Universiteit
Leiden
The Netherlands

Light weighed: on the statistics and systematics of weak gravitational lensing

Smit, D.M.

Citation

Smit, D. M. (2021, December 8). *Light weighed: on the statistics and systematics of weak gravitational lensing*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/3245825

Version:	Publisher's Version
License:	Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/3245825

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

6

Nederlandse samenvatting

"... en zelfs, als hij laat zien dat alle dingen één zijn door deel uit te maken van eenheid en dat hetzelfde ook veel is door deel uit te maken van veelheid, lijkt me dat helemaal niet vreemd; maar als hij laat zien dat de absolute eenheid ook veel is en de absolute veelheid weer één, dan zal ik oprecht verbaasd zijn."

– Socrates tegen Zeno in Plato's dialoog Parmenides, 129B.

In zijn Ideeënleer[1] beargumenteert Plato dat onze zintuigelijke waarnemingen slechts mogelijke reflecties of gestalten zijn van een onwaarneembare en unieke universele Vorm.

Voor sterrenkundigen is dit de dagelijkse realiteit: we zijn beperkt tot de informatie die ons op aarde bereikt in de vorm van elektromagnetische straling – zoals licht – of zwaartekrachtgolven. We kunnen in onze directe omgeving – ons zonnestelsel – kijken, maar we kunnen de Melkweg niet vanaf de andere kant observeren of een zwart gat in een ander sterrenstelsel opzoeken, metingen doen en weer terugkomen. Onze blik op de hemel is een momentopname in vergelijking met de miljoenen of zelfs miljarden jaren durende evolutie van objecten in het heelal.

Dat betekent dat ons perspectief uniek is, maar ook heel beperkt. Het is onze uitdaging om uit de observaties die we kunnen doen, de indirecte informatie te halen over alles wat we niet direct kunnen waarnemen. De grote vraag is dan: hoe weten we dat onze conclusies juist zijn?

In dit proefschrift combineren we daarom het onderzoek naar de verdeling van materie in groepen en clusters van sterrenstelsels met analyses van de systematische en statistische onzekerheden van onze onderzoeksmethoden. Zien we echt wat we denken te zien?

[1] Wellicht beter genaamd "vormenleer" of "gestaltenleer"

6.1 "De hemel bij nacht"

Voor wie op een heldere nacht voldoende lang naar het firmament kijkt[2] en steeds nieuwe sterren ontdekt, terwijl de hemel langzaam voorbij draait, zal het makkelijk voor te stellen zijn hoe haar aanblik de mensheid reeds duizenden jaren heeft gefascineerd.

Reeds vanaf het begin hebben mensen geprobeerd hun waarnemingen te verklaren en betekenis te geven. Eén van de oudste voorbeelden is het verhaal van de Plejaden, het Zevengesternte, dat in de Griekse mythologie het verhaal vertelt van zeven zusters, terwijl er maar zes sterren zichtbaar zijn voor de meeste mensen. Uit oude teksten, zoals van Aratus van Soli uit de 3^{e} eeuw voor Christus, blijkt dat de Grieken ook uitgingen van zes zichtbare sterren. Het verhaal lijkt daar ook op aangepast: de verklaring voor het aantal van zes zichtbare sterren is, dat één van de zusters (Merope) zich verstopt heeft voor de jager Orion. Maar waarom de associatie van zes sterren met een verhaal over zeven zusters? Een veel gebezigde aanname is dat het hier een *cognitieve vertekening* of *cognitieve bias* betreft: namelijk dat men, door het verhaal aan te passen, als het ware naar het eigen verwachtingspatroon toe heeft geredeneerd.

