

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tartu Observatoorium

Gutnar Leede

**GALAKTIKATE FILAMENDID KUI DÜNAAMILISED  
STRUKTUURID: TEOORIA VÕRDLUS VAATLUSTEGA**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad:  
Rain Kipper, MSc  
Elmo Tempel, PhD

Tartu 2016

# **Galaktikate filamendid kui dünaamilised struktuurid: teooria võrdlus vaatlustega**

Käesolevas töös uurisime galaktikate jaotust filamentides Tempel et al. (2014) poolt välja töötatud Bisous mudeli põhjal. Leidsime, et filamendid on andmestiku järgi vaatesihis välja venitatud, aga ei saanud vea piires seda kinnitada. Teiseks esitasime filamendi dünaamilise mudeli, mis põhineb Jeans'i võrranditel. Mudeli sisendparameetriks on süsteemi radiaalne tihedusjaotus, mida lähendasime filamentide ja galaktikate kataloogide põhjal leituga. Leidsime, et Jeans'i võrrandite järgi leitud vaatesuunaline kiiruste dispersioon kattub vea piires vaatlusliku kataloogi põhjal leitud dispersiooniga. Saadud tulemused on kooskõlalised filamentidega kui gravitatsiooniliselt seotud dünaamiliste struktuuridega, aga veenvate järelduste tegemiseks on vajalikud väiksema mõõtemääramatusega suuremastaabilised galaktikate punanihete mõõtmised.

Märksõnad: suuremastaabiline struktuur, filamendid, Jeans'i võrrandid, kiiruste dispersioon.

CERCS: PS20 Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia.

## **Galactic filaments as dynamical structures in theory and by observation**

In this paper, we investigated the distribution of galaxies in filaments based on the Bisous model of Tempel et al. (2014). We found that, according to the data, the filaments are elongated along the line of sight, but could not confirm it because of the size of the error in measurement. Secondly, we presented a dynamical model of filaments, which is based on the Jeans equations. The single input parameter of the model is the radial density distribution of the system. In this work, the density distribution was approximated according to the filament and galaxy catalogues available to us. We found that the line-of-sight velocity dispersion given by Jeans equations matches the one based on the catalogue within the range of the error. The results of this work are consistent with filaments that are gravitationally bound dynamical structures. However, we conclude that more precise large-scale measurements of galaxy redshifts are required to get convincing results.

Keywords: large-scale structure, filaments, Jeans equations, velocity dispersion.

CERCS: PS20 Astronomy, space research, cosmic chemistry.

# Sisukord

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Sissejuhatus</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1 Vaatlused</b>  | <b>6</b>  |
| 1.1 Hubble'i seadus . . . . .                                   | 6         |
| 1.2 Sloani Digitaalne Taevaülevaade . . . . .                   | 7         |
| 1.3 Jumala sõrmed . . . . .                                     | 8         |
| <b>2 Filamentaarne struktuur</b>                                | <b>11</b> |
| 2.1 Bisous mudel . . . . .                                      | 11        |
| 2.2 Filamentide ja galaktikate kataloog . . . . .               | 12        |
| 2.3 Filamendi skaala punanihete ja kauguste ruumis . . . . .    | 13        |
| 2.4 Galaktikate kiiruste dispersioon filamendis . . . . .       | 15        |
| <b>3 Filamendi dünaamiline mudel</b>                            | <b>16</b> |
| 3.1 Jeans'i võrrandid . . . . .                                 | 17        |
| 3.2 Tihedusjaotus . . . . .                                     | 18        |
| 3.3 Gravitatsioonivälja potentsiaal . . . . .                   | 20        |
| 3.4 Kiiruste dispersiooni leidmine Jeans'i võrrandist . . . . . | 20        |
| <b>4 Kokkuvõte</b>  | <b>24</b> |
| <b>Tänuavaldused</b>  | <b>25</b> |
| <b>Kirjandus</b>  | <b>26</b> |
| <b>Lihtlitsents</b>   | <b>28</b> |

# Sissejuhatus

Universumi suuremastaabilise struktuuri vaatlemisel paistab silma selle kargstruktuur, kus on suured piirkonnad, milles on vähe galaktikaid ja niitjad tihedamad piirkonnad, mis neid ümbritsevad. Galaktikate arvtiheduse ja kuju järgi on selles struktuuris vähemalt kolm eristatavat struktuuri elementi:

1. tühikud, milles on vähe galaktikaid,
2. parved, mis on tihedad galaktikate kogumid ja
3. filamendid, mis ühendavad parvesid.

Suurel skaalal on struktuur küll silmaga eristatav, aga selle täpne struktuur sõltub meetodist, mille järgi see luuakse. Selleks on välja töötatud mitmeid algoritme nagu *watershed segmentation* (Platen et al. 2007; Aragón-Calvo et al. 2010), *skeleton analysis* (Novikov et al. 2006; Sousbie et al. 2008) ja meetodeid, mis põhinevad gravitatsioonivälja potentsiaali Hessianil (Hahn et al. 2007; Lee ja Lee 2008; Bond et al. 2010; Forero–Romero et al. 2009; Wang et al. 2012) ja kiiruste vektorväljal (Hoffman et al. 2012; Wang et al. 2014).

Käesoleva töö huvialused objektid on filamendid, mille olemus on veel lahendamata probleem - need võivad olla kõigest näilised struktuurid, mis galaktikate evolutsiooni ei mõjuta. Seisukohale, et filamendid on gravitatsiooniliselt seotud süsteemid, mis galaktikate elukäigus rolli mängivad on andnud alust asjaolu, et filamentides olevate galaktikate pöörlemistelgede suunad näivad olevat korreleeritud filamenti peatelje suunaga (Troxel ja Ishak 2015).

Kui filamendid on gravitatsiooniliselt seotud süsteemid, siis on põhjust eeldada, et filamendid on piki vaatekiirt välja venitatud. See on tingitud faktist, et galaktikate kaugused on mõõdetud kiirusteeruumis, mitte ei ole tegemist tegelike kaugustega. Eesmärgiks on esiteks hinnata, kas ja mis määral on filamendid suuremastaabilisel pildil vaatesihis välja venitatud ja leida, kas filament on lihtsustatud kujul kirjeldatav Jeans'i võrranditega.

Filamentaarne struktuur, millel selle töö tulemused põhinevad, on Tempel et al. (2014) filamentide kataloog, mis loodi teises peatükis kirjeldatud Bisous mudeli abil. Tempel

et al. (2014) töö baseerub esimeses peatükis väljatoodud Sloani Digitaalse Täevaülevaate vaatlusandmetel.

Kolmandas osas esitame filamendi lihtsustatud mudeli telgsümmeetrilise silindrilise objektina, kirjeldame seda Jeans'i võrranditega ja avaldame selle põhjal vaatlustega võrreldava suuruse, vaatekiiresuunalise kiiruste dispersiooni.

# Peatükk 1

## Vaatlused

### 1.1 Hubble'i seadus

Galaktikate vaatlused suurel skaalal alates 20. sajandist on näidanud, et kauged objektid omavad selliseid radiaalkiiruseid, et need eemalduvad meist. Sealjuures on avastatud seaduspärasus, et mida kaugemal on vaatlusalune objekt, seda suurem selle radiaalkiirus on. See on nähtus, mida on oodata paisuvas universumis - kui ruum paisub kõikjal ühtemoodi, siis on kahe punkti eemaldumiskiirus monotoonselt seotud nendevahelise kaugusega.

