

# DESI:n ja SDSS:n galaksijoukkotutkimusten vertailu

Pro Gradu

Turun yliopisto

Tähtitiede

2026

Miska Ojanperä

Ohjaajat:

Dos. Pekka Heinämäki

FT Pasi Nurmi

Tarkastajat:

Prof. Seppo Mattila

Dos. Pekka Heinämäki

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

## Ojanperä, Miska DESI:n ja SDSS:n galaksijoukkotutkimusten vertailu

Pro Gradu, 63 s.  
Tähtitiede  
Tammikuu 2026

---

Suuret galaksiotokset muodostavat tärkeimmän tutkimusaineiston pyrkimyksessämme ymmärtää ja kartoittaa maailmankaikkeuden rakennetta ja evoluutiota. Galaksiotosten laajuus, syvyys, aallonpituusalue ja havaintomenetelmät poikkeavat huomattavasti toisistaan. Tämä vaikuttaa merkittävästi aineiston pohjalta tehtyyn tutkimukseen ja päätelmiin. Tutkimuksen tekijän on ymmärrettävä havaintoaineiston asettamat rajoitukset ja mitä päätelmiä aineistosta voi tehdä.

Tämä tutkimus käsittelee DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) Legacy Survey -aineistojen DR9:n (Data Release 9) ja DR10:n (Data Release 10) pohjalta tehtyä, pääasiassa fotometrasta ja osin spektroskooppista galaksijoukkotutkimusta (DESIG), sekä SDSS (Sloan Digital Sky Survey) DR10:n pohjalta tehtyä spektroskooppista galaksijoukkotutkimusta (SDSSG). DESIG hyödyntää tiheysetsintää galaksijoukkojen löytämiseksi ja SDSSG FoF (Friends of Friends) -algoritmia. Tämän tutkimuksen tavoitteena on vertailla näitä kahdella täysin eri menetelmällä saatua galaksijoukkotutkimusta.

Työn ensimmäisessä osassa verrattiin SDSSG:n ja DESIG:n galaksijoukkojen yleisiä ominaisuuksia punasiirtymän funktiona. Näitä olivat rikkaus, magnitudi, säde ja massa. Myös DESIG:n pelkkiä spektroskooppisia kohteita verrattiin erikseen SDSSG:hen. Näistä havaittiin, että aineistoissa on merkittäviä eroja kaikkien ominaisuuksien välillä.

Tämän jälkeen kummastakin aineistosta identifioitiin samat galaksijoukot. Galaksijoukkoparit löydettiin hyödyntämällä Python-kirjasto Scipy:n luokkaa cDKTree, jolla lähimmät parit löydettiin eukliidisen etäisyyden avulla karteeseeseen koordinaatistoon muutetuista deklinaatiosta, rektaskensioista ja punasiirtymästä, joka oli muutettu mukana liikkuvaksi etäisyydeksi. Tästä poistettiin virheelliset identifioinnit rajaamalla deklinaation ja rektaskension absoluuttiseksi virheeksi 0.0001 deg. Tämän jälkeen aineistosta vielä poistettiin ne parit, joissa suuremman DESIG:n galaksijoukon sisällä oli useampi pienempi SDSSG:n galaksijoukko. Tämän jälkeen galaksijoukkopareja jäi 2 096.

Näitä galaksijoukkopareja ja niissä olevia samoja galakseja (jotka saatiin cDKTree:n ja deklinaation ja rektaskension absoluuttisten virheiden avulla) verrattiin ja havaittiin, että galaksijoukkoparien ominaisuudet eroavat yhä merkittävästi. Muun muassa DESIG:n galaksien punasiirtymävirheet osoittautuivat jopa 100 – 1 000 kertaa suuremmiksi kuin SDSSG:n. Galaksien magnitudit olivat ainoat ominaisuudet, jotka olivat aineistojen välillä samoja.

Lopuksi tässä tutkimuksessa etsittiin luottamusrajaa, jolla tutkimukset olisivat edes osittain vertailukelpoisia massan, säteen ja rikkauden avulla. Niistä havaittiin, että DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparien massat vastaavat parhaiten toisiaan massasuhdejakauman mediaaniarvon ollessa välillä 0.5 – 1.5, kun SDSSG:n valittujen galaksijoukkojen rikkaus on vähintään 16.

Asiasanat: galaksijoukkotutkimus; DESI; SDSS; galaksijoukkojen ominaisuudet

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Galaksit, galaksijoukot ja -ryhmät</b>	<b>3</b>
<b>2 Kosmologia tutkimuksessa</b>	<b>8</b>
<b>3 Spektroskooppiset ja fotometriset havainnot sekä tutkimusaineis-</b>	
<b>tot</b>	<b>11</b>
3.1 DESI Legacy Survey . . . . .	13
3.2 DESIG galaksijoukot . . . . .	15
3.3 SDSS DR10 . . . . .	17
3.4 SDSSG galaksijoukot . . . . .	18
<b>4 DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkojen vertailu punasiirtymäalu-</b>	
<b>eella <math>z &lt; 0.2</math></b>	<b>23</b>
4.1 DESIG:n koko aineiston vertailu SDSSG:n aineistoon . . . . .	23
4.2 DESIG:n spektroskooppisen aineiston vertailu SDSSG:n aineistoon . .	30
<b>5 Galaksijoukkojen kattavuusanalyysi</b>	<b>32</b>
5.1 Alustava kattavuusanalyysi . . . . .	32
5.2 Duplikaattien poistaminen . . . . .	35
5.3 DESIG:n ja SDSSG:n lopullinen aineisto . . . . .	40
5.4 Galaksijoukkoparien samojen galaksien kattavuusanalyysi ja magni-	
tudivertailu . . . . .	40
5.5 Galaksijoukkoparien ominaisuudet . . . . .	44
<b>6 Galaksijoukkoparien analyysi</b>	<b>49</b>
6.1 Galaksijoukkoparien yhdistäminen ja punasiirtymävirheen vaikutus .	49
6.2 Massan ja säteen luotettavuusrajojen arviointi rikkauden avulla . . .	51

6.2.1	Massan analyysi . . . . .	52
6.2.2	Säteen analyysi . . . . .	54
6.2.3	Luotettavuusrajan määrittäminen . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Yhteenveto ja tulokset</b>	<b>58</b>

## Johdanto

Galaksijoukot ja niissä olevat galaksit ovat havaitsemamme universumin peruspi-lareita. Ne kertovat meille universumin laajenemisesta ja muodostumisesta sekä helpottavat dynamiikkansa avulla sellaisten kohteiden tutkimista, joita on muuten vaikea havaita. Ne voivat paljastaa tietoa esimerkiksi mustien aukkojen ja pimeän aineen luonteesta. Galaksien spektroskooppisten ja fotometrinen mittausten teke-minen on kuitenkin vaikeaa havaintolaitteisiin ja menetelmiin liittyvien rajoitus-ten vuoksi, mikä johtaa virheisiin punasiirtymissä ja lopulta muun muassa galaksi-joukkojen massojen ja niihin kuuluvien galaksien määrän arvioinnissa. Tämä tutki-mus käsittelee näitä galaksijoukkojen ominaisuuksia ja selvittää, kuinka fotometriset galaksijoukot eroavat spektroskooppisista hyödyntämällä sekä tunnettua spektros-kooppista galaksijoukkotutkimusta että uudempaa ja selvästi laajempaa fotometris-tä galaksijoukkotutkimusta.

Tämä tutkimus käsittelee DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) Legacy Survey -aineistojen DR9:n (Data Release 9) ja DR10:n (Data Release 10) ekstragalaktisten aineistojen pohjalta tehtyä, pääasiassa fotometrista ja osin spektroskoop-pista galaksijoukkotutkimusta (DESIG) (Wen & Han, 2024), jonka punasiirtymä on rajattu tässä tutkimuksessa arvoihin  $z < 0.2$ , sekä SDSS (Sloan Digital Sky Survey) DR10:n ekstragalaktisen aineiston pohjalta tehtyä spektroskooppista galaksijouk-kotutkimusta (SDSSG) (Tempel et al., 2014). DESI DR9 sisältää noin 2 miljardia ja DR10 noin 2.8 miljardia kohdetta, joilla on yhteensä neljältä optiselta aallonpi-tuusalueelta ja neljältä infrapuna-aallonpituusalueelta mittaustuloksia. SDSS DR10 taas tarjoaa ensimmäiset the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experi-ment (APOGEE) -spektrit sekä laajennetun The Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) -aineiston, joka sisältää yli 178 000 tähtispektriä ja yli 1,5 miljoonaa galaksi-, kvasaari- ja tähtispektriä. Tässä tutkimuksessa suoritetaan kattavuusana-lyysi DESIG:n ja SDSSG:n välillä, jonka avulla pyritään tutkimaan aineistojen vä-

lisiä eroja. Tutkimus keskittyy pääasiassa galaksijoukkojen massaan, säteeseen ja galaksien lukumäärään eli galaksijoukkojen rikkauteen.

Tässä tutkimuksessa esitellään ensin yleisesti galaksien ja galaksijoukkojen ominaisuuksia, minkä jälkeen esitellään käytetyt aineistot. Tämän jälkeen tehdään kattavuusanalyysi, jossa tunnistetaan samat galaksijoukot DESIG:n ja SDSSG:n aineistoista, ja esitetään näistä esimerkkejä. Lopuksi näitä löydettyjä galaksijoukkopareja vertaillaan määrällisesti sekä niiden massojen että säteiden avulla, ja yritetään selvittää, ovatko aineistot vertailukelpoisia. Tutkimuksen keskeinen tavoite on selvittää, ovatko spektroskooppiset ja fotometriset aineistot vertailukelpoisia keskenään ja kuinka paljon suuremmat DESIG:n galaksijoukot vaikuttavat massoihin ja säteisiin SDSSG:hen verrattuna. Samalla arvioidaan, ovatko aineistot luotettavia ja mitä tekijöitä pitää huomioida niiden käyttämisessä tieteellisessä tutkimuksessa.

# 1 Galaksit, galaksijoukot ja -ryhmät

Baryoninen eli havaitsemamme aine on universumin harvinaisin aine tämän hetken ymmärryksemme mukaan. Sitä on maailmankaikkeuden massa-energia tiheydestä vain noin 4.9 %, kun taas pimeää ainetta arvioidaan olevan noin 26.6 % ja pimeää energiaa noin 68.5 % (Planck Collaboration et al., 2020). Galaksijoukot sekä niissä että niiden ulkopuolella sijaitsevat galaksit ovat universumin baryonisen aineen, eli protoneista, neutroneista ja niiden yhdisteistä koostuvan aineen, suurimpia keskittymiä. Lähes 100 % baryonisesta aineesta universumissa on löydettävissä galakseista ja galaksijoukoista, jotka sijoittuvat universumin suurimpaan rakenteeseen: kosmiseen verkkoon ja sen filamentteihin (Ganeshaiyah Veena, 2020). Galaksijoukkojen massasta noin 80 – 95 % on pimeää ainetta (Babyk et al., 2012; Dai et al., 2010), kun taas yksittäisissä galakseissa osuus on yleensä pienempi, noin 35 – 85 % (Tortora & Napolitano, 2022). Pimeän aineen dynamiikalla on merkittävä vaikutus galaksijoukkojen ja galaksien toimintaan ja kehitykseen.

Galaksijoukot ovat universumin suurimpia virialisoituneita rakenteita (Allen et al., 2011) eli niiden oletetaan käyttäytyvän viriaalteoreeman mukaan. Viriaalteoreemassa systeemi on virialisoitunut, jos sen kineettinen energia on puolet potentiaalienergian itseisarvosta (Schneider, 2015). Kun galakseissa on satoja miljardeja tähtiä, on galaksijoukoissa vastaavasti enimmillään tuhansia galakseja. Toisin kuin galaksien sisäiset tähtijärjestelmät, galaksijoukot ovat harvempia ja dynaamisesti yksinkertaisempia järjestelmiä, joissa yksittäiset galaksit liikkuvat pääosin gravitaation vaikutuksesta ilman merkittäviä törmäyksiä (White et al., 2015; Fall & Zhang, 2001). Galaksien väliset vuorovaikutukset ovat merkittäviä lähinnä galaksien mittakaavassa, mutta yksittäiset tähtijärjestelmät eri galakseissa eivät juuri vaikuta toisiinsa (Binney & Tremaine, 1987). Kuvassa 1 on esitetty Hicksonin kompaktigalaksiryhmä 40 ja Perseuksen galaksijoukko. Myös Linnunratamme kuuluu paikalliseen galaksiryhmään ja edelleen Neitsyen galaksijoukkoon. Neitsyen galaksijoukkokin kuuluu

vielä suurempaan Laniakean superjoukkoon, johon kuuluu useita galaksijoukkoja, ja sen galaksien määrä ylittää sadantuhannen. Vaikka superjoukot ovat havaittavia rakenteita, ne eivät ole virialisoituneita.



Kuva 1. Nasan julkaisemat kuvat Hicksonin kompaktigalaksiryhmästä 40 (vasen) aallonpituusalueella 400 – 960 nm ja Perseuksen galaksijoukosta (oikea) energioilla 0.5 – 7 keV. Vasemmanpuoleinen kuva on otettu Hubblen avaruusteleskoopilla, jonka aallonpituusalue on 100 – 2 500 nm kattaen koko näkyvän valon alueen ja osan sekä ultraviolettia että lähi-infrapuna-alueesta. Oikeanpuoleinen kuva on otettu Chandra-röntgenteleskoopilla, joka kuvaa röntgensäteitä 0.1 – 10 keV alueella. Vasemmanpuoleisen kuvan lähde: NASA/ESA/STScI/Kuvankäsittely: Alyssa Pagan (STScI). Oikeanpuoleisen kuvan lähde: NASA/CXC/SAO/E. Bulbul, et al.

Seuraamalla galaksijoukkojen ja niissä olevien galaksien baryonisen aineen käytöstä voimme tehdä havaintoja niiden sisältämästä pimeästä aineesta. Tällä tavalla havaittiin muun muassa galakseja koskevissa tutkimuksissa galaksien pekuliaaristen nopeuksien perusteella, että pelkkä baryonisen aineen gravitaatiovuorovaikutus ei riitä selittämään galaksien dynaamista stabiilisuutta (Sofue & Rubin, 2001; Navarro, 1998). Tutkimuksissa saadut pekuliaariset nopeudet saattoivat ylittää gravitaatiovuorovaikutuksen kyvyn pitää galaksin kasassa, mutta jostain syystä galaksi ei hajonnut. Tämä on pystytty selittämään galakseissa olevan pimeän aineen avulla (Navarro, 1998). Sen gravitaatiovuorovaikutus baryonisen aineen kanssa mahdollistaa näiden galaksien olemassaolon (Aditya, 2024). Pimeän aineen haloiksi kutsutut

alueet pitävät pelkästään baryoniselle aineelle liian suurilla pekuliaarisilla nopeuksilla liikkuvia galaksin osia kasassa gravitaatiovuorovaikutuksellaan (Jimenez et al., 2003; Li et al., 2020), vaikuttaen merkittävästi galaksien dynamiikkaan. Näillä haloilla on myös keskeinen merkitys galaksien muodostumisessa (Fei et al., 2025). Ne vaikuttavat usein galaksin rakenteeseen sen koko elinkaaren ajan, muokaten esimerkiksi kaasun kertymistä ja tähtien syntyä (Reddick et al., 2013).

Galaksijoukot voidaan jakaa laajoihin tuhansia galakseja sisältäviin galaksijoukkoihin sekä galaksiryhmiin, jotka sisältävät korkeintaan muutamia kymmeniä galakseja. Tässä työssä viitataan galaksijoukkoihin ja -ryhmiin kuitenkin yhteisnimellä galaksijoukot, lukuun ottamatta niitä kohtia, joissa ne on mainittu erikseen. Galaksijoukkojen ja galaksiryhmien keskeisimpiä ominaisuuksia ovat rikkaus, massa, halkaisija ja  $M/L$  eli massan suhde luminositeettiin (Schneider, 2015). Taulukossa I on esitetty tyypillisiä ominaisuuksia galaksijoukoille ja -ryhmille sekä galakseille. Galaksijoukot ovat rikkaudeltaan, halkaisijaltaan ja  $M/L$ -suhteeltaan tyypillisesti vähintään muutamia kertoja suurempia kuin galaksiryhmät. Galaksijoukoissa on tyypillisesti selvästi enemmän massaa kuin galaksiryhmissä. Taulukosta I huomataan myös, että osa galakseista voi olla massaltaan ja  $M/L$ -suhteeltaan suurempia kuin pienimmät galaksiryhmät, mikä johtuu siitä, että niissä on huomattavasti enemmän pimeää ainetta (Hargreaves et al., 1994; van Dokkum et al., 2016).

Tyyppi	Galaksi	Galaksiryhmä	Galaksijoukko
<b>Rikkaus</b>	-	$\lesssim 50$	$\gtrsim 50$
<b>Massa [<math>M_{\odot}</math>]</b>	$\lesssim 10^{13}$	$\sim 3 \times 10^{13}$	$\gtrsim 3 \times 10^{14}$
<b>Halkaisija [Mpc]</b>	$\lesssim 0.1h^{-1}$	$\lesssim 1.5h^{-1}$	$\gtrsim 1.5h^{-1}$
<b>M/L</b>	$\lesssim 100$	$\sim 100$	$\sim 250$

Taulukko I. Galaksiryhmien ja -joukkojen normaalit rikkauudet, massat, halkaisijat ja  $M/L$ -suhteet verrattuna galakeihin (Schneider, 2015; Hargreaves et al., 1994; van Dokkum et al., 2016).  $h$  on dimensioton luku, joka ilmaisee Hubble-vakion arvon suhteessa 100 km/s/Mpc.

Pimeä aine dominoi galaksijoukkoja (Thanjavur et al., 2010) tehden siitä merkittävän osan niiden massaa. Galaksijoukkojen massan määrittäminen on yksi keskeisimmistä tutkituista asioista galaksijoukkojen tutkimuksessa. Galaksijoukkojen massaa voidaan arvioida useilla eri menetelmillä, joista keskeisimmät esitellään Schneider (2015) mukaan. Dynaaminen massa on yksi yleisimmistä keinoista määrittää galaksijoukkojen massa ja muun muassa SDSSG käyttää sitä. Dynaaminen massa pystytään määrittämään galaksijoukolle, jos sen oletetaan käyttäytyvän viriaaliteoreeman mukaan. Tällöin galaksijoukon massa voidaan arvioida sen galaksien nopeusdispersiosta, joka saadaan galaksien spektroskooppisesti mitatuista punasiirtymistä johdetuista radiaalinopeuksista, eli nopeuksista katsojan suunnassa. Dynaamisen massan tarkkuus perustuu vahvasti galaksijoukon galaksien määrään, minkä vuoksi se antaa epäluotettavia arvoja pienille galaksiryhmille. Röntgensäteily on toinen tapa määrittää galaksijoukon massa. Galaksijoukon sisällä esiintyvän kaasun lämpötila voi olla noin  $10^7 - 10^8$  K, jolloin se säteilee röntgensäteilyä. Tämä säteily on havaittavissa, ja tutkimalla sen intensiteettiä ja spektriä voidaan selvittää sen lämpötila ja tiheys galaksijoukossa. Tästä voidaan laskea galaksijoukon massa, jos oletetaan kaasun olevan hydrostaattisessa tasapainossa. Hydrostaattisessa tasapainossa kaasun paine tasapainottaa galaksijoukon gravitaatiovoiman. Tällöin kaasu on tasapainotilassa ja ei laajene tai supistu. Massa-arvot ovat epäluotettavia, jos tästä tasapainosta ei voida olla varmoja. Kolmas yleisesti käytetty tapa galaksijoukkojen massan määrittämisessä on gravitaatiolinssiefekti. Galaksijoukot ovat massaltaan niin suuria, että ne voivat kaareuttaa aika-avaruutta ympärillään. Tämä kaareutumisen taittaa galaksijoukkojen taustassa olevien kohteiden valoa ja tästä taitumisesta voidaan arvioida niiden massaa. Gravitaatiolinssiefektiä on kahdenlaista: heikkoa ja vahvaa. Heikossa efektissä galaksijoukon taustalla olevien kohteiden pienistä muutoksista arvioidaan tilastollisesti galaksijoukon massaa, jolloin tarkkuus on vahvasti riippuvainen taustalla olevien kohteiden määrästä. Vahvassa efektissä taust-

talla oleva kohde voi olla esimerkiksi selvästi kaareutunut tai näkyä kahtena kuvana, jolloin massan määrittäminen tarkasti on helpompaa. Gravitaatiolinssiefektissä on kuitenkin aina olennaista hyvä mallintaminen ja laaja kohteiden havainnointi, jolloin tulosten luotettavuus paranee.

## 2 Kosmologia tutkimuksessa

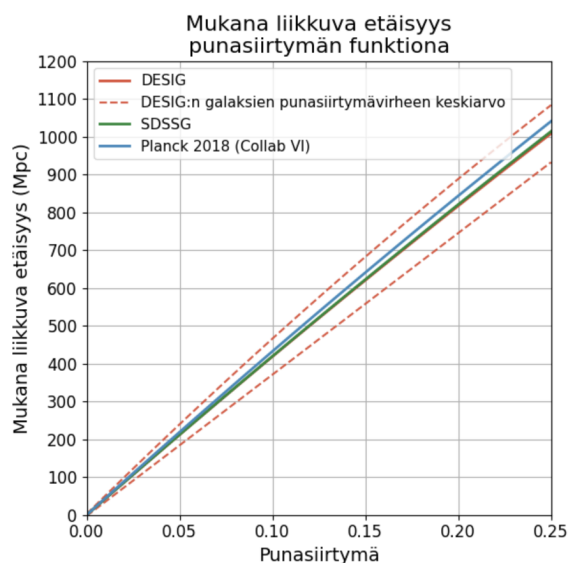
Tässä tutkimuksessa käytän sekä SDSSG:lle että DESIG:lle tasaista (flat)  $\Lambda$ CDM-kosmologiaa, jossa Hubblen vakio on  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ; baryonisen ja pimeän aineen osuudet universumin kokonaisenergiatiheydestä ovat  $\Omega_{m, \text{DESIG}} = 0.3$  ja  $\Omega_{m, \text{SDSSG}} = 0.27$ , ja pimeän energian osuudet ovat  $\Omega_{\Lambda, \text{DESIG}} = 0.7$  ja  $\Omega_{\Lambda, \text{SDSSG}} = 0.73$ . Etäisyydet laskin käyttämällä mukana liikkuvaa (comoving) etäisyyttä kaavalla

$$D_C(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{E(z)}, \quad (1)$$

jossa  $c$  on valonnopeus,  $H_0$  Hubblen vakio,  $z$  punasiirtymä ja  $E(z)$  on käytetty kosmologia, joka on määritelty kaavalla

$$E(z) = \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}, \quad (2)$$

jossa  $\Omega_m$  on baryonisen ja pimeän aineen osuus ja  $\Omega_\Lambda$  pimeän energian osuus. Mukana liikkuva etäisyys antaa kahden pisteen välisen tämän hetkisen etäisyyden ottaen huomioon universumin laajenemisen valon lähtöhetken ja nykyhetken välillä. Kuvassa 2 on esitetty DESIG:n ja SDSSG:n kosmologioiden sekä uusimpien Planck 2018 -tutkimustulosten (Planck Collaboration et al., 2020) kosmologian ( $H_0 = 67.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.315$  ja  $\Omega_\Lambda = 0.685$ ) mukana liikkuva etäisyys punasiirtymän funktiona. Lisäksi kuvassa 2 on esitetty DESIG:n galaksien keskiarvoinen punasiirtymävirhe sijoitettuna DESIG:n kosmologiaan punasiirtymään. Kuvassa punasiirtymäakseli on jaettu 100 osaan ja jokaiselle osalle on laskettu sen osan DESIG:n galaksien punasiirtymävirheiden keskiarvo. Lopuksi näihin keskiarvoihin on sovitettu käyrä, joka näkyy kuvassa 2. Kuvasta 2 nähdään, että eri kosmologioiden vaikutus ei ole pienillä punasiirtymillä kovin suuri. Esimerkiksi DESIG:n galaksien punasiirtymävirheet vaikuttavat merkittävästi enemmän mukana liikkuvaan etäisyyteen kuin valittu kosmologia.