Het merkwaardige feit is echter dat verschillende culturen over de hele wereld dit verhaal kennen in één of andere vorm en al deze overleveringen vasthouden aan zeven, waarvan er één verdwenen is, in plaats van een verhaal te vertellen over zes. Dit suggereert dat deze verhalen een gezamenlijke oorsprong kennen uit een tijd, zo'n 100,000 jaar geleden, waarin de zevende ster nog wel te zien was (Norris & Norris 2021). Dat men lange tijd is uitgegaan van een onvolkomenheid in de mythologieën, gebaseerd op de aanname dat onze eigen observaties van zes sterren een juiste weergave van de werkelijkheid waren, legt het probleem van cognitieve bias juist bij onze theorieën. Het laat zien hoe belangrijk het is om ons niet blind te staren op de beelden die we zien, maar ook alert te zijn op de dingen die wij, zelfs in de moderne tijd, juist *niet* zien.

6.1.1 Waarnemingen en vertekening

Wellicht het bekendste voorbeeld van hoe ons perspectief een drempel kan zijn in het vormen van juiste theorieën, is het Ptolemeïsche wereldbeeld met de aarde in het centrum, dat meer dan 1400 jaar heeft standgehouden. Toen steeds groter wordende onnauwkeurigheden de onhoudbaarheid van dit model duidelijk maakten (zie bijvoorbeeld Figuur 1.1), was Copernicus' stap naar een heliocentrisch model – met de zon in het centrum – een fundamentele verandering in het paradigma. Het was echter nog steeds niet genoeg.

Ook Copernicus bleef vasthouden aan een ideaalbeeld van volmaaktheid, namelijk bewegingen in perfecte cirkels. Dit vooroordeel leidde ertoe dat zijn voorgestelde aanpassingen niet tot overtuigende verbetering leidden. Pas toen Kepler zijn theorie van elliptische banen formuleerde – een tweede, maar net zo fundamentele stap – konden waarnemingen en theorie met elkaar in overeenstemming worden gebracht.

In dit geval betreft het een bias in het model, dat intrinsiek niet geschikt was om de werkelijkheid te beschrijven. Een andere bekende vertekening in de astronomie is de Malmquist bias (Malmquist 1925), veroorzaakt doordat heldere objecten makkelijker te detecteren zijn en dus op grotere afstand waar te nemen zijn. Objecten die makkelijker te detecteren zijn, lijken vaker voor te komen en zijn ook nauwkeuriger te bestuderen. Dit zou ertoe kunnen leiden

[2]Zoals een student sterrenkunde bij het gelijknamige waarneempracticum

dat een steekproef niet aselect is: een zogenoemde selectiebias. Een maatschappelijk voorbeeld is het probleem van de prominente focus in de geschiedenis van medisch onderzoek op vrijgezelle, witte mannen (Dresser 1992).

Het brede concept van bias, als discrepantie tussen een waarneming of interpretatie en de 'waarheid', komt regelmatig terug in dit proefschrift, waarin we kijken naar bias in de waarnemingen, in de modellen, zelfs in de uitkomsten van statistische berekeningen en onze interpretatie van die uitkomsten.

6.1.2 Donkere materie

Eén van de grootste mysteries in de sterrenkunde is het mogelijke bestaan van donkere materie: iets wat we niet direct kunnen zien, maar waarvan we wel indirect de effecten kunnen waarnemen.

Op macroscopische schaal zijn er twee soorten interacties in het universum: één gebaseerd op elektromagnetisme, die er onder andere voor zorgt dat wij kunnen waarnemen in het zichtbare licht, radiogolven of andere frequenties; en één gebaseerd op gravitatie, die onder andere terug te zien is in de bewegingen in het heelal. Op deze schaal kijken we vooral naar sterrenstelsels, verzamelingen van biljoenen sterren of meer, zoals onze eigen Melkweg. Deze sterrenstelsels hebben de neiging bij elkaar te blijven, van groepen[3] van enkele sterrenstelsels tot grote clusters van honderden stelsels of meer.

