



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Unveiling dark structures with accurate weak lensing

Herbonnet, R.T.L.; Herbonnet R.T.L.

### Citation

Herbonnet, R. T. L. (2017, September 26). *Unveiling dark structures with accurate weak lensing*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/55951>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/55951>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/55951> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Herbonnet R.T.L.

**Title:** Unveiling dark structures with accurate weak lensing

**Date:** 2017-09-26

---

## Nederlandse Samenvatting

---

### 6.1 De duistere kant van het Universum

De nachtelijke hemel wordt verlicht door duizenden zichtbare sterren en ontelbaar meer die niet helder genoeg zijn om met het oog waar te nemen. Al deze sterren vormen echter maar een klein deel van alle materie in het Universum. Enorme gaswolken bevatten het merendeel van deeltjes die in het hele licht spectrum zijn te observeren. Maar verreweg het meest voorkomend materiaal in het Universum is in de vorm van de mysterieuze donkere materie. Dit fenomeen is verantwoordelijk voor de grote hoeveelheid zwaartekracht die nodig is om astronomische objecten, zoals sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels, bijeen te houden. Hoewel de zwaartekracht van donkere materie reeds in de jaren dertig was opgemerkt, is donkere materie zelf (nog) niet waargenomen omdat het geen (bekende) interactie heeft met licht. Toch is ook donkere materie niet het meest dominante ingrediënt van het Universum: ongeveer 75% van het energie budget zit in donkere energie. Donkere energie is een beschrijving voor de waargenomen versnelde uitdijning van het Universum, terwijl een Universum gevuld met massa onder de invloed van zwaartekracht steeds langzamer zou moeten expanderen. De benaming van deze fysische verschijnselen is gekozen omdat men nog in het duister tast over de theoretische verklaringen ervoor.

Er zijn veel theoretische modellen ontwikkeld om het bestaan van donkere materie en donkere energie te verklaren, maar tot nu toe heeft geen enkel model een bevredigend antwoord gegeven voor alle kosmologische waarnemingen. Het zoeken van een fysische oorzaak wordt bemoeilijkt door het feit dat de donkere componenten van het Universum niet direct waargenomen kunnen worden. Er zijn wel experimenten die proberen deeltjes, die geproduceerd worden door donkere materie, te detecteren, maar daar is nog geen positief resultaat uit gekomen. In plaats daarvan worden de gevolgen van donkere materie en donkere energie bestudeerd en vergeleken met voorspellingen van theoretische modellen om de fysische oorsprong te achterhalen. Veel kosmologische onderzoeken richten zich op de totale hoeveelheid van donkere materie en energie in het Universum. Aan de hand daarvan kunnen fysische eigenschappen worden bepaald, zoals een mogelijke evolutie van donkere energie met de tijd.

Een van de mogelijkheden voor kosmologisch onderzoek is het in kaart brengen van de structuur in het Universum. Materie op kosmische schalen is niet willekeurig verdeeld, maar het klontert samen onder de invloed van zwaartekracht. Waarnemingen laten zien dat materie verdeeld is in een soort kosmisch web, waarbij sterrenstelsels zich bevinden in lange draden. Waar de draden elkaar kruisen ontstaan de grootste verzamelingen van massa in het Universum: clusters van sterrenstelsels. Simulaties laten ook zien dat de donkere materie een soortgelijke verdeling heeft en dat de zwaartekracht van de donkere materie de belangrijkste factor is voor het ontstaan van deze structuur. Daarentegen wordt de samenklontering tegengewerkt door de uitdijning van

