

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/80327> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Dvornik, A.

Title: The galaxy–dark matter connection: a KiDS study

Issue Date: 2019-11-13

8.1 POVEZAVA MED GALAKSIJAMI IN TEMNO SNOVJO

GLAVNA tema te disertacije je osredotočena na lastnosti in haloje temne snovi in na njihovo povezavo z galaksijami, ki jih lahko opazujemo v vesolju. Zaradi še vedno neznane narave temne snovi se le ta ponavadi preučuje z uporabo njene porazdelitve in lastnosti na galaktičnih in večjih razdaljah. Povezava med galaksijami in temno snovjo je pomembna iz treh glavnih razlogov, njeno razumevanje pa pomaga pri odgovoru na največja vprašanja v astrofiziki in kozmologiji danes. Prvo vprašanje vključuje razumevanje fizike tvorbe galaksij. Drugič, pomaga pri merjenju kozmoloških parametrov – če hočemo natančno izmeriti kozmološke parametre, moramo razumeti kako se galaksije povežejo s temno snovjo, in tretjič, pomaga pri poznavanju razvoja porazdelitve snovi in lastnosti temne snovi (Wechsler & Tinker 2018).

V standardnem kozmološkem modelu, v katerem prevladuje hladna temna snov in kozmološka konstanta (tako imenovani Λ CDM model), formiranje struktur v vesolju vodi predvsem dinamika hladne temne snovi. Gravitacijski kolaps fluktuacij gostote temne snovi in njihova kasnejša virializacija privedeta do tvorbe halojev temne snovi iz najbolj gostih mest v začetnem naključnem Gaussovem polju. Splošno je sprejeto, da vsaka galaksija prebiva v matičnem haloju iz temne snovi. Galaksije, ki se nahajajo na dnu gravitacijskega potenciala haloja temne snovi, so označene kot osrednje galaksije in galaksije, ki krožijo okoli osrednje galaksije, se imenujejo satelitske galaksije. Natančen način, kako galaksije poseljujejo haloje temne snovi, je še vedno tema aktivnih raziskav, h katerim ta disertacija prispeva nekaj spoznanj. Na splošno se povezava med populacijo galaksij in populacijo halojev temne snovi statistično modelira s Press-Schechterjevim formalizmom (Press & Schechter 1974). Ta formalizem postulira, da se masivne galaksije tvorijo na najbolj gostih delih osnovne porazdelitve temne snovi in da je povezava med galaksijam in temno snovjo mogoče povezati s količino, imenovano galaktični bias. Medtem ko ta formalizem napove pravilno število halojev kot funkcijo njihove mase in tudi dobro napove kopičenje galaksi, ima nekaj pomanjkljivosti. Bolj natančno, galaktični bias ima lahko ne-trivialno odvisnost od mase in razdalje. Splošno je sprejeto, da ta povezava ni linearna ali

deterministična. Poleg tega, zgodovina sestavljanja halojev temne snovi pušča odtise v opazovanih porazdelitvah galaksij, ki se nato ne ujemajo več s teoretičnimi napovedmi. Zgodovina sestavljanja, mehanizmi odstranjevanja mase in združevanja satelitskih galaksij nam prav tako puščajo različne odtise v povezavi temne snovi med osrednjimi in satelitskimi galaksijami. Zaradi teh dejstev obstaja veliko različnih modelov, ki temeljijo na statističnih postulatih Press-Schechterjevega formalizma in omogočajo da se povezava med temno snovjo in galaksijami modelira bolj natančno.

Priljubljen in uspešen način opisovanja povezave med galaksijami in temno snovjo je skozi porazdelitve zasedenosti halojev (halo occupation distribution – HOD), ki opisujejo verjetnostno porazdelitev števila galaksij z določeno lastnostjo (izsev ali vidna masa) v haloju, kot funkcijo mase haloja. Porazdelitve zasedenosti halojev se zaradi temeljnih razlik v lastnostih osrednjih in satelitskih galaksij posebej izrazijo za osrednje galaksije in satelitske galaksije. V skladu s temi predpostavkami je standardni HOD v celoti opisan s povprečnim številom galaksij, ki prebivajo v haloju z maso M . Načeloma je HOD lahko odvisen tudi od drugih lastnosti in ne samo mase haloja, kar nam lahko pomaga povezati galaksije z zgodovino sestavljanja halojev temne snovi (Wechsler & Tinker 2018).

