

TARTU ÜLIKOOL  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tartu observatoorium

Kelly Kelder

**KOSMILISTE TÜHIKUTE TUVASTAMINE KAHEL MEETODIL  
NING LEITUD TÜHIKUTE VÕRDLUS**

Bakalaureusetöö (12 EAP)  
Füüsika, keemia ja materjaliteadus

Juhendaja:  
Taavi Tuvikene, PhD

Tartu 2023

# **Kosmiliste tühikute tuvastamine kahel meetodil ning leitud tühikute võrdlus**

Kosmilised tühikud on osa Universumi suuremastaabilisest struktuurist ning need moodustavad üle poole vaadeldavast Universumist. Käesolevas töös analüüsiti kahte tühikute tuvastamise meetodit: VoidFinder ja ZOBOV. Esimene kahest määrab tühikuid galaktikaid mitte sisaldavate ruumiosadena, teine määrab tühikud ruumi lokaalsete alatiheduste põhjal. Tulemustest selgus, et VoidFinder-meetod leiab ruumist rohkem väiksemate mõõtmetega tühikuid ning ZOBOV-meetod täidab ruumi efektiivselt väiksema arvu suurte tühikutega. Arvuliselt tuvastas VoidFinder-meetod ruumist 264 tühikut, mille efektiivsete raadiuste mediaanväärtuseks leiti  $11,3 h^{-1}$  Mpc. Kogu vaadeldava ruumi ruumalast moodustasid need 52,4%. ZOBOV-meetodiga tuvastati samast alast 91 unikaalset tühikut, mille efektiivsete raadiuste mediaan oli  $14,5 h^{-1}$  Mpc ning need moodustasid kogu ruumist 63,5%.

Märksõnad: Universumi suuremastaabiline struktuur, kosmilised tühikud, VoidFinder, ZOBOV  
CERCS: P520 — Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

## **The identification of cosmic voids using two methods and the comparison of resulting voids**

Cosmic voids are a part of the large-scale structure of the Universe and comprise over half of it. In this thesis, two identification methods – VoidFinder and ZOBOV – were analyzed. The first of the two defines voids as empty spaces containing no galaxies. The second method determines the locations of the voids through local underdensities in the galaxy distribution. Results show that VoidFinder tends to find many smaller voids, as for ZOBOV, which focuses on filling the empty areas more effectively, finding a smaller number of larger voids. Quantitatively, VoidFinder identified 264 voids from the survey, with an effective median radius of  $11.3 h^{-1}$  Mpc, covering 52.4% of the survey volume. The ZOBOV method found 91 unique voids with an effective median radius of  $14.5 h^{-1}$  Mpc, and the voids covered 63.5% of the survey.

Keywords: large-scale structure of the Universe, cosmic voids, VoidFinder, ZOBOV  
CERCS: P520 — Astronomy, space research, cosmic chemistry

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>5</b>
<b>1 Ülevaade</b>	<b>6</b>
1.1 Kosmilised tühikud . . . . .	6
1.2 Tühikute tuvastamise meetodid . . . . .	7
1.3 Andmed . . . . .	7
1.4 Meetodite kirjeldus . . . . .	10
1.4.1 VoidFinder . . . . .	10
1.4.2 ZOBOV . . . . .	11
<b>2 Töö käik</b>	<b>13</b>
2.1 Tühikute tuvastamine . . . . .	13
2.2 Võre kasutamine . . . . .	14
2.3 Leitud tühikute võrdlemine . . . . .	14
2.3.1 Tühikute ruumalad . . . . .	14
2.3.2 Efektiivsete raadiuste määramine . . . . .	15
<b>3 Tulemused ja analüüs</b>	<b>16</b>
3.1 Statistiline analüüs . . . . .	16
3.2 Ühe ruumiosa võrdlus . . . . .	21
<b>Kokkuvõte</b>	<b>24</b>
<b>Tänuavaldused</b>	<b>25</b>
<b>Kirjandus</b>	<b>26</b>
<b>A Töös kasutatud Pythoni kood</b>	<b>28</b>
A.1 VoidFinder-meetodi põhikood . . . . .	28
A.2 ZOBOV-meetodi põhikood . . . . .	30

A.3	ZOBOV-meetodi rakendamiseks vajaminev parameetrite sisendfail . . . . .	33
A.4	Vaadeldud ruumiosa määramine . . . . .	33
A.5	VoidFinderi tühikute kirjeldamine võrega . . . . .	35
<b>B</b>	<b>Programmipaketi VAST lähtekoodis tehtud muudatused</b>	<b>37</b>
	<b>Lihtlitsents</b>	<b>38</b>

# Sissejuhatus

Vaatlused viitavad sellele, et Universumi suuremastaabiline struktuur kujutab endast hiiglaslikku kosmilist võrgustikku (ingl *cosmic web*). Võrgustik koosneb tihedalt paiknevatest galaktikatest ja galaktikate parvedest, mis omakorda moodustavad filamendid, seinad ja sõlmed. Nende vahel asetsevad massiivsed, tunduvalt madalama tihedusega alad – kosmilised tühikud.

Galaktikate paiknemist uuriti aktiivselt juba möödunud sajandi teises pooles. Peamine eesmärk oli teada saada, kas Universumis eksisteerib mingisugune korrapära või suurem struktureeritus. Aastal 1978 toimus läbimurre, mil kaks eraldiseisvat uurimisrühma Jõeveer et al. ja Gregory ja Thompson tuvastasid galaktikate punanihke ülevaate (ingl *redshift survey*) andmestikust tühikud. Vaid loetud aastad hiljem avastasid Kirshner et al. (1981) seni teadaolevalt suurima, ligikaudu sfäärilise sümmeetriaga Boötes'i tühiku, mille ruumala küündib 1 miljoni Mpc<sup>3</sup>-ni.

Kosmiliste tühikute uurimine on oluline mitmel põhjusel. Kuna tühikud on prominentseks osaks suuremastaabilisest struktuurist, aitab nende analüüsimine saada Universumi kui terviku kohta rohkem infot. Näiteks, sobivad märkimisväärselt madalama tihedusega tühikualad ideaalselt uurimaks, kuidas keskkond mõjutab galaktikate tekkimist ja arengut. Lisaks võiksid ruumi paisumise ning gravitatsiooniliste efektide iseärasused tühikute piirkonnas anda teavet kosmoloogiliste parameetrite kohta ning selgitada nii tumeenergia olemasolu kui ka kosmilise taustkiirguse temperatuurianisotroopiat. (Neyrinck, 2008; van de Weygaert ja Platen, 2011)

Selleks, et saaks põhjalikumalt uurida, millised protsessid tühikualadel toimuvad, tuleb veenduda, et tühikute asukohti suudetakse määrata piisava täpsusega. Antud töös käsitletakse kahte laialdaselt kasutatud kosmiliste tühikute tuvastamise meetodit – VoidFinder ja ZOBOV. Mõlemat meetodit rakendades leitakse uuritud ruumiosasse kuuluvate tühikute arv, arvutatakse välja nende ruumalad ning ruumiline osakaal kogu vaatlusalas, leitakse meetodite ühisosa ja määratakse tühikute efektiivseid raadiuseid.

Bakaleureusetöö eesmärkideks on võrrelda kahte peamist kosmiliste tühikute tuvastamise meetodit ning hinnata, kas need sobivad tühikute tuvastamiseks TÜ Tartu observatooriumis koostatud galaktikate ruumjaotuse kataloogist.

# Peatükk 1

## Ülevaade

Käesolevas peatükis keskendutakse kosmiliste tühikute üldisele olemusele, näidatakse, milliste andmetega töötatakse ning kirjeldatakse lähemalt töös kasutatavaid meetodeid.

### 1.1 Kosmilised tühikud

Tühikud (ka tühimikud) on kumera, tihti ümara kujuga, nende läbimõõt võib varieeruda vahemikus 15–150 Mpc (megaparsek;  $1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$ ). Kuigi nimetus viitaks justkui täielikule tühjusele, sisaldavad tühikud siiski mingil määral ainet, sealhulgas üksikuid nähtavaid galaktikaid. Hinnanguliselt moodustab tühikualade tihedus Universumi keskmisest tihedusest umbes 10–20%. Rääkides suures mastaabis aine tihedusest, võetakse enamjaolt vaatluse alla galaktikate arvtihedus ehk galaktikate arv ruumalaühiku kohta. (Neyrinck, 2008; Baushev, 2021)

Tühikute tekkimist seostatakse enamasti varajases Universumis toimunud tihedusfluktuatsioonidega, mis inflatsiooni (ruumi paisumise) tagajärjel süvenesid. Keskmisest hõredamatest aladest hakkas aine piltlikult öeldes välja voolama ning liikus tühjade alade servadesse tihedamatesse piirkondadesse, kuhu selle tulemusena kujunesid galaktikate filamendid. Tühikutes on aine vähesuse tõttu gravitatsioonilised mõjustused praktiliselt olematud, mistõttu on ruumi paisumine neis tunduvalt suurem kui filamentides ning ainel on tendents liikuda tihedamate alade suunas tühikust välja. Eemaldumise kiirus on seejuures suurim tühiku keskpunkti ümbruses ning väikseim selle servades. (van de Weygaert ja Bond, 2008)

Tänapäevaks on määratud, et tühikud moodustavad Universumi ruumalast 50–75%. Tühikute ruumilise osakaalu leidmisega on tegeletud näiteks El-Ad ja Piran (1997) töös, kus saadi tulemuseks ligikaudu 50%, van de Weygaert (2014) töös määrati osakaaluks 77% ning Douglass et al. (2023) poolt tuvastatud tühikud moodustasid ruumist 60,5–68,1%. Tulemused sõltuvad tugevalt sellest, millist tüüpi meetodit tuvastamiseks kasutatakse. Kuna kosmilise tühiku mõiste

pole täiesti üheselt määratud, on iga tuvastamise meetodi loomisel lähtunud veidi erinevatest asjaoludest.

