

# Kvasaarien joukkoympäristöt

Pro Gradu  
Turun yliopisto  
Tähtitiede  
2021  
Fil. yo. Joonas Tarvainen  
Tarkastajat:  
Prof. Jari Kotilainen  
FT Heidi Lietzen

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

**Tarvainen, Joonas** Kvasaarien Joukkoympäristöt

Pro Gradu, 62 s., 3 liites.

Tähtitiede

Kesäkuu 2021

---

Tutkimuksissa analysoitiin kvasaarien lähiympäristöjen, joukkojen ja niiden galaksien ominaisuuksien välisiä korrelaatioita Sloan Digital Sky Surveyn (SDSS-IV, DR12, DR14Q) fotometrisen ja spektroskooppisen datan pohjalta. Työssä vertailtiin statistisen analyysin avulla kvasaarien, kvasaarillisten (aktiivisten) joukkojen, kvasaarittomien (passiivisten) joukkojen ja joukkoihin kuuluvien galaksien ominaisuuksia, kuten väriä, paikallisen ympäristön tiheyksiä, joukkojen nopeusdispersioita, rikkauksia, viriaalimassoja, viriaalisäteitä, luminositeetteja ja joukon jäsenten morfologioita. Tuloksissa kvasaarien havaittiin sijaitsevan passiivisia galaksijoukkoja keskimäärin massiivisemmissä ja tiheämmässä joukoissa. Aktiivisten galaksijoukkojen rikkausjakauman havaittiin myös eroavan passiivisista aktiivisten joukkojen rikkauksien painottuessa voimakkaammin köyhiin ja köyhähköihin joukkoihin ja heikommin pienimpiin ryhmiin. Myös r-kaistan luminositeettien havaittiin olevan keskimäärin hieman suurempia aktiivisilla joukoilla. Sen sijaan fotometristen ominaisuuksien ja korrelaatioiden, kuten värijaukaumien sekä värijakauman ja luminositeetin välisistä korrelaatioista ei löytynyt tilastollisesti merkittäviä eroja aktiivisten ja passiivisten galaksijoukkojen väliltä.

Asiasanat: Kvasaarit, galaksijoukot, galaksit, kinemaattiset suureet, fotometriset suureet, rikkauudet, tiheydet, morfologiat.

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Galaksit</b>	<b>2</b>
1.1 Galaksiavaruuden rakenteiden muodostuminen . . . . .	2
1.2 Galaksijoukot . . . . .	6
1.3 Galaksiympäristöt . . . . .	7
<b>2 Kvasaarit</b>	<b>9</b>
2.1 Aktiivisten galaksien ominaisuudet ja yhtenäismalli . . . . .	9
2.2 AGN-takaisinkytkentä ja mustan aukon vuorovaikutus ympäristönsä kanssa . . . . .	14
2.3 AGN-takaisinkytkentä ja galaksijakauman bimodaalisuus . . . . .	17
2.4 Aktiivisten galaksien ympäristöt . . . . .	21
<b>3 Tutkimusanalyysi</b>	<b>24</b>
3.1 Galaksidata SDSS-III DR12 . . . . .	24
3.2 Kvasaaridata SDSS-IV DR14 . . . . .	24
3.3 FoF-algoritmi ja joukot . . . . .	25
3.4 Punasiirtymäkorjaus ja comoving etäisyyden laskeminen . . . . .	26
3.5 Galaksi- ja kvasaarikatalogien yhdistäminen . . . . .	27
3.6 Galaksijoukkojen vertailu . . . . .	31
<b>4 Tulokset</b>	<b>32</b>
4.1 Galaksijoukkojen kinemaattiset ominaisuudet ja rikkaudet . . . . .	32
4.2 Morfologiat . . . . .	34
4.3 Galaksijoukkojen fotometriset ominaisuudet, tiheydet ja r-luminositeetit	39
4.4 Tiheydet . . . . .	41

<b>5</b>	<b>Keskustelu</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>Loppupäätelmät</b>	<b>52</b>

## Johdanto

Paikallisen ympäristön tiedetään olevan merkittävä tekijä galaksievoluutiossa, mistä todistavat lukuisat havaitut tunnusomaiset piirteet galaksien välisistä lähikoh- taamisista ja vuorovaikutuksista, jotka ovat erityisen selvästi havaittavissa tiheissä joukkoympäristöissä. Tiheissä joukoissa kehityshistoriansa viettävät galaksit ovat tyypillisesti punaisia, elliptisiä ja kaasuköyhiä systeemejä, joista monissa havaitaan myös merkkejä vuorovaikutuksesta ja sulautumisprosesseista. Kvasaarien aktiivisuu- den uskotaan aiheutuvan kaasurikkaiden spiraaligalaksien suurista sulautumispro- sesseista, jotka edelleen riippuvat voimakkaasti galaksiympäristön globaaleista omi- naisuuksista. Paikallisessa maailmankaikkeudessa kvasaarien lukumäärän on havait- tu paitsi jyrkästi romahtaneen myös olevan merkittävästi himmeämpiä korkeammilla punasiirtymillä sijaitseviin kvasaareihin verrattuna. Olivatpa syyt näiden energieetti- simpien ja kirkkaimpien aktiivisten galaksiytimien kaasubarantojen ehtymiseen mit- kä tahansa, kvasaarien lähimpien naapurigalaksiensa evoluutioon jättämä jälki voisi myös auttaa ymmärtämään kvasaarien itsensä dynaamista kehityshistoriaa. Mpc- kokoskaalan galaksiympäristön ja kvasaarin aktiivisuuden riippuvuus ja rooli ga- laksievoluutiossa on kuitenkin toistaiseksi heikosti ymmärretty. Tässä tutkielmassa olen SDSS:n arkistodatan pohjalta tutkinut kvasaarien paikallisia ympäristöjä ga- laksijoukkojen kokoskaalassa: joukkojen kinemaattisia ominaisuuksia ja rikkauksia, yksittäisten joukon jäsenten fotometriä ominaisuuksia sekä galaksien lähiympä- ristön tiheyksiä vertaillen niitä "normaalien", passiivisten galaksien ja joukkojen vastaaviin ominaisuuksiin.

# 1 Galaksit

*"Heaven wheels above you,  
displaying to you her eternal  
glories, and still your eyes are on  
the ground".*

–Dante Alighieri.

## 1.1 Galaksiavaruuden rakenteiden muodostuminen

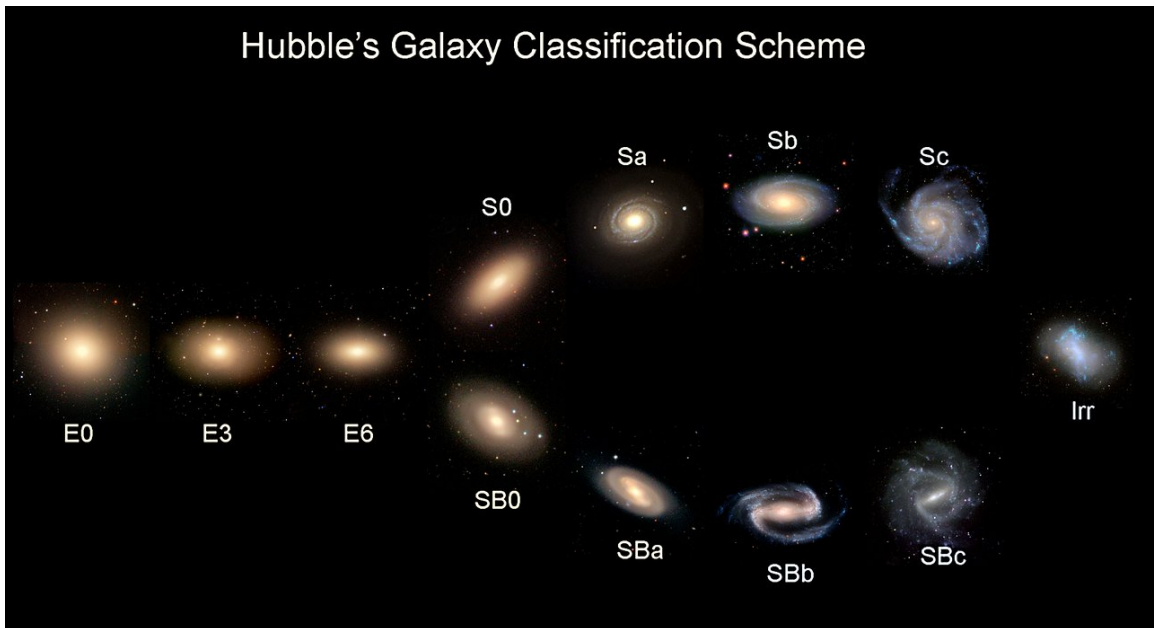
$\Lambda$ CDM-kosmologian mallin mukaan maailmankaikkeus koostuu n. 5 % baryonista ainetta, 26 % kylmää pimeää ainetta ja 69 % pimeää energiaa (Planck-kollaboraatio, 2016) [155]. Maailmankaikkeuden rakenteiden alkuperänä ovat kosmisessa mikroaaltotaustassa havaittavat epäisotropiat. Gravitaation vaikutuksesta epäisotropiat kasvavat pimeän aineen vaikutuksesta muodostaen ylitiheitä alueita, jotka oman gravitaationsa vaikutuksesta luhistuvat muodostaen pimeän aineen haloja. Simulaatioiden mukaan kylmän pimeän aineen vaikutuksesta rakenteiden muodostuminen etenee hierarkkisesti pienten halorakenteiden muodostuessa ensin ja suurempien vasta myöhemmin [159] [84] [1] [56] [45]. Gravitaation ja sulautumisprosessien vaikutuksesta pienet halot kasvavat muodostaen maailmankaikkeuden suuren kokoskaalan rakenteen, "kosmisen verkon", tuottaen tyhjiä alueita ympäröivät filamenttirakenteet, jotka sitovat galaksijoukkoja. Filamenttirakenteita pitkin kaasu virtaa pimeän aineen muodostamien potentiaaliuoppien pohjalle. Baryoniseen aineeseen liittyvä voimakkaan epälineaarinen fysiikka, kaasun dynamiikka, sen kuumentuminen ja jäähtyminen ja takaisinkytkentä mutkistavat asioita ja luovat suuria haasteita galaksievoluution mekanismien ja prosessien mallintamisessa. Baryonikaasun jäähtyessä se vajoaa halon keskustaa kohti muodostaen tähtiä. Kiertoimpulssin säilyessä ja vuorovesivoimien aiheuttaman vääntömomentin vaikuttaessa systeemissä kaasu asettuu kiekon muotoon kaoottisempien sulautumisprosessien johtaessa yleensä el-

liptisten galaksien syntyyn [68] [14].

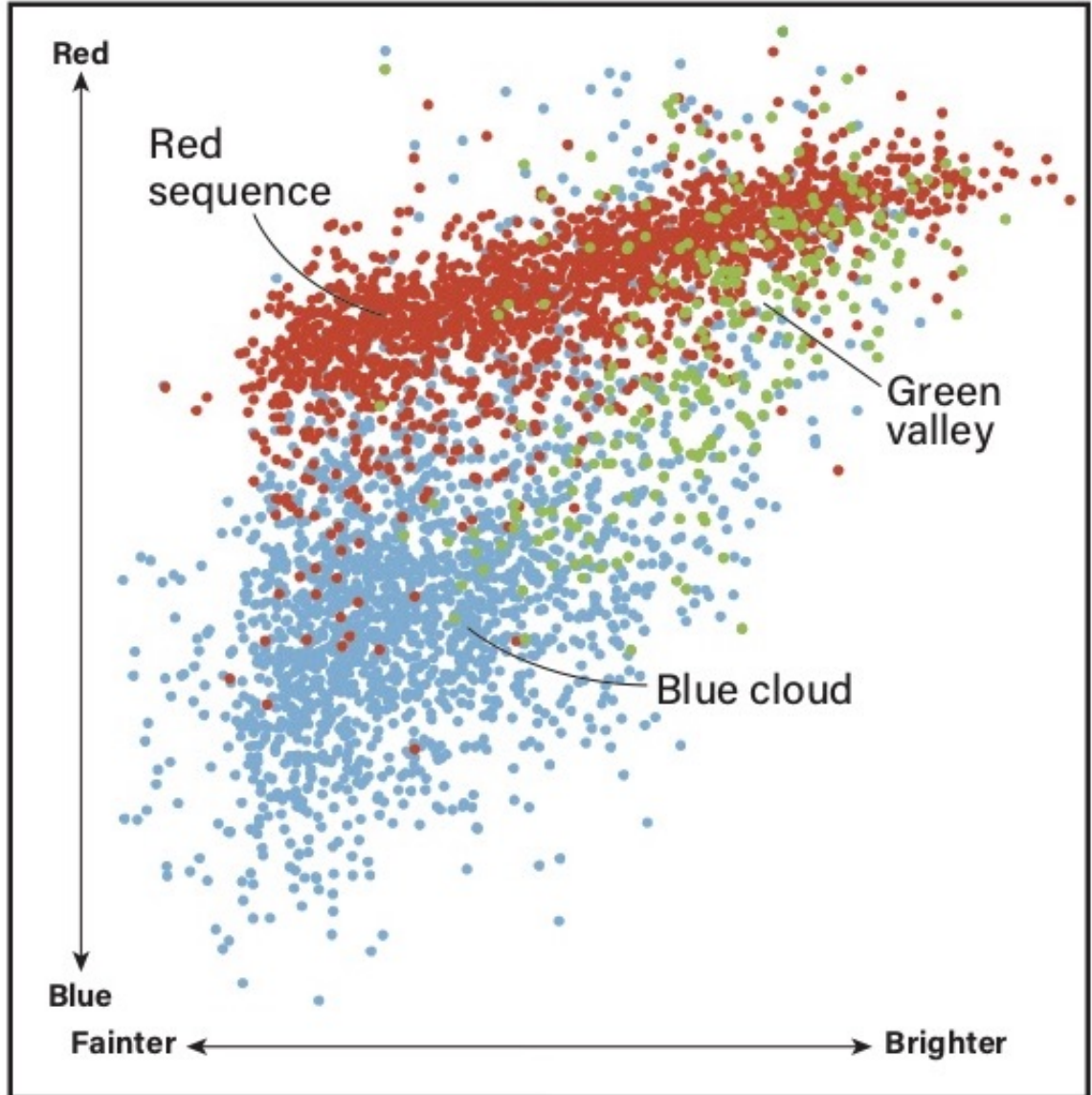
Galaksin muodostumisen jälkeen sen morfologian ja muodon määräävät vuorovaikutukset muiden galaksien kanssa. Galaksien voidaan havaita poikkeavan toisistaan suuresti kooltaan ja muodoltaan niin matalilla punasiirtymillä kuin varhaisimmassakin maailmankaikkeudessa. Hyödyllinen perustyökalu galaksien luokitteliseksi niiden morfologian perusteella on Hubblen (1926)[99] kehittämä klassinen "äänirautadiagrammi"(eng. Tuning fork diagram; kuva 1). Hubble huomasi, että galaksit voidaan morfologiansa perusteella jakaa karkeasti elliptisiin ja spiraaligalakseihin ja jälkimmäiset kahteen haaraan spiraalihaarojen rakenteen ja keskuspullistuman muodon perusteella. Hubble oletti galaksien morfologisen evoluution etenevän varhaisen tyyppin elliptisistä galakseista kohti myöhäisen tyyppin spiraaleja. Modernit kosmologiset tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet galaksievoluution paljon monimutkaisemmaksi kokonaisuudeksi kuin Hubble oletti ja galaksien evoluution etenevän vastakkaiseen suuntaan. [114].

Galaksien värin ja luminositeetin on pitkään tiedetty korreloivan niiden morfologian kanssa spiraalien ja epäsäännöllisten galaksien ollessa yleensä sinisiä ja elliptisten punaisia [48] [33]. Laajat galaksikartoitukset ovat paljastaneet bimodaalisuuden optisessa väri-magnitudi-diagrammissa (CMD) 2 galaksien jakautuessa kahdeksi erilliseksi populaatioksi, joista toinen koostuu optiselta väriltään sinisistä, suhteellisen pienimassaisista spiraaleista ja toinen väriltään punaisista, suurimassaisista elliptisistä galakseista [9] [10] [27]. Näitä kahta erillisestä galaksipopulaatiota on tapana kutsua "siniseksi pilveksi"(eng. Blue cloud) ja "punaiseksi ketjuksi"(eng. Red sequence) [33] [26] [21] [54] [66] ja niiden väliin jäävää molemmista populaatioista koostuvaa aluetta "vihreäksi laaksoksi"(eng. Green valley). Massan lisäksi tärkeimpänä selittävänä tekijänä bimodaalisuuden alkuperälle on galaksiympäristö. Morfologian [51] lisäksi galaksien väriajakauman on kauan tiedetty korreloivan sekä ympäristön [135] [29] [51] [133] että luminositeetin kanssa [48] [26]. Verrattaessa erikseen

galaksien värijakauman punaista ja sinistä populaatioita vakioisen luminositeetin arvoilla molemmat populaatiot korreloivat voimakkaasti luminositeetin kanssa. Kun taas punaisen ja sinisen populaation sisällä korrelaatio värin ja paikallisen tiheyden välillä on vähäistä [11]. Toisaalta sinisen populaation galaksien luminositeetin ollessa lähes riippumaton ympäristön tiheydestä punaisen populaation kirkkaimpien ja himmeimpien galaksien paikallisen ympäristön tiheydet ovat keskimäärin suurempia kuin keskitason luminositeetin omaavilla galakseilla [90]. The Galaxy Zoo projectin [126] [127] miljoonien galaksien morfologinen luokittelu osaltaan auttoi myös vahvistamaan aikaisempaa käsitystä ettei morfologinen kahtiajako sinisen ja punaisen populaation välillä ole täysin tarkkarajainen [168] [40] [180]. Punaisen populaation on havaittu koostuvan osin myös suurista punaisista spiraaleista [132] ja sinisen populaation spiraalittomista galakseista [169].



Kuva 1. Hubblen "äänirautadiagrammi"ryhmittelee galaksit morofologiansa perusteella neljään luokkaan: elliptisiin, spiraaligalakseihin ja sauvaspiraaligalakseihin sekä epäsäännöllisiin galakseihin. Elliptiset galaksit ovat numeroituina littanuutensa perusteella. Spiraaligalaksit ja sauvaspiraaligalaksit erottelevallaan diagrammin mukaisesti keskuspullistuman koon ja kieteishaarojen erottuvuuden perusteella. [64].



Kuva 2. Väri-magnitudi-diagrammi koostettuna Sloanin suureen seinään (eng. Sloan Great Wall) kuuluvista galakseista. Diagrammista voidaan erottaa kaksi erillistä populaatiota: sininen pilvi, joka koostuu keskimäärin sinisistä, himmeämmistä ja kevyemmistä spiraaligalakseista ja punainen ketju, jonka sisältämät punaiset elliptiset galaksit ovat spiraaleja keskimäärin massiivisempia ja kirkkaampia. Näiden populaatioiden välissä vihreässä laaksossa sijaitsevat galaksit voidaan tulkita olevan siirtymävaiheessa kahden populaation välillä sinisestä pilvestä punaiseen ketjuun. (Lähde: Roen Kelly, astronomy.com perustuen Gavazzi et al. 2010 julkaisuun [78].)

## 1.2 Galaksijoukot

Galaksijoukot eivät ole vain kokoelma galakseja, stationäärisiä, muuttumattomia systeemejä vaan alati muuttuvia kokonaisuuksia, joiden evoluutiota ohjaavat niin astrofysikaaliset prosessit kuin kosmologisen tiheyskenttää mukaileva gravitaation vaikutus. Kosmologian standardimallin mukaan [74] pimeän aineen muodostamat tihentymät kytkeytyvät irti Hubblen virrasta ja luhistuvat gravitaation vaikutuksesta muodostaen baryonista ainetta sisältäviä haloja. Halot sulautuvat myöhemmin toisiinsa muodostaen yhä suurempia halorakenteita. Hierarkkisen rakenteiden muodostumisen seurauksena galaksijoukot ovat siten galaksiavaruuden rakenteiden muodostumisen lopputuotteita, joiden ominaisuudet riippuvat paitsi joukoissa itsessään vaikuttavista prosesseista myös niiden perustana olevasta kosmologiasta. Eri-tyisesti massiivisimmat galaksijoukot ovat arvokkaita tutkimuskohteina kosmologisten mallien testaamiselle; ne ovat kirkkaita niin optisella kuin röntgenalueella ja ovat siten mahdollista havaita huomattaville punasiirtymille asti ( $z \sim 1$ ). Lisäksi massiivisten joukkojen ollessa suhteellisen harvinaisia ne muodostuvat taustalla olevassa tiheyskentässä suhteellisen korkeiden huippujen kohdalle ja koska näiden massiivisten joukkojen dynaaminen aikaskaala on Hubblen aikaan verrattuna huomattava eivät kosmologisten alkuehtojen jäljet ole kokonaan pyyhkiytyneet pois myöhemmän evoluution vaikutuksesta. Tämä mahdollistaa useiden tärkeiden kosmologisten parametrien raja-arvojen määrittämisen ( $\Omega_m$ ,  $\sigma_8$  ja  $\omega$  pimeän energian tilanyhtälöä varten) ja kenties tärkeimpänä galaksijoukkojen massafunktion tutkimisen sen ollessa riippumaton muista kuin gravitaation aiheuttamista galaksijoukkojen kehitystä muovaavista prosesseista.

Liki puolet maailmankaikkeuden galakseista sijaitsevat joukoissa [183], systeemeissä, joissa tyypillisesti puolet jäsenistä ovat pakkautuneet kooltaan  $\leq 1$  Mpc suuruiselle alueelle. Galaksijoukkojen koot ja rikkaudet vaihtelevat suuresti muuttaman jäsenen ryhmistä suuriin ja tiheisiin joukkoihin, joissa keskustan megaparse-

kin kokoluokan alueilla sijaitsee tyypillisesti ainakin 50 kirkasta galaksia  $L \geq L_* \approx 2 \cdot 10^{10} L_\odot$ . Galaksijoukkojen massat vaihtelevat suuresti köyhempien joukkojen ollessa  $\sim 10^{12} M_\odot$  ja suurimpien välillä  $\sim 10^{14} - 10^{15} M_\odot$ . Galaksijoukkojen jäsenten eri morfologioiden osuus vaihtelee suuresti: köyhempien ryhmien ja joukkojen jäsenet ovat tyypillisimmin spiraaleja ja epäsäännöllisiä: Ison Karhun joukon suurimmista galakseista lähes kaikkia ovat kiekkomaisia systeemejä: 79 kirkkaimmasta galaksista vain kaksi ovat elliptisiä. Myös paikallisen galaksiryhmän kolme kirkkainta jäsentä ovat spiraaleja Linnunradan ja Andromedan satelliittien ollessa pääosin morfologialtaan epäsäännöllisiä ja kääpiögalakseja. Kuitenkin massiivisemmissä ja tiheämissä galaksijoukoissa huomattavasti suurempi osuus galakseista on morfologialtaan elliptisiä; Coman galaksijoukossa elliptisten galaksien osuuden ollessa jopa 85%.