Kuva 2. Mukana liikkuva etäisyys punasiirtymän funktiona DESIG:n ja SDSSG:n kosmologiassa sekä Planck 2018 -tuloksissa (Planck Collaboration et al., 2020). Lisäksi katkoviivoilla esitetään DESIG:n galaksien keskimääräinen punasiirtymävirhe sijoitettuna DESIG:n kosmologiaan punasiirtymään.

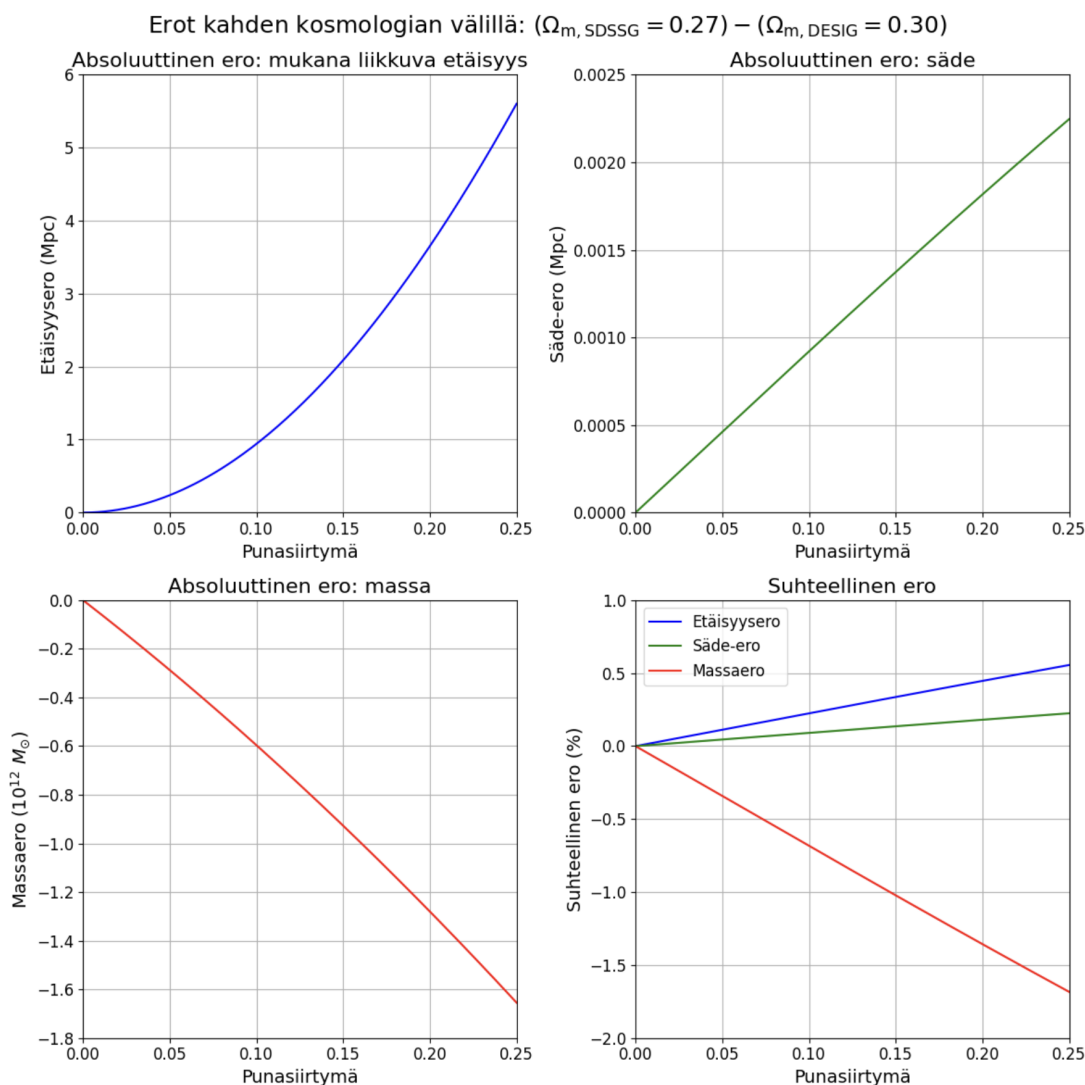
Käytettyjen kosmologioiden erot tutkimusten välillä vaikuttavat tässä tapauksessa galaksien ja galaksijoukkojen etäisyyksiin sekä galaksijoukkojen massoihin ja säteisiin. Galaksien ja galaksijoukkojen sijainnit karteesisessa koordinaatistossa olen laskenut tässä työssä uudelleen deklinaatioista, rektaskensioista ja etäisyydestä käyttämällä DESIG:n kosmologiaa. Käytän CMB (Cosmic Microwave Background) -korjaamatonta punasiirtymää molemmissa aineistoissa. Kuvassa 3 on esitetty eri kosmologioiden aiheuttama ero ilman virheitä galaksijoukkojen etäisyydelle, säteelle ja massalle. Säteen ja massan erot on laskettu käyttäen DESIG:n määrittämiä (Wen & Han, 2015) kaavoilla

$$\Delta \log R_{500} = (-0.20 \pm 0.06) \log E(z) + (0.01 \pm 0.01) \quad (3)$$

$$\Delta \log M_{500} = (1.51 \pm 0.14) \log E(z) - (0.09 \pm 0.01), \quad (4)$$

joissa  $E(z)$  on kosmologia kaavan 2 mukaisesti,  $R_{500}$  on säde, jonka alueella galaksijoukon keskitiheys on 500 kertaa universumin kriittinen tiheys ja  $M_{500}$  on massa säteen  $R_{500}$  sisällä. Kaavan 3 yksikkö on Mpc, eli megaparsekki, ja kaavan 4 yksik-

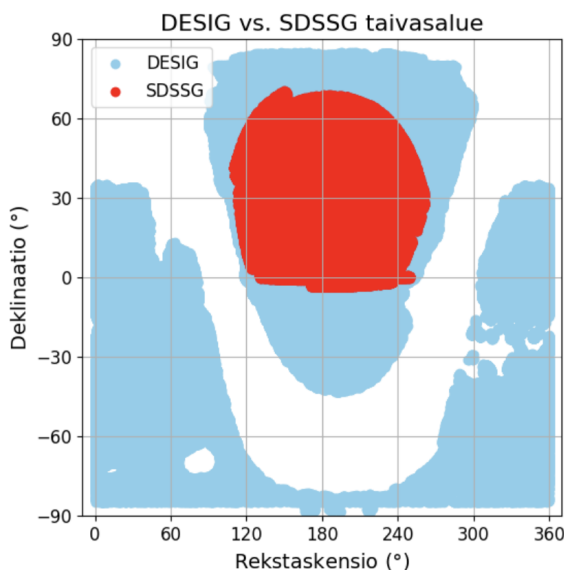
kö on  $10^{12} M_{\odot}$ , eli  $10^{12}$  auringon massaa. Kuten kuvasta 3 nähdään, virheen suuruus on huonoimmissakin tilanteissa alle kahden prosentin luokkaa. SDSSG antaa galaksijoukoille hieman pienempiä massoja ja suurempia säteitä kuin DESIG. Eri kosmologioista johtuva massan ja säteen erojen merkittävyys on niin pieni verrattuna DESIG:n epävarmoihin punasiirtymiin, etten huomioi sitä tässä tutkimuksessa. Laskin SDSSG:n galaksijoukkojen etäisyydet kuitenkin uudelleen samalla kosmologialla (DESIG), johtuen siitä, että ne voivat erota yli 4 Mpc punasiirtymällä  $z \sim 0.2$ . Tämä on enemmän kuin tavallisen galaksijoukon koko.



Kuva 3. Etäisyyden, säteen ja massan absoluuttiset sekä suhteelliset virheet punasiirtymän funktiona kahden eri kosmologian ( $(\Omega_{m, \text{SDSSG}} = 0.27) - (\Omega_{m, \text{DESIG}} = 0.30)$ ) välillä.  $H_0$  on kuvissa  $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

### 3 Spektroskooppiset ja fotometriset havainnot sekä tutkimusaineistot

Tutkimusaineistona käytin DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoaineistoja. DESIG:n aineisto pohjautuu DESI:n Legacy Survey -aineistojen DR9 ja DR10 fotometrisiin mittauksiin, kun taas SDSSG:n aineisto pohjautuu SDSS:n DR10:n spektroskooppisiin mittauksiin. SDSS:n DR10 on julkaistu vuonna 2013, kun taas DESI:n DR9 ja DR10 ovat julkaistu vuosina 2021 ja 2023. Kuvassa 4 on esitetty DESIG:n ja SDSSG:n välinen ero taivasalueen koossa. Niin kuin kuvasta selvästi havaitaan, DESIG:n galaksijoukkotutkimus on paljon laajempi, ja sen taivasalue sisältää selvästi koko SDSSG:n galaksijoukkotutkimuksen, jota voidaan hyödyntää myöhemmin tehtävässä kattavuusanalyysissä.



Kuva 4. Taivasaluekuvaaja SDSSG:n ja DESIG:n aineistosta deklinaation ja rektaskension avulla.

SDSSG:n etuna on sen parempi tarkkuus spektroskooppisten mittausten ansiosta. Spektroskopiassa valon säteily hajotetaan sen eri aallonpituuksiin käyttämällä prismaa tai hilaa ja tästä muodostuu valon spektri (Hearnshaw, 2009). Valon spektristä voidaan esimerkiksi analysoida galaksien kemiallista koostumusta, mitata

spektriviivojen siirtymää punasiirtymän arvioimiseksi sekä tutkia valon intensiteetin jakaumaa eri aallonpituuksilla (Hearnshaw, 2009; Mo et al., 2010). Spektroskopiasa voidaan muun muassa selvittää, mitä alkuaineita havainnoidussa kohteessa esiintyy. Tämä tapahtuu löytämällä kohteen emissio- ja absorptioviivat, jotka osoittavat, millä eri alkuaineiden kvantittuneilla energiatasoilla kohde säteilee ja absorboi valoa (Merrill, 1958; Mo et al., 2010). Spektroskopia antaa merkittävästi tarkempaa tietoa galaksien fysikaalisista ominaisuuksista verrattuna pelkkään eri aallonpituusalueiden kokonaissäteilyyn perustuvaan fotometriseen mittaukseen. Spektroskooppinen punasiirtymä saadaan mittaamalla galaksin spektriviivojen siirtymä kohti pidempiä aallonpituuksia (Tonry & Davis, 1979; Mo et al., 2010) ja sen tarkkuus on hyvä saaden tyypillisesti arvoja alle  $z_{err} \sim 0.0001(1+z)$  (Prada et al., 2025), jossa  $z$  on kohteen punasiirtymä.

DESIG hyödyntää fotometrisiä mittaustuloksia suurimmassa osassa kohteistaan, ja vain noin 20 % kohteista sisältää spektroskooppisen mittauksen (Wen & Han, 2024). Fotometrisessä mittauksessa valon vuo mitataan useiden suodattimien (esim. B, V, R, I) läpi, jolloin kohteiden magnitudit ja väri-indeksit pystytään määrittämään (Mo et al., 2010; Beck et al., 2014). Fotometrinen punasiirtymä saadaan myös tämän avulla. Klassisessa fotometriassa punasiirtymä arvioidaan eri suodattimien läpi saaduista väreistä vertaamalla niitä tunnettuihin galaksivärimalleihin eri punasiirtymillä (Newman & Gruen, 2022). Nykyisin fotometriset punasiirtymät saadaan hyödyntämällä koneoppimismalleja (Newman & Gruen, 2022). Moderni fotometria säilyttää pikselitason informaation, jonka takia sen tarkkuus on yleensä suurempi kuin klassisen fotometrian (Newman & Gruen, 2022). Fotometrinen havaintojen tarkkuus on parhaimmissakin tapauksissa kuitenkin vain  $z_{err} \sim 0.01(1+z)$  (Newman & Gruen, 2022).

Vaikka fotometria ei tarjoa yhtä suurta tarkkuutta kuin spektroskopia, mahdollistaa se nopean ja laaja-alaisen tutkimuksen verrattuna spektroskopiaan (Kirk

et al., 2015). Spektroskopiassa talteen otetaan koko säteilyn aallonpituusjakauma, mikä vaatii pidempiä valotusaikoja ja tarkempaa kalibrointia (Mo et al., 2010; Lombardo et al., 2017). Näistä syistä spektroskopiset havainnot ovat usein rajattu pienempään määrään kohteita, kun taas fotometrialla voidaan kartoittaa miljoonia kohteita suhteellisen lyhyessä ajassa (Eriksen & Gaztañaga, 2015; Mo et al., 2010). Fotometrinen havaintojen katsotaan siksi soveltuvan paremmin suurten galaksijoukkokatalogien tilastolliseen tutkimukseen, kun taas spektroskopia tarjoaa yksityiskohtaista tietoa yksittäisten kohteiden ominaisuuksista (Asorey et al., 2016; Mo et al., 2010).

### 3.1 DESI Legacy Survey

Tässä työssä käytetyn DESIG:n aineiston muodostamisessa on hyödynnetty DESI Legacy Survey -aineiston (Dey et al., 2019) DR9- ja DR10-julkaisuja sekä spektroskooppisia punasiirtymiä Two Micron All-Sky Survey:stä (2MASS), SDSS DR17:sta ja DESI:n varhaisesta aineistojulkaisusta. DESI Legacy Survey -aineisto koostuu kolmesta laajasta taivaankartoituksesta: Dark Energy Camera Legacy Survey (DECaLS), the Beijing-Arizona Sky Survey (BASS) ja Mayall z-band Legacy Survey (MzLS) (Dey et al., 2019). Näistä vain DECaLS hyödyntää g-, r- ja z-aallonpituusalueita, kun taas BASS hyödyntää g- ja r-aallonpituusalueita ja MzLS vain r-aallonpituusaluetta (Dey et al., 2019). DECaLS:in mittaukset on tehty Blanco teleskoopilla ja DECam-instrumentilla, BASS:in Bok teleskoopilla ja 90Prime-instrumentilla ja MzLS:än Mayall teleskoopilla ja Mosaic-3-instrumentilla (Dey et al., 2019). Taivasalue on  $9000 \text{ deg}^2$  DECaLS:ssa kattaen  $\text{NGC}(\text{dekl.} \leq +32^\circ) + \text{SGC}$ , jossa NGC on galaktinen pohjoisnavan ympäristö (North Galactic Cap) ja SGC on galaktinen etelänavan ympäristö (South Galactic Cap) (Dey et al., 2019). BASS ja MzLS kattavat pienemmän taivasalueen  $\text{NGC}(\text{dekl.} \geq +32^\circ)$ , joka on vain  $5000 \text{ deg}^2$  (Dey et al., 2019). Kokonaisuudessaan tutkimus kattoi noin  $14\,000 \text{ deg}^2$  vuonna 2019, mutta uusimpien

DECaLS-mittausten jälkeen DR9 julkaisu kattaa jo melkein 20 000 deg<sup>2</sup> ja DR10 julkaisu 24 000 deg<sup>2</sup> (Dey et al., 2019). DESIG:n aineistoa varten DR9 ja DR10 julkaisut on käsitelty erikseen (Wen & Han, 2024) DESIG:n tutkimuksessa johtuen niiden aallonpituusalueiden erosta. DR9 sisältää grzW1W2-aallonpituusalueet (Wen & Han, 2024). DR10 taas sisältää DECaLS:in uudet i-aallonpituusalueella tehdyt mittaukset, joten siinä on grizW1W2-aallonpituusalueet (Wen & Han, 2024).

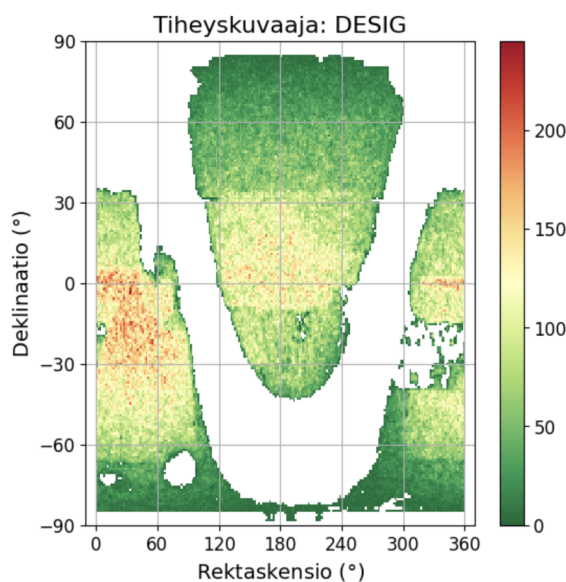
Wen & Han (2024) suorittivat DESIG:n aineistolle myös laatutarkastelun, jossa ensin poistettiin kohteet, joiden tyyppi on pistemäinen. Tällä rajattiin tähtimäiset kohteet pois tutkimuksesta. Tämän jälkeen he käyttivät kolmea laadunvalintakriteeriä grz-aallonpituusalueille DR9-aineistossa ja griz-aallonpituusalueille DR10-aineistossa (Wen & Han, 2024):

1. Jos kohteesta tulevasta valosta yli 50 % on peräisin häiriöstä, kuten esimerkiksi kirkkaasta kohteesta oikean kohteen vierellä, poistettiin kohde.
2. Jos kohteesta yli 40 % on peittynyt jollain maskilla, kuten esimerkiksi toisella tähdellä, poistettiin kohde.
3. Jos kohteesta alle 30 % oli kuvattuna mukana mittauksessa, poistettiin kohde.

Lisäksi he asettivat signaali-kohinasuhteeksi  $S/N \geq 5$  grzW1-aallonpituusalueille DR9-aineistossa ja grizW1-aallonpituusalueille DR10-aineistossa (Wen & Han, 2024). Lopuksi he poistivat aineistosta morfologisesti galakseiksi luokiteltuja, mutta väri-väri-avaruudessa tähtimäisiä kohteita (Wen & Han, 2024). Kohde voidaan luokitella tähdeksi väri-väri-avaruuden perusteella, jos se sijoittuu kapealle värialueelle (Solarz et al., 2012). Tämä alue syntyy, koska tähdillä on suhteellisen samanlaiset pintalämpötilat, jotka määrittävät niiden värit (Solarz et al., 2012). Galaksit sen sijaan koostuvat monista tähdistä ja sisältävät usein myös pölyä, joten ne sijoittuvat väri-väri-avaruudessa laajemmalle alueelle, mikä erottaa ne tähdistä (Solarz et al., 2012).

## 3.2 DESIG galaksijoukot

DESIG:n aineisto koostuu 1 581 179 galaksijoukosta, joissa on yhteensä 15 864 358 galaksia (Wen & Han, 2024). DESIG:ssä galaksijoukkojen yleensä kirkkaimman ja massiivisimman keskusgalaksin (BCG, eng. Brightest Cluster Galaxy) tähtimassan piti olla vähintään  $10^{11} M_{\odot}$  ja loppujen galaksien tähtimassan vähintään  $10^{10} M_{\odot}$  (Wen & Han, 2024). Wen & Han (2024) määrittivät DESIG:n galaksijoukot etsimällä korkean tiheyden alueita ennalta valittujen massiivisten galaksien ympäriltä tiettyjen punasiirtymäarvojen sisältä. Kuvassa 5 on esitetty DESIG:n taivasalue ja kerättyjen galaksijoukkojen tiheys deklinaation ja rektaskension avulla. Kuten kuvasta 5 nähdään, DESIG:n tiheys muuttuu merkittävästi eri taivasalueilla. Tämä on selitettävissä sillä, että DESIG koostuu monista eri tutkimuksista, joiden syvyysalue punasiirtymän suunnassa vaihtelee merkittävästi. DESIG:n aineisto kattaa myös laajan kirjon muita ominaisuuksia, joista on saatavilla lisää tietoa Wen & Han (2024).



Kuva 5. Tiheyskuvaaja DESIG:n aineistosta deklinaation ja rektaskension avulla. Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella.

Seuraavaksi esittelen, kuinka Wen & Han (2024) ensin valitsivat BCG-kohteet, miten niiden ympärille muodostettiin galaksijoukot sekä miten näiden galaksijouk-

kojen laatua arvioitiin heidän tutkimuksessaan. BCG-kohteiksi valittiin optiselta- ja infrapunaluminositeetiltaan kirkkaimpia massiivisia universumin galakseja, joihin kuuluu tyypillisesti vanhoja tähtipopulaatioita (Wen & Han, 2024). Ne sijaitsevat tyypillisesti magnitudijakauman kirkkaassa päässä, värijakauman punaisessa päässä (Wen et al., 2018) ja ovat kirkkaimpia keskusgalakseja galaksijoukoille (Wen & Han, 2024). DESIG:ssä BCG-kohteet valittiin rzW1-aallonpituusalueiden, arvioitujen punasiirtymien ja massojen avulla (Wen & Han, 2024). BCG-kohteiden tähtimassan piti olla vähintään  $10^{11} M_{\odot}$ , jonka jälkeen niistä poistettiin himmeät kohteet eri etäisyysväleillä (Wen & Han, 2024; Lauer et al., 2014; Wen et al., 2012; Wen & Han, 2015, 2022). Tämä poisti 2.5 % himmeistä BCG-kohteista (Wen & Han, 2024). Myös osa sinisistä BCG-kohteista poistettiin värinsä perusteella aineistosta (Wen & Han, 2024). Tämän jälkeen voitiin siirtyä etsimään galaksijoukkoja.