Aan het begin van de 20e eeuw kreeg men het vermoeden dat er materie moest zijn, die wel interacteerde via zwaartekracht, maar niet via elektromagnetisme. Deze materie is daardoor niet direct waar te nemen. De term 'donkere materie' is voor het eerst gebruikt door de Nederlandse sterrenkundige Kapteyn (1922). De eerste significante waarnemingen kwamen van Zwicky (1933) in het nabije Coma cluster van sterrenstelsels. Uit deze waarnemingen leken individuele sterrenstelsels door grote gravitatiekrachten rondgeslingerd te worden. De zichtbare materie in Coma had echter niet genoeg massa om deze gravitatie te veroorzaken: Zwicky concludeerde dat er meer dan 400 keer zoveel massa nodig was dan zichtbaar was, om de grote snelheden die hij observeerde te verklaren. Ook hij gebruikte hiervoor de term 'Dunkele Materie'.

Het duurde tot in de tweede helft van de 20e eeuw voordat het probleem van deze ontbrekende of onzichtbare materie systematisch en overtuigend werd aangetoond door Rubin (1983) uit de interne snelheden van sterrenstelsels. In de jaren daarna bleek dit ook uit waarnemingen van de kosmische achtergrondstraling, bijvoorbeeld met de Planck satelliet (Planck Collaboration et al. 2014). Deze achtergondstraling is een soort echo van de Big Bang. De patronen in deze gloed suggereren dat er veel meer materie nodig is om de structuur en samenhang van het universum te verklaren, dan direct kan worden waargenomen. Ook uit deze waarnemingen lijkt er een overweldigende meerderheid van zo'n 80% van alle materie te zijn die niet zichtbaar is.

Om uit waarnemingen van de hemel massa's te bepalen, zijn vaak modellen en aannamen nodig. Zo gaat men er vaak vanuit dat een cluster van sterrenstelsels in evenwicht is, om de waargenomen snelheden te vertalen naar een massaverdeling. In dit proefschrift gebruiken we een andere, onafhankelijke methode om de materie in kaart te brengen: gravitationele lenswerking.

[3] Onze eigen Melkweg vormt samen met het vergelijkbare Andromedastelsel en een aantal kleinere stelsels de zogenaamde 'Lokale Groep'.

6.2 Gravitatielenzen

Gravitationele lenswerking is voor het eerst waargenomen door Dyson et al. (1920) en is gevoelig voor alle massaverdelingen, onafhankelijk van de toestand van die massaverdeling (zoals evenwicht) of de eigenschappen van de materie (heet of koud, zichtbaar of donker). Deze methode doet geen aannamen over de dynamische evenwichtssituatie in clusters of de astrofysische processen die de waarneembare straling veroorzaken, maar is gebaseerd op de geometrie van het heelal.

