

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

Samenvatting

7.1 DE CONNECTIE TUSSEN STERRENSTELSELS EN DONKERE MATERIE

IN dit proefschrift richt het onderzoek zich op de eigenschappen van donkere materie en donkeremateriehalo's en hoe ze verbonden zijn met de sterrenstelsels die we in het heelal kunnen waarnemen. Vanwege de nog steeds onbekende aard van donkere materie bestuderen we haar doorgaans door middel van de eigenschappen van haar verdeling en haar eigenschappen op de schaal van sterrenstelsels en groter. De connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie is belangrijk vanwege drie hoofdredenen, en haar begrijpen helpt bij het beantwoorden van de grootste vragen in de astrofysica en kosmologie van vandaag. De eerste vraag behelst het begrijpen van de fysica van sterrenstelselvorming. Ten tweede, de gevolgtrekking van kosmologische parameters – als we de kosmologische parameters robuust willen meten, moeten we het samenspel van de sterrenstelsels en de donkere materie begrijpen, en ten derde, de gevolgtrekking van de evolutie van de materieverdeling en de eigenschappen van donkere materie (Wechsler & Tinker 2018).

In het standaard, door koude donkere materie en kosmologische constante gedomineerde (Λ KDM) kosmologische raamwerk wordt structuurvorming in het heelal voornamelijk gedreven door de dynamica van koude donkere materie. De gravitationele ineenstorting van donkeremateriefluctuaties en hun volgende virialisatie leidt tot de vorming van donkeremateriehalo's uit de hoogste dichtheidspieken in het aanvankelijke Gaussische willekeurige dichtheidsveld. Het is breed aangenomen dat elk sterrenstelsel zich bevindt in een moederhalo van donkere materie. De sterrenstelsels die zich op de bodem van de potentiaalput van de donkeremateriehalo bevinden, worden aangeduid als centrale sterrenstelsels en sterrenstelsels die zich in een baan om het centrale sterrenstelsel bevinden, worden aangeduid als satellietsterrenstelsels. De precieze manier waarop sterrenstelsels de donkeremateriehalo's bevolken is nog steeds een onderwerp waar actief onderzoek naar gedaan wordt, waaraan dit proefschrift enkele inzichten bijdraagt. In het algemeen wordt de connectie tussen de populatie van sterrenstelsels en de populatie van donkeremateriehalo's statistisch gemodelleerd met een uitgebreid Press-Schechterformalisme (Press & Schechter 1974).

Dit formalisme postuleert dat zware sterrenstelsels zich in de hoogste dichtheidspieken van de onderliggende donkerematerieverdeling vormen en dat de connectie gerelateerd kan worden aan een grootte genaamd sterrenstelselvertekening. Hoewel dit formalisme het juiste aantal halo's als functie van massa voorspelt en ook het clusteren van sterrenstelsels dat we waarnemen tot grote nauwkeurigheid voorspelt, heeft het enkele tekortkomingen. Expliciet kan de sterrenstelselvertekening zelf niet-triviaal afhangen van massa en schaal en is het algemeen geaccepteerd dat ze niet lineair of deterministisch is. Bovendien zal de assemblagegeschiedenis van donkeremateriehalo's kenmerken achterlaten in de waargenomen verdelingen die niet langer overeen zullen stemmen met de theoretische voorspellingen. De assemblagegeschiedenis en mechanismen van satellietmassastripping en samensmelting laten ons ook achter met verschillende eigenschappen van de donkerematerieconnectie voor centrale en satellietsterrenstelsels. Vanwege al dit bestaat een grote verscheidenheid aan verschillende modellen, alle bouwende op de statistische postulaten van het Press-Schechterformalisme.