## 1.2 Tühikute tuvastamise meetodid

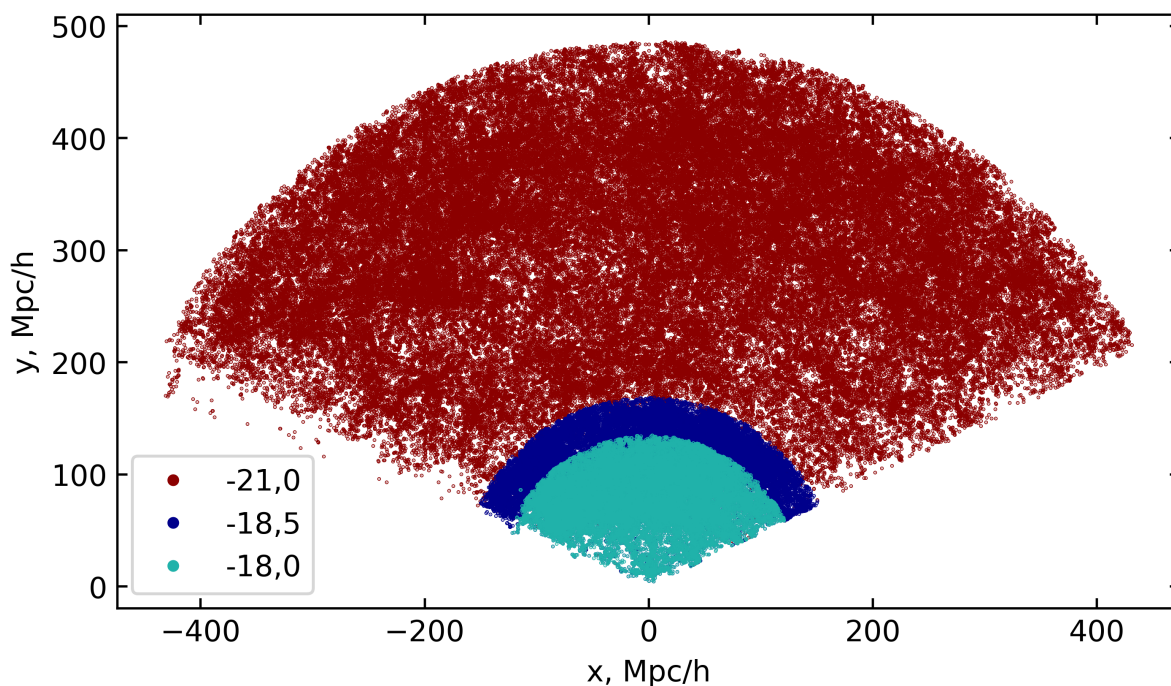
Ajalooliselt on välja kujunenud hulgaliselt meetodeid, millega on võimalik kosmilisi tühikuid tuvastada. Sisu poolest jaotuvad nad kolme klassi. Esimene neist lähtub tühikutest kui aladest, mis ei sisalda ühtegi mitte-isoleeritud galaktikat. Sellise meetodi rakendamiseks tuleb esmalt määrata galaktikate andmestikust filamentidesse kuuluvad galaktikad ning nende põhjal leitakse sinna vahele jäävad tühjad alad. Esimese klassi üheks esindajaks on VoidFinder, mida tutvustatakse lähemalt peatükis 1.4.1. Teist klassi iseloomustab ruumiosade jaotamine tiheduse põhjal. Sellist tüüpi meetodi rakendamisel tavaliselt jagatakse vaadeldud ruum tükikideks ning tühikute kasvatamine algab kõige madalama tihedusega tükist, kuni jõutakse suure tihedusega filamentideni. Antud käsitlust kirjeldatakse täpsemalt peatükis 1.4.2 ZOBOV-meetodi näitel. Kolmas klass leiab tühikuid dünaamiliselt, võttes aluseks gravitatsioonilised ebastabiilsused. Kolmandasse klassi kuuluvate meetodite tühiku definitsioon erineb oluliselt eelnevast kahest, mille puhul oli tühik muutumatu tühi piirkond. Siin vaadeldakse tühikut kui ala, kust aine pidevalt eemaldub. Kusjuures on eemaldumine vastavuses tumeenergia olekuvõrrandiga. Kolmanda klassi meetodite seast on üks enim kasutatav DIVA (*Dynamical void analysis*, Lavaux ja Wandelt, 2010).

## 1.3 Andmed

Töös võeti aluseks Tempel et al. (2014) koostatud galaktikagruppide kataloog: Flux- and volume-limited groups for SDSS galaxies, mis on koostatud Sloani digitaalse taevaülevaate (*Sloan Digital Sky Survey*) kümnendast andmete väljalaskest (DR10).

Tühikute leidmiseks kasutati konstantse ruumtihedusega (ingl *volume-limited*) galaktikate tabelit piirheledusega  $-18,5$  tähesuurust. Valimisse kuuluvad galaktikad, mis on heledamad kui  $-18,5$  tähesuurust (absoluutne heledus  $M \leq -18,5$ ) ja mis asuvad lähemal kui piirkaugus  $168,9 h^{-1}$  Mpc, kus  $h$  on dimensioonitu Hubble'i parameeter, mille väärtus on seotud Hubble'i konstandiga ( $H_0$ ):

$$H_0 = 100 h \frac{\text{km}}{\text{s}} \frac{1}{\text{Mpc}}. \quad (1.1)$$



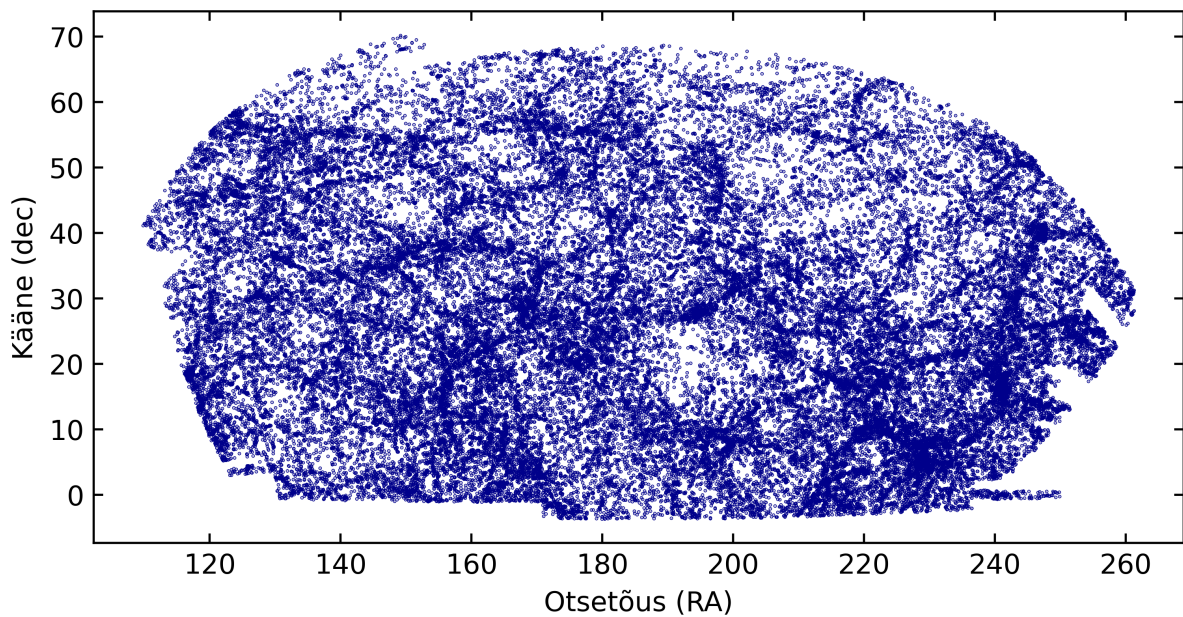
Joonis 1.1: Vaatluse alla võetavad galaktikad erinevate piirheleduste ja vastavate piirkauguste korral. Käesolevas töös kasutatakse valimit  $-18,5$  (tumesinine).

Andmete taoline piiramine oli oluline selleks, et galaktikate jaotus kogu vaadeldavas piirkonnas oleks ühtlane. Mida kaugemat ala vaadelda, seda vähem nõrku galaktikaid on võimalik mõõta, mistõttu igale määratud heleduspiirile oli määratud kaugus, milleni heleduspiirile vastavad galaktikad olid veel mõõdetavad. Joonisel 1.1 on töös kasutatavat andmestikku võrreldud Tempel et al. (2014) artikli suurima ja väikseima konstantse ruumtihedusega galaktikate valimiga.

Varasemates tühikute tuvastamise töödes, näiteks Pan et al. (2012) ja Douglass et al. (2023), on avaldatud tühikute kataloogid leitud suuremast ruumiosast, mille galaktikate keskmine tihedus on madalam (analoogne joonisel 1.1 piirheledusega  $-21,0$  tähistatud alale). Käesoleva töö uudsus seisneb asjaolus, et uuritud ruumiosa on kordades väiksem, kuid suurema galaktikate tihedusega.

Tabel 1.1: Töös kasutatavad galaktikate andmed (kokku 73 006 rida). Antud on galaktikate taevakoordinaadid (ra, dec; ühik: kraad), punanihke arvväärtsus (redshift), absoluutne heledus  $r$  filtris (rabsmag; ühik: tähesuurus) ning korrigeeritud ristkoordinaadid ( $x, y, z$ ; ühik:  $h^{-1}$  Mpc)

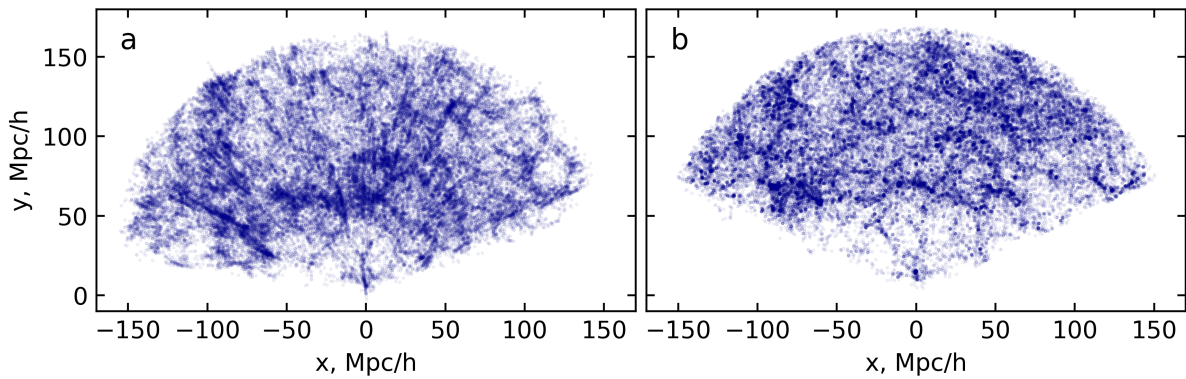
ra	dec	redshift	rabsmag	x	y	z
109.81305	41.14679	0.02766	$-18.59$	60.874	43.14	37.754
109.96461	41.41612	0.03492	$-18.76$	76.160	54.532	47.712
110.08979	41.39777	0.04984	$-19.51$	107.965	77.516	67.497
...	...	...	...	...	...	...
261.24625	31.26067	0.04604	$-19.20$	$-114.421$	62.044	45.265



Joonis 1.2: Töös kasutatav Sloani taeväülevaate ala taevakoordinaatides.

Nõutud tingimustele vastav valim koosnes 73 006 galaktikast. Tabelis 1.1 on esitatud galaktikate taevakoordinaadid otsetõus (ra) ja kääne (dec), mille kohta näeb vaadeldud taevaala visualiseeringut joonisel 1.2, galaktikate absoluutsed heledused punases (r) filtris ning punanihke arväärtused. Lisaks on antud taevakoordinaatide ja punanihke põhjal teisendatud ja korrigeeritud galaktikate ristkoordinaadid (x, y ja z).

Tühikute tuvastamisel pidi lähtuma asjaolust, et taevakoordinaatide ning punanihete otsene kasutamine tekitab galaktikate andmestikku "jumala sõrmede" efekti (ingl *finger-of-god effect*). Nimetatud efekt kujutab endast galaktikaparvede väljavenitamist vaatekiire sihis, nagu osutaks jumal sõrmega vaatlejale. Efekt seisneb üksnes mõõtmistulemuste sisus: on eeldatud, et punanihke arväärtused kirjeldavad täpselt ruumi paisumisest tingitud galaktikate eemaldumist, küll aga sisaldub tulemus ka Doppleri efektist tingitud komponent – galaktikate radiaalliikumised meie suunas või meist eemale, mis on tingitud galaktikate liikumisest galaktikaparve sees. Iga mõõdetud punanihke arväärtus on selle komponendi võrra kas veidi suurem või väiksem tegelikust ning selle tulemusena venitatakse ümarad galaktikaparved piklikeks (joonis 1.3a). Töös kasutataval galaktikate kataloogil olid ristkoordinaadid Doppleri efekti suhtes korrigeeritud (joonis 1.3b).



