']>0] #eemaldab massideta grupid
22
23 gal=Table.read('G3CGalv10.fits') #gruppide kataloog
24
```

```

25 gal_new= gal[ gal['GroupID'] != 0 ] #eemaldab galaktikad mis gruppi ei
    ↪ kuulu
26
27 gal_new=gal[gal['RA']>100]#eemaldab G02
28
29 #leiab kaasaliikuvad kaugused galaktikatele punanihete järgi
30 col_dist=Column(name='dist',
    ↪ data=cosmo.comoving_distance(gal_new['Z']))
31 gal_new.add_column(col_dist)
32
33
34 #-----galaktika absoluutse heleduse leidmine
35 m_gal=gal_new['Rpetro'] #galaktika näiv heledus
36
37 z_gal=gal_new['Z'] #punanihe
38
39 dist=gal_new['dist']*cosmo.h #kaugus
40
41 M_gal=m_gal-25-5*np.log10(dist*(1+z_gal)) #arvutab absoluutse heleduse
42
43 col_M_gal=Column(name='M_gal', data=M_gal )
44 gal_new.add_column(col_M_gal) #lisab absoluutsed heledused kataloogi
45
46
47 #-----galaktika piirkauguste leidmine
48 piirheledus=19.8 #mag
49
50 dL=10**((piirheledus-25-M_gal)/5)
51
52 d_piiir_gal=dL/(1+z_gal) #galaktika piirkaugus
53
54 col_d_piiir = Column(name='d_piiir', data=d_piiir_gal )
55 gal_new.add_column(col_d_piiir) #lisab piirkaugused kataloogi
56

```

```

57
58 #galaktikate piirkauguste graafik
59 figure(dpi=110)
60 fs=12 #font
61
62 plot(d_piiir_gal,M_gal,'c.',label='piirkaugused')
63 plot(dist, M_gal,'m.',label='kaugused')
64
65 xlabel('Galaktikate kaugus [Mpc/h]',fontsize=fs)#h^-1 Mpc
66 ylabel('Absoluutne heledus [mag+5log(h)]',fontsize=fs)# mag+5log(h)
67
68 ylim(max(M_gal),min(M_gal))
69 xlim(0,700)
70
71 grid()
72 legend()
73 savefig('M_vs_d_gal_5.png')
74 show()
75
76
77 #-----gruppide piirkauguste leidmine
78 grupid=np.array([]) #teeb tühjad järjendid
79 gr_d_piiir=np.array([])
80 gr_M=np.array([])
81
82 for group in gr_new['GroupID']: #vaatab igat gruppi eraldi gruppide
    ↪ kataloogist
83     liikmed=gal_new[gal_new['GroupID']==group] #võtab galaktikate
    ↪ kataloogist grupi liikmed välja
84     M_nth=np.sort(liikmed['M_gal'])[n-1] #järjestab liikmed absoluutse
    ↪ heleduse järgi ja võtab n-nda heleduse
85     d_piiir_gr=liikmed[liikmed['M_gal']==M_nth]['d_piiir'][0] #grupi
    ↪ piirkauguseks n-ndale heledusele vastav piirkaugus
86

```

```

87     grupid=np.append(grupid,group) #lisab andmed järjenditesse
88     gr_d_piir=np.append(gr_d_piir,d_piir_gr)
89     gr_M=np.append(gr_M,M_nth)
90
91     z_gr=gr_new['Zfof']
92
93     col_dist_gr=Column(name='dist', data=cosmo.comoving_distance(z_gr))
94     gr_new.add_column(col_dist_gr) #lisab gruppide kaasaliikuvad kaugused
    ↪     gruppide kataloogi
95
96     col_d_piir_gr=Column(name='d_piir', data=gr_d_piir)
97     gr_new.add_column(col_d_piir_gr)
98
99     dist_gr=gr_new['dist']*cosmo.h #grupi kaugus
100
101     piir=cosmo.comoving_distance(0.25)*cosmo.h #Mpc h^-1
102     piir=piir.value
103
104     gr_new['d_piir'][np.where(gr_new['d_piir'] > piir)] = piir #arvestab
    ↪     piirkaugusega
105     gr_d_piir=gr_new['d_piir']
106
107
108     #-----gruppide graafik
109     figure(dpi=110)
110
111     plot(gr_d_piir,gr_M,'c.',label='piirkaugused') #h^-1 Mpc
112     plot(dist_gr, gr_M,'m.',label='kaugused')
113
114     xlabel('Gruppide kaugus [Mpc/h]', fontsize=fs)
115     ylabel('5nda liikme absoluutne heledus \n[mag+5log(h)]', fontsize=fs)
116
117     ylim(max(gr_M),min(gr_M))
118     xlim(0,720)

```

