

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/19026> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Uiter, Edo van

Title: Weak gravitational lensing in the red-sequence cluster survey 2

Date: 2012-05-29

Nederlandse samenvatting

Een mysterieus heelal

We leven in een mysterieus heelal. Volgens de huidige overtuiging, die gebaseerd is op een groot aantal verschillende waarnemingen, ontstond ons heelal 13.7 miljard jaar geleden uit de oerknal (Big Bang). Het heelal was toen onvoorstelbaar heet, dicht en klein. Er volgde een lange periode waarin het heelal uitzette en afkoelde, een periode die nog steeds gaande is. Na 380 duizend jaar was het heelal voldoende afgekoeld om de vorming van waterstof mogelijk te maken. Daarbij kwam licht met een specifieke frequentie vrij, dat we vandaag de dag nog steeds kunnen waarnemen: de kosmische achtergrond straling. De frequentie van dit licht is in de loop van de tijd steeds lager geworden ten gevolge van de uitdijning van het heelal: we nemen het tegenwoordig waar in het millimeter regime. Dit licht geldt als een van de belangrijkste bewijzen dat de oerknal daadwerkelijk heeft plaatsgevonden, en toont ons als het ware een foto van het heelal op het moment dat waterstof gevormd werd. Dit heeft ontzettend veel belangrijke informatie opgeleverd over het vroege heelal. Het laat bijvoorbeeld zien dat het heelal zeer gelijkmatig was, met slechts minuscule dichtheidsverschillen. Als reden voor deze homogeniteit wordt tegenwoordig aangenomen dat het heelal een fractie van een seconde na de oerknal voor een heel korte periode met een explosieve snelheid expandeerde, een proces dat 'inflatie' genoemd wordt.

Daar waar het heelal ietsje dichter was dan op andere plaatsen, groeiden kleine inhomogeniteiten en klonterden samen ten gevolge van hun onderlinge zwaartekracht, en vormden de basis voor de gigantische structuren waaruit later de sterrenstelsels -zoals onze Melkweg- ontstonden. Bij de vorming van sterrenstelsels speelde een grote variëteit aan processen een rol: door de zwaartekracht werd materie uit de omgeving aangetrokken, sterren vormden en straalden grote hoeveelheden licht uit, massieve sterren ontploften na een kort leven, materie viel in zwarte gaten waarbij ongelooflijke hoeveelheden energie vrijkwam, reusachtige gaswolken botsten met hoge snelheid op elkaar, kleine sterrenstelsels vielen in grotere en werden daarbij door de zwaartekracht uiteen gereten, en ga zo maar door. De wisselwerking van al deze en nog vele andere processen hebben het innerlijk en uiterlijk van de sterrenstelsels in het huidige heelal bepaald.

In de observationele kosmologie, de tak van de sterrenkunde waarin dit proefschrift thuishoort, proberen we het ontstaan en de ontwikkeling van deze grote structuren te begrijpen. We willen te weten komen hoe uit die minuscule inhomogeniteiten in het vroege heelal, de grote variëteit aan structuur in het huidige heelal is ontstaan. Welke processen zijn daarbij betrokken geweest, en wat was hun onderlinge wisselwerking? Waarom zijn er verschillende soorten sterrenstelsels ontstaan, die ruwweg in twee typen onderverdeeld kunnen worden: de zogeheten spiraalstelsels, gekarakteriseerd door de aanwezigheid van spiraalarmen, en elliptische sterrenstelsels, die een zeer gelijkmatige verschijning hebben? Waarom zijn er meer kleine stelsels dan grote? Hoe zijn deze stelsels verdeeld in de ruimte? Kortom, kunnen we een model voor de evolutie van het heelal opstellen, die het huidige heelal zoals deze is waargenomen correct kan voorspellen? Dit zijn het soort vragen die men in de kosmologie probeert te beantwoorden.