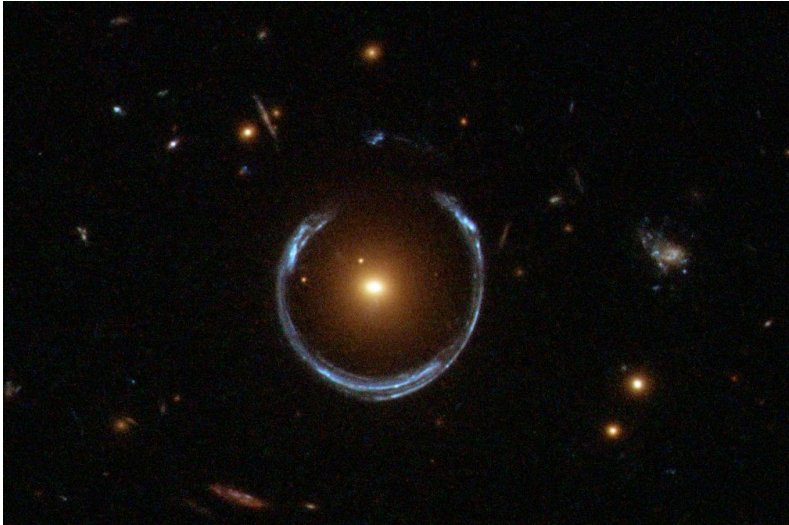
het Universum. Uit simulaties van hypothetische donkere materie deeltjes blijkt dat de aanwezigheid van donkere energie er voor zorgt dat er minder van de meest massieve objecten (ook wel *halo's* van donkere materie genoemd) zijn en dat de gemiddelde massa van halo's lager is. Door de massa's en verdeling van halo's in het Universum te meten en te vergelijken met simulaties kan de hoeveelheid donkere materie en donkere energie worden bepaald.

Het bepalen van de verdeling van massa in het Universum vereist een methode om donkere materie halo's in kaart te brengen. De grootste verzamelingen van lichtgevende deeltjes bevinden zich in massieve wolken van heet gas en in sterrenstelsels en deze objecten worden door de zwaartekracht van de donkere materie halo's aangetrokken. De locaties van de heldere objecten, die direct met telescopen waar te nemen zijn, onthullen dus de verdeling van donkere materie. Echter is de relatie tussen de hoeveelheid donkere- en lichte materie niet volledig bekend. Dit komt omdat de verscheidenheid aan astrofysische processen, die ondergaan worden door sterrenstelsels en gaswolken, nog niet volledig begrepen is. Er is dus een directe manier nodig om de massa van halo's van donkere materie te meten en daarmee empirisch de relatie tot heldere objecten te bepalen of de gehele verdeling van donkere materie in kaart te brengen. Het enige wat bekend is van donkere materie is dat het zwaartekracht uitoefent en het bestuderen van donkere materie kan dus alleen door middel van de zwaartekracht.

## 6.2 Zwaartekrachtlenzen

De algemene relativiteitstheorie van Albert Einstein beschrijft zwaartekracht als de invloed van een object met massa op de ruimte-tijd eromheen. De omliggende ruimte-tijd wordt gekromd en door deze kromming wordt het pad van het licht, uitgezonden door een helder hemellichaam achter het massieve object, verbogen. Het licht van het achterliggende hemellichaam zal anders worden waargenomen, dan dat het zou worden zonder het massieve object in de voorgrond. De zwaartekracht werkt dus als een optische lens en het massieve object wordt dan een *zwaartekrachtslens* genoemd. Voor kosmologische onderzoeken zijn de zwaartekrachtlenzen voornamelijk grote wolken van donkere materie en zijn de heldere achtergrond objecten verafgelegen sterrenstelsels. Sterrenstelsels zijn grote objecten en licht uit verschillende delen van het stelsel wordt anders beïnvloed door een zwaartekracht lens, waardoor het waargenomen beeld van sterrenstelsels wordt vervormd. Het Hoefijzer sterrenstelsel in Figuur 6.1 is een van de bekendste voorbeelden van lenswerking door zwaartekracht en laat de vervorming duidelijk zien. De blauwe band is een enkel helder sterrenstelsel direct achter het centrale gele sterrenstelsel dat door de bijbehorende donkere materie halo is vervormd. Deze vervorming is een herkenbaar teken van een zwaartekracht lens en kan gebruikt worden om de massa van de lens te bepalen. Dit geval van *sterke lenswerking* gebeurt alleen bij een sterrenstelsel direct achter een zwaartekracht lens. Zulke configuraties zijn zeldzaam.