Mikäli galaksin punasiirtymäero oli suurempi kuin  $z \pm \Delta z$ , jossa

$$\Delta z = \begin{cases} 0.04(1+z), & \text{kun } z \leq 0.7 \\ 0.15z - 0.037, & \text{kun } z > 0.7 \end{cases} \quad (5)$$

verrattuna valittuun massiiviseen galaksiin, ei galaksi kuulunut kyseiseen galaksijoukkoon (Wen & Han, 2024). Näillä arvoilla suurin osa galaksijoukkojen galakseista löytyi punasiirtymän muuttuessa (Wen et al., 2009; Wen & Han, 2021). Tämän jälkeen määritetystä galaksijoukosta poistettiin vielä galaksit, joiden punasiirtymän varmuus oli huono  $\sigma_{zp} > 2\Delta z$  (Wen & Han, 2024). Galaksijoukkoon kuuluvat galaksit valittiin projosoidun säteen  $R_1 = E(z)^{-\frac{2}{3}}$  Mpc sisältä (Wen & Han, 2024). Lopuksi galaksijoukkojen massat määritettiin niissä olevien galaksien tähtimassojen ja skaalausrelaation avulla tunnetun laajan galaksijoukkoaineiston pohjalta (Wen & Han, 2024, 2015). Ensin galaksijoukolle laskettiin sen jäsenten massojen avulla  $R_{500}$  säde skaalausrelaation avulla, joka esitellään kappaleessa 4.1 (Wen & Han, 2024). Tämän jälkeen galaksijoukon massa määritettiin hyödyntämällä tätä sädettä (Wen & Han, 2024). Tähän palataan tarkemmin kappaleessa 4.1. Tutkimuksessa tehtiin

löydetyille galaksijoukoille myös laatutarkastelu lopuksi. Ensin verrattiin Cosmic Evolution Survey Deep Field (The COSMOS field) -tutkimuksen tuloksia saatuihin tuloksiin ja huomattiin saadun näytteen olevan hyvälaatuinen sen väriavaruuden vastatessa hyvin The COSMOS field -tuloksia BCG-kohteiden läheisille galakseille (Wen & Han, 2024). Saaduista galaksijoukoista on siis hyvin onnistuttu poistamaan kohteet, jotka on virheellisesti luokiteltu alun perin galakseiksi. Tämän jälkeen verrattiin saatujen galaksijoukkojen fotometrisia ja spektroskooppisia punasiirtymiä ja huomattiin, että suurin osa galaksijoukkojen galakseista on edelleen löydettävissä pelkkien fotometrinen punasiirtymien avulla, vaikka epävarmuustekijöiden määrä kasvaa (Wen & Han, 2024). Tämä tehtiin vertaamalla saatuja fotometrisia galaksijoukkoja Galaxy And Mass Assembly (GAMA) -tutkimuksen tuloksiin (Wen & Han, 2024).

### 3.3 SDSS DR10

Tässä työssä käytetty SDSSG:n galaksijoukkoaineisto (Tempel et al., 2014) pohjautuu SDSS DR10-aineiston Ahn et al. (2014) julkaisuun. SDSS DR10-aineisto koostuu kahdesta tutkimuksesta: BOSS ja APOGEE (Ahn et al., 2014). Näistä BOSS on mitannut kohteita spektroskooppisesti ja APOGEE H-aallonpituusalueella (Ahn et al., 2014). Molemmat mittaukset on tehty Sloan Foundation teleskoopilla (Ahn et al., 2014). BOSS hyödyntää mittauksissaan 1000 kuidun spektroskooppia ja APOGEE 300 kuidun spektroskooppia (Wilson et al., 2019). Yhdellä kuidulla voidaan mitata yhden kohteen spektri kerrallaan (Mo et al., 2010), jolloin mittausten suorittaminen on BOSS:lla merkittävästi nopeampaa. BOSS:in taivasalue on  $10\,000\text{ deg}^2$  kattaen  $\text{NGC}(-10 \leq \text{dekl.} \leq +60^\circ) + \text{SGC}(-10 \leq \text{dekl.} \leq +40^\circ)$  (Ahn et al., 2014). APOGEE:n taivasaluetta on vaikea määrittää sen koon ja sijainnin perusteella johtuen sen tutkimuksesta. APOGEE keskittyi etsimään punaisia jättiläisiä Linnunradalta tähtien historian ja kehityksen tutkimisen tueksi, eikä sen tutkimus

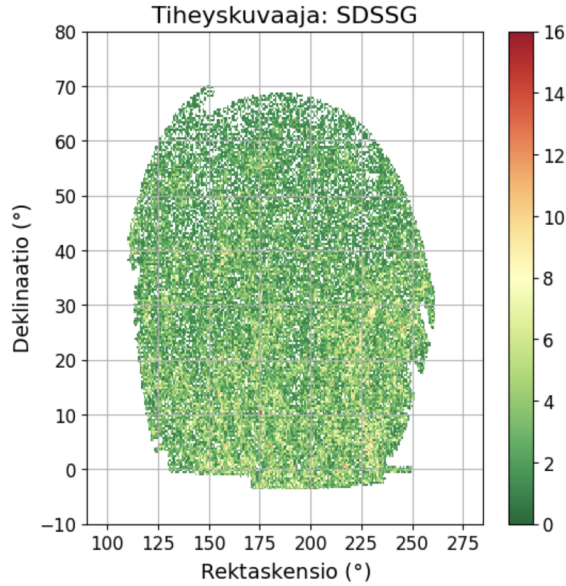
rajoittunut tiettyyn sijaintiin tai alueeseen (Ahn et al., 2014). Kokonaisuudessaan tutkimus kuitenkin kattoi hieman alle  $15\,000\text{ deg}^2$  taivasalueen (Ahn et al., 2014).

Laatutarkastelu galaksiaineistolle on tehty jo SDSS DR10-aineiston tutkimuksessa, mutta se on täysin automatisoitu, joka johtaa joihinkin vääriin tuloksiin (Tempel et al., 2014). Automaattisen suodatuksen vuoksi aineistoon jää mukaan erityisesti kirkkaita ylisaturoituneita tähtiä, suurien galaksien kaksoiskappaleita sekä galakseja, joiden luminositeetti-arvio on selvästi virheellinen (Tempel et al., 2014). Automaattisen suodatuksen lisäksi Tempel et al. (2014) poistivat manuaalisesti 1 352 kohdetta SDSSG:stä. Nämä kohteet koostuivat pääasiallisesti tähdistä, jotka luokiteltiin virheellisesti galakseiksi, galaksien kaksoiskappaleista ja virheellisen luminositeetin galakseista (Tempel et al., 2014). Tämän jälkeen he poistivat aineistosta kohteet, joiden galaktinen ekstinktio ei täyttänyt Petrosian r-aallonpituusalueen magnitudia  $m_r \leq 17.77$  (Tempel et al., 2014) viitaten Schlegel et al. (1998). Lopuksi he myös korjasivat punasiirtymät taustasäteilyn suhteen, ja punasiirtymäraajaksi asetettiin  $z = 0.2$  (Tempel et al., 2014).

### 3.4 SDSSG galaksijoukot

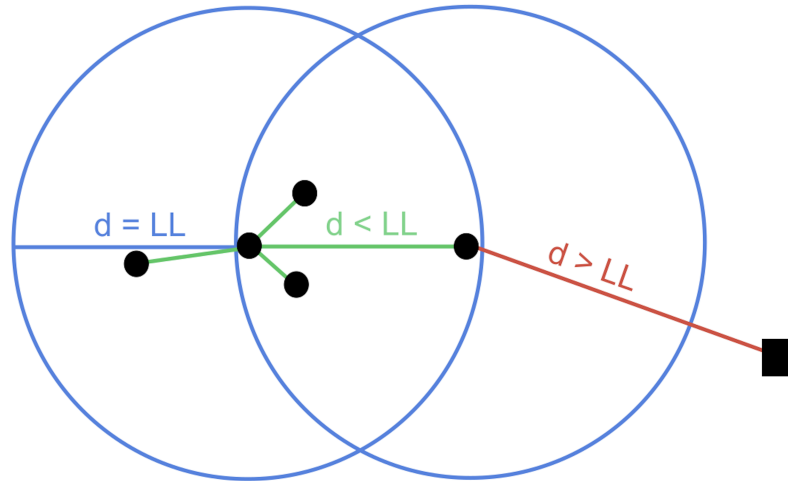
SDSSG:n aineisto koostuu 82 458 galaksijoukosta, joissa on yhteensä 588 193 galaksia (Tempel et al., 2014). Näiden galaksien kirkkaus on vähintään  $m_r \leq 17.77$  (Tempel et al., 2014). Tempel et al. (2014) määrittivät galaksijoukot hyödyntämällä tunnettua FoF (Friends of Friends) -algoritmia, joka selitetään tässä kappaleessa myöhemmin. Kuvassa 6 on esitetty SDSSG:n taivasalue ja kerättyjen galaksijoukkojen tiheys deklinaation ja rektaskension avulla. Verrattuna DESIG:n tiheyskuvaajaan, SDSSG:n tiheyskuvaaja on jakautunut paljon tasaisemmin punasiirtymän suuntaisessa syvyysalueessa. Tämä on selitettävissä sillä, että SDSSG:n aineisto koostuu vain yhdestä tutkimuksesta, jolla on tietty punasiirtymän suuntainen syvyysalue (Ahn et al., 2014). SDSSG:n aineisto kattaa myös laajan kirjon muita ominaisuuks-

sia, joista on saatavilla lisää tietoa Tempel et al. (2014).



Kuva 6. Tiheyskuvaaja SDSSG:n aineistosta deklinaation ja rektaskensioon avulla. Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella.

FoF-algoritmissa määritetään LL (Linking Length), joka määrittää kaikki kohdegalaksia ympäröivät potentiaaliset muut galaksit, jotka voivat kuulua kohdegalaksin galaksijoukkoon (Press & Davis, 1982; Tempel et al., 2014). LL on etäisyysarvo ja, kun kohdegalaksin galaksijoukkoon kuuluvien galaksien ympärillä ei ole enää galakseja, jotka ovat LL:n arvon sisällä, on galaksijoukko löytynyt (Press & Davis, 1982; Tempel et al., 2014). Kuvassa 7 on esitetty yksinkertaistettu havainnekuva, kuinka LL toimii FoF-algoritmissa. Kuvassa 7 LL on esitetty sinisellä siitä kohteesta, josta FoF-algoritmi alkoi, joten kaikki kohteet, jotka ovat sen sisällä, kuuluvat FoF-algoritmin luomaan joukkoon. Nämä ovat merkattu palloilla ja vihreillä viivoilla. Punaisella ja laatikolla on taas merkattu kohde, joka on kauempana kuin LL. Tämä kohde ei kuulu FoF-algoritmin luomaan alkuperäiseen joukkoon, vaan se muodostaa oman joukkonsa käyttäen LL:ää.



Kuva 7. Havainnekuva FoF-algoritmin ja LL:n toiminnasta. Kuvassa sinisellä on merkitty LL siitä kohteesta, josta FoF-algoritmi alkoi; vihreällä ja palloilla on esitetty algoritmin hyväksymät kohteet, ja punaisella sekä laatikolla hylätty kohde, joka muodostaa oman joukkonsa.

Seuraavaksi esittelen, kuinka Tempel et al. (2014) valitsivat FoF-algoritmissa käytettävän LL:n skaalauksen punasiirtymän funktiona, jonka avulla galaksijoukot muodostettiin. SDSSG hyödyntää muuntuvaa LL:ää, jonka arvo riippuu kohdegalaksin ja lähimmän löytyneen galaksin välisestä etäisyydestä, galaksijoukon punasiirtymästä sekä halutusta galaksijoukkojen tiheydestä (Tempel et al., 2014). Mitä hajanaisemmalle alueelle galaksijoukkojen halutaan jakautuvan, sitä suurempaa LL:ää voidaan käyttää estämään galaksijoukkojen jakautuminen useammaksi pienemmäksi joukoksi (Duarte & Mamon, 2014; Tago et al., 2006). LL:n kasvattamisella etäisyyden funktiona voidaan estää galaksijoukkojen hajoamista pienemmiksi galaksijoukoiksi, kun himmeämmät galaksit katoavat etäisyyden kasvaessa (Duarte & Mamon, 2014; Tago et al., 2006). SDSSG:n tutkimuksessa pyrittiin välttämään galaksijoukkoja ympyröiviä filamenttirakenteita ja pitämään galaksijoukot ominaisuuksiltaan homogeenisinä, yhtenäisinä ja etäisyydestä riippumattomina (Tempel et al., 2014).

Aluksi SDSSG:n aineistossa etsitään keskimääräinen etäisyys lähimpään galaksiin taivaan tasossa (Tempel et al., 2014). Sen lähintä naapurigalaksia etsittiin tä-

män jälkeen sylinterimäisestä tilavuudesta, jonka säteen LL:n ja poikittaisen LL:n suhde on 10 (Tempel et al., 2014). Pienin sylinteri, joka sisältää nämä kaksi galaksia, määrittää niiden minimietäisyyden ja siten myös LL:n skaalauksen (Tempel et al., 2014). Tästä huomattiin tutkimuksessa, että sen rajallinen kirkkaus johtaa LL:n kasvuun etäisyyden kasvaessa (Tempel et al., 2014).

Tämän jälkeen LL:n arvolle tehtiin arvaus sijoittamalla se arctan-lakiin

$$d_{LL}(z) = d_{LL,0} \left[ 1 + a \arctan \left( \frac{z}{z_*} \right) \right], \quad (6)$$

jossa  $d_{LL,0}$  on LL, kun  $z = 0$  ja  $a$  ja  $z_*$  ovat vapaita parametrejä (Tempel et al., 2014). Käyttämällä saatua lakia tutkimuksessa luotiin läheisen avaruuden ( $d < 200$  h<sup>-1</sup> Mpc) galaksijoukoista testijoukko, jonka rikkausalue on 15 – 50 (Tempel et al., 2014). Pienet joukot poistettiin kohinan vähentämiseksi, ja suurimmat joukot jätettiin pois, jotta vältyttäisiin läheisiltä massiivisilta galaksijoukoilta (Tempel et al., 2014). Tämä rikkausalue kuvaa hyvin lähiavaruuden galaksijoukkojen ominaisuuksia (Tempel et al., 2014). Se antaa hyvän ennusteen lähiavaruutemme galaksijoukkojen galaksien keskimääräisistä etäisyyksistä toistensa kanssa (Tempel et al., 2014).

Lopuksi SDSSG:n tutkimuksessa etsittiin galaksijoukkoja, joiden kirkkaimmat kohteet olivat vain havaittavissa (Tempel et al., 2014). Hyödyntämällä arviota, että kaikki galaksijoukon galaksit ovat keskietäisyydellä galaksijoukosta, laskettiin galakseille absoluuttiset magnitudit ja pekuliaariset säteittäiset nopeudet (Tempel et al., 2014). Tämän jälkeen sama toistettiin, mutta oletettiin, että galaksijoukko on suuremmalla etäisyydellä, jolloin sen himmeimpiä kohteita putosi havaittavan magnitudirajan vuoksi pois (Tempel et al., 2014). Tällä tavalla pystyttiin laskemaan tarvittava LL etäisyyden muuttuessa, jolla galaksijoukko pysyisi kasassa gravitaatiovuorovaikutuksen ansiosta, kun sen fyysinen koko pidettiin samana (Tempel et al., 2014). Kun galaksijoukon himmeimpiä kohteita putosi havaittavan magnitudirajan takia etäisyyden kasvaessa, huomattiin, että LL:ää täytyi kasvattaa kohtuudella, jotta galaksijoukko pysyisi kasassa (Tempel et al., 2014). Kun tähän uuteen saatuun

skaalausrelaatioon sijoitettiin käytetty arctan-laki ja tämän jälkeen prosessi iteroitiin muutaman kerran uudestaan, saatiin se lähentymään näihin parametreihin: LL punasiirtymällä  $z = 0$  on  $0.23 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$  ja parametrit ovat  $a = 1.4$  ja  $z_{\star} = 0.09$  (Tempel et al., 2014).

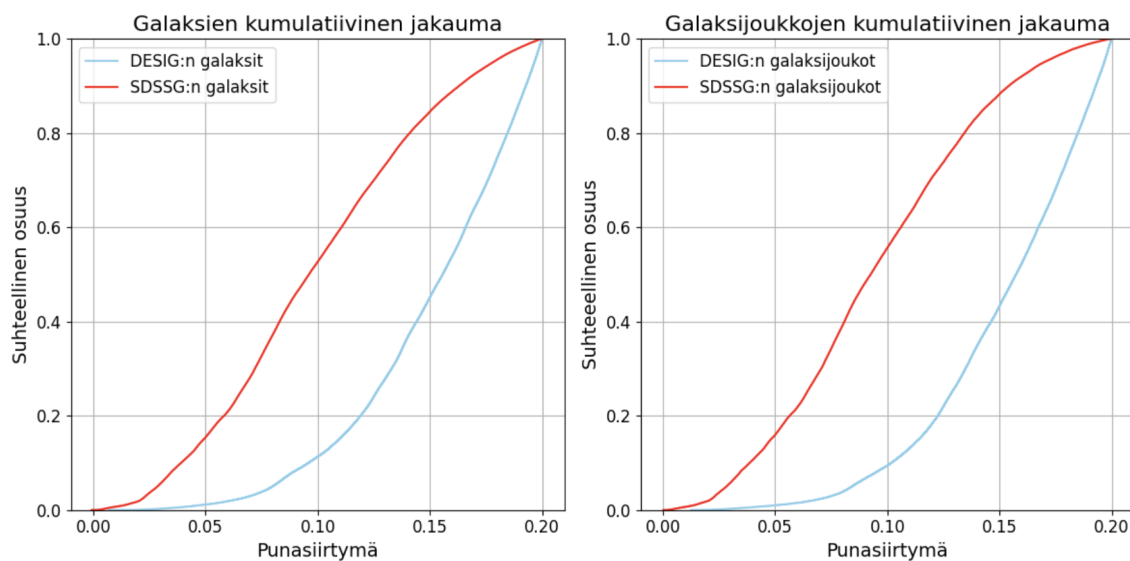
## 4 DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkojen vertailu punasiirtymäalueella $z < 0.2$

Vertailen tässä kappaleessa DESIG:n ja SDSSG:n aineistoja viidellä tavalla visuaalisesti. Vertaan galaksien ja galaksijoukkojen määrää, galaksijoukkojen rikkautta ja sädettä ja galaksien r-aallonpituusalueen magnitudia punasiirtymään sekä galaksijoukkojen massaa niiden rikkauteen. Koska SDSSG:n aineisto koskee vain punasiirtymäaluetta  $z < 0.2$ , rajaan myös DESIG:n aineiston tälle alueelle, joka normaalisti ulottuu punasiirtymälle  $z \sim 1.5$ . Teen tämän vertailun SDSSG:n kanssa ensin kaikille DESIG:n fotometrisesti ja spektroskooppisesti havaituille kohteille ja tämän jälkeen vain spektroskooppisesti havaituille kohteille. En ole korjannut käyttämässäni aineistossa erikseen FoG (Finger of God) -efektiä. FoG-efekti aiheuttaa galaksijoukkojen venymistä katsojan suunnassa, mikä johtuu galaksijoukon galaksien pekuliaarisista nopeuksista (Smith et al., 2008; Malavasi et al., 2020). Nämä pekuliaariset nopeudet vääristävät galaksien todellisia punasiirtymiä muuttamalla galaksien havaittuja nopeuksia katsojan suunnassa, mikä suurentaa galaksijoukkojen havaittua kokoa (Smith et al., 2008; Malavasi et al., 2020). SDSSG:ssä FoG-efekti on korjattu, mutta DESIG:ssä ei (Tempel et al., 2014; Wen & Han, 2024). Tällä ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta DESIG:n arvoihin, jotka lasketaan projisoitujen säteiden avulla havaittujen säteiden sijaan (Wen & Han, 2024).

### 4.1 DESIG:n koko aineiston vertailu SDSSG:n aineistoon

Kuvassa 8 vertaan galaksien ja galaksijoukkojen määrää DESIG:n ja SDSSG:n aineistojen välillä. Kuten kuvasta 8 nähdään, SDSSG rajoittuu lähiavaruuteemme, ja DESIG painottuu kaukaisempaan avaruteen. Galaksien ja galaksijoukkojen määrän väheneminen huipun jälkeen kuvassa 8 SDSSG:llä johtuu siitä, että SDSS DR10 käyttää magnitudirajaa  $m_r \leq 17.77$  (Ahn et al., 2014). Tämä raja poistaa mer-

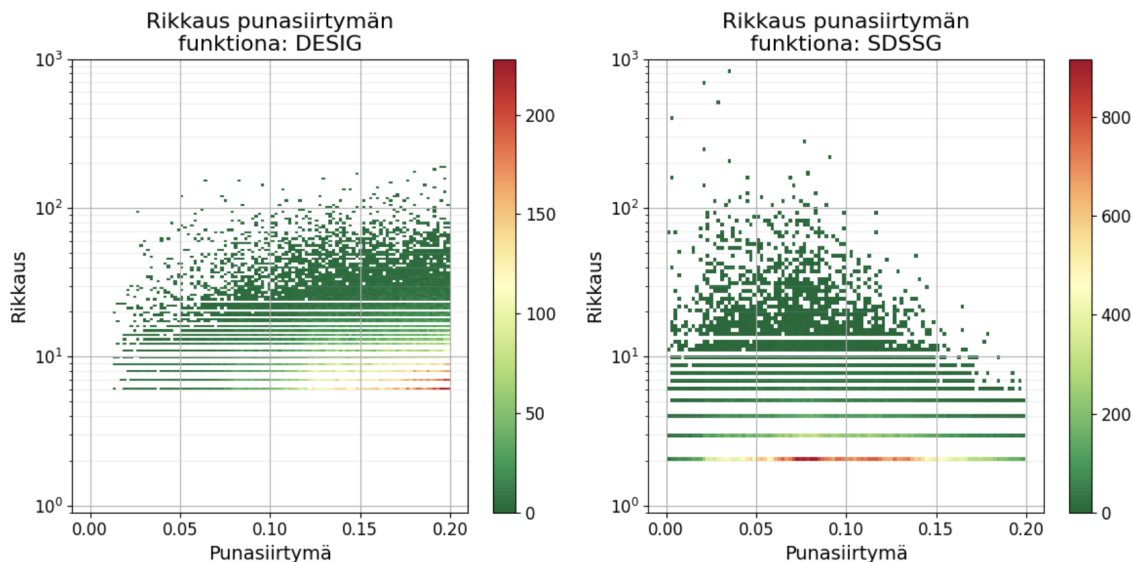
kittävästi SDSSG:n himmeämpiä galakseja ja galaksijoukkoja suuremmilla punasiirtymillä. DESIG:ssä ei ole SDSSG:n kaltaista yhtä magnitudirajaa tämän tutkimuksen tutkimusalueella, joten sen kumulatiiviset jakaumat eivät laske suuremmilla punasiirtymillä. Kuvasta 8 voidaan myös päätellä, että kattavuusanalyysissä valtaosa aineistojen yhteisistä galaksijoukoista ja galakseista osuu punasiirtymäalueelle  $0.075 < z$ , mikä vastaa noin 315 Mpc:n mukana liikkuvaa etäisyyttä.