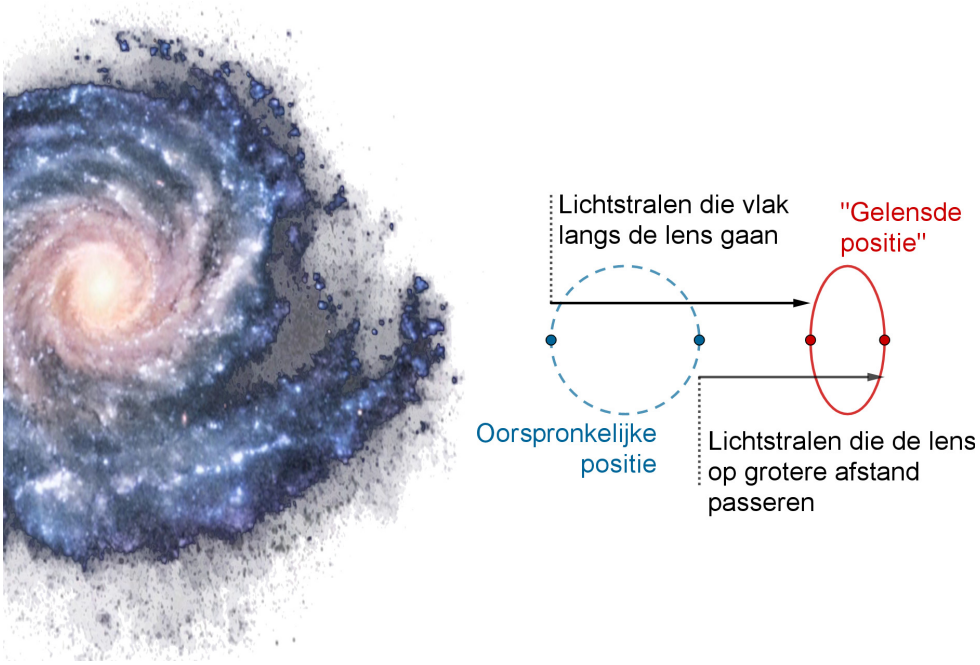
6.2.1 Kromming van ruimtetijd

Waar wij gravitatie ervaren als een 'kracht', wordt deze in de relativiteitstheorie van Einstein beschreven als een kromming van de ruimtetijd. Door deze kromming zijn er eigenlijk geen rechte lijnen in het universum. Ook lichtstralen (die geen massa hebben) worden daardoor beïnvloed door de "zwaartekracht" van objecten in de buurt van hun baan. Voor 'lenzen' wordt vaak gekeken naar sterrenstelsels of clusters van sterrenstelsels, vanwege hun grote massa en dus makkelijker meetbaar effect. Omdat wij het object dat de lichtstralen uitzond zien in de richting waar de lichtstralen vandaan leken te komen (zie ook Figuur 1.2), zorgt deze afbuiging voor een verplaatsing van objecten aan de hemel. In dit proefschrift beperken we ons tot zwakke lenswerking, waarbij dit effect zeer subtiel is en slechts statistisch waargenomen kan worden.

Bij zwakke lenswerking duwt deze subtiele verplaatsing het beeld van een bron in de achtergrond als het ware iets van het tussenliggende, 'lenzende' object vandaan (Figuur 6.1). Dit effect is logischerwijs het sterkst voor lichtstralen die dicht langs de lens gaan en minder voor lichtstralen die de lens op grotere afstand passeren. Als we naar objecten kijken die oorspronkelijk een bepaalde vorm hadden, zoals sterrenstelsels die in de achtergrond liggen, dan zien we dat het deel van het beeld dat dichter bij de lens ligt daardoor sterker verplaatst wordt en het deel dat verder van de lens ligt inhaalt: het beeld wordt als het ware iets platgedrukt, waardoor de ellipticiteit van het beeld wordt veranderd. Figuur 6.2 laat zien hoe deze vervorming aan de hemel een patroon zou kunnen veroorzaken in de ellipticiteiten van achtergrondbeelden.

De mate van deze vervorming kunnen we direct koppelen aan de massaverdeling van het lenzende object. Op deze manier kunnen we alle materie, zichtbaar en donker, in principe in kaart brengen, zonder dat we iets hoeven te weten of aan te nemen over de lens. Gravitationele lenswerking wordt daarom gezien als onafhankelijke en zeer belangrijke meetmethode voor het bestuderen van kosmologische modellen. Een beroemd voorbeeld is dat van het bullet cluster, weergegeven in Figuur 1.3. Het bullet cluster bestaat eigenlijk uit twee clusters, die met elkaar in botsing zijn gekomen. Hierdoor is het totale systeem duidelijk niet in evenwicht. Met behulp van Röntgenstraling zijn schokgolven te zien in het hete gas wat deze clusters meedroegen, maar door de botsing in het midden is achtergebleven (het linkerpaneel in Figuur 1.3). In het zichtbare licht zien we twee concentraties van sterrenstelsels, die als los zand door elkaar zijn gevlogen en dus verder van elkaar zijn verwijderd (het rechterpaneel in Figuur 1.3). Als we ons alleen op deze waarnemingen zouden baseren, zoals de aantallen sterrenstelsels en de intensiteit van het gas, zouden we de conclusie trekken dat het gas het grootste deel van de zichtbare massa vertegenwoordigt.