Joonis 1.3: Taevakoordinaatide ja punanihke kasutamisel tekkinud "jumala sõrmede" efekt galaktikate andmestikku (a) ning efekti suhtes parandatud ristkoordinaadid (b).

## 1.4 Meetodite kirjeldus

Töös kasutatakse Pythoni-põhist programmpaketti VAST (*Void Analysis Software Toolkit*). Paketti on kokku pandud VoidFinder ja ZOBOV meetodid. Mõlema meetodi ülesehitust kirjeldatakse lähemalt järgmistes alapeatükkides.

### 1.4.1 VoidFinder

VoidFinder on välja töötatud põhimõttel, et Universumi suuremastaabiline struktuur koosneb kosmilistest tühikutest ning neid ümbritseatest galaktikatest moodustatud tihedatest filamentidest. Tühikute tuvastamiseks esmalt eristatakse galaktikate andmestikust filamentidesse kuuluvad ja isoleeritud galaktikad. VoidFinder kasutab isoleeritud galaktikate tuvastamiseks niinimetatud kolmanda lähima naabri meetodit – galaktikat nimetatakse isoleerituks, kui tema kolmas lähim naaber asub kaugemal kui mingi etteantud distants. Isoleeritud galaktikad eemaldatakse andmestikust ning alles jäävad kosmilistesse filamentidesse kuuluvad galaktikad (ingl *wall galaxies*). (El-Ad ja Piran, 1997)

Ruumi paigutatakse kindla sammuga võre ning tühjadest võrepunktidest hakatakse kasvatama sfääre. Esmalt leitakse suurima raadiusega sfäärid, mida on võimalik ruumi asetada nii, et need ei kattuks filamentidega. Sfääri keskpunkti asukoht määratakse piirjuhuga, kus maksimaalse võimaliku raadiuse korral puutub sfääri pind neljast erinevast punktist kokku mõne filamenti galaktikaga. Suurim sfäär määrab ära tühiku asukoha. Üldiselt on nende raadiused suurusjärgus 10–15 Mpc, kus alumine piir (piirraadius) on ette antav. Küllalt levinud on, et suurima sfääri raadiuse piiriks valitakse 10 Mpc, näiteks Pan et al. (2012) ja Douglass et al. (2023) töödes toimiti vastavalt. Kuna enamasti pole tühikud sfäärilised, vaid pigem elliptilised või keerulisema kujuga, tuleb struktuuri leidmiseks lisada väiksemaid sfääre, mis vähemalt 50% ulatuses suurega kattuksid – see tagab, et tegemist on sama tühikuga. (El-Ad ja Piran, 1997; Douglass et al., 2023)

Vältimaks tühikute tuvastamist väljaspool tegelikku vaatlusala, on VoidFinderi kasutamisel oluline, et vaatlusala oleks rangelt piiratud. Selle tagamiseks antakse ette lisatingimus: kui sfääri ruumalast vähemalt 10% jääb vaatlusalast välja, siis sfäär eemaldatakse. Lisaks rakendatakse olulist tingimust tühikualade eristamiseks, mille korral, kui vaatluse all on kaks sfääri raadiustega üle piirraadiuse (näiteks 10 Mpc) ning vähem kui 10% väiksema sfääri ruumalast kattub suuremaga, loetakse need sfäärid eraldi tühikutesse kuuluvateks. (Hoyle ja Vogeley, 2002; Douglass et al., 2023)

Kattumise ning äärealade arvestamine on oluline, sest vastasel juhul on ühte ruumiosa analüüsitud mitu korda ning analüüsi käigus saadud tühikute arv reaalsusest palju suurem. Pan et al. (2012) töös rakendati VoidFinder-meetodit neid parameetreid arvestamata. Nende algoritmi kasutades ilma järeltöötluseta saaks tulemuseks suure tühikute arvu just äärealadel.

## Sisendid ja väljundid

Algoritm võimaldab sisse lugeda galaktikate keskpunkte nii perioodilistes ristkoordinaatides kui ka taevakoordinaatides, arvestades punanihke arvvaartusi.

Väljundiks antakse kaks tekstifaili. Esimene fail sisaldab endas andmestiku tühikutesse paigutatud suurimate sfääride keskpunkte ja raadiuseid (*\_maximals.txt*), teine määrab samad parameetrid kõigi, sealhulgas nendega osaliselt kattuvate väiksemate sfääride jaoks (*\_holes.txt*). Mõlemat sfääride liiki on lähemalt kirjeldatud eelmises peatükis.

### 1.4.2 ZOBOV

ZOBOV (*ZOnes Bordering On Voidness*) meetodi puhul jagatakse vaadeldavasse ruumiosasse kuuluvad galaktikad ühekaupa niinimetatud rakkudesse (ingl *cell*). Rakk ümber galaktika järjenumbriga  $i$  on defineeritud kui piirkond, mis on galaktikale  $i$  lähemal kui ükskõik millisele teisele naabergalaktikale. See tähendab, et rakkudeks jaotatud ruumis paiknevad isoleeritud galaktikad suurtes ja väga madala tihedusega rakkudes ning filamentides asuvate galaktikate rakud on mõõtmelt väikesed ja tihedus suur. (Neyrinck, 2008)

Arvutusmahu vähendamiseks jagatakse rakud tiheduse järgi tsoonidesse. Esmalt leitakse tiheduste lokaalsed miinimumid ehk kõige madalama tihedusega rakkude keskmed (galaktika asukoht rakus). Kahe kõrvuti oleva raku seast leitakse see, mis on madalama tihedusega. Protsessi jätkatakse, kuni jõutakse rakuni, mille tihedus on kõrvalolevatest väiksem. Kesksel raku (miinimumi) koos oma naabritega nimetataksegi tsooniks. Selleks, et leida tühikuid, tuleb mõned tsoonid veel omavahel ühendada. (Neyrinck, 2008)

Ühendamiseks kasutatakse veelahkme-põhist (ingl *watershed*) segmenteerimist. Piltlikult võib

seada ette kujutada kui maastiku üleujutamist. Esmalt täitub veega sügavaim lohk ehk miinimum, seejärel veetase muudkui tõuseb ning täidab pidevalt tsooni. Protsess peatub siis, kui vesi hakkab üle voolama teise lohku ehk kõrvalmiinimumi. Tühikuks loetakse see ala, mis vahetult enne protsessi lõppu oli veega täidetud. Segmenteerimise tulemusena leitakse lisaks tühikutele ka alamtühikud. (Platen et al., 2007)

Alamtühikud tekivad, kui segmenteerimise etappi alustada tsoonist, mille miinimum on lokaalselt madalaim, see tähendab, et ühegi naabertsooni tihedus pole väiksem vaadeldavast. Kui segmenteerimist alustada mõnest selle kõrval asuvast tsoonist, siis liidetakse juurde ka miinimumi sisaldav naabertsoon ning tulemusena saadakse tühik, mis koosneb kahest tsoonist. Meetodiga käiakse läbi kõik ruumis asuvad tsoonid ning leitakse, millistesse (alam)tühikutesse need kuuluvad. Tulemusena leitakse reeglina ka tühikuid, mis on hierarhiliselt kõrgema järgu alamtühikud ehk kuuluvad omakorda mõne juba määratud alamtühiku sisse. (Neyrinck, 2008)

ZOBOVi algoritmi rakendamisel tuleb saadud tühikute jaoks teha veel ka järeltöötlus. Selleks on VAST-paketti ühendatud ka mõned edasiarendused, millest antud töös kasutati VIDE (*Void IDentification and Examination toolkit*) algoritmi. VIDE määrab tühikute leidmisel lisatingimuse, mis on seotud vaatlusalala keskmise tiheduse ja etteantava löikeparameetriga  $dc$  (*density cut*, vaikeväärtus 0,2). Kui tsooni tihedus on väiksem kui  $dc$  keskmise tihedusest, toimub naabertsooniga ühendamine. Kui ühendatud tsoonide (tühiku) tihedus saab suuremaks  $dc$  keskmisest tihedusest, on see tühikuks nimetamise seisukohalt liiga suur, ühendamist ei toimu ning tsoon eemaldatakse tühikust. (Sutter et al., 2015)

## **Sisendid ja väljundid**

Sarnaselt VoidFinder'i algoritmile, peavad sisendfailis galaktikate asukohad olema antud taevakoordinaatides (otsetõus ja kääne) ning fail peab sisaldama punanihke arvvaartust.

Tulemusena antakse väljundiks kolm tühikuid iseloomustavat faili. Andmefailis *\_galzones.dat* on galaktikad määratud tsoonidesse ning tähistatud vastava tsooni numbriga, fail *\_zonevoids.dat* näitab, millisesse tühikusse iga tsoon kuulub ning *\_zobovoids.dat* annab ZOBOVi algoritmiga leitud tühikute koordinaadid, efektiivsed raadiused ja elliptilisused.

# Peatükk 2

## Töö käik

Peatükis näidatakse, kuidas eespool kirjeldatud meetodite rakendamine võimaldas tühikuid tuvastada, milliseid modifikatsioone tuli teha, et kood sobituks andmetega ning milliseid asjaolusid võeti arvesse tulemuste võrdlemisel.

### 2.1 Tühikute tuvastamine

VoidFinder-meetodi puhul võeti aluseks VASTi dokumentatsioonis antud näidiskript, milles oli tühikute tuvastamiseks kasutatud galaktikate taevakoordinaate ning punanihkeid. Lähtekoodi viidi sisse muudatused, mille tulemusena kasutati tühikute tuvastamiseks galaktikate ristkoordinaate. Vaatulusalale määrati sobilik mask, mis tagas olukorra, kus tühikuid otsitakse vaid vaatlusala seest. Meetodi rakendamiseks kasutatud fail on välja toodud lisas A.1 ning vaatlusala mask lisas B. Kuna töös uuritav galaktikate kataloog oli ruumiosa mõõtmelt väiksem ning suurema galaktikate tihedusega, kui varem uuritud töodes, leiti, et neis määratud vaikeparameetrid vajasisid kohendamist. VoidFinderi suurima sfääri piirradiust (vaikeväärtusega  $10 h^{-1}$  Mpc) varieeriti vahemikus  $6-10 h^{-1}$  Mpc, näitamaks, kuidas tuvastatud tühikute arv ning osakaal selle tulemusena muutuvad. Tühikud pandi kokku ala sisse mahtuvatest suurimatest sfääridest ning nendega kattuvatest väiksematest.

ZOBOVi algoritm vajab lähtekoodis analoogseid muudatusi: viidi sisse tingimus, kus valitakse analüüsiks galaktikate ristkoordinaadid ning vaadeldud ala piiratakse samasuguse maskiga. Kuna täpsema analüüsi jaoks ei piisa sfäärilisest või ellipsoidsest lähendusest, mida ZOBOV-meetod vaikumisi väljundiks pakub, kirjutati koodi juurde osa, mis määras rakkudest koosnevate tühikute tegelikud kujud. Kasutatud ZOBOVi kood on toodud lisas A.2, muudatused lisas B ning meetodite lõpptulemused peatükis 3.1.

## 2.2 Võre kasutamine

Meetodite rakendamisel saadud tühikute kataloogide võrdlemiseks kasutati analüüsiks võre. Võrepunktidega tuli määrata töös vaadeldud ruumiosa, mis sarnanes oma kuju poolest kera sektorile, mille raadius oli määratud valimi piirkaugusega. Erinevalt kera sektorist oli selle pind määratud vaadeldud taevaalaga, mida on näidatud joonisel 1.2.

