



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Studying dark matter using weak gravitational lensing : from galaxies to the cosmic web

Brouwer, M.M.

Citation

Brouwer, M. M. (2017, December 20). *Studying dark matter using weak gravitational lensing : from galaxies to the cosmic web*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/58123>

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/1887/58123>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/58123> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Brouwer, Margot

Title: Studying dark matter using weak gravitational lensing : from galaxies to the cosmic web

Date: 2017-12-20

6 | Nederlandse samenvatting

“Dit kosmische mysterie van immense proporties, dat ooit op de rand van de oplossing leek, is alleen maar dieper geworden, en verbijstert astronomen en astrofysici nu meer dan ooit. De crux ... is dat het overgrote deel van de massa van het heelal lijkt te ontbreken.”

Hiermee beschrijft New York Times journalist William Broad in weinig woorden een van de grootste problemen in de moderne kosmologie. In de loop van de afgelopen tachtig jaar hebben astronomen steeds meer bewijzen gevonden voor een heelal waarin alle materie die we kennen – sterren, planeten, gas, stof, en zelfs exotische objecten zoals zwarte gaten en neutrino's – slechts 20% van alle massa verklaart. De overige 80% bestaat volgens de meeste astronomen uit een onbekend en onzichtbaar soort deeltje dat 'donkere materie' genoemd wordt. Deze mysterieuze substantie straalt geen licht uit en absorbeert het ook niet; het heeft er eigenlijk geen enkele invloed op. Kortom, de op licht gebaseerde waarnemingen waar de astronomie van alle tijden van afhankelijk is (van de oude Babyloniërs tot de modernste ruimte-telescopen) zullen ons bij dit probleem niet helpen. Sterker nog, voor zover de huidige waarnemingen hebben kunnen vaststellen, heeft donkere materie op bijna geen enkele manier wisselwerking met onze normale, zichtbare materie. Dit maakt het ongelooflijk moeilijk om donkere materie te onderzoeken. Maar, als donkere materie zo onzichtbaar is, hoe weten we dan dat ze bestaat? En als die materie bijna niets doet, hoe wordt er dan onderzoek naar gedaan?

6.1 Het donkere universum

Donkere materie is eigenlijk niet één keer, maar meerdere keren op verschillende manieren ontdekt, wat astrofysici steeds sterker van dit probleem heeft overtuigd. Al deze ontdekkingen hangen echter met één concept samen: de zwaartekracht. De zwaartekracht is, voor zover we weten, de enige manier waarop donkere materie met zichtbare materie wisselwerkt, en dit is ook de manier waarop astronomen zulke materie hebben ontdekt. De wetten van de zwaartekracht zijn namelijk al in 1687 beschreven door Isaac Newton, en in 1915 verbeterd door Albert Einstein. Door middel van deze zwaartekrachtwetten kunnen fysici precies uitrekenen hoeveel kracht twee massa's op elkaar uitoefenen, en welke bewegingen daarop moet volgen. Zo hebben astrofysici door het bestuderen van de beweging van zichtbare materie, zoals sterren en gas, kunnen ontdekken dat er meer massa moet zijn dan we kunnen zien.

Eén van de eersten die het bestaan van onzichtbare massa opmerkte was de Nederlandse astronoom Jan Hendrik Oort. In 1932 bestudeerde hij de bewegingen van naburige sterren, en concludeerde dat de massa in ons deel van de Melkweg groter moet zijn dan die van waargenomen sterren en gas. Zijn berekeningen bleken echter onvoldoende bewijs. De eerste die overweldigend bewijs voor de realiteit van het probleem van de donkere materie verzamelde, was de Amerikaanse astronome Vera Rubin. Tussen 1960 en 1970 observeerde ze met haar collega Kent Ford de rotatiekrommen van tientallen sterrenstelsels. In een rotatiekromme wordt de rotatiesnelheid van de sterren rond het centrum van het sterrenstelsel uitgezet tegen hun afstand tot het centrum. Als je weet wat de massa van de sterren en het gas in het sterrenstelsel is, kun je de vorm van deze rotatiekromme voorspellen door middel van Newtons zwaartekrachtwetten. De verwachting was dat de massa, en dus de rotatiesnelheid van het sterrenstelsel, zou afnemen met de afstand tot het centrum. Tot haar verbazing observeerde Vera Rubin echter dat de rotatiesnelheid niet daalde, maar gelijk bleef of zelfs bleef stijgen.