Door een reconstructie van de massaverdeling met behulp van zwakke lenswerking, de



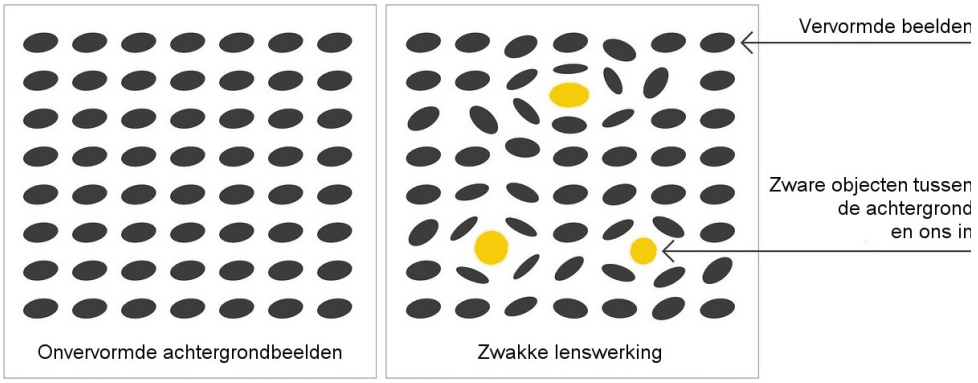
Figuur 6.1: Een voorbeeld van een lens (het grote sterrenstelsel links) met daarnaast het schematische beeld van een gelensd sterrenstelsel in de achtergrond (en daarom kleiner weergegeven). Lichtstralen die dicht langs de lens gaan worden sterker afgebogen dan lichtstralen dan lichtstralen die de lens op grotere afstand passeren. Hierdoor wordt het 'binnenste deel' van het oorspronkelijke (blauwe) beeld sterker weggeduwd dan het 'buitenste' deel. In het waargenomen, "gelensde" (rode) beeld heeft de binnenkant de buitenkant iets ingehaald, waardoor het beeld enigszins is platgedrukt.

groene contouren in Figuur 1.3, blijkt echter dat de grootste massaconcentraties verder uit elkaar liggen, niet bij het hete gas, maar juist waar de twee concentraties van sterrenstelsels zich bevinden. Er blijkt er veel meer materie in het bullet cluster te zijn dan zichtbaar is. Bovendien vertelt gravitationele lenswerking ons ook waar die materie zich bevindt en hoe deze tijdens de botsing heeft bewogen.

6.2.2 Metingen en interpretatie

Dat een model van gravitationele lenswerking geen aannamen hoeven te doen over de dynamische of astrofysische processen in de lenzende objecten, maakt het op dat punt minder gevoelig voor bijvoorbeeld model bias. Dit betekent echter niet dat gravitationele lenswerking niet haar eigen aannamen en onzekerheden kent. Bijvoorbeeld waar het de selectie en oorspronkelijke vorm van achtergrondbronnen betreft, maar ook in de statistische berekening van het effect en de interpretatie van die uitkomsten.

Om de vormen van achtergrondbronnen te meten, zijn zeer nauwkeurige beelden van hoge kwaliteit nodig. Deze beelden kennen altijd een vervorming door bijvoorbeeld de atmosfeer en de optica in de telescoop. Deze vervormingen lijken op vervormingen die veroorzaakt



Figuur 6.2: Een indicatie hoe achtergrondbeelden vervormd kunnen worden door zware objecten tussen die achtergrond en ons, de waarnemers, in. Links is een theoretische achtergrond te zien, zonder vervormingen. Rechts is geschetst hoe de ellipticiteit en de oriëntatie van die achtergrondbeelden verandert door gravitationele lenswerking. Bron: NOIRLab/NSF/AURA.

worden door gravitatielenzen en dus moet hier zorgvuldig voor gecorrigeerd worden. Bijvoorbeeld: als er meerdere beelden worden gecombineerd, kan deze correctie voor de totale combinatie wel nauwkeurig zijn, maar voor de individuele beelden een afwijking vertonen. In hoofdstuk 2 en 3 komen we hier in het bijzonder op terug.