Kuva 8. Kumulatiivinen jakauma DESIG:n ja SDSSG:n galakseista ja galaksijoukoista punasiirtymäalueella  $z < 0.2$ .

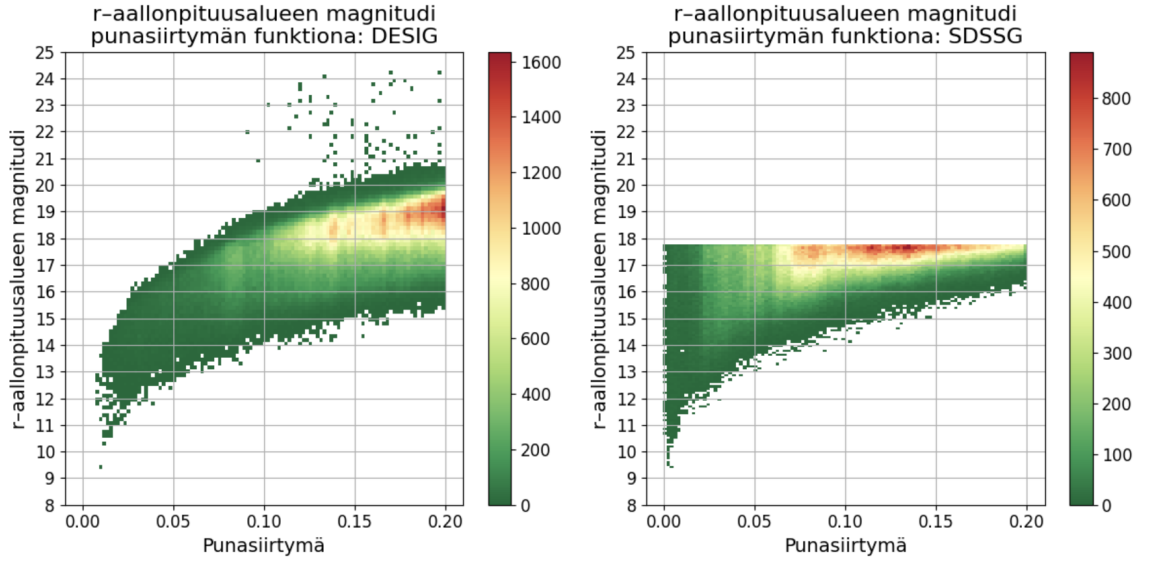
Kuvassa 9 vertaan rikkautta punasiirtymään galaksijoukkojen tiheyskuvaajan avulla. Kuten kuvasta 9 nähdään, DESIG rajaa vahvasti pienempiä galaksijoukkoja ulos tutkimuksestaan säilyttäen galaksijoukot, joiden rikkaus on yli kuusi, kun taas SDSSG:n galaksijoukoista suurin osa on hyvin pieniä. Tällä tulee olemaan vaikutus kattavuusanalyysiä tehdessä, sillä SDSSG:n pienimpiä galaksijoukkoja ei voida löytää DESIG:n aineistosta, jos ne eivät sijaitse rikkaukseltaan suuremman DESIG:n galaksijoukon sisällä. Rikkaimmat galaksijoukot löytyvät SDSSG:stä punasiirtymiltä  $z < 0.1$  johtuen aiemmin mainitusta SDSS DR10:n käyttämästä magnitudirajasta  $m_r \leq 17.77$ , joka poistaa himmeämpiä galakseja suuremmilla punasiirtymillä. Tämän takia uusia galakseja SDSSG:n aineiston galaksijoukkoihin voidaan odottaa

löytyvän kattavuusanalyysissä varsinkin punasiirtymiltä  $z > 0.1$  DESIG:stä, joka keskittyy kaukaisempaan avaruuteen.



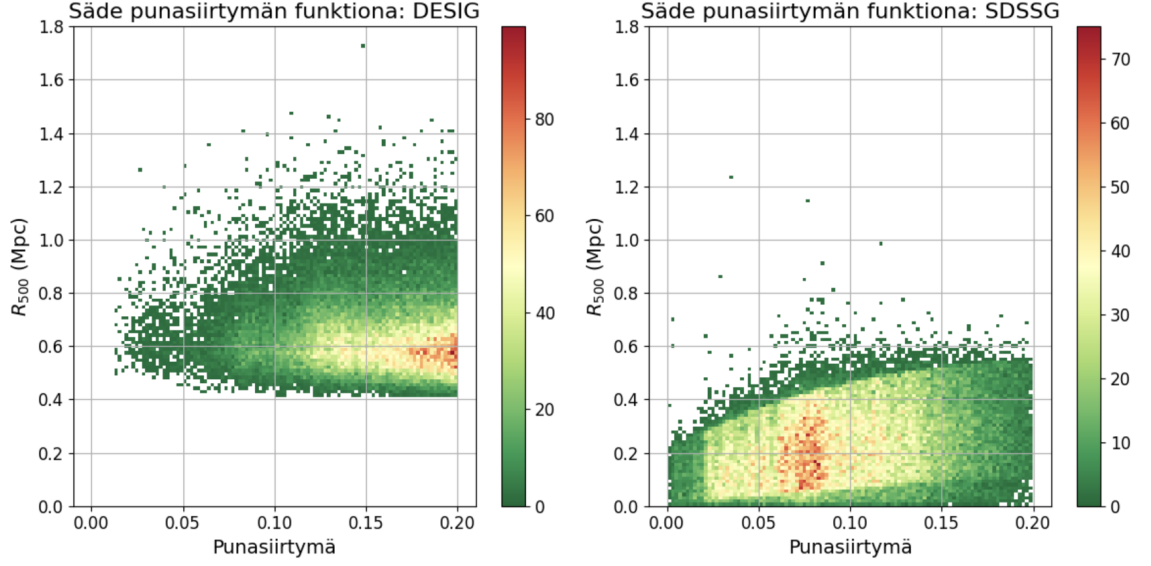
Kuva 9. DESIG:n ja SDSSG:n rikkaus punasiirtymän funktiona punasiirtymäalueella  $z < 0.2$ . Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella.

Kuvassa 10 vertaan r-aallonpituusalueen magnitudia punasiirtymään galaksijoukkojen galaksien tiheyskuvaajan avulla. Tätä varten käytin SDSSG:n aineiston ekstinktiokorjattua Petrosian magnitudia r-aallonpituusalueella ja DESIG:n magnitudia r-aallonpituusalueella. Kuten kuvasta 10 nähdään, saadut magnitudialueet vastaavat hyvin toisiaan tutkimusten välillä, ja korrelaatio eri punasiirtymien kirkkaimmilla galakseilla on hyvä. DESIG:n galaksit ovat kuitenkin rajattu niin, että galaksit, joiden massa on alle  $10^{10} M_{\odot}$ , eivät pääse DESIG:n aineistoon mukaan niiden huonon punasiirtymätarkkuuden takia (Wen & Han, 2024). Tämän vuoksi himmeät galaksit puuttuvat pienillä punasiirtymillä DESIG:stä. Tästä johtuen DESIG:ssä esiintyy myös jonkin verran himmeitä poikkeamia suuremmilla punasiirtymillä, joiden massan on laskettu olevan yli  $10^{10} M_{\odot}$ . SDSSG:stä taas puuttuvat himmeimmät galaksit, koska SDSS DR10 käyttää magnitudirajaa  $m_r \leq 17.77$  niin kuin aikaisemmin mainittiin. Tämän magnitudirajan seurauksena SDSSG:hen tullaan löytämään erityisesti himmeitä kohteita kattavuusanalyysissä.



Kuva 10. DESIG:n r-aallonpituusalueen magnitudi ja SDSSG:n r-aallonpituusalueen ekstinktio korjattu Petrosian magnitudi punasiirtymän funktiona punasiirtymäalueella  $z < 0.2$ . Väri kertoo galaksien määrän kyseisellä alueella.

Kuvassa 11 vertaan galaksijoukkojen sädettä punasiirtymään galaksijoukkojen tiheyskuvaajan avulla. Koska SDSSG:ssä käytetään virialisoitunutta sädettä eli  $R_{200}$  sädettä, jonka alueella universumin keskitiheys on 200 kertaa yli universumin kriittisen tiheyden ja DESIG:ssä  $R_{500}$  sädettä, täytyy jompikumpi muuttua toiseksi. Näin tutkimukset saadaan vertailukelpoiksi. Muutan SDSSG:n  $R_{200}$  säteen  $R_{500}$  säteeksi relaatiolla  $R_{500} \approx 0.65R_{200}$  (Reiprich et al., 2013). Kuten kuvista nähdään, DESIG ei sisällä lainkaan pienemmän säteen galaksijoukkoja. Myös vasemmanpuoleinen kuva kuvassa 9 näyttää tämän. DESIG:n galaksijoukot ovat säteiltään suurempia ja sisältävät enemmän galakseja. Kuvissa on kuitenkin myös hieman yhteistä. Molemmissa aineistoissa galaksijoukkojen säteiden yläraja suurenee punasiirtymän funktiona. SDSSG:ssä säteiden yläraja suurenee, koska sen aiemmin mainittu magnitudiraja poistaa himmeimpiä galakseja galaksijoukoista etäisyyden kasvaessa. Tämän vuoksi LL skaalautuu suuremmaksi etäisyyden kasvaessa ja tämä suurentaa säteiden ylärajaa. DESIG:ssä säteiden yläraja puolestaan suurenee johtuen DESIG:n säteiden skaalausrelaation (kts. kaava 12) riippuvuudesta punasiirtymään.



Kuva 11. DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkojen säde punasiirtymän funktiona punasiirtymäalueella  $z < 0.2$ . Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella.

Kuvassa 12 vertaan massaa rikkauteen galaksijoukkojen tiheyskuvaajan avulla.

SDSSG:n massat on muutettu DESIG:n massoihin vertailukelpoisiksi kaavalla

$$M_{200} = \frac{200}{500} \left( \frac{R_{200}}{R_{500}} \right)^3 M_{500} \quad (7)$$

(Sankhyayan et al., 2023), jossa  $M_{500}$  on massa  $R_{500}$  sisällä ja  $M_{200}$  on massa  $R_{200}$  sisällä. Tässä työssä massat esitetään  $M_{500}$  avulla. Tempel et al. (2014) laskivat massat galaksijoukoille SDSSG:ssä kaavalla

$$M_{200} = 2.325 \times 10^{12} \frac{R_g}{\text{Mpc}} \left( \frac{\sigma_v}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 M_{\odot} \quad (8)$$

(Tempel et al., 2014), jossa  $R_g$  on galaksijoukon gravitaationaalinen säde ja  $\sigma_v$  sen nopeusdispersio. Galaksijoukon galaksien nopeusdispersio on saatu kaavalla

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{(1+z_m)^2(n-1)} \sum_{i=1}^n (v_i - v_{\text{mean}})^2 \quad (9)$$

(Tempel et al., 2014), jossa  $z_m$  on galaksijoukon keskimääräinen punasiirtymä,  $n$  on galaksijoukon galaksien määrä, jolle nopeus on saatu,  $v_i$  on galaksijoukon yksittäisen galaksin nopeus ja  $v_{\text{mean}}$  on galaksijoukon keskinopeus. Tämä on dynaamisen massan

kaava, joka huomio pimeän aineen massan. Galaksijoukon gravitaatioenergia on taas saatu kaavalla

$$U = 4\pi G \int_0^{R_{out}} \frac{M(r)}{r} \rho(r) r^2 dr \quad (10)$$

(Tempel et al., 2014), jossa  $U$  on galaksijoukon potentiaalienergia  $M(r)$  on massa säteen  $r$  sisällä,  $\rho(r)$  on valittu tiheysprofiili (tässä tutkimuksessa käytetään NFW-profiilin massoja, jotka on laskettu SDSSG:n aineistoon valmiiksi) ja  $R_{out}$  on galaksijoukon ulkorajan säde.

Wen & Han (2024) laskivat ensin massat DESIG:ssä galaksijoukkojen sijaan yksittäisille galakseille tähtimassana kaavalla

$$\log \left( \frac{M_\star}{M_\odot} \right) = \gamma \log \left( \frac{L_z}{L^*} \right) + f \quad (11)$$

(Wen & Han, 2021), jossa  $\gamma$  on suoran kulmakerroin,  $f$  sen vakiotermin,  $L_z$  on galaksin luminositeetti  $z$ -aallonpituusalueella ja  $L^*$  sen ominaisluminositeetti, millä luminositeetin arvo normalisoidaan populaatio synteesimallin (Bruzual & Charlot, 2003) avulla. Parhaaksi sovituksiksi saatiin kulmakerroin  $\gamma = 1.13 \pm 0.01$  ja vakio-termi  $f = 10.63 \pm 0.01$ . Näistä tähtimassoista he pystyivät määrittämään  $R_{500}$  säteen skaalausrelaatiolla

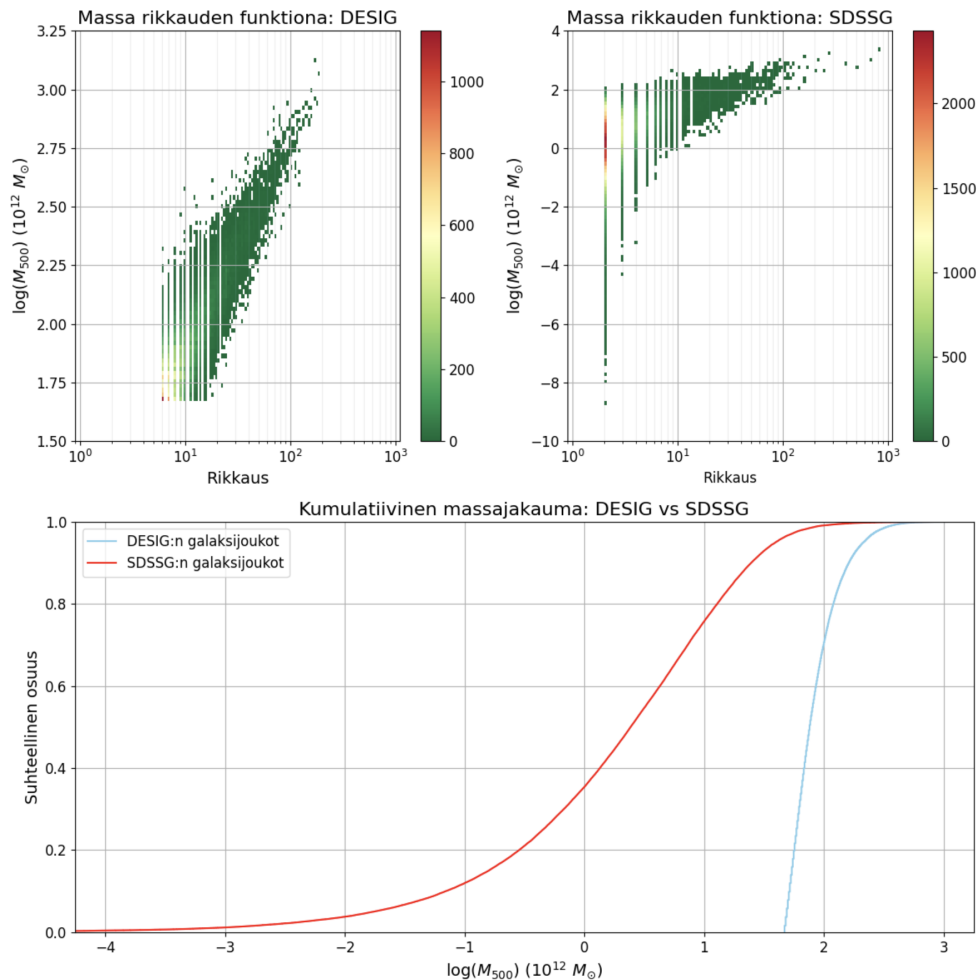
$$\log R_{500} = 0.402 \log \left( \frac{M_{\star, R_1}}{10^{10} M_\odot} \right) - (0.944 \pm 0.03) + (0.43 \pm 0.02) \log(1+z) \quad (12)$$

(Wen & Han, 2024), jossa  $M_{\star, R_1}$  on koko tähtimassa projisoidun säteen  $R_1 = E(z)^{-\frac{2}{3}}$  Mpc sisällä ja  $z$  on galaksijoukon BCG-kohteen punasiirtymä. Projisoidusta  $R_{500}$  säteestä he pystyivät määrittämään koko galaksijoukon tähtimassan  $M_{\star, 500}$ , josta he lopulta määrittivät galaksijoukon massan, joka huomioi pimeän aineen, skaalausrelaatiolla

$$\log M_{500} = 0.96 \log M_{\star, 500} - (1.82 \pm 0.02) \quad (13)$$

(Wen & Han, 2021). Kuten kuvasta 12 nähdään, rajatumalla massavälillä lineaaristen kaavojen 12 ja 13 käyttäminen johtaa DESIG:n galaksijoukkojen massojen

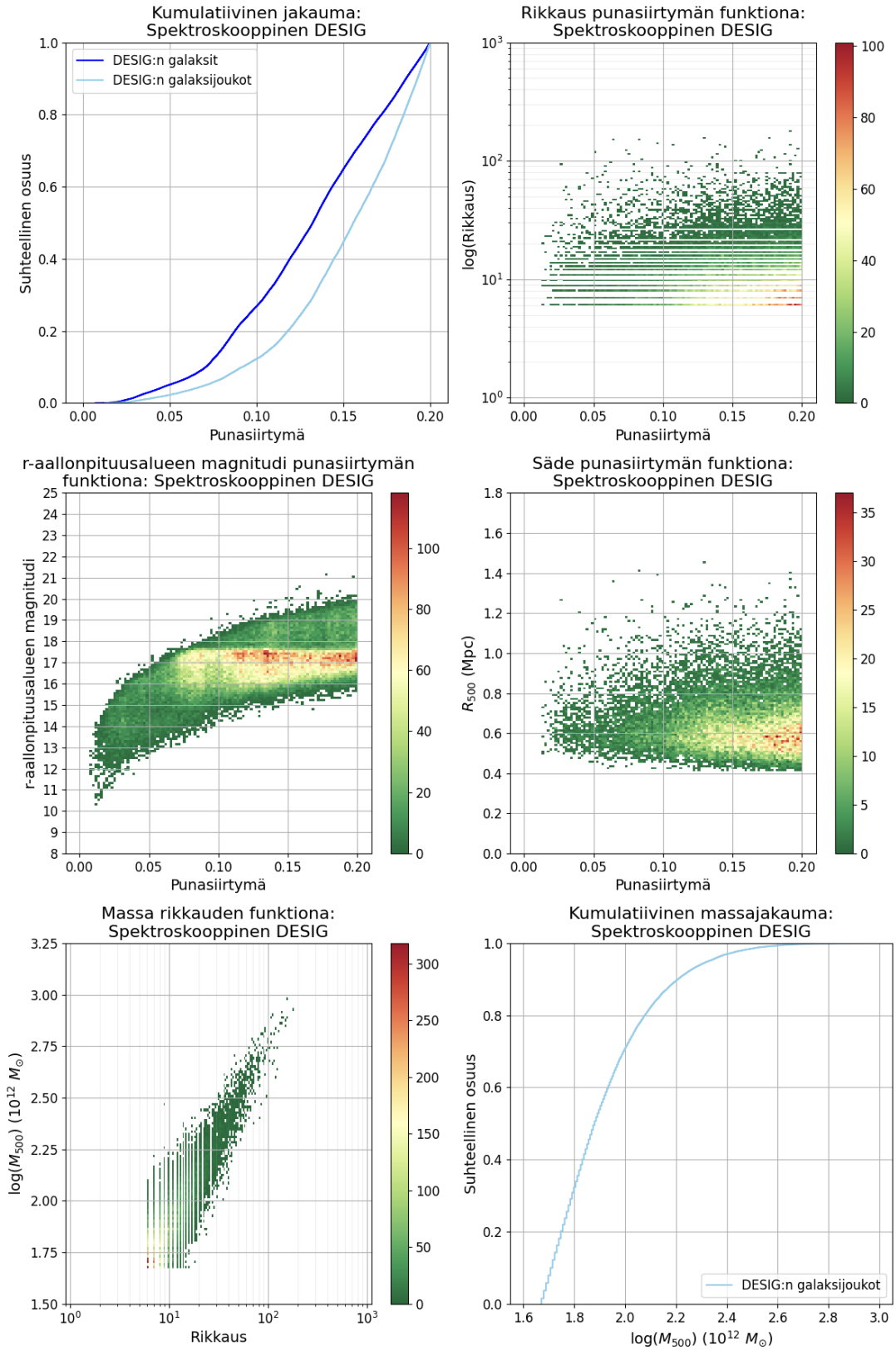
pienempään keskihajontaan. DESIG:n massat ovat myös selvästi paljon suurempia kuin SDSSG:ssä. SDSSG:n toisen asteen yhtälön kaava 8 antaa laajemmalla alueella selvästi pienempiä massoja. Se ei kuitenkaan pysty määrittämään massoja kunnolla pienen rikkauden galaksijoukoille johtuen siinä käytetystä nopeusdispersiosta, jonka tarkkuus on vahvasti riippuvainen galaksien määrästä galaksijoukossa. Tämän takia SDSSG:llä, jolla on enemmän pienen rikkauden galaksijoukkoja, galaksien nopeusdispersio johtaa suureen massojen keskihajontaan kuvassa 12 (oikea yläkulma). Kuvasta 12 nähdään myös, että DESIG:ssä ei ole ollenkaan pienemmän massan ja rikkauden galaksijoukkoja, joita SDSSG:stä löytyy.