Een populaire en succesvolle manier om de connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie te beschrijven is met de halobezettingsverdelingen (HBV), welke de kansverdelingen voor het aantal sterrenstelsels met een bepaalde eigenschap (lichtkracht of stellaire massa) in een halo specificeren, gegeven als een functie van halomassa. De halobezettingsverdelingen worden apart gekwantificeerd voor de centrale sterrenstelsels en de satellietsterrenstelsels, vanwege hun fundamentele observationele verschillen. Onder deze aannames is de standaard HBV aldus volledig gekarakteriseerd door haar gemiddelde bezettingsgraad van sterrenstelsels die zich in een halo van massa M bevinden. In principe kan de HBV een functie van eigenschappen anders dan halomassa zijn, wat ons kan helpen het verband te leggen tussen de sterrenstelsels en de assemblagegeschiedenis van donkeremateriehalo's (Wechsler & Tinker 2018).

De HBV-modellen kunnen verder uitgebreid worden om beter te lijken op sterrenstelselwaarnemingen en -populaties. De voorwaardelijke lichtkracht- (VLF) en voorwaardelijke stellairemassafuncties (VSMF) beschrijven de volledige verdeling van stellaire massa's en lichtkrachten van sterrenstelsels als functie van de halomassa. Ze zijn daarnaast doorgaans gescheiden in bijdragen van centrale sterrenstelsels en satellietsterrenstelsels en kunnen direct gemeten worden van een monster van sterrenstelselgroepen en -clusters (van den Bosch et al. 2013; Cacciato et al. 2013).

Zowel de VLF als de HBV-modellen specificeren het aantal sterrenstelsels per halo en de modelvoorspellingen kunnen op twee manieren gemaakt worden. Het meest voor de hand liggend is het bevolken van de donkeremateriehalo's uit een meerlichamensimulatie gebruikmakend van een Monte Carloaanpak, gevolgd door het meten van de eigenschappen van sterrenstelsels uit de samengestelde catalogus. Als alternatief kunnen zowel VLF als HBV gecombineerd worden met een analytisch halomodel om de observabelen op een semi-analytische manier te voorspellen (Seljak 2000; Cooray & Sheth 2002). De halomodelaanpak neemt aan dat alle materie in het heelal zich bevindt in halo's die als gravitationeel gebonden objecten kunnen worden beschouwd die ontkoppeld zijn van de uitdijning van het heelal en sferisch ineengestort zijn, met een massa M besloten in een straal waar de gemiddelde dicht-

heid 200 keer groter is dan de gemiddelde dichtheid van het heelal. De abundantie van donkeremateriehalo's kan dan gekarakteriseerd worden door de halomassafunctie, welke het aantal halo's gegeven een massa M oplevert. Als we de resultaten nemen van de meerlichamensimulaties waaruit gevonden werd dat het dichtheidsprofiel een universele massafunctie volgt (Navarro et al. 1997) en deze combineren met de halomassafunctie en het aanvankelijke materievermogenspectrum alsook de HBV/VLF-modellen, zijn we in staat om een veelvoud aan observabelen te voorspellen, waardoor we dan de connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie in meer detail kunnen bestuderen.

Onder de aanname dat de sterrenstelsel- en donkerematerie-eigenschappen nauw verbonden zijn, is de meest begrenzende observationele meting voor ieder model de abundantie van sterrenstelsels. Het model van de connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie, gegeven het kosmologisch model, zou in staat moeten zijn om de abundantie van sterrenstelsels te voorspellen als functie van hun stellaire massa of lichtkracht. Hoewel deze observationele eigenschap de meest begrenzende is, neemt ze niet alle eigenschappen van de connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie in ogenschouw en kan tot een verkeerde interpretatie leiden. Om dit te overkomen kan men ook andere meetmethoden gebruiken (samen met de sterrenstelselabundantie) om een beter perspectief te krijgen van de connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie. De volgende meting die men kan gebruiken is de tweepuntsclustering van sterrenstelsels. Omdat de abundantie van donkeremateriehalo's sterk verbonden is aan hun clusteringeigenschappen, zal de relatie van stellaire tot halomassa ook de clusteringeigenschappen voorspellen van de sterrenstelsels die zich in die halo's bevinden. De tweepuntsclustering van sterrenstelsels samen met de sterrenstelselabundantie zal aldus ieder model dat men wil gebruiken om de connectie tussen de donkere materie en sterrenstelsels te beschrijven, en aldus om over de aard van donkere materie te leren, volledig karakteriseren.