Daarnaast moeten er aannamen worden gedaan over de oorspronkelijke vormen van achtergrondstelsels, terwijl we die nooit hebben kunnen meten. Wat dit betreft is gravitationele lenswerking een schoolvoorbeeld van het indirect waarnemen van een niet zichtbare 'ware vorm'. Om deze informatie te achterhalen, gebruiken we zogenaamde basismodellen die we vervormen en vergelijken met de waarnemingen. De benodigde vervorming is dan het signaal van de gravitationele lenswerking. We zijn dus gevoelig voor een model bias als het de achtergrondvormen betreft. Om dit zorgvuldig te ijken, vergelijken we in hoofdstuk 3 twee verschillende benaderingen hiervoor.

Omdat achtergrondbronnen bovendien al een eigen ellipticiteit hebben, combineren we een groot aantal achtergrondmetingen en nemen we daar het gemiddelde van. Het lenseffect is dan het netto signaal dat overblijft. Hierbij moeten we wel rekening houden met een complexe situatie: de combinatie van intrinsieke ellipticiteit en lenswerking is niet-lineair; de bijkomende meetruis is verschoven ten opzichte van de verdeling van de intrinsieke vormen; en de resulterende verdeling is asymmetrisch. Hierdoor wijkt dit gemiddelde van de gemeten vormen iets af van de waarde van de lenswerking, zoals we in hoofdstuk 4 en 5 aantonen.

Dit is hoe statistiek werkt: men voert een berekening uit en vervolgens koppelt men een betekenis aan de waarde die uit deze berekening volgt. Zelfs als de berekening goed wordt uitgevoerd, hoeft deze uitkomst niet *exact* te beschrijven hoe de situatie in elkaar steekt. Deze statistische bias beïnvloedt vervolgens onze reconstructie van de verdeling van materie aan de hemel. In hoofdstuk 4 en 5 bestuderen we daarom altenatieve statistische berekeningen, die dichter bij de waarheid *lijken* te liggen. In verder onderzoek zal duidelijk moeten worden of dat inderdaad zo is.

6.3 Dit proefschrift

Het onderzoek beschreven in dit proefschrift beslaat vier delen, namelijk een theoretische bespiegeling op de regressiestatistiek in de theorie van zwakke lenswerking en drie afzonderlijke analyses van zwakke lenswerking door groepen en clusters van sterrenstelsels, elk met een focus op bepaalde systematische onzekerheden in de methode.

In **hoofdstuk 2** (Smit et al. 2015) voeren we met behulp van zwakke lenswerking een analyse uit van de zogenaamde "supergroep" SG1120–1202, ook wel een protocluster genoemd (Gonzalez et al. 2005). SG1120–1202 lijkt namelijk te bestaan uit vier relatief lichte groepen van sterrenstelsels op gemiddeld 10 lichtjaren van elkaar. Voorspellingen tonen aan dat deze subgroepen over enkele miljarden lichtjaren samen zullen zijn gevoegd tot één groot cluster, vergelijkbaar met het Coma cluster. Omdat deze supergroep op 3,5 miljard lichtjaar afstand staat, zien we de ontwikkeling zoals deze 4 miljard jaar geleden was en zou deze samensmelting tot één cluster al plaats kunnen hebben gevonden.