Vaadeldud taevaala määramiseks kasutati HEALPix piksleid. HEALPix (*Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelation of a sphere*) on algoritm, mis jagab taevafääri võrdse suurusega nelinurkseteks piksliteks. Töös kasutati HEALPix algoritmi-põhist Pythoni paketti healpy (Górski et al., 2005; Zonca et al., 2019). Valiti parameeter NSIDE = 64, millega jaotati taevafäär  $12 \cdot 64^2 = 49152$  piksliks ning seejärel määrati pikslid, millesse kuulus vähemalt üks galaktika.

Viimaks defineeriti risttahuka-kujuline võre, mis oli piiratud kataloogi galaktikate äärmiste ristkoordinaatidega (minimaalne ja maksimaalne galaktika koordinaat iga telje sihis). Võre sammuks võeti igas suunas  $1 h^{-1}$  Mpc. Leiti, millised võrepunktid asusid galaktiktega ühistes pikslites ning mis asusid lähemal valimi piirkaugusest  $168,9 h^{-1}$  Mpc. Tingimustele vastavad võrepunktid moodustasid vaadeldud ruumiosa. Ruumiosa määramiseks kasutatud kood on leitav lisast A.4.

## 2.3 Leitud tühikute võrdlemine

Tulemuste võrdlemisel võeti aluseks järgnevad karakteristikud:

- Unikaalsete tühikute arv
- Tühikute ruumalad
- Efektiivsed raadiused
- Osakaal (%) vaadeldud alas
- Meetodite ühisosad, nende osakaal (%) kummagi meetodi suhtes
- Tühikutesse jäävate galaktikate arv ja osakaal (%)

### 2.3.1 Tühikute ruumalad

Tühikute ruumalade määramiseks võeti aluseks peatükis 2.2 kirjeldatud võre. Kuna võre sammuks oli  $1 h^{-1}$  Mpc, siis tuli määrata, millised vaadeldud ruumiosa võrepunktid asuvad tühikus ning vastavate võrepunktide kokku summeerimisel saadi tühiku ruumala ühikutes

$(h^{-1} \text{ Mpc})^3$ . Võre kasutamine ruumala leidmiseks tagas leitud koguruumala piisava täpsuse ilma, et kattuvusi arvestataks mitmekordselt.

VoidFinder-meetodi puhul oli igale sfäärile omistatud *flag*-väärtus ehk indeks, mis näitas, millise järjenumbriga tühikusse see kuulus. Kõik tühikutes asuvad võrepunktid oli võimalik õige indeksiga vastavusse viia ning summeerides üle indeksi saadi tulemuseks tühikute ruumalad. ZOBOV-meetodiga leiti lisaks tühikutele ka alamtühikud, mis edasise analüüsi jaoks tuli eemaldada, et välistada andmete mitmekordset analüüsimist. Kui alles olid jäänud vaid unikaalsed tühikud, võis võrepunktid lihtsalt loendada ning ruumalad olid määratud.

### 2.3.2 Efektiivsete raadiuste määramine

Tühikute efektiivsete raadiuste hindamiseks tehti sfääriline lähendus, mis tähendas, et kui on teada tühiku ruumala, saab sellega vastavusse viia sfääri, mille raadius

$$R = \left( \frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3}, \quad (2.1)$$

kus  $V$  tähistab tühiku ruumala. Efektiivseid raadiuseid kasutati selleks, et hinnata tühikute suuruste jaotust. Lisaks sai määrata kummagi meetodi jaoks efektiivsete raadiuste mediaanväärtused ning maksimaalsed väärtused.

# Peatükk 3

## Tulemused ja analüüs

Peatükk jaotub kaheks osaks, kus esimeses tehakse tulemuste statistiline analüüs ning teises osas vaadeldakse näitena konkreetset väiksemat ruumiosa ning selles leitud tühikuid.

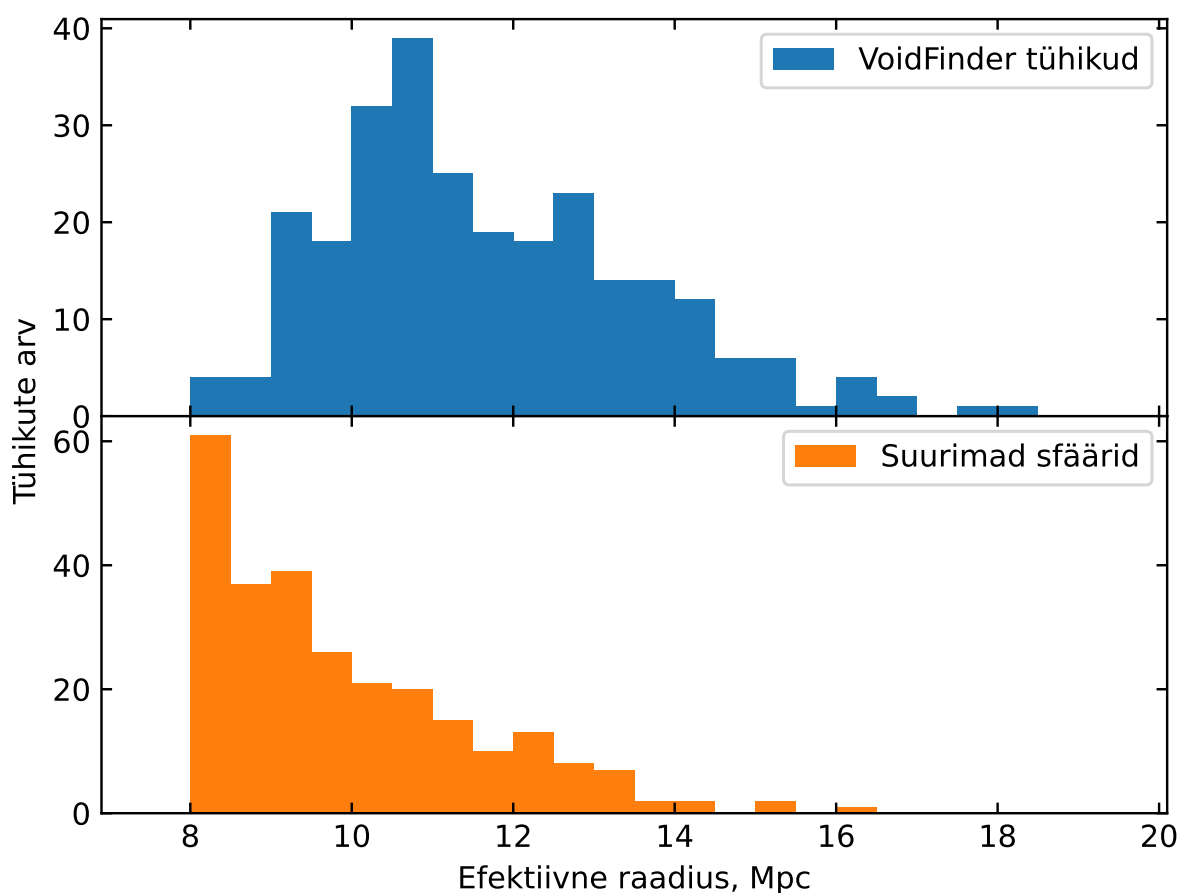
### 3.1 Statistiline analüüs

VoidFinder-meetodiga tühikute tuvastamisel varieeriti suurima sfääri minimaalse raadiuse piiri vahemikus  $6\text{--}10 h^{-1} \text{ Mpc}$  sammuga  $1 h^{-1} \text{ Mpc}$ . Hinnati, kuidas muutuvad tühikute arvud, nende ruumiline osakaal, efektiivsed raadiused ning neis sisalduvate galaktikate arv. Tulemused kajastuvad tabelis 3.1.

Tulemustest ilmneb, et vähendades piirraadiust, kasvasid nii tühikute arv kui ka nende osakaal ruumis märkimisväärselt. Ruumiline osakaal piirraadiuse  $6 h^{-1} \text{ Mpc}$  korral oli 1,9 korda suurem kui raadiuse vaikeväärtuse  $10 h^{-1} \text{ Mpc}$  korral, seevastu tuvastatud tühikute arv oli kuuekordistunud. Lisaks on täheldada efektiivsete raadiuste mediaanväärtuse märgatavat vähenemist.

Edasise analüüsi jaoks valiti piirraadiuseks  $r_{\min} = 8 h^{-1} \text{ Mpc}$ , mille puhul tuvastati vaadeldud ruumiosast 264 tühikut, mis koosnesid 4818 sfäärist. Vastavalt peatüki 2.3.2 kirjeldusele, määrati iga tühiku efektiivne raadius ning nende jaotus kõrvutati tühikutes paiknevate suurimate sfääride raadiustega (joonis 3.1). Võrdlusega saavutati oodatav tulemus, kus sfääride raadiused on valdavalt väiksemad ning tühikute raadiused on koondunud suuremate väärtuste ümber.

Meetodiga tuvastatud tühikud visualiseeriti koos galaktikatega. Kuna tühikud täidavad kogu ruumi, ei ole võimalik andmeid korraga 2-dimensionaalsel projektsioonil mõistlikult esitada, mistõttu tuli andmetest võtta ühe telje sihis piisavalt õhuke kiht. Siin valiti selleks  $3 h^{-1} \text{ Mpc}$  lõige vahemikus  $z \in [-1, 2] h^{-1} \text{ Mpc}$ , mis vastab ligikaudu vaatlusala keskosale. Joonisel 3.2 on näha,

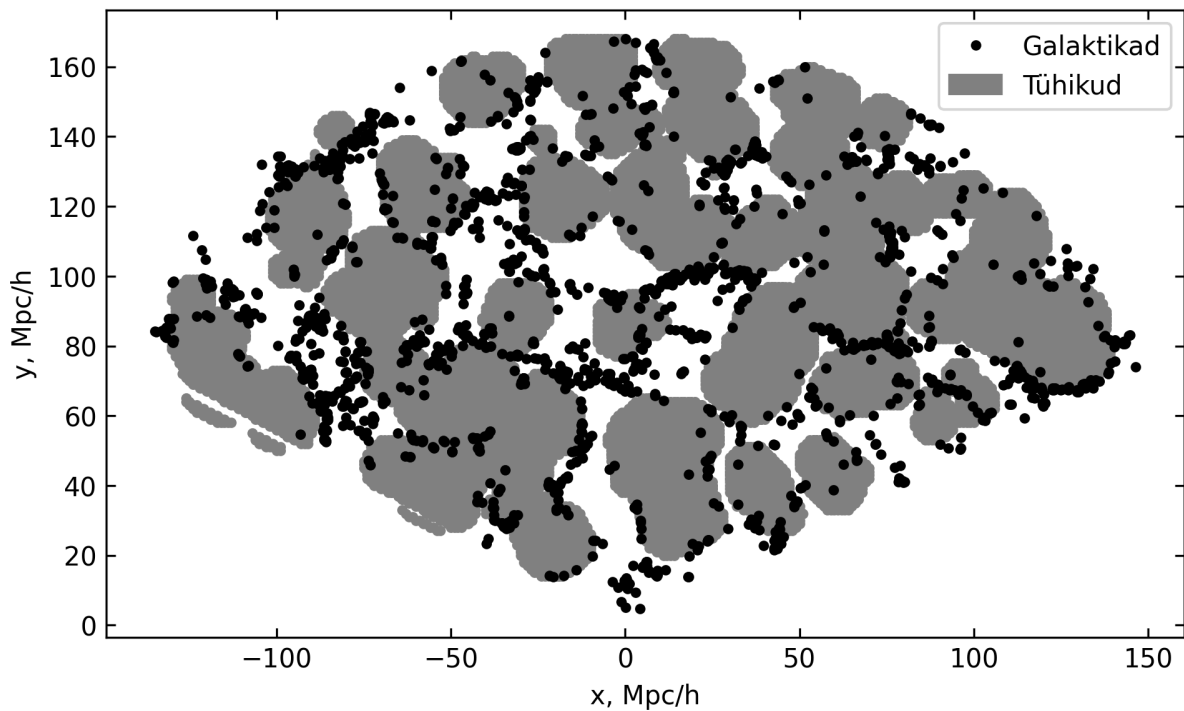


Joonis 3.1: VoidFinder-meetodiga leitud tühikute efektiivsed raadiused võrrelduna sama meetodiga leitud suurimate sfääridega.