Met het halomodel kan men ook voorspellingen verwerven voor de kruiscorrelatie tussen sterrenstelsels en donkere materie (de tweepuntsclustering van sterrenstelsels beschrijft de correlatie tussen de sterrenstelsels). Het halomodel voorspelt de correlatiefunctie ξ_{gm} van sterrenstelsels en massa, gerelateerd aan het overschot van oppervlaktemassadichtheid $\Delta\Sigma$, welke tot eerste orde de geprojecteerde profielen van donkeremateriehalo's meet, die op hun beurt direct gemeten kunnen worden gebruikmakend van de lenswerking tussen sterrenstelsels. Lenswerking tussen sterrenstelsels is de meting van het zwaartekrachtlenseffect rond individuele sterrenstelsels en haar sterkte is rechtevenredig met de massa van de donkeremateriehalo's rond die sterrenstelsels. Het signaal van de lenswerking tussen sterrenstelsels is in de meeste gevallen vrij ingewikkeld om te interpreteren omdat centrale en satellietsterrenstelsels zich in volledig verschillende halo's bevinden, aldus is een volledig model van de connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie nodig. Desalniettemin leveren de metingen van lenswerking tussen sterrenstelsels een complementaire blik op de metingen van abundanties en tweepuntsclustering van sterrenstelsels. Het belangrijkste is dat ze direct massaschattingen van de donkeremateriehalo's leveren en dat ze ook gebruikt worden om de overgebleven degeneraties in het model, namelijk de sterrenstelselvertekening, te verbreken.

7.2 ZWAARTEKRACHTLENSWERKING

Einsteins honderd jaar oude algemene relativiteitstheorie (Einstein 1916) beschrijft zwaartekracht als een kromming van ruimtetijd rond een zwaar object. Terwijl licht een recht pad aflegt door vlakke ruimtetijd, zal het pad van een lichtstraal veranderen wanneer ze door een gekromde ruimtetijd beweegt. Dit betekent dat het licht dat uit de verre uithoeken van het heelal komt beïnvloed kan zijn door de verdeling van massa op zijn weg. De relativistische beschrijving kan vereenvoudigd worden om tot een theorie te komen die volledig ontwikkeld kan worden in het Newtoniaanse raamwerk. Omdat dit effect analoog is aan optische lenswerking, staat dit effect bekend als *zwaartekracht lenswerking*.

De zwaartekracht lenswerking kan gebruikt worden om de materieverdeling van zware objecten in het heelal te onderzoeken. Het waargenomen effect van zwaartekracht lenswerking op een beeld van een achtergrondsterrenstelsel is een vergroting en een getijde-achtige uitrekking van de oorspronkelijke vorm. De getijde-achtige uitrekking van de beelden is rechtevenredig met de hoeveelheid massa die zich tussen zo'n sterrenstelsel en ons als waarnemers bevindt en ze kan gebruikt worden om de massa's van donkeremateriehalo's te meten gebruikmakend van de lenswerking tussen sterrenstelsels (bijv. Leauthaud et al. 2011; van Uitert et al. 2011; Velandier et al. 2014; Cacciato et al. 2014; Viola et al. 2015). Zwaartekracht lenswerking kan ook gebruikt worden om de aard van het heelal te bestuderen met de lenswerking door de grootschalige structuur zelf, genaamd de kosmische afschuiving (Bartelmann & Schneider 2001; Hildebrandt et al. 2017).