NEDERLANDSE SAMENVATTING

Zoals gezegd leven we in een mysterieus heelal. Niet alleen de onstaansgeschiedenis, maar ook de huidige inhoud van ons heelal stelt ons voor grote raadsels. Waarnemingen laten zien dat ons heelal maar voor zo'n 4% uit normale 'baryonische' materie bestaat. Dit is de materie waar we bekend mee zijn in het dagelijkse leven, en waar alles wat we in het heelal rechtstreeks kunnen waarnemen uit is opgebouwd. De overige 96% is onder te verdelen in 23% donkere materie en 73% donkere energie. Het label "donker" refereert naar de eigenschap van deze componenten dat we ze niet direct kunnen waarnemen. Ze stralen geen licht uit, en absorberen dat ook niet. Waar bestaan ze dan uit, zou je je kunnen afvragen? Deze vraag houdt kosmologen al jaren bezig, en is nog steeds niet beantwoord.

Als we de donkere componenten niet kunnen waarnemen, hoe weten we dan dat ze er zijn? En hoe kunnen we er iets over te weten komen? We kunnen het bestaan ervan afleiden uit het effect dat deze componenten hebben op hun omgeving. Donkere materie oefent zwaartekracht uit op zijn omgeving, net als gewone materie. Dat is dan ook de manier waarop donkere materie is ontdekt: in de jaren 30 van de vorige eeuw bestudeerde de Zwitserse sterrenkundige Fritz Zwicky de bewegingen van sterrenstelsels die door de zwaartekracht gebonden zijn in een grote groep van sterrenstelsels, de Coma cluster. De snelheden van deze sterrenstelsels waren dusdanig hoog dat je zou verwachten dat de stelsels uit elkaar zouden vliegen. De massa die de groep van sterrenstelsels zou moeten hebben om door de zwaartekracht gebonden te blijven, was ruwweg 160 keer hoger dan de massa die je op basis van de sterrenstelsels aan de totale cluster zou toewijzen. Er moest dus nog een andere component in het cluster aanwezig zijn, dat zwaartekracht uitoefende op de sterrenstelsels, maar die je niet kon zien: donkere materie.

Het karakter van donkere energie is haast volledig tegengesteld aan dat van donkere materie. Donkere energie wordt verondersteld de veroorzaker te zijn van de versnelde uitdijning van het heelal. Dat het heelal versneld uitdijt is in 1998 voor het eerst waargenomen door twee verschillende onderzoeksgroepen, het *high-z SN search*-team en het *Supernova Cosmology Project*-team, die beiden een vergelijkbaar onderzoek uitvoerden. Men gebruikte hiervoor waarnemingen aan een bepaalde type sterren die, aan het eind van hun leven beland, ontploften, de zogeheten supernova van het type Ia. Een bijzondere eigenschap van deze supernovae is dat ze een karakteristieke lichtcurve hebben: na de explosie verandert hun helderheid met de tijd op een specifieke wijze. De vorm van deze lichtcurve staat in nauw verband met de maximale helderheid van de supernova. Door deze eigenschap kunnen ze gebruikt worden om de afstand te bepalen tot sterrenstelsels: wanneer de helderheidscurve van een supernova is gemeten, en daaruit de maximale helderheid is afgeleid, en deze vergeleken wordt met de waargenomen helderheid, kan de afstand tot die supernova (en dus tot het sterrenstelsel waar deze supernova in verblijft) worden bepaald. Door deze metingen te combineren met de roodverschuiving¹ van dezelfde sterrenstelsels, kon men de uitdijngsgeschiedenis van het heelal achterhalen. Er volgde een onverwachte conclusie: de ver weg gelegen sterrenstelsels lagen verder weg dan men zou verwachten op basis van een aangenomen constante expansie van het heelal, hetgeen betekende dat het heelal versneld uitdijt. De veroorzaker van deze versnelde uitdijning van het heelal heeft de naam 'donkere energie' gekregen.