### 1.3 Galaksiympäristöt

Paikallisessa maailmankaikkeudessa elliptiset galaksit ja S0:t dominoivat galaksijoukkojen tiheitä keskusalueita ( $> 90$  prosenttia), joilla uusien tähtien muodostuminen on käytännössä loppunut. Joukon keskustasta pois päin katsottaessa tähtiä muodostavien spiraaligalaksien osuus kasvaa galaksien ympäristön tiheyden pienenemässä (kuva 3). Spiraaligalaksien suhteellinen osuus saavuttaa maksimiarvonsa ( $\sim 55\%$ ) kentällä, missä sekä varhaisen että myöhäisen tyyppin galaksit ovat yleisiä [53]. Morfologia-tiheys-relaation kehitystä ja käyttäytymistä on tutkittu laajasti punasiirtymälle  $z \sim 1$  asti [53][182] [158] [197]. Tutkimuksissa varhaisen tyyppin galaksien suhteellisen osuuden  $f(e+S0)$  havaittiin kasvavan ajassa keskitiheillä (galaksijoukoissa) ja korkean tiheyden alueilla (galaksijoukkojen ytimissä) missä elliptisten ja S0:ien osuus kasvoi punasiirtymältä  $z = 1$  arvosta  $0,7 \pm 0,1$  nykyiseen arvoon  $0,9 \pm 0,1$  kentällä sijaitsevien galaksien morfologisen evoluution ollessa vähäistä samalla punasiirtymäalueella. Lisäksi joukkojen ympäristöihin siirryttäessä galaksien integroidussa tähtien synnyn muutosvauhdissa havaitaan jyrkkä pudotus aina-

kin punasiirtymältä  $z \sim 1$  asti [29] [130] [156]. Ottaen huomioon galaksijoukkojen ydinalueiden elliptisten galaksien vähäisen evoluution [61] [195] ja tähtien tuotannon muutosvauhdin kasvun galaksin keskustan etäisyyden kasvaessa voidaan galaksin lähiympäristöllä todeta olevan merkittävä rooli galaksievoluutiota ohjaavana tekijänä.

Morfologian tai rakenteen riippuessa vain heikosti ympäristöstä tähtienmuodostusaktiivisuus (SFR) korreloi voimakkaasti ympäristön kanssa laskien alhaisista tiheyksistä korkean tiheyden galaksiympäristöihin siirryttäessä (kuva 4). Lisäksi Hogg et al. (2003, 2004) ja Balogh et al. (2004) [90] [91] [11] osoittivat, että rakenteeltaan samanlaisilla galakseilla tähtienmuodostusaktiivisuuden on alhaisempi joukkoympäristöissä. Ympäristön vaikutus tähtituotantoon on nähtävillä myös etäisemmässä maailmankaikkeudessa [111][158] [160] ja joidenkin tutkimusten mukaan tähtienmuodostustiheys-relaatio näyttäisi olevan käänteinen  $z \sim 1$  korkeammilla punasiirtymillä [59] [41][196]. Vaikkakin em. tutkimustulos SFR-tiheys-relaation käänteisyydestä on kiistanalainen osa etäisistä ( $z \sim 1$ ) joukoista näyttää keskitiheillä laitamillaan viitteitä tehostuneesta SFR-aktiivisuudesta ja nopeutuneesta galaksievoluutiosta, joka näyttää laskevan jyrkästi pian  $z \sim 1$  jälkeen [29] [130] [156].

Rikkaammissa ympäristöissä olevilla galakseilla on myös havaittu olevan korkeammat metallisuudet paikallisessa maailmankaikkeudessa  $z \sim 0$  [41]. Varsinainen määräävä ympäristötekijä on kuitenkin vielä kiistanalainen; osa havainnoista viittaa satelliittigalakseilla olevan korkeammat metallisuudet keskusgalaksiin verrattuna korrelaation tehostuessa emohalon massan kasvaessa ja halosentrisen etäisyyden pienentyessä [146] [152]. Osa havainnoista puolestaan viittaa metallisuustiheys-korrelaation olevan seurausta ympäristön ylitiheyksistä ja riippumatta siitä onko galaksi keskus- vai satelliittigalaksi [62].

Galaksien lähiympäristön vaikutus niiden morfologiaan sekä näiden välillä ope-roivien fysikaalisten mekanismien vaikutus morfologiaan on pitkäkestoinen kiistanai-

he. Yksi varhaisimmista ja eniten tutkituista mekanismeista on dynaamisen paineen aiheuttama kaasun riisuminen, joka tyhjentää koko satelliittigalaksin kaasusta [87] [2] [75]. Lisäksi hienovaraisempia prosesseja kuten galaksien väliset suurien nopeuksien lähikohtaamiset, "galaksihäirintä"[137] [138] [76], joukon sisäiset vuorovesivoimat, jotka vääristävät galaksin rakennetta galaksijoukon potentiaalissa [30] [199] [76], galaksien välinen sulautuminen [103] [129] [19] [73] sekä kaasun joukkoympäristön aikaansaama kaasun kulutus [118][20] [73] on ehdotettu. Kuitenkin viimeaikaiset simulaatiot antavat ymmärtää, että galaksiympäristön ohjaamat fysikaaliset mekanismit eivät välttämättä ole hallitsevassa roolissa galaksin elinkaareissa [109] [203] [154] [63]. Yksittäisen hallitsevan mekanismin sijaan esimerkiksi korrelaatio sammuneen tähtituotannon (eng. quenched) galaksien osuuden ja ympäristön tiheyden välillä voisi olla seurausta useiden muiden galaksin ja niiden ympäristön välillä toimivien mekanismien yhteisvaikutuksesta, superpositiosta.

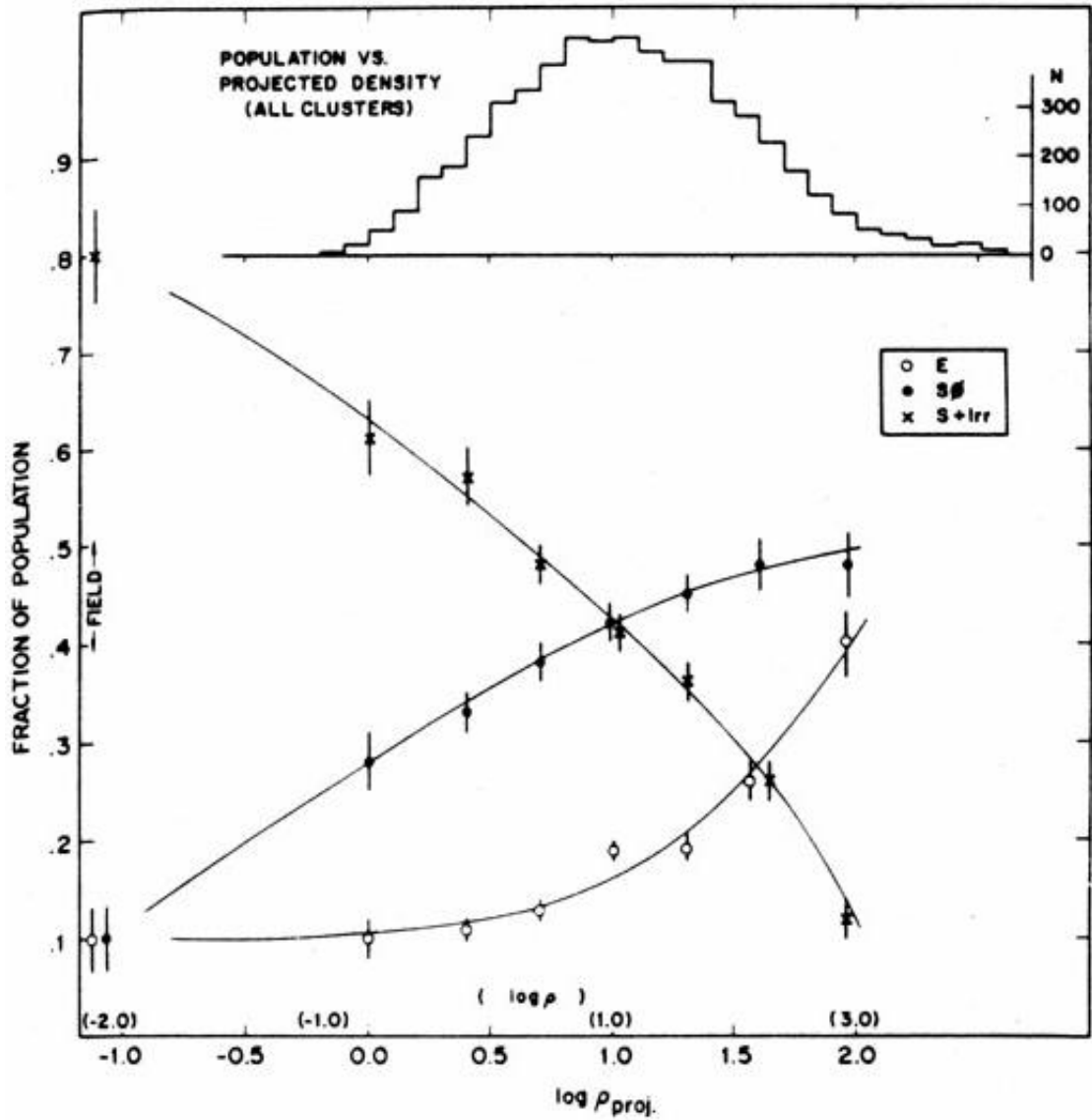
## 2 Kvasaarit

*"I know that I am mortal by nature, and ephemeral; but when I trace at my pleasure the windings to and fro of the heavenly bodies I no longer touch the earth with my feet: I stand in the presence of Zeus himself and take my fill of ambrosia".*

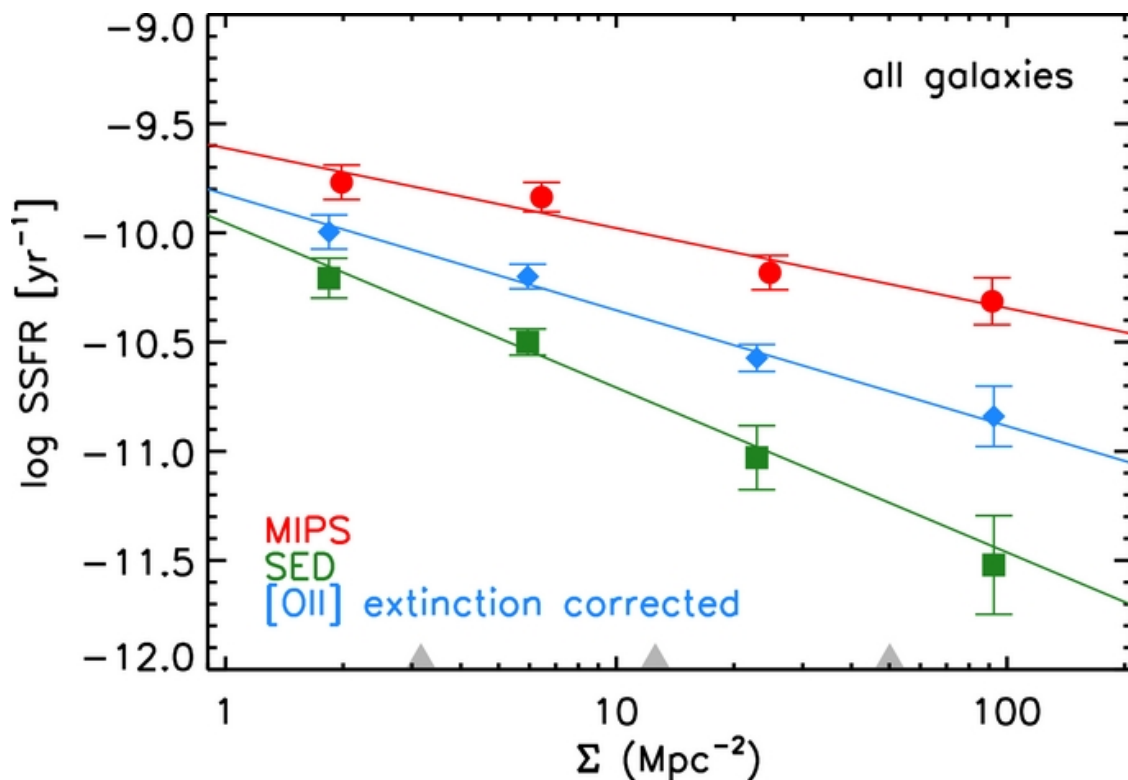
—Ptolemy, *Ptolemy's Almagest*.

### 2.1 Aktiivisten galaksien ominaisuudet ja yhtenäismalli

Aktiiviset galaksiytimet (AGN) ovat yleisnimitys galakseille, joiden ytimen tai keskusalueiden energiantuotantoa ja kirkkautta ei voida selittää pelkästään tähtien aktiivisuudella. Näiden kohteiden tunnusomaisiin ominaisuuksiin ja havaittuihin erityispiirteisiin kuuluvat:



Kuva 3. Elliptisten (E), lentikulaaristen (S0) ja spiraalien + epäsäännöllisten galaksien (S + Irr) suhteelliset osuudet projisoidun tiheyden logaritmin funktiona  $Mpc^{-2}$  kohden. Vaaka-akselilla on myös esitettyä arvioitu galaksien todellinen avaruustiheys  $Mpc^{-3}$  kohden (alla). Yllä histogrammissa galaksien lukumäärä kunkin projisoidun tiheysvälin sisällä. [52]



Kuva 4. Mediaani SSFR ja paikallisen tiheyden riippuvuus galakseille massoilla  $\log(M/M_{\odot}) > 10,25$  punasiirtymävälillä  $0,6 < z < 0,9$ . SFR on esitettyä kuvassa kolmen eri SFR-indikaattorin avulla ratkaistuna: (1) 12-15  $\mu m$  luminositeeteilla Spitzerin MIPS 24  $\mu m$  kuvantamisen (punaiset pisteet) (2) SED-sovituksen (vihreät neliöt) ja (3) ekstinktiokorjattujen  $[OII]\lambda 3727$  emissioviivan avulla (siniset timantit). Kaikissa tapauksissa voidaan huomata SSFR:n laskevan paikallisen tiheyden kasvaessa kentältä joukkojen keskustoja kohti mentäessä. [147]

- Kohteiden usealle aallonpituusalueelle esiintyvän kontinuumiemission ja emissioviivojen (erityisesti röntgenkaistan) voimakas vaihtelevuus (eng. variability).
- Vaihtelevuus viittaa emission olevan peräisin alueelta, jonka koko on luokkaa valotunneista -päiviin. Lähimmillekin AGN:ille koko vastaa kulmaläpimittaa  $\sim 10^{-6} - 10^{-5}$  kaarisekuntia.
- Luminositeetin laaja vaihteluväli, joka kattaa yli yhdeksän kertaluokkaa. Hyvin matalilla luminositeeteilla erottelu aktiivisen ja tavallisen galaksin välillä on lähinnä semanttinen.
- Voimakkaat ja leveät optisen/UV-alueen emissioviivat, joiden lähteenä ydinalueiden fotoionisoimat kaasupilvet.
- Laajakaistainen, lähes koko sähkömagneettisen säteilyn spektrin kattava emissio.
- Merkittävä vähemmistö AGN:sta ( $\sim 10\%$ ) emittoi voimakkaita hiukkassuihkujia. Kyseiset "radioäänekkäät" AGN:t tuottavat radioaaltoja synkrotronisäteilyn kautta ja suihkujen vuorovaikuttaessa galaksia ympäröivän kaasun kanssa.

Yleisesti hyväksytyn käsityksen mukaan havaittu energiantuotto aktiivisen galaksin ytimessä on peräisin kaasun virtauksesta supermassiivisen mustan aukon ympärillä. Kaasu muodostaa aukon ympärille optisesti paksun materiakiekon, kertymäkiekon, jonka terminen emissio aiheutuu kiekon sisäisestä viskositeetista [173][162]. Kertymäkiekon kaasulla on laaja, etäisyyden funktiona käänteinen (mustasta aukosta pois päin suuntautuva) lämpötilajakauma, jonka seurauksena emissio jakaantuu optiselta aina pehmeään röntgensäteilyn alueelle. Yhdessä radio- röntgen- ja gammaemission kanssa säteilyn energia jakaumaa taajuuden/aallonpituuden funktiona on tapana kutsua spektrin energiajakaumaksi (eng. spectral energy distribution, SED).

Tärkeä osa AGN:ien luokittelua perustuu niiden optisen, röntgen- ja radiokais-tan emissioon. Optisella/UV-kaistalla luokittelu perustuu emissioviivojen muotoon, minkä perusteella on mahdollista erotella kaksi pääryhmää:

*Leveäviivaiset* AGN:t (tai tyyppin 1 AGN:t), joiden spektrissä havaitaan emissio-viivoja kahdelta erilliseltä alueelta; leveän viivan alueelta (BLR) ja kapean viivan alueelta (NLR). BLR ja NLR määritellään perustuen havaittujen emissioviivojen nopeusleveyteen. Empiirisesti BLR:lta peräisin olevan kaasun nopeusjakauma on le-veämpi kuin NLR:n kaasun, jonka nopeusleveys rajoittuu kiellettyjen viivojen emis-sioon BLR:n kaasun ollessa liian tiheää kielletyille transitoille. BLR:n ja NLR:n kaasun nopeusleveydet, joiden oletetaan johtuvan viivojen Doppler-leventymisestä määräytyvät kaasun sijainnista suhteessa galaksin keskustan supermassiiviseen mus-taan aukkoon. BLR:n kaasu sijaitsee lähellä kertymäkiekkoa supermassiivisen mus-tan aukon gravitaation vaikutuspiirissä. NLR:n kaasu puolestaan sijaitsee emogalak-sin gravitaation vaikutuspiirissä kauempana galaksin ydinalueilta suurimman osan kaasun tuotannosta ollen peräisin suuremmalta kpc-kokoskaalalta [102] [200].

*Kapeaviivaiset* AGN:ien (tai tyyppin 2 AGN) spektriä karakterisoivat kapeat emis-sioviivat, jotka saavat alkunsa sekä sallituilta että kielletyiltä transitoilta. Tyyppin 2 AGN:ien kontinuumiemissio on heikompi tyyppin 1 AGN:iin verrattaessa ja on mel-kein laakea. Kauempana AGN:n keskusalueista parsek-kokoskaalalla sijaitsee mole-kulaaristen pölypilvien muodostelma, joka sijaitsee samassa tasossa kertymäkiekon kanssa. Näitä pölypilviä kutsutaan usein torukseksi, jolla on keskeinen ja määrit-tävä rooli AGN:ien yhtenäismallin kannalta [5]. Yhtenäismallin mukaan AGN:ien havaittavat (toisistaan eroavat) ominaisuudet on mahdollista selittää epäisotroop-pisen kohteen orientaatioilla suhteessa havaintoperspektiiviin. Tyyppin 2 kohteen ta-pauksessa systeemi havaitaan galaksin tason suuntaisesti (eng. "edge-on"), jonka seurauksena pölytorus peittää alleen kertymäkiekon ja BLR:n emissio kun taas tyyppin 1 AGN:n tapauksessa kohteen orientoituneena siten että katselukulma on

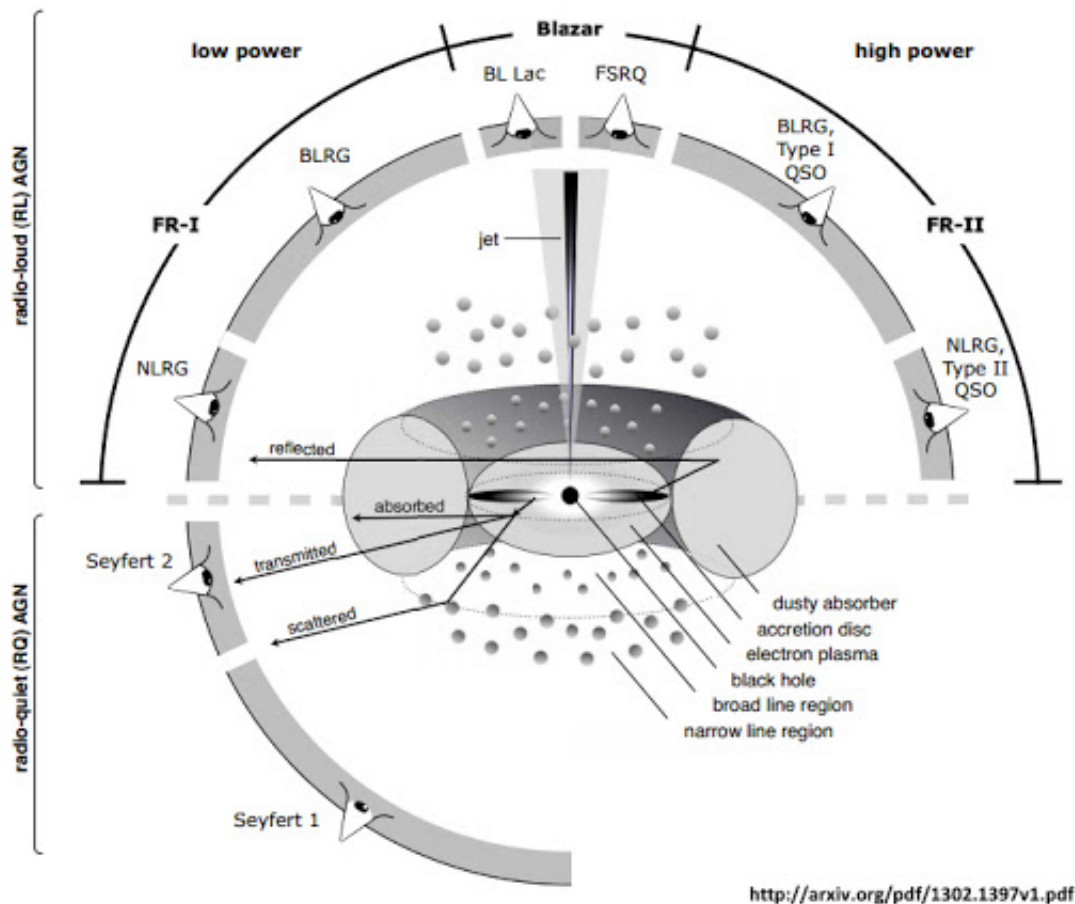
kohtisuorassa galaksin ja kertymäkiekon tasoa ja BLR vastaan.