In het meest voorkomende geval van *zwakke lenswerking door zwaartekracht* ligt een sterrenstelsel niet direct achter de zwaartekracht lens en is het effect een minieme uitrekking (*shear*) van het waargenomen licht profiel van het sterrenstelsel. In tegenstelling tot de duidelijke vervorming van het Hoefijzer stelsel, is deze shear veel kleiner dan de intrinsieke elliptische vorm van het sterrenstelsel. Het is dus onmogelijk om het effect van de zwaartekracht lens te bepalen voor een enkel stelsel. In plaats daarvan kan de shear met de vormen van een grote hoeveelheid sterrenstelsels statistisch



Figuur 6.1: Waarneming met de Hubble Space Telescope van het Hoefijzer sterrenstelsel. Het blauwe licht wordt uitgezonden door een enkel sterrenstelsel wat door lenswerking door zwaartekracht wordt vervormd. Hierdoor nemen wij het licht waar in de vorm van een hoefijzer. Het Hoefijzer sterrenstelsel is een bekend voorbeeld van sterke lenswerking door zwaartekracht en de massa van de zwaartekracht lens kan bepaald worden aan de hand het hoefijzervormige licht. In dit geval is het gelige sterrenstelsel in het midden van het hoefijzer bij lange na niet zwaar genoeg om het hoefijzer te veroorzaken en dus is er een halo van donkere materie rond dat sterrenstelsel.

worden gemeten, onder de aanname dat sterrenstelsels gemiddeld cirkelvormig zijn. Bij een intrinsiek cirkelvormig sterrenstelsel is de enige uitrekking afkomstig van de zwaartekracht lens en dus kan de shear geïsoleerd worden voor een verzameling van sterrenstelsels. De aanname vereist een zo groot mogelijke hoeveelheid waargenomen sterrenstelsels om de statistische fout door de intrinsieke vormen te verminderen. Experimenten met zwakke lenswerking (door zwaartekracht) gebruiken dus een zo groot mogelijk oppervlak aan de hemel.

Een belangrijk onderdeel van onderzoek naar zwaartekracht lenzen is het precies meten van de vormen van sterrenstelsels. Aangezien sterrenstelsels ruwweg kunnen worden beschreven als ellipsen, kan uit de ratio van de lengte van de assen de ellipticiteit worden bepaald, die wiskundig te relateren is aan de shear. Het bepalen van de ellipticiteit van een sterrenstelsel wordt bemoeilijkt door de andere processen die licht ondergaat als het zich een weg baant door de atmosfeer en de telescoop apparatuur. Dit zorgt voor versmering van het lichtprofiel van het sterrenstelsel met een puntspreidingsfunctie (PSF) en daarnaast is er altijd ruis in de observaties. Beide effecten kunnen de ellipticiteit van het waargenomen lichtprofiel veranderen en dus een meetfout in de shear veroorzaken.

Hoewel veel verschillende technieken zijn ontwikkeld om het effect van de PSF ongedaan te maken, is het effect van ruis pas in de laatste jaren meer bestudeerd. Door de verbeterde technologie, worden de experimenten met zwakke lenswerking steeds beter en moeten meetfouten ook beter onder controle worden gehouden. De enige (beproeft) manier om meetfouten van methoden die vormen meten te bepalen, is door de lichtprofielen van sterrenstelsels te simuleren na toevoeging van alle oorzaken

van vervormingen. Doordat de toegevoegde shear bekend is, kan de meetfout precies worden gekwantificeerd voor specifieke processen die het lichtprofiel beïnvloeden. Deze simulaties van telescoop opnames vormen de basis voor elk experiment met zwakke lenswerking door zwaartekracht.

## 6.3 Dit proefschrift

Dit proefschrift begint met het verbeteren van methodes om shear te meten. In het tweede deel van het proefschrift verleggen we de aandacht naar metingen van zwakke lenswerking door zwaartekracht van de grootste structuren in het heelal, met als uiteindelijk doel limieten te stellen aan de mogelijke hoeveelheid donkere energie en materie in het Universum.

In **Hoofdstuk 2** ontwikkelen wij een nieuw algoritme om de vormen van sterrenstelsels te meten. De nieuwe methode is speciaal ontworpen voor zwakke stelsels waarvoor het meten van vormen moeilijk is. In tegenstelling tot andere vergelijkbare methoden, is de deconvolutie van de PSF een analytisch proces, waardoor in principe ook kleine stelsels kunnen worden bestudeerd. De meetfout door de aanwezigheid van ruis is klein door het gebruik van een van tevoren vastgestelde gewichtsfunctie en het gebruik van momenten in plaats van ellipticiteit om de shear te bepalen. Deze meetfout kan verder worden verminderd door een extra analytisch proces en wij vinden dat ruis een meetfout van minder dan een procent introduceert. Dit resultaat is goed genoeg voor de huidige experimenten, al moet de methode nog worden getest voor andere oorzaken van meetfouten.

