



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Weighing the dark : cosmological applications of gravitational lensing**

Köhlinger, F.

### **Citation**

Köhlinger, F. (2016, September 28). *Weighing the dark : cosmological applications of gravitational lensing*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/43359>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License:

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/43359>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/43359> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Köhlinger, F.

**Title:** Weighing the dark : cosmological applications of gravitational lensing

**Issue Date:** 2016-09-28

## 6.1 Modern kosmologisch onderzoek

Het huidige kosmologische model is gebaseerd op Einstein's algemene relativiteits theorie, die de interactie beschrijft tussen materie (ofwel energie, zoals Einstein's  $E = mc^2$  ons vertelt) en ruimte-tijd. Hieruit is in de laatste honderd jaar een fysisch model, het kosmologische model, opgekomen dat het ontstaan en de evolutie verklaart en het uiteindelijke lot van het universum voorspelt. Dit model beschrijft met succes een verscheidenheid aan waarnemingen met slechts een paar parameters. Desondanks, blijft een fysische verklaring voor de dominante bestanddelen, donkere materie en donkere energie, uit.

Het enige wat bekend is over donkere materie is dat het alleen door middel van zwaartekracht interactie heeft en dat het geen licht uitstraalt (vandaar de toepasselijke benaming 'donkere' materie). Echter, donkere materie speelt een belangrijke rol in de formatie van kosmologische structuren, die als een spinnenweb over het universum verspreid zijn en dus het kosmische web worden genoemd. De knopen van dit web bevatten de grootste objecten in het universum: clusters van honderden melkwegstelsels, die bij elkaar gehouden worden door hun eigen zwaartekracht. Zulke clusters van melkwegstelsels bestaan voornamelijk uit donkere materie en zijn daarom een ideaal laboratorium om de interactie tussen donkere materie en 'gewone' materie in te onderzoeken.

Een grote openbaring die uit het kosmologische model naar voren is gekomen, is dat de ruimte uitzet (alleen op kosmologische afstanden en astronomische objecten worden bijeen gehouden door hun eigen zwaartekracht). De uitdijning van het universum met de tijd betekent ook dat er een punt in het verleden is geweest waarin het universum is begonnen met uitdijen vanuit het kleinste punt. Er wordt gedacht dat deze oerknal 13,8 miljard jaar geleden heeft plaats gevonden. Het universum begon met een hoge dichtheid en temperatuur en naarmate de expansie vorderde, werd het minder dicht en koelde het af. Toen de juiste temperatuur bereikt was waarop neutrale (waterstof) atomen uit het plasma van hete subatomaire deeltjes en straling geformeerd konden worden (ongeveer 380 000 jaar na de oerknal), werd het universum transparant voor straling. Zelfs in de moderne tijd kunnen we nog de thermische straling zien die na de formatie van neutraal waterstof vrij rond kon bewegen. Deze gloed wordt de kosmische achtergrond straling genoemd. Alsmar preciezere metingen worden gedaan aan de minieme variaties in temperatuur van de kosmische achtergrond straling door satellieten in de ruimte zoals *WMAP* (engelse afkorting voor *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) of *Planck*. Deze metingen geven ons de sterkste limieten voor de parameters in het kosmologische model.

Recente waarnemingen laten zien dat het universum versnelt aan het uitdijen is. Deze versnelling wordt toegeschreven aan 'donkere energie'. De benaming 'donkere energie' is voornamelijk een beschrijving van hoe wij in het duister tasten over wat dit fenomeen is. Donkere energie moet dus vooral gezien worden als een verzamelnaam voor een verscheidenheid aan theorieën die de versnelde uitdijning proberen te verklaren. Sommige van deze theorieën

hebben verstrekkende gevolgen, zoals een revisie van Einstein's theorie van de zwaartekracht. Hierdoor is de studie naar donkere energie een van de belangrijkste vragen binnen het hedendaagse kosmologische onderzoek. Hoewel we nog niet weten welke natuurkundige principes zich achter donkere energie schuilhouden, kunnen we wel de effecten van donkere energie bestuderen. Donkere materie is de drijvende kracht achter de versnelde uitdijning van het universum en de uitdijning kan zeer precies worden bestudeerd door te kijken naar de evolutie van structuren van kosmologische grootte. Bekende subatomaire deeltjes die ook de evolutie van deze enorme structuren beïnvloeden zijn neutrinos. Deze deeltjes reizen met bijna de lichtsnelheid en reageren nauwelijks door middel van de zwakke kracht (een van de vier fundamentele krachten in de natuurkunde) en de zwaartekracht. De wisselwerking tussen neutrinos en andere deeltjes is zo zwak dat op dit moment ongeveer 70 miljard neutrinos per seconde door uw duim nagel gaan. Het onderzoek dat heeft aangetoond dat neutrinos ook door middel van de zwaartekracht reageren, en dus een massa hebben, is beloond met een Nobelprijs. Het is echter niet mogelijk om met de huidige techniek met behulp van deeltjes fysica experimenten de absolute massa van neutrinos te bepalen. De sterkste aanwijzingen voor de maximale massa die neutrinos kunnen hebben, komen uit studies naar de kosmische structuren.