De omvang van het gehele stelsel is qua onderlinge afstanden te vergelijken met het eerder genoemde bullet cluster, maar de subgroepen zijn van lagere massa en vertonen nog geen interactie. Ook hier is heet gas dat zichtbaar is in Röntgenstraling, maar dit vertoont geen interactie, zoals schokgolven. SG1120–1202 is onderdeel van een reeks onderzoeken, die onder andere aantonen dat de sterrenstelsels in de subgroepen het grootste deel van hun ontwikkeling al hebben doorgemaakt, hetgeen suggereert dat sterrenstelsels het grootste deel van hun tijd in kleinere groepen doormaken (Tran et al. 2008, 2009). Het vormt dus een unieke kijk op het ontstaan van structuur op kosmische schaal en toont het belang aan van het bestuderen van deze groepsfase.

Met behulp van zeer nauwkeurige waarnemingen met de Hubble Space Telescope (HST) hebben we de ellipticiteiten van achtergrondbronnen bepaald. Met behulp van aanvullende archiefdata van HST waarnemingen en de methoden uit Schrabback et al. (2010) zijn de storende vervormingen door onder andere de telescoop zelf nauwkeuriger bepaald, dan met alleen de gebruikte beelden zelf mogelijk zou zijn geweest. Gezien de onderlinge nabijheid van de subgroepen, is de gravitationele lenswerking van de supergroep in haar geheel gemodelleerd.

Uit het model bleek dat de massaverdeling in SG1120–1202 bijna hetzelfde is als die van de zichtbare sterrenstelsels en de Röntgenstraling van het hete gas in het protocluster, wat bevestigt dat de subgroepen nog niet hebben geïnteracteerd. Eén van de subgroepen ligt ongeveer 100 miljoen lichtjaar dichterbij dan de andere drie en vertoont geen verhoogde massaconcentratie. Van de andere drie hebben we onafhankelijke massabepalingen gedaan die eerdere bepalingen met andere methoden bevestigden.

Hoofdstuk 3 vormt een studie naar 79 zeer nabije en zeer lichte groepen van sterrenstelsels. Deze groepen zijn gevonden in de Two-degree-Field Galaxy Redshift Survey (Colless et al. 2001) en onderdeel van de Zürich Environmental Survey (Carollo et al. 2013), een onderzoek naar de eerder genoemde, belangrijke groepsfase in de ontwikkeling van sterrenstelsels.

Deze groepen, op slechts 600 miljoen lichtjaar afstand, variëren in massa van zeer licht (vergelijkbaar met onze eigen Melkweg) tot de (nog steeds lichte) subgroepen van de supergroep van hoofdstuk 2. Zulke hele lichte structuren zijn tot op de dag van vandaag nog steeds relatief onderbelicht. Daarnaast kon deze studie een oriëntatie vormen voor wat er met de geplande Kilo-Degree Survey (de Jong et al. 2013) mogelijk zou zijn. Dit is uiteindelijk gedaan

in Viola et al. (2015), met iets zwaardere groepen, die iets verder weg liggen.

Zowel de nabijheid als de lage massa van deze groepen vertalen zich naar een zeer zwakke lenswerking. Dit stelt extra hoge eisen aan de beheersing van systematische fouten en de kwaliteit van de meetmethoden. Een bijkomend effect is dat zulke lichte groepen moeilijker te vinden zijn, waardoor het niet altijd zeker is *dat* er een groep is of *waar* het centrum van de groep zich bevindt. Een belangrijk aspect is dus de mogelijke definitie van het centrum van zo'n groep, waarvoor we meerdere opties onderzocht hebben. In dit regime van zeer lichte groepen zijn onze methoden dus gevoeliger voor een mogelijke bias in de detectie of in de modellering van de lenzen.

Ook is er uitgebreid gekeken naar de vervormingen door de telescoop en de eerder genoemde effecten van samenvoeging van meerdere opnamen tot één beeld. Tenslotte hebben we twee methoden vergeleken om de vormen van de achtergrondbronnen te meten. De eerste methode gebruikt het meten van de helderheidsverdeling van de bronnen (KSB+, zoals beschreven in Erben et al. 2001). De andere methode vergelijkt de beelden van achtergrondbronnen met een zeer flexibele set modellen (Shapelets, zoals beschreven in Kuijken 2006).