Hubble'i seadus väljendabki universumi paisumist ja selle põhjal on suurel skaalal galaktika kaugus vaatlejast  $d$  võrdeline selle eemaldumiskiirusega  $v$  ehk

$$v = H_0 d, \quad (1.1)$$

kus  $H_0$  on Hubble'i konstant, mille väärtuseks on praegusel ajal

$$H_0 \approx 67,8 \frac{\text{km}}{\text{s}} \frac{1}{\text{Mpc}}. \quad (1.2)$$

Hubble'i konstanti saab esitada dimensioonitu Hubble'i parameetri  $h$  kaudu kujul

$$H_0 = 100h \frac{\text{km}}{\text{s}} \frac{1}{\text{Mpc}}, \quad (1.3)$$

kus  $h \approx 0,678$ . Parameetri  $h$  kaudu on kosmoloogias kombeks esitada kauguseid ühikutes  $h^{-1}\text{Mpc}$ . Selline esitusviis rõhub, et avaldatud kaugus sõltub Hubble'i konstandist kui kosmoloogilisest parameetrist, millele on edasi kantud osa mõõtemääramatusest.

## 1.2 Sloani Digitaalne Taevaülevaade

Sloani Digitaalne Taevaülevaade (SDSS - *Sloan Digital Sky Survey*) on suuremastaabiline universumis olevate objektide uurimus. Käesoleva töö tulemused põhinevad SDSS-III 8. väljalaske andmetel (DR8 - *Data Release 8*), mis võimaldavad universumit kolmemõõtmeliselt kaardistada. DR8 aluseks on vaatlused, mis katavad 14 555 ruutkraadi<sup>1</sup> ehk ligikaudu 35% taevast ja on katalogiseerinud 208 478 448 galaktika positsioonid taevafääril. Lisaks sellele on mõõdetud spektroskoopiliselt 860 836 galaktika punanihked (York et al. 2000; Aihara et al. 2011).

Tempel et al. (2012) on loonud DR8 andmetele baseerudes kataloogi, mis annab punanihete põhjal lisaks asukohtadele taevatasandis ka galaktikate kaugused ja on jaotanud need gruppidesse. Nimetatud töös on piiratud valimit 576 493 galaktikale nii, et on välistatud objektid kohalikus superparves ja kaugemas piirkonnas, kus andmeid on hõredalt. Sellel ülevaatel põhineb Tempel et al. (2014) poolt arendatud vaatluslik filamentaarne struktuur, mille järgi on käesoleva töö tulemused välja arvutatud.

Vaatlustulemuste põhjal on lihtne määrata objekti asukoht taevafääril, aga kolmemõõtmeliseks kaardistamiseks on vaja teada ka kaugust - selleks on kataloogis ka informatsioon galaktikate punanihete kohta. Punanihe kirjeldab valgusallika spektrijoonte nihet ja avaldub kujul

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (1.4)$$

kus  $\lambda$  on kiiratud valguse lainepikkus ja  $\Delta\lambda$  on mõõdetud lainepikkuse erinevus sellest.

Punanihe on tingitud vaateleja ja valgust kiirgava objekti suhtelisest kiirusest ja on kiiruse  $v$  puhul

$$z = \frac{v}{c}, \quad (1.5)$$

kus  $c$  on valguse kiirus.

Mõõtes galaktika spektrit on võimalik tuntud spektrijoonte järgi määrata punanihet, mille kaudu saab valemit (1.5) ja Hubble'i seost (1.1) rakendades hinnata galaktika kaugust. Sellegipoolest ei piisa vaid Hubble'i seaduse rakendamisest korrektse kaardi loomiseks, sest galaktikatel on lisaks paisumisest tingitud kiirusele ka omakiirused kaasaliikivas taustsüsteemis (sellises taustsüsteemis, kus paisumist ei ole). See tähendab, et punanihete ruumis on teatud moonutused, millest lahti saamiseks on vajalik edasine andmetöötlus.

---

<sup>1</sup>Ruutkraad on ruuminurga ühik. Üks ruutkraad on võrdne  $(\pi/180^\circ)^2$  sterradiaaniga.

### 1.3 Jumala sõrmed

Esmapilgul jätab pilk suureskaalalisele struktuurile kosmoloogilisele printsiibile vastuolulise mulje - vaatleja sihis on näha galaktikatest moodustunud jooni, mis tähendab teatud eelissuunda. See on nn *fingers of god* ehk jumala sõrmede efekt, mis tuleneb galaktikate kiirustest teineteise suhtes ehk nende omakiirustest gravitatsiooniliselt seotud süsteemides (Coil 2012).

Jumala sõrmede efekti mõistmiseks võtame vaatluse alla galaktikaparve kaugusel  $d$ , mille raadius on  $r$ . Parve keskel oleva galaktika punanihe  $z_H$  on universumi paisumisest tulenevalt Hubble'i seose (1.1) ja valemi (1.5) põhjal

$$z_H(d) = \frac{H_0 d}{c}. \quad (1.6)$$

Ignoreerides parve kuuluvate galaktikate omakiiruseid, on nende punanihked vahemikus

$$z_H \in \left[ \frac{H_0(d-r)}{c}, \frac{H_0(d+r)}{c} \right], \quad (1.7)$$

seega on punanihke skaalal antud parve laius

$$\Delta z_H = \frac{2H_0 r}{c}. \quad (1.8)$$

Kuna galaktikaparved on gravitatsiooniliselt seotud süsteemid, mille liikmed omavad kaasaliikivas taustsüsteemis omakiiruseid, siis annab tegelikult iga galaktika punanihkesse panuse ka Doppleri nihe. Oletame, et galaktikate omakiiruste moodulid on mitterelativistlikus vahemikus  $[0, v]$ . Sel juhul on nende kiiruste vaatesihilised komponendid piirkonnas  $[-v, +v]$  ja punanihe on valemi (1.5) järgi vahemikus

$$z_D \in \left[ -\frac{v}{c}, +\frac{v}{c} \right]. \quad (1.9)$$

Kahest nimetatud efektist tingitud summaarne punanihe on

$$z = (1 + z_H)(1 + z_D) - 1 = z_H + z_D + z_H z_D. \quad (1.10)$$

Eeldades, et galaktikate kiirused on valguse kiirusega võrreldes väikesed ehk  $H_0 r \ll c$  ja  $v \ll c$ , siis  $z_H z_D \approx 0$  ja punanihe on

$$z = z_H + z_D, \quad (1.11)$$

mille väärtused kuuluvad piirkonda

$$z \in \left[ \frac{H_0(d-r) - v}{c}, \frac{H_0(d+r) + v}{c} \right]. \quad (1.12)$$

See tähendab, et arvestades ka galaktikate omakiiruseid, on parve laius punanihke skaalal

