

Nederlandse Samenvatting

Wij zijn maar een progressieve soort apen op een kleine planeet rond een zeer gewone ster. Maar wij kunnen het Universum begrijpen. Dat maakt ons iets speciaals.

– Stephen Hawking

Het weidse Universum

Een blik naar de nachtelijke hemel vertelt ons dat sterren niet willekeurig geplaatst zijn. Het merendeel van de sterren bevindt zich in een dunne streep aan de hemel. Deze streep heet de *Melkweg* en is het sterrenstelsel waar onze zon zich bevindt. Er wordt geschat dat de zon een van de 100 miljard sterren is die de Melkweg rijk is. Het linker paneel van Figuur 1 laat een typisch spiraal sterrenstelsel zien, Messier 81 genaamd, dat ongeveer 12 miljoen lichtjaar van ons af ligt. De karakteristieke blauwe kleur van spiraal stelsels wordt veroorzaakt door jonge sterren, die ongeveer 100 miljoen jaar geleden ontstaan zijn. Ons sterrenstelsel is een deel van de *Lokale Groep*, een conglomeraat van ongeveer 50 sterrenstelsels, waarvan de Melkweg en het Andromeda stelsel (ongeveer 2.5 miljoen lichtjaar verwijderd van de Melkweg) de grootsten zijn.

De meeste sterrenstelsels in het universum bevinden zich in zulk soort conglomeraten, waarvan de Lokale Groep een voorbeeld is. Per conventie worden verzamelingen van rond de 50 sterrenstelsels *groepen* genoemd en verzamelingen van meer dan dat, *clusters* van sterrenstelsels. Clusters zijn de grootste objecten die zich tot nu toe hebben gevormd in het universum. Zo'n cluster kan meer dan duizend zichtbare sterrenstelsels bevatten en een massa van 10^{15} (1.000.000.000.000.000) zonnen hebben. Het rechter paneel van Figuur 1 toont de cluster van sterrenstelsels Abell 2218 (ontdekt door Amerikaanse astronoom George Abell). Het plaatje toont grote getalen van (elliptische) rossige sterrenstelsels, waarvan de meesten toebehoren aan het cluster. Het cluster Abell 2218 bevindt zich ongeveer 2 miljard lichtjaar van ons af.

Sterrenstelsels in clusters lijken rossig in tegenstelling tot de blauwe spiraalvormige sterrenstelsels, die vooral op zichzelf te vinden zijn. De reden voor dit verschil ligt in de zwaartekracht van het cluster, het gas in het cluster en de grote hoeveelheid andere sterrenstelsels in het cluster. Deze drie ontnemen het gas van sterrenstelsels in het cluster, wat anders gebruikt zou worden om nieuwe sterren te vormen. Het gebrek aan nieuwe jonge blauwe sterren zorgt ervoor dat het stelsel de rode kleur van zijn oudere sterren aanneemt.

Donkere materie

De sterrenstelsels die wij zien, met hun sterren, gas en stof, en alle atomen in het universum zijn maar ongeveer 20 procent van alle massa in het universum. Het grootste gedeelte



Figuur 1: Links: Spiraalvormig sterrenstelsel Messier 81. Het plaatje is een combinatie van waarnemingen met de Subaru Telescoop in Hawaï en de Hubble ruimtetelescoop. De blauwe kleur toont het licht van jonge sterren en het rode licht toont het stof in het sterrenstelsel. Credit: Ken Crawford (Rancho del Sol Observatory). Rechts: Cluster van sterrenstelsels Abell 2218, waargenomen met de Hubble ruimtetelescoop. Het merendeel van de rossige objecten zijn sterrenstelsels die bij het cluster horen. Het plaatje laat ook heldere bogen zien rondom de centrale stelsels van het cluster. Deze bogen zijn sterrenstelsels achter het cluster die vervormd zijn door de sterke lenswerking door de zwaartekracht van het cluster. Credit: NASA, Andrew Fruchter en de ERO Team [Sylvia Baggett (STScI), Richard Hook (ST-ECF), Zoltan Levay (STScI)] (STScI).

van alle massa zit verborgen in een mysterieus bestandsdeel van het universum, dat *donkere materie* wordt genoemd. Hoewel donkere materie niet direct waar te nemen is, kunnen we wel diens aanwezigheid bepalen aan de hand van de zwaartekracht die het uitoefent op zichtbare componenten van het Universum.