Een van de grootste experimenten voor zwakke lenswerking op dit moment is de Kilo Degree Survey (KiDS). Dit experiment zal uiteindelijk 1500 vierkante graden van de hemel bestuderen met behulp van zwakke lenswerking door zwaartekracht en de verdeling van donkere materie in kaart brengen, om daarmee limieten te zetten op kosmologische parameters. Het algoritme dat het KiDS team gebruikt om vormen te meten, moest gekalibreerd worden om de statistiek van de grote dataset volledig uit te buiten. In **Hoofdstuk 3** beschrijf ik de tests die wij hebben gedaan om een betrouwbare kalibratie te verzekeren. Met enorme simulaties van de KiDS data, waarbij de sterrenstelsels gesimuleerd zijn aan de hand van echte data, hebben wij de meetfout gekwantificeerd. Onrealistische simulaties kunnen een verkeerde meetfout opleveren en dus heb ik veel aandacht besteed om de eigenschappen van de gesimuleerde sterrenstelsels zoveel mogelijk op de echte data te laten lijken. Voor de overgebleven verschillen heb ik geverifieerd dat de kalibratie onveranderd bleef als de simulaties wel op de data lijken. De kalibratie die wij hebben verzorgd, is nauwkeurig tot op 1% en is gebruikt in, onder andere, de kosmologische analyse.

Een vergelijkbaar onderzoek als dat beschreven in **Hoofdstuk 3** heb ik tijdens mijn promotie traject verricht voor een andere studie, die buiten dit proefschrift beschreven is. Met dat onderzoek hebben wij een praktische methode om vormen te meten, zeer nauwkeurig gecorrigeerd voor meetfouten. Deze methode is toegepast op twee grote collecties van waarnemingen van clusters van sterrenstelsels om de massa's ervan te bepalen. Het werk voor een van deze collecties, die de zwaarste clusters bevat met een roodverschuiving lager dan 0.15, is beschreven in **Hoofdstuk 4**. De afstanden tussen de Aarde, de waargenomen clusters, en de vervormde achtergrond stelsels zijn bepaald met behulp van diepe fotometrische data. Met nog meer simulaties van telescoop opnames is bepaald hoe clusters de populatie van achtergrond stelsels beïnvloeden en dus het gemeten shear signaal veranderen. Na correctie voor dit laatste fenomeen,

heb ik de massa's gemeten van de clusters en deze vergeleken met andere schattingen van de massa. De massa gemeten aan de hand van het hete gas is een van de meest gebruikte indicatoren massa, omdat dit van veel clusters bekend is. Met onze directe metingen van de verdeling van donkere materie tonen we aan dat de relatie tussen de twee massa indicatoren afhangt van de massa van het cluster. Met deze relatie kunnen bestaande catalogi van massa metingen aan de hand van het gas beter gebruikt worden voor kosmologische analyses.

In **Hoofdstuk 5** gebruiken we dezelfde methode als in **Hoofdstuk 4** op dezelfde clusters en zijn we geïnteresseerd in de structuur binnen de clusters zelf. Hiertoe meten wij de massa's rond satelliet sterrenstelsels in het cluster. Satelliet stelsels zijn sterrenstelsels, die zich niet in het centrum van het cluster bevinden, omdat ze geïsoleerde sterrenstelsels waren die het cluster zijn ingevallen. Deze accumulatie van satelliet stelsels is een van de belangrijkste processen waarmee het cluster meer massa vergaart en toch is er nog maar weinig bekend over de donkere materie halo's rond deze satelliet stelsels (*subhalo's*). Om de massa van subhalo's te bepalen, moet de shear van sterrenstelsels, die zich in projectie dicht bij satelliet stelsels bevinden, gemeten worden. Het licht van de satelliet stelsels zorgt voor een meetfout en ik heb daarom nauwkeurig het effect van de nabijheid van deze objecten op de vorm metingen gekwantificeerd. We hebben de relatie tussen de massa's van subhalo's en van massa's in de sterren in satelliet sterrenstelsels bepaald en vinden overeenstemming met eerder werk. In tegenstelling tot ander werk vinden wij niet verschillende subhalo massa's als functie van nabijheid tot het centrum van het cluster. De onzekerheid in de metingen is vooralsnog te groot om een duidelijke conclusie te trekken over hoeveel massa van de subhalo verloren gaat als een satelliet stelsels het cluster invalt. Meer theoretisch en observationeel onderzoek in dit veld is nodig om de groei van clusters te begrijpen.