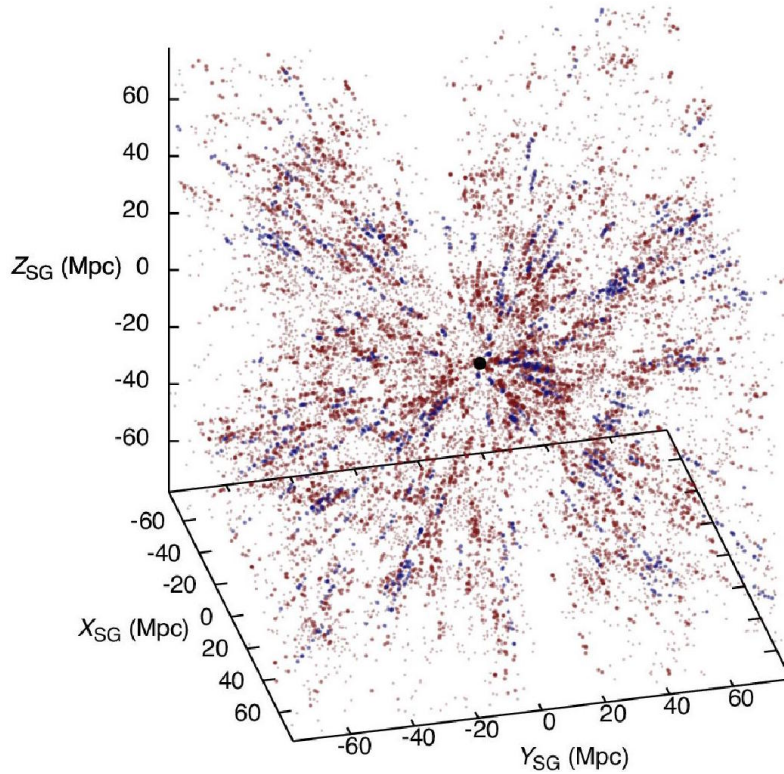
$$\Delta z = \frac{2(H_0 r + v)}{c}, \quad (1.13)$$

mis on

$$\frac{\Delta z}{\Delta z_H} = \frac{H_0 r + v}{H_0 r} = 1 + \frac{v}{H_0 r} \quad (1.14)$$

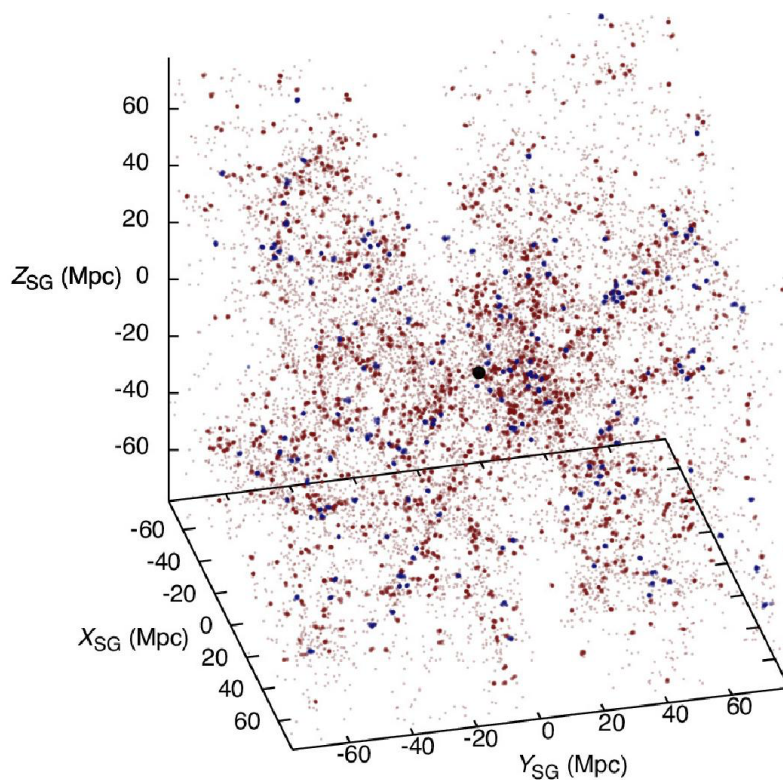
korda suurem kui selle suurus arvestades vaid Hubble'i seadust.

Kui tüüpilise galaktikaparve raadius on  $r = 1 h^{-1} \text{Mpc}$  ja selles olevate galaktikate kiirused ulatuvad  $v = 1000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ -ni, siis on avaldise (1.14) järgi selline parv vaatesihis umbes 16 korda pikem kui tegelikkuses. Seetõttu on läheduses sfääriline parv vaatesihis välja venitatud ja suuremastaabilises pildis ilmnevad jooned, mida nimetatakse jumala sõrmedeks.



Joonis 1.1: Vaatleja asukoht on märgitud musta punktiga keskel. Galaktikate jaotus on näidatud punanihete vaatluste põhjal nii, et vähemalt viieliikmelisse gruppi kuuluvad galaktikad on sinised punktid ja ülejäänud on punased punktid. Jumala sõrmede nähtust piltlikustavad vaatesihis väljavenitatud struktuurid (Tempel et al. 2016).

Jumala sõrmedest vabanemiseks ja moonutuseeta pildi saamiseks peab parvedesse kuuluvad galaktikad tagasi kokku viima. Selleks hinnatakse parve suurust taevatasandis ja vaatesihis ning kaugused piki vaatejoont surutakse kokku nii, et süsteem oleks sfääriline (Tempel et al. 2012). Joonistel 1.1 ja 1.2 on toodud illustratsioonid jumala sõrmedest ja nende kokku surumisest.



Joonis 1.2: Galaktikaparvede taastamisel kaob jumala sõrmede efekt. Kuvatud on sama galaktikate jaotus nagu joonisel 1.1, milles on nüüd moonutusega struktuurid vaatesihis kokku surutud (Tempel et al. 2016).

## Peatükk 2

# Filamentaarne struktuur

Filamendid on universumis ühed pikimad struktuurid tüüpilise pikkusega 50 kuni 80  $h^{-1}\text{Mpc}$  (Coil 2012; Tempel et al. 2014). Need moodustavad niitja galaktikatest koosneva võrgustiku, mis on üheks universumi suuremastaabilise struktuuri silmatorkavaimaks omaduseks.

Filamentaarse struktuuri kirjeldamiseks on välja töötatud erinevaid meetodeid. Antud töös kasutame selleks vaatluslikke filamente, mis on leitud Tempel et al. (2014) poolt arendatud Bisous mudeli abil.

### 2.1 Bisous mudel

Bisous mudel on markeeritud punktprotsess, mille realisatsiooniks on silindriliste objektide konfiguratsioon. Erinevalt teistest meetoditest, mis on arendatud filamentaarse struktuuri kirjeldamiseks, ei modelleeri Bisous mudel otseselt galaktikate asukohti, vaid struktuurielemente, mida need ruumiliselt moodustavad (Tempel et al. 2014).

Silindreid parametrizeeritakse suurustega nagu keskkoha asukoht, orientatsioon, raadius  $r$  ja pikkus vahemikus  $h_{\min}$  kuni  $h_{\max}$ . Lisaks defineeritakse silindri mõlema aluspinna keskel nn atraktsioonisfäärid raadiusega  $r_a$ , mis osalevad silindrite ühenduvuse määramisel.

Punktprotsessi simuleerimiseks on mudelis defineeritud konfiguratsioonide  $\mathbf{y}$  tõenäosustihedus

$$p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) = \frac{\exp[-U(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})]}{Z(\boldsymbol{\theta})}, \quad (2.1)$$

kus  $\boldsymbol{\theta}$  on mudeli parameetrite vektor,  $U(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})$  on energiafunktsioon ja  $Z(\boldsymbol{\theta})$  on

normaliseerimiskonstant.

Energiafunktsioon  $U(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})$  on jagatud kaheks osaks:

$$U(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) = U_d(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) + U_i(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}), \quad (2.2)$$

mis täidavad vastavalt lokaalset ja globaalset rolli filamentide kirjeldamisel. *Data energy* ehk andme-energia ( $U_d$ ) on seotud galaktikate paiknemisega silindri sees. Selle eesmärgiks on tagada võimalikult ühtlane galaktikate jaotus piki silindri peatelge ja tingimus, et silindri sees oleks oluliselt rohkem galaktikaid kui sellest väljaspool. *Interaction energy* ehk interaktsioonienergia ( $U_i$ ) on seotud silindrite paiknemisega üksteise suhtes ja tingib silindrite võrgustiku.