Tabel 3.1: VoidFinder suurima sfääri raadiuse piiri varieerides ning ZOBOV-meetodiga saadud tühikute arvud, osakaalud, efektiivsete raadiuste mediaanväärtused ning neis sisalduvate galaktikate arv ja osakaal.

Meetod	$r_{\min}$ (Mpc/h)	Tühikute arv	Tühikute ruumiline osakaal (%)	$r_{\text{ref}}$ mediaan (Mpc/h)	Galaktikate arv tühikutes	Galaktikate osakaal (%)
VoidFinder	10	101	34,4	14,1	2197	3,0
	9	166	43,7	12,7	2881	3,9
	8	264	52,4	11,3	3525	4,8
	7	412	60,5	9,9	4152	5,7
	6	612	65,8	8,8	4488	6,1
ZOBOV		91 129*	63,5	14,5	53 169	72,8

\* Tühikud koos alamtühikutega

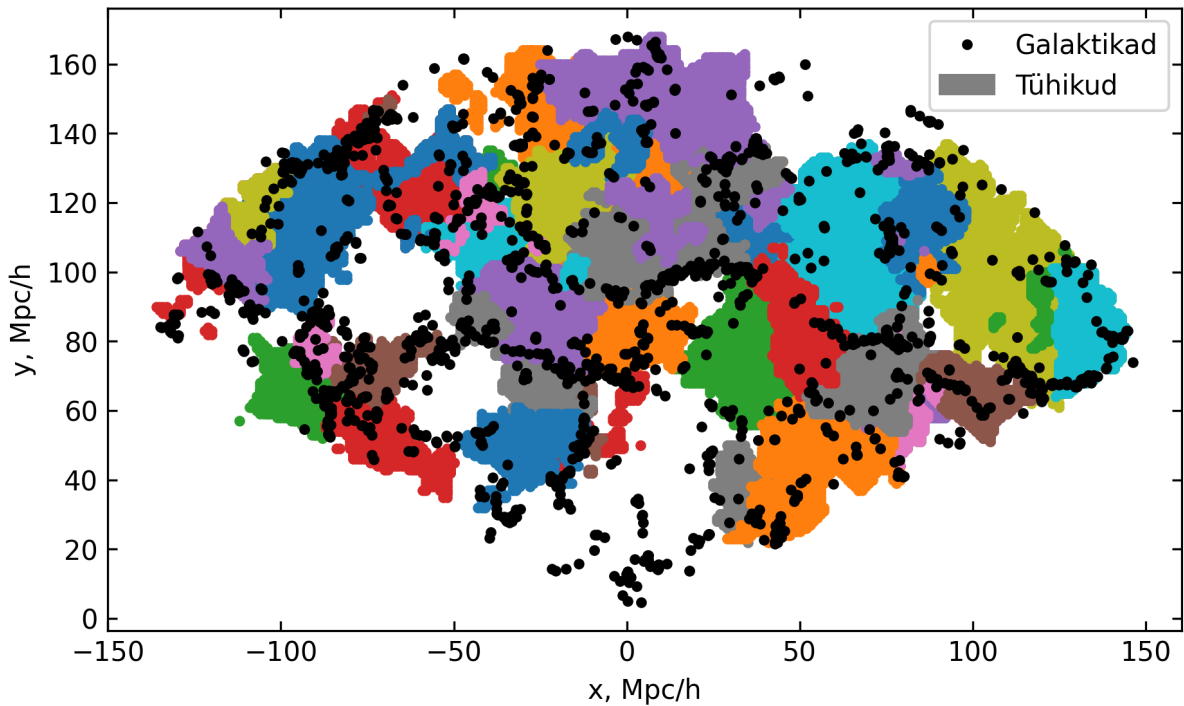


Joonis 3.2: VoidFinder-meetodiga raadiuse piiranguga  $8 h^{-1} \text{Mpc}$  leitud tühikud koos galaktikatega. Läbilõige  $3 h^{-1} \text{Mpc}$  paksusega kihist vahemikus  $z \in [-1, 2] h^{-1} \text{Mpc}$ .

et VoidFinder-meetodiga leitud tühikud on valdavalt ümarad, hästi eristatavad ning galaktikad on suures osas jaotunud nende servade lähiumbrusesse. Tühikute sisse jäävad galaktikad on VoidFinderil poolt defineeritud kui isoleeritud galaktikad. Leiduvad ka üksikud näivald tühjemad alad, kus tühikuid ei tuvastatud. Tegemist on aladega, mis on oma mõõtmetelt liiga väikesed, et VoidFinderil oleks võimalik võrepunktidest kasvatada vähemalt  $8 h^{-1} \text{Mpc}$  raadiusega sfääre ilma, et see ühegi filamendiga kattuma hakkaks. Selle meetodi puhul võivad seega tuvastamata jääda tugevalt elliptilised või korrapäratud pikliku kujuga tühikud.

ZOBOV-meetodit rakendades leiti vaadeldud ruumist 129 tühikut, millest 91 olid unikaalsed tühikud ning ülejäänud 38 alamtühikud (tabel 3.1). Tulemused visualiseeriti galaktikatega  $3 h^{-1} \text{Mpc}$  paksuses lõigus. Joonisel 3.3 on näha kõiki tühikuid kui ka neis sisalduvaid alamtühikuid. Reeglina paiknevad selle meetodiga leitud tühikud külj-külje kõrval ning galaktikad asuvad enamasti kahe tühiku või tühiku ja alamtühiku piiril. Meetodi üheks eripäraks leiti, et tühikute servmised rakud, kus paikneb galaktikaid tihedalt, loetakse samuti tühikusse kuuluvateks. Eripära tuleneb veelahkme-põhise segmenteerimise tingimustest, mille põhjal loetakse tsooniks see ala, mis vahetult enne "üle voolamist" oli nii-öelda veega täidetud. Kuigi selline tulemus on täielikus vastavuses meetodi olemusega, tuleks tulevikus tegelike tühikualade leidmiseks suurema tihedusega rakud (filamendid) eemaldada.

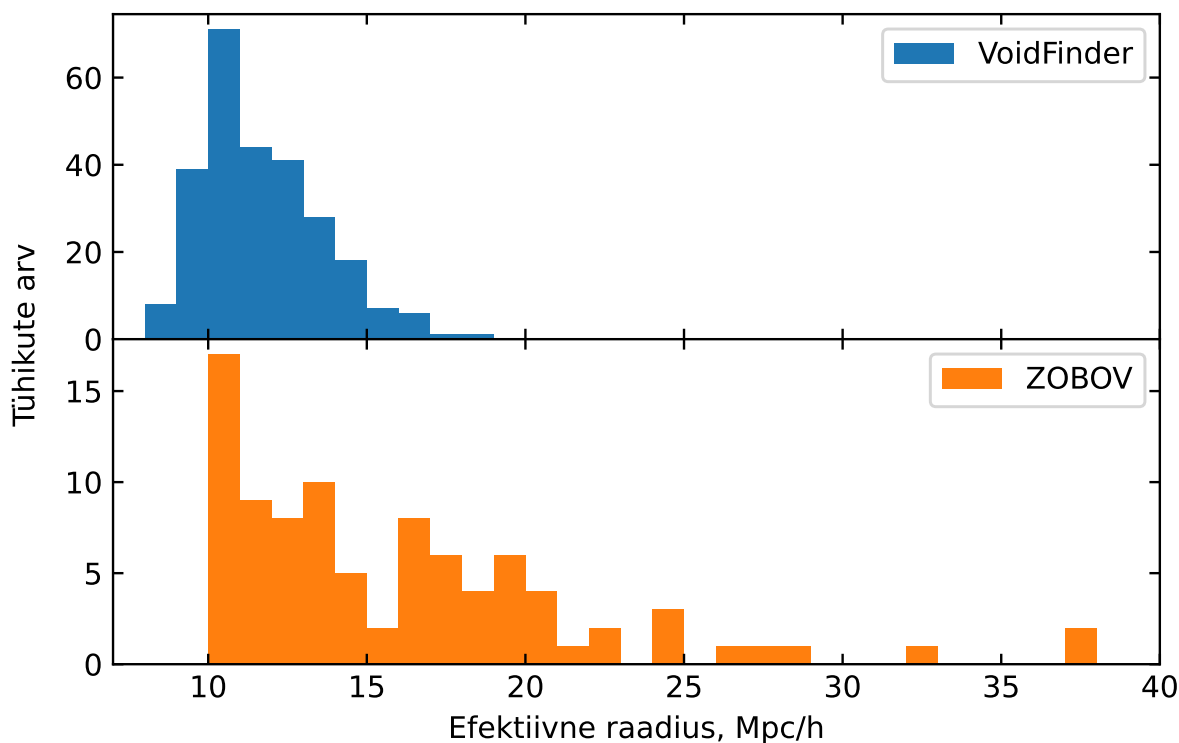
Edasisest (kvantitatiivsest) analüüsist jäeti ZOBOVi alamtühikud välja, sest need kuuluvad



Joonis 3.3: ZOBOV-meetodiga leitud tühikud koos galaktikatega. Erinevad tühikud on tähistatud eri värvidega. Läbilõige  $3 h^{-1}$  Mpc paksusega kihist vahemikus  $z \in [-1, 2] h^{-1}$  Mpc.

täielikult vastava tühiku koosseisu, mistõttu on need sisuliselt juba vaadeldud ruumiosad. Tühikute efektiivsed raadiused määrati peatükis 2.3.2 kirjeldatud viisil ning neid võrreldi VoidFinder'i tühikutega (joonis 3.4). ZOBOV-meetodi tühikute mediaanraadiuseks leiti  $14,5 h^{-1}$  Mpc ning suurima tühiku raadius seejuures  $37,8 h^{-1}$  Mpc. VoidFinder-meetodi puhul oli mediaanraadiuseks  $11,3 h^{-1}$  Mpc ning suurima tühiku raadius  $18,2 h^{-1}$  Mpc. Tulemustest ilmneb, et ZOBOV'i tühikud on VoidFinder'i omadest valdavalt suuremad, sest meetod täidab ära kogu tühja ala galaktikate vahel, samas kui VoidFinder leiab tühikute asukohad ning täidab ala sfääridega nii kaua, kuni esimene galaktikate filament ette jääb ning sfäärid hakkavad liiga suures osas kattuma.