```

119
120 grid()
121 legend()
122 savefig('M_vs_d_gr_5.png')
123 show()
124
125
126 gr_d_piir=gr_new['d_piir']/cosmo.h
127
128 #taevaalade suurused
129 G09=(141-129)*(5)
130 G12=(186-174)*(5)
131 G15=(223.5-211.5)*(5)
132
133 taevaala=G09+G12+G15
134
135 S_sfäär=360**2/np.pi #sfääri pindala ruutkraadies
136 osakaal=taevaala/S_sfäär
137
138 V_sfäär=(4*np.pi*gr_d_piir**3)/3
139 V_max=V_sfäär*osakaal #(Mpc)^3
140
141 col_V_max = Column(name='V_max', data=V_max )#Mpc^3
142 gr_new.add_column(col_V_max)
143
144 M=gr_new['MassA']/cosmo.h #massid
145
146 #-----vahemike tegemine
147 nb=18 #vahemike arv
148 alumine=11.7 #väärtus millest hakkab vahemikke tegema
149 laius=0.2 #vahemiku laius
150 binnid=[] #tühi järjend vahemikele
151 i=0
152

```

```

153 while i<nb:
154     j=alumine+i*laius
155     k=j+laius
156     binnid.append((j,k))
157     i=i+1
158
159 #-----massifunktsioon
160 tabel=gr_new['MassA', 'V_max']
161 keskkoht=np.array([]) #tühi järjend massivahemike keskkohtadele
162 pöördruumala=np.array([])
163
164 col_logM=Column(name='logM', data=np.log10(M) )# M on ühikutes Msun
165 tabel.add_column(col_logM)
166
167 for binn in binnid:
168     a=binn[0]
169     b=binn[1]
170     vahemikus=tabel[(tabel['logM']>=a) & (tabel['logM']< b)] # vaatab
    ↪ vahemikus olevaid andmeid
171     vp=sum(1/(vahemikus['V_max']*laius))
172     binnikesk=(a+b)/2
173     keskkoht=np.append(keskkoht,binnikesk)
174     pöördruumala=np.append(pöördruumala, vp)
175
176 # Driver et al. (2022) andmed
177 artiklis_x=np.array([15.4,15.2,15.0,14.8,14.6,14.4,14.2,14.0,13.8,
178                     13.6,13.4,13.2,13,12.8,12.6,12.4,12.2,12])
179 artiklis_y=np.array([-6.943,-6.717,-6.038,-5.702,-5.454,-5.163,
180                     -4.791,-4.528,-4.36,-4.25,-4.266,-4.082,
181                     -4.181,-4.062,-4.599,-4.171,-4.876,-4.526])
182 vead=np.array([0.94,0.6,0.32,0.26,0.24,0.21,0.19,0.24,0.26,0.28,
183                0.33,0.36,0.38,0.45,0.52,0.61,0.71,0.9])
184
185 #graafikule minevad punktid

```