HOD modele je mogoče še bolj posplošiti na tak način da lahko bolje opišejo opazovane populacije galaksij. Pogojna izsevna funkcija (conditional luminosity function – CLF) in pogojna funkcija vidne mase (conditional stellar mass function – CSMF) popolnoma opišeta porazdelitev vidne mase galaksij ali njihovega izseva kot funkcijo mase haloja. Običajno tudi ti dve funkciji razdelimo na dva dela: prispevek osrednjih galaksij in prispevek satelitskih galaksij. Te funkcije je mogoče neposredno določiti na vzorcu skupin in jat galaksij (van den Bosch et al. 2013; Cacciato et al. 2013).

Oba načina modeliranja povezave med galaksijami in temno snovjo, CLF in HOD, specificirata število galaksij na halo, napovedi iz modela pa lahko uporabimo na dva načina. Najbolj preprosto je, da s pomočjo računalniške simulacije N -teles ustvarimo haloje temne snovi in jih z metodo Monte Carlo naselimo z galaksijami, izbira galaksij pa sledi našemu izbranemu modelu. Nato izmerimo lastnosti galaksij iz sestavljenega kataloga in jih primerjamo z opazovanji. Drugi način uporabe vključuje združevanje CLF in HOD z analitičnim halo modelom s katerim lahko napovemo opazljive količine na analitičen način (Seljak 2000; Cooray & Sheth 2002). Pristop s halo modelom predpostavlja, da je vsa materija v Vesolju v halojih, ki jih je mogoče obravnavati kot gravitacijsko vezane objekte, ki so se odklopili od širitve Vesolja in se sferično sesedli pod lastnim gravitacijskim privlakom in imajo maso M , ki je vsebovana v sferi katere povprečna gostota je 200-krat večja od povprečne gostote vesolja. Število halojev temne snovi lahko nato opišemo z masno funkcijo, kar nam da število halojev z maso M . Če uporabimo rezultate simulacij N -teles, kjer je bilo ugotovljeno, da profil gostote halojev sledi univerzalni funkciji (Navarro et al. 1997) in ta profil združimo z masno funkcijo, začetnim spektrom moči snovi, in s HOD/CLF modelom, lahko napovemo množico opazljivk, s pomočjo katerih lahko podrobneje preučimo povezavo med galaksijami in temno snovjo.

Pod predpostavko, da so lastnosti galaksij in halojev temne snovi tesno povezane, je za vse modele najbolj omejujoča opazovalna meritev številčnost galaksij. Vsak model povezave med galaksijami in temno snovjo, v danem kozmološkem okvirju, bi

moral biti sposoben predvideti število galaksij kot funkcijo njihove vidne mase ali izseva. Čeprav je ta lastnost najbolj omejujoča, ne upošteva vseh lastnosti povezave med galaksijami in temno snovjo in lahko vodi do napačnih razlag. Da premagali to pomanjkljivost, lahko uporabimo tudi druge opazljivke (skupaj z številom galaksij), da dobimo boljši pogled na relacijo med temno snovjo in galaksijami. Naslednja meritev, ki jo lahko uporabimo, je dvotočkovna avtokorelacijska funkcija kopičenja galaksij. Ker je število halojev temne snovi močno povezano z njihovim kopičenjem, bo razmerje med vidno in temno snovjo opisalo tudi lastnosti kopičenja galaksij, ki prebivajo v teh halojih. Dvotočkovna avtokorelacijska funkcija, skupaj s številom galaksij, bo tako v celoti karakterizirala kateri koli model, ki ga želimo uporabiti za opis povezave med temno snovjo in galaksijami ter tako posredno spoznati naravo temne snovi.

S halo modelom je mogoče pridobiti tudi napovedi za dvotočkovno križnokorelacijsko funkcijo med galaksijami in temno snovjo (dvotočkovna avtokorelacijska funkcija opisuje korelacijo med galaksijami). Halo model nam da dvotočkovno križnokorelacijsko funkcijo med galaksijami in maso ξ_{gm} , ki je povezana s presežno površinsko gostoto $\Delta\Sigma$, ki v prvem približku opisuje projiciran radialni profil halojev temne snovi, ki ga je mogoče neposredno izmeriti z šibkim gravitacijskim lečenjem med posameznimi galaksijami (lečenje galaksija-galaksija). Lečenje galaksija-galaksija je meritev učinka gravitacijskega lečenja okoli posameznih galaksij, njegova moč pa je neposredno sorazmerna z maso halojev temne snovi okoli teh galaksij. Signal lečenja galaksija-galaksija je v večini primerov precej zapleteno opisati, saj osrednje in satelitske galaksije prebivajo v popolnoma različnih halojih, zato je potreben celoten model povezave med galaksijami in temno snovjo. Kljub temu meritve lečenja galaksija-galaksija dopolnjujejo pogled na meritve števila in dvotočkovne avtokorelacijske funkcije. Najpomembneje je, da lečenje galaksija-galaksija neposredno meri maso temne snovi in se tako tudi uporablja tudi za razvozlanje preostalih degeneriranosti v modelu, in sicer galaktičnega biasa.