Het is niet verwonderlijk dat Vera's ontdekking in eerste instantie sceptisch werd ontvangen. Haar waarnemingen bevestigden echter wel een vermoeden dat twee grootheden uit de astronomie al eerder had uitgesproken. In 1933, een jaar na het onderzoek van Oort, merkte ook de Zwitser Fritz Zwicky, tijdens zijn onderzoek naar clusters van melkwegstelsels, dat de stelsels aan de rand van het Coma-cluster te snel bewogen om door de zwaartekracht van de zichtbare materie bij elkaar gehouden te worden. Het

cluster moest hiervoor zo'n 400 keer zwaarder zijn dan op grond van het zichtbare gas en de sterrenstelsels werd berekend. Frits Zwicky noemde deze missende massa zelfs als eerste 'Dunkele Materie'. Vera Rubin stond dus al snel niet alleen: van alle kanten bleek dat er iets niet in de haak was.

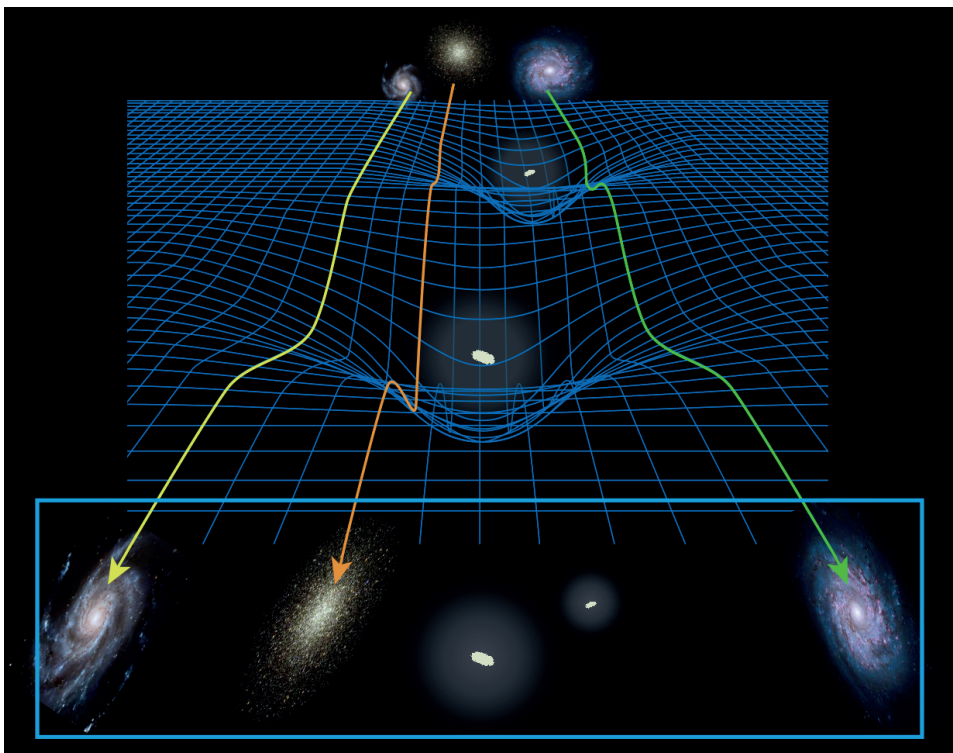
Voor zover we nu weten, kunnen al deze waarnemingen kortweg twee dingen betekenen:

1. Als de totale massa van objecten veel groter is dan kan worden afgeleid uit zichtbare materie, moet er een onzichtbare massa-component zijn die ervoor zorgt dat zowel afzonderlijke sterrenstelsels als clusters zo snel kunnen roteren zonder uit elkaar te vliegen. Deze massa wordt donkere materie genoemd.
2. De zwaartekrachtwetten van Newton en Einstein werken op de kosmische schaal niet hetzelfde als op kleine schaal, zoals op aarde en binnen ons zonnestelsel. Er moet een aanpassing op de huidige zwaartekrachttheorie komen, ook wel "geModificeerde Newtoniaanse Dynamica" (MoND) genoemd.