Optisessa spektrissä esiintyvien emissioviivojen leveyden ( $Sy1/Sy2$ , BLRG/NLRG) lisäksi luokittelukriteereihin kuuluu: optinen morfologia ( $Sy1$ /radioäänekäs kvasaari, BLRG/radioäänekäs kvasaari), radiomorfologia (FR1, FR2), variabiliteetti (BL Lac, OVV), luminositeetti ( $Sy1$ /radiohiljainen kvasaari, WLRG/NLRG), spektrin muoto (SSRLQ, FSRLQ). Yksinkertaistetun taksonomisen mallin mukaisesti aktiiviset galaksit voidaan järjestää kaaviossa 5 kuvattuihin ryhmiin kahden parametrin: radiosäteilyn tehon ja emissioviivojen leveyden perusteella, siten että kunkin yksittäisen ryhmän sisällä AGN:n eroavaisuudet määrää luminositeetin suuruus.

1990-luvun puoliväliin tultaessa havaintoevidenssi yhä enenevässä määrin tuki hypoteesia, jonka mukaan orientaatio olisi erottava tekijä useiden aktiivisten galaksien välillä ja onnistui selittämään kuinka pohjimmiltaan identtiset kohteet näyttävät erilaisina eri katselukulmista. Oli kuitenkin selvää, ettei "vahva"orientaatiomalli (ts. kaikki aktiiviset galaksit olisivat yhdistettävissä orientaation perusteella) voisi toimia, ja vuonna 1993 Antonucci [5] esitteli vahvasta orientaatiohypoteesista rajoitetun mallin 5, jonka mukaan aktiiviset galaksit voitaisiin jakaa kahdeksi intrinsisesti erilaiseksi populaatioksi: radioäänekkäisiin ja radiohiljaisiin. Molempien populaatioiden sisällä AGN:t eroaisivat toisistaan luminositeettinsa lisäksi ainoastaan orientaationsa perusteella. Kyseinen "olkiukkomalli" (straw person model, SPM), kuten Antonucci itse malliaan kutsui, oli epätäydellinen eikä se kyennyt antamaan selitystä radioäänekkäiden ja radiohiljaisten populaatioiden tai FR1-/FR2-luokkien dikotomiale.

## 2.2 AGN-takaisinkytkentä ja mustan aukon vuorovaikutus ympäristönsä kanssa

Havainnot osoittavat supermassiivisten mustien aukkojen massojen korreloivan useiden emogalaksin keskuspullistuman ominaisuuksien, kuten massan (kuva 6) [128]



Kuva 5. Skemaattinen esitys aktiivisten galaksien yhtenäismallista. Yhtenäismallin mukaan erityyppisten AGN:ien eroavaisuudet voidaan selittää kohteen orientaation (katselukulman), luminositeetin ja radiosuihkujen perusteella [18]

[72] [79], nopeusdispersion [72] [79], konsentraatio- ja/tai valoprofilin [85], sferoidisen potentiaalikanavan syvyys/sidosenergian [92] [4] kanssa. Edellä mainituissa korrelaatioissa esiintyvä hajonta on hyvin pientä riippumatta mm. siitä, että tähtimassan, valoprofilin ja muiden ominaisuuksien vaihteluväli mustan aukon vaikutuspiirissä (eng. sphere of influence) on kertaluokan suuruinen määrättyllä galaksin nopeusdispersion tai massan arvoilla [98]. Kun lisäksi lukuisat ehdot viittaavat, siihen että supermassiiviset mustat aukot ovat keränneet suurimman osan massastaan optisesti kirkkaan kvasaarikehitysvaiheen aikana [184] [166] [209] [96], on sen yhdessä mustien aukkojen massojen korrelaatioiden kanssa johtanut useiden mallien kehittelyyn, joiden mukaan kertymän suuren kokoskaalan takaisinkytkentäefektit itsesäätelevät mustan aukon massan kasvua kriittisen massan alueella [177] [110] [50] [139]. Saadessaan sysäyksen jonkin prosessin vaikutuksesta kaasuvirtaus aikaansaa mustan aukon nopean kasvun, kunnes takaisinkytkentä poistaa mustaa aukkoa ruokkivan kaasun ja pölyn keskustan lähiympäristöstä. Kaasun pois sysäämisen tuloksena syntyy lyhytaikainen, optisesti kirkas kvasaari, joka käytettyään loppuun kaasuvaramonsa, himmenee ja jättää jälkeensä jäänteitä, joka noudattaa havaittuja musta aukko-keskuspullistuma-korrelaatioita [93][95]. Kvasaarivaiheen evoluution tarkempi kuvaus erimassaisten halojen ja kosmisen ajan funktiona on esitettyä kaaviossa 7. Edellä mainitut skenaariot ovat onnistuneet selittämään useita kvasaarien mitattuja ominaisuuksia, kuten luminositeettifunktioita, elinikää ja mustan aukon massafunktioita [97] [98] [201] [136].

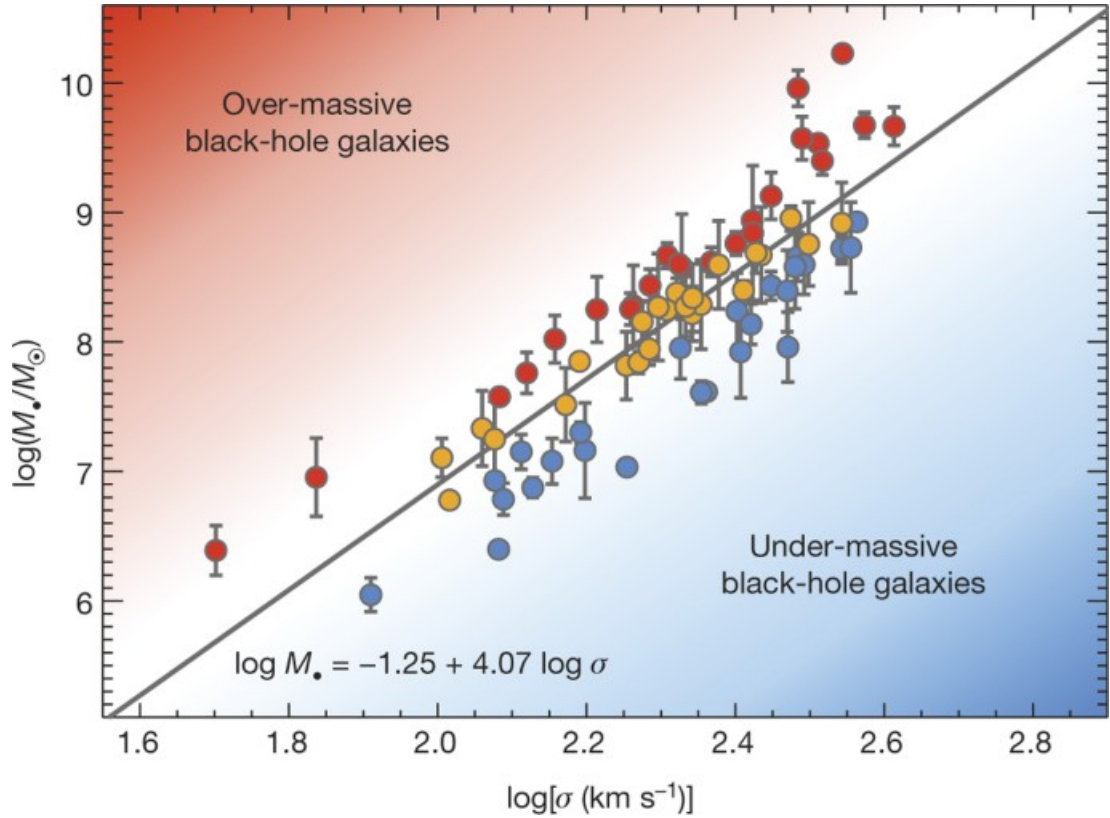
AGN-takaisinkytkentää on pyritty mallintamaan lukuisien simulaatioiden avulla  $M - \Sigma$ -suhteen tuottamiseksi. Di Matteo et al. 2005 [50] onnistuivat ensimmäisenä näyttämään, että ilman takaisinkytkentää musta aukko tyhjentäisi kaasuvaramonsa täydellisesti kvasaarivaiheensa aikana, jolloin mustan aukon massa kasvaisi rajatta yli kriittisen arvon, eikä BH-galaksi-relaatiota pääsisi syntymään. Takaisinkytkennän ollessa toiminnassa kaasun virratessa kertymäkiekossa lähellä Eddingtonin

rajaa, musta aukko saavuttaa kriittisen luminositeetin arvonsa ja sysää ydinalueen kaasun pois vaikutuspiiristään jättäen jälkeensä jäänteen, jonka massa asettuu hyvin sopusointuun  $M - \Sigma$ -relaation kanssa [34].

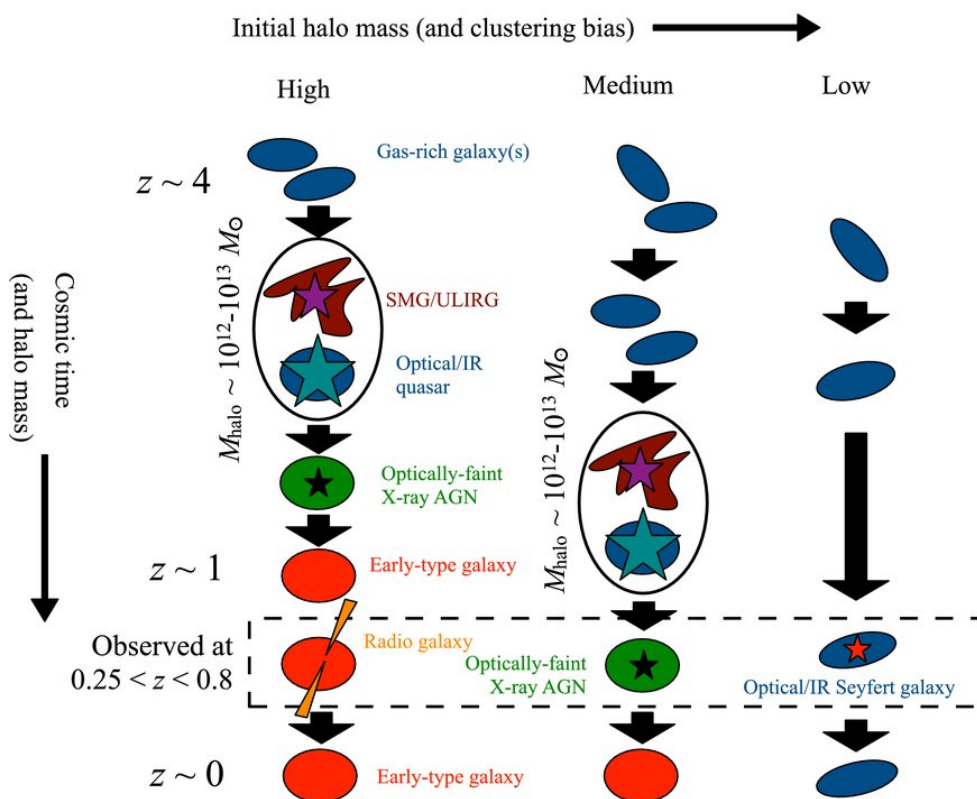
Yksi takaisinkytkentäsäätelymallien keskeisiä ennusteita ovat erilaiset  $M_{bh} - \Sigma$ -relaatiot klassisten, sulautumisprosesseissa syntyneiden keskuspulistumien ja sekulaarin evoluution tuloksena syntyneiden pseudopulistumien välillä (kuva 6). Pulistumat eroavat rakenteeltaan monella tapaa toisistaan: klassisilla pullistumilla on korkeammat dispersiot, ne ovat isotrooppisempia ja niiden kirkkausprofiili noudattaa  $r^{1/4}$ -lakia. Pseudopulistumat ovat klassisia epäisotrooppisempia, niillä korkeampi rotaatio ja niiden kirkkausprofiilit ovat muodoltaan eksponentiaalisia. Rakenteelliset erot tarkoittavat, että myös niiden potentiaalikuopat eroavat toisistaan, mikä johtaisi erilaisiin  $M_{bh}$ - $\Sigma$ -relaatioihin.

### 2.3 AGN-takaisinkytkentä ja galaksijakauman bimodaalisuus

$M$ - $\Sigma$ -relaation ja luminositeettifunktion galaksijakauman korkean luminositeetin händän selittämisen ohella merkittävin argumentti mustan aukon aiheuttaman takaisinkytkennän puolesta on galaksien väri- ja magnitudijakauman bimodaalisuus. Varhaisen ja myöhäisen tyyppin galaksit muodostavat kaksi erillistä populaatiota väri-luminositeetti-diagrammissa (kuva 2). Nämä populaatiot eroavat toisistaan niin väritään, luminositeetiltaan kuin morfologialtaan. Mikä on bimodaalisuuden alkupe-  
rä ja kuinka sitä tulisi tulkita galaksievoluution näkökulmasta? Nykyisen  $\Lambda$ CDM-kosmologian standardiparadigman mukaan jokainen galaksi muodostuu alun perin pimeään aineen halossaan kiekkomaisena keskusgalaksina. Haloon virranneen kaasun jäähtyttyä ja asetuttua ensin rotaation kannattelemana tasapainotilaan tähtien muodostuminen voi alkaa kiekon kylmässä kaasussa. Jokaisen galaksin evoluutiohistoria oletetaan saavan alkunsa väri-magnitudi-diagrammin "sinisestä pilvestä". Sulautumisprosessit ovat tärkeä galaksien evoluutiota ajava mekanismi, joka täh-



Kuva 6. Mustan aukon massa - keskuspullistuman tähtien nopeusdispersion välinen korrelaatio ( $M - \Sigma$ -relaatio). Yhtenäinen viiva kuvaa keskimääräistä mustan aukon massaa kutakin nopeusdispersion arvoa kohden.  $M - \Sigma$ -relaation mukaiset standardimassoisten mustien aukkojen galaksit ovat esitettynä kuvassa oransseina pisteinä. Standardimassoista poikkeavat yli- ja alimassiivisten aukkojen galaksit ovat esitettynä kuvassa punaisina ja sinisinä pisteinä. Näiden kahden populaation galaksien mustat aukot ovat  $M - \Sigma$ -relaation ennustamaan nopeusdispersion arvoon nähden joko massiivisempia tai kevyempiä ( $\pm 0,2$  dex). [131]



Kuva 7. Skemaattinen esitys AGN:n ja emogalaksin evoluutiosta kolmelle halon massasta riippuvalle tapahtumaketjulle. Galaksiytimen aktiivinen vaihe saa alkunsa pimeään aineen emohalon saavuttaessa kriittisen massan  $\sim 10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$  arvon joko sulautumisprosessin tai sekulaarin evoluution tuloksena. (Kyseinen vaihe on kuvattuna soikion muotoisen alueen sisällä). Systeemi saavuttaa kriittisen massan arvon, jolloin systeemi kirkastuu ensin tähtienmuodostuspyrähdyksen johdosta. ULIRG/kvasaari-vaiheessa galaksin ytimen mustan aukon kasvuvauhti on suurimmillaan ja syntyvän elliptisen galaksin sferoidinen morfologia syntyy. ULIRG/kvasaari-vaihe loppuu tähtituotannon romahtaessa ja mustan aukon kertymävirran heikentyessä, mikä saattaa olla yhteydessä optisesti himmeään röntgen-AGN-vaiheeseen. Tähtipopulaatioiden ikääntyessä systeemi jättää lopulta jälkeensä "punaisen ja kuolleen" elliptisen galaksin radiomoodissa operoivien ulosvirtausten lämmittäessä ympäröivää tähtienvälistä kaasua estäen myöhemmän tähtien muodostuksen. Keskisuurissa pimeään aineen haloissa kvasaarivaihe ja tähtisferoidin muodostuminen tapahtuvat myöhemmin kuin suurimassaisilla haloilla. Kaikkein pienimassaisimmat halot eivät koskaan saavuta kvasaarivaiheen alkamiseen vaadittavaa kriittistä massaa; nämä kohteet voidaan havaita tähtiämuodostavia spiraaleina tai Seyfert galakseina punasiirtymällä  $z < 0,8$ . Katkoviivalla merkitty laatikko kuvaa kunkin halomassan karakteristisia AGN-tyyppejä, jotka ovat havaittavissa punasiirtymävälillä  $0,25 < z < 0,8$ . [89].

tituotantoon vaikuttavien sammutusprosessien ohella toimii transitiomekanismina väri-magnitudi-diagrammin sinisen ja punaisen populaation välillä.

Sammutusprosesseissa keskusgalaksi säilyy morfologialtaan ja ominaisuuksiltaan muuttumattomana, mutta sen gravitaatiopotentiaalin satelliittigalaksiin aiheuttamat häiriöt usein eri mekanismein vaikuttavat niin satelliittigalaksin tähtituotantoon ja kylmän ja kuumen kaasun saatavuuteen. Kuristumisessa (eng. strangulation) [149] galaksiklusterin gravitaatiopotentiaalin aiheuttamat vuorovesivoimat riittävät galaksin subhalon kuumen kaasun atmosfääriin, kun dynaaminen paine ajaa kylmän kaasun ulos galaksista sen liikkuessa galaksiklusterin välisen kuumen kaasun läpi [87] [71] [2] [75]. Myös galaksien väliset lähikohtaukset "galaksihäirintä" erityisesti rikkaissa klustereissa voivat aiheuttaa morfologisia muutoksia pienimassaisen spiraalin kierteishaarojen rakenteeseen sekä epäsymmetrioita erilaisten vuorovesivoimien aiheuttamien häntien ja kehien muodossa [137] [138] [76]. Sulautuminen, "galaksihäirintä" [103] [120] [129] [19][73] ja kaikki edellä mainitut sammutusprosessit sekä sekulaarit prosessit, kuten kiekon epästabiilisuudet ohjaavat tähtien syntyhistoriaa (i.e. kaasun saatavuutta) [171] [7][153] [38] [161] [116] [8][142] ja toimivat transitiomekanismeina sinisen ja punaisen pilven välillä. Punaisen populaation massiivisia, elliptisiä galakseja ympäröivän kuumen kaasuhalon jäähtymisajan ollessa Hubblen aikaa lyhyempi kaasu ennen pitkää jäähtyy viriaalilämpötilasta pudoten kohti galaksin keskustaa. Väistämätön seuraus tälle kaasun sisäänvirtaukselle on katastrofaalinen jäähtyminen, joka johtaa intensiiviseen tähtien muodostumiseen halon keskustassa, ellei jokin prosessi tasapainota ja estä jäähtymistä. Tällaista intensiivistä tähtien muodostusta ei kuitenkaan havaita. Kysymys siten kuuluu: mikä estää kaasua jäähtymästä ja muodostamasta tähtiä? Pienimassaisissa haloissa tähtien erityisesti supernovien takaisinkytkentä voi olla riittävä mekanismi estämään tähtiä muodostumasta, mutta massiivisimmissa haloissa aktiivisten galaksin ydinten "radiomoodin" takaisinkytkennän uskotaan olevan vastuussa jäähtymisvirtojen

tukahduttamisesta ja jäähtymiskatastrofin estämisestä [43].

## 2.4 Aktiivisten galaksien ympäristöt

Suuren kokoskaalan ympäristöillä on merkittävä rooli galaksievoluutiossa. Galaksijoukon tiheyksien tiedetään vaikuttavan jäsentensä väreihin, morfologioihin ja tähtituotannon aktiivisuuteen. Nämä ominaisuudet riippuvat edelleen galaksijoukon ominaisuuksista, epookista sekä yksittäisen galaksin sijainnista joukkonsa sisällä. Kyseiset galaksiympäristön ominaisuudet vaikuttavat aktiivisten galaksien ominaisuuksiin joko epäsuorasti tai suorasti. AGN:ien ominaisuudet ovat yhteydessä emogalaksinsa ominaisuuksiin ja niiden lukumäärä ja jakauma joukon sisällä riippuvat myös eri galaksipopulaatioiden jakaumista. Toisaalta ytimen aktiivisuuden ja siihen läheisesti liittyvän voimakkaan tähtituotannon lisääntymisen (eng. starburst) otaksutaan johtuvan AGN:ien/tähtiryöppygalaksien suorasta vuorovaikutuksesta ympäristönsä kanssa. Tähtiryöppyaktiivisuuden on yleisesti hyväksytty aiheutuvan gravitaation aiheuttamista vuorovesiefekteistä [207][176], mutta Seyfert/kvasaariaktiivisuuden tapauksessa vuorovesivoimien osuus ytimen aktiivisuuteen on kiistanalaisempi. Useat tutkimukset ovat tutkineet aktiivisten galaksien ympäristöjen tiheyksiä ja verranneet niitä passiivisten ja tähtiryöppygalaksien ympäristöihin. Osa tutkimuksista on esittänyt Seyfert/kvasaarien ympäristöjen olevan alitiheitä kirkkaiden galaksien osalta passiivisten galaksien ympäristöihin verrattuna [39] [125] kun taas toiset ovat havainneet AGN:ien ja passiivisten galaksien ympäristöjen kasautumisvoimakkuuden (eng. clustering strength) vastaavan toisiaan aina  $< 100$  kpc kokoskaalasta useisiin megaparsekeihin asti [123]. Yleisesti hyväksytyn käsityksen mukaan AGN:t/kvasaarit esiintyvät tavallisimmin keskitiheissä joukoissa massiivisimpia ja rikkaimpia joukkoja vältellen [80] [179]. Koulouridis (2018) [113] havaitsi AGN:ien ylimäärän vähemmän massiivisten galaksijoukkojen reuna-alueilla sekä antikorraation AGN:ien aktiivisuuden ja galaksijoukkojen massan välillä. He tulkitsivat

massiivisilla joukoilla aktiivisten galaksien pienemmän osuuden johtuvan massiivisten joukkojen syvemmän gravitaatiopotentiaalin vaikuttavan aktiivisuuteen sekä korkeamman nopeusdispersion vaikuttavan osaltaan galaksien sulautumisiin. Arnold et al. 2009 havaitsi röntgenvalittujen AGN:ien osuuksia (eng. AGN fractions) köyhissä ja rikkaissa joukkoympäristöissä myöhäisen ja varhaisen tyyppin galaksipopulaatioita vertaillen. He havaitsivat AGN:ien osuuden olevan suurempi köyhissä, vähemmän tiheissä ympäristöissä molemmille galaksipopulaatioille. AGN:ien osuudet eivät heidän mukaansa riippuneet galaksipopulaatioiden morfologioiden vaihtelusta joukkoympäristöjen välillä, vaan sekä varhaisen että myöhäisen tyyppin galakseilla oli suurempi todennäköisyys olla AGN:ien emogalakseina köyhemmässä ympäristössä. Silverman et al. (2008)[178] tutki suuren kokoskaalan rakenteiden vaikutusta AGN:ien emogalaksien värijakaumiin ja havaitsi jakauman olevan vahvasti riippuvainen 10 Mpc:n kokoskaalan rakenteista. Coldwell et al. (2009) [37] havaitsivat heidän tutkimansa sinisen AGN:ien lähiympäristön olevan identtinen sinisen passiivisten galaksien naapuruston kanssa. Punaisessa AGN:-ympäristössä he sitä vastoin havaitsivat ylimäärän sinisiä tähtiämuodostavia galakseja. Aktiivisten galaksien yhtenäismallin perusteella eri AGN-tyyppien Sy1 ja Sy2 välillä ainoa erottava tekijä on kohteen orientaatio, jolloin tyyppin 1 ja 2 Seyfertien ympäristöjen ei tulisi erota toisistaan. Sorrentino et al. (2006) [186] tarkastelivat galakseja SDSS:n 4. datajulkaisun pohjalta punasiirtymävälillä  $0,05 \leq z \leq 0,095$  eivätkä kyenneet havaitsemaan eroja kahden Seyfert-tyypin suuren kokoskaalan ympäristöissä. Kolouridis et al. (2006) [112] ja Strand et al. (2008) [187] tutkivat Seyfert-galaksien ympäristöjä väleillä  $0,004 \leq z \leq 0,036$  ja  $0,11 \leq z \leq 0,6$ . He sitä vastoin löysivät ylimäärän seuralaisgalakseja Sy2-galakseilla. Varhaiset tutkimukset osoittivat kvasaarien olevan selvästi voimakkaasti ryhmittyneinä (eng. more strongly clustered) passiivisiin galakseihin nähden, mikä viittasi myös niiden paikallisten ympäristöjen ylitheyteen korkeampien ylitheyksien ollessa tyyppillisesti matalampia ylitheyksiä voimakkaam-