De resultaten bleken goed met elkaar in overeenstemming. Hierdoor bleek het mogelijk om significante schattingen te maken van verschillende aspecten van de massa's van deze groepen. Deze bleken in goede overeenstemming met onder andere schattingen gebaseerd op de interne snelheden van de groepen. Die schattingen waren dus verkregen door het gebruik van eerder genoemde dynamische modellen. In het regime van (zeer) lage waarden zijn twee onafhankelijke methoden zeer belangrijk.

Hoofdstuk 4 (Smit & Kuijken 2018) is het eerste deel van een tweeluik over de statistische methoden die gebruikt worden voor regressie. Het welbekende gewogen gemiddelde werkt het best bij metingen waarvan de foutenverdelingen zich enigszins regelmatig gedragen, in het bijzonder de normale of Gaussische verdeling. Belangrijk is dat er niet een te groot aantal relatieve uitschieters in de afwijkingen voorkomt en bovendien dat die afwijkingen redelijk symmetrisch zijn verdeeld.

De natuurlijke verdeling van ellipticiteiten van sterrenstelsels vertoont een scherpe centrale piek, waar de meeste informatie te vinden is. Een methode die minder afhankelijk is van grote afwijkingen en meer van die centrale piek ligt dan voor de hand.

Daarnaast is het effect van lenswerking op die natuurlijke verdeling niet lineair en is de verdeling van meetfouten afwijkend. Dat zorgt voor een asymmetrie in de gemeten verdeling van ellipticiteiten die tot een afwijking – een statistische bias – van enkele procenten kan leiden in een gewogen gemiddelde, ten opzichte van de ware positie van de piek.

We bekijken enkele andere regressiemethoden, waarvan de belangrijkste twee de methoden van Kleinste Absolute Afwijking (Least Absolute Deviations of LAD) en Convexe Omhulling (Convex Hull Peeling of CHP) zijn. Beiden leiden in het eendimensionale geval tot de mediaan en zijn veel minder gevoelig voor sterk afwijkende waarden.

Deze regressiemethoden hebben we getest op verschillende simulaties van ellipticiteiten, die we optimaal konden aanpassen, en op de verdeling van gemeten ellipticiteiten in de catalogus van de Canada-France-Hawaii Lensing Survey (Heymans et al. 2012b). Daarbij hebben we gekeken naar de bias van de statistische methode, maar ook naar de betrouwbaarheid.

Uit ons onderzoek kwam naar voren dat de bias van CHP in theorie de kleinste kan zijn, maar dat LAD de meest betrouwbare verbetering oplevert ten opzichte van het gewogen gemiddelde, door een makkelijkere toepasbaarheid en stabielere uitkomsten.

In **hoofdstuk 5** (Smit et al. 2021) passen we de resultaten van hoofdstuk 4 toe. Hier-

voor gebruiken we nauwkeurige metingen van meer dan 10 miljoen achtergrondbronnen in 450 vierkante graden van KiDS. Als beoogde lenzen gebruiken we bijna 7000 tussenliggende clusters van sterrenstelsels, gevonden met de Adaptive Matched Identifier of Clustered Objects (AMICO, Bellagamba et al. 2018) in de KiDS waarnemingen.

Door de hoge kwaliteit en aantallen konden we het signaal nauwkeurig genoeg vaststellen, om het verschil van enkele procenten tussen het gewogen gemiddelde en LAD duidelijk zichtbaar te maken. In het bepalen van de verdeling van de dichtheid in de clusters kwam dit verschil het meest duidelijk naar voren. Dit hebben we vertaald naar het effect op de relatie tussen lichtkracht en massa van clusters van sterrenstelsels.

Ook in deze toepassing bleek LAD een iets hoger signaal te geven, met bovendien kleinere onzekerheden in de gevonden waarden.