Bisous mudeli kui punktprotsessi simuleerimiseks on erinevaid algoritme. Tempel et al. (2014) on selleks kasutanud Metropolis-Hastings algoritmi.

## 2.2 Filamentide ja galaktikate kataloog

Tempel et al. (2014) on loonud SDSS-III DR8 andmete põhjal filamentide kataloogi. Valimis on 499340 galaktikat, mille punanihked on vahemikus 0,009 kuni 0,155 - altpoolt piiratud selleks, et välistada galaktikaid kohalikus superparves ja ülevalt poolt sellepärast, et suurematel kaugustel on andmeid väga hõredalt.

Filamentaarset struktuuri on Tempel et al. (2014) kirjeldanud filamentidega kahel skaalal: raadiustega  $0,5 h^{-1}\text{Mpc}$  ja raadiustega  $1,0 h^{-1}\text{Mpc}$ . Struktuuri kirjeldamiseks kasutati Bisous mudelit, milles on filamenti raadius üks parameetritest. Antud töö tulemused põhinevad kataloogil, milles on raadiuseks defineeritud  $0,5 h^{-1}\text{Mpc}$ .

Kataloogid sisaldavad muuseas informatsiooni filamentide pikkuste ja orientatsioonide kohta ning nendes olevate galaktikate positsiooni kolmes mõõtmes, kaugust lähima filamenti peateljeni ja selles grupis olevate liikmete arvu, millesse antud galaktika kuulub (kui tegemist pole üksiku galaktikaga).

Käesolevas töös vaatleme ainult filamente, mille peateljed on risti vaatesuunaga ehk selliseid, mis on taevafääril võimalikult suures ulatuses nähtavad. Et valimisse jääks mõistlik arv galaktikaid, filtreerime kataloogist välja filamendid, mille peatelje ja vaatekiiresuunalise nurga koosinus on väiksem kui 0,01 ehk nendevaheline nurk on vähemalt 89,4 kraadi. Teiseks piirame valimit galaktikatele, mille kaugus filamenti peateljest on vähem kui  $1,0 h^{-1}\text{Mpc}$ . Saadud valimis on  $N = 1795$  galaktikat.

## 2.3 Filamendi skaala punanihete ja kauguste ruumis

Selles ja järgmises alapeatükis toodud arvutused on tehtud antud töö raames ning moodustavad esimese olulise osa bakalaureusetöö sisust.

Vaadates vaid vaatesihiga ristuva peateljega filamente ja eeldades, et keskmistatult on galaktikate jaotus filamendi peatelje suhtes sümmeetriline, on peateljest galaktikate kauguste vaatesihiliste komponentide  $d_{\parallel}$  ja sellega ristuvate komponentide  $d_{\perp}$  dispersioonid võrdsed.

Kuna galaktikate kauguseid vaatelejust mõõdetakse punanihke kaudu nagu kirjeldatud peatükis 1.2, mis on seotud objektide kiirustega, siis annavad Doppleri nihke tõttu kauguste vaatesihiliste komponentide dispersiooni panuse ka galaktikate omakiirused. Kauguste komponentide dispersioonid on eelduse kohaselt võrdsed, seega kui galaktikad filamendis omakiiruseid omavad, peaks vaatesihiliste komponentide dispersioon olema ristuvate komponentide dispersioonist suurem.

Tempel et al. (2014) filamentide kataloogis on antud galaktikate asukohtad  $(x, y, z)$  ja nende projektsioonid lähima filamendi peateljele  $(p_x, p_y, p_z)$  ehk punkt teljel, mis on galaktikale kõige lähemal. Need positsioonid on antud taustsüsteemis, kus vaateleja on keskpunktis  $(0, 0, 0)$ , seega on nimetatud punktide kohavektoriteks  $\vec{r} = (x, y, z)$  ja  $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$  ning kaugus filamendi teljest on  $|\vec{p} - \vec{r}|$ .

Otsitavate dispersioonide leidmiseks peame jaotama galaktika kauguse teljest selle vaatesihiliseks ja sellega ristuvaks komponendiks. Kuna vaatlusalused objektid on väga kaugel, siis on vektorid  $\vec{r}$  ja  $\vec{p}$  peaaegu paralleelsed ja vaatesihiliseks suunavektoriks võib võtta

$$\vec{e} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}. \quad (2.3)$$

Kauguse vaatesihiline komponent on selle projektsioon vaatesuunale ja avaldub kujul

$$d_{\parallel} = (\vec{p} - \vec{r}) \cdot \vec{e} \quad (2.4)$$

ning sellega ristuv komponent on

$$d_{\perp} = \sqrt{|\vec{p} - \vec{r}|^2 - d_{\parallel}^2}. \quad (2.5)$$

Kui  $d_n$  tähistab  $n$ -nda galaktika kiiruse vaatesihilist või sellega ristuvat komponenti, siis on kauguste standardhälve

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N d_n^2}{N}}. \quad (2.6)$$

Kirjeldatud valimi põhjal, milles on vaid vaatesihiga ristuvaga peateljega filamendid, on peateljest kauguste vaatesihiliste komponentide standardhälve

$$\sigma_{\parallel} = 0,265 h^{-1} \text{Mpc} \quad (2.7)$$

ja sellega ristuvate komponentide standardhälve

$$\sigma_{\perp} = 0,257 h^{-1} \text{Mpc}. \quad (2.8)$$

Need tulemused saime valimi põhjal, milles olid kõik katalogiseeritud galaktikad, mis asetsesid filamentides, mis täitsid vaatesihiga ristuvat kriteeriumit. Kasutuselolev Tempel et al. (2014) poolt arendatud filamentaarne struktuur põhineb gruppide kataloogil, mis on jumala sõrmede maha surumiseks kontrakteerinud gruppidesse kuuluvate galaktikate vaatesuunalised kaugused. Kuna filamentides on nii üksikuid kui ka gruppidesse kuuluvaid galaktikaid, võib see olla süstemaatilise vea allikaks, millest vabanemiseks saame leida kiiruste dispersioonid arvestades vaid galaktikaid, mis kataloogi alusel gruppi ei kuulu.

Ühtaegu vaatesihiga ristiolevates filamentides ja parvedesse mittekuuluvaid galaktikaid on 973 tükki. Sellise valimi põhjal saame samade arvutuste põhjal dispersioonide väärtusteks vaatesihis

$$\sigma'_{\parallel} = 0,268 h^{-1} \text{Mpc} \quad (2.9)$$

ja ristuvast sihis

$$\sigma'_{\perp} = 0,257 h^{-1} \text{Mpc}. \quad (2.10)$$

Jumala sõrmede efekt ristuvat kiiruse komponenti ei mõjuta ja sellesuunaline dispersioon on ootuspäraselt mõlemal juhul sama. Võrreldes eelmise tulemusega on vaatesihiline dispersioon veidi suurem, sest nüüd ei ole valimis ühegi galaktika vaatesuunalist kiirust vähendatud. Arvtulemus on sellegipoolest sisuliselt sama, mis näitab, et gruppide kokkusurumine on olnud Tempel et al. (2012) töös korrektne.