min ryhmittyneinä [174] [42]. Kuitenkin uudemman sukupolven kartoituksiin (2dF ja SDSS) perustuvien tutkimuksien mukaan kvasaarit  $z < 0,2$  näyttävät systemaattisesti välttelevän korkean tiheyden alueita ja niiden alitiheät, keskimääräiset ympäristöt tyypillisesti vastaavat normaalien galaksien ympäristöjä [36] [125]. Toisaalta kvasaarien  $z < 0,4$  on myös havaittu sijaitsevan ylitiehillä alueilla suhteessa passiivisiin galakseihin kokoskaalan  $25 \text{ kpc} - 1 \text{ Mpc}$  ympäristöissä ylitheyden maksimin sijoittuessa  $\sim 100 \text{ kpc}$  ja laskevan monotonisesti  $1 \text{ Mpc}$  asti, jossa tiheydet vastaavat keskimääräisiä passiivisten joukkojen tiheyksiä [172]. Karhunen et al. 2014 ja Bettoni et al. 2017 vertailivat kvasaarien suuren kokoskaalan ympäristön galaksien ja passiivisen vertailujoukon galaksien ylitiehyksiä eivätkä löytäneet tilastollisesti merkittäviä poikkeamia näiden väliltä [22] [105]. Myöskään merkittäviä korrelaatioita kvasaarin ympäristön ylitheyden ja punasiirtymän, kvasaarin luminositeetin, radioluminositeetin tai mustan aukon massan välillä ei löydetty [105]. Pienen kokoskaalan ympäristöissä kvasaarien emogalaksien värit eivät myöskään näyttäneet eroavan passiivisen vertailuotoksen galaksien väreistä [105]. Bettoni et al. 2017 kuitenkin havaitsi kvasaarin välittömän lähiympäristön olevan hieman sinisempi passiivisten galaksien lähiympäristöön nähden. Kvasaarien emogalaksien keskimääräiset värit:  $(g - i)$ ,  $(r - i)$ ,  $(u - g)$  eivät sitä vastoin eronneet passiivisten galaksien väreistä [22]. Yleisesti ottaen useiden viimeaikaisten tutkimusten valossa korrelaatioiden puute kvasaarien ominaisuuksien ja niiden ympäristön välillä näyttäisi viittaavan ympäristön vuorovaikutuksella olevan luultua pienempi rooli kvasaarien kehityshistoriassa. Tämä voisi viitata sekulaarin evoluution vastaavasti suurempaan rooliin kvasaarin aktiivisuuden aikaansaajana.

## 3 Tutkimusanalyysi

### 3.1 Galaksidata SDSS-III DR12

Sloan Digital Sky Survey (SDSS), joka aloitti toimintansa huhtikuussa 2000 on DR12 julkaisemisajankohtaan mennessä mitannut yli viiden miljoonan astronomisen kohteen spektrin kartoittaen yli kolmanneksen taivaanpallosta. Kartoituksissaan SDSS käyttää 2,5 metrin laajan kuvakentän teleskooppia [88], alkuperäistä ja päivitettyä monikohteista optista spektrografia, lähi-infrapunan aallonpituusalueen korkean resoluution spektrografia ja uudenlaista optista interferometria.

SDSS-III 12. datajulkaisu (DR12) [3] sisältää kaikkiaan 584 449 galaksin tietokannan mukaan lukien galaksien mitatut spektrit filterien kattaessa viidellä kaistalla ( $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$ ) koko CCD:n herkkyysalueen. SDSS Legacy surveyn Main Sampleen [208] perustuva DR12 on näennäisen magnitudin perusteella rajoitettu spektroskooppinen otos Petrosian magnitudirajalla  $r_{\text{lim}} < 17,77$ . Kosmisen mikroaaltotaustan mukaan korjatuille etäisyyksille punasiirtymäraja asetettiin  $z < 0,2$ .

### 3.2 Kvasaaridata SDSS-IV DR14

SDSS-IV uusin, päivitetty kvaasariluettelo (DR14)[145] sisältää SDSS-IV ja eBOSS -kohteet kaikista aikaisemmista SDSS:n vaiheista I-IV. Kohteet ovat spektroskooppisesti luokiteltu kvaasarikandidaateiksi ja myöhemmin varmistettu kvaasaareiksi uuden automaattisen tunnistusmenetelmän avulla yhdessä spektrin silmämääräisen arvioinnin kanssa. Kvaasariotokseen on sisällytetty kohteet, joiden luminositeetit  $M_i$   $z = 2 < -20,5$  ( $\Lambda$ CDM-kosmologiassa, kun  $H_0 = 70 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_M = 0,3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0,7$ ) ja joiden spektri sisältää joko vähintään yhden emissioviivan, jonka puoliarvoleveys  $\text{FWHM} > 500 \text{ kms}^{-1}$  tai mielenkiintoisia tai monimutkaisia absorptiopiirteitä. DR14Q-katalogi sisältää kaikkiaan 526 356 kvaasaria, joista 387 223 tunnistettiin silmämääräisesti ja 139 133 luokiteltiin automaattisen tunnistusmenetelmän

avulla. Jokaiselle kohteelle katalogi sisältää viisikaistaisen optisen aallonpituusalueen kattavan  $(u, g, r, i, z)$  CCD-pohjaisen fotometrian lisäksi kvasaarien röntgen-, ultravioletti-, lähi-infrapuna-, ja radioemissio-ominaisuuksia osalle kohteista kerättyinä muista laajanalueen kartoituksista.

### 3.3 FoF-algoritmi ja joukot

Galaksijoukkojen etsimiseen ja tunnistamiseen käytetty Friends of Friends -algoritmi (FoF), jonka ensimmäisinä käyttöön ottivat Turner & Gott (1976)[198], Huchra & Geller (1982)[100] ja Zeldovich et al. (1982)[210]. Yksinkertaisuudessaan se on yksi laajimmin käytetyistä työkaluista galaksijoukkojen etsimisessä. Sovellettaessa FoF-algoritmia punasiirtymäavaruudessa ilmoitettuihin galaksikatalogin arvoihin ainoat vapaat parametrit ovat sidospituuden (eng. Linking Length) taivaantason suuntainen ja radiaalinen komponentti. Sidospituudet kalibroidaan usein simulaatioiden avulla [58] [164] tyypillisten etäisyyksien ollessa  $b_{trans} \sim 0,1$  ja  $b_{rad} \sim 1,0$  galaksien keskimääräisen välimatkan yksikköinä ilmaistuna.

Työssä sidospituuden laskemisessa vuorajoitetun SDSS-IV-katalogin pohjalta käytettiin poikittaisen (taivaantason suuntaisen) sidospituuden laskemisessa etäisyyden mukaan skaalautuvaa arctan-lakia [190]

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

missä  $d_{LL,0}$  on sidospituus, kun  $z=0$  ja  $a$  ja  $z_*$  ovat vapaita parametrejä. Käytetyt parametrien arvot  $d_{LL,0} = 0,34$  Mpc,  $a = 1,4$  ja  $z_* = 0,09$  perustuvat niin ikään [190] lähigalaksijoukkojen avulla skaalattuihin arvoihin. Finger of God -valintaefektin vaikutus otettiin korjaustermin avulla huomioon sidospituuksia laskettaessa. Transveraalisen ja radiaalisen sidospituuden suhteeksi  $b_{rad}/b_{trans}$  valittiin tyypillisen 10 sijaan 12 [191].

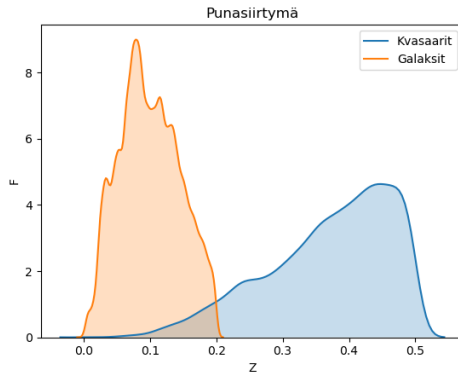
Tutkimuksessa käytetty vuorajoitettu galaksijoukkokatalogi [192] sisälsi alunpe-

rin kaikkiaan 88 662 joukkoa. Koska tutkimusanalyysissä vertailtavat galaksijoukkojen kinemaattiset suureet, kuten viriaalisäde, viriaalimassa ja nopeusdispersio ovat epävarmoja kaikkein köyhimmille joukoille jätettiin alle viiden galaksin joukot kinemaattisten suureiden vertailun ulkopuolelle. Enemmistö alkuperäisen katalogin joukoista oli köyhiä; joukkojen kokonaismäärästä (88 662) 78 596 oli rikkaudeltaan  $< 5$ , joten kaikkiaan 10 066 galaksijoukkoa selviytyi lopulliseen vertailuun.

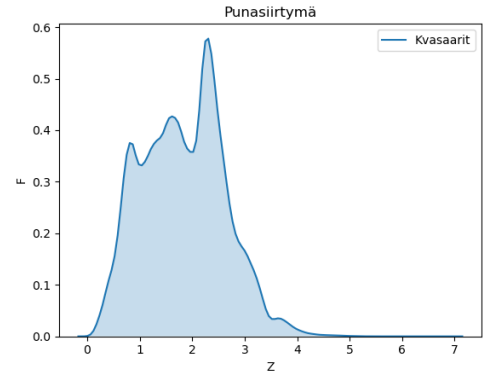
### 3.4 Punasiirtymäkorjaus ja comoving etäisyyden laskeminen

Kvasaarien mitatut punasiirtymät  $z_{\text{obs}}$  muunnettiin heliosentrisestä CMB-keskeiseen viitekehykseen, jolloin havaitsijan pekuliäärinopeuden vaikutus saatiin eliminoitua pois ja kohteiden kosmologisen punasiirtymän  $z_{\text{CMB}}$  ratkaisemiseksi. Kvasaarien kosmologisten punasiirtymien arvojen laskeminen kosmisen taustasäteilyn suhteen suoritettiin Tempel et al. (2017) käyttämän menetelmän avulla [192]. Saadut kvasaarien  $z_{\text{CMB}}$ :n arvot muunnettiin comoving-etäisyyksiksi käyttämällä python-ohjelmointikielen Astropy-ohjelmointipaketin muunnoskoodia.

Työssä käytettiin FoF-algoritmille perustuvaa menetelmää, jonka avulla kvasaarit yhdistettiin ensin yksilöllisen sidospituutensa avulla galaksijoukkojen lähimpiin galakseihin ja myöhemmin SDSS DR12-joukkokatalogia apuna käyttäen kvasaarien joukot täydennettiin lopulliseen kokoonsa. DR14Q-kvasaari-, DR12-galaksi- ja galaksijoukkokatalogien tuloksien pohjalta muodostettiin uusi katalogi, johon kvasaarien joukkojen ja joukkoon kuuluvien galaksien vertailtavat ominaisuudet kootiin. Tutkimuksessa tarkastellulla punasiirtymäalueella  $z < 0,1$  alkuperäisten SDSS-katalogien kvasaarien ja galaksien etäisyysjakaumat huiput asettuivat merkittävästi eri punasiirtymän arvoille, jolloin kvasaarien ja galaksien etäisyysjakaumat eivät punasiirtymäalueella  $z < 0,1$  asettuneet kuin osittain päällekkäin, mikä rajoitti merkittävästi uuden katalogin kvasaarien, joukkojen ja galaksien määrää. Punasiirtymäjakaumien erot ovat esitettyinä kuvassa 8 ja kvasaarien punasiirtymät kokonaisuudessaan ku-



Kuva 8. Galaksien ja kvasaarien punasiirtymäjakaumat väleillä  $z < 0,2$  ja  $z < 0,7$ .



Kuva 9. Alkuperäisen katalogin (SDSS-IV DR14) kvasaarien punasiirtymäjakauma välillä  $z = 0 - 7$

vassa 9. Punasiirtymän rajauksen lisäksi kvasaariluettelosta karsittiin kohteet, jotka sijaitsivat selvästi eri taivaanalueilla galakseihin nähden. Karsiminen tehtiin kvasaareille, joiden rektaskension arvot sijoittuivat välin  $100 < RA < 270$  ulkopuolelle. Yhdistettyä galaksi- galaksijoukko- ja kvasaariluetteloa ja FoF-algoritmin soveltamista varten valikoitui lopulta yhteensä 598 kvasaaria.

### 3.5 Galaksi- ja kvasaarikatalogien yhdistäminen

Kvasaarien liittäminen galakseihin ja joukkoihin toteutettiin käytännössä ensin laskemalla jokaisen galaksin taivaantason etäisyys yksittäiseen kvasaariin ja saatua etäisyyttä (kulmaeroa) verrattiin kullekin kvasaarille ominaiseen sidospituuteen. Toimenpide toistettiin erikseen jokaiselle vertailuotoksen kvasaarille ja lopuksi saadut kvasaari-galaksiparit rajattiin syvyysuunnassa 12 sidospituuden syvyisen sylinterinmuotoisen tilavuuden sisään, jolloin sisäänjäävien galaksien voidaan katsoa kuuluvaksi samaan joukkoon kvasaarin kanssa.

Kvasaari-galaksi-parien taivaantason etäisyydet laskettiin kohteiden taivaankoordinaattien rektaskension (R.A.) ja deklinaation (Dec) avulla yhdessä kvasaarin kulmaläpimittaetäisyyden kanssa, jolloin saatuja kolmiulotteisia taivaantason etäisyyksiä kvasaarin ja galaksin välillä voitiin verrata kvasaareille laskettuihin sidospituuk-

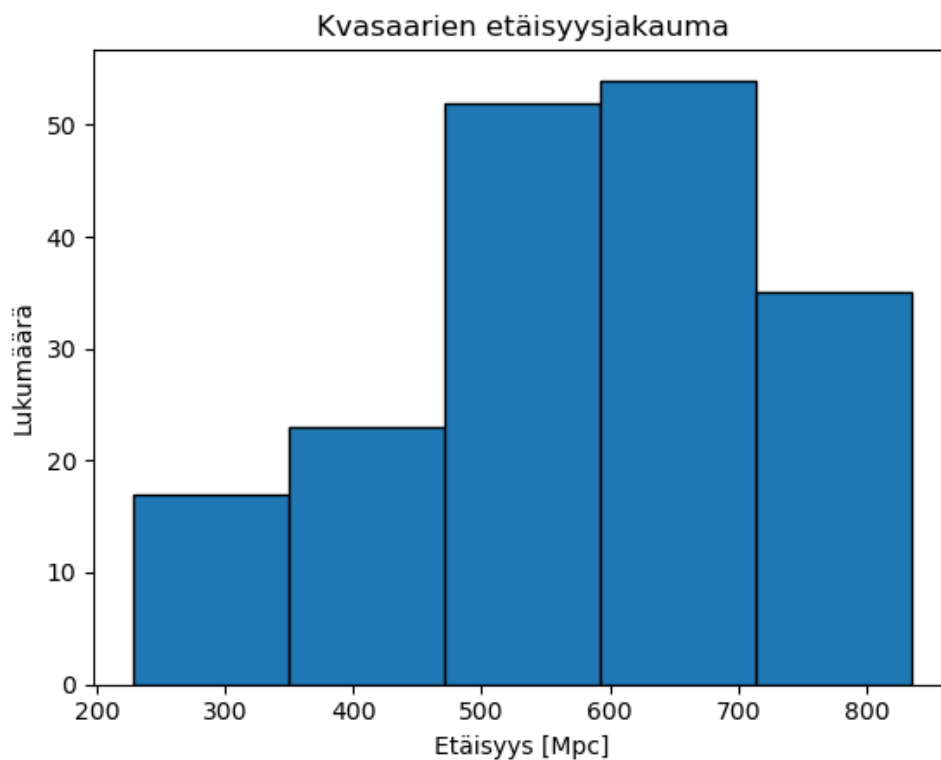
siin. Saaduista kvasaari-galaksipareista rajattiin pois ne parit, jotka jäivät radiaalissa suunnassa kauemmaksi kuin 12 sidospituuden päähän kvasaarista.

Yleisesti ottaen FoF-algoritmi ei välttämättä pysty tunnistamaan lähellä toisiaan sijaitsevia tai sulautuvia joukkoja erillisiksi galaksijoukoiksi mikä aiheuttaa epävarmuutta tuloksiin. Lopullisesta vertailuanalyysistä karsittiin pois tapaukset, joissa sama kvasaari yhdistyi useampaan kuin yhteen galaksijoukkoon. Niin ikään usean kvasaarin sisältämät galaksijoukot oli tarpeen erotella kvasaari-galaksi-luettelosta. Tällaisia tapauksia ei algoritmi kuitenkaan löytänyt. Nämä erikoistapaukset oli mahdollista määrittää katalogista vertailemalla kvasaarien ja joukkojen tunnistenumeroita toisiinsa. Lisäksi osa kvasaareista esiintyi kohteina sekä galaksi- että kvasaari-luetteloissa. Nämä duplikaatit tunnistettiin vertailemalla kvasaarin ja galaksin välistä kulmaeroa taivaan tasolla. Kulmaerolla  $< 10^{-5}$  astetta olevat kvasaarit ja galaksit, joiden koordinaatit (R.A. ja Dec) ja punasiirtymä olivat identtiset tunnistettiin samoiksi kohteiksi. Tämä oli mahdollista visuaalisen tarkastelun avulla SDSS finding chart -työkalua apuna käyttäen. Galaksiluettelosta tunnistettiin SDSS finding chart -työkalun avulla minimietäisyys, jolla kaksi kohdetta (kvasaari ja galaksi) oli mahdollista silmämääräisesti tunnistaa erillisiksi kohteiksi. Kulmaero  $10^{-5}$  astetta vastasi minimietäisyysrajaa, jolla (kuvassa osittain jo päällekkäiset) kohteet juuri erotti toisistaan. Tätä kulmaeroa pienemmillä arvoilla kahta erillistä kohdetta ei pystynyt enää tunnistamaan, joten tapaukset luokiteltiin sekä galaksi- että kvasaarikatalogissa esiintyviksi duplikaateiksi. Näitä kohteita löytyi kaikkiaan seitsemän kappaletta ja ne poistettiin yhdistetystä luettelosta. Lopullinen kvasaarikatalogi sisälsi lopulta yhteensä 88 kvasaaria ja joukkoa sekä 400 galaksia. Alkuperäisten SDSS-datakatalogien ja lopullisen yhdistetyn katalogin sisältämien kvasaarien, galaksien ja galaksijoukkojen kokonaismäärät on kerättynä taulukkoon I.

Työssä tutkittiin galaksi- ja kvasaarijoukkojen dynaamisten, kinemaattisten ja fotometrinen ominaisuuksien sekä näiden ympäristöjen välisiä korrelaatioita. Ver-

tailua suoritettiin niin joukkojen kollektiivisten (kinemaattisten) ominaisuuksien kuin joukkojen sisäisten, yksittäisten galaksien (fotometrisien) ominaisuuksien välillä. Tutkittavat parametrit: viriaalimassat ( $m_{200}$ ), nopeusdispersiot ( $\sigma$ ), viriaalisäteet ( $r_{200}$ ), joukon rikkaudet, galaksiympäristön tiheydet, r-luminositeettijakaumat,  $g - r$ -väri-indeksit sekä  $g - r$ -väri-indeksin riippuvuus r-luminositeetista galaksijoukoissa esitettiin graafisesti tiheyskuvaajien ja -histogrammien avulla. K- ja ekstinktiokorjattujen  $u-$ ,  $g-$ ,  $r-$ ,  $i-$ ,  $z-$ kaistojen absoluuttisen magnitudien avulla muodostettiin  $g - r$ -väri-indeksi, joiden jakaumaa vertailtiin kvasaarijoukkojen ja galaksijoukkojen yksittäisten galaksien välillä. Joukkojen välisten värijakaumien eroja havainnollistettiin laskemalla keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe sekä KS-testin perusteella  $p$ -arvo  $g - r$ -kaistalla. Havaintobias-efektien eliminoimiseksi galaksi ja galaksijoukkojen vertailu pyrittiin toteuttamaan siten, että vertailuotosten punasiirtymäjakaumat olisivat mahdollisimman samanlaisia ja vertailuotoksiin valikoituksi kohteita mahdollisimman tasaisesti koko etäisyysalueelta  $0 < z < 0,2$ . Tämä toteutettiin ensin kuvaamalla kvasaarien punasiirtymä-/etäisyysjakauma pylväsdiagrammimuodossa ja valitsemalla pylväiden binit sopivasti siten, että kvasaarien kokonaismäärä jakautuu mahdollisimman tasaisesti etäisyysvälin kesken ja kunkin intervallin alueella "riittävä" määrä kvasaareja ( $> 15$ ). Kvasaarien etäisyysbinin sekä kvasaarien määrät kunkin etäisyysintervallin sisällä on esitettynä kuvassa 10. Sekä kinemaattisten että fotometristen ominaisuuksien vertailussa kultakin etäisyysväliltä valittiin kooltaan mahdollisimman suuri satunnaisotos jakaumien satunnaisvaihtelun minimoimiseksi. Galaksijoukkoja ja näiden kinemaattisia ominaisuuksia tarkasteltaessa satunnaisotoksen maksimikoko jouduttiin rajaamaan melko pieniin satunnaisotokokoihin ( $n=50$  kullakin etäisyysintervallilla). Tämä ei kuitenkaan aiheuttanut merkittävää satunnaisvaihtelua jakaumissa. Fotometristen ominaisuuksien (yksittäisien galaksien suuremman otoskoon johdosta) vertailuotoksen satunnaiskoko oli laajemman otoskoon vuoksi mahdollista valita huomattavasti suuremmaksi ( $n=5000$ ). Tä-

män jälkeen satunnaisotokset liitettiin yhteen ja niistä muodostettiin kvasaarien vertailuotos. Ko. tavalla koostettua vertailuotosta käytettiin tutkimuksessa aina galaksijoukkojen välisien fotometrisien ja kinemaattisten ominaisuuksien vertailuissa.