```

186 mf_x=(artiklis_x+np.log10(cosmo.h))[:,::-1] #pöörab elementide järjestuse
    ↪ järjendis
187 mf_y=(artiklis_y+np.log10(5))[:,::-1]
188
189
190 #-----massifunktsiooni graafik
191 figure(dpi=110)
192
193 plot(keskkocht,np.log10(pöördruumala),'co',label='reprodutseeritud')
194 plot(mf_x, mf_y,'mo', label='Driver et al. (2022)')
195 errorbar(mf_x, mf_y, yerr=vead, fmt='none', ecolor='m', capsize=2,
    ↪ elinewidth=0.75, capthick=1.2)
196
197 xlim(11.6,15.6)
198 ylim(-8,-2)
199
200 xlabel('$\log(M\odot)$', fontsize=fs)
201 ylabel('$\log(\phi)\$, [Mpc^{-3}dex^{-1}]$ ', fontsize=fs)
202
203 grid()
204 legend()
205 savefig('artikkel_vs_repr_5.png')
206 show()
207
208
209 erinevused=(1-np.log10(pöördruumala)/mf_y)*100 #tulemuste erinevus
    ↪ protsentides repr/artikkel
210 print(keskkocht, erinevused)
211
212
213 #----- Tartu andmed
214 gr_T=Table.read('ggfind_paperv2_groups.fits')
215 gal_T=Table.read('ggfind_paperv2_gal.fits')
216

```

```

217 gr_T_new=gr_T[ gr_T['ngal'] >= n ] #eemaldab gruppide kataloogist liiga
    ↳ väiksed grupid
218 gr_T_new=gr_T_new[ gr_T_new['z'] <= 0.25 ] #eemaldab liiga väikese
    ↳ punanihkega grupid
219
220 gr_T_new=gr_T_new[ gr_T_new['m200']>0]
221
222 z_T=gr_T_new['zlim_rank5']
223 d_T_piiir=cosmo.comoving_distance(z_T)
224
225 col_dpiiir=Column(name='d_piiir', data=d_T_piiir)
226 gr_T_new.add_column(col_dpiiir)
227
228 piiir_T=cosmo.comoving_distance(0.25)
229 piiir_T=piiir_T.value
230
231 gr_T_new['d_piiir'][np.where(gr_T_new['d_piiir'] > piiir_T)] = piiir_T
232 d5piiir=gr_T_new['d_piiir']
233
234 V_T_sfäär=(4*np.pi*d_T_piiir**3)/3
235 V_T_max=V_T_sfäär*osakaal #(Mpc)^3
236
237 col_V_max=Column(name='V_max', data=V_T_max )#Mpc^3
238 gr_T_new.add_column(col_V_max)
239
240 M_T=gr_T_new['m200']*10**10#Msun
241
242 tabel=gr_T_new['m200', 'V_max']
243 T_pöördruumala=np.array([])
244
245 col_logM=Column(name='logM', data=np.log10(M_T) )
246 tabel.add_column(col_logM)
247
248 for binn in binnid:

```

```

249     a=bin[0]
250     b=bin[1]
251     vahemikus=tabel[(tabel['logM']>=a) & (tabel['logM']< b)]# vahemikus
    ↪   olevad andmed
252     vpT=sum(1/(vahemikus['V_max']*laius))
253     T_pöördrumala=np.append(T_pöördrumala, vpT)
254
255
256 #----- GAMA, Tartu, LCDM graafik
257 figure(dpi=110)
258
259 plot(keskkoht, np.log10(T_pöördrumala), 'mo', label='Tartu')
260 plot(keskkoht, np.log10(pöördrumala), 'co', label='GAMA')
261 plot(np.log10(mf.m/cosmo.h), np.log10(mf.dndlog10m*(cosmo.h)**3), '--',
262      label='$\Lambda$CDM')
263
264 xlim(11.6, 15.6)
265 ylim(-8, -1.2)
266
267 xlabel('$\log(M_{\odot})$', fontsize=fs)
268 ylabel('$\log(\phi)\$, [Mpc^{-3}dex^{-1}]$', fontsize=fs)
269
270 grid()
271 legend()
272 savefig('Tartu_vs_GAMA_5.png')
273 show()

```

Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Reelika Pärnpuu**,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
Halo massifunktsiooni reprodutseerimine ja analüüs,
mille juhendaja on Elmo Tempel,
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 4.0, 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 punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Reelika Pärnpuu

24.05.2023