Järgmisena määrati, kui suure osa vaadeldud ruumist täidavad tühikud ning kui suure osa moodustavad üheselt leitud tühikualad kummastki meetodist. Vaadeldud ruumiosa ning tühikute ruumalad leiti vastavalt peatükkides 2.2 ja 2.3.1 kirjeldatule. Tulemuseks saadi, et VoidFinder-meetodiga leitud tühikud moodustasid vaadeldud ruumist 52,4% ning ZOBOV'i tühikud 63,5%. Tulemused on heas vastavuses varasemate töödega, mille puhul osakaal jääb sarnasesse vahemikku ning ZOBOV'i algoritmiga tuvastatud tühikud katavad reeglina suurema ruumiosa. Näiteks Douglass et al. (2023) töös, kus tühikuid tuvastati suuremast ruumialast, millel oli väiksem galaktikate keskmine tihedus, moodustasid VoidFinder ja ZOBOV meetodiga tuvastatud tühikud vastavalt 60,5% ja 68,1%. Erinevus on põhjendatav uuritava ruumiosa

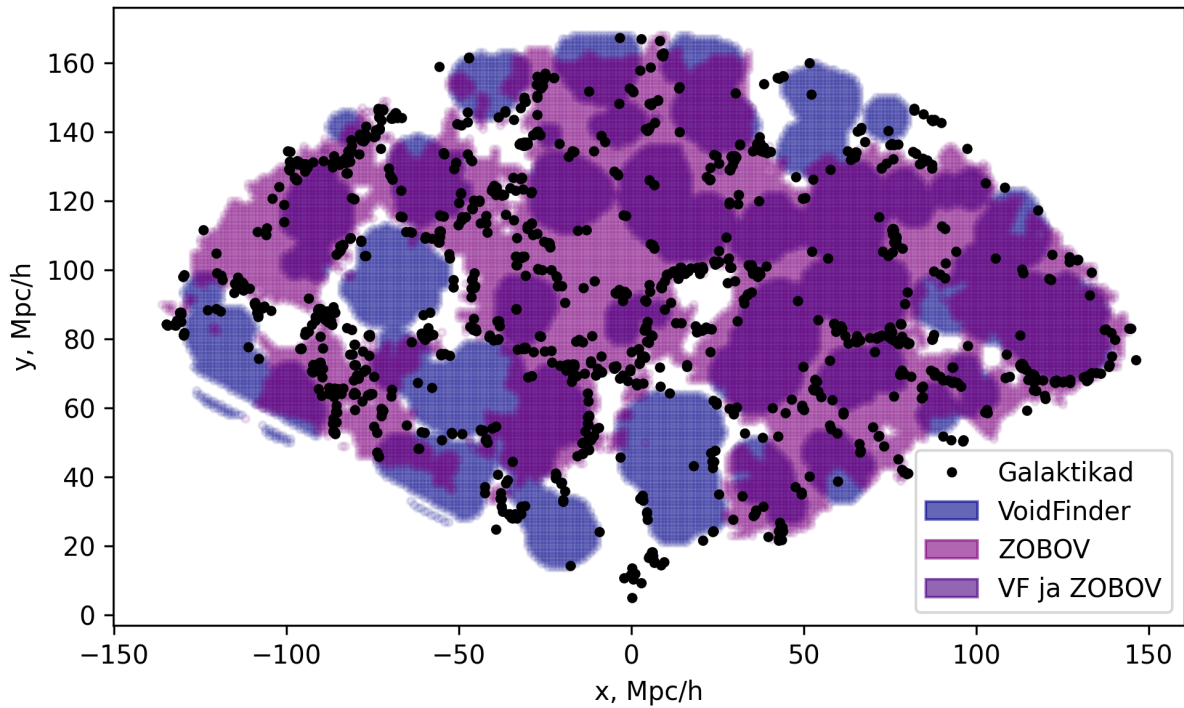


Joonis 3.4: VoidFinder ja ZOBOV meetoditega leitud tühikute efektiivsete raadiuste jaotus.

valikuga.

Hinnati ka meetoditega leitud tühikute ühisosa ruumilist osakaalu kummagi meetodi suhtes. Ühistest tühikualadest 72,0% kattus VoidFinder'i tühikutega ning 59,4% ZOBOV-meetodi tühikutega. Mõlema meetodiga tuvastatud tühikud visualiseeriti koos galaktikatega lõigul  $z \in [-1, 1] h^{-1} \text{ Mpc}$  (joonis 3.5). Kihis tulevad selgelt esile piirkonnad, kus on eelistatud ühe või teise meetodi tühikud. Eelnevalt kirjeldatu põhjal on teada, et ZOBOVi algoritmiga tuvastatud tühikud täidavad ruumi küllaltki ühtlaselt, lugedes ka galaktikaid sisaldavad äärmised rakud neisse kuuluvateks. Alad, kus ZOBOVi algoritmiga tühikuid ei tuvastatud olid tõenäoliselt lokaalselt tihedamad kui ette antud löikeparameeter 0,2 keskmist tihedust, mistõttu VIDE meetodiga toimunud järeltöötlemises tühikud eemaldati. Kuna VoidFinder-meetodit tihedus otseselt ei mõjuta, tuvastati taolistes kohades tihti ainult VoidFinder'i tühik. Kui näiliselt tühi piirkond oli mõlemat, nii suure tiheduse kui ka liialt väikese läbimõõduga, siis neis tühikuid ei tuvastatud.

Viimaks leiti, kui suur hulk galaktikaid asus kummagi meetodiga tuvastatud tühikute sees. VoidFinder-meetodiga leitud tühikutesse kuulus kokku 3525 galaktikat, mis moodustas kogu vaatlusalala galaktikate arvust 4,8%. VoidFinderiga leitud isoleeritud galaktikate arv oli seejuures 6084. ZOBOVi tühikute sisse kuulus kokku 53 169 galaktikat ehk 72,8% kogu vaatlusalala galaktikatest. Tulemus on kooskõlas eespool kirjeldatud meetodi omapäraga, kus tühikute servmised tihedad rakud loetakse samuti tühikutesse kuuluvateks. Kooskõlast olenemata tuleb



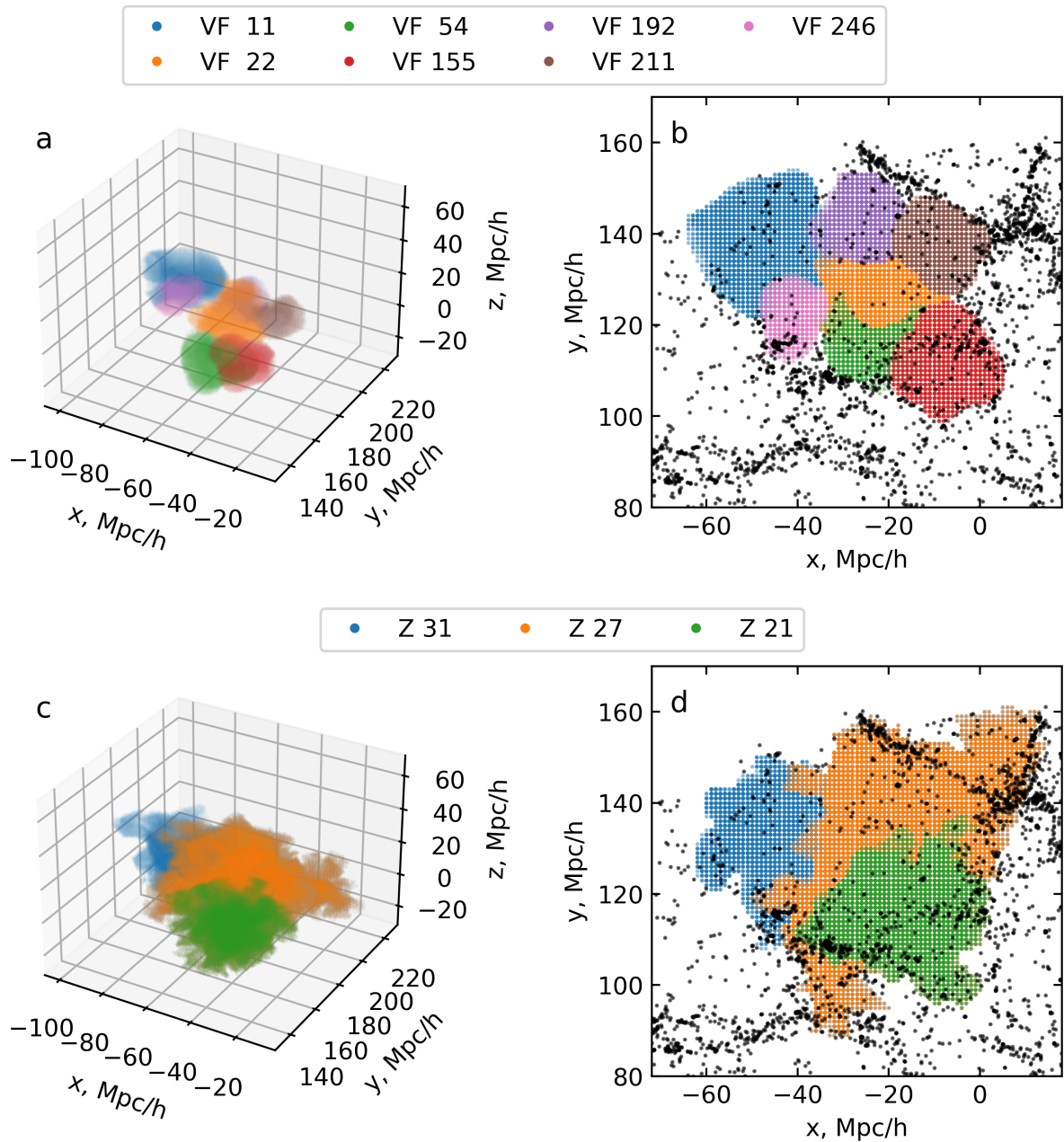
Joonis 3.5: VoidFinder ja ZOBOV meetoditega leitud tühikud kihil  $z \in [-1, 1]$   $h^{-1}$  Mpc.

märkida, et valdava enamuse galaktikate sisaldamist peaks pidama meetodi kitsaskohaks, sest definitsiooni põhjal on filamendid pikad galaktikatest moodustatud struktuurid, mis piiravad tühikuid, kuid ei kuulu nende sisse.

### 3.2 Ühe ruumiosa võrdlus

Vaatluse alla võeti ruumiosa, kus ZOBOV-meetod tuvastas keskmisest suurema tühiku efektiivse raadiusega  $27,9 h^{-1}$  Mpc. Tühik sisaldas kahte alamtühikut efektiivsete raadiustega  $26,2 h^{-1}$  Mpc ja  $18,7 h^{-1}$  Mpc, millest viimane oli hierarhiliselt 2. järgu alamtühik ehk suurema alamtühiku alamtühik. Ruumiosa viidi vastavusse VoidFinderiga tingimusel, et VoidFinder tühiku keskpunkt asuks ZOBOVi tühiku sees. Ruumiosas leiti seitse VoidFinder tühikut, mille efektiivsed raadiused jäid vahemikku  $8,1\text{--}13,1 h^{-1}$  Mpc ehk samas piirkonnas leidis VoidFinder rohkem väiksemaid tühikuid. Tühikud visualiseeriti nii 3-dimensionaalselt (joonis 3.6a ja 3.6c) kui ka  $20 h^{-1}$  Mpc paksuse kihi projektsioonina  $xy$ -tasandil koos galaktikatega kohal  $z \in [44, 64] h^{-1}$  Mpc (joonis 3.6b ja 3.6d).