Kuva 10. Kvasaarien etäisyysjakauma, jota käytettiin vertailuotoksien eri etäisyyksistä johtuvan havaintobiaksen eliminoinniseksi. Tutkimusanalysissä käytetyt galaksien ja galaksijoukkojen otokset valittiin satunnaisotoksella kuvassa esiintyviltä etäisyysväleiltä (bineiltä).

	<b>Kvasaarit</b>	<b>Galaksit</b>	<b>Joukot</b>	<b>Joukot (<math>N \geq 5</math>)</b>
<b>SDSS-data</b>	526 356	584 449	88 662	10 066
<b>Yhd. katalogi</b>	88	400	88	22

Taulukko I. Yhteenvedo alkuperäisen SDSS-datan ja lopullisen yhdistetyn katalogin sisältämien kvasaarien, galaksien sekä joukkojen määristä. Viimeinen pystysarake kuvaa rikkaudeltaan yli viiden galaksijoukkojen kokonaismäärää.

### 3.6 Galaksijoukkojen vertailu

Tutkimuksessa kinemaattisia ominaisuuksia (viriaalisäde, viriaalimassa, nopeusdispersio) ja joukkojen rikkauksia vertailtiin kvasaarien joukkojen ja passiivisten galaksijoukkojen välillä. Näiden lisäksi joukkojen välisiä keskimääräisiä ympäristön tiheyksiä vertailtiin eri tasoituskaaloilla (eng. smoothing scale) 1,5 ja 10 Mpc. Keskimääräiset ympäristön tiheydet ovat laskettu luminositeetti tiheyskentän perusteella soveltaen yksittäisten galaksien jakauman sijaan allaolevaan tiheyskenttään tasattua (eng. smoothed) galaksi-/joukkojakaumaa sopivalle ytimelle (eng. kernel) ja tasauspituudelle (eng. smoothing length) [189]. Kvasaarien asuttamien ja passiivisten joukkojen sisältämien galaksien fotometrisiä ominaisuuksia:  $g-r$ -värijakaumaa,  $r$ -kaistan luminositeetin ja  $g-r$ -väri-indeksin suhdetta ja  $r$ -luminositeettijakaumaa tutkittiin paitsi passiivisten vertailugalaksijoukkojen osalta myös kvasaarien joukkojen sisäisten, kvasaarista taivaantasossa mitattuna lähimpien galaksien ( $\sim 0,5 - 1$  Mpc) ja kauempien ( $> 1$  Mpc) galaksien välillä. Näiden kvasaarien lähigalaksien ominaisuuksia vertailtiin myös tavallisten, passiivisten joukkojen jäsenten ominaisuuksiin.

Vertailtavien joukkojen galaksipopulaatioiden erojen tilastollista merkittävyyttä tutkittiin kahden otoksen Kolmogorov-Smirnov-testin (KS-testin) avulla. Saaduille viriaalimassojen, viriaalisäteiden, nopeusdispersioiden ja joukon tiheyden jakaumille sekä värijakaumille laskettiin  $p$ -arvot. Nämä arvot ovat esitettyinä taulukoissa II. Jakaumien erojen katsottiin olevan tilastollisesti merkittäviä valitun  $p$ -arvon (arvioitun todennäköisyyden, että jakaumat ovat tilastollisesti samanlaisia) ollessa sopivaa merkitsevyystasoa pienempiä  $p < 0,01$ .

Passiivisten galaksijoukkojen ja aktiivisten joukkojen jakaumien eroja viriaalimassoissa, viriaalisäteissä, nopeusdispersioissa, rikkausjakaumissa, ympäristön tiheyksillä ja  $r$ -luminositeeteissa on havainnollistettu esittämällä normalisoituna todennäköisyystiheysfunktiona pylväsdiagrammin muodossa. Edellä mainittujen suurten eroja havainnollistettiin myös laskemalla näiden keskiarvot ja keskiarvojen

keskivirheet.

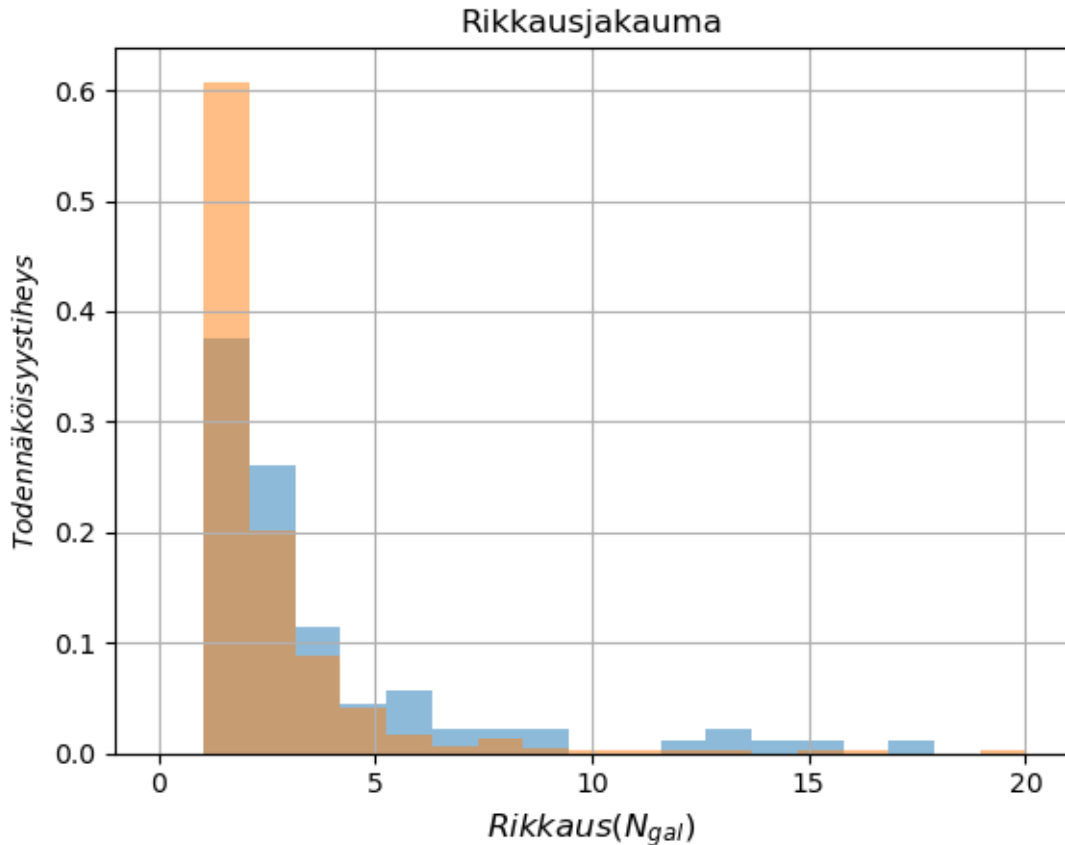
## 4 Tulokset

### 4.1 Galaksijoukkojen kinemaattiset ominaisuudet ja rikkaudet

Passiivisten galaksien tapaan myös kvasaarien joukkojen rikkaudet painottuvat voimakkaasti jakauman köyhään päähän. Kuitenkin selviä eroja rikkausjakaumissa on erotettavissa rikkausväleillä  $5 \leq N < 10$  sekä  $10 \leq N < 20$ . Molempien rikkausjakaumien erot ovat esitettynä tiheyshistogrammin muodossa rikkausjakaumien välillä 2-20 kuvaajassa 11. Kuvaajan ulkopuolelle jäävän osan, rikkaudeltaan  $>20$  olevien joukkojen määrä passiivisten galaksijoukkojen osalta laskee jokseenkin jyrkästi, mutta jatkuvasti rikkauden kasvaessa  $N \sim 250$  asti. Löydetyistä kvasaarien galaksijoukoista sitä vastoin ainoastaan yksi oli rikkaudeltaan  $>20$  sisältäen 43 jäsentä. Näin ollen havaittujen kvasaarien galaksijoukkojen rikkaudet vaihtelivat hyvin köyhistä köyhähköihin joukkoihin. Passiivisten galaksijoukkojen tapaan aktiivisten joukkojen rikkausjakauma painottuu voimakkaimmin hyvin köyhiin ( $<5$ ) joukkoihin. Kuitenkin rikkausjakaumissa on havaittavissa selvää eroa välillä rikkausvälillä  $5 < N < 15$ , jossa kvasaarien galaksijoukkojen prosentuaalinen osuus on selvästi suurempi passiivisten joukkojen rikkausjakauman laskiessa huomattavasti jyrkemmin. Toisaalta kvasaarit näyttävät lähes kokonaan puuttuvan joukoista, joiden rikkaudet ovat  $N > 20$ . Tähän löytyi vain yksi poikkeus, jossa yksittäisen kvasaarin galaksijoukko poikkesi muista rikkaudeltaan ( $N = 43$ ), kun k.o tapausta lukuun ottamatta rikkain joukko sisälsi vain 17 jäsentä. Passiivisten galaksijoukkojen vertailuotoksessa maksimirikkaus oli 254 ja rikkaudeltaan  $N > 100$  passiivisia joukkoja esiintyi vertailuotoksessa useita, vaikkakin ne olivat suuri otoskoko (88 000) huomioiden harvinaisia. Aktiivisten ja passiivisten tarkemmat suhteelliset osuudet eri rikkausväleillä on

esitettyinä taulukossa III. Aktiivisten ja passiivisten joukkojen suhteellisten osuuksien erot eri rikkausväleillä on esitettyinä taulukossa. Kvasaarien galaksijoukkojen maksimirikkauksien perusteella kvasaarit näyttäisivät välttelevän rikkaita joukkoja, joskin näiden rikkaiden joukkojen harvinaisuuden ja kvasaarien joukkojen pienehkön otoskoon vuoksi tilastollisen poikkeaman merkitystä ei voida täysin poissulkea. Joukkojen muiden kinemaattisten ominaisuuksien, kuten viriaalisäteiden, -massojen ja nopeusdispersioiden jakaumien välillä havaittavat erot kvasaarien ja passiivisten joukkojen välillä ovat yhdenmukaisia rikkausjakaumista saatujen tulosten kanssa. Vaikka em. suureiden otoksista oli rajattu pois alle viiden galaksin joukot voidaan viriaalisäteiden 12, viriaalimassojen 13 ja nopeusdispersioiden 14 kuvaajista havaita selviä eroja aktiivisten ja passiivisten joukkojen jakaumien välillä. Viriaalisäteiden ja nopeusdispersioiden jakaumien erot vertailtavien otosten välillä muistuttavat paljon toisiaan. Molemmissa tapauksissa aktiivisten jakaumien huippukohtat sijoittuvat hieman passiivista otosta suuremmille arvoille, jolloin jakaumien ollessa muodoltaan melko samanlaisia ovat aktiivisen joukot suhteelliset osuudet suurempia korkeilla nopeusdispersion arvoilla. Vastaavasti passiiviset joukot ovat tällöin voimakkaammin painottuneina pienillä nopeusdispersion arvoilla. Viriaalimassan jakaumat eroavat toisistaan sitä vastoin selvästi paitsi huippuarvonsa myös muotonsa perusteella. Passiivisen joukon massajakauma on selvästi leveämpi ja matalampi ja vailla selkeää huippukohtaa. Aktiivisen joukon massajakauma on kapeampi ja terävämpi joskin pienehköstä otoskoosta johtuen osin epäyhtenäinen ja muiden kinemaattisten suureiden tavoin painottuu passiivista jakaumaa korkeammille massan arvoille. Passiivinen massajakauma painottuu niinkään selvästi voimakkaammin pienille massan arvoille. Jakaumien eroja on kvantitatiivisesti havainnollistettu kaksipuoleisella KS-testillä, josta saatua p-arvoa verrattiin valittuun merkitsevyystason arvoon 0,01. Kinemaattisten suureiden p-arvot sekä keskiarvot ja -virheet ovat esitettyinä taulukossa II. Saatuja p-arvoja merkitsevyystasoon ( $p < 0,01$ ) verrattaessa voidaan

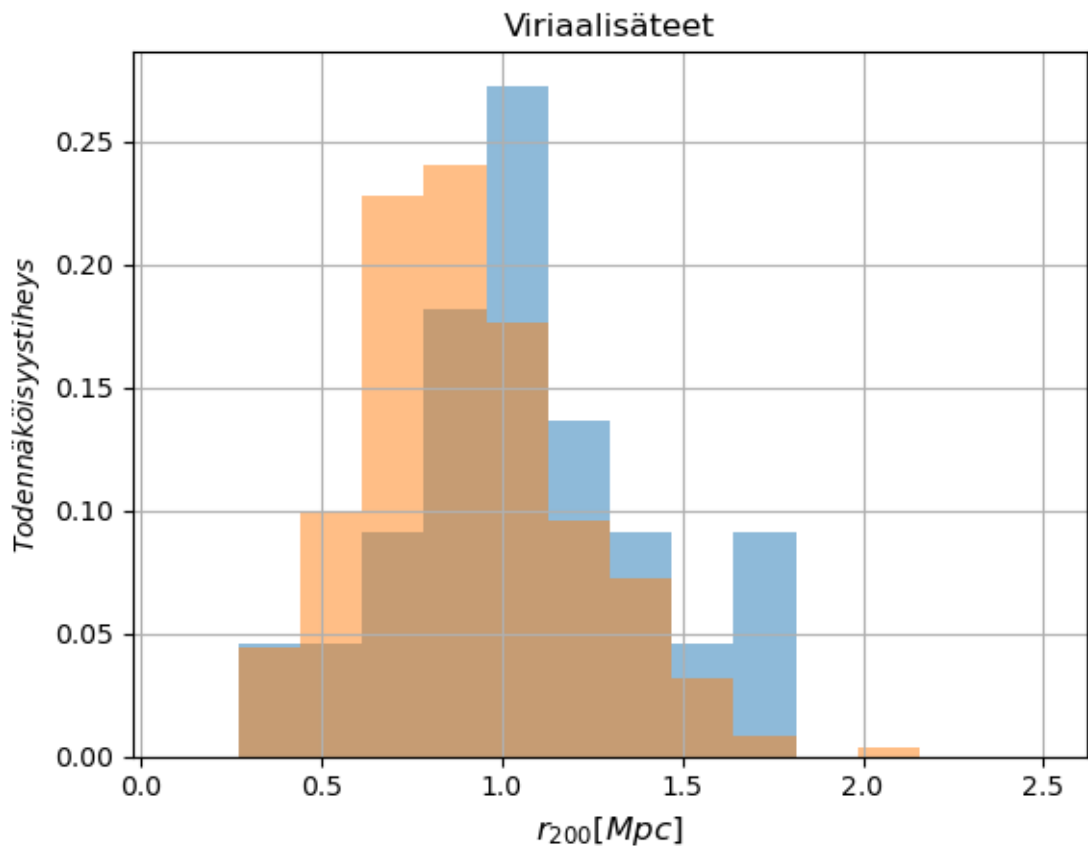
todeta että kinemaattisten suureiden ja tiheyksien eroja aktiivisten ja passiivisten galaksijoukkojen välillä voidaan pitää tilastollisesti merkittävänä näiden p-arvojen jäädessä selvästi alle merkitsevyystason.



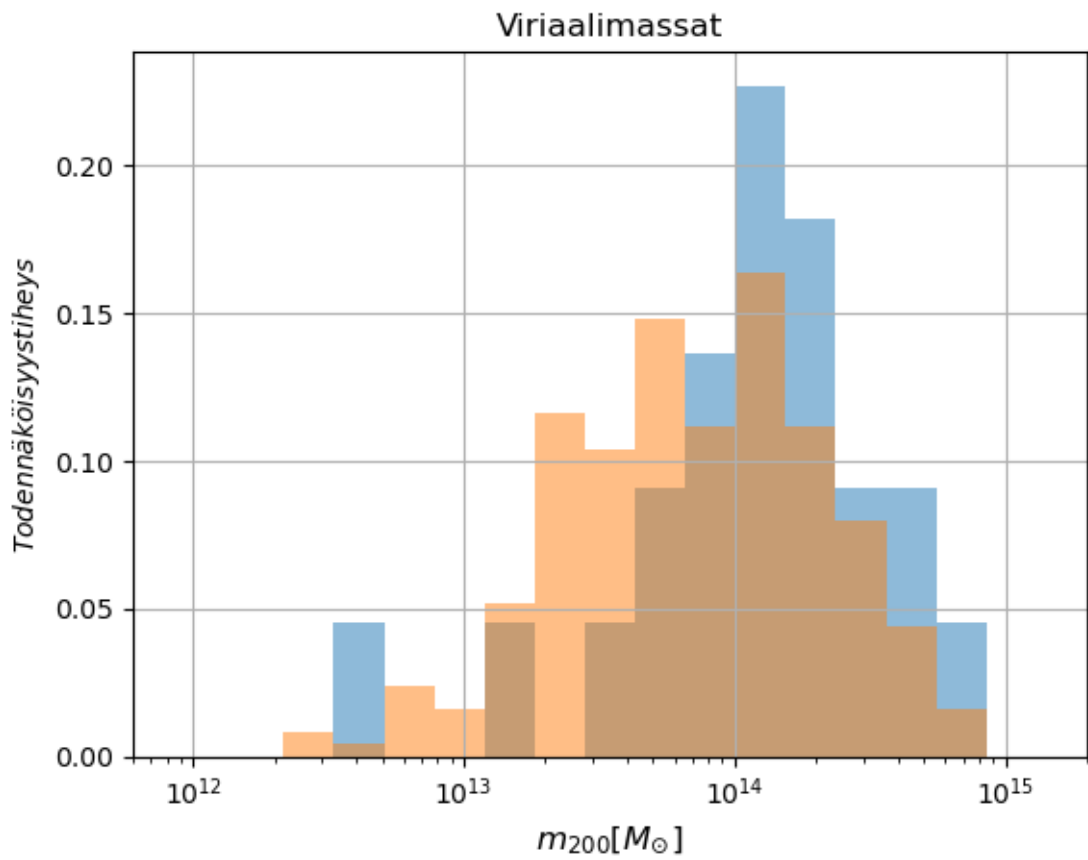
Kuva 11. Kvasaarien joukkojen ja passiivisten galaksijoukkojen rikkausjakaumat välillä 2-20.

## 4.2 Morfologiat

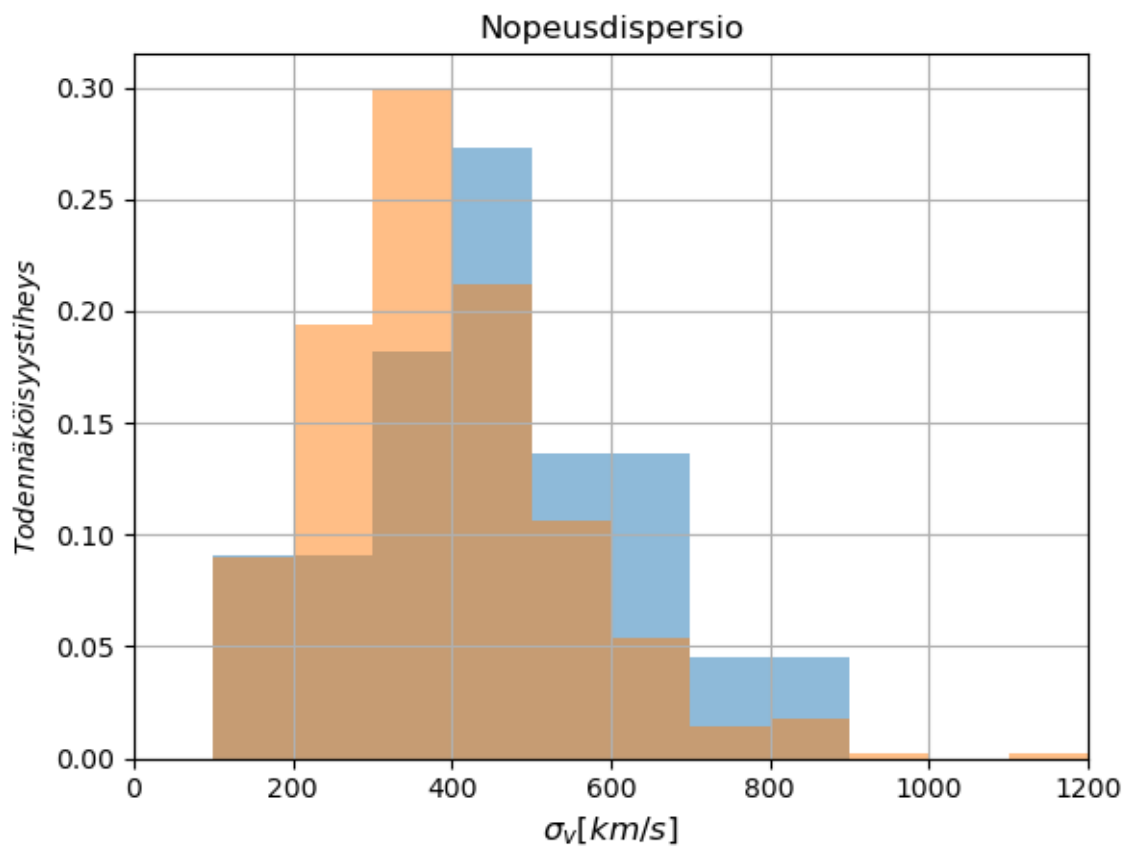
Morfologialuokittelussa käytettiin SDSS DR12 –katalogiin kerättyjä tuloksia [101], jotka oli koostettu käyttäen automatisoitua bayesilaista morfologialuokitusmetodia, joka määrää todennäköisyyden kunkin kohteen kuulumisesta neljään morfologia- luokkaan: elliptisiin, lentikulaaarisiin (S0) sekä varhaisen ja myöhäisen tyyppin spiraa- leihin Sab ja Scd. Analysoitaessa vertailtavien galaksijoukkojen jäsenten morfologia-



Kuva 12. Viriaalisäteet. Siniset pylväät kuvaavat kvaasarien sisältämiä galaksijoukkojen viriaalisäteiden jakaumaa ja oranssit pylväät joukkoja ilman kvaasareja. Pystyakselin asteikko on amplitudinormalisoitu korkeimman pylvään suhteen.



Kuva 13. Viriaalimassat. Siniset pylväät kuvaavat kvasaarien sisältämiä galaksijoukkojen viriaalimassojen jakaumaa ja oranssit pylväät joukkoja ilman kvasaareja. Pystyakselin arvot on ilmaistu todennäköisyystiheyden muodossa.