Mõõtemääramatust ignoreerides näitab tulemus, et kiiruste vaatesihiliste komponentide dispersioon on sellega ristuvate komponentide dispersioonist suurem, sest see sisaldab ka galaktikate kiirustest tingitud lisapanust. Võrreldes aga galaktikaparvede väljavenituse määraga, mis võib olla kümnekordne, on see väike - kui parved on punanihke põhjal pikenenud suurusjärgus 1000% võrra, siis filamendid kõigest 4%.

SDSS-III punanihke mõõteveast tingitud ruutkeskmise kiiruse määramatus antud valimis on ligikaudu  $\Delta v = 5,5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ . Hubble'i seose (1.1) järgi on seega selle põhjal leitud kauguse

määramatus

$$\Delta\sigma_{\parallel} = \frac{\Delta v}{100h} = 0,055 h^{-1} \text{Mpc}. \quad (2.11)$$

Kuna kauguste vaatesihiliste komponentide standardhälve kattub vea piires ristuvate komponentide standardhällbega, siis ei ole leitud tulemused filamendi väljavenitatuses osas veenvad. Selle paremaks hindamiseks on vaja täpsemaid galaktikate punanihete vaatluseid.

## 2.4 Galaktikate kiiruste dispersioon filamendis

Galaktikate kiiruste dispersiooni saame hinnata vaatesihiliste ja sellega ristuvate kauguste dispersioonide võrdlemisel. Eelduse kohaselt on galaktikate paiknemisest tingitud panused  $\sigma_d^2$  nendes dispersioonidesse vaatesihiga ristuvaga peateljega filamendi jaoks võrdsed. Vaatesihiga risti galaktikate kiirused mõõtmistulemusi ei mõjuta, seega on komponentide dispersioon selles sihis

$$\sigma_{\perp}^2 = \sigma_d^2. \quad (2.12)$$

Vaatesihis on mõõtmise meetodist tulenevalt lisaks ka kiiruste dispersioonide panus  $\sigma_v^2$ , seega Hubble'i seose (1.1) põhjal on summaarne vaatesihiliste komponentide dispersioon

$$\sigma_{\parallel}^2 = \sigma_d^2 + \left(\frac{\sigma_v}{100h}\right)^2. \quad (2.13)$$

Siit saame kataloogi abil leitud suuruste  $\sigma_{\parallel}$  ja  $\sigma_{\perp}$  järgi hinnata galaktikate kiiruste dispersiooni:

$$\sigma_v^2 = (100h)^2(\sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp}^2). \quad (2.14)$$

Arvestades vaid filamentides olevaid üksikuid galaktikaid, saame kiiruste standardhällbeks

$$\sigma_v = 7,60 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \quad (2.15)$$

Kui taevatasandis on kauguse mõõteviga võrreldes punanihke järgi leitud kauguse veaga tühine, siis on kiiruste vaatesihiliste komponentide standardhällbe määramatus

$$\Delta\sigma_v = \left| \frac{\partial \sigma_v}{\partial \sigma_{\parallel}} \right| \Delta\sigma_{\parallel} = 100h \frac{\sigma_{\parallel}}{\sqrt{\sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp}^2}} = 19,4 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \quad (2.16)$$

## Peatükk 3

# Filamendi dünaamiline mudel

Bisous mudeli järgi on filamendid silindrilised objektid raadiusega  $R = 0,5 h^{-1}\text{Mpc}$ . Käesolevas töös esitame filamendi dünaamilise mudeli, mille sisendiks on radiaalne massitiheduse jaotus, mille järgi saame avaldada gravitatsioonivälja potentsiaali ja kirjeldada filamenti Jeans'i võrranditega. Selles peatükis toodud arvutused on originaalsed ning teostatud bakalaureusetöö raames.

Lisaks sellele teeme mudelis mõned lihtsustavad eeldused, milleks on

1. statsionaarsus
2. telgsümmeetrilisus,
3. nihkesümmeetrilisus mööda peatelge,
4. kiiruste dispersiooni isotroopsus igas punktis ja
5. kiiruste keskvärtus on null.

Mudeli sisendparameetrite leidmiseks kasutame filamentide ja galaktikate katalooge. Katalogiseeritud andmete abil avaldame keskmise arvtiheduse ja massitiheduse jaotuse, mille järgi on võimalik kirjeldada süsteemi dünaamikat ja kinemaatikat.

Järgnevates arvutustes kasutame põhiühikutena kauguste jaoks ka kataloogis kasutatud ühikut  $h^{-1}\text{Mpc}$ , kiiruste jaoks ühikut  $\frac{\text{km}}{\text{s}}$  ja masside kirjeldamiseks suurust  $10^{10}M_{\odot}$  (Päikese massi). Niisuguses ühikute süsteemis on gravitatsioonikonstandi väärtus

$$G \approx 43,02 \frac{\text{Mpc}}{10^{10}M_{\odot}} \left( \frac{\text{km}}{\text{s}} \right)^2. \quad (3.1)$$

### 3.1 Jeans'i võrrandid

Jeansi võrrandid põhinevad põrkevabal Boltzmanni võrrandil ja kirjeldavad kehade dünaamikat gravitatsiooniväljas. Need võrrandid ei käsitle üksikute objektide liikumist, vaid süsteemi tervikuna iseloomustavaid suuruseid nagu keskmised kiirused, kiiruste dispersioonid ja tihedus. Jeans'i võrrandite kasulikkus ilmneb sellest, et struktuuride vaatlemisel hinnatakse tavaliselt vaatlusalust süsteemi kirjeldavaid statistilisi suuruseid, mis saadakse üksikute tähtede või galaktikate liikumise põhjal.

Käesolevas töös kirjeldame filamente kui silindrilisi struktuure, seega on loomulik avaldada võrrandid silindrilistes koordinaatides  $(r, \theta, z)$ . Radiaalne Jeans'i võrrand on (Binney ja Tremaine 2008)

$$\frac{\partial(\rho \langle v_r \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \langle v_r^2 \rangle)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho \langle v_r v_z \rangle)}{\partial z} + \rho \frac{\langle v_r^2 \rangle - \langle v_\theta^2 \rangle}{r} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad (3.2)$$

kus  $\rho$  on massitihedus ja  $\Phi$  on gravitatsioonivälja potentsiaal.

Eeldades statsionaarsust kaob ajaline tuletis ja nihkesümmeetrilisusest tuleneb, et süsteemi kirjeldavad suurused on sõltumatud positsioonist peateljel ning võrrandist kaovad osatuletised  $z$ -koordinaadi järgi. Arvestades lisaks eeldust, et kiiruse keskväärts on null, lihtsustub võrrand kujule

$$\frac{\partial(\rho \langle v_r^2 \rangle)}{\partial r} + \rho \frac{\langle v_r^2 \rangle - \langle v_\theta^2 \rangle}{r} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial r}. \quad (3.3)$$

Kiiruse jaotuse isotroopsusest järeldub, et kõigi kiiruse komponentide dispersioonid on võrdsed. Dispersioon on defineeritud valemiga  $\sigma^2 = \langle v^2 \rangle - \langle v \rangle^2$ . Kuna kiiruse keskväärts on eelduse kohaselt null, siis avaldub see kujul

$$\sigma^2 = \langle v^2 \rangle. \quad (3.4)$$

Avaldades võrrandi kiiruse dispersiooni kaudu, saame

$$\frac{\partial(\rho \sigma^2)}{\partial r} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial r}. \quad (3.5)$$