8.2 GRAVITACIJSKO LEČENJE

Einsteinova sto let stara teorija splošne relativnosti (Einstein 1916) opisuje gravitacijo kot ukrivljenost prostora in časa okoli masivnih objektov. Ko svetloba potuje po ravni poti skozi raven prostor-čas, se bo vsakič, ko gre skozi ukrivljen prostor-čas, spremenila njena pot. To pomeni, da na svetlobo, ki potuje iz oddaljenih delov Vesolja, vpliva porazdelitev mase na njeni poti. Relativistični opis gravitacije na pot svetlobe je mogoče poenostaviti tako, da tvori teorijo, ki jo je mogoče popolnoma razviti v newtonskem okviru. Ker je učinek analogen optičnemu lečenju, je ta učinek znan kot *gravitacijsko lečenje*.

Gravitacijsko lečenje lahko uporabimo za ugotavljanje porazdelitve snovi v masivnih objektih v vesolju. Gravitacijsko lečenje nam bo sliko oddaljene galaksije povečalo in raztegnilo v smeri plimske sile. Plimsko raztezanje slik je neposredno sorazmerno s količino mase, ki je prisotna med takšno galaksijo in nami kot opazovalci, in jo lahko uporabimo za merjenje mase halojev temne snovi z lečenjem galaksija-

galaksija (npr. Leauthaud et al. 2011; van Uitert et al. 2011; Velander et al. 2014; Cacciato et al. 2014; Viola et al. 2015). Gravitacijsko lečenje lahko uporabimo tudi za preučevanje lastnosti Vesolja z lečenjem same strukture Vesolja, imenovano kozmično striženje (Bartelmann & Schneider 2001; Hildebrandt et al. 2017).

8.3 TA DISERTACIJA

V tej disertaciji smo raziskali različne vidike povezave galaksijami in temno snovjo, ki jih je mogoče meriti z gravitacijskim lečenjem, natančneje z uporabo lečenja galaksija-galaksija kot naše primarne metode. Za to smo uporabili halo model skupaj s porazdelitvami zasedenosti halojev za statistični opis povezave med galaksijami in haloji in tako izmerili “assembly bias” v skupinah galaksij. Isti teoretični model smo uporabili tudi za meritve lastnosti galaktičnega biasa. Poleg tega smo ponovno ocenili zmožnosti dvodimenzionalnega pristopa k lečenju galaksija-galaksija ter hkrati preučili napake, ki bi se lahko pojavile pri tej metodi. Na koncu smo uporabili dvodimenzionalno metodo za meritev razmerja vidne mase in temne snovi v satelitskih galaksijah.

V **2. poglavju** smo raziskovali možne odtise zgodovine sestavljanja halojev za spektroskopsko izbrane skupine galaksij iz pregleda neba Galaxy and Mass Assembly (GAMA) z uporabo šibkega gravitacijskega lečenja iz prekrivajočih se območij globljšega visokokakovostnega fotometričnega pregleda neba Kilo-Degree Survey (KiDS). Uporabili smo skupine galaksij iz GAMA pregleda neba s številom galaksij v skupini večjim od 4 iz katerih smo dobili vzorce skupin galaksij s primerljivimi povprečnimi masami halojev, vendar z drugačno porazdelitvijo satelitskih galaksij okoli osrednjih galaksij. Porazdelitev satelitskih galaksij je povezana s časom nastanka primarnih halojev. Izmerili smo signal gravitacijskega lečenja za skupine, ki imajo porazdelitev satelitskih galaksij bolj ali manj oddaljene od povprečja vseh skupin v vzorcu in ne najdemo nobenih znakov “assembly bias”-a. Razmerje biasa je $0,85^{+0,37}_{-0,25}$, kar je skladno z napovedjo Λ CDM modela. Naše skupine galaksij imajo značilne mase $10^{13} M_{\odot}/h$, kar dopolnjuje prejšnje raziskave zgodovine sestavljanja halojev na jatah galaksij.