Kuva 12. DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkojen massa rikkauden funktiona ja niiden kumulatiivinen massajakauma punasiirtymäalueella  $z < 0.2$ . Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella. Huomioi y-akselien massarajat kahdessa ylemmässä kuvaajassa.

## 4.2 DESIG:n spektroskooppisen aineiston vertailu SDSSG:n aineistoon

Spektroskooppisen punasiirtymän kohteita DESIG:ssä on suhteellisen vähän, kuten aikaisemmin on mainittu. Punasiirtymäalueella  $z < 0.2$  vain 83 988 galaksilla on spektroskooppinen punasiirtymä 686 221 galaksista, joka on vain noin 12 % koko aineistoon verrattuna. Koska nämä galaksit ovat kuitenkin usein galaksijoukkojen BCG-kohteita, 52 729 galaksijoukosta 22 840 galaksijoukolla on spektroskooppinen punasiirtymä, mikä vastaa noin 43 % DESIG:n galaksijoukoista punasiirtymäalueella  $z < 0.2$ . Mukana on myös jonkin verran muita spektroskooppisen punasiirtymän galakseja. Tässä kappaleessa esittelen spektroskooppisen DESIG:n aineiston kuvassa 13, jossa kuvat ovat samassa järjestyksessä kuin aiemmassa kappaleessa. Teen tämän verratakseni spektroskooppista DESIG:n aineistoa SDSSG:n täysin spektroskooppiseen aineistoon. Kuvan 13 vasemmanpuoleisessa ylimmässä kuvassa on merkittävästi vähemmän korkean punasiirtymän galakseja ja galaksijoukkoja verrattuna kuvaan 8. Kuvan 13 neljästä tiheyskuvaajasta kaikki lukuun ottamatta magnitudikuvaajaa ovat hyvin samanlaisia koko fotometriseen aineistoon verrattuna (vasemmanpuoleiset kuvat 9, 11 ja 12), kuten voi odottaa. Niiden ainoana erona on aineiston koko. Rikkauteen,  $R_{500}$  säteeseen ja massaan ei siis ole merkittävää vaikutusta sillä, onko galaksijoukon BCG-kohteella spektroskooppinen punasiirtymä vai ei. Merkittävin ero havaitaan magnitudijakaumassa kuvan 13 vasemmanpuoleisen keskimmäisen kuvan ja kuvan 10 vasemmanpuoleisen kuvan välillä. Kuvan 13 vasemmanpuoleiseen keskimmäiseen kuvaan tulee selvästi havaittavissa oleva horisontaalinen raja noin 17.5 magnitudin kohdalle, jota ei ole kuvan 10 vasemmanpuoleisessa kuvassa. Tämä johtuu DESIG:n käyttämästä SDSS DR16:n (Data Release 16) harjoitusotoksesta spektroskooppisille punasiirtymille, joka on magnitudirajattu samoin kuin SDSS DR10 (Wen & Han, 2022).



Kuva 13. DESIG:n spektroskooppisen punasiirtymän galaksijoukkojen ja galaksien kumulatiiviset jakaumat, galaksijoukkojen rikkaudet ja säteet ja galaksien r-aallonpituusalueen magnitudit punasiirtymän funktiona sekä galaksijoukkojen massa rikkauden funktiona ja kumulatiivinen massajakauma. Väri kertoo galaksijoukkojen tai galaksien määrän kyseisellä alueella.

## 5 Galaksijoukkojen kattavuusanalyysi

Tässä osiossa teen DESIG:n ja SDSSG:n aineistojen kattavuusanalyysin, jonka tarkoituksena on kartoittaa potentiaaliset samat galaksijoukot molemmista aineistoista. Poistan myös samojen galaksijoukkojen useammat osumat, jotka johtuvat käytetystä hakualgoritmista ja fotometrisen aineiston epätarkkuudesta parantaakseni aineiston puhtautta. Nämä useammat osumat johtuvat SDSSG:n pienemmistä galaksijoukoista, joita DESIG:n galaksijoukkojen sisälle voi mahtua useampi. Kutsun näitä DESIG:n galaksijoukkojen sisälle mahtuvia useampia SDSSG:n galaksijoukkoja duplikaateiksi. Duplikaattien poiston jälkeen jäljelle jääneiden galaksijoukkoparien avulla voidaan tehdä jatkotutkimus, jossa vertaillaan galaksijoukkoparien ominaisuuksia spektroskooppisen ja fotometrisen aineiston välillä.

### 5.1 Alustava kattavuusanalyysi

Aloitin potentiaalisesti samojen galaksijoukkojen etsimisen tekemällä ensin karkean rajauksen DESIG:n aineistoon poistamalla siitä alueet, jotka eivät kuulu SDSSG:n kanssa samalle taivasalueelle. Rajasin DESIG:n deklinaation  $-10$  ja  $75$  asteen välille ja rektaskension  $105$  ja  $270$  asteen välille (sekä punasiirtymän  $z < 0.2$  niin kuin aiemmin mainittiin). Tällöin galaksijoukkoja DESIG:hen jäi  $21\,264$ , joista noin  $75\%$  ( $15\,982 / 21\,264$ ) sisälsi spektroskooppisesti havaitun galaksin (tyypillisesti BCG). Tekemistäni rajauksista on esitetty rajattu DESIG:n taivasalue (vasen) ja galaksijoukkojen kumulatiivinen jakauma (oikea) kuvassa 14. Vertaamalla kuvan 14 vasemmanpuoleista kuvaa kuvaan 4 huomataan, että suurin osa DESIG:n galaksijoukoista sijoittuu SDSSG:n tutkimuksen ulkopuolelle ja vain noin  $1\%$  ( $21\,264 / 1\,581\,179$ ) DESIG:n galaksijoukoista jää SDSSG:n tutkimuksen alueelle. Seuraavaksi poistin SDSSG:stä kaikki galaksijoukot, joiden rikkaus oli alle viisi, perustuen niiden epätarkkoihin dynaamisiin massoihin (Becker et al., 2007; Tempel et al., 2017) kuvassa 12, jolloin galaksijoukkoja jäi SDSSG:hen noin  $14\%$  ( $11\,166 / 82\,458$ ) alkuperäises-

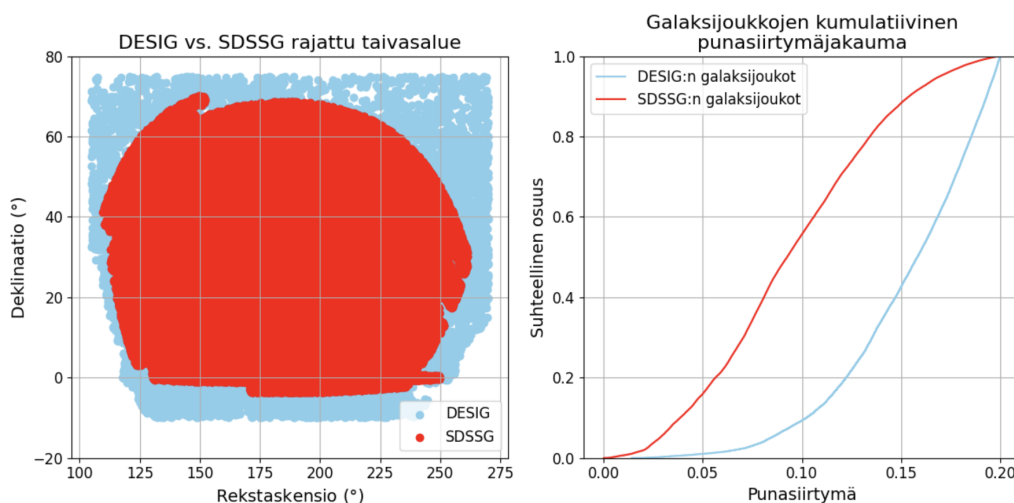
tä. Tämä on esitetty kuvassa 15, jossa ovat jäljelle jääneiden SDSSG:n (vasen) ja DESIG:n (oikea) galaksijoukkojen massat rikkauden funktiona ja niihin pienimmän neliösumman menetelmällä sijoitetut lineaariset funktiot. Lineaarista funktioista näkee, että massa kasvaa rikkauden funktiona. SDSSG:llä hajonta ja kulmakerroin ovat suurempia. Tämän jälkeen laskin DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkojen sijainnit niiden BCG-kohteiden avulla karteesisessä koordinaatistossa käyttäen DESIG:n kosmologiaa. Tähän käytin kaavoja

$$x = D_C(z) \cos \delta \cos \alpha, \quad (14)$$

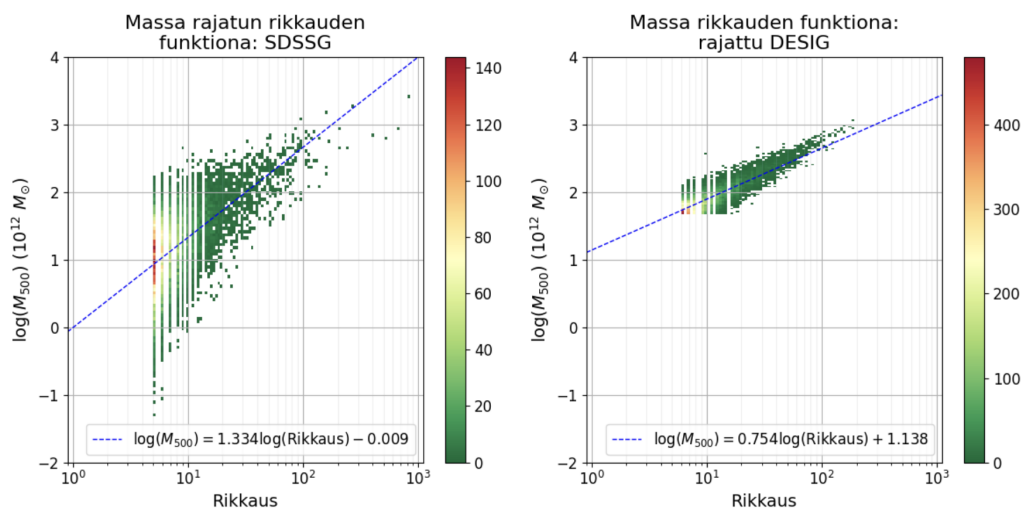
$$y = D_C(z) \cos \delta \sin \alpha \text{ ja} \quad (15)$$

$$z = D_C(z) \sin \delta, \quad (16)$$

joissa  $D_C(z)$  on mukana liikkuva etäisyys,  $\delta$  on deklinaatio ja  $\alpha$  on rektaskensio. Kun koordinaatit oli laskettu, käytin DESIG:n aineistoon Python-kirjasto SciPy:n luokkaa (class) `cDKTree`, joka kuuluu SciPy:n avaruudellisiin algoritmeihin ja tietorakenteisiin (Spatial algorithms and data structures). Tämä loi DESIG:n karteesisista kordinaateista puurakenteen, josta lyhyimmät etäisyydet on helppo löytää. Puurakenne muodostuu `cDKTree` luokassa niin, että se etsii suurimman hajonnan akselin ja jakaa aineiston noin puoliksi tämän suhteen. Sen jälkeen tämä operaatio toistuu rekursiivisesti niin kauan, kunnes aineistoa ei enää pysty jakamaan pienempiin osiin. Ideaalitulanteissa `cDKTree` luokka on aikavaativuudeltaan  $O(\log n)$ -algoritmi. Etäisyyksien saamiseksi etsin SciPy:n `query`-metodilla lähimmät parit jokaiselle SDSSG:n aineiston galaksijoukolle. Kun etäisyydet olivat tiedossa, määritin mahdolliset galaksijoukkoparit käyttämällä absoluuttista virherajaa 5 Mpc galaksijoukkojen väliselle etäisyydelle. Valitsin tämän etäisyyden absoluuttiseksi virherajaksi, koska se on suurimpien viriaalisten galaksijoukkojen halkaisijaa hyvin lähellä oleva arvo. On epätodennäköistä, että samoja galaksijoukkoja löytyy tätä kauempaa toisistaan. Tämän määrittelyn jälkeen löysin 3 723 potentiaalista samaa galaksijoukkoa.



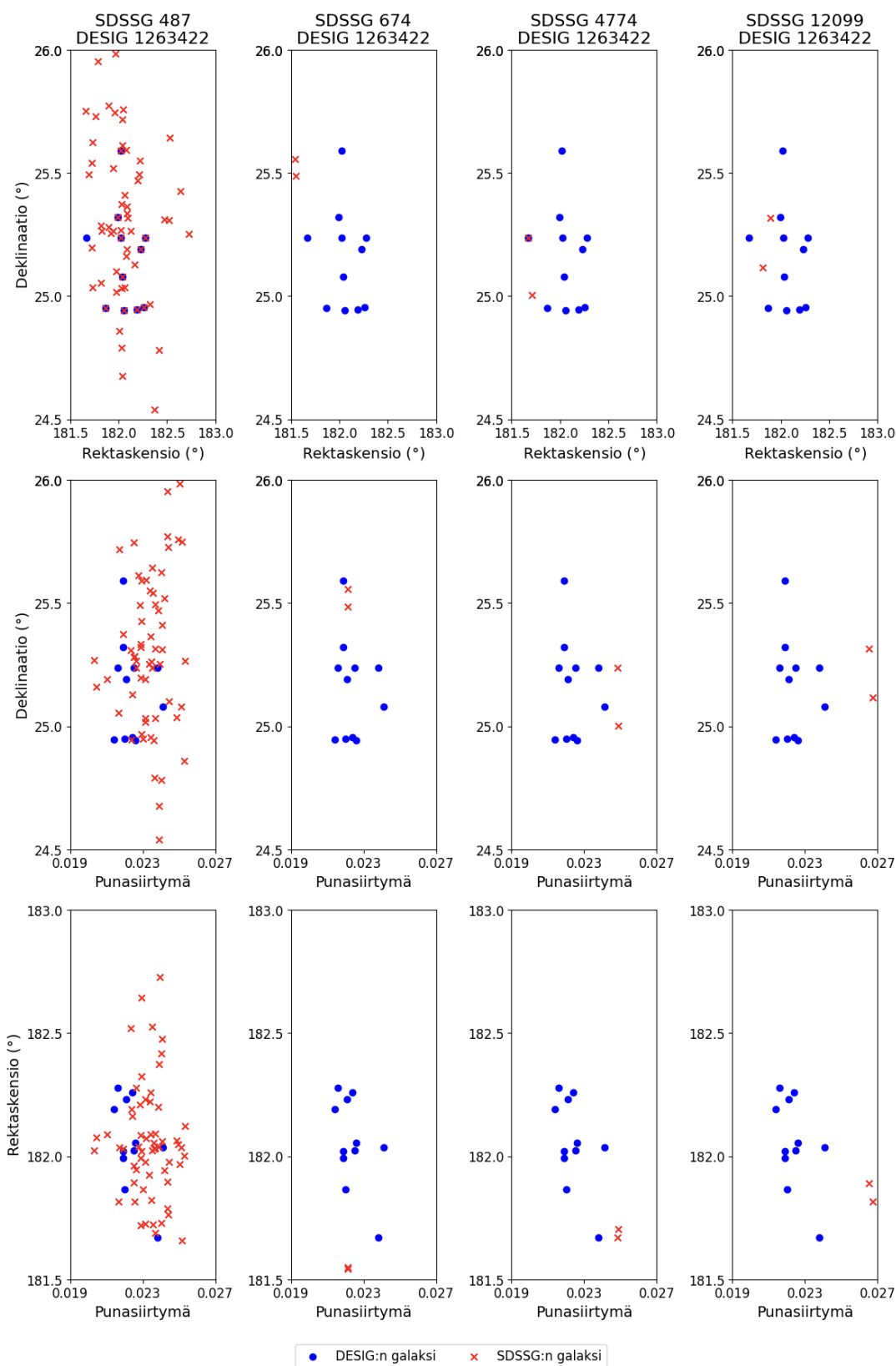
Kuva 14. DESIG:n ja SDSSG:n rajattu taivasalue ja niiden galaksijoukkojen kumulatiivinen jakauma punasiirtymän funktiona, joista on poistettu DESIG:n kohteet, joiden deklinaatio ei ole  $-10$  ja  $75$  asteen välillä, rektaskensio  $105$  ja  $270$  asteen välillä ja punasiirtymä  $z < 0.2$ .



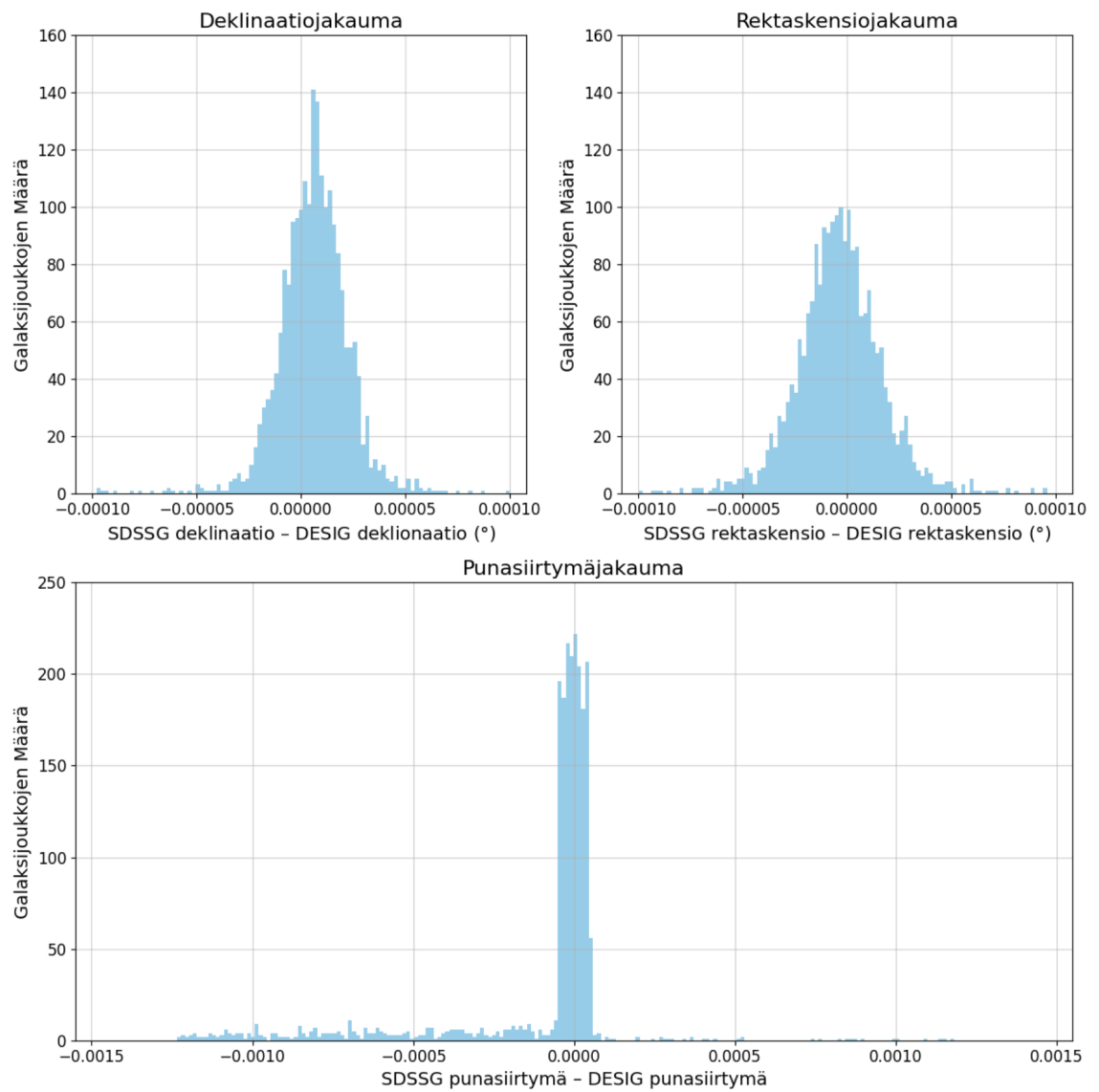
Kuva 15. SDSSG:n ja DESIG:n rajatun taivasalueen galaksijoukkojen massat rikkauksen (rikkaus  $> 5$ ) funktiona. Siniset katkoviivat ovat pienimmän neliösumman menetelmällä kuviin sijoitetut lineaariset funktiot. Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella.

## 5.2 Duplikaattien poistaminen

Aikaisemmassa kappaleessa saadusta 3 723 potentiaalisesta samasta galaksijoukosta osa oli niin sanottuja duplikaatteja. Näissä tilanteissa DESIG:n galaksijoukolle löytyi useampi SDSSG:n galaksijoukko. Toisin sanoen, DESIG:n kooltaan suuremman galaksijoukon sisältä löytyi useampi pienempi SDSSG:n galaksijoukko. Tämä johtui edellisessä kappaleesta käytetystä hakualgoritmista. Tästä on kuvassa 16 esimerkkinä DESIG:n galaksijoukko tunnisteella 1263422, jolle esiintyy neljä duplikaattia SDSSG:stä tunnisteilla 487, 674, 4774 ja 12099. Tämän tilanteen päädyin ratkaisemaan kahdella vaiheella. Ensimmäisenä lisäsin deklinaatioille ja rektaskensiolle 0.0001 deg absoluuttiset virherajat. Nämä rajat lähestyvät alkuperäisten aineistojen astrometristä virherajaa, jolloin saatujen galaksijoukkoparien pitäisi olla oikeita. DESIG:n astrometrinen virheraja on huonoimmillaan noin 30 mas:in (milliarkkisekunti) eli noin 0.00001 deg luokkaa (Dey et al., 2019) ja SDSSG:n noin 75 mas:in eli 0.00002 deg luokkaa (Pier et al., 2003). Kun nämä rajat lisättiin, saatiin kuva 17, jossa on 2 116 osumaa ilman duplikaatteja, joista jokaisella on spektroskooppinen BCG-kohde. Toisena laskin SDSSG:n jäljellä olevien galaksijoukkojen etäisyydet toistensa kanssa. Tämän jälkeen poistin kaikki potentiaaliset samat galaksijoukot, joiden SDSSG:n galaksijoukkojen välinen etäisyys toistensa kanssa oli alle 3 Mpc. Tämä arvo on reilusti suurempi kuin kuvan 11 vasemmanpuoleisessa kuvassa olevat DESIG:n säteet, joten se varmistaa hyvin, että DESIG:n galaksijoukkojen sisällä ei voi esiintyä useampia SDSSG:n galaksijoukkoja. Tämän rajauksen jälkeen potentiaalisia samoja galaksijoukkoja aineistoon jäi 2 096.