Gedurende de laatste jaren is het observationele bewijs voor het bestaan van donkere materie en donkere energie flink toegenomen. Mede daardoor is de overgrote meerderheid van de sterrenkundigen ervan overtuigd geraakt dat deze componenten daadwerkelijk bestaan. Over de aard van donkere materie en donkere energie bestaat nog veel onduidelijkheid. Het afgelopen decennium zijn er vrijwel dagelijks nieuwe theorieën ontwikkeld om hun oorsprong te verklaren, maar tot nog toe heeft geen enkele van deze theorieën geleid tot voorspellingen die bevestigd zijn met waarnemingen. Vooralsnog blijven donkere materie en energie veelal benamingen van deze twee verschijnselen - het overschot aan zwaartekracht in- en rondom sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels, en de versnelde uitdijing van het heelal.

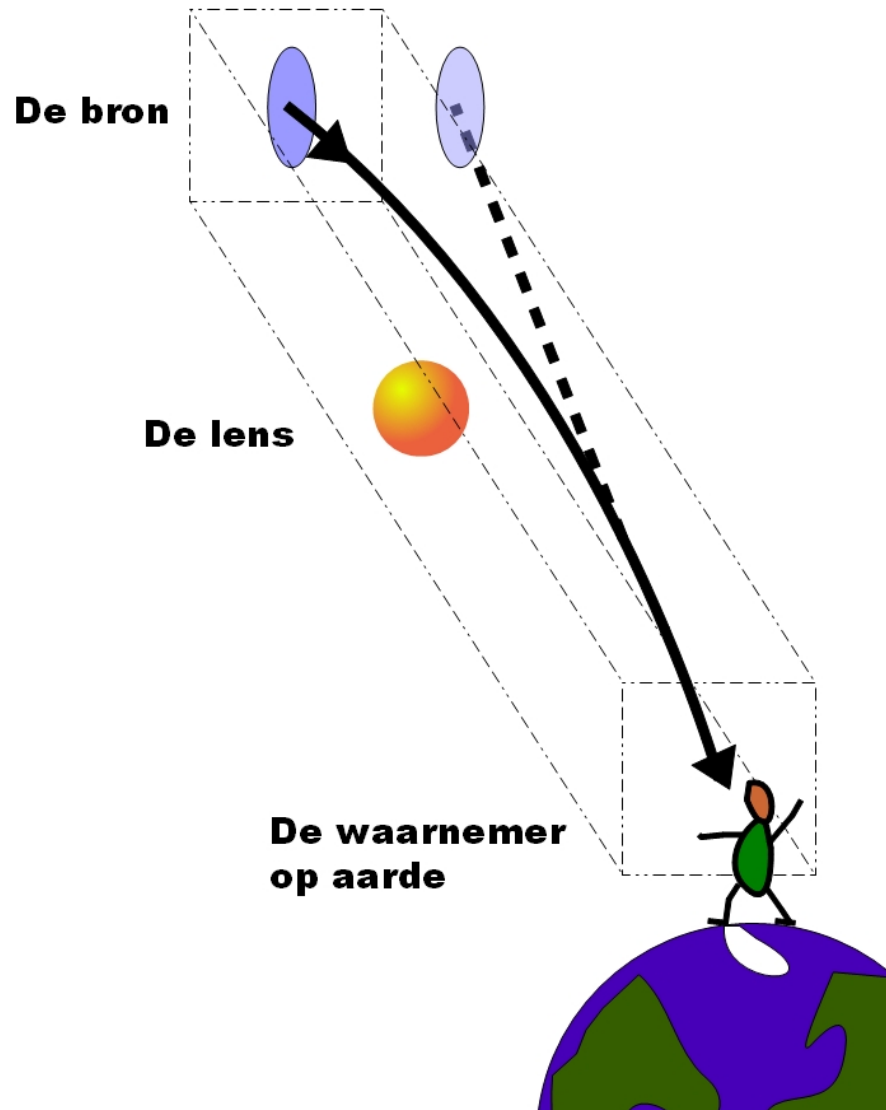
Het onderzoek naar donkere materie en energie is een van de meest actieve onderzoeksgebieden binnen de sterrenkunde op dit moment. Dit proefschrift is daar ook een onderdeel van. We beperken ons in dit werk tot het bestuderen van donkere materie. We onderzoeken de distributie van donkere materie rondom sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels. We meten de totale hoeveelheid donkere materie die in sterrenstelsels aanwezig is, en kijken hoe dit afhangt van de eigenschappen van deze stelsels, zoals bijvoorbeeld de totale hoeveelheid licht die wordt uitgestraald, of van het type stelsel. Verder kijken we welke zichtbare eigenschap van een sterrenstelsel de beste indicator is van de totale massa van de donkere materie die in het stelsel aanwezig is. Ook bestuderen we hoe de donkere materie rondom sterrenstelsels is verdeeld, of het de verdeling van sterren volgt, of dat het sferisch symmetrisch is verdeeld, onafhankelijk van de vorm van het sterrenstelsel. Ten slotte meten we de massa van clusters van sterrenstelsels, en bepalen hoe dit afhangt van het aantal sterrenstelsels in het cluster. Al deze metingen geven ons nieuwe informatie over hoe donkere materie in het heelal is verdeeld, wat bijdraagt aan een beter begrip van dit mysterieus component.