Kuva 14. Nopeusdispersio. Siniset pylväät kuvaavat kvasaarien sisältämiä galaksi-joukkojen nopeusdispersion jakaumaa ja oranssit pylväät joukkoja ilman kvasaareja. Pystyakselin asteikko on amplitudinormalisoitu korkeimman pylvään suhteen.

Suure	Akt.	Akt.	Pass.	Pass.	p-arvo
	ka.	S	ka.	S	
$r_{200}$ [Mpc]	1,06	0,07	0,78	0,003	0,0004
$m_{200}$ [ $10^{12} \cdot M_{\odot}$ ]	188,52	37,12	84,06	1,13	0,0003
$\sigma$ [ $\text{km s}^{-1}$ ]	453,57	36,93	326,81	1,47	0,001
$\rho_{1,5}$	372,87	35,41	222,18	1,50	$1,08 \cdot 10^{-7}$
$\rho_{10}$	5,81	0,42	4,17	0,02	0,0003

Taulukko II. Joukkojen kinemaattiset ominaisuudet. Taulukossa on esitettyä aktiivisten (Akt.) ja passiivisten galaksijoukkojen (Pass.) viriaalisäteiden  $r_{200}$ , viriaali-massojen  $m_{200}$ , nopeusdispersion  $\sigma$  ja normalisoidun ympäristön tiheyden  $\rho$  jakau-mien keskiarvot (ka.), keskivirheet (S) ja Kaksipuoleisen KS-testin p-arvot.

	$N < 5$	$5 \leq N < 10$	$10 \leq N < 20$
<b>Akt. [%]</b>	$\sim 75$	$\sim 17$	$\sim 8$
<b>Pass. [%]</b>	$\sim 89$	$\sim 9$	$\sim 2$

Taulukko III. Aktiivisten (Akt.) ja passiivisten (Pass.) galaksijoukkojen osuudet eri rikkausväleillä.

luokkien jakaantumista galaksiotoksissa jaettiin neljä morfologialuokkaa (E, S0, Sab, Scd) kahteen osaan: varhaisen (E, S0) ja myöhäisen tyyppin (Sab, Scd) galakseihin, joiden suhteellisia osuuksia vertailuotoksissa tutkittiin. Vertailuotoksista jätettiin pois pieni osa galakseja, joiden morfologiatyyppiä ei pystytty kunnolla määrittelemään. Vähentämällä vertailuotoksien etäisyysjakaumien eroista aiheutuvan havaintobiaksen vaikutuksen havaittiin kvasaarien galaksijoukoissa varhaisen tyyppin galaksien (E, S0) suhteellisen osuuden olevan selvästi suurempi ja vastaavasti myöhäisen tyyppin galaksien osuuden olevan pienempi suhteessa passiivisiin vertailujoukkoihin. Varhaisen ja myöhäisen tyyppin galaksien suhteelliset osuudet aktiivisissa joukoissa olivat 0,46 ja 0,32 ja passiivisissa joukoissa vastaavasti 0,41 ja 0,36.

### 4.3 Galaksijoukkojen fotometriset ominaisuudet, tiheydet ja $r$ -luminositeetit

Kvasaarien Megaparsek-kokoskaalan galaksiympäristöä ( $d < 1$  Mpc) tutkittiin fotometrinen vertailuotosten osalta kvasaarien galaksijoukkojen lähimpien jäsenten väri-indeksien  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $g-i$ ,  $r-i$  ja  $r-z$ -jakaumaa,  $r$ -luminositeettijakaumaa sekä  $g-r$ -väri-indeksin ja  $r$ -luminositeetin suhdetta. Vertailuotoksina käytettiin paitsi kvasaaria lähimpiä galakseja (0,59–0,88 Mpc etäisyydellä) myös galaksijoukkoja kokonaisuudessaan. Näitä kahta otosta verrattiin edelleen passiivisten galaksijoukkojen ominaisuuksiin. Lisäksi jakaumien mahdollisia eroja tutkittiin kvasaarien joukkojen sisällä näitä lähimpien ( $d < 1$  Mpc) ja kauempien ( $d > 1$  Mpc) galaksien osalta. Useiden eri kaistojen  $u-g$ ,  $g-r$ ,  $g-i$ ,  $r-i$ , ja  $r-z$ -jakaumia tutkittiin ja vertailtiin em. vertailuotosten välillä. Satunnaisotoksen valinnasta johtuva vaihtelu vaikeutti erityisesti väri-indeksijakaumien tulkintaa. Passiivisten joukkojen  $g-r$ -värijakauma on painottuneena hieman enemmän siniselle puolella ja aktiivisten joukkojen värijakauma vastaavasti punaiselle puolelle, mutta tässä havaittavat pienet erot eivät ole juurikaan satunnaisvaihtelua suurempia (kuva 15). Eroja  $g-r$ -värissä kvasaarien joukkojen lähimpien jäsenten ja kauempien välillä ei löytynyt. Myös  $g-r$ -väri-indeksin suhdetta  $r$ -luminositeettiin tarkasteltiin aktiivisten joukkojen lähimpien ( $d < 1$  Mpc) sekä etäisempien jäsenten välillä (kuva 19) ja aktiivisten joukkojen lähimpien jäsenten ja passiivisten vertailujoukkojen jäsenten (kuva 20) välillä. Molemmissa tapauksissa kummassakin vertailujoukossa oli havaittavissa heikohko positiivisen korrelaatio, mutta eroa vertailtavien joukkojen galaksijakaumissa ei havaittu.

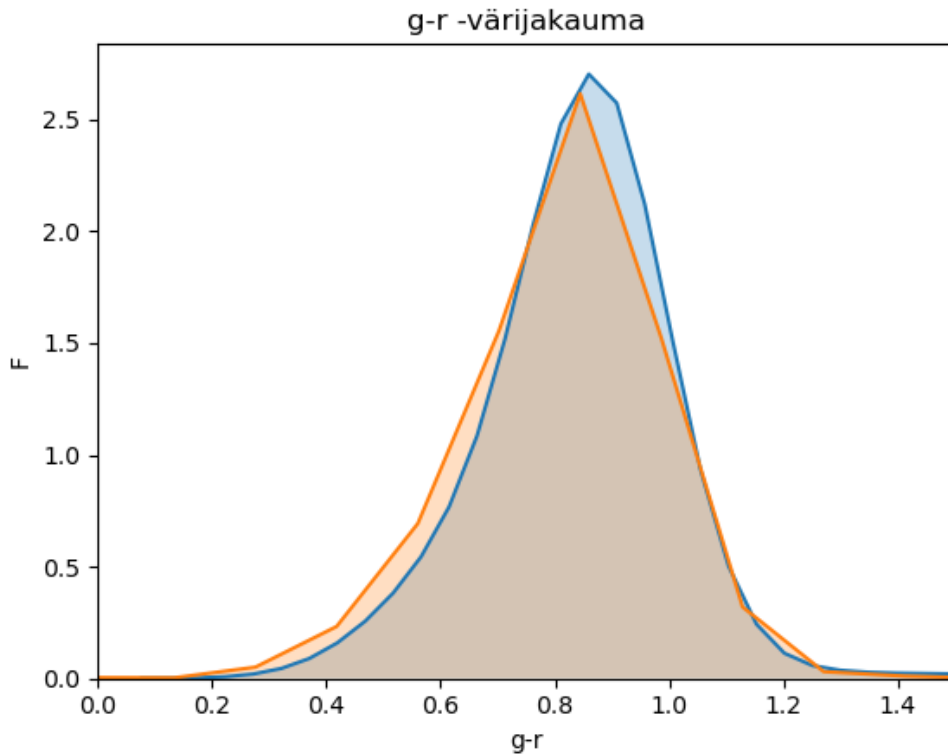
$r$ -luminositeetin ja  $g-r$ -värijakauman välinen yhteys on esitettyä joukoissa kvasaareja lähimmille galakseille vertailemalla näitä joukon etäisempiin sekä passiivisiin galaksijoukkoihin. Molemmissa tapauksissa on havaittavissa kohtalainen positiivinen korrelaatio molemmilla jakaumilla, jonka perusteella passiiviset näyttäisi-

vät korreloivan kvasaarien joukkojen galakseja voimakkaammin  $r$ -luminositeetin ja  $g - r$ -väri-indeksin suhteen.

Korrelaatioita etsittiin lisäksi kvasaarin absoluuttisen magnitudin ( $M_I$ ) ja lukuis-  
ten joukkojen ja näiden kvasaaria lähimpien jäsenten ominaisuuksien, kuten värien  
( $u - g, g - r, r - z$ ), galaksiympäristön tiheyden, tähtien muodostumisaktiivisuu-  
den ja  $r$ -luminositeetin suhteen, mutta minkäänlaista korrelaatiota em. suureiden  
suhteen ei kyetty löytämään.

Kuvaajissa 16 ja 17 on vertailtu kunkin aktiivisen joukon ja passiivisen galaksi-  
joukon yksittäisten jäsenten  $r$ -luminositeetteja, sekä aktiivisen joukon sisäisten lä-  
himpien galaksien ( $d < 1$  Mpc) ja passiivisten joukkojen galaksien osalta. Lisäksi  
yksittäisen kvasaarin galaksijoukon sisällä on vertailtu kvasaaria lähimpien ( $d < 1$   
Mpc) ja kauempien ( $d > 1$  Mpc) keskinäisiä eroja  $r$ -luminositeetissa (kuva 18).  
Punasiirtymäkorjaus huomioiden kvasaarien joukkojen jäsenet eroavat passiivises-  
ta vertailujoukosta kaikissa kolmessa tarkastellussa tapauksessa ollen kirkkaampia  
 $r$ -kaistalla. Jakaumien muotojen erot ovat selvästi nähtävissä jakaumien himmeän  
puolen muodossa: aktiiviset joukot sisältävät selvästi vähemmän himmeämpiä ga-  
lakseja ja hieman enemmän kirkkaita galakseja. Erot luminositeeteissa korostuivat  
selvimmin lähimpien vertailussa passiivisten galaksijoukkojen kanssa, jolloin lumi-  
nositeettijakauman muoto ja lasketut keskiarvot poikkesivat eniten toisistaan (ku-  
vaaja 17 ja taulukko IV). Pieniä eroja jakaumissa havaitaan myös kvasaarin joukon  
jäsenten sisäisessä vertailussa lähimpien ollessa hieman kaukaisempia kirkkaampia.  
Taulukoissa IV ja V on esitettyinä värijaukaumien keskiarvot ja keskivirheet sekä  
KS-testistä saadut p-arvot. KS-testin p-arvojen perusteella aktiivisten ja passiivis-  
ten joukkojen  $g - r$ -värijakaumien eroa voidaan pitää tilastollisesti merkittävänä va-  
littuun merkitsevyystasoon ( $p=0,01$ ) verrattaessa. Kuitenkin satunnaisotoksen va-  
linnan aiheuttamasta vaihtelusta johtuen erojen ei voida katsoa olevan satunnais-  
vaihtelua suurempia. Aktiivisten joukkojen kvasaaria lähimpien ja kauempien galak-

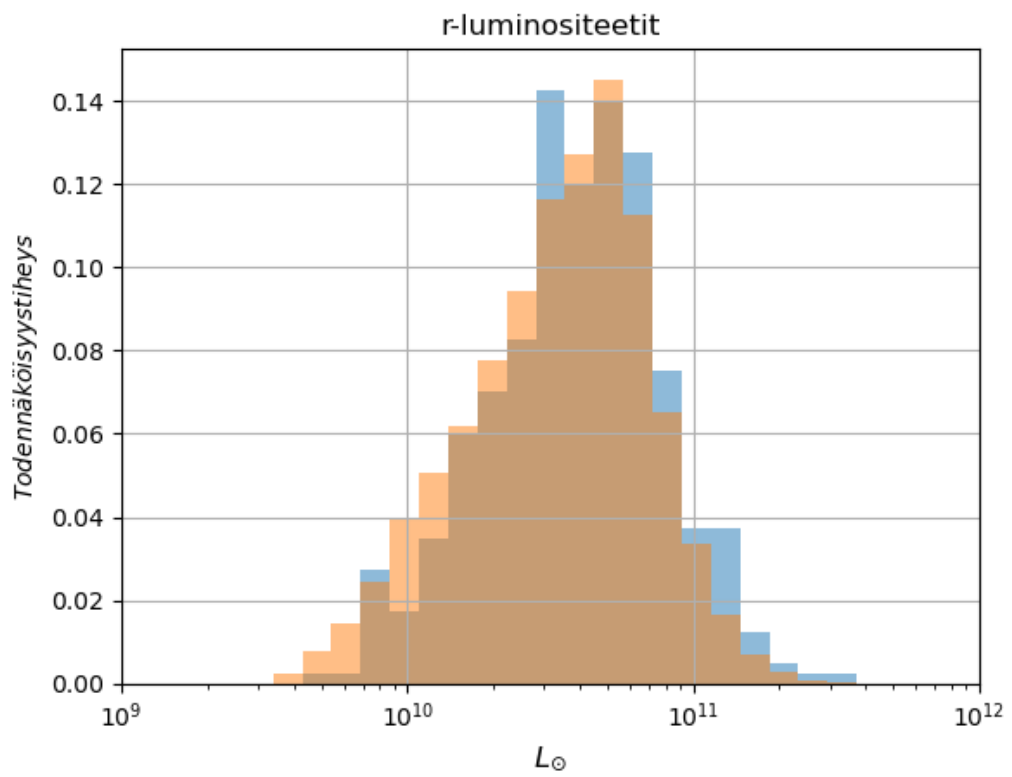
sien värijakaumista ei sen sijaan löytynyt tilastollisia eroja p-arvon ollessa selvästi merkitsevyysrajaa suurempi. Aktiivisten joukkojen  $r$ -luminositeettijakaumat erosivat kaikissa kolmessa tapauksessa passiivisista joukoista p-arvonsa perusteella, joista erot korostuivat erityisesti lähimpien aktiivisten joukkojen jäsenten ja passiivisen joukon välillä ja eroja voidaan täten pitää tilastollisesti merkittävänä.



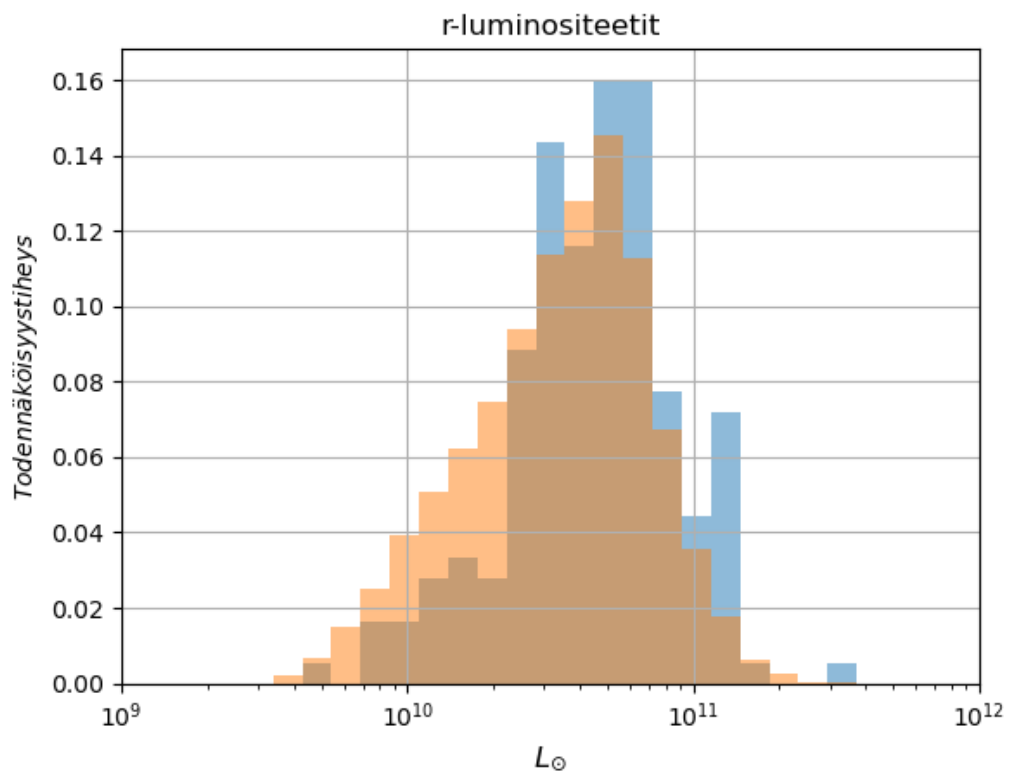
Kuva 15. Kvasaarien ja passiivisten joukkojen g-r-värijakaumat.

#### 4.4 Tiheydet

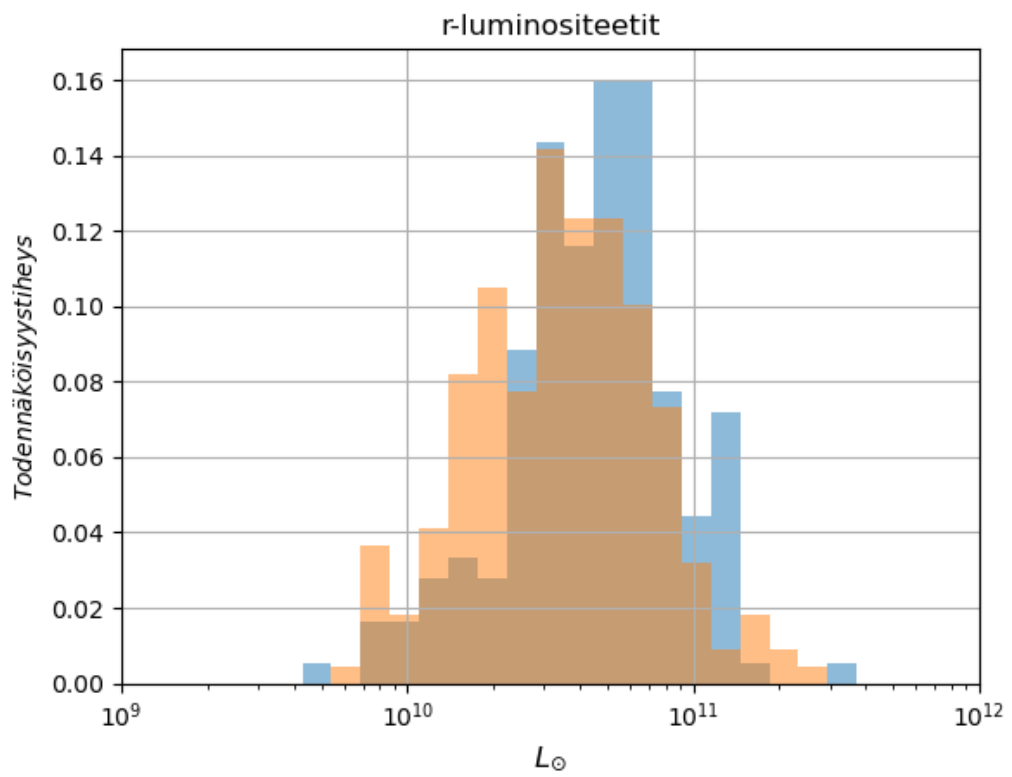
Keskimääräisen ympäristön tiheyden jakaumat (tasoitus kokoskaalalla 1,5 ja 10 Mpc; eng. smoothing scale) kvasaarien joukkojen ja passiivisten joukkojen jäsenten välillä viittaavat vahvasti aktiivisten joukkojen sijaitsevan keskimäärin passiivisia tiheämmissä ympäristöissä. Erityisesti pienemmällä kokoskaalalla (1,5 Mpc) huomattavasti suurempi osa aktiivisista joukoista sijaitsee suuren tiheyden päässä



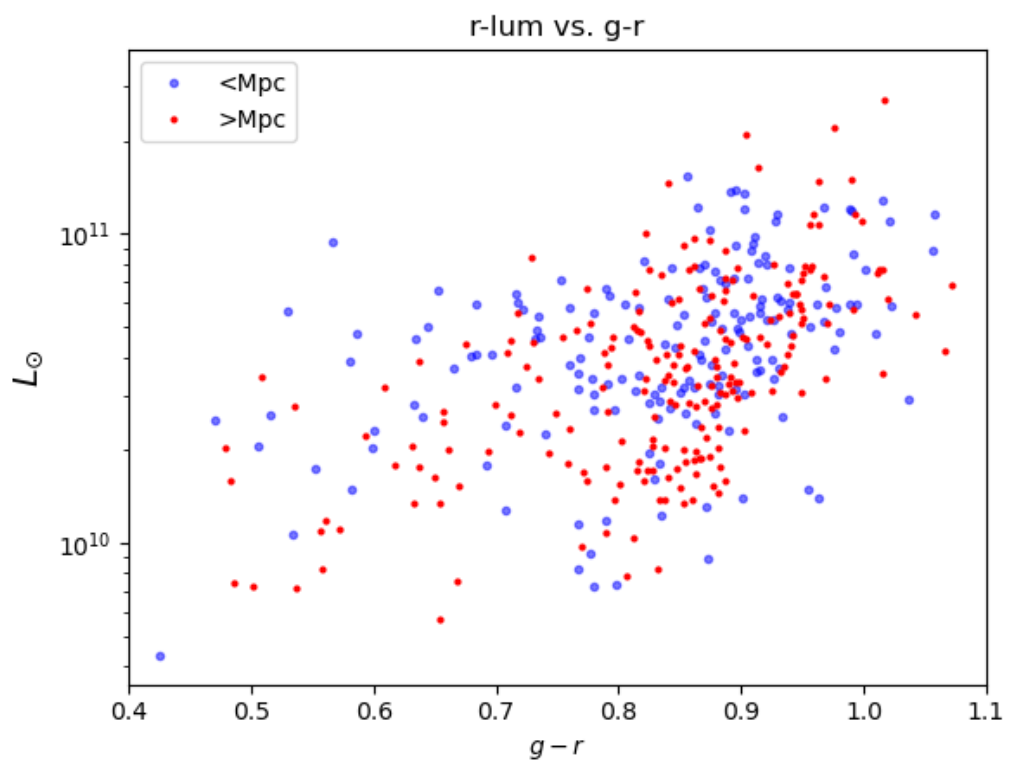
Kuva 16. Kvasaarin sisältävien galaksijoukkojen (sininen) ja passiivisten joukkojen (oranssi) r-luminositeettijakaumat.