In beide kampen werken grote groepen astrofysici al jaren aan een definitieve verklaring van het probleem van de donkere materie, maar tot de dag van vandaag is de strijd nog altijd niet beslecht. Hoe kom je er nu achter welke van deze twee opties de missende massa het beste verklaart? En als donkere materie echt bestaat, hoe vind je het dan?

6.2 Buigende ruimte-tijd

Het probleem van zoeken naar donkere materie is dat het onzichtbaar is: volgens de huidige theorieën straalt het geen licht uit en absorbeert het dat ook niet; het heeft er eigenlijk geen enkele invloed op. Sterker nog: donkere materie heeft, voor zover we weten, geen enkele wisselwerking met normale materie, behalve door middel van de zwaartekracht. Omdat donkere materie, indien het bestaat, in ieder geval zwaartekracht uitoefent (en dus massa heeft), kunnen we er meer over te weten te komen door deze onzichtbare massa in kaart brengen. De methode hiervoor is al in 1915 door Albert Einstein voorspeld in zijn algemene relativiteitstheorie. In deze theorie zijn ruimte en tijd niet statisch en strikt gescheiden, maar een vierdimensionaal geheel (de ruimte-tijd) dat kan inkrimpen, uitrekken en buigen. Volgens Einstein is zwaartekracht niets anders dan kromming van de ruimte-tijd. Elke massa vervormt de ruimte-tijd, en kan daardoor het pad



Figuur 6.1: De kromming van de ruimte door de zwaartekracht rondom voorgrond-sterrenstelsels buigt het licht van achtergrond-sterrenstelsels dat door deze ruimte reist. Door de vervorming van de achtergrond-sterrenstelsels waar te nemen met een telescoop, kan de verdeling van zwaartekracht rondom de voorgrond-sterrenstelsels worden gereconstrueerd. Credit: APS/Alan Stonebraker; galaxy images from STScI/AURA, NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team.

van een andere massa veranderen of zelfs van een lichtstraal buigen. Dit effect is voor het eerst waargenomen door de Britse astronoom Arthur Eddington in 1919. Hij reisde met een telescoop en fotografische platen naar West-Afrika, om daar tijdens de zonsverduistering de sterren die rondom de zon lijken te staan waar te nemen. Doordat de zwaartekracht van de zon de ruimte-tijd kromt, waren de lichtstralen van deze sterren gebogen en leken ze verder van de rand zon te staan dan in werkelijkheid. Dit effect heet de “lenswerking van zwaartekracht”, omdat de zwaartekracht het licht net als een lens afbuigt. Eddington bewees met zijn waarneming dat Einsteins zwaartekrachttheorie de juiste was, waardoor Einstein in één klap beroemd werd.