De onderzoeken in dit proefschrift zijn uitgevoerd met behulp van een bepaalde techniek, te weten zwaartekrachtlenwerking. Deze techniek heeft de afgelopen tien jaar sterk aan populariteit gewonnen, en is nu een van de meest gebruikte methoden in het onderzoek naar donkere materie en donkere energie. In de volgende sectie beschrijven we hoe zwaartekrachtlenzen werken.

Zwaartekrachtlenwerking

Het licht van een sterrenstelsel legt een lange weg af voordat het wordt opgevangen door onze telescopen. Wanneer het licht onderweg in de buurt van een massief object komt, bijvoorbeeld een cluster van sterrenstelsels, wordt het aangetrokken door de zwaartekracht van dit object. Ten gevolge hiervan wordt het licht afgebogen, vergelijkbaar met de werking van een lens (maar veroorza-

¹De roodverschuiving geeft aan hoeveel het spectrum van een sterrenstelsel is verschoven ten gevolge van zijn beweging naar ons toe of van ons af. Omdat het heelal uitdijt bewegen sterrenstelsels gemiddeld genomen van ons vandaan en lijken daardoor roder. Hoe verder weg een sterrenstelsel staat, des te sneller beweegt hij van ons vandaan, en des te groter is zijn roodverschuiving. Het licht van verder weg gelegen sterrenstelsels is ook langer onderweg geweest, en het heelal was dus jonger toen het werd uitgezonden. Kortom, hoe verder weg een sterrenstelsel staat, des te groter is zijn roodverschuiving, en des te jonger het heelal toen het licht werd uitgezonden. De roodverschuiving is daarmee ook een maat voor de leeftijd die het heelal had toen de sterrenstelsels hun licht uitzonden.



Figuur 6.10: De lichtstralen van een ver weg gelegen sterrenstelsel (de bron) worden onderweg naar de aarde afgebogen door een zwaar object (de lens). De waarnemer op aarde neemt een vervormd sterrenstelsel waar.

akt door een andere reden!). Daarom wordt dit effect zwaartekrachtlenwerking genoemd. In Figuur 6.10 illustreren we dit proces. Het massieve object dat de afbuiging veroorzaakt wordt de lens genoemd, het stelsel wiens lichtstralen worden afgebogen de bron.

Lichtstralen die dichter langs de lens passeren, worden meer afgebogen omdat de zwaartekracht lokaal sterker is. Alle lichtstralen van de bron worden dus



Figuur 6.11: Een voorbeeld van een zwaartekracht lens, gefotografeerd door de Hubble ruimtetelescoop. De grote ovaalvormige sterrenstelsels in de voorgrond zijn erg zwaar en vervormen daardoor de beelden van de sterrenstelsels die erachter liggen tot dunne slierten.

een beetje anders verbogen. Hierdoor verandert de schijnbare vorm van de bron: de vorm die wij waarnemen, is niet de echte vorm van de bron - de vorm die we zouden waarnemen als er geen zwaartekracht lens aanwezig was. Wanneer de lichtstralen van de bron vlak langs de lens scheren, en de lens erg zwaar is, kunnen deze vervormingen grote vormen aannemen. In extreme gevallen kan het beeld van de bron tot een lange boog uiteen getrokken worden, zodat het niet meer herkenbaar is als een sterrenstelsel. Een voorbeeld hiervan laten we in Figuur 6.11 zien. Dit effect wordt ook wel ‘sterke zwaartekracht lenswerking’ genoemd.