## 6.2 Zwaartekrachtslenzen

Een goede manier om de donkere materie en donkere energie in het universum te bestuderen is door middel van zwaartekrachtslenzen. Het principe van lenswerking door zwaartekracht beschrijft hoe licht vanuit een bron, zoals een sterrenstelsel, wordt afgebogen door een verzameling van massa, die zich voor de bron bevindt en de 'lens' wordt genoemd. Afhankelijk van de geometrische opstelling van de bron, de lens en de waarnemer en hoe de massa verdeeld is over de lens, kunnen zulke afbuigingen 'sterk' zijn, waardoor de bron vervormd wordt of te zien is op verschillende posities. Dit soort fenomenen worden effecten van 'sterke zwaartekrachtslenzen' genoemd en zijn alleen te zien dicht (in projectie) bij de lens. Op grotere afstand van de lens worden alleen lichte vervormingen van de bron waargenomen. Het zwakke effect van zwaartekrachtslenzen op grote afstand is een van de redenen dat een statistische aanpak nodig is om het te meten. Een andere reden is dat de intrinsieke vorm van een sterrenstelsel niet te onderscheiden is van de vervorming door de zwaartekrachtslens. We kunnen echter aannemen dat voor een grote groep van sterrenstelsels, die elk een willekeurige vorm hebben, de intrinsieke vormen uit het gemiddelde wegvallen. De enige vorm die overblijft in het gemiddelde is dan de vervorming ten gevolge van de zwaartekrachtslens. Deze aanpak wordt zwakke lenswerking door zwaartekracht genoemd.

De massa van de lens kan bepaald worden met behulp van zwakke en sterke lenswerking door zwaartekracht. Dit maakt zwaartekrachtslenzen een goede manier om kosmologisch onderzoek mee te doen. Het is namelijk de *totale massa* van donkere materie en lichtgevende materie van een lens die de vervorming veroorzaakt. Daarom is het bestuderen van de massa en massa verdeling van clusters van melkwegstelsels een uitstekende manier om limieten te zetten op de parameters van het kosmologische model. In het bijzonder is de hoeveelheid van clusters van sterrenstelsels van een gegeven massa, op een gegeven tijd, in een gegeven volume, een belangrijke kosmologische test. Deze test is echter alleen mogelijk met precieze metingen van de massa's van de clusters.

Het is niet alleen mogelijk om individuele astronomische objecten als zwaartekrachtslenzen te gebruiken. Het is ook mogelijk om het hele universum te gebruiken als zwaartekrachtslens. Licht dat door verschillende kosmische structuren reist, wordt door de zwaartekracht ervan aangetast. Door de zwakke lenswerking te bestuderen op verschillende kosmische tijd-

stippen kan de evolutie van de kosmische structuren worden bepaald. Deze tijdsevolutie kan ons weer meer vertellen over hoe donkere energie kosmische structuren beïnvloedt. De studie naar zwakke lenswerking door kosmische structuren wordt ‘cosmic shear’ in het Engels genoemd, maar we zullen het hier verder ‘kosmische lenswerking’ noemen. Op het moment worden verschillende kosmische lenswerking experimenten gedaan met observaties van grote delen van de hemel. Deze observaties van ongeveer 1000 vierkante graden zijn slechts voorlopers van toekomstige observaties van de gehele hemel.

### 6.3 Dit proefschrift

In dit proefschrift zullen wij toepassingen van zwakke en sterke lenswerking door zwaartekracht presenteren in de context van de kosmologie.