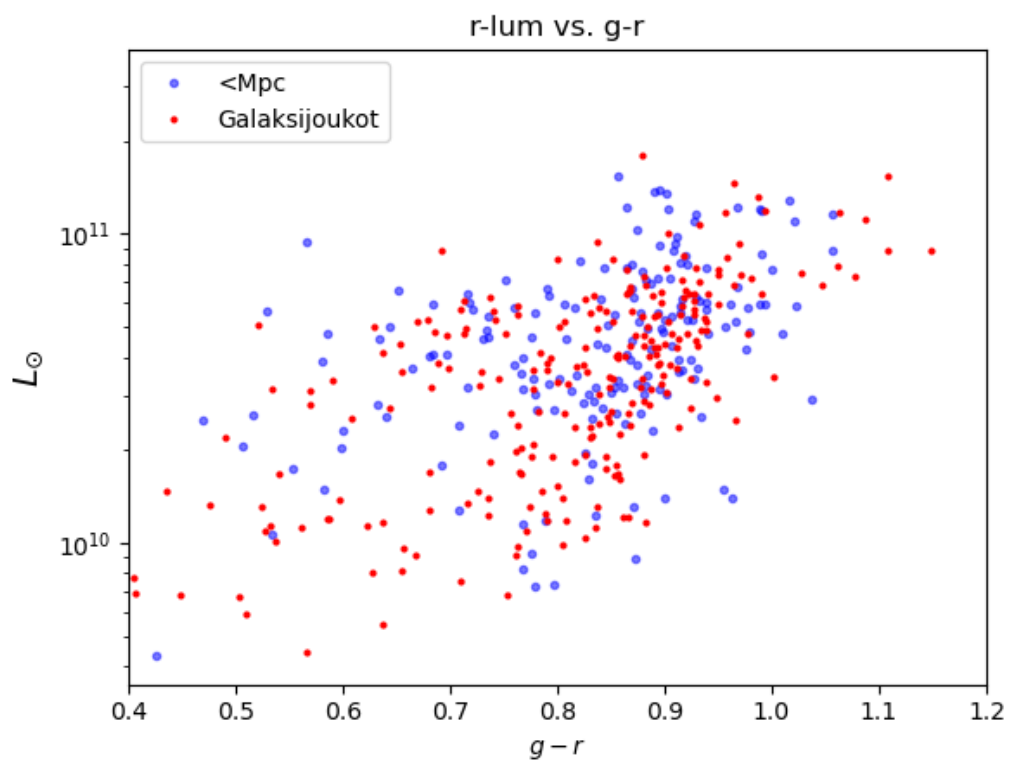
Kuva 17. Kvasaarin sisältävien galaksijoukkojen kvasaareja lähimpien galaksien (sininen) ja passiivisten (oranssi) joukkojen galaksien r-luminositeettijakaumat.



Kuva 18. Kvasaarien joukkojen sisältämien kvasaareja lähimpien (sininen) ja kauimpien (oranssi) galaksien r-luminositeettijakaumat.



Kuva 19. Kvasaarin sisältävien joukkojen lähimpien (<Mpc) ja kauempien (>Mpc) galaksien r-luminositeetin ja g-r-väri-indeksin välinen yhteys.



Kuva 20. Kvasaarien lähimpien (<Mpc) galaksien ja kvasaarittomien galaksijoukkojen galaksien r-luminositeetin ja g-r-väri-indeksin välinen yhteys.

Suure	Akt.	Akt.	Pass.	Pass.	p-arvo
	ka.	S	ka.	S	
<b>g-r</b>	0.87	0.02	0.82	0.001	0.001
<b>r-lum</b> [ $10^{10} L_{\odot}$ ]	4.87	0.18	4.22	0.02	0.006
<b>r-lum (&lt;Mpc)</b> [ $10^{10} L_{\odot}$ ]	5.37	0.28	4.24	0.02	$3.89 \cdot 10^{-5}$

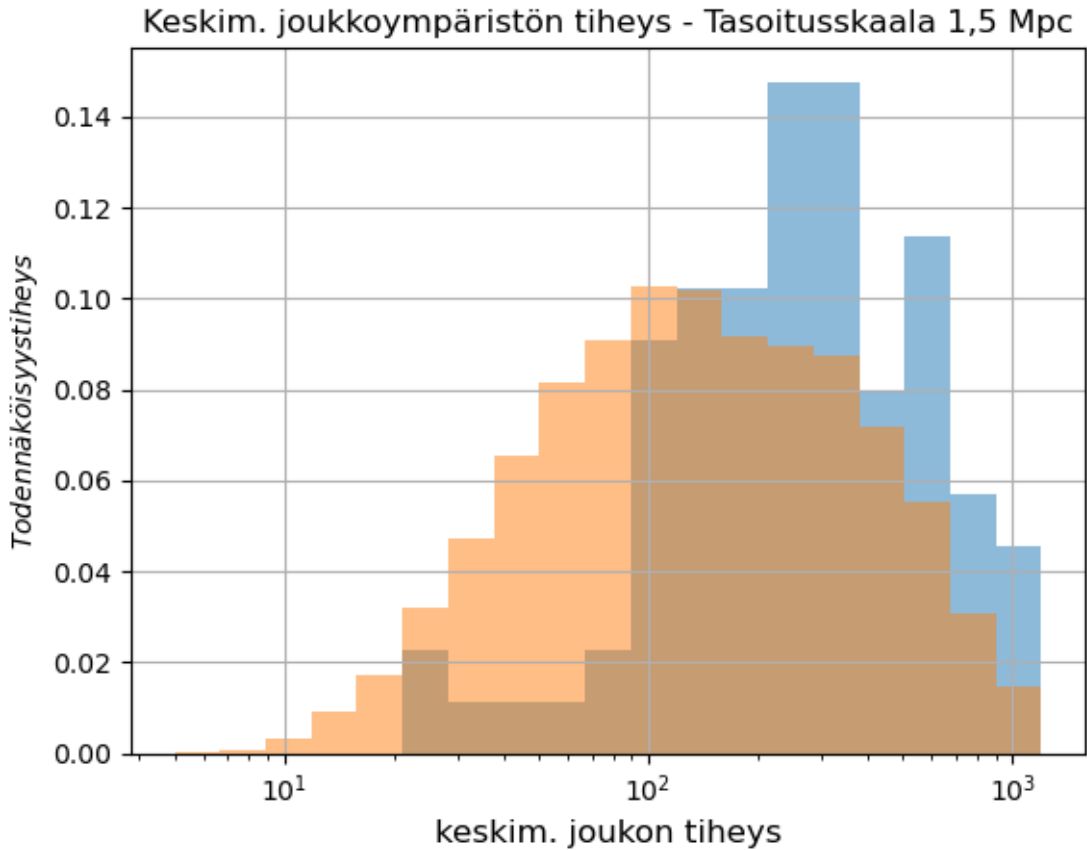
Taulukko IV. Joukkojen galaksien fotometriset ominaisuudet. Taulukossa vertaillaan Aktiivisten galaksijoukkojen (Akt.) ja passiivisten joukkojen (Pass.) jäsenten välisiä keskimääräisiä  $r$ -luminositeetin ja  $g - r$ -väri-indeksin arvoja. Taulukossa on esitettyä em. vertailtavien otosten suureiden keskiarvot (ka.) ja keskivirheet (S) sekä kaksipuoleisen KS-testin  $p$ -arvot.

Suure	Akt.>	Akt>	Akt.<	Akt.<	p-arvo
	ka.	S	ka.	S	
<b>g-r</b>	0.87	0.03	0.86	0.02	0.32
<b>r-lum (Akt.)</b> [ $10^{10} L_{\odot}$ ]	5.37	0.28	4.46	0.24	0.005

Taulukko V. Taulukossa vertaillaan aktiivisten joukkojen kvasaaria lähimpien ( $d < 1$  Mpc) ja kauempien ( $d > 1$  Mpc) galaksien  $r$ -luminositeetin ja  $g - r$ -väri-indeksin arvoja. Taulukossa on esitettyä em. vertailtavien otosten suureiden keskiarvot (ka.) ja keskivirheet (S) sekä kaksipuoleisen KS-testin  $p$ -arvot.

ja vastaavasti huomattavasti aliedustettuna passiivisiin joukkoihin nähden matalan tiheyden päässä 21. Aktiivisten joukkojen ylitheydet ovat myös erotettavissa (10 Mpc ) tasausskaalla joskin erot ovat selvästi pienempiä (kuva 22). Tiheyksien keskiarvot ja keskivirheet sekä KS-testin  $p$ -arvot on esitettyä taulukossa II. KS-testin  $p$ -arvojen perusteella tiheysjakaumien eroja voidaan pitää tilastollisesti merkittävinä. Myös kvasaariympäristön tiheyden suhdetta kvasaarin kirkkauteen,  $M_i$  tutkittiin, mutta minkäänlaista korrelaatiota ei näiden väliltä löydetty. Vertailujoukkojen välillä esiintyvien erojen selittämiseksi suoritettiin analyysi eri Hubblen morfologia luokkien osuuksista vertailtavissa galaksijoukoissa. Morfologiatyyppien osuuksissa havaittavat erot voisivat selittää ainakin kvasaarien joukkojen punaisuuden ja

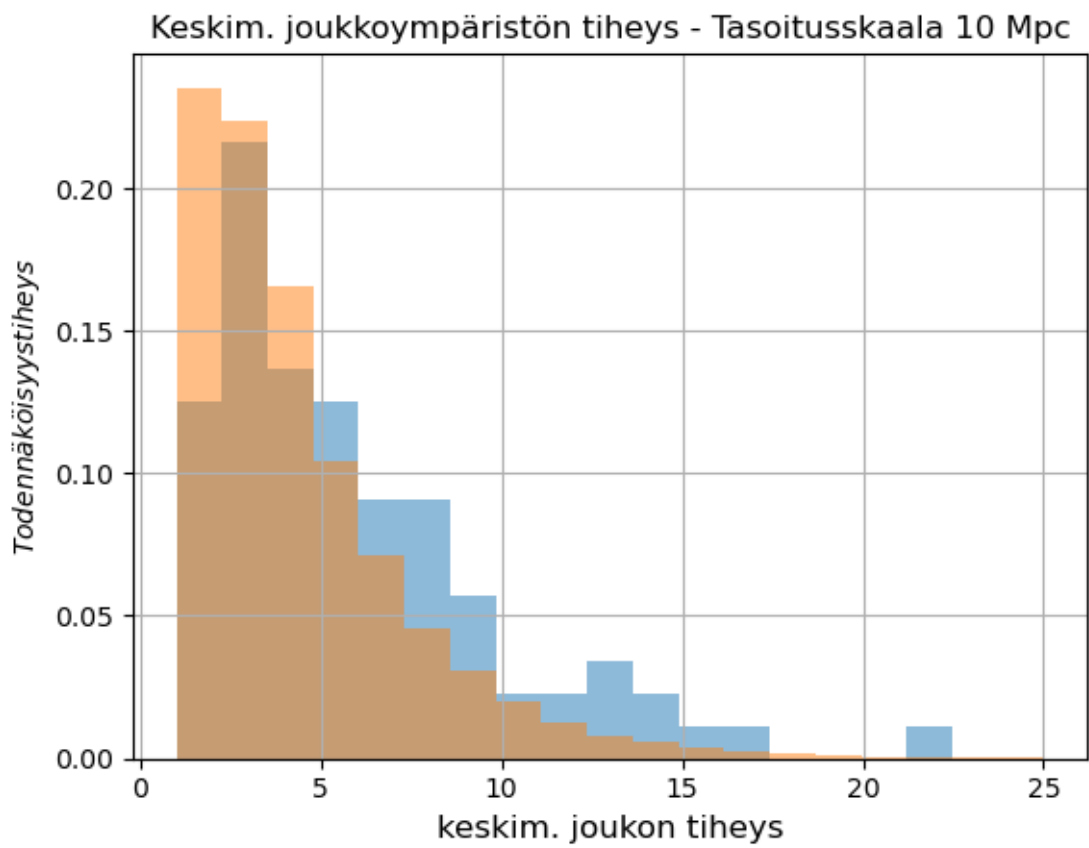
$r$ -luminositeetti jakaumissa havaitut erot suhteessa vertailujoukkoihin. Lisäksi kvasaarien joukkojen massiivisuuserot selittyisivät rikkausjakauman erojen lisäksi myös osittain yksittäisten joukon jäsenten massiivisuudesta ja kirkkaudesta.



Kuva 21. Keskimääräinen ympäristön tiheys tasausskaalalla 1,5 Mpc. Siniset pylväät kuvaavat kvasaarien sisältämien galaksijoukkojen ja oranssit pylväät passiivisten joukkojen tiheyksiä.

## 5 Keskustelu

Kvasaarien aktiivisten galaksijoukkojen kinemaattisten suureiden: viriaalimassan ja nopeusdispersion jakaumat ja keskiarvot poikkeavat selvästi vertailussa aikaisempien AGN:ien galaksijoukkoihin [82]. Kvasaarien joukot näyttäisivät olevan näihin vertailuviin AGN:ien joukkoihin nähden selvästi massiivisempia. Gordon et. al 2018 [82]



Kuva 22. Keskimääräinen ympäristön tiheys tasausskaalalla 10 Mpc. Siniset pylväät kuvaavat kvasaarien sisältämien galaksijoukkojen ja oranssit pylväät passiivisten joukkojen tiheyksiä.

tutki AGN:ien joukkojen kinemaattista ympäristöä punasiirtymillä  $z < 0,16$ . Joukkojen viriaalimassojen ja nopeusdispersioiden jakaumat sekä keskiarvot ( $\log(M_{200}/M_{\odot}) = 13,06$   $\sigma[km/s] = 248$ ) poikkeavat kvasaarijoukkojen vastaavista ollen selvästi alempia. Toinen silmiinpistävä ero voitiin havaita tarkastelemalla ko. galaksijoukkojen nopeusdispersion ja rikkauden välistä suhdetta. Vertailemalla nopeusdispersioiden jakauman yläpään osajoukkojen  $\sigma > 700$  km/s rikkauksia voitiin kvasaarien asuttamien joukkojen havaita olevan merkittävästi köyhempiä kuin AGN:ien joukot. Sama piirre oli havaittavissa myös viriaalimassoille; samanmassaiset kvasaarien galaksijoukot olivat selvästi köyhempiä. Pienehkön otoskoon ja referenssitutkimusten vähäisyyden takia lisänäyttöä kuitenkin vaaditaan edellä mainittujen tulosten vahvistamiseksi. Aktiivisten joukkojen rikkaudet rajautuivat lähes yksinomaan ryhmistä köyhiin joukkoihin välille  $3 \leq N \leq 17$ . Li et. al 2019 [124] vertaili AGN:ien joukkojen rikkauksia kolmella eri rikkausvälillä  $5 \leq N \leq 10$ ,  $10 < N \leq 50$  ja  $N > 50$  ja havaitsi AGN:ien joukkojen sijoittuvan tavallisimmin rikkausvälille  $5 \leq N \leq 10$  mikä vastaa hyvin saatuja tuloksia aktiivisten joukkojen rikkausjakaumalle. Vaikka määrällisesti suurin osa aktiivisista ryhmistä (passiivisten tavoin) sijoittuikin pieniin ryhmiin ( $N < 5$ ) juuri rikkausvälin  $5 \leq N \leq 10$  suhteelliset määrät korostuivat voimakkaimmin suhteessa passiivisiin joukkoihin. Toisaalta kuitenkin aivan pienimpien ryhmien osuus aktiivisten joukkojen rikkausjakaumassa oli merkittävästi pienempi kuin passiivisten vastaavassa. Galaksijoukkojen rikkautta pidetään yleisesti hyvänä indikaattorina näiden halon massasta [124] minkä tulisi pääosin selittää viriaalimassojen jakaumissa havaitut erot. Toisaalta on mahdollista, että kinemaattisten suureiden jakauman eroihin vaikuttaisi myös osaltaan aktiivisten galaksijoukkojen keskimäärin massiivisemmat joukon jäsenet mikä havaitaan r-kaistan lumionositeettijakaumien erona aktiivisten joukkojen jäsenten ollessa passiivisia kirkkaampia. Coldwell et. al 2006 [36] ja myöhemmin Bettoni et. al 2017 [22] analysoivat kvasaariympäristön värejä matalan punasiirtymän alueella  $z < 0,5$ . Coldwell et. al mukaan kvasaarien

naapurustot koostuivat systemaattisesti sinisemmistä galakseista kuin passiivinen vertailujoukko. Myös Bettoni et. al havaitsivat kvasaarien lähiympäristön olevan lievästi sinisempiä vertailujoukkoonsa nähden. Kuitenkaan merkkejä kvasaarin lähiympäristön sinisyydestä ei tämän tutkimusanalyysin pohjalta löytynyt, eikä  $g - r$ -väriindeksin ja  $r$ -kaistan luminositeetin välisestä korrelaatiosta löytynyt eroja aktiivisen ja passiivisen otoksen väliltä. Aktiivisen ja passiivisen ympäristön välistä hienois- ta punaisuuseroa ei voida pitää tilastollisesti merkittävänä. Varhaiset tutkimukset [175] osoittivat kvasaarien ympäristön galaksien olevan voimakkaammin kasautuneita, mutta sittemmin uudemman sukupolven kartoitusten, kuten 2dF (Two degree field) ja SDSS (Sloan Digital Sky Survey) myötä kvasaarien paikallisen ympäris- tön on havaittu vastaavan tyypillistä galaksiympäristöä [202]. Lietzen et. al 2009 ja Coldwell et. al 2006 [36] [125] havaitsivat lähikvasaarien suosivan muutaman Mpc:n kokoskaaloilla matalan tiheyden alueita. Kuitenkin pieni määrä aikaisempia SDSS:n arkistodataa hyödyntäneitä tutkimuksia [172][187] näyttäisi olevan jokseenkin yh- denmukaisia tässä tutkimustyössä esitettyjen tulosten kanssa. Kvasaarit ( $M_i < -22$ ,  $z < 0,4$ ) näyttäisivät k.o tutkimusten mukaan sijaitsevan keskimäärin ylitiheämmil- lä alueilla tyypillisiin passiivisiin galakseihin verrattuna tiheyden huippuarvon sijai- tessa 100 kpc etäisyydellä kvasaarista [172]. Serberin tutkimuksia vastaten aktiivis- ten joukkojen ylitiheydet olivat selkeimmin havaittavissa pienimmän tasausskaalan (1,5 Mpc) tapauksessa, kun 10 Mpc:n kokoskaalalla erot olivat hyvin pieniä. Lisäksi Strand et al. (2008) havaitsi kirkkaampien AGN:ien ympäristöjen olevan himmeäm- pien AGN:ien ympäristöjä ylitiheämpiä aina 2 Mpc etäisyydelle asti [187]. Myös Serber havaitsi pienen kokoskaalan ylitiheyksien riippuvan kvasaareiden lumino- siiteetista, mutta riippuvuus oli havaittavissa vain kaikkein kirkkaimmille kvasaareille ( $M_i > -23,3$ ). Minkäänlaista korrelaatiota kvasaarien luminositeetin ja ympäristön ei tämän työn pohjalta pystytty osoittamaan.

## 6 Loppupäätelmät

Kvasaarien suuren kokoskaalan ja joukkoympäristöjä koskevan tilastollisen analyysin perusteella voitiin johtopäätöksenä päätellä seuraavaa:

- Aktiiviset joukot olivat rikkaudeltaan lähes poikkeuksetta köyhiä ja köyhähköjä. Suhteessa passiivisiin suurempi osuus aktiivisista joukoista sijoittui rikkausvälille  $5 \leq N < 20$ , mutta samalla ne olivat aliedustettuja pienimmissä ryhmissä ( $N < 5$ ) suhteessa vertailujoukkoonsa. Rikkauksilta  $N > 20$  aktiiviset joukot puuttuivat lähes kokonaan.
- Kinemaattisista ominaisuuksista viriaalimassan, viriaalisäteen ja nopeusdispersion perusteella aktiiviset joukot olivat keskimäärin selvästi passiivisia massivisempia.
- Aktiivisten joukkojen jäsenet olivat keskimäärin passiivisia kirkkaampia r-kaistan luminositeetin perusteella. Ero korostui erityisesti kvasaaria lähimpien  $d < 1$  Mpc galaksien ja passiivisten joukkojen galaksien välillä.
- Aktiiviset joukot olivat  $g - r$ -värijakaumansa perusteella passiivisia hieman punaisempia, mutta ero oli vähäinen. Myöskään  $g - r$ -värijakauman ja luminositeetin välisestä yhteydestä ei löytynyt eroja joukkojen välillä.
- Aktiivisten ja passiivisten joukkojen jäsenten kirkkauseroja selittää ainakin osittain havaitut erot näiden morfologioissa. Varhaisen tyypin galaksien osuus oli aktiivisissa joukoissa hieman suurempi ( $\sim 5\%$ ) ja myöhäisen tyypin galaksien osuudet pienempiä ( $\sim 4\%$ ) kuin passiivisissa joukoissa. Erot selittänevät ainakin osittain havaitun luminositeettieron sekä mahdollisen vähäisen eron värijakaumissa.
- Joukkoympäristön kokoskaaloissa (1,5 Mpc:n tasausskaalalla) aktiiviset joukot sijaitsivat passiivisia selkeästi tiheämmässä ympäristöissä. Ero näyttäisi koros-

tuvan erityisesti pienemmillä kokoskaaloilla ja joukkoympäristöä suuremmilla kokoskaaloilla (10 Mpc:n tasausskaalalla) ero on enää vähäinen.