Op grotere afstand van de lens zijn de vervormingen van daarachter gelegen sterrenstelsels minder spectaculair, maar ze zijn nog steeds aanwezig. De zwaartekracht lenswerking in dit regime wordt ‘zwakke zwaartekracht lenswerking’ genoemd. In tegenstelling tot het ‘sterke zwaartekracht lenswerking’ signaal, dat alleen in uitzonderlijke gevallen rondom massieve sterrenstelsels is waar te nemen, hebben alle sterrenstelsels een ‘zwakke zwaartekracht lenswerking’ op de vormen van erachter gelegen sterrenstelsels. Het effect op een enkele bron is echter te klein om te zien. De reden is dat alle bronnen ook een intrinsieke vorm hebben. Als ze slechts een klein beetje van vorm veranderen, kunnen we dus niet vaststellen of ze door de zwaartekracht lens van vorm zijn veranderd. We weten echter dat de gemiddelde vorm van een sterrenstelsel rond is. Wanneer we nu de waargenomen vormen van duizenden bronnen middelen rondom een gegeven lens, dan middelen hun intrinsieke vormen weg. Wat we overhouden is de vervorming ten gevolge van de zwaartekracht lens. De meeste sterrenstelsels hebben echter niet voldoende sterrenstelsels in de achtergrond. Om deze reden wordt het signaal rondom honderden tot duizenden zwaartekracht lenzen gemiddeld. Gezamenlijk hebben deze sterrenstelsels voldoende bronnen om het

NEDERLANDSE SAMENVATTING

signaal meetbaar te maken. We kunnen dus niet het ‘zwakke zwaartekracht lens’ signaal van een individueel sterrenstelsel meten, maar wel het *gemiddelde* signaal van een bepaalde set van sterrenstelsels. Wanneer we nu de lenzen zo selecteren dat ze allemaal dezelfde eigenschap hebben, bijvoorbeeld allemaal een vergelijkbare helderheid, kunnen we het gemiddelde signaal van een bepaald type lens te weten komen. Zelfs van heel kleine en niet massieve sterrenstelsels is de zwakke zwaartekracht lenswerking te meten, zolang we maar voldoende lenzen hebben om over te middelen.

Het signaal van zwaartekracht lenzen kan direct vertaald worden naar de verdeling van materie rondom een lens. Niet alleen gewone ‘baryonische’ materie, maar ook donkere materie oefent zwaartekracht uit op de lichtstralen van bronnen. Met de zwaartekracht lenswerking kunnen we dus de verdeling van alle materie rondom sterrenstelsels meten. Als we het signaal meten als een functie van de afstand tot de lens, kunnen we bepalen hoe de verdeling van alle materie rondom sterrenstelsels van de straal afhangt. Dit stelt ons in staat om de gemiddelde totale massa van een bepaald type lens te bepalen. Ook kunnen we de verdeling van de totale materie vergelijken met de verdeling van de sterren. Dit stelt ons in staat om te bepalen waar de donkere materie zich ophoudt.