De ontdekking van donkere materie dateert uit 1933, toen Zwitserse astronoom Fritz Zwicky aantoonde dat clusters van sterrenstelsels een enorme hoeveelheid onzichtbare materie moesten hebben om alle sterrenstelsels bij elkaar te houden. De sterrenstelsels in clusters hadden namelijk zo'n hoge snelheid dat ze zouden moeten ontsnappen als ze niet door iets tegengehouden zouden worden. In 1980 toonde een studie, geleid door Amerikaanse astronome Vera Rubin, aan dat de sterren in spiraalvormige stelsels ook sneller gaan dan verwacht. Ook hier is een grote hoeveelheid donkere materie nodig om de sterren door middel van zwaartekracht aan het sterrenstelsel te binden. Sinds deze eerste studies zijn er steeds meer aanwijzingen gekomen voor het bestaan van donkere materie. Hoewel er nog geen definitief bewijs is voor het bestaan van donkere materie, is het wel een hypothese die door de meeste astronomen wordt aangenomen.

De bewegingen van sterren en sterrenstelsels

De relatie tussen de bewegingen van sterren in sterrenstelsels en de massa van sterrenstelsels is in principe vrij simpel. Net als een raket een specifieke snelheid (de *ontsnappings-snelheid*) nodig heeft om de atmosfeer van de aarde te ontsnappen, heeft een ster een specifieke snelheid nodig om aan diens sterrenstelsels te ontsnappen. De ontsnappingsnelheid is dus de maximale snelheid die een ster kan hebben in een sterrenstelsel en is direct gerelateerd aan de massa van het totale systeem. Daarom zijn metingen van de maximale snelheden van sterren in sterrenstelsels goed te verbinden aan de massa van het sterrenstelsel.

Voor spiraalvormige sterrenstelsels kan de *omloopsnelheid* van sterren (de snelheid waarmee de ster ronddraait rond het centrum van het stelsel) gebruikt worden om een *rotatiecurve* te bepalen. Deze rotatiecurve geeft de omloopsnelheid van de ster als functie van de afstand tot

het centrum van het stelsel. In een universum zonder donkere materie zouden verafgelegen sterren een lagere snelheid moeten hebben dan centraler gelegen sterren, die rond het keerpunt liggen in de rotatiecurve. Het is echter in 1980 aangetoond door Vera Rubin en haar mede-onderzoekers dat de omloopsnelheid van sterren constant blijft tot de rand van het sterrenstelsel. Deze waarneming kan verklaard worden door een wolk van donkere materie die zich verder uitstrekt dan het stelsel, wiens zwaartekracht de sterren binnen het stelsel houdt.

In elliptische stelsels, en ook in groepen en clusters van sterrenstelsels, is er geen coherente rotatie van sterren. In plaats daarvan bewegen de objecten zich willekeurige rond en is hun *snelheidsspreiding* (de typische snelheid van bijvoorbeeld stelsels in een cluster) direct verbonden aan de massa door middel van het *viriaaltheorema*. Deze methode werd in 1933 door Fritz Zwicky gebruikt om de hypothese van donkere materie op te stellen.

Lenswerking door zwaartekracht

Het effect van lenswerking door zwaartekracht is de vervorming van het beeld van verre objecten door tussengelegen materie. Deze vervorming is een consequentie van de intieme relatie tussen de geometrie van de ruimte-tijd en de massa die het bevat. Deze relatie is beschreven in de wereldberoemde Algemene Relativiteitstheorie die precies 100 jaar geleden is gepubliceerd door Albert Einstein. Volgens deze theorie buigt massa de ruimte, waardoor het licht zich in een gebogen, in plaats van rechte, lijn voortbeweegt. De verbuiging van het lichtpad zorgt er ook voor dat het licht van verafgelegen sterrenstelsels, vooral als die achter een andere sterrenstelsel of een cluster van sterrenstelsels ligt, anders wordt waargenomen dan dat het is uitgezonden. Het waarnemen van zulke verbuigingen geeft ons dus een directe indicatie van de verdeling van massa in het object dat dienst doet als lens.

Het rechter paneel van Figuur 1 laat enkele dunne bogen zijn rondom het grootste sterrenstelsel. Deze bogen zijn eigenlijk stelsels achter het cluster waarvan het licht zo is verbogen door de zwaartekracht van het cluster. Als het effect van zwaartekracht zo duidelijk is, wordt dit fenomeen *sterke lenswerking door zwaartekracht* genoemd. Dit fenomeen kan alleen worden waargenomen in de kern van cluster van sterrenstelsels of in de buurt van hele massieve sterrenstelsels. Verder verwijderd van het centrum van clusters is *zwakke lenswerking door zwaartekracht* waar te nemen als minieme vervormingen van alle stelsels achter het cluster. In dit geval kan de massa verdeling worden geschat door de gemiddelde vervorming te bepalen voor duizenden achtergrond stelsels.