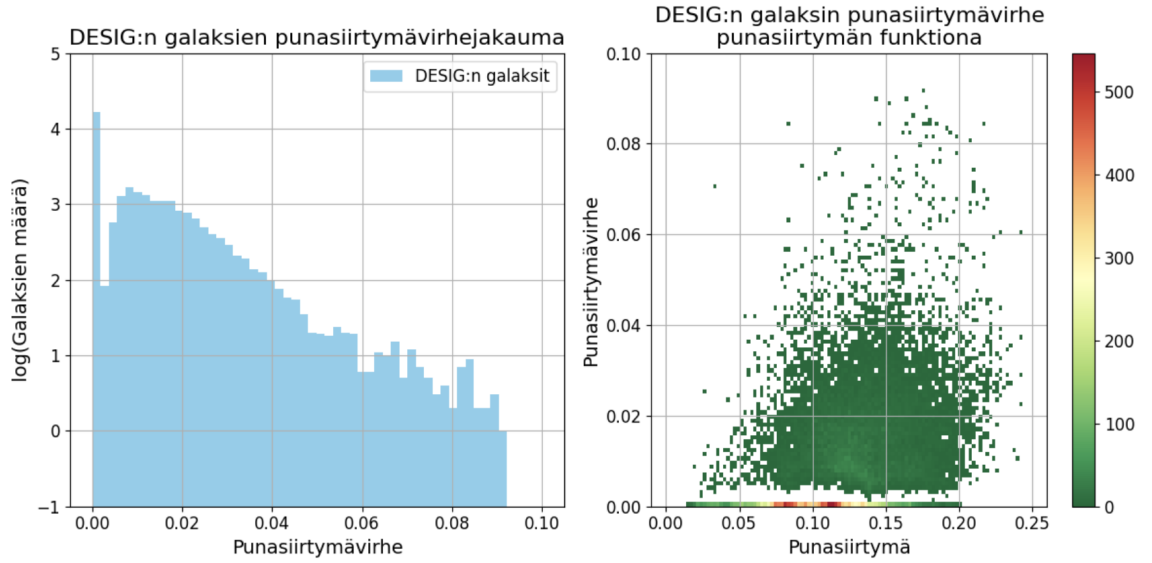


Kuva 16. Esimerkkigalaksijoukko DESIG:stä tunnisteella 1263422, jolle esiintyy neljä mahdollista samaa galaksijoukkoa eli duplikaattia SDSSG:ssä, joiden tunnisteet ovat 487, 674, 4774 ja 12099. Kuvissa on vertailtuna näiden galaksijoukkojen punasiirtymät, deklinaatiot ja rektaskensiot.

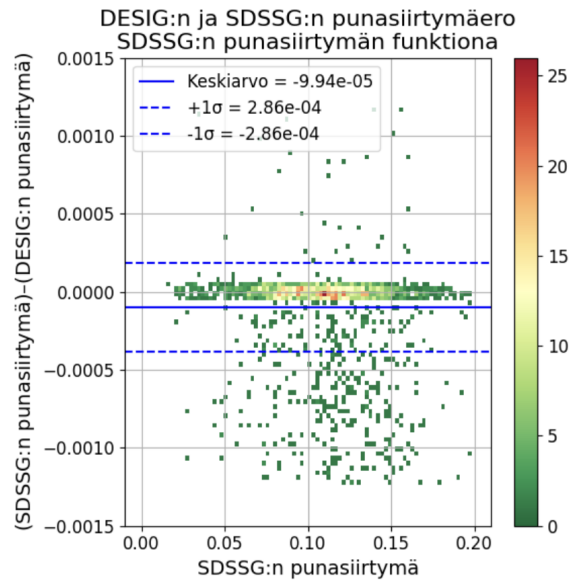


Kuva 17. Deklinaation, rektaskensioon ja punasiirtymän jakaumat duplikaattien poiston jälkeen.

Kuten kuvasta 17 nähdään, punasiirtymät osumien välillä on määritetty tarkasti. Tämä on odotettavissa oleva tulos, sillä kaikilla fotometrisesti havaituilla DESIG:n galaksijoukoilla on spektroskooppinen punasiirtymä tämän tutkimuksen tutkimusalueella. DESIG:n punasiirtymätarkkuus on pääosin kuitenkin huono. Tämä johtuu galaksijoukkoihin valittujen galaksien fotometrinen punasiirtymien suurista virheistä, jotka on esitetty kuvassa 18. Galaksit, joiden punasiirtymävirhe  $z_{err} = 0$  kuvassa 18, ovat DESIG:n BCG-kohteita. Merkittävä tulos kuvassa 18 on DESIG:n galaksien absoluuttisten punasiirtymävirheiden suuruusluokka. Se on jopa noin 100 – 1 000 suurempi kuin mitä punasiirtymäerot ovat kuvassa 19 eli DESIG:n galaksien punasiirtymät ovat hyvin epävarmoja. Kuvassa 19 on esitetty potentiaalisesti samojen galaksijoukkojen punasiirtymien erot punasiirtymän funktiona DESIG:n ja SDSSG:n aineiston välillä. Kuvassa 19 punasiirtymäerot ovat jakautuneet hyvin pienelle alueelle suhteellisen tasaisesti BCG-kohteiden tarkkojen spektroskooppisten punasiirtymien vuoksi. Näiden ansiosta punasiirtymän virherajan muuttaminen ei vaikuta merkittävästi galaksijoukkojen määrään. Jos BCG-kohteilla olisi vain fotometrinen punasiirtymä, punasiirtymän virheraja vaikuttaisi merkittävästi galaksijoukkojen määrään. Kuvaan 19 on myös merkitty DESIG:n punasiirtymäeron keskiarvo ja sen ympärille  $1\sigma$ :n keskihajonta. Näitä katsomalla voidaan havaita, että punasiirtymäeron hajonta on pieni, ja se on todennäköisimmin negatiivinen (näky myös kuvassa 17). Tämä tarkoittaa, että DESIG arvioi galaksijoukon olevan todennäköisemmin kauempana kuin se todellisuudessa on. Kaikkiaan 857 DESIG:n galaksijoukkoa saa kuvassa 19 positiivisen arvon ja 1 239 negatiivisen. Näistä arvoista 29 on positiivisen  $1\sigma$ :n ulkopuolella ja 251 negatiivisen  $1\sigma$ :n ulkopuolella.



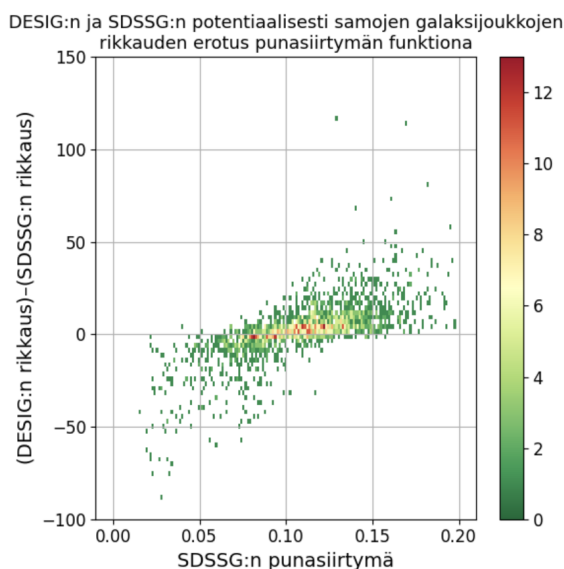
Kuva 18. DESIG:n aineiston 2 096 galaksijoukon galaksien absoluuttiset punasiirtymävirheet jakaumana (vasen) ja DESIG:n punasiirtymän funktiona (oikea). Galaksit, joiden  $z_{err} = 0$ , ovat BCG-kohteita. Väri kertoo galaksien määrän kyseisellä alueella.



Kuva 19. Potentiaalisesti saman 2 096 galaksijoukon DESIG:n ja SDSSG:n punasiirtymäero SDSSG:n punasiirtymän funktiona. Sininen viiva esittää DESIG:n punasiirtymäeron keskiarvon, ja siniset katkoviivat esittävät  $1\sigma$ :n keskihajonnan keskiarvon ympärillä. Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella.

### 5.3 DESIG:n ja SDSSG:n lopullinen aineisto

Kun verrataan aiemmin mainittuja 2 096 potentiaalisesti samaa galaksijoukkoa, havaitaan, että punasiirtymillä  $z > 0.1$  suureen osaan DESIG:n galaksijoukoista kuuluu vähemmän galakseja kuin SDSSG:ssä. Tämä näkyy kuvassa 20. Jakauman epäsymmetrisyys johtuu aiemmin mainituista (kts. kappaleet 3.2 ja 3.4) aineistoissa käytetyistä magnitudi- ja massarajauksista, jotka on helpointa havaita kuvista 10 ja 13. Näiden rajausten vuoksi himmeät galaksit puuttuvat DESIG:stä pieniltä punasiirtymiltä ja SDSSG:stä suurilta punasiirtymiltä. Lopullinen aineisto sisältää siis 2 096 samaa galaksijoukkoa, joita kutsun tästä eteenpäin galaksijoukkopareiksi.



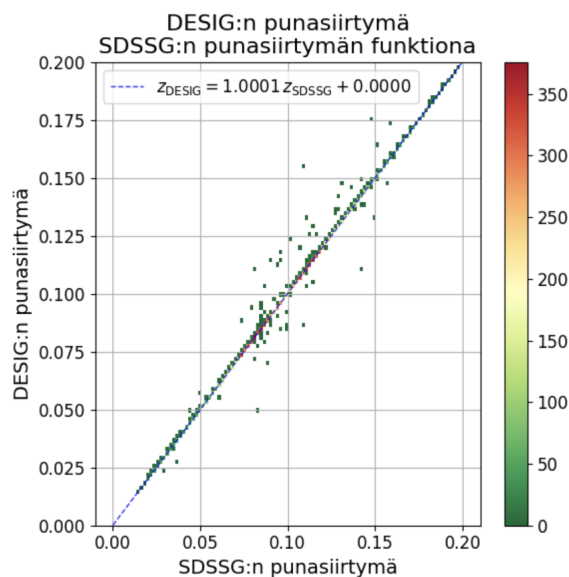
Kuva 20. Potentiaalisesti samojen 2 096 galaksijoukon vertailu SDSSG:n ja DESIG:n välillä näiden rikkauksien erotuksena punasiirtymän funktiona. Väri kertoo galaksijoukkojen määrän kyseisellä alueella.

### 5.4 Galaksijoukkoparien samojen galaksien kattavuusanalyysi ja magnitudivertailu

Teen tässä kappaleessa kattavuusanalyysin ja magnitudivertailun galaksijoukkoparien samoille galakseille, joiden tarkoitus on varmistaa, että tutkin samoja galaksijoukkoja ja galakseja eri aineistoista. Kattavuusanalyysin suoritus galaksijoukko-

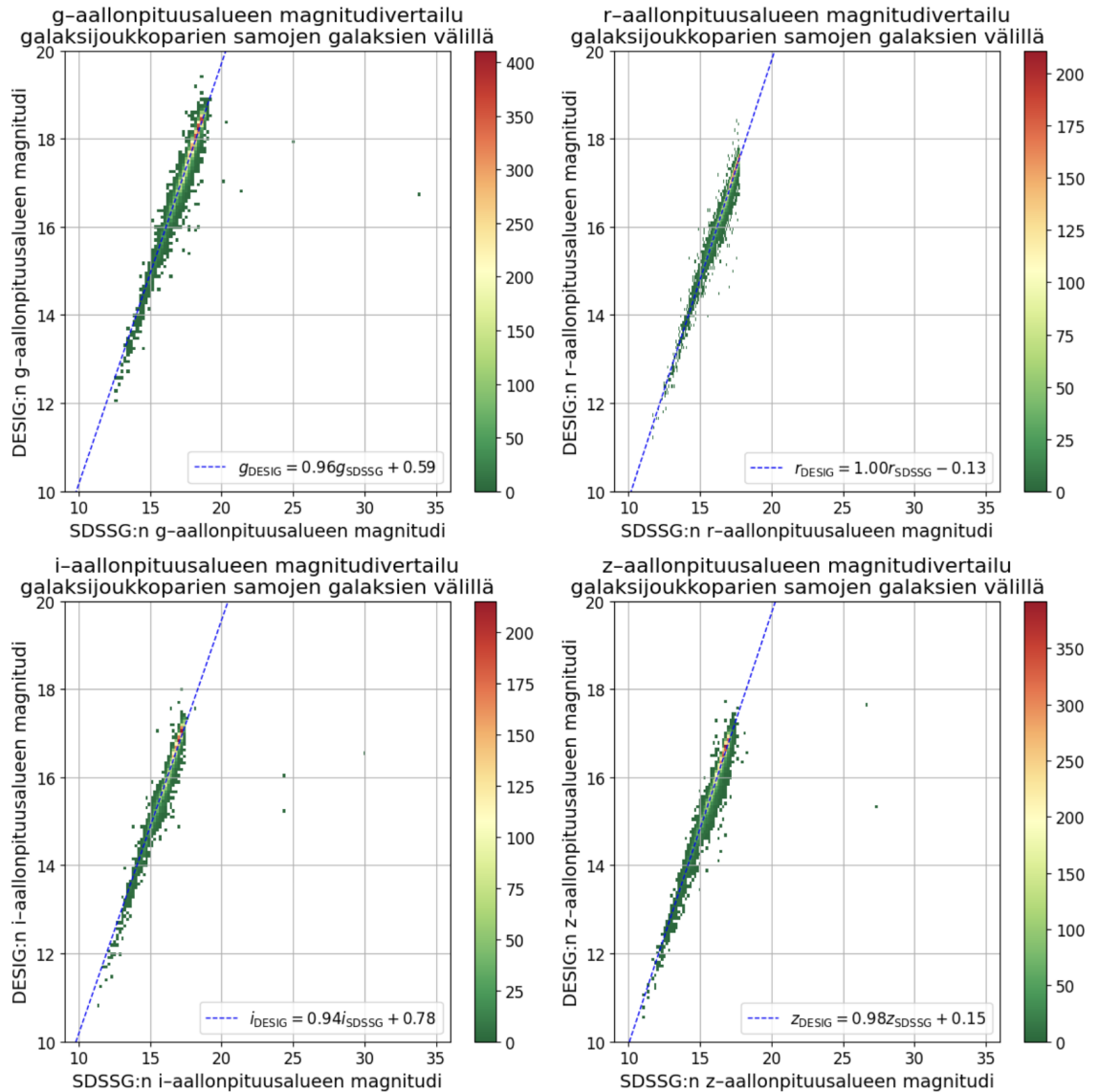
parien samojen galaksien välillä oli helppo toteuttaa lähes samoilla perusteilla kuin kappaleessa 5.2 lisäämällä absoluuttinen virheraja sekä deklinaatiolle että rektaskensiolle. Deklinaation ja rektaskension absoluuttiseksi virherajaksi valitsin 0.00005 deg, joka on hieman yli alkuperäisten aineistojen aikaisemmin mainittujen astrometristen virherajojen. Tällä virherajalla samoja galakseja galaksijoukkopareista saadaan 13 421. Jos tätä virherajaa kiristetään vielä tästä, löytyy kohteita merkittävästi vähemmän, sillä lähestytään instrumenttien astrometristä virherajaa. Tällöin myöskään rajan löyhentämisestä ei ole hyötyä, koska mennään niin kauas astrometrisestä virherajasta, että virheellisiä havaintoja alkaa esiintyä enemmän. Absoluuttisella virherajalla 0.00005 deg saadaan suuri otos ilman, että samoissa galakseissa esiintyy vääriä osumia merkittävästi.

Kuvassa 21 on esitetty saatujen samojen 13 421 galaksin punasiirtymä, ja niihin sijoitettu lineaarinen funktio pienimmän neliösumman menetelmällä. Kuten kuvasta 21 nähdään, samat galaksit asettuvat hyvin lineaarisesti tutkimusten välillä lukuun ottamatta muutamia poikkeamia, joiden punasiirtymäerot ovat  $z \sim 0.02$  kokoluokkaa. Nämä poikkeamat ovat todennäköisesti virheellisesti havaittuja samoja galakseja, mutta onneksi niiden vaikutus ei ole merkittävä. Tämä voidaan myös varmentaa kuvaan 21 asetetusta lineaarisesta funktiosta, joka antaa lähes identiteettifunktiota vastaavia tuloksia. Saadut tulokset ovat selitettävissä sillä, että saaduista 13 421 galaksista 13 333 galaksilla on spektroskooppinen punasiirtymä DESIG:n aineistossa. Tähän vahvaan lineaarisuuteen pohjautuen päätin olla rajaamatta samojen galaksien absoluuttista punasiirtymäeroa, sillä mielestäni se ei enää pysty parantamaan kyseisen aineiston laatua merkittäväällä tavalla.



Kuva 21. DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparien samojen 13 421 galaksin punasiirtymät toistensa funktiona. Sininen katkoviiva on pienimmän neliösumman menetelmällä kuvaan sijoitettu lineaarinen funktio. Väri kertoo galaksien määrän kyseisellä alueella.

Galaksit DESIG:n ja SDSSG:n aineistossa sisältävät hyvin rajallisesti suoraan vertailukelpoista informaatiota toistensa kanssa, minkä vuoksi voin verrata vain magnitudreja eri aallonpituusalueilla tutkimusten välillä. Nämä magnitudit ovat esitetty kuvassa 22 niiden pienimmän neliösumman menetelmän avulla sijoitettujen lineaaristen funktioiden kanssa. Kuten kuvan 22 lineaarisista funktioista nähdään, g-, r-, i- ja z-aallonpituusalueet ovat hyvin samanlaiset molemmissa aineistoissa. Aineistoissa esiintyy muutamia merkittäviä poikkeamia g-, i- ja z-aallonpituusalueilla. Oletettavasti tämä johtuu siitä, että galaksit on luokiteltu virheellisesti samaksi galaksiksi DESIG:n ja SDSSG:n aineistojen välillä.

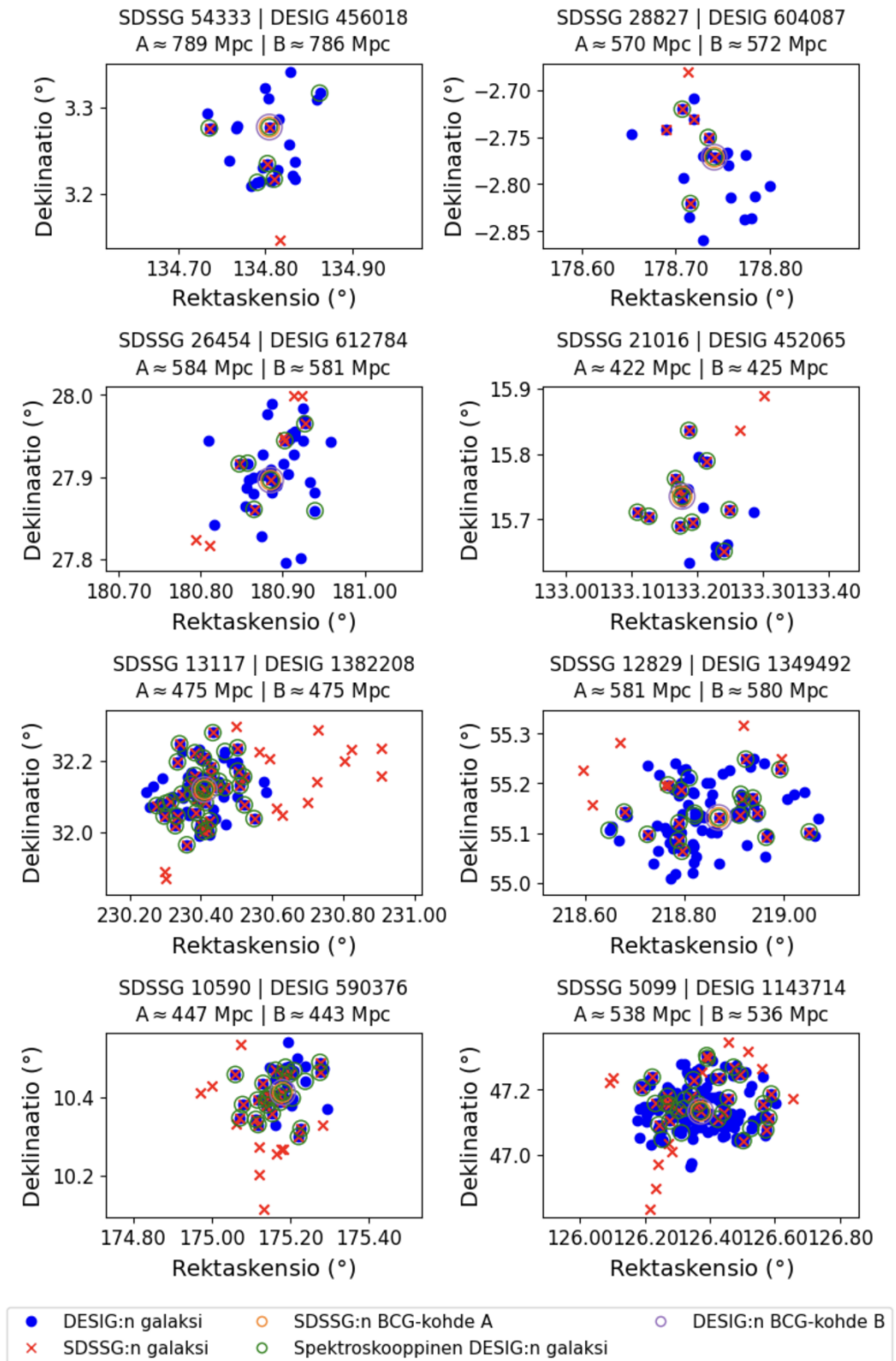


Kuva 22. DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparien samojen 13 421 galaksin DESIG:n griz-aallonpituusalueiden magnitudit SDSSG:n griz-aallonpituusalueiden magnitudien funktiona. Kuvasta on poistettu ne kohteet i-aallonpituusalueelta, joille ei ollut olemassa tulosta tältä aallonpituusalueelta DESIG:ssä. Siniset katkoviivat ovat pienimmän neliösumman menetelmällä kuviin sijoitetut lineaariset funktiot. Väri kertoo galaksien määrän kyseisellä alueella.