Het gebruik van zwaartekracht lenzen heeft verscheidene voordelen ten opzichte van andere methoden die de totale massa van sterrenstelsels bepalen. Het signaal dat we meten kan direct worden omgezet in een massa distributie. Andere methoden zijn gebaseerd op verscheidene aannames, die niet in alle gevallen correct zijn en kunnen leiden tot verkeerde conclusies. Een tweede groot voordeel is dat het signaal van zwaartekracht lenzen tot op grote afstand van de lens te meten is, terwijl andere methoden beperkt zijn tot kleine schaal. De verdeling van materie op zulke grote afstanden tot de lens geeft veel extra inzicht in de formatiegeschiedenis van sterrenstelsels. Ten slotte is het zwaartekracht lens signaal voor alle type sterrenstelsels te meten, en zijn andere methoden vaak beperkt zijn tot een bepaald type sterrenstelsel.

Om het ‘zwakke zwaartekracht lens’ signaal te meten, moeten we de vormen van duizenden sterrenstelsels nauwkeurig meten. Dit vereist waarnemingen van grote delen van de hemel, met een lange integratietijd om ook de vormen van zwakke en ver weg gelegen sterrenstelsels te kunnen bepalen. Er zijn de afgelopen jaren verscheidene waarnemingprogramma’s uitgevoerd, die een deel van de hemel hebben waargenomen met als doel de vorm van zoveel mogelijk sterrenstelsels te bepalen. In dit werk maken we ook gebruik van zo’n waarnemingprogramma, te weten de Red-sequence Cluster Survey 2 (RCS2). De RCS2 bestaat uit waarnemingen van 900 vierkante graden van de hemel (de maan is ongeveer een halve vierkante graad, en de totale hemel beslaat ongeveer 40 000 vierkante graden), die waargenomen zijn in drie verschillende kleurfilters. Met deze filters kunnen we de helderheid van sterrenstelsels in drie golflengte gebieden meten, en daarmee kunnen we hun kleur bepalen. Dit helpt ons om sterrenstelsels van een bepaald type te selecteren. In totaal zijn er meer dan 20 miljoen sterrenstelsels waargenomen, waarvan de vormen zijn bepaald. Deze vormen vormen de basis voor dit proefschrift.

Dit proefschrift

Dit proefschrift gaat over het bepalen van de massaverdeling van alle materie rondom sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels in de RCS2, door middel van het meten van hun zwakke zwaartekrachtlenswerking op de vormen van erachter gelegen sterrenstelsels. In hoofdstuk 2 beschrijven we de RCS2, en de methode die we gebruikt hebben om uit de waarnemingen de vormen van alle waargenomen sterrenstelsels te halen. Verder presenteren we enkele tests om ons ervan te vergewissen dat de catalogi met de vormen van sterrenstelsels die we gebruiken van voldoende kwaliteit is. In hoofdstuk 3 gebruiken we deze vormen om de zwakke zwaartekrachtlenswerking rondom een set van 17 000 sterrenstelsels te meten. Deze sterrenstelsels zijn ook in een ander waarneemprogramma waargenomen (in de Sloan Digital Sky Survey, SDSS). We hebben daardoor veel extra informatie beschikbaar voor deze stelsels, zoals een nauwkeurige schatting van hun roodverschuiving, een bepaling van het type stelsel, hun helderheid en hun stellaire massa (de totale massa aanwezig in sterren), informatie die we anders niet uit de RCS2 hadden kunnen halen. We verdelen deze stelsels in verschillende kleinere sets, onder meer als een functie van helderheid en stellaire massa, en meten het gemiddelde zwaartekrachtlens signaal van elke set om hun gemiddelde massa te bepalen. We vinden onder meer dat spiraalstelsels van een gegeven helderheid minder zwaar zijn dan elliptische stelsels van dezelfde helderheid. Verder vinden we dat de totale massa van spiraalstelsel en elliptische stelsels met een lage stellaire massa vergelijkbaar is, maar voor een hoge stellaire massa vinden we dat de elliptische stelsels zwaarder zijn.