In **Hoofdstuk 2** bestuderen wij de massa en de massa verdeling van RX J1347.5–1445, een van de zwaarste clusters van sterrenstelsels. Daarnaast is dit cluster ook een van de helderste Röntgen straling objecten in de hemel. Dit komt door de grote hoeveelheid van ‘intra-cluster gas’, dat zo heet is dat het Röntgen licht uitzendt. De sterke lenswerking door zwaartekracht van het cluster veroorzaakt grote heldere blauwe bogen en hetzelfde achtergrondstelsel kan op verschillende posities waargenomen worden. Voor dit onderzoek gebruiken wij gearchiveerde diepe observaties gemaakt met de *Hubble Space Telescope*. Wij presenteren een gedetailleerd model van het cluster als een sterke zwaartekracht lens, dat gemaakt is met behulp van twee onafhankelijke modellerende methodes. Daarnaast meten wij het profiel van de massa verdeling van de binnenste kern van het cluster.

In **Hoofdstuk 3** bekijken wij verzamelingen van clusters van sterrenstelsels en stellen wij de vraag wat de beperkingen zijn voor zwakke lenswerking door zwaartekracht om massa’s voor verzamelingen van clusters te bepalen. Deze studie is uitgevoerd met de geplande *Euclid* missie in gedachten. Wij bepalen het niveau van de statistische onzekerheden in massa metingen voor de *Euclid* missie en bestuderen de invloed van verschillende systematische onzekerheden. Zoals eerder gezegd, zijn precieze metingen van de massa’s een belangrijk onderdeel voor het bepalen van het aantal clusters van een gegeven massa, op een gegeven kosmisch tijdstip, in een gegeven volume. Deze hoeveelheid hangt sterk af van de kosmologie. Wij bestuderen in het bijzonder het effect van het foutief bestempelen van sterrenstelsels, die bij het cluster horen, als stelsels die zich achter het cluster bevinden. Door deze cluster sterrenstelsels als bronnen in plaats van lenzen te markeren, wordt het effect van de zwakke lenswerking door zwaartekracht afgezwakt. Hierdoor zal de meting van de massa lager zijn dan de werkelijke massa. Dit effect is hevig voor gecombineerde data van clusters en moet dus worden gecorrigeerd. Een ander effect dat voor foutieve massa metingen zorgt, is het kiezen van een verkeerd centrum van het cluster van sterrenstelsels. Normaliter wordt het centrum van het cluster gekozen als de positie van het helderste sterrenstelsel in het cluster, of als de piek van de Röntgen straling. Het is echter mogelijk dat deze twee posities niet overeenkomen met het ware centrum van het cluster, waardoor de massa metingen foutief zouden kunnen zijn. Aangezien de verwachte statistische onzekerheden van *Euclid* klein zijn, is deze onzuiverheid significant. Echter zullen geplande missies, zoals de Röntgen missie *eROSITA* (engelse afkorting voor *extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array*), helpen om het effect van een verkeerd centrum te verminderen.

In de laatste twee hoofdstukken nemen we de stap van de studie van clusters van sterrenstelsels naar de studie van kosmische structuren met de kosmische lenswerking. In plaats van de standaard aanpak te volgen, meten wij het signaal van de kosmische lenswerking met behulp van een mathematische transformatie techniek. Deze techniek geeft ons een beschrijving van het signaal van de kosmische lenswerking in hetzelfde kader als wordt gebruikt voor

theoretische beschrijvingen van het signaal van de kosmische lenswerking. (De theoretische voorspellingen zijn nodig om de gemeten data te vergelijken met het kosmologische model.) Een voordeel van deze techniek is dat, bijvoorbeeld, het effect van neutrinos veel gemakkelijker in dit kader beschreven kan worden. Om de limieten voor de parameters van het kosmologische model beter te kunnen bepalen, kijken wij in **Hoofdstuk 4** naar uitbreidingen van het algoritme om metingen van het signaal van de kosmische lenswerking op verschillende tijdstippen mogelijk te maken. We testen dit uitgebreide algoritme in detail met gesimuleerde data, waarna we het toepassen op vrij toegankelijke data van de zwaartekracht lens analyse van de Canada–France–Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLenS).

Uiteindelijk gebruiken we in **Hoofdstuk 5** de modernste data uit de 450 vierkante graden aan observaties van een tussentijdse data verstrekking van de Kilo-Degree Survey (KiDS). Opnieuw gebruiken we ons uitgebreide algoritme om het signaal van de kosmische lenswerking te meten en de kosmologische parameters te bepalen. Onze resultaten komen niet overeen met de nieuwste metingen van de kosmische achtergrond straling door *Planck*.