Projektsioonidelt joonistub välja kahe meetodi eripära tühikute tuvastamisel. VoidFinder lõpetab sfääri kasvatamise kohe, kui sellele filament vastu tuleb ning seejuures jätab tuvastamata väiksemad tühjad alad sfääri lähimbruses. ZOBOV loeb filamentide ümbruses olevad rakud samuti tühikutesse kuuluvateks, mistõttu on tühiku lõplik kuju tunduvalt korrapäratum ning tühik



Joonis 3.6: VoidFinder (VF) meetodiga ruumiosas leitud tühikud (a), läbilõige  $20 h^{-1}$  Mpc paksusega kihist koos galaktikatega (b); ZOBOV (Z) meetodiga leitud tühik koos alamtühikutega (c) ning läbilõige  $20 h^{-1}$  Mpc paksusega kihist koos galaktikatega (d). Legendis on esitatud vastava meetodi lühend koos meetodi poolt määratud tühiku järjenumbriga.

ise märgatavalt suurem. Jooniselt tuleb esile ka kahe meetodiga tuvastatud tühikute sarnasus. Kohtades, kus ZOBOV tuvastas alamtühikud, määras VoidFinder eraldiseisvad tühikud. Nende asukohad on heas omavahelises vastavuses ning piirkonna üldine kuju on küllaltki sarnane.

# Kokkuvõte

Bakalaureusetöö käigus võrreldi VoidFinder ja ZOBOV meetodeid kosmiliste tühikute tuvastamiseks. Töö käigus leiti kummagi meetodiga tuvastatud tühikute arv ning määrati nende efektiivsed raadiused. VoidFinder-meetodiga tuvastati kokku 264 tühikut ning ZOBOVi algoritmiga leiti neid 129, millest omakorda unikaalseid oli 91. VoidFinder-meetodi tühikuid oli seega tunduvalt rohkem kui ZOBOVi tühikuid. Efektiivsete raadiuste kaudu näidati, et ZOBOVi tühikud olid valdavalt suuremad – tühikute efektiivsete raadiuste mediaan oli  $14,5 h^{-1}$  Mpc ning VoidFinder'i tühikutel oli selleks  $11,3 h^{-1}$  Mpc. ZOBOV-meetodiga leitud suurima tühiku efektiivne raadius oli üle kahe korra suurem VoidFinder-meetodi suurima tühiku efektiivsest raadiusest (vastavalt  $37,8 h^{-1}$  Mpc ja  $18,2 h^{-1}$  Mpc). Kogu vaadeldud ruumist täitsid VoidFinder tühikud 52,4%, sisaldades endas 3525 galaktikat (4,8% koguarvust). ZOBOVi tühikud täitsid ruumist 63,5%, seejuures sisaldades 53169 galaktikat ehk 72,8% kogu vaatlusalala galaktikatest.

Mastaapset galaktikate sisaldamist võib pidada ZOBOVi algoritmi üheks puuduseks, sest definitsiooni põhjal on filamendid tühikuid piiravad galaktikate struktuurid, mitte tühiku osad. Kuigi VoidFinder tühikud sisaldasid galaktikaid tunduvalt vähem, jäeti selle meetodiga filamentide vahelised kitsamad tühjad alad tühikutest välja, mistõttu võib öelda, et tühikute asukohad tuvastati hästi, kuid nende täpne kuju jäi määramata. Lisaks leiti, et kuna uuritav ruum oli väiksem ja suurema galaktikate tihedusega, võrreldes varasemate tühikute tuvastamise töödega, siis VoidFinder-meetodile määratud piirraadiuse parameeter vajas samuti muutmist. Nähti, et tulemus sõltus tugevalt piirraadiuse valikust ning parima tulemuse andis  $r_{\min} = 8 h^{-1}$  Mpc.

Tööst saab järeldada, et kasutatud meetoditega on võimalik galaktikate ruumjaotusest tuvastada tühikuid edukalt, kuid meetodite tõhusamaks muutmiseks tuleks teha mõningaid täiendusi või järeltöötlust: VoidFinder-meetodi puhul selgus, et ainuüksi sfäärade kasutamine ruumi täitmiseks on liialt robustne ning tühi ruum ei täitu nendega niivõrd hästi. ZOBOV-meetodi tühikud täitsid ruumi paremini, kuid algoritmis kasutatud veelahkme-põhine segmenteerimine vajaks samuti järeltöötlust – enne tsoonide ühendamist tuleks igale rakule seada tiheduspiir, mille korral filamendi galaktikaid sisaldavad rakud eemaldatakse tsoonist.

# Tänuavaldused

Suur tänu minu juhendajale Taavi Tuvikesele, kes kogu töö käigus oli alati toeks, vastas tekkinud küsimustele ning aitas kitsaskohtadest asjalike juhistega välja. Samuti tänan TÜ Tartu observatooriumi kollektiivi näpunäidete eest töö ettekandmisel.

Kelly Kelder

# Kirjandus

- Baushev, A. N. (2021). The central region of a void: an analytical solution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 504(1):L56–L60.
- Douglass, K. A., Veyrat, D., ja BenZvi, S. (2023). Updated Void Catalogs of the SDSS DR7 Main Sample. *ApJS*, 265(1):7.
- El-Ad, H. ja Piran, T. (1997). Voids in the Large-Scale Structure. *ApJ*, 491(2):421–435.
- Górski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J., Wandelt, B. D., Hansen, F. K., Reinecke, M., ja Bartelmann, M. (2005). HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere. *ApJ*, 622:759–771.
- Gregory, S. A. ja Thompson, L. A. (1978). The Coma/A1367 supercluster and its environs. *ApJ*, 222:784.
- Hoyle, F. ja Vogeley, M.Š. (2002). Voids in the Point Source Catalogue Survey and the Updated Zwicky Catalog. *ApJ*, 566(2):641–651.
- Jõeveer, M., Einasto, J., ja Tago, E. (1978). Spatial distribution of galaxies and of clusters of galaxies in the southern galactic hemisphere. *MNRAS*, 185(2):357–370.
- Kirshner, R. P., Oemler, Jr., A., Schechter, P. L., ja Shectman, S. A. (1981). A million cubic megaparsec void in Bootes. *ApJ*, 248:L57.
- Lavaux, G. ja Wandelt, B. D. (2010). Precision cosmology with voids: definition, methods, dynamics. *MNRAS*, 403(3):1392–1408.
- Neyrinck, M. C. (2008). ZOBOV: a parameter-free void-finding algorithm. *MNRAS*, 386(4):2101–2109.
- Pan, D. C., Vogeley, M.Š., Hoyle, F., Choi, Y.-Y., ja Park, C. (2012). Cosmic voids in Sloan Digital Sky Survey Data Release 7: *Cosmic voids in Sloan Digital Sky Survey Data Release 7*. *MNRAS*, 421(2):926–934.

- Platen, E., van De Weygaert, R., ja Jones, B. J. T. (2007). A cosmic watershed: the WVF void detection technique. *MNRAS*, 380(2):551–570.
- Sutter, P. M., Lavaux, G., Hamaus, N., Pisani, A., Wandelt, B. D., Warren, M., Villaescusa-Navarro, F., Zivick, P., Mao, Q., ja Thompson, B. B. (2015). VIDE: The Void IDentification and Examination toolkit. *Astronomy and Computing*, 9:1–9.
- 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.
- van de Weygaert, R. (2014). Voids and the Cosmic Web: cosmic depressions & spatial complexity. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 11(S308):493–523.
- van de Weygaert, R. ja Bond, J. R. (2008). Observations and Morphology of the Cosmic Web. In Plionis, M., Hughes, D., ja López-Cruz, O., editors, *A Pan-Chromatic View of Clusters of Galaxies and the Large-Scale Structure*, pages 409–468. Springer Netherlands, Dordrecht.
- van de Weygaert, R. ja Platen, E. (2011). Cosmic voids: Structure, dynamics and galaxies. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 01:41–66.
- Zonca, A., Singer, L., Lenz, D., Reinecke, M., Rosset, C., Hivon, E., ja Gorski, K. (2019). healpy: equal area pixelization and spherical harmonics transforms for data on the sphere in python. *Journal of Open Source Software*, 4(35):1298.

# Lisa A

## Töös kasutatud Pythoni kood

### A.1 VoidFinder-meetodi põhikood

VoidFinder.py

```
1 # VoidFinder - Hoyle & Vogeley (2002)
2
3 #IMPORT MODULES
4 import sys
5 sys.path.insert(0, '/home/kelly/VAST/python')
6 import vast
7 from vast.voidfinder import find_voids, filter_galaxies, ra_dec_to_xyz
8 from vast.voidfinder.multizmask import generate_mask
9 from vast.voidfinder.preprocessing import file_preprocess
10 from astropy.table import Table
11 import numpy as np
12 import pickle
13
14 # USER INPUTS
15 num_cpus = 1
16
17 # File name details
18 # File header
19 survey_name = 'VF_5may_r6_'
20 in_directory = ''
21 out_dir = ''
22
23 # Input file name
24 # File format: RA, dec, redshift, comoving distance, absolute magnitude
25 galaxies_filename = 'galaxies3.fit'
26
```

```

27 # Survey parameters
28 # Redshift limits
29 min_z = -8.7e-4
30 max_z = 0.057
31
32 # Cosmology
33 Omega_M = 0.27
34 h = 1
35 dist_metric = 'comoving'
36
37 # PREPROCESS DATA
38 result = file_preprocess(galaxies_filename ,
39                          in_directory ,
40                          out_directory ,
41                          dist_metric=dist_metric ,
42                          min_z=min_z ,
43                          max_z=max_z ,
44                          Omega_M=Omega_M ,
45                          h=h ,
46                          )
47 galaxy_data_table , dist_limits , out1_filename , out2_filename = result
48
49 print("Dist limits: ", dist_limits)
50
51 # FILTER GALAXIES
52 galaxies = Table.read("galaxies3.fit")
53 filt     = filter_galaxies(galaxies ,
54                            galaxy_data_table ,
55                            survey_name ,
56                            out_directory ,
57                            dist_limits=dist_limits ,
58                            dist_metric=dist_metric ,
59                            h=h ,
60                            )
61
62 coords_xyz , wall_coords_xyz , field_coords_xyz = filt
63
64 # Save the catalog details needed for finding voids , so that the code can be
65 # restarted from the next step if needed.
66 temp_outfile = open(survey_name + "filter_galaxies_output.pickle" , 'wb')
67 pickle.dump((wall_coords_xyz , field_coords_xyz) , temp_outfile)
68 temp_outfile.close()
69
70 # GENERATE MASK
71 mask , mask_resolution = generate_mask(coords_xyz ,

```

```

72         galaxy_data_table ,
73             max_z ,
74             dist_metric=dist_metric ,
75             smooth_mask=True ,
76             h=h ,
77             )
78
79 # Save the mask and mask resolution so that it can be used elsewhere
80 temp_outfile = open(out_directory + survey_name + 'mask.pickle', 'wb')
81 pickle.dump((mask, mask_resolution, dist_limits), temp_outfile)
82 temp_outfile.close()
83
84
85 del galaxy_data_table
86
87
88 find_voids(wall_coords_xyz ,
89            survey_name ,
90            mask_type='ra_dec_z' ,
91            mask=mask ,
92            mask_resolution=mask_resolution ,
93            dist_limits=dist_limits ,
94            #save_after=50000 ,
95            #use_start_checkpoint=True ,
96            maximal_spheres_filename=out1_filename ,
97            void_table_filename=out2_filename ,
98            potential_voids_filename=out_dir+survey_name+'potential_voids_list.txt' ,
99            num_cpus=num_cpus)