Saadud võrrandis võime asendada osatuletise täistuletisega, sest sümmeetria tõttu sõltuvad kõik avaldises olevad funktsioonid ainult  $r$ -koordinaadist:

$$\frac{d(\rho \sigma^2)}{dr} = -\rho \frac{d\Phi}{dr}. \quad (3.6)$$

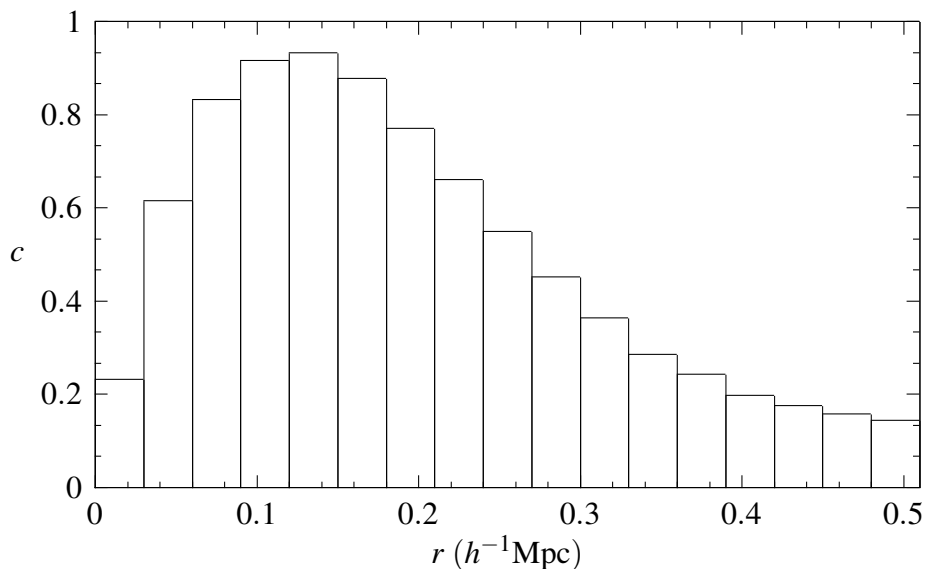
Avaldatud Jeans'i võrrandis on kaks tundmatut funktsiooni: tihedusjaotus  $\rho$  ja gravitatsioonivälja potentsiaal  $\Phi$ . Järgnevates alapeatükkides kasutame kõigepealt galaktikate kataloogi, et hinnata tihedusjaotust ja seejärel Poisson'i võrrandit, et avaldada selle kaudu ka potentsiaal.

## 3.2 Tihedusjaotus

Dünaamilise mudeli rakendamiseks vajame tihedusjaotust, mille konstrueerime galaktikate kataloogi põhjal. Kataloogis on antud iga galaktika kaugus sellele lähima filamendi peateljest. Arvtiheduse leidmiseks mingil kaugusel saame leida galaktikate keskmise arvu antud kauguse lähimbruses ja jagada selle vaadeldud piirkonna ruumalaga.

Alustuseks jaotame filamendi võrdse paksusega kihtideks pikkusega  $\Delta r$  ja leiame iga  $n$ -nda osa jaoks galaktikate kataloogi järgi, mitu galaktikat on kõigis defineeritud filamentides kokku peateljest kaugusel  $(n-1)\Delta r$  kuni  $n\Delta r$ . Jagades selle valimis olnud filamentide arvuga, saame keskmise galaktikate arvu  $\langle N_n \rangle$  antud kaugusevahemikus peateljest.

Joonisel 3.1 on histogramm, mis näitab keskmist galaktikate radiaalset arvtihedust järjestikes kaugusevahemikes. Kõigi loetletud väärtuste summa kuni raadiuseni  $R$  annab ligikaudse keskmise galaktikate arvu filamendis.



Joonis 3.1: Histogramm näitab keskmist galaktikate radiaalset arvtihedust kaugusevahemikes suurustega  $\Delta r = 0.03 h^{-1}\text{Mpc}$ .

Arvtihedus  $c$  näitab galaktikate arvu ruumalaühiku kohta. Diskreetse arvtiheduse jaotuse

saamiseks on vaja jagada läbi keskmine galaktikate arv  $\langle N_n \rangle$  igas jaotatud osas selle ruumalaga  $V_n$ . Lihtsustatud mudelis on tegemist silindriga, seega on teatud vahemiku ruumala selle kaugemalt ja lähemalt piiratud raadiustega silindrite ruumalade vahe. Kui keskmine filamendi pikkus on  $\langle L \rangle$ , siis on  $n$ -nda jaotatud osa ruumala

$$V_n = 4\pi \langle L \rangle (r_n^2 - r_{n-1}^2), \text{ kus } r_n = n\Delta r. \quad (3.7)$$

Diskreetne arvtiheduse jaotus avaldub nüüd kujul

$$c_n = \frac{\langle N_n \rangle}{V_n}. \quad (3.8)$$

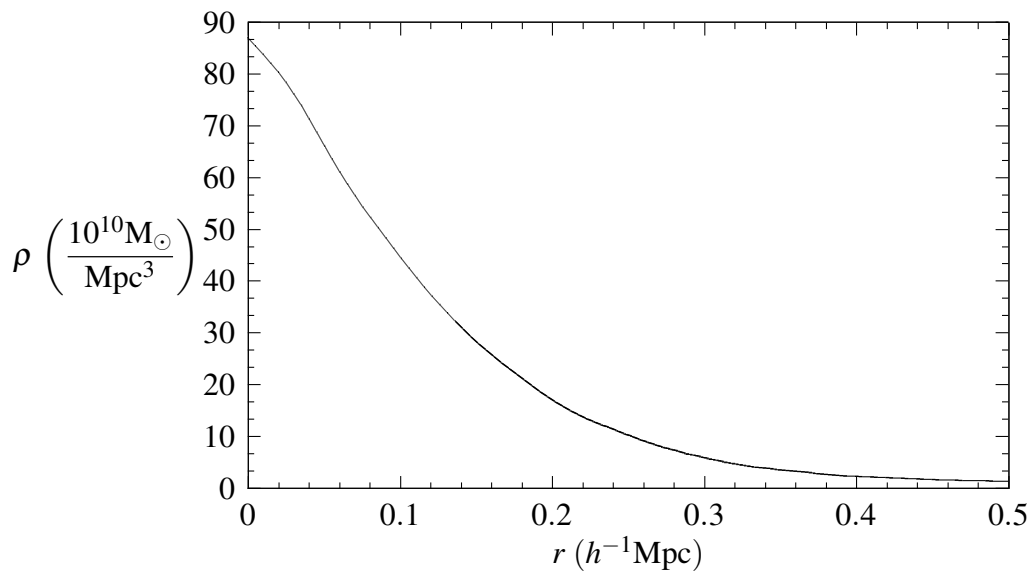
Kui valimis on palju galaktikaid, siis võime massitiheduse  $\rho$  saamiseks korrutada arvtiheduse läbi keskmise galaktika massiga. Kataloogi põhjal on valimisse kuuluvate galaktikate keskmine täheline mass

$$\langle M \rangle = 6,0 \cdot 10^{10} M_\odot. \quad (3.9)$$

Täheline mass moodustab galaktika kogumassist umbes 22% (Stott et al. 2016). Eeldades, et tähelise- ja kogumassi suhe on kaugusest filamendi peateljest sõltumatu, saame tihedusjaotuseks

$$\rho_n = \frac{\langle M \rangle \langle N_n \rangle}{0.22 V_n}. \quad (3.10)$$

Saadud tihedusjaotus on näidatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2: Keskmine tihedus sõltuvalt kaugusest filamendi peateljest.