Beide effecten van lenswerking door zwaartekracht geven ons de mogelijkheid om de hoeveelheid massa van het object dat als lens fungeert (een sterrenstelsel of cluster van sterrenstelsels) te onderzoeken. In het ideale geval moeten deze effecten gecombineerd worden om de totale massa van het object gedetailleerd te bepalen. Echter is dit in de praktijk moeilijk haalbaar doordat zeer gedetailleerde observaties van grote delen van de hemel hiervoor nodig zijn. Zulke combinaties zijn dus alleen gemaakt voor een paar clusters van sterrenstelsels.

De relatie tussen massa en licht in sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels

Een eerste stap in de studie naar de relatie tussen donkere en lichtgevende materie (of simpel gezegd tussen “massa” en “licht”) is het differentiëren tussen verschillende typen ster-



Figuur 2: Massa en licht in het cluster van sterrenstelsels El Gordo, een zeer massief systeem van ten minste twee op elkaar botsende clusters. Het achtergrond plaatje is waargenomen met de Hubble ruimtetelescoop. De blauwe gloed toont de distributie van donkere materie, wat is bepaald met behulp van zwaartekrachtslenzen, terwijl de rode gloed de distributie van het gas toont, wat is bepaald met behulp van waarnemingen van Röntgen licht. De enorme afstand tot het cluster, ongeveer 7 miljard lichtjaar, maakt het moeilijk om sterrenstelsels in dit plaatje te zien, maar het centrale stelsel kan worden gevonden iets ten links van de piek in de rode gloed van de verdeling van gas. De kolossale botsing heeft de donkere en lichtgevende materie in El Gordo duidelijk gescheiden. *Credit: NASA, ESA, J. Jee (Univ. of California, Davis), J. Hughes (Rutgers Univ.), F. Menanteau (Rutgers Univ. & Univ. of Illinois, Urbana-Champaign), C. Sifón (Leiden Obs.), R. Mandelbaum (Carnegie Mellon Univ.), L. Barrientos (Univ. Católica de Chile), and K. Ng (Univ. of California, Davis).*

renstelsels: *centrale* en *satelliet* stelsels. In het algemeen bevatten clusters een dominant stelsel in het centrum, dat helderder is dan alle andere stelsels, wat wij het centrale stelsel noemen. Alle andere stelsels die bij het cluster behoren, zullen we satelliet stelsels noemen. In Abell 2218 (in het rechterpaneel van Figuur 1) is het centrale stelsels gemakkelijk te identificeren in de buurt van de rechterbovenhoek van het figuur, omringd door bogen gemaakt door sterke lenswerking.

Deze scheiding is belangrijk omdat de verschillende typen stelsels anders worden beïnvloed door hun omgeving. De reden hierachter is dat satelliet stelsels in de cluster omgeving ronddraaien en naar het centrale stelsel toevallen, waardoor het centrale stelsel groeit door elke fusie met een satelliet stelsel. Zo'n scheiding is in de praktijk moeilijk te bewerkstelligen. Voor elk sterrenstelsel moet bepaald worden of het geïsoleerd is, en dus een centraal stelsel is, of dat het een deel is van een groep, en dus ook een satelliet stelsel kan zijn. Er zijn nauwkeurige afstandsmetingen van alle stelsels nodig om dit te bepalen en dus onderscheid te maken tussen satelliet en centrale stelsels. Centrale stelsels zijn in het algemeen de helderste sterrenstelsels in hun buurt en dus makkelijker te bepalen dan satelliet stelsels. Dit heeft ervoor gezorgd dat centrale stelsels veel meer zijn onderzocht voor de relatie tussen massa en licht. De conclusie van die studies is dat, zoals verwacht, stelsels die helderder zijn ook massiever zijn en dat de stelsels aan de uitersten van de massa schaal meer donkere materie bevatten, terwijl stelsels met een gemiddelde massa een lagere fractie donkere materie bevatten. Clusters van sterrenstelsels lijken een vaste fractie aan donkere materie (van 80-85%) te hebben, ongeacht hun massa. Desondanks is de relatie tussen massa en licht nog niet in detail onderzocht. Gezien de radicale transformatie van stelsels als zij satellieten worden (vergelijk her linker en rechter paneel in Figuur 1), kan eenzelfde transformatie verwacht

worden van hun donkere materie. De tweede helft van dit proefschrift is gewijd aan de relatie tussen massa en licht in satelliet stelsels in groepen en clusters van sterrenstelsels.