Deze lenswerking is dus een unieke manier om de verdeling van zwaartekracht rondom astronomische objecten te meten. In dit proefschrift gebruiken we de lenswerking van zwaartekracht om de verdeling van donkere materie (of “extra zwaartekracht”) te meten rondom sterrenstelsels en grotere structuren. Dit gebeurt als volgt: stel dat we met onze telescoop in de richting van twee sterrenstelsels kijken. Op afbeelding 6.1 zijn deze sterrenstelsels te zien als gele vlekjes, met daaromheen de gekromde blauwe lijnen, die de ruimte weergeven. Ver achter deze sterrenstelsels staan een paar achtergrond-sterrenstelsels. Het licht van de achtergrond-sterrenstelsels reist door de gekromde ruimte. Hierdoor zien we deze sterrenstelsels vervormd door onze telescoop. De vervorming van de achtergrond-sterrenstelsels geeft dus aan waar de zwaartekracht zich bevindt. Omdat de lenswerking van zwaartekracht erg zwak is, zijn er niet één of twee, maar duizenden voorgrond-sterrenstelsels (met miljoenen achtergrond-sterrenstelsels) nodig om dit effect nauwkeurig te meten. De voorgrond-sterrenstelsels die bestudeerd worden in dit werk zijn waargenomen met de Galaxy And Mass Assembly (GAMA) survey, een samenwerkingsverband dat met de Anglo-Australian Telescope (AAT) zeer nauwkeurig de afstand en eigenschappen van tienduizenden sterrenstelsels heeft bepaald. De vervorming van de achtergrond-sterrenstelsels is zeer nauwkeurig waargenomen met de Kilo-Degree Survey (KiDS). Deze survey, die speciaal ontworpen is om de lenswerking van zwaartekracht waar te nemen, wordt uitgevoerd met de Very Large Survey Telescope (VST). Deze telescoop staat op de 2,6 kilometer hoge berg Cerro Paranal in Chili (te zien op afbeelding 6.2).

6.3 Dit proefschrift

In dit proefschrift meten we met KiDS de lenswerking van zwaartekracht rondom sterrenstelsels die zijn waargenomen met GAMA. Op deze manier kunnen we de verdeling van donkere materie (de extra zwaartekracht) vergelijken met de verdeling van zichtbare materie (de sterrenstelsels). Dit kan ons meer inzicht geven in het gedrag van donkere materie, wat ons aanwijzingen kan geven over wat het mogelijk zou kunnen zijn.

In **Hoofdstuk 2** van dit proefschrift bestuderen we de donkere materie rond groepen van sterrenstelsels (met 5 leden of meer). Groepen vertegenwoordigen de meest voorkomende omgeving waarin sterrenstelsels zich bevinden, wat ze belangrijke studie-objecten maakt. We verdelen de ~ 1400 groepen in verschillende categorieën op basis van hun waargenomen eigenschappen, en meten de gemiddelde massa van de donkere materie-wolk



Figuur 6.2: Het Paranal-observatorium in Chili. De Very Large Survey Telescope, waarmee de lenswerking van zwaartekracht wordt waargenomen, staat op de grote berg vooraan, net achter de vier telescopen van de Very Large Telescope. Credit: J.L. Dauvergne & G. Hüdepohl (atacamaphoto.com)/ESO

(die ‘halo’ wordt genoemd) rond de groepen in elke categorie. Zo kunnen we de massa van de halo meten als functie van o.a. de helderheid, de rotatiesnelheid, en het aantal leden van de groepen. Door onze waarnemingen te vergelijken met de Cosmo-OverWhelmingly Large Simulations (Cosmo-OWLS), kunnen we bepalen dat sterrenstelsels en hun halo’s sterk worden beïnvloed door de actieve kernen van sterrenstelsels, zogenaamde “Active Galactic Nuclei” (AGN), waardoor simulaties die deze niet in rekening nemen onrealistische voorspellingen geven.

In **Hoofdstuk 3** vragen we ons af of de donkere materie-halo’s rond sterrenstelsels worden beïnvloed door de grootschalige omgeving van de sterrenstelsels. Deze omgeving bestaat uit het zogenaamde “kosmische web”, een groot netwerk van structuren die bestaan uit donkere materie, sterrenstelsels en gas. Afhankelijk van het aantal dimensies waarin deze structuren zich uitstrekken worden ze gedefinieerd als: Voids (3-dimensionale leegtes), Sheets (2-dimensionale platen), Filaments (1-dimensionale filamenten) en Knots (0-dimensionale knopen). We verdelen de GAMA-sterrenstelsels

in 4 categorieën op basis van de kosmische omgeving waarin ze wonen, en meten de gemiddelde massa van hun donkere materie-halo's. We corrigeren deze massa voor de zichtbare massa's van de sterrenstelsels (gebaseerd op het licht van sterren en gas) en de invloed van de lokale omgeving (dichtbijzijnde sterrenstelsels), en richten ons puur op de invloed van de kosmische omgeving. Wanneer we deze correcties toepassen vinden we geen afhankelijkheid van de halo-massa met betrekking tot de kosmische omgeving.