### 3.3 Gravitatsioonivälja potentsiaal

Gravitatsioonivälja potentsiaal  $\Phi$  on seotud tihedusega Poisson'i võrrandi kaudu, mis on Gaussi seadus gravitatsioonivälja jaoks:

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho, \quad (3.11)$$

mis avaldub silindrilistes koordinaatides kujul

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 4\pi G\rho. \quad (3.12)$$

Kuna süsteem omab telg- ja nihkesümmeetriat, siis on potentsiaal  $\Phi$  vaid  $r$ -i funktsioon ning võrrandist kaovad osatuletised teiste koordinaatide järgi ja osatuletise võib asendada täistuletisega:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\Phi}{dr} \right) = 4\pi G\rho. \quad (3.13)$$

Saime teist järku diferentsiaalvõrrandi potentsiaali  $\Phi$  jaoks, aga Jeans'i võrrandi (3.6) lahendamiseks piisab selle tuletisest  $\frac{d\Phi}{dr}$ . See tähendab, et dispersiooni leidmiseks piisab esimest järku diferentsiaalvõrrandi

$$\frac{df}{dr} = 4\pi G r \rho \quad (3.14)$$

lahendamisest, kus tähistame

$$f \equiv r \frac{d\Phi}{dr}. \quad (3.15)$$

Eeldades, et lõpmatul kaugusel on potentsiaali tuletis null, seame võrrandi ääretingimuseks

$$\lim_{r \rightarrow \infty} f = 0. \quad (3.16)$$

Käesolevas töös lähendame võrrandi lahendit numbriliselt kasutades 4. järku Runge-Kutta meetodit (RK4). Seejärel saame avaldada otsitava potentsiaali tuletise kujul

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{f}{r}. \quad (3.17)$$

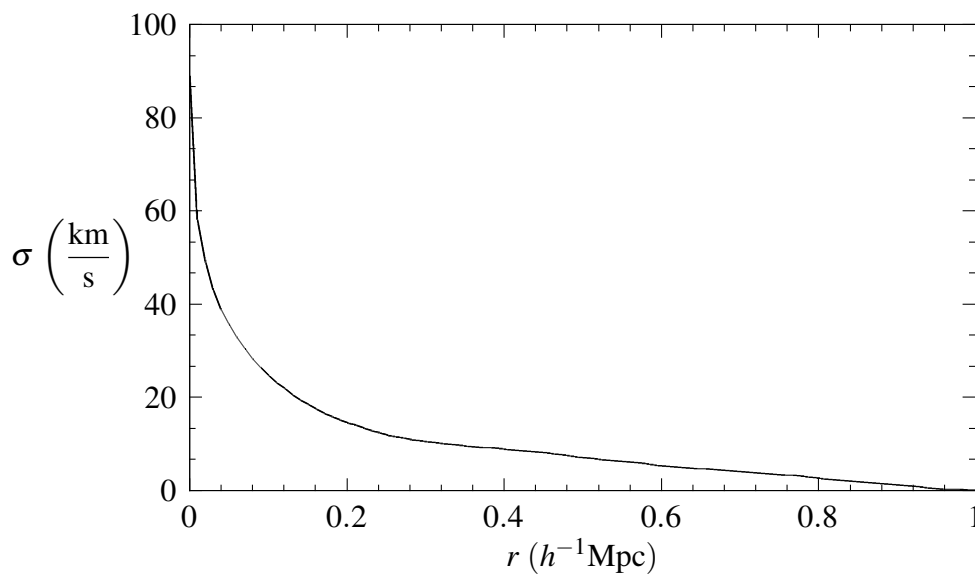
### 3.4 Kiiruste dispersiooni leidmine Jeans'i võrrandist

Mudeli testimiseks saame leida vaatlustega otseselt võrreldava suuruse, kiiruste vaatesihiliste komponentide dispersiooni. Kiiruste dispersiooni leidmiseks saame kasutada Jeans'i võrrandit

(3.6), mis seob dispersiooni  $\sigma^2$  juba lähendatud tihedusega  $\rho$  ja gravitatsioonivälja potentsiaali tuletisega  $\frac{d\Phi}{dr}$ .

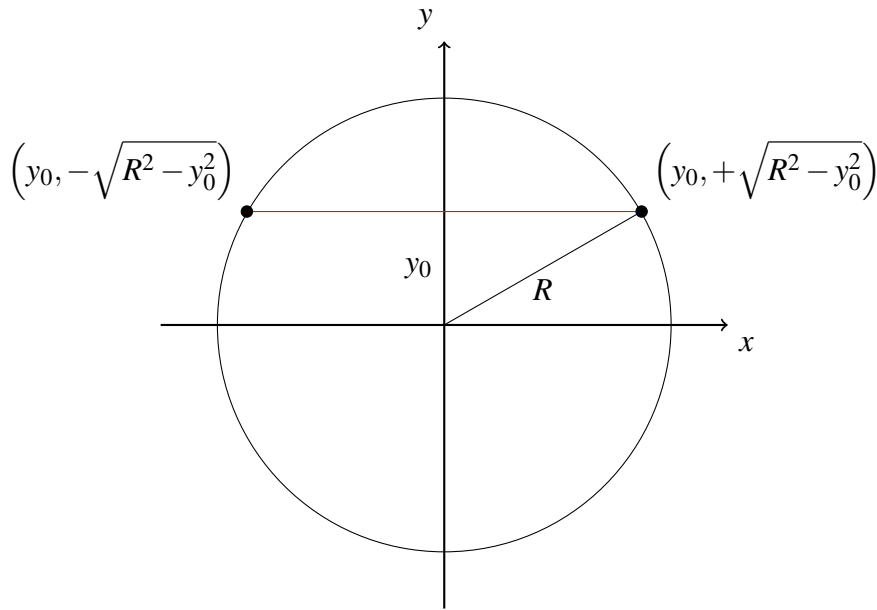
Lähendame kiiruste dispersiooni numbriliselt rakendades Runge-Kutta meetodit (RK4) esimest järku diferentsiaalvõrrandi (3.6) lahendamiseks. Kuna me uurime isoleeritud filament, siis on kahanev tihedus lõpmatul kaugusel peateljest null. Kui tihedus on null, siis pole galaktikaid ega ka nende kiiruste dispersiooni, seega saame seada võrrandi ääritingimuseks

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (\rho \sigma^2) = 0. \quad (3.18)$$



Joonis 3.3: Kiiruste standardhälbe  $\sqrt{\sigma^2}$  sõltuvus kaugusest filamenti peateljest.

Leiame sellise filamenti vaatesuunalise dispersiooni, mille peatelg on vaatesihiga risti. Joonisel 3.4 on filamenti kui silindri telg risti joonise tasandiga. Sümmeetria tõttu ei sõltu tulemus vaatekiire suunast joonise tasandil - siin valime selleks  $x$ -telje positiivse suuna.



Joonis 3.4: Vaatesihiga ( $x$ -telje positiivse suunaga) ristuva peateljega filament. Punane kõõl näitab ühte rada, mis vaatesuunalisse dispersiooni panuse annab. Kiiruste vaatesihiliste komponentide dispersioon sõltub kõikidest kõõludest, mis on  $x$ -teljega paralleelsed.