7.3 DIT PROEFSCHRIFT

In dit proefschrift verkennen we verschillende aspecten van de connectie tussen sterrenstelsels en donkere materie die gemeten kunnen worden met zwaartekracht lenswerking, specifiek, gebruikmakend van lenswerking tussen sterrenstelsels als onze primaire meetmethode. We gebruiken het halomodel samen met de halobezettingsverdelingen om de connectie tussen sterrenstelsels en halo's statistisch te beschrijven en om de assemblagevertekening in rijke sterrenstelselgroepen te begrenzen. Hetzelfde theoretische raamwerk is ook gebruikt om de aard van sterrenstelselvertekening te begrenzen. Daarnaast herevalueren we de prestaties van de tweedimensionale aanpak van lenswerking tussen sterrenstelsels en bestuderen we de systematische fouten die zouden kunnen optreden in deze andere bestudering. Ten slotte gebruiken we de tweedimensionale methode om de relatie van stellaire tot halomassa van satellieten te meten.

In **Hoofdstuk 2** onderzoeken we mogelijke kenmerken van haloassemblagevertekening voor spectroscopisch geselecteerde sterrenstelselgroepen uit de Galaxy And Mass Assembly-opmeting (GAMA-opmeting) gebruikmakend van metingen van de zwakke zwaartekracht lenswerking uit ruimtelijk overlappende regionen van de diepere en hogere beeldkwaliteit hebbende fotometrische Kilo-Degree Survey (KiDS). We gebruiken GAMA-groepen met een schijnbare rijkheid groter dan 4 om monsters

te identificeren met vergelijkbare gemiddelde moederhalomassa's maar met een andere radiële verdeling van satellietsterrenstelsels, wat instaat voor de formatietijd van de halo's. We meten het zwakkelenwerkingssignaal voor groepen met een steilere en een vlakke satellietverdeling dan gemiddeld en vinden geen teken van haloassemblagevertekening, met de vertekeningverhouding van $0.85^{+0.37}_{-0.25}$, wat consistent is met de Δ KDM-voorspelling. Onze sterrenstelselgroepen hebben typische massa's van $10^{13} M_{\odot}/h$, wat op een natuurlijke manier eerdere studies van haloassemblagevertekening op schalen van sterrenstelselclusters complementeert.

In **Hoofdstuk 3** meten we de geprojecteerde sterrenstelselclustering en de signalen van lenswerking tussen sterrenstelsels gebruikmakend van de GAMA-opmeting en KiDS-opmeting om sterrenstelselvertekening te bestuderen. We gebruiken het concept van niet-lineaire en stochastische sterrenstelselvertekening in het raamwerk van halobezettingsstatistieken om de parameters van de halobezettingsstatistieken te begrenzen en om de oorsprong van sterrenstelselvertekening te onthullen. De vertekeningfunctie $\Gamma_{\text{gm}}(r_p)$ wordt geëvalueerd gebruikmakend van het analytische halomodel waaruit gevolgtrekkingen gemaakt kunnen worden over de schaalafhankelijkheid van $\Gamma_{\text{gm}}(r_p)$ en de oorsprong van de niet-lineariteit en stochasticiteit in halobezettingsmodellen. Onze waarnemingen onthullen de fysieke reden voor de niet-lineariteit en stochasticiteit, verder verkend gebruikmakend van hydrodynamische simulaties, waar de stochasticiteit voornamelijk voortkomt uit het niet-Poissoniaanse gedrag van satellietsterrenstelsels in de donkeremateriehalo's en hun ruimtelijke verdeling, welke niet volgt uit de ruimtelijke verdeling van donkere materie in de halo. De waargenomen niet-lineariteit is voornamelijk te wijten aan de aanwezigheid van de centrale sterrenstelsels, zoals opgemerkt was uit eerder theoretisch werk aan hetzelfde onderwerp. We zien ook dat over het geheel genomen zwaardere sterrenstelsels een sterkere schaalafhankelijkheid tonen, en tot op grotere stralen. Onze resultaten laten zien dat een schat aan informatie over sterrenstelselvertekening verborgen is halobezettingsmodellen. Deze modellen zouden daarom gebruikt moeten worden om de invloed van sterrenstelselvertekening te bepalen in kosmologische studies.