V **3. poglavju** smo izmerili projicirano dvotočkovno avtokorelacijsko funkcijo galaksij in lečenje galaksija-galaksija s pomočjo GAMA in KiDS pregledov neba. Meritve smo nato uporabili za proučevanje lastnosti galaktičnega biasa. Koncept nelinearnega in stohastičnega galaktičnega biasa smo uporabili v HOD statističnem modelu s katerim lahko izmerimo proste parametre v HOD modelu in tako tudi razkrijemo naravo galaktičnega biasa. Funkcijo, s katero lahko opišemo galaktični bias $\Gamma_{\text{gm}}(r_p)$, smo ocenili s pomočjo analitičnega halo modela, s pomočjo katerega lahko ugotovimo kako se funkcija $\Gamma_{\text{gm}}(r_p)$ obnaša na različnih razdaljah in kje je izvir nelinearnosti in stohastičnosti v modelih HOD. Naša opazovanja so razkrila fizični razlog za nelinearnost in stohastičnost, ki smo ga nadalje podkrepili z analizo hidrodinamičnih računalniških simulacij. Glavni razlog za stohastičnost modelov HOD večinoma izvira iz ne-Poissonovega obnašanja satelitskih galaksij v halojih temne snovi in njihove prostorske razporeditve, ki ne sledi prostorski porazdelitvi temne snovi v haloju.

Opazena nelinearnost je večinoma posledica prisotnosti osrednjih galaksij, kar je v skladu s predhodnimi teoretičnimi raziskavami. Prav tako smo opazili, da bolj masivne galaksije močneje variirajo na različnih razdaljah. Naši rezultati kažejo, da se v HOD modelih skriva veliko informacij o galaktičnem biasu in je zato te modele priporočljivo uporabiti za določitev vpliva galaktičnega biasa v kozmoloških študijah.

V **4. poglavju** smo ponovno preučili zmožnosti in napake dvodimenzionalne metode lečenja galaksija-galaksija. Ta metoda izkorišča vse informacije o lečenih galaksijah, kot so njihovi natančni položaji in eliptičnosti. Tako ne uporablja samo lastnosti vzorca statistično enakovrednih galaksij, kot je to običajno pri enodimenzionalnem lečenju. Učinkovitost te metode smo primerjali s tradicionalno uporabljenim enodimenzionalnim tangencialnim strižnim signalom na naboru umetno generiranih podatkov, ki so generirani tako, da upoštevajo vse lastnosti trenutno naj sodobnejših pregledov neba, ki se uporabljajo za raziskave gravitacijskega lečenja. Ugotovili smo, da so v idealiziranih okoliščinah območja zaupanja meritev parametrov modela NFW v dvodimenzionalni analizi več kot 3-krat strožja od enodimenzionalnih rezultatov. Poleg tega je to izboljšanje odvisno od gostote števila leč in je večje pri večjih gostotah. Metodo smo primerjali tudi s pomočjo meritev na hidrodinamični računalniški simulaciji EAGLE, da bi preverili morebitne napake, ki bi se lahko pojavile zaradi manjkajočih galaksij, in ugotovili, da je metoda sposobna vrniti nepristranske ocene mas halojev. Zaradi svoje prednosti na območjih z visoko številčno gostoto galaksij je metoda še posebej primerna za preučevanje lastnosti satelitskih galaksij v jatah.

V **5. poglavju** smo uporabili podatke iz KiDS in GAMA pregledov neba, s pomočjo katerih smo sočasno izmerili razmerje med vidno maso osrednjih in satelitskih galaksij in maso njenih halojev. Razmerje smo izmerili za galaksije ki so spektroskopsko potrjene v skupinah galaksij v pregledu neba GAMA. Uporabili smo tako tradicionalno enodimenzionalno metodo v obliki tangencialnih strižnih meritev za določitev mase halojev naših galaksij ter za meritev razmerja med vidno maso in maso temne snovi, kot tudi dvodimenzionalno metodo. Za dvodimenzionalno metodo uporabimo celotno gravitacijsko strižno polje, ki uporabi vse razpoložljive informacije o lečah in natančnih položajih oddaljenih galaksij in njih eliptičnosti. Ugotovili smo, da je dvodimenzionalna metoda statistično boljša kot enodimenzionalna metoda. Obe metodi vodita do podobnih parametrov izmerjenih razmerij, ki so skladni s prejšnjimi rezultati v literaturi. Rezultati kažejo, da imajo satelitske galaksije na splošno nižje mase halojev kot osrednje galaksije glede na isto vidno maso.

Na koncu, v **poglavju 6** predstavljamo četrto javno objavo podatkov pregleda neba KiDS, ki več kot podvoji območje opazovanega dela neba, ki je bilo zajeto v prejšnji javni objavi podatkov, ki smo jih uporabili za glavni vir meritev šibkega gravitacijskega lečenja v zgornjih poglavjih. Moj prispevek k objavljenemu članku, na katerem temelji to poglavje, je vseboval vodenje obdelave fotometričnih podatkov s pomočjo sistema ASTRO-WISE, ki je bil uporabljen za izdelavo mozaika iz 1006 posameznih fotografij v štirih vidnih pasovih, iz katerih je pridobljena fotometrija v objavljenih katalogih. Natančen prispevek je opisan v poglavju 6, natančneje v razdelku 6.3.1.