## Viitteet

- [1] Aarseth, S. J., Turner, E. L., & Gott, III, J. R. 1979, ApJ, 228, 664
- [2] Abadi M. G., Moore B. & Bower R. G., 1999, MNRAS, 308, 947
- [3] Alam, S., Albareti, F. D., Allen de Prieto, C., Anders F. & Anderson Scott F. et al., 2015, ApJ, 219, 12
- [4] Aller M. C. & Richstone D. C., 2007, ApJ, 665, 120
- [5] Antonucci, R. 1993, ARA&A, 31, 473
- [6] Antonucci, R. R. J., & Miller, J. S. 1985, ApJ, 297, 621
- [7] Athanassoula E., Bienayme O., Martinet L. & Pfenniger D., 1983, A&A, 127,349
- [8] Athanassoula E., Dehnen W. & Lambert J. C., 2005, MRNAS, 363, 496
- [9] Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Z. & Lupton, R. H., 2004, ApJ 600, 681-694.
- [10] Ball N. M., Loveday J.& Brunner R. J., 2008, MNRAS, 383, 907
- [11] Balogh, M. L., et al. 2004, MNRAS, 348, 1355
- [12] Balogh M. L., Schade D., Morris S. L., Yee H. K. C.& Carlberg R. G., 1998, ApJ, 504, 75
- [13] Bamford S. P., Nichol R. C., Baldry I. K., Land K. & Lintott C. J. et al., 2009, MNRAS, 393, 4, 1324
- [14] Barnes, J. & Efstathiou, G. 1987, ApJ, 319, 575
- [15] Barthel, P. D. 1989, ApJ, 336, 606
- [16] Bauer, A. E., Grutzbauch,R., Jörgensen, I., Varela, J., & Bergmann, M., 2011,MNRAS, 411, 2009
- [17] Baum, S. A., Zirbel, E. L., & O'Dea, C. P. 1995, ApJ, 451, 88
- [18] Beckmann V.& Shrader C. R., 2012, "Active Galactic Nuclei", 380 pages, Wiley-VCH
- [19] Bekki K., 1998, ApJ, 502, L133
- [20] Bekki K., Couch W. J., Shioya Y., 2002, ApJ, 577, 651

- [21] Bell, E. F., McIntosh D. H., Barden M., Wolf C. & Caldwell J. A. R. et al., 2004, *ApJ* 600, L11-14.
- [22] Bettoni D., Falomo R., Kotilainen J. K. & Karhunen K., 2017, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 4, 44
- [23] Blandford, R. D., & Königl, A. 1979, *ApJ*, 232, 34
- [24] R. D. 1990, in *Active Galactic Nuclei*, ed. R. D. Blandford, H. Blandford, Netzer, & L. Woltier (Berlin : Springer), 161
- [25] Blanton, M. R., Eisenstein, D. & Hogg, D. W., et al. 2005, *ApJ*, 629, 143
- [26] Bower R. G., Lucey J. R. & Ellis R. S., 1992, *MNRAS*, 254, 601
- [27] Brammer, G. B., Whitaker, K. E., & van Dokkum, P. G. et al. 2009, *ApJ*, 706, L173
- [28] Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Tremonti C. & Kauffmann G. et al., 2004, *MNRAS*, 351, 4, 1151
- [29] Butcher, H., & A. Oemler, Jr., 1978a, *ApJ*, 219, 18.
- [30] Byrd, G., & Valtonen, M. 1990, *ApJ*, 350, 89
- [31] Cattaneo, A., Dekel, A., Devriendt, J., Guiderdoni, B., & Blaizot, J. 2006, *MNRAS*, 370, 1651
- [32] Cattaneo A., Faber S. M., Binney J., Dekel A. & Kormendy J. et al., 2009, *Nature*, 460, 7252, 213
- [33] Chester C. & Roberts M. S., 1964, *ApJ*, 69, 635
- [34] Choi E., Ostriker J. P., Naab T., Oser L. & mOSTER B. P., 2015, *MNRAS*, 449, 4
- [35] Cohen, M.H., Lister, M.L., Homan, D.C., Kadler, M. & Kellermann, K.I., (2007) *ApJ*. 658, 232–244.
- [36] Coldwell, G. V., & Lambas, D. G. 2006, *MNRAS*, 371, 786
- [37] Coldwell, G. V., Lambas D. G., Söchting I. K. & Gurovich S., 2009, *MNRAS*, 399, 1.
- [38] Combes F., Debbasch F., Friedli D. & Pfenniger D., 1990, *A&A*, 233, 82.
- [39] Constantin A. & Vogeley M.S., 2006, *ApJ*, 650, 927
- [40] Constantin, A., Hoyle, F., & Vogeley, M. S. 2008, *ApJ*, 673, 715
- [41] Cooper, M. C., Newman, J. A. & Weiner, B. J., et al. 2008, *MNRAS*, 383, 1058

- [42] Crampton, D., Cowley, A. P., & Hartwick, F. D. A. 1989, *ApJ*, 345, 59
- [43] Croton D. J., Springel V., White S. D. M., De Lucia D. & Frenk C. S. et al., 2006, *MNRAS*, 365, 1, 11
- [44] Daddi, E., Dickinson, M. & Morrison, G., et al. 2007, *ApJ*, 670, 156
- [45] Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S. & White S. D. M., 1985, *ApJ*, 292, 371
- [46] De Lucia, G., Springel, V., White, S. D. M., Croton D., & Kauffmann G., 2006, *MNRAS*, 366, 499
- [47] de Robertis M. M., Yee H. K. C. & Hayhoe K., 1998, *ApJ*, 496, 93
- [48] de Vaucouleurs G., 1961., *ApJ. Suppl.*, 5, 233
- [49] de Vaucouleurs G., 1975, *ApJ.*, 202, 319
- [50] Di Matteo, T., Springel, V., & Hernquist, L. 2005, *Nature*, 433, 604
- [51] Dressler A., 1980, *ApJ. Suppl.*, 42, 577
- [52] Dressler A., 1980, *ApJ*, 236, 351
- [53] Dressler A., Oemler A. Jr., Couch W. J., Smail I. & Ellis R. S. et al., 1997, *ApJ*, 490, 2, 577
- [54] Driver S.P., Allen P. D., Alister W. G., Cameron E. & Liske J. et al., 2006, *MNRAS*, 368, 414
- [55] Dultzin-Hacyan D., Krongold Y., Fuentes-Guridi I. & Marziani P., 1999, *ApJ*, 513, L111
- [56] Efstathiou, G., & Eastwood, J.W., 1981, *MNRAS*, 194, 503.
- [57] Egami E., Misselt K. A., Rieke G. H., Wise M. W. & Neugebauer G., et al. 2006, *ApJ*, 647, 922
- [58] Eke V. R., Baugh C. M., Cole S., Frenk C. S. & Norberg P. et al. (The 2dFGRS Team), 2004, *MNRAS*, 348, 866
- [59] Elbaz, D., Daddi, E. & Le Borgne, D., et al. 2007, *A&A*, 468, 33
- [60] Elitzur M. & Shlosman I., *ApJ*. 2006, 648, L101
- [61] Ellis, R. S., Smail, I., Dressler, A., Couch, W. J., Oemler, A. & Jr., 1997, *ApJ*, 483, 582
- [62] Ellison, S. L., Simard, L. & Cowan, N. B., et al. 2009, *MNRAS*, 396, 1257
- [63] Emerick A., Mac Low M.-M., Grcevich J. & Gatto A., 2016, *ApJ*, 826, 148
- [64] ESO Supernova Planetarium & Visitor Centre Exhibition Images

- [65] Everett J. E., Gallagher S. C. & Keating S. K., 2009, AIP Conf. Proc. 1201, The Monster's Fiery Breath: Feedback in Galaxies, Groups, and Clusters, ed. bibitemEver2 Everett J. E., 2005, ApJ, 631, 689
- [66] Faber, S. M., Willmer, C. N. A., Wolf, C., Koo D. C. & Weiner B. J. et al., 2007, ApJ, 665, 265
- [67] Fabian A.C., Daines S.J. & Johnstone R.M., 1994, MNRAS, 271, 737
- [68] Fall S.M. & Efstathiou G., 1980, MNRAS, 193, 189
- [69] Falomo
- [70] Fanaroff B.L., & Riley J.M., 1974, MNRAS, 167, 31P-36P
- [71] Farouki R.& Shapiro S. L., 1980, ApJ, 241, 928
- [72] Ferrarese, L. & Merritt, D. 2000, ApJ, 539, L9
- [73] Finoguenov, A., Pietsch, W. N., Aschenbach, B. R., & Miniati F., 2004, A&A, 415, 415
- [74] Frenk C. S. & White S. D. M., 2012, Ann. Phys., 524, 507
- [75] Fujita Y. & Nagashima M., 1999, ApJ, 516, 619
- [76] Fujita Y., 1998, ApJ, 509, 587
- [77] Gavazzi G., Boselli A., Cortesse L., Arosio I.& Gallazzi A, 2006, A&A, 446, 839
- [78] Gavazzi G., Fumagalli M., Cucciati O. & Boaselli A., 2010, A&A, 517, A73
- [79] Gebhardt K., Richstone D., Kormendy J., Lauer T. R. & Ajhar E. A. et al. 2000, ApJ, 119, 3, 1157
- [80] Gilmour R., Gray M. E., Almaini O., Best P. & Wolf C. et al., 2007, MNRAS, 380, 4
- [81] Gómez P. L., Nichol R. C. & Miller, C. J., Hopkins A. M. & Bernardi M., 2003, ApJ, 584, 210
- [82] Gordon Y. A., Pimbblet K. A., Owers M. S., Bland-Hawthorn J. & Brough S. et al., 2018, MNRAS, 475, 3
- [83] Goto T., Yamauchi C., Fujita Y., Okamura S. & Sekiguchi M., 2003a, MNRAS, 346, 601
- [84] Gott J.R. & and Rees M.J., 1975, A & A, 45, 365
- [85] Graham, A. W., Trujillo, I., & Caon, N., 2001, ApJ, 122, 1707
- [86] Granato G. L., De Zotti G., Silva L., Bressan A. & Danese L., 2004a, ApJ, 600, 580

- [87] Gunn, J. E., & Gott, J. R. I., 1972, *ApJ*, 176, 1
- [88] Gunn J., Siegmund W., Mannery E., Owen R. & Hull C., et al., 2006, *ApJ*. 131 (4), 2332–2359
- [89] Hickox R. C., Jones C., Forman W. R., Murray S. S. & Kochanek C. S., 2009, *ApJ*, 696, 1
- [90] Hogg D. W., Blanton M. R., Eisenstein D. J., Gunn J. E. & Schegel D. J. et al., 2003, *ApJ*, 585, L5
- [91] Hogg D. W., Blanton M. R., Brinchmann J., Eisenstein D. J. & Schegel D. J., et al. 2004, *ApJ*, 601, L29
- [92] Hopkins P. F., Bundy K., Hernquist L. & Ellis R. S., 2007, *ApJ*, 659, 976
- [93] Hopkins P. F., Hernquist L., Cox T. J. & Di Matteo T., 2005a, *ApJ*, 630, 705
- [94] Hopkins P. F., Hernquist L., Cox, T. J., Di Matteo T. & Robertson B. 2005b, *ApJ*, 630, 716
- [95] Hopkins P. F., Hernquist L., Cox T. J., Di Matteo T. & Robertson B., 2005c, *ApJ*, 632, 81
- [96] Hopkins P. F., Somerville R. S., Hernquist L., Cox T. J. & Robertson B., 2006b, *ApJ*, 652, 864
- [97] Hopkins P. F., Hernquist L., Cox T. J., & Kereš D. 2008, *ApJ*, 175, 356
- [98] Hopkins P. F., Hickox R., Quataert E., & Hernquist L., 2009a, *MNRAS*, 398, 333
- [99] Hubble E., 1926, *ApJ*. 64 (64), 321–369.
- [100] Huchra J.P. & Geller M. J., 1982, *ApJ*., 257, 423.
- [101] Huertas-Company M., Aguerri J. A. L., Bernardi M., Mei S. & Sanchez Almeida J., 2011, *A&A*, 525, A157
- [102] Humphrey A., Villar-Martin M., Ramos Almeida C. & Tadhunter C. N., 2015, *MNRAS*, 454, 4452H
- [103] Icke V., 1985, *A&A*, 144, 115
- [104] Kajisawa M., Ichikawa T., Yamada T., Uchimoto Y. K. & Yoshikawa T., 2010, *ApJ*, 723, 129
- [105] Karhunen K., Kotilainen J. K., Falomo R. & Bettoni D., 2014, *MNRAS*, 441, 1802-1816
- [106] Kauffmann G., Heckmann T. M., Tremonti C., Brinchman J. & Charlot S. et al., 2003, *MNRAS*, 346, 1055

- [107] Kaufmann T., Mayer L., Wadsley J., Stadel J. & Moore B., 2006, MNRAS, 370, 1612
- [108] Keating S. K., Everett J. E. & Gallagher S. C., Deo R.P., 2012, ApJ., 749, 32
- [109] Kimm T., Somerville R. S., Sukyoung K. Y., van den Bosch F. & Salim S. et al., 2009, MNRAS, 394, 1131
- [110] King A. R., 2003, ApJ, 596, L27
- [111] Kodama T. & Bower R. G., 2001, MNRAS, 321, 18
- [112] Koulouridis E., Chavushyan V., Plionis M., Krongold Y., & Dultzin-Hacyan D., 2006, ApJ, 651, 93
- [113] Koulouridis E., 2018, Proceedings of the International Astronomical Union 14(S342): 145-148
- [114] Kormendy J. & Bender R., 1996, ApJ, 464, L119
- [115] Krolik J. H., & Begelman M. C., 1988, ApJ, 329, 702
- [116] Kuijken K. & Merrifield M. R., 1995, ApJ, 443, L13
- [117] Lapi, A., Shankar, F., Mao, J., Granato, G. L. & Silva, L., 2006, ApJ, 650, 42
- [118] Larson R. B., Tinsley B. M. & Caldwell C. N., 1980, ApJ, 237, 692
- [119] Laurikainen E. & Salo H., 1995, A&A, 293, 683
- [120] Lavery R. J. & Henry J. P., 1988, ApJ, 330, 596
- [121] Lawrence, A., & Elvis, M. 1982, ApJ, 256, 410
- [122] Lewis I., Balogh M., De Propris R., Couch W. & Bower R. et al., 2002, MNRAS, 334, 673
- [123] Li C., Kauffman G., Wang L., White S.D.M. & Heckmann T.M., 2006, MNRAS, 373, 457
- [124] Feng Li, Yi-Zhou Gu, Qi-Rong Yuang, Ming Bao & Zhi-Cheng He et al., 2019, MNRAS, 484, 3
- [125] Lietzen H., Heinämäki P., Nurmi P., Tago E. & Saar E. et al. 2009, A&A, 501, 145
- [126] Lintott C. J., Schawinski K., Slosar A., Land K. & Bamford S. et al., 2008, MNRAS, 389, 1179
- [127] Lintott C. J., Schawinski K., Bamford S., Slosar A. & Land K. et al., 2011, MNRAS, 410, 166

- [128] Magorrian J., Tremaine S., Richstone D., Bender R. & Bower G. et al., 1998, *ApJ*, 115, 2285
- [129] Mamon G. A., 1992, *ApJ*, 401, L3
- [130] Margoniner V. E., de Carvalho R. R., Gal R. R. & Djorgovski S. D., 2001, *ApJ*, 548, L143
- [131] Martin-Navarro I., Brodie J. P., Romanowsky A. J., Ruiz-Lara T. & van de Ven G., 2018, *Nature*, 553, 307-309
- [132] Masters K. L., Nichol R., Bamford S., Mosleh M & Lintott C. J. et al., 2010, *MNRAS*, 404, 792
- [133] Mathieu, R. D. & Spinrad H., 1981, *ApJ*. 251, 485.
- [134] McNamara B. R. & Nulsen P. E. J., 2007, *ARA&A*, 45, 117
- [135] Melnick, J., & W. L. Sargent, 1977, *ApJ*. 215, 401.
- [136] Menci N., Cavaliere A., Fontana A., Giallongo E. & Poli F., 2003, *ApJ*, 587, L63
- [137] Moore B., Katz N., Lake G., Dressler A. & Oemler A., 1996, *Nat*, 379, 613
- [138] Moore B., Lake G., Quinn T. & Stadel J., 1999, *MNRAS*, 304, 465
- [139] Murray N., Quataert E., & Thompson T. A. 2005, *ApJ*, 618, 569
- [140] Narayan R., & Yi I., 1994, *ApJ*, 428, L13 (NY)
- [141] Oemler A., 1974, *ApJ*, 194, 1.
- [142] O'Neill J. K. & Dubinski J., 2003, *MNRAS*, 346, 251
- [143] Orr M. J. L., & Brown I. W. A., 1982, *MNRAS*, 200, 1067
- [144] Padovani P., 2017, *Nature*, 1, 0194.
- [145] Paris I., Petitjean P., Aubourg E., Myers A.D. & Streblyanska A., 2018, *A&A*, 613, A51
- [146] Pasquali A., Gallazzi A., Fontanot F., van den Bosch F. D. & De Lucia G. et al., 2010, *MNRAS*, 407, 937
- [147] Patel S. G., Kelson D. D., Holden B. P., Franx M. & Illingworth G. D., 2011, *ApJ*, 735, 53
- [148] Peng Y. J., Lilly S. J., Kovac K., Bolzonella M. & Renzini A. et al., 2010, *ApJ*, 721, 193
- [149] Peng Y., Maiolino R. & Cochrane R., 2015, *Nature*, 521, 192–195

- [150] Peterson J. R., Kahn S. M., Paerels F. B. S., Kaastra J. S. & Tamura T., 2003, *ApJ*, 590, 207
- [151] Peterson J. R. & Fabian A. C., 2006, *Phys. Rep.*, 427, 1
- [152] Petropoulou, V., Vílchez, J., & Iglesias-Páramo, J. 2012, *ApJ*, 749, 133
- [153] Pfenniger D., 1984, *A&A*, 134, 373
- [154] Phillips J. I., Wheeler C., Cooper M. C., Boylan-Kolchin M. & Bullock J. S., 2015, *MNRAS*, 447, 698
- [155] Adam R., Aghanim N., Ashdown M., Aumont J. & Baccigalupi C. et al., 2016, *A&A*, 596, A108
- [156] Poggianti B. M., von der Linden A., De Lucia G., Vandana D. & Simard L. et al., 2006, *ApJ*, 642, 188
- [157] Postman M., Franx M., Cross N. J. G., Holden B. & Ford H. C. et al., 2005, *ApJ*, 623, 721
- [158] Postman M. & Geller M. J., 1984, *ApJ*, 281, 95
- [159] Press W. H. & Schechter P., 1974, *ApJ*, 187, 42
- [160] Quadri R. F., Williams R. J., Franx M., & Hildebrandt H., 2012, *ApJ*, 744, 88
- [161] Raha N., Sellwood J. A., James R. A. & Kahn F. D., 1991, *Nature*, 352, 411(RSJK91)
- [162] Rees, M.J. 1984, *ARA&A* 22, 471–506.
- [163] Rees M. J., Begelman M. C., Blandford R. D., & Phinney E. S., 1982, *Nature*, 295, 17
- [164] Robotham A., Wallace C., Phillips S. & De Propriis R., *MNRAS*, 2006, 652, 1077
- [165] Rowan-Robinson M., 1977, *ApJ*, 213, 635
- [166] Salucci, P., Ratnam, C., Monaco, P., & Danese, L. 1999, *MNRAS*, 307, 637
- [167] Santini P., Fontana A., Grazian A., Salimbeni S. & Fiore F. et al. 2009, *A&A*, 504, 751
- [168] Schawinski K., Thomas D., Sarzi M., Maraston C. & Kaviraj S., 2007. *MNRAS*, 382, 1415-1431.
- [169] Schawinski K., Virani S., Simmons B., Urry C. M. & Treister E., 2009b, *ApJ*, 692, L19
- [170] Scheuer P. A. G. & Readhead A. C. S., 1979, *Nature*, 277, 182

- [171] Schwarz, M.P., 1981, *ApJ*, 247, 77
- [172] Serber W., Bahcall N., Menard B. & Richards, G., 2006, *ApJ* 643, 68–74.
- [173] Shakura N. I. & Sunyaev R. A., 1973, *A&A*, 24, 337
- [174] Shaver P., 1988, *Large-Scale Structure of the Universe*, IAU Symposium No. 130, ed. J. Audouze et al. (Dordrecht: Reidel), 359
- [175] Shanks T., Fong R., Boyle B.J. & Peterson B.A., 1987, *MNRAS*, 227, 739
- [176] Shardha J., Miller S. H., Penner K., Skelton R. E. & Conseice C.J. et al., 2009, *ApJ*, 697, 1971
- [177] Silk J. & Rees M. J., 1998, *A&A*, 331, L1
- [178] Silverman J. D., Mainieri V., Lehmer B. D., Alexander D.M. & Bauer F. E. et al., 2008, *ApJ*, 675, 1025
- [179] Silverman J. D., Kovac K., Knobel C., Lilly S. & Bolzonella M. et al., 2009, *ApJ*, 695, 171
- [180] Skibba R. A., Bamford S. P. & Nichol R. C. et al 2009 *MNRAS* 399 966
- [181] Smith E. P., Heckman T. M., Bothun G. D., Romanishin W., & Balick B. 1986, *ApJ*, 306, 64
- [182] Smith G. P., Treu T., Ellis R. S., Moran S. M., & Dressler A. 2005, *ApJ*, 620, 78
- [183] Sparke L. S., Gallagher J. S., 2007, "Galaxies in the Universe: an introduction (2nd ed.), Cambridge University Press, p. 278
- [184] Soltan A., 1982, *MNRAS*, 200, 115
- [185] Somerville R. S., Hopkins P. F., Cox T. J., Robertson B. E., & Hernquist L., 2008, *MNRAS*, 391, 481
- [186] Sorrentino G., Radovich M. & Rifatto A., 2006, *A&A*, 451, 809-816
- [187] Strand N. E., Brunner R. J. & Myers A. D., 2008, *ApJ*, 688, 180
- [188] Strateva I., Ivezic Z., Knapp G.R., Narayanan V.K. & Strauss M.A et al., 2001, *ApJ*, 122, 1861
- [189] Tempel E., Tago E. & Liivamägi L. J., 2012, *A&A*, 540, A106
- [190] Tempel E., Tamm A., Gramann M., Tuvikene T. & Liivamägi L. J. et al., 2014, *A&A*, 566, A1
- [191] Tempel E., Kipper R., Tamm A., Gramann M. & Einasto M. et al. 2016, *A&A*, 588, A14

- [192] Tempel E., Tuvikene T., Kipper R. & Libeskind N. I., 2017, *A&A*, 602, A100
- [193] Tempel E., Saar E., Liivamägi L. J., Tamm A. & Einasto J. et al., 2011, *A&A* 529, A53
- [194] Tortora C., Antonuccio-Delogu V., Kaviraj S., Silk J. & Romeo A. D., 2009, *MNRAS*, 396, 6
- [195] Tran K.V. H., Franx M. & Illingworth G. D., et al. 2007, *ApJ* 661, 750
- [196] Tran K., Papovich C. & Saintonge A., et al. 2010, *ApJ*, 719, L126
- [197] Treu T., Ellis R. S., Kneib J., Dressler A. & Smail I., 2003, *ApJ*, 591, 53
- [198] Turner E.L. & Gott J.R. III, 1976, *ApJ Suppl.*, 32, 409
- [199] Valluri M., 1993, *ApJ*, 408, 57
- [200] Villar-Martin M., Arribas S., Emonts B., Humphrey A. & Tadhunter C. et al., 2016, *MNRAS*, 460, 130
- [201] Volonteri M., Salvaterra R., & Haardt F., 2006, *MNRAS*, 373, 121
- [202] Wake D. A., Miller C. J., Di Matteo T., Nichol R. C. & Pope A. et al., 2004, *ApJ*, 610, L85-L88
- [203] Wang W., Sales L. V., Henriques B. M. B. & White S. D. M., 2014, *MNRAS*, 442, 1363
- [204] Whitaker K. E., van Dokkum P. G., Brammer G., & Franx M., 2012, *ApJ*, 754, L29
- [205] White S. D. M., Navarro J. F., Evrard A. E., & Frenk, C. S. 1993, *Nat.*, 366, 429
- [206] Wilson A. S., & Colbert E. J. M., 1995, *ApJ*, 438, 62
- [207] Woods D. & Geller M., 2007, *ApJ*, 134, 527
- [208] York D. G., Adelman J., Anderson Jr. J. E., Anderson S. F. & Annis J. et al., 2000, *ApJ*, 120, 1579
- [209] Yu, Q. & Tremaine, S., 2002, *MNRAS*, 335, 965
- [210] Zeldovich Y. B., Einasto J., & Shandarin S. F., 1982, *Nature*, 300, 407