In **Hoofdstuk 4** bekijken we opnieuw de prestaties en systematische fouten van de tweedimensionale aanpak van lenswerking tussen sterrenstelsels. Deze methode buit de informatie over de daadwerkelijke posities en afplattingen van bronsterrenstelsels uit, in plaats van alleen gebruik te maken van de algemene eigenschappen van statistisch equivalente monsters. We vergelijken de prestaties van deze methode met het traditioneel gebruikte eendimensionale tangentiële afschuivingssignaal op een set van gemodelleerde data die lijkt op de huidige top van zwakkelenwerking-opmetingen. We vinden dat onder geïdealiseerde omstandigheden, de betrouwbaarheidsregio's van simultane begrenzingen voor de amplitude- en schaalparameters van het NFW-model in de tweedimensionale analyse meer dan 3 keer nauwer kunnen zijn dan de eendimensionale resultaten. Bovendien is deze verbetering afhankelijk van de lensaantaldichtheid en is ze groter voor hogere dichtheden. We vergelijken de methoden met de resultaten van de hydrodynamische EAGLE-simulatie ten behoeve van het testen voor mogelijke systematische fouten die zouden kunnen optreden vanwege missende lenssterrenstelsels, en vinden dat de methode in staat is om onvertekende schattingen van halomassa's te geven wanneer ze wordt ver-

geleken met de echte eigenschappen van de EAGLE-sterrenstelsels. Vanwege haar voordelen in gebieden met een hoge sterrenstelseldichtheid, is de methode bijzonder geschikt voor het bestuderen van de eigenschappen van satellietsterrenstelsels in clusters van sterrenstelsels.

In **Hoofdstuk 5** gebruiken we data van de opmetingen Kilo-Degree Survey (KiDS) en Galaxy And Mass Assembly (GAMA) om tegelijkertijd de relaties van stellaire tot halomassa van zowel centrale als satellietsterrenstelsels te begrenzen, voor spectroscopisch bevestigde sterrenstelsels in sterrenstelselgroepen, gebruikmakend van zwakke lenswerking. Voor de analyse gebruiken we de traditionele eendimensionale methode in de vorm van de gestapelde tangetiële afschuivingsmetingen om de halo- en subhalomassa's van onze sterrenstelsels te bepalen en om de relatie van stellaire tot halomassa te begrenzen, en daarnaast een tweedimensionale fit aan het volledige afschuivingsveld die alle beschikbare informatie over lenssterrenstelsels en precieze bronsterrenstelselposities en -afplattingen gebruikt. We vinden dat de tweedimensionale methode statistisch beter presteert dan de eendimensionale methode. Beide methoden leiden tot vergelijkbare parameters van de relatie van stellaire tot halomassa, welke consistent zijn met eerdere resultaten die in de literatuur gevonden zijn, wat laat zien dat de satellietsterrenstelsels in het algemeen lagere halomassa's hebben dan de centrale sterrenstelsels, gegeven dezelfde stellaire massa.

Ten slotte presenteren we in **Hoofdstuk 6** de vierde publieke data-uitgifte van de Kilo Degree Survey welke het oppervlak van de hemel beslagen door data-uitgifte 3, de data die we hoofdzakelijk gebruikten als onze bron van metingen van zwaartekracht lenswerking in de bovenstaande hoofdstukken, meer dan verdubbelt. Mijn bijdrage aan het artikel waarop dit Hoofdstuk is gebaseerd bestond uit het leiden van de ASTRO-WISE fotometrische datareductie, welke gebruikt werd om gestapelde afbeeldingen van 1006 richtingen in de vier banden te produceren, waaruit de fotometrie in de catalogi verkregen is. De precieze bijdrage is beschreven in Hoofdstuk 6, specifiek in Paragraaf 6.3.1.