Hoofdstuk 4 is een vervolg op hoofdstuk 3. We gebruiken dezelfde set van lenzen, maar nu om een andere vraag te beantwoorden, te weten: welke waarneembare eigenschap van sterrenstelsels is het nauwst gerelateerd aan hun zwaartekrachtlens signaal? Deze vraag is belangrijk in de context van de formatie van sterrenstelsels; het vertelt ons welke waarneembare eigenschap het nauwst samenhangt met de verdeling van donkere materie, en dus het minste verstoord is door andere processen. We vergelijken drie verschillende eigenschappen van sterrenstelsels: de model snelheidsdispersie, de waargenomen snelheidsdispersie en de stellaire massa. De snelheidsdispersie is een maat voor de snelheid waarmee sterren in het centrum van sterrenstelsels bewegen. De model snelheidsdispersie is een schatting van de snelheidsdispersie, die gebaseerd is op andere eigenschappen van een sterrenstelsel, zoals zijn grootte en stellaire massa. De model snelheidsdispersie komt goed overeen met de waargenomen snelheidsdispersie voor elliptische sterrenstelsels, en daarom kijken we in dit hoofdstuk alleen naar dit type sterrenstelsel. We vinden dat de waargenomen snelheidsdispersie en de stellaire massa evengoed schalen met het signaal van de zwaartekrachtlenzen. De model snelheidsdispersie is echter minder nauw gerelateerd, wat veroorzaakt kan worden door een buiten beschouwing gelaten afhankelijkheid van het signaal van bijvoorbeeld de grootte van een sterrenstelsel.

In hoofdstuk 5 proberen we de vorm van de verdeling van donkere materie rondom sterrenstelsels te meten. Een eventuele meting van dit effect is van groot belang voor verschillende andere onderzoeksgebieden, waaronder de studie hoe sterrenstelsels ten opzichte van elkaar georiënteerd zijn. Wanneer een sterrenstelsel in een elliptische donkere materie halo zit, die dezelfde oriëntatie heeft, dan

NEDERLANDSE SAMENVATTING

wordt het zwaartekracht lens signaal rondom het sterrenstelsel asymmetrisch. Dit is echter een zeer zwak effect, en om het te meten middelen we het signaal over drie sets met zeer veel lenzen. De eerste set bestaat uit zo'n 100 000 zeer heldere elliptische stelsels, de tweede set uit ongeveer evenveel spiraalstelsels, en de derde set bestaat uit 1.6 miljoen normale sterrenstelsels, en mengsel van allerlei soorten stelsels die het gemiddelde sterrenstelsel in het heelal representeert. We vinden een zwakke aanwijzing dat het gemiddelde sterrenstelsel in een elliptische donkere materie halo zit, die dezelfde orientatie heeft. Voor de spiraalstelsels vinden we een zeer kleine aanwijzing dat hun donkere materie halo ge-anti-alinieerd is, dat wil zeggen dat de vorm van het sterrenstelsel en de donkere materie halo 90 graden ten opzichte van elkaar staan. We bestuderen de invloed van verschillende mogelijk verstorende complicaties op deze metingen, en geven schattingen van de grootte van hun invloed op het signaal.

In het laatste hoofdstuk van dit proefschrift, hoofdstuk 6, maken we gebruik van een catalogus van clusters van sterrenstelsels in de RCS2 die door collega's beschikbaar is gesteld. Deze clusters zijn verdeeld over een grote bereik in afstand (tussen roodverschuiving $0.2 < z < 1.2$), en daarmee leeftijd. Dat maakt deze cluster catalogus zeer geschikt voor het bestuderen van de formatie en evolutie van clusters. Om deze evolutie te kwantificeren, meten we de relatie tussen de 'richness' van een cluster, een schatting van het totale aantal sterrenstelsels dat bij een cluster hoort, en de massa, die we bepalen door de zwaartekracht lens werking van de clusters te meten. We vinden dat de relatie tussen de massa en de richness van clusters in het huidige heelal anders is dan die van een paar miljard jaar geleden. Clusters die slechts uit enkele sterrenstelsels bestaan, zijn in de tussentijd tot wel twee keer zwaarder geworden. Clusters die uit tientallen leden bestaan, zijn daarentegen gemiddeld genomen weinig in massa veranderd. We bespreken enkele effecten die deze waargenomen trend kan verklaren, onderverdeeld in mogelijke observationele en fysieke effecten.