Vaatesuunaline dispersioon sõltub kõigi silindris olevate galaktikate dispersioonidest. Pideva arvtiheduse  $c$  puhul on galaktikate koguarv ruumintegraal

$$N = \int_0^L \int_0^R \int_0^{2\pi} cr d\theta dr dz, \quad (3.19)$$

kus  $L$  on filamendi pikkus. Eeldades süsteemi telg- ja nihkesümmeetrilisust ehk arvestades, et  $c$  on vaid  $r$ -i funktsioon, lihtsustub see kujule

$$N = 2\pi L \int_0^R cr dr. \quad (3.20)$$

Vaatesuunalise dispersiooni leidmiseks jaotame filamendi ristlõike kõõludeks, mis on vaatesihiga paralleelsed. Need asuvad  $y$ -teljel kõrgustevahemikus  $(-R, +R)$  ja on sõltuvalt kõrgusest  $y_0$  pikkusega  $2\sqrt{R^2 - y_0^2}$  nagu näidatud joonisel 3.4. Integreerides saame dispersiooni avaldada kujul

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \int_0^L \int_{-R}^R \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{+\sqrt{R^2 - y^2}} c \sigma^2(r) dx dy dz. \quad (3.21)$$

Avaldises (3.21) on integreerimispiirkonnaks kogu filamenti sisaldav silinder. Kirjeldades seda

piirkonda silindriliste koordinaatide  $(r, \theta, z)$  abil, on integraaliks

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \int_0^L \int_0^R \int_0^{2\pi} c \sigma^2(r) r d\theta dr dz. \quad (3.22)$$

Kuna süsteem omab sümmeetriat ja nii  $\rho_N$  kui ka  $\sigma^2(r)$  sõltuvad vaid  $r$ -koordinaadist, siis arvestades võrrandit (3.20) lihtsustub vaatesuunalise dispersiooni avaldis kujule

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^R c \sigma^2(r) r dr}{\int_0^R c r dr}. \quad (3.23)$$

Selle väärtuse leidmisel numbriliselt integreerides kasutades eelmistes alapeatükkides lähendatud arvtihedust  $c$  ja kiiruse dispersiooni jaotust  $\sigma^2(r)$ , saame üle filamendi keskmistatud standardhälbeks

$$\sigma = 22,1 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \quad (3.24)$$

Jeansi võrrandite järgi saadud kiiruste vaatesihiliste komponentide standardhälbe väärtus on samas suurusjärgus vaatlusandmete järgi saadud tulemusega  $\sigma_v = (7,6 \pm 19,4) \frac{\text{km}}{\text{s}}$  ja kattub sellega vea piires.

# Peatükk 4

## Kokkuvõte

Galaktikate pöörlemistelgede orientatsioonid filamentides on andnud alust arvata, et filamendid on gravitatsiooniliselt seotud süsteemid, mis galaktikate evolutsiooni mõjutavad. Kui dünaamilise süsteemi liikmed omavad paigalseisva taustsüsteemi suhtes kiiruseid, siis on tegelikkuses isotroopne kiiruste dispersioon vaatesihis mõõtmistulemuste järgi moonutatud.

Käesolevas töös uurisime galaktikate jaotust filamentides Tempel et al. (2014) poolt välja töötatud Bisous mudeli põhjal. Leidsime, et filamendid on andmestiku järgi vaatesihis välja venitatud, aga ei saanud vea piires seda kinnitada.

Teiseks esitasime filamendi dünaamilise mudeli, mis põhineb Jeans'i võrranditel. Mudeli sisendparameetriks on süsteemi radiaalne tihedusjaotus, mida lähendasime filamentide ja galaktikate kataloogide põhjal leituga. Leidsime, et Jeans'i võrrandite järgi leitud vaatesuunaline kiiruste dispersioon kattub vea piires vaatlusliku kataloogi põhjal leitud dispersiooniga.

Saadud tulemused on kooskõlalised filamentidega kui gravitatsiooniliselt seotud dünaamiliste struktuuridega, aga veenvate järelduste tegemiseks on vajalikud väiksema mõõtemääramatusega suuremastaabilised galaktikate punanihete mõõtmised.

# Tänuavaldused

Olen väga tänulik oma juhendajate Rain Kiperi ja Elmo Templi ees, kes pideva ja asjaliku tagasidega aitasid lõputööl valmida ning oma positiivse suhtumisega selle tegemise meeldivaks tegid.

Gutnar Leede

# Kirjandus

- Aihara, H., Allende Prieto, C., An, D., et al. (2011). The Eighth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III. , 193:29.
- Aragón-Calvo, M. A., Platen, E., van de Weygaert, R., ja Szalay, A.Š. (2010). The spine of the cosmic web.
- Binney, J. ja Tremaine, S. (2008). *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press.
- Bond, N. A., Strauss, M. A., ja Cen, R. (2010). Crawling the cosmic network: exploring the morphology of structure in the galaxy distribution. , 406:1609–1628.
- Coil, A. L. (2012). Large scale structure of the universe.
- Forero–Romero, J. E., Hoffman, Y., Gottlöber, S., Klypin, A., ja Yepes, G. (2009). A dynamical classification of the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396(3):1815–1824.
- Hahn, O., Porciani, C., Carollo, C. M., ja Dekel, A. (2007). Properties of dark matter haloes in clusters, filaments, sheets and voids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 375(2):489–499.
- Hoffman, Y., Metuki, O., Yepes, G., Gottlöber, S., Forero-Romero, J. E., Libeskind, N. I., ja Knebe, A. (2012). A kinematic classification of the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425(3):2049–2057.
- Lee, J. ja Lee, B. (2008). The variation of galaxy morphological type with environmental shear. *The Astrophysical Journal*, 688(1):78.
- Novikov, D., Colombi, S., ja Doré, O. (2006). Skeleton as a probe of the cosmic web: the two-dimensional case.
- Platen, E., Weygaert, R. V. D., ja Jones, B. J. T. (2007). A cosmic watershed: the WVF void detection technique.

- Sousbie, T., Pichon, C., Courtois, H., Colombi, S., ja Novikov, D. (2008). The three-dimensional skeleton of the sdss. *The Astrophysical Journal Letters*, 672(1):L1.
- Stott, J. P., Swinbank, A. M., Johnson, H. L., Tiley, A., Magdis, G., Bower, R., Bunker, A. J., Bureau, M., Harrison, C. M., Jarvis, M. J., Sharples, R., Smail, I., Sobral, D., Best, P., ja Cirasuolo, M. (2016). The KMOS Redshift One Spectroscopic Survey (KROSS): dynamical properties, gas and dark matter fractions of typical  $z$  1 star-forming galaxies. , 457:1888–1904.
- 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.
- Tempel, E., Stoica, R.Š., Martinez, V. J., Liivamägi, L. J., Castellan, G., ja Saar, E. (2014). Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS.
- Tempel, E., Tago, E., ja Liivamägi, L. J. (2012). Groups and clusters of galaxies in the SDSS DR8. Value-added catalogues.
- Troxel, M. A. ja Ishak, M. (2015). The intrinsic alignment of galaxies and its impact on weak gravitational lensing in an era of precision cosmology.
- Wang, H., Mo, H. J., Yang, X., ja van den Bosch, F. C. (2012). Reconstructing the cosmic velocity and tidal fields with galaxy groups selected from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420(2):1809–1824.
- Wang, X., Szalay, A., Aragón-Calvo, M. A., Neyrinck, M. C., ja Eyink, G. L. (2014). Kinematic Morphology of Large-scale Structure: Evolution from Potential to Rotational Flow. , 793:58.
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, Jr., J. E., et al. (2000). The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. , 120:1579–1587.

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

Mina, Gutnar Leede,

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

**Galaktikate filamendid kui dünaamilised struktuurid: teooria võrdlus vaatlustega,**

mille juhendajad on Rain Kipper, MSc ja Elmo Tempel, PhD,

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
  3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 26. mai 2016. a.