Kaiken kaikkiaan sanoisin, että DESIG antaa tarkkoja tuloksia SDSSG:hen verrattuna. Magnitudivertailu varmisti, että tutkin samoja galaksijoukkoja ja galakseja. Samat galaksit, jotka esiintyvät sekä DESIG:ssä että SDSSG:ssä, viittaavat siihen, että DESIG:n tarkkuus on riittävän hyvä, jotta aineistoja voidaan vertailla.

## 5.5 Galaksijoukkoparien ominaisuudet

Tässä kappaleessa tutkitaan löytämiäni galaksijoukkopareja ja niiden ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia ovat sijainti, rikkaus, säde ja massa. Vertailen niiden ominaisuuksia keskenään ja tutkin ovatko nämä muuttuneet alkuperäisiin galaksijoukkoaineistoihin verrattuna. Löytämästäni 2 096 galaksijoukkoparin galaksijoukosta on kuvassa 23 esitetty kahdeksan esimerkkiä, joista nähdään, että vaikka aineistojen välillä on eroja, samat galaksit löytyvät todella hyvin. Varsinkin BCG-kohteet löytyvät hyvin tarkasti. Niiden punasiirtymät kuitenkin sisältävät muutaman megaparsekin suuruisia virheitä, jotka vastaavat suunnilleen galaksijoukon halkaisijaa, eli nekin ovat merkittäviä. DESIG:n galaksijoukkoparien galakseista noin 53 %:lla (16 445 / 31 095) on spektroskooppinen punasiirtymä. Kuvasta 23 nähdään myös hyvin, että SDSSG:n galaksit eivät aina painotu samalle avaruuden alueelle kuin DESIG:n galaksit, vaikka galaksijoukoilla olisi sama BCG-kohde hyvin tarkasti määritettynä. Tämä ilmiö on osasy s siihen, miksi galaksijoukkoparien ominaisuudet eroavat tässä kappaleessa niin merkittävästi toisistaan. Esimerkiksi SDSSG:n dynaaminen massa huomioi myös havaitsemattomien kohteiden massan. Se ei kuitenkaan pysty huomioimaan massaa, joka on systeemin ulkopuolella. Kuva 23 on hyvä osoitus siitä, kuinka erilaisilla galaksijoukkojen etsimismenetelmillä voidaan saada hyvin vaihtelevia tuloksia galaksijoukoille samalla taivasalueella olevista galakseista.

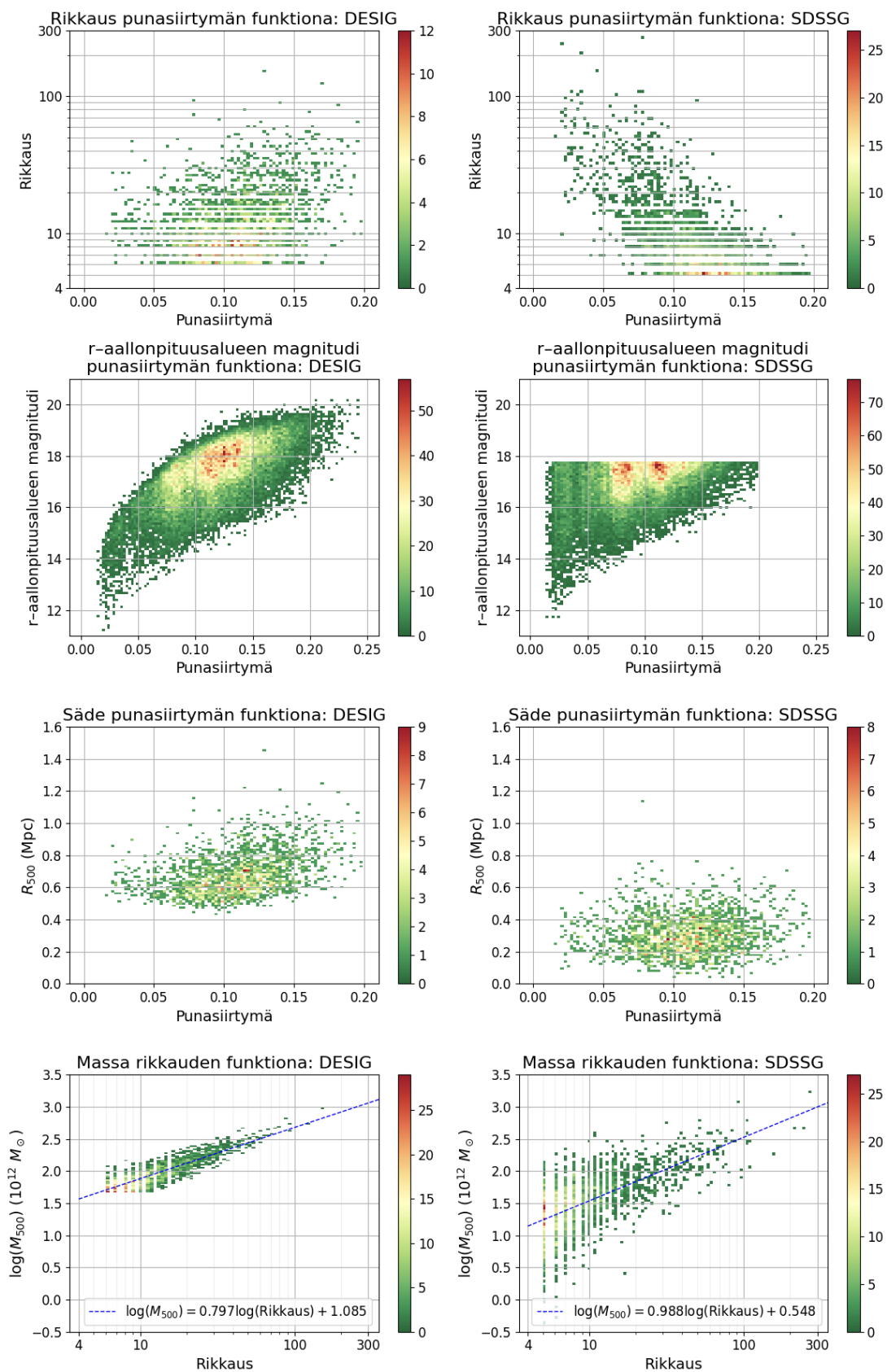


Kuva 23. Kahdeksan satunnaista esimerkkigalaksijoukkoparia DESIG:stä ja SDSSG:stä. Kuvissa on esitetty deklinaatio rektaskension funktiona. Siniset pallot ovat osa DESIG:n aineistoa ja punaiset rastit SDSSG:n aineistoa. Vihreät ympyrät näyttävät spektroskooppisen punasiirtymän DESIG:n galaksit, oranssit ympyrät SDSSG:n BCG-kohteet (A) ja violetit ympyrät DESIG:n BCG-kohteet (B). Kuvien yläpuolella on esitetty galaksijoukkojen tunnisteet DESIG:n ja SDSSG:n aineistoissa ja ympyröiden A ja B etäisyydet mukana liikkuvassa koordinaatistossa DESIG:n kosmologialla.

Galaksijoukot asettuvat lukumäärällisesti hyvin lähelle toisiaan eri punasiirtymillä niin kuin pitäisi galaksijoukkojen ollessa pareja tutkimusten välillä. Kolmogorov–Smirnov testin (K-S-testi)  $p$ -arvo galaksijoukkojen jakaumien välillä on 1.000 ja  $D$ -arvo on 0.005, joten aineistosta ei ole näyttöä jakaumaerolle. Galaksit galaksijoukoissa asettuvat myös ennustettavasti lukumäärällisesti eri punasiirtymillä. DESIG:ssä on vähemmän galakseja pienillä punasiirtymillä johtuen sen fotometrisestä menetelmästä, joka ei pysty erottamaan punasiirtymää pienen etäisyyden kohteille luotettavasti. Tämän vuoksi sen kumulatiivinen käyrä alkaa nousemaan hitaammin kuin SDSSG:ssä. Vastaavasti DESIG:n kumulatiivinen käyrä laskee hitaammin korkeammilla punasiirtymillä johtuen siitä, että DESIG:n punasiirtymätarkkuus on epätarkka mahdollistaen galaksien löytymisen suuremmilta punasiirtymiltä kuin  $z = 0.2$ . Tämä nähdään myös kuvassa 18. SDSSG:n tutkimusalue loppuu punasiirtymällä  $z = 0.2$  ja sen takia sen kumulatiivinen käyrä laskee nopeasti lähellä tätä punasiirtymää.

Kappaleissa 4.1 ja 4.2 esiteltiin SDSSG:n ja DESIG:n galaksijoukkojen ominaisuuksia ennen galaksijoukkoparien etsimistä. Kuvissa 9 – 13 esitettiin galaksijoukkojen rikkaudet, magnitudit ja säteet punasiirtymän ja massat rikkauden funktiona. Vastaavat kuvat on nyt esitetty kuvassa 24, mutta nyt löydetyille galaksijoukkopareille. Kuvia vertaamalla nähdään, että DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparit ja niiden galaksit ovat säilyttäneet ominaisuutensa verrattuna alkuperäiseen aineistoon ja massojen ja rikkauksien väliset korrelaatiot ovat lähestyneet toisiaan verrattuna kuvaan 15. Merkittävin ero on havaittavissa kuvan 24 magnitudikuvaajissa. Johtuen DESIG:n galaksijoukkojen galaksien punasiirtymien suurista virheistä, osa kaukaisimpien galaksijoukkojen galakseista ylittää punasiirtymärajan  $z = 0.2$ . SDSSG:ssä esiintyy selvästi pienemmän rikkauden galaksijoukkoja punasiirtymäalueella  $0.15 < z < 0.2$ . Koko punasiirtymäalueella  $z < 0.2$  säteet ovat pienempiä SDSSG:llä kuin DESIG:llä. Tämä näyttäisi johtuvan siitä, että DESIG:n suuret

punasiirtymävirheet vääristävät galaksijoukkojen säteitä. Myös magnitudikuvaajista voidaan nähdä, että DESIG:n himmeät galaksit voivat olla punasiirtymärajan  $z = 0.2$  ulkopuolella. Kirkkaimmat galaksit seuraavat suunnilleen samaa punasiirtymärelaatiota. Saman rikkauden galaksijoukoille DESIG:n massat ovat yleisesti suurempia ja niillä on pienempi hajonta verrattuna SDSSG:n galaksijoukkoihin. Myös massa-rikkausrelaatiot ovat lähentyneet toisiaan duplikaattien poiston tuloksena. Tämä vähensi merkittävästi varsinkin pienen massan ja rikkauden galaksijoukkoja SDSSG:stä. Saatujen tuloksien perusteella voidaan sanoa, että kattavuusanalyysi on onnistunut ja aineistot ovat säilyttäneet alkuperäiset ominaisuutensa hyvin. Määrä on niin laaja, että saatuja 2 096 galaksijoukkoparia pystytään hyödyntämään jatkotutkimuksissa.



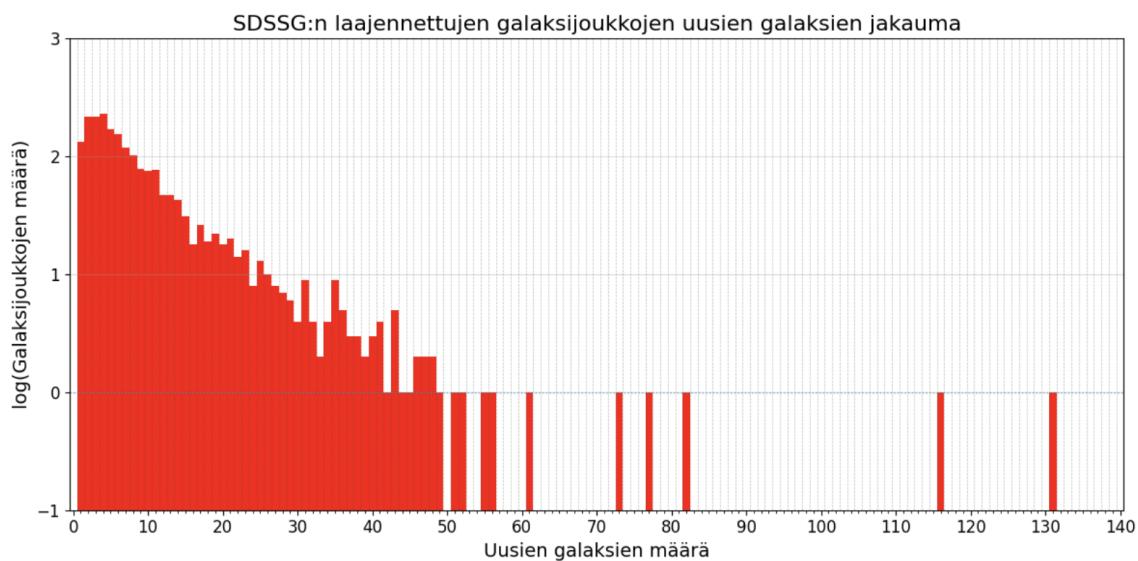
Kuva 24. DESIG:n ja SDSSG:n 2 096 galaksijoukkoparin rikkaus, galaksien r-aallonpituusalueen magnitudit ja säde punasiirtymän funktiona sekä massa rikkauden funktiona. Sininen katkoviiva on pienimmän neliösumman menetelmällä kuvaan sijoitettu lineaarinen funktio. Väri kertoo galaksijoukkojen tai galaksien määrän kyseisellä alueella.

## 6 Galaksijoukkoparien analyysi

Tässä kappaleessa analysoin galaksijoukkoparien rikkauksia, massoja ja säteitä. Ensin muodostan saaduista galaksijoukkopareista yhdistettyjä galaksijoukkoja, joiden punasiirtymävirheitä arvioin DESIG:n avulla. Lopuksi tutkin massojen ja säteiden eroja rikkauden avulla, sillä aineistojen välillä on merkittävästi eroa. Koska aineistojen väliset ominaisuudet eroavat merkittävästi, yritän löytää sopivan luotettavuusrajan, jonka yläpuolella galaksijoukkoparien ominaisuudet olisivat vertailukelpoisia.

### 6.1 Galaksijoukkoparien yhdistäminen ja punasiirtymävirheen vaikutus

Aikaisemmissa kappaleissa DESIG:n galaksijoukoista etsittiin SDSSG:n vastaavat galaksijoukot ja muodostettiin näistä galaksijoukkopareja. Tässä kappaleessa nämä galaksijoukkoparit yhdistetään yhdeksi galaksijoukoksi tavoitteena laajentaa SDSSG:n galaksijoukkoja tuomalla uusia galakseja DESIG:stä SDSSG:hen. Tätä tarkoitusta varten poistin samat galaksit SDSSG:n ja DESIG:n galaksijoukkopareista. Käytin tähän kappaleessa 5.4 löytämiäni samoja galakseja. Jokaisen galaksijoukon kohdalla valitsen galakseista aina ensisijaisesti SDSSG:n galaksin. Näin ollen DESIG:n 31 095 galaksista jäljelle jää 17 674 galaksia, kun SDSSG:n aineistosta valitaan kaikki 27 029 galaksia laajennettuihin SDSSG:n galaksijoukkoihin. Kun nämä yhdistetään, saadaan 44 703 galaksia laajennettuihin SDSSG:n galaksijoukkoihin, mikä on noin 1.7 kertaa enemmän verrattuna alkuperäiseen galaksien määrään. Kuvasta 25 nähdään tämä uusien galaksien määrä laajennetuissa galaksijoukoissa. Yleisin lisäys oli neljä galaksia galaksijoukkoa kohden, kun taas muutamassa harvinaisemmassa tapauksessa määrä saattoi kasvaa jopa yli 70 galaksilla.



Kuva 25. SDSSG:n laajennettujen galaksijoukkojen uusien galaksien määrä jakamana.

DESIG:n punasiirtymävirheet ovat galaksien kokoon verrattuna valtavia, minkä vuoksi niiden vaikutusta aineistoon on arvioitava tarkasti. Taulukossa II on esitetty SDSSG:n laajennettujen galaksijoukkojen galaksien määrä eri DESIG:n absoluuttisilla punasiirtymävirheillä. Kuten taulukosta II nähdään, sallitun absoluuttisen punasiirtymävirheen nostaminen vaikuttaa merkittävästi aineiston kokoon aina punasiirtymävirheeseen  $z_{\text{err}} = 0.04 \approx 170$  Mpc asti, jolloin lähes 99 % galakseista sijoittuu tälle välille. Kun  $z_{\text{err}} \lesssim 0.02 \approx 85$  Mpc laajennetun SDSSG:n aineiston galakseista saadaan käytettäväksi noin 90 %. Vertailun vuoksi: tyypillinen galaksin halkaisija on alle 0.1 Mpc, eli noin 850 kertaa pienempi. Näin ollen virheiden vaikutus aineiston laatuun voi olla merkittävä, ja jos aineistoa haluaisi käyttää jatkotutkimuksissa, pitäisi nämä virheet huomioida huolellisesti.

Absoluuttinen punasiirtymävirhe	Galaksien määrä	Suhteellinen osuus [%]
0.01	34 380	76.91
0.02	40 477	90.55
0.03	43 296	96.85
0.04	44 226	98.93
0.05	44 495	99.53
0.06	44 597	99.76
0.07	44 646	99.87
0.08	44 678	99.94
0.09	44 701	100.00
0.10	44 703	100.00

Taulukko II. SDSSG:n laajennettujen galaksijoukkojen galaksien määrä ja niiden suhteellinen osuus eri DESIG:n absoluuttisilla punasiirtymävirheillä.

## 6.2 Massan ja säteen luotettavuusrajojen arviointi rikkauden avulla

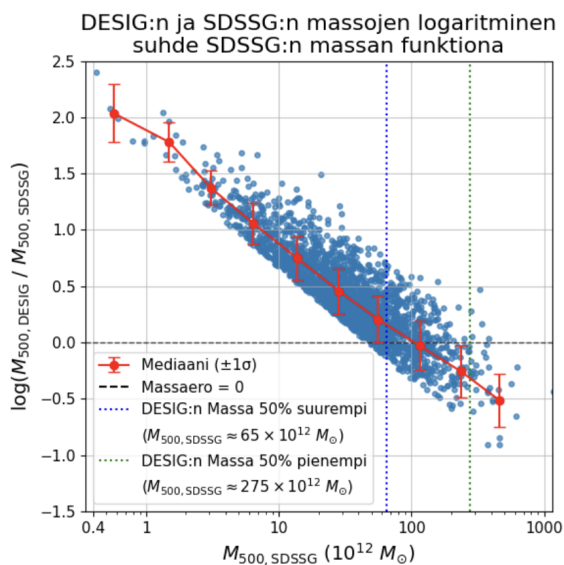
Aiemmissä kappaleissa nähtiin, että DESIG:n ja SDSSG:n aineistot eroavat toisistaan merkittävästi sekä laadullisesti että kooltaan. Tässä kappaleessa määritän DESIG:n ja SDSSG:n aineistoille massaan, säteeseen ja rikkauteen perustuvat rajat, joiden sisällä aineistot ovat vertailukelpoisia tietyllä luotettavuudella. Käytän työssäni luotettavuuden rajana massojen sekä säteiden suhteelle aluetta  $0.5 - 1.5$ . Tämä tarkoittaa, että galaksijoukkopareissa DESIG:n ominaisuudet saavat poiketa SDSSG:n ominaisuuksista enintään  $0.5 - 1.5$  -kertaisesti. Logaritmisella asteikolla tämä tarkoittaa noin aluetta  $-0.30 - 0.18$ . Valitsin nämä rajat, koska niitä käyttämällä galaksijoukkoparien määrä pysyy suhteellisen suurena ilman, että aineistojen ominaisuudet eroavat merkittävästi toisistaan. Käytän luotettavuuden rajojen

määrittämiseen DESIG:n ja SDSSG:n massoja ja säteitä, ja oletan, että SDSSG:n aineiston on oltava tarkempi kaikissa tilanteissa. Näin ei todellisuudessa ole, vaan myös SDSSG:n aineisto kärsii tulosten suuresta hajonnasta erityisesti pienten galaksijoukkojen tapauksessa, jossa galaksien lukumäärä ei riitä esim. dynaamisen massan luotettavaan määrittämiseen (Becker et al., 2007; Tempel et al., 2017). Dynaaminen massa on luotettavampi rikkauden kasvaessa johtuen menetelmässä käytettävästä nopeusdispersiosta, jonka tarkkuus paranee galaksijoukon rikkauden kasvaessa.

### 6.2.1 Massan analyysi

Dynaaminen massa ei voi siis saada SDSSG:ssä luotettavia arvoja pienen rikkauden galaksijoukoille. DESIG kärsii myös säteiden ja massojen skaalausrelaatioiden sovituksista, jotka vaikuttavat varsinkin sen pienen rikkauden galaksijoukkojen massoihin. Tämä käy ilmi Wen & Han (2021) tutkimuksen tuloksista, erityisesti kuvista 6 ja 7. Niistä nähdään, että massan skaalausrelaatiot painottuvat selkeästi suurimassaisiin galaksijoukkoihin ja tämä johtaa pienimassaisten galaksijoukkojen massojen kasvuun. Jos skaalausrelaationa oltaisiin käytetty toisen asteen yhtälöä lineaarisen sovituksen sijaan, olisi tältä voitu todennäköisesti välttyä ainakin osittain. Kuvassa 26 on esitetty massasuhdejakauma ja sen mediaanikäyrä (punainen) SDSSG:n massan funktiona. Mediaanikäyrää tarkastelemalla nähdään, kuinka massasuhdejakauman mediaaniarvo lähestyy yhtä aina noin massaansa  $110 \times 10^{12} M_{\odot}$  asti eli  $\log\left(\frac{M_{500, \text{DESIG}}}{M_{500, \text{SDSSG}}}\right)$  lähestyy nollaa, jonka jälkeen massojen ero alkaa taas kasvamaan. Myös tulosten hajonta pysyy lähes samana koko käsiteltävällä massa-alueella. Se kasvaa hieman suuremmilla massoilla, ja vain ääripäissä se nousee keskitasoa korkeammaksi, mikä johtuu galaksijoukkoparien vähäisestä määrästä näissä ääripäissä. Massavälillä  $65 \times 10^{12} M_{\odot} \lesssim M_{500, \text{SDSSG}} \lesssim 275 \times 10^{12} M_{\odot}$  galaksijoukkojen massat vastaavat parhaiten toisiaan massasuhdejakauman mediaaniarvon ollessa välillä 0.5 – 1.5. DESIG:tä ja SDSSG:tä pystyy siis vertailemaan tietyllä massavälillä

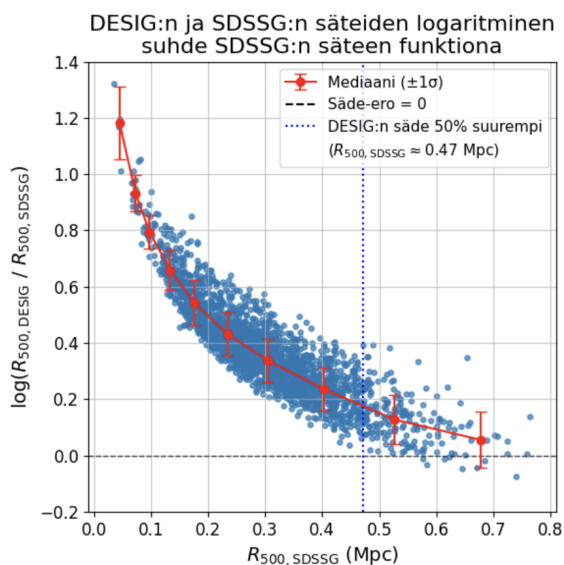
osittain, mutta niiden vertaileminen vaatii tarkkoja virherajamäärytyksiä, jotta virheiltä vältytään. Koska SDSSG:n massojen laatu on hyvä ja hajonta pieni suurilla rikkauksilla eli suurilla massoilla (Tempel et al., 2017) ja DESIG:n massojen suuruudet eroavat sielläkin vielä merkittävästi SDSSG:stä, vaikuttaa siltä, että DESIG:n saamien massojen laatua on tarpeellista kyseenalaistaa. On myös oleellista miettiä, onko tieteellisesti luotettavaa hyödyntää DESIG:n massoja.