In **Hoofdstuk 4** bestuderen we de structuur van het kosmische web zelf, door het meten van de lenswerking van de zwaartekracht van 'troughs' (langwerpige leegtes of 'troggen') en 'ridges' (langwerpige verdichtingen of 'ruggen'). Dit zijn cirkelvormige gebieden aan de hemel die minder (in het geval van de troughs) of meer (ridges) sterrenstelsels bevatten dan gemiddeld. Door de kracht van de lenswerking rondom troughs en ridges te meten als functie van hun sterrenstelsel-dichtheid, kunnen we de connectie tussen hun normale (lichtgevende) massa en hun donkere massa bestuderen. Door de troughs en ridges te scheiden als functie van hun afstand in de ruimte (wat door de beperkte snelheid van het licht gelijk staat aan een afstand in de tijd) proberen we hun ontwikkeling door de tijd te bepalen. Op de relatief kleine afstanden die we momenteel tot onze beschikking hebben kunnen we geen significante evolutie van deze structuren vinden. Echter, met behulp van simulaties kunnen we voorspellen dat deze evolutie gemeten zou kunnen worden met toekomstige nauwkeurigere telescopen, die sterrenstelsels op grotere afstanden kunnen waarnemen.

In **Hoofdstuk 5** beschrijven we de eerste test van Erik Verlinde's nieuwe theorie van Emergente Zwaartekracht door middel van de lenswerking van zwaartekracht. Deze theorie probeert een alternatieve verklaring te geven voor de extra zwaartekracht die momenteel aan donkere materie wordt toegeschreven. De voorspellingen van de theorie zijn nog beperkt toepasbaar: alleen op bolsymmetrische, statische en geïsoleerde massaverdelingen. Daarom hebben we de 33,613 GAMA-sterrenstelsels die we voor deze test hebben gebruikt nauwkeurig geselecteerd. Met behulp van de zichtbare massa's van deze sterrenstelsels kunnen we de voorspelde zwaartekrachtverdeling van Verlindes theorie bepalen, en daarmee de voorspelde lenswerking van de zwaartekracht. Hierbij moeten we aannemen dat Emergente Zwaartekracht het licht precies zo afbuigt als in Einsteins algemene relativiteitstheorie, en het omgevende heelal zich op ongeveer dezelfde manier blijft gedragen. Deze voorspelling lijkt veel op die van MoND in het geval van een puntmassa, maar wijkt af voor grotere massaverde-

lingen. We vergelijking Verlinde's voorspelling met de door ons gemeten zwaartekrachtsverdeling rond sterrenstelsels van vier verschillende massa's. Onze conclusie is dat de Emergente Zwaartekrachttheorie de waarnemingen even goed voorspelt als het donkere materie-model. In dit laatste model zijn echter vier vrije parameters nodig voor het bepalen van de vier verschillende massa's van de halo's rond de sterrenstelsels, terwijl Verlinde's voorspelling direct voortvloeit uit de gemeten zichtbare massa's van de sterrenstelsels. Hoewel dit een interessant eerste resultaat is, zijn er nog zeer veel waarnemingen die niet door Emergente Zwaartekracht kunnen worden verklaard. Zowel de theoretische achtergrond als de observationele tests van deze theorie zullen daarom sterk moeten worden uitgebreid voordat het kan worden beschouwd als een alternatieve verklaring voor donkere materie.

Deze samenvatting is gebaseerd op:

- *Donkere materie (1): Een duistere ontdekking*, Margot Brouwer (<http://www.quantumuniverse.nl/donkere-materie-1-een-duistere-ontdekking>)
- *Donkere Materie (2): Strijd tussen de sterren*, Margot Brouwer (<http://www.quantumuniverse.nl/donkere-materie-2-strijd-tussen-de-sterren>)
- *Een eerste test van de theorie van Erik Verlinde*, Margot Brouwer & Manus Visser (<http://www.quantumuniverse.nl/een-eerste-test-van-de-theorie-van-erik-verlinde>)