```

## A.2 ZOBOV-meetodi põhikood

ZOBOV.py

```

1 #!/usr/bin/env python
2 """
3 Driver program for Voronoi Voids (V2) void finder module using the ZOBOV
4 algorithm.
5 """
6 import sys
7 sys.path.insert(0, '/home/kelly/VAST/python')
8 import vast
9 from vast.vsquared.zobov import Zobov
10 from argparse import ArgumentParser, ArgumentDefaultsHelpFormatter
11 import numpy as np

```

```

12 from astropy.table import Table
13 from scipy.spatial import ConvexHull
14
15 p = ArgumentParser(description='Voronoi Voids (V^2) void finder.',
16                     formatter_class=ArgumentDefaultsHelpFormatter)
17
18 p.add_argument('-m', '--method', type=int, default=0,
19               help='Void-finding method (0,1,2,3,...)')
20 p.add_argument('-v', '--visualize', action='store_true', default=False,
21               help='Enable void visualization.')
22 p.add_argument('-w', '--save_intermediate', action='store_true', default=False,
23               help='Save intermediate files in void calculation.')
24 p.add_argument('-p', '--periodic', action='store_true', default=False,
25               help='Use periodic boundary contitions.')
26
27 req = p.add_argument_group('required named arguments')
28 req.add_argument('-c', '--config', dest='config_file', required=True,
29                 default="DR7_config.ini", help='V^2 config file (INI format).')
30
31 args = p.parse_args()
32
33 newZobov = Zobov(args.config_file, 0, 3,
34                 save_intermediate=args.save_intermediate,
35                 visualize=True,
36                 periodic=False)
37
38 newZobov.sortVoids(method = 0)
39
40 newZobov.saveVoids()
41
42 newZobov.saveZones()
43
44 if args.visualize:
45     newZobov.preViz()
46
47 #-----
48 # Take survey volume points as gridpoints
49 tab_volume = Table.read('../survey_volume.fits')
50 xg = tab_volume['x']
51 yg = tab_volume['y']
52 zg = tab_volume['z']
53 gridpoints = np.vstack((xg, yg, zg)).T
54
55 mask_all = gridpoints[:,0]**2 < 0
56 void_id_arr = np.zeros(len(mask_all), dtype=int) - 1

```

```

57
58 def points_in_hull(p, hull, tol=1e-12):
59     return np.all(hull.equations[:, :-1]@ p.T
60     +np.repeat(hull.equations[:, -1][None, :],
61     len(p), axis=0).T <= tol, 0)
62
63 for i, void in enumerate(newZobov.voids):
64     clist = [c for zone_id in void for c in newZobov.zones.zcell[zone_id]]
65     mask_void = np.zeros_like(mask_all)
66
67     for c in clist:
68         if newZobov.tesselation.volumes[c] < 1e-5:
69             continue
70
71         verts = newZobov.tesselation.vertIDs[c]
72         cell_vertices = newZobov.tesselation.verts[verts, :]
73         hull = ConvexHull(cell_vertices)
74
75         mmm = np.logical_and(gridpoints >= np.floor(cell_vertices.min(axis=0)),
76                             gridpoints <= np.floor(cell_vertices.max(axis=0)))
77         mgrid = mmm.sum(axis=1) == 3
78         gridpoints_subset = gridpoints[mgrid, :]
79         msub = points_in_hull(gridpoints_subset, hull)
80         mask_void[mgrid] = np.logical_or(mask_void[mgrid], msub)
81         void_id_arr[mgrid] = i
82
83     t = Table()
84     t['x'] = gridpoints[mask_void, 0]
85     t['y'] = gridpoints[mask_void, 1]
86     t['z'] = gridpoints[mask_void, 2]
87     t.write('Voids/Void_{:03d}_gridpoints.fits'.format(i), format='fits')
88
89     print(i, mask_void.sum())
90     mask_all = np.logical_or(mask_all, mask_void)
91
92
93 t = Table()
94 t['id'] = void_id_arr[mask_all]
95 t['x'] = gridpoints[mask_all, 0]
96 t['y'] = gridpoints[mask_all, 1]
97 t['z'] = gridpoints[mask_all, 2]
98 t.write('ZOBOV_voids_gridpoints.fits', format='fits', overwrite=True)

```

## A.3 ZOBOV-meetodi rakendamiseks vajaminev parameetrite sisendfail

sisend.ini

```
1 [Paths]
2 #Currently only accepts FITS input
3 Input Catalog = galaxies3.fit
4 Survey Name = gal_27mar
5 Output Directory = ./
6
7 [Cosmology]
8 #Currently only uses Flat LambdaCDM
9 H_0 = 100
10 Omega_m = 0.27
11
12 [Settings]
13 #Redshift limits
14 redshift_min = -8.7e-4
15 redshift_max = 0.057
16 #Magnitude limit, can be None
17 rabsmag_min = None
18 #Minimum void radius (Mpc/h)
19 radius_min = 10.0
20 #NSIDE for HEALPix pixelization
21 nside = 32
22 #Step size for comoving-distance-to-redshift lookup table
23 redshift_step = 5e-5
24 #Periodic limits (Mpc/h)
25 x_min = -150.188
26 y_min = 4.67
27 z_min = -98.57
28 x_max = 150.21
29 y_max = 168.714
30 z_max = 101.987
31 #Periodic buffer shell width (Mpc/h)
32 buffer = 5.
```

## A.4 Vaadeldud ruumiosa määramine

HEALPix.py

```
1 from astropy.table import Table
2 import astropy.units as u
```

```

3 from astropy.coordinates import SkyCoord, match_coordinates_3d
4 import healpy as hp
5
6 NSIDE = 64
7 NPIX = hp.nside2npix(NSIDE)
8
9 def xyz_to_radec(coord):
10     DtoR = np.pi / 180.
11     c1 = coord[:,0]
12     c2 = coord[:,1]
13     c3 = coord[:,2]
14     r = np.sqrt(c1**2. + c2**2. + c3**2.)
15     lat = np.arcsin(c3 / r) / DtoR
16     lon = -(np.arccos(c2 / np.sqrt(c1**2. + c2**2.)) * np.sign(c1) / DtoR)
17
18     c_sdss = SkyCoord(ra=185*u.deg, dec=32.5*u.deg, frame='icrs')
19     c = c_sdss.spherical_offsets_by(lon*u.deg, lat*u.deg)
20
21     return c.ra.deg, c.dec.deg
22
23 #Galaktikad
24 galaxies = Table.read("../Downloads/asu(3).fit") #all gals
25 gal_coord = np.vstack((galaxies['Xpos'], galaxies['Ypos'], galaxies['Zpos'])).T
26 ra_gals, dec_gals = xyz_to_radec(gal_coord)
27
28 hpx_gals = hp.pixelfunc.ang2pix(NSIDE, ra_gals, dec_gals, nest=True, lonlat=True)
29
30 #Vore
31 #gals vollim -18,5
32 vollim = Table.read("galaxies3.fit")
33 xpos = vollim['Xpos'].value
34 ypos = vollim['Ypos'].value
35 zpos = vollim['Zpos'].value
36
37 # Vore servad
38 xmin = np.floor(min(xpos))
39 xmax = np.ceil(max(xpos))
40 ymin = np.floor(min(ypos))
41 ymax = np.ceil(max(ypos))
42 zmin = np.floor(min(zpos))
43 zmax = np.ceil(max(zpos))
44
45 # Vore, samm 1 Mpc
46 xgrid = int((xmax - xmin) + 1)
47 ygrid = int((ymax - ymin) + 1)

```

```

48 | zgrid = int((zmax - zmin)) + 1
49 |
50 | # Vorepunktide koordinaadid
51 | x = np.linspace(xmin, xmax, xgrid)
52 | y = np.linspace(ymin, ymax, ygrid)
53 | z = np.linspace(zmin, zmax, zgrid)
54 | xg, yg, zg = np.meshgrid(x, y, z)
55 |
56 | grid_coord = np.vstack((xg.flatten(), yg.flatten(), zg.flatten())).T
57 | ra_grid, dec_grid = xyz_to_radec(grid_coord)
58 |
59 | hpx_grid = hp.pixelfunc.ang2pix(NSIDE, ra_grid, dec_grid, nest=True, lonlat=True)
60 |
61 | #Uhised
62 | grid_mask = np.isin(hpx_grid, hpx_gals)
63 |
64 | #Piiirkaugus
65 | dist = np.sqrt(grid_coord[:,0]**2 + grid_coord[:,1]**2 + grid_coord[:,2]**2)
66 |
67 | def piirkaugus(kaugus, mask, max_dist = 168.9):
68 |     for i in range(len(mask)):
69 |         if kaugus[i] > max_dist:
70 |             mask[i] = False
71 |         else:
72 |             mask[i] = mask[i]
73 |     return mask
74 |
75 | grid_mask_uus = piirkaugus(dist, grid_mask, max_dist)
76 |
77 | #Vaadeldud ruumiosa faili
78 | t = Table()
79 | t['x'], t['y'], t['z'] = grid_coord[grid_mask_uus].T
80 | t.write('survey_volume.fits', format='fits', overwrite=True)

```

## A.5 VoidFinder'i tühikute kirjeldamine võrega

Näidis piirraadiuse  $8 h^{-1}$  Mpc korral.

---

```

1 | fail = 'VoidFinder_osa/galaxies_comoving_holes_r8.txt'
2 | x0, y0, z0, r0, flag = np.loadtxt(fail).T
3 |
4 | for j in range(len(x0)):
5 |     mask_sphere = (xg - x0[j])**2 + (yg - y0[j])**2 +
6 |     (zg - z0[j])**2 < (r0[j]-1e-6)**2

```

```
7     mask_all = mask_all | mask_sphere
8     void_id_arr[mask_sphere] = flag[j]
9
10 t = Table()
11 t['id'] = void_id_arr[mask_all]
12 t['x'] = gridpoints[mask_all, 0]
13 t['y'] = gridpoints[mask_all, 1]
14 t['z'] = gridpoints[mask_all, 2]
15 t.write('VoidFinder_osa/VoidFinder_voids_gridpoints_r8.fits', format='fits')
```

## Lisa B

# Programmipaketi VAST lähtekoodis tehtud muudatused

Meetodite rakendamiseks TÜ Tartu observatooriumis koostatud kataloogi andmetele, tuli teha muudatusi ka algoritmi koodis. Töös kasutati 13. mail 2022 koostatud VASTi versiooni <sup>1</sup>

### Muudatused failis `multizmask.py`

```
1 #alates rida 91
2     r = np.linalg.norm(coordinates , axis=1)
3     ra = np.arctan(coordinates[:,1]/coordinates[:,0])/D2R
4     dec = np.arcsin(coordinates[:,2]/r)/D2R
5
6     boolean_ra180 = np.logical_and(coordinates[:,0] < 0, coordinates[:,1] != 0)
7     ra[boolean_ra180] += 180.
8     ra[ra < 0] += 360.
```

### Muudatused failis `voidfinder.py`

```
1 #rida 172 asendus
2 coords_xyz = np.vstack((galaxies['Xpos'], galaxies['Ypos'], galaxies['Zpos'])).T
```

### Muudatused failis `zobov.py`

```
1 #rida 244 lisati juurde
2     self.voids = voids
```

<sup>1</sup><https://github.com/DESI-UR/VAST/tree/cc016425caebb534e9ed176a9b1059241a85c3d1>

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

Mina, Kelly Kelder,

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

**Kosmiliste tühikute tuvastamine kahel meetodil ning leitud tühikute võrdlus,**

mille juhendaja on Taavi Tuvikene, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Kelly Kelder,

Tartu, 25. mai 2023. a.