Kuva 26. DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparien (siniset pisteet) massojen logaritminen suhde SDSSG:n massan funktiona, johon on sovitettu mediaanikäyrä. Kuvassa on esitetty vihreällä ja sinisellä pisteviivalla rajat, joissa DESIG:n ja SDSSG:n massasuhdejakauman mediaani on välillä 0.5 – 1.5. Kuvasta on jätetty pois näkyviltä muutamia ääriarvoja saavia kohteita.

### 6.2.2 Säteen analyysi

Toisin kuin massat, SDSSG:n galaksijoukkojen säteet voidaan laskea tarkemmin, koska niiden arvot perustuvat täysin galaksijoukon galaksien koordinaatteihin projektiotasolla, jotka saadaan havainnoista hyvin suurella tarkkuudella. Arvoissa ei ole huomioitu projektion vaikutusta galaksijoukkojen säteeseen. DESIG:ssä taas käytetään skaalausrelaatioita säteiden määrittämiseen. Tästä johtuen säteissä esiintyy skaalausrelaatioiden tuoma epätarkkuus, joka on havaittavissa myös massoissa. Wen & Han (2021) tutkimuksessa DESIG:n säteiden skaalausrelaatio sopii huonosti suurimassaisille galaksijoukoille niiden suuren hajonnan vuoksi. Siksi pienimassaisten galaksijoukkojen säteet saavat suurempia arvoja kuin niiden pitäisi. Myös tässä, niin kuin massassa, jos skaalausrelaationa oltaisiin käytetty toisen asteen yhtälöä lineaarisen sovituksen sijaan, olisi tältä voitu todennäköisesti välttyä osittain. Kuvassa 27 on esitetty sädesuhdejakauma ja sen mediaanikäyrä SDSSG:n säteen funktiona. Mediaanikäyriä tarkastelemalla nähdään, kuinka sädesuhdejakauman mediaaniarvo lähestyy yhtä koko tutkittavalla välillä eli säteiden ero lähestyy nollaa. Myös tulosten hajonta pysyy lähes samana koko käsiteltävällä sädealueella. Se kasvaa hieman suuremmilla säteillä, ja vain hyvin pienillä säteillä se nousee keskitasoa merkittävästi korkeammaksi, mikä johtuu galaksijoukkoparien vähäisestä määrästä tässä ääripäässä. Sädettä  $R_{500, \text{SDSSG}} \approx 0.47$  Mpc suuremmilla arvoilla galaksijoukkojen säteet vastaavat parhaiten toisiaan sädesuhdejakauman mediaaniarvon ollessa välillä 0.5 – 1.5 ja alimmillaan säteet saavat lähes yhtä suuria arvoja. DESIG:n säteet ovat siis vertailukelpoisia suuremmilla säteillä. Sen sijaan pienemmän säteen galaksijoukkojen hyödyntämistä tieteellisessä jatkotutkimuksessa pitää miettiä tarkasti.

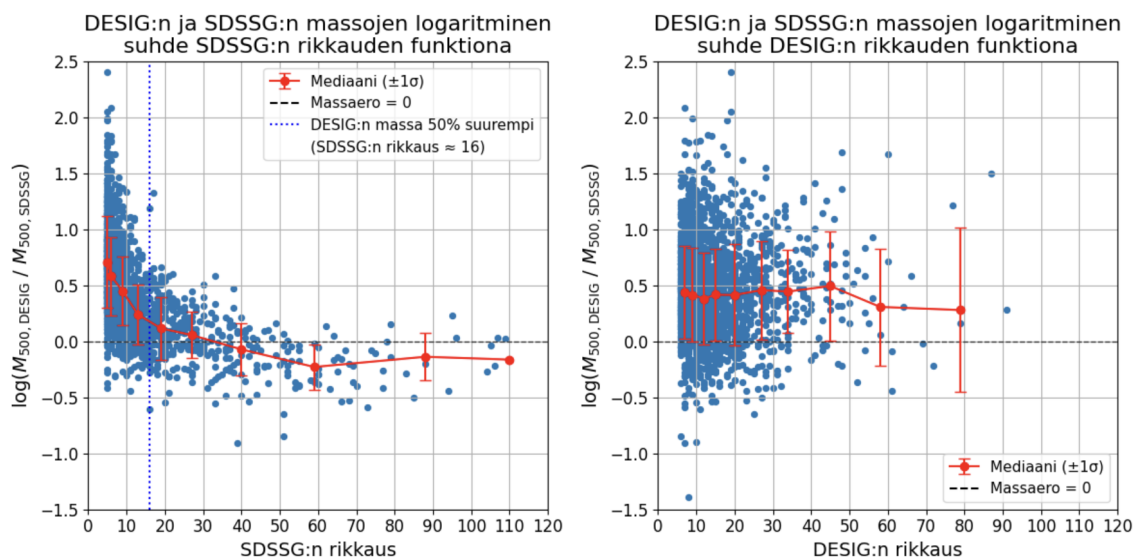


Kuva 27. DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparien (siniset pisteet) säteiden logaritminen suhde SDSSG:n säteen funktiona, johon on sovitettu mediaanikäyrä. Kuvassa on esitetty sinisellä pisteviivalla raja, jossa DESIG:n ja SDSSG:n sädesuhdejakauman mediaani on välillä 0.5 – 1.5. Kuvasta on jätetty pois näkyviltä muutamia ääriarvoja saavia kohteita.

### 6.2.3 Luotettavuusrajan määrittäminen

Koska galaksijoukkoparien massojen ja säteiden arvot eroavat aineistojen välillä merkittävästi, aineistojen vertaileminen on keskenään vaikeaa. Kun rikkautta verrataan DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparien massasuhdejakaumaan kuvassa 28, huomataan, että hajonta pienenee SDSSG:n rikkauden funktiona ja kasvaa DESIG:n rikkauden funktiona. Vain SDSSG:n rikkauden kasvaessa galaksijoukkojen massat lähenevät toisiaan (mediaaniarvo lähestyy nollaa logaritmisella asteikolla). Samaa ilmiötä ei havaita, jos massojen suhdetta verrataan DESIG:n rikkauteen. Tämä johtuu DESIG:n kaavan 12 riippuvuudesta punasiirtymään ja siinä käytetystä menetelmästä galaksijoukkojen massoille, jossa galaksijoukkojen massat lasketaan niissä olevien galaksien tähtimassojen avulla. Tästä johtuen rikkaudeltaan samojen galaksijoukkojen massat voivat siis erota merkittävästi, sillä saman rikkauden galaksijoukot voivat sisältää massaltaan täysin erilaisia galakseja ja punasiirtymän muuttami-

nen muuttaa myös näiden galaksijoukkojen massoja. Kuvassa 28 olevaa korrelaatiota käyttämällä, voidaan SDSSG:lle arvioida minimirikkaus, jolla SDSSG:n ja DESIG:n galaksijoukkojen massat vastaavat parhaiten toisiaan massasuhdejakauman mediaaniarvon ollessa välillä 0.5 – 1.5. Tämä raja saavutetaan SDSSG:n rikkauksella 16. Samanlaista sovitusta kokeilin myös säteelle sekä DESIG:n että SDSSG:n rikkauksella, mutta havaitsin, että DESIG:n galaksijoukkojen säteet ovat aina suurempia molempien aineistojen rikkauksilla ja sädesuhdejakauman mediaaniarvot eivät alita ylärajaa 1.5.



Kuva 28. DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoerien (siniset pisteet) massojen logaritminen suhde SDSSG:n ja DESIG:n galaksijoukon rikkauksen funktiona, johon on sovitettu mediaanikäyrä. Vasemmassa kuvassa on esitetty sinisellä pisteviivalla raja, jossa DESIG:n ja SDSSG:n massasuhdejakauma on välillä 0.5 – 1.5. Kuvista on jätetty pois muutamia ääriarvoja saavia kohteita.

Tuloksena voidaan siis sanoa, että DESIG ja SDSSG ovat osittain vertailukelpoisia, jos SDSSG:n galaksijoukon rikkaus on yli 16. Tällöin vältetään kaikkein epätarkimmilta SDSSG:n dynaamisilta massoilta ja lähestytään DESIG:n aineiston arvoja massan ja säteen suhteen. Tämä raja ei kuitenkaan pysty takaamaan aineistojen laatua kovin tarkasti, sillä massassa voi esiintyä yhä suuria virheitä mediaanivirheen ollessa 50 %. SDSSG:tä voi käyttää tieteellisissä tutkimuksissa suurella luo-

tettavuudella, jos siitä poistetaan pienet dynaamiset massat, joilla on suuri hajonta (Tempel et al., 2017). DESIG:n käyttö taas edellyttää tarkkuutta, ja virherajat on määritettävä huolellisesti, koska sen erot SDSSG:hen ovat merkittävät.

## 7 Yhteenveto ja tulokset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli verrata Wen & Han (2024) fotometrisesti (DESIG) ja Tempel et al. (2014) spektroskooppisesti (SDSSG) valittujen galaksijoukkojen ominaisuuksia ja niiden eroja. Tutkimuksen ensimmäisessä osassa esitellin aineistojen ominaisuudet ja kuinka DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoaineistot tehtiin. Jo tässä vaiheessa havaitsin, että DESIG:ssä on enemmän suuria galaksijoukkoja. Tämä johtuu fotometristen punasiirtymien epätarkkuudesta, jotka voivat olla useita kymmeniä megaparsekkeja.

Vertasin aineistoja visuaalisesti, ja havaitsin, että aineistot eroavat myös muilta osin merkittävästi toisistaan. Muun muassa DESIG:ssä minimirikkaus on kuusi, kun taas SDSSG:ssä se on kaksi. SDSSG:n magnitudiraja on  $m_r = 17.77$  ja DESIG:ssä vastaavaa selkeää magnitudirajaa ei ole. DESIG:n ja SDSSG:n havaintoeroista sekä galaksijoukkojen massojen ja säteiden laskumenetelmistä johtuen galaksijoukkojen massat ja säteet erosivat merkittävästi toisistaan.

Työssä tehdyn kattavuusanalyysin tarkoituksena oli löytää DESIG:n ja SDSSG:n aineistoista samat galaksijoukot ja vertailla niiden ominaisuuksia keskenään. Ensimmäisenä rajasin DESIG:n ja SDSSG:n aineistot samalle taivasalueelle, jolloin DESIG menetti noin 99 % kohteistaan. Tämä selittyi pääosin DESIG:n suuren punasiirtymän kohteiden pois jäämisellä. Tämän jälkeen laskin aineistoille niiden galaksijoukkojen karteesiset koordinaatit perustuen galaksijoukkojen kirkkaimpien galaksien (BCG) sijainteihin. Lopuksi hyväksyin alle 5 Mpc:n etäisyydellä toisistaan sijaitsevat galaksijoukot samoiksi galaksijoukoiksi. Tämän analyysin pohjalta tunnistin SDSSG:ssä ja DESIG:ssä 3 723 potentiaalisesti samaa galaksijoukkoa.

Kattavuusanalyysin viimeisessä vaiheessa poistettiin vielä ns. duplikaatit. Duplikaatit tarkoittavat tilannetta, jossa DESIG:n galaksijoukon sisällä on SDSSG:ssä oleva galaksijoukko, mutta jonka BCG-kohde ei ole sama kuin DESIG:n galaksijoukon. Tämän jälkeen lopulliseen aineistoon galaksijoukkopareja jäi 2 096. Tutkimalla

näiden galaksijoukkoparien punasiirtymiä havaitsin systemaattisen epäsymmetrian: vaikka osa DESIG:n galaksijoukoista sijoittuu SDSSG:tä kauemmas, valtaosa merkittävistä poikkeamista viittaa pienempiin etäisyyksiin. Lisäksi DESIG:n galaksien fotometriset punasiirtymät eivät ole kovin luotettavia, koska niiden punasiirtymävirheet ovat jopa 100 – 1 000 kertaa suurempia kuin SDSSG:ssä.

Galaksijoukkoparien kaikissa vertailukelpoisissa ominaisuuksissa (rikkaus, säde ja massa) oli merkittävästi eroja, vaikka niiden samojen galaksien magnitudijakumat vastasivat hyvin toisiaan. Käytin myös näitä samoja galakseja laajennettujen SDSSG:n galaksijoukkojen luonnissa, jossa toin SDSSG:n galaksijoukkoihin lisää galakseja DESIG:stä. Jos sama galaksi löytyi molemmista aineistoista, otin galaksin tiedot SDSSG:n aineistosta, koska luotin sen olevan tarkempi. Tämän tuloksena galaksijoukkoihin jäi 27 029 SDSSG:n galaksia ja 17 674 DESIG:n galaksia. Yleisin lisäys oli neljä galaksia galaksijoukkoa kohden. Tutkimalla uusien galaksien punasiirtymävirheitä, havaitsin, että vasta noin punasiirtymävirheellä  $z_{\text{err}} \lesssim 0.02 \approx 85$  Mpc laajennetun SDSSG:n aineiston galakseista saadaan käytettäväksi noin 90 %. Tämä tarkoittaa, että SDSSG:n laajennetuissa galaksijoukoissa on yli 4 000 galaksia, joiden punasiirtymävirhe on yli 850 kertaa suurempi kuin tyypillisen galaksijoukon halkaisija, joka on noin 0.1 Mpc.

Analyysi osoitti, että SDSSG ja DESIG poikkesivat merkittävästi toisistaan erityisesti pienillä massoilla ja säteillä. Tämä käy ilmi tutkimalla DESIG:n ja SDSSG:n galaksijoukkoparien massasuhdetta ja sädesuhdetta. Massasuhteesta havaitsin, että massat vastaavat parhaiten toisiaan, kun SDSSG:n massa on välillä  $65 \times 10^{12} M_{\odot} \lesssim M_{500, \text{SDSSG}} \lesssim 275 \times 10^{12} M_{\odot}$  ja, kun SDSSG:n rikkaus on yli 16. Sädesuhteesta taas havaitsin, että säteet vastaavat parhaiten toisiaan, kun SDSSG:n säde on yli  $R_{500, \text{SDSSG}} \approx 0.47$  Mpc.

Tässä tutkimuksessa etsittiin galaksijoukkoparit kahden eri tutkimuksen väliltä ja havaittiin, että fotometrisesti ja spektroskooppisesti valitut galaksikatalogit eroa-

vat merkittävästi toisistaan. Muun muassa galaksijoukkoparien massat olivat jopa noin 100 kertaa suurempia ja säteet jopa noin 10 kertaa suurempia DESIG:ssä kuin SDSSG:ssä. Kuitenkin galaksijoukkoparien samojen galaksien kirkkaudet olivat hyvin samanlaisia aineistojen välillä ja massat ja säteet lähestyivät toisiaan massan (massan tarkkuus alkoi huonontua uudestaan massaltaan suurimmilla galaksijoukoilla), säteen ja SDSSG:n rikkauden kasvaessa. Fotometriseen DESI:n aineistoon perustuvan DESIG galaksijoukkoaineiston käyttö galaksijoukkojen ominaisuuksien tutkimuksessa ja niistä tehtävissä päätelmissä edellyttää varovaista lähestymistapaa sekä aineiston rajoitteiden tunnistamista. Seuraavana vaiheena tälle tutkimukselle voisi olla DESIG:n spektroskooppisesti valittujen galaksijoukkojen tutkimus SDSSG:n kanssa, kun ne julkaistaan uudelle DESI:n spektroskooppiselle aineistolle. Sen avulla saataisiin hyvä arvio fotometrysten ja spektroskooppisten havaintojen eroista ja siitä, mihin niitä on soveliasta hyödyntää.

## Viitteet

- Aditya K., 2024, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 532, 3839
- Ahn C. P., et al., 2014, [The Astrophysical Journal Supplement Series](#), 211, 17
- Allen S. W., Evrard A. E., Mantz A. B., 2011, [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#), 49, 409
- Asorey J., Carrasco Kind M., Sevilla-Noarbe I., Brunner R. J., Thaler J., 2016, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 459, 1293
- Babyk I., Melnyk O., Elyiv A., 2012, [Advances in Astronomy and Space Physics](#), 2, 56
- Beck S. J., Henden A. A., Templeton M. R., 2014, [The AAVSO Guide to CCD Photometry](#). American Association of Variable Star Observers
- Becker M. R., et al., 2007, [The Astrophysical Journal](#), 669, 905
- Binney J., Tremaine S., 1987, [Galactic dynamics](#). Princeton University Press
- Bruzual G., Charlot S., 2003, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 344, 1000
- Dai X., Bregman J. N., Kochanek C. S., Rasia E., 2010, [The Astrophysical Journal](#), 719, 119
- Dey A., et al., 2019, [The Astronomical Journal](#), 157, 168
- Duarte M., Mamon G. A., 2014, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 440, 1763
- Eriksen M., Gaztañaga E., 2015, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 451, 1553
- Fall S. M., Zhang Q., 2001, [The Astrophysical Journal](#), 561, 751
- Fei Q., et al., 2025, [The Astrophysical Journal](#), 980, 84
- Ganeshaiyah Veena P., 2020, PhD thesis, University of Groningen, Netherlands
- Hargreaves J. C., Gilmore G., Irwin M. J., Carter D., 1994, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 271, 693
- Hearnshaw J., 2009, [Astronomical Spectrographs and their History](#). Cambridge University Press, [doi:10.1017/CBO9780511735288](https://doi.org/10.1017/CBO9780511735288)
- Jimenez R., Verde L., Oh S. P., 2003, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 339, 243

- Kirk D., Lahav O., Bridle S., Jouvel S., Abdalla F. B., Frieman J. A., 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **451**, 4424
- Lauer T. R., Postman M., Strauss M. A., Graves G. J., Chisari N. E., 2014, *The Astrophysical Journal*, **797**, 82
- Li P., Lelli F., McGaugh S., Schombert J., 2020, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **247**, 31
- Lombardo S., et al., 2017, *Astronomy & Astrophysics*, **607**, A113
- Malavasi N., Aghanim N., Tanimura H., Bonjean V., Douspis M., 2020, *Astronomy & Astrophysics*, **634**, A30
- Merrill P. W., 1958, Lines of the chemical elements in astronomical spectra. Carnegie Institution of Washington
- Mo H., van den Bosch F. C., White S., 2010, Galaxy Formation and Evolution. Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9780511807244
- Navarro J. F., 1998, *arXiv e-prints*, pp astro-ph/9807084
- Newman J. A., Gruen D., 2022, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **60**, 363
- Pier J. R., Munn J. A., Hindsley R. B., Hennessy G. S., Kent S. M., Lupton R. H., Ivezić Z., 2003, *The Astronomical Journal*, **125**, 1559
- Planck Collaboration et al., 2020, *Astronomy & Astrophysics*, **641**, A6
- Prada F., et al., 2025, *Astronomy & Astrophysics*, **698**, A170
- Press W. H., Davis M., 1982, *The Astrophysical Journal*, **259**, 449
- Reddick R. M., Wechsler R. H., Tinker J. L., Behroozi P. S., 2013, *The Astrophysical Journal*, **771**, 30
- Reiprich T. H., Basu K., Ettori S., Israel H., Lovisari L., Molendi S., Pointecouteau E., Roncarelli M., 2013, *Space Science Reviews*, **177**, 195
- Sankhyayan S., et al., 2023, *The Astrophysical Journal*, **958**, 62
- Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., 1998, *The Astrophysical Journal*, **500**, 525
- Schneider P., 2015, Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction. Springer Berlin Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-54083-7
- Smith R. E., Sheth R. K., Scoccimarro R., 2008, *Physical Review D*, **78**, 023523
- Sofue Y., Rubin V., 2001, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **39**, 137

- Solarz A., et al., 2012, *Astronomy & Astrophysics*, 541, A50
- Tago E., et al., 2006, *Astronomische Nachrichten*, 327, 365
- Tempel E., et al., 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 566, A1
- Tempel E., Tuvikene T., Kipper R., Libeskind N. I., 2017, *Astronomy & Astrophysics*, 602, A100
- Thanjavur K., Crampton D., Willis J., 2010, *The Astrophysical Journal*, 714, 1355
- Tonry J., Davis M., 1979, *The Astronomical Journal*, 84, 1511
- Tortora C., Napolitano N. R., 2022, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8, 197
- Wen Z. L., Han J. L., 2015, *The Astrophysical Journal*, 807, 178
- Wen Z. L., Han J. L., 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 500, 1003
- Wen Z. L., Han J. L., 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 513, 3946
- Wen Z. L., Han J. L., 2024, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 272, 39
- Wen Z. L., Han J. L., Liu F. S., 2009, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 183, 197
- Wen Z. L., Han J. L., Liu F. S., 2012, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 199, 34
- Wen Z. L., Han J. L., Yang F., 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 343
- White J. A., et al., 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453, 2718
- Wilson J. C., et al., 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131, 055001
- van Dokkum P., et al., 2016, *The Astrophysical Journal Letters*, 828, L6