Sterrenstelsels in clusters zijn verantwoordelijk voor ongeveer 20% van het lichtgevende materiaal in het cluster (wat ongeveer gelijk is aan 4% van de totale massa). De overgebleven 80% zit in heet gas, met temperaturen van 10 miljoen graden Kelvin of meer, dat verspreid is in het cluster. De hoge temperatuur van het gas zorgt ervoor dat het Röntgen licht uitzendt. Figuur 2 toont de verdeling van massa in het cluster van sterrenstelsels “El Gordo”, wat zich ongeveer 7 miljard lichtjaar van ons vandaan bevindt. In dit cluster kunnen wij verschillende regio's met grote hoeveelheden massa onderscheiden; totale (donkere) massa in het blauw, wat zich ergens anders bevindt dan het gas in het rood. Het figuur laat zien dat het cluster uit twee zeer massieve botsende en fuserende sub-clusters bestaat. Aangezien het hete gas het gros van de lichtgevende massa bevat, is de afstand tussen de totale massa en de lichtgevende massa een directe indicatie van het bestaan van donkere materie. De eerste helft van dit proefschrift is gemoeid met de relatie tussen de totale massa en de lichtgevende massa in enkele clusters van sterrenstelsels.

Dit proefschrift

Dit proefschrift begint met het uitzoeken van de globale relatie tussen de hoeveelheid massa en licht in clusters van sterrenstelsels door waarnemingen van het cluster gas te combineren met schattingen van de totale massa van het cluster. Daarna, bestuderen wij deze relatie direct voor sterrenstelsels in groepen en clusters.

In **Hoofdstuk 2** bestuderen wij het cluster van sterrenstelsels PLCK G004.5-19.5 (zo genoemd vanwege diens coördinaten aan de hemel). Wij gebruiken de sterke lenswerking van het cluster om de totale massa ervan te meten en vinden dat het lager is dan verwacht aan de hand van metingen van de wolk van cluster gas. De reden voor deze discrepantie is niet duidelijk met behulp van de beschikbare data. Wij gebruiken ook waarneming van licht met radio golflengten om een voorzichtige hypothese op te stellen dat het cluster een botsing ondergaat met een kleiner systeem. Zo'n botsing kan de bovengenoemde discrepantie in massa verklaren, aangezien beide massa metingen aannemen dat het cluster geïsoleerd is. In de toekomst zullen wij nieuwe waarnemingen gebruiken om meer informatie in te winnen over deze cluster en onze hypothese te testen.

In **Hoofdstuk 3** passen wij een statistische aanpak toe en vergelijken we de massa's van 44 cluster, die zijn bepaald met behulp van eigenschappen van het cluster gas en de snelheidsspreiding van de cluster stelsels. Een belangrijk deel van dit hoofdstuk is gewijd aan de bespreking van de sterke en zwakke punten van het gebruik van de snelheidsspreiding om massa's van clusters te bepalen. We vinden dat massa's, die bepaald zijn aan de hand van de snelheidsspreiding, gemiddeld genomen consistent zijn met massa's, die bepaald zijn aan de hand van de eigenschappen van het cluster gas. Desondanks zijn er te veel factoren die deze resultaten beïnvloeden. Deze factoren beperken de toepassing van de snelheidsspreiding om nauwkeurige massametingen uit te voeren.

In **Hoofdstuk 4** verleggen wij onze aandacht naar satelliet stelsels in clusters en onderzoeken wij een ander aspect van de relatie tussen massa en licht: de oriëntatie van elk. Een cluster van sterrenstelsels oefent een sterke getijdenkracht uit op satelliet stelsels en in dit hoofdstuk zoeken wij uit of deze getijdenwerking ervoor zorgt dat satelliet stelsels een voorkeursrichting hebben richting het cluster centrum. Dit fenomeen is duidelijk zichtbaar in simulaties van donkere materie, maar directe voorspellingen voor het universum blijven uit. Wij onderzoeken ongeveer 14000 sterrenstelsels in 90 verschillende clusters en vinden geen

voorkeursrichting van stelsels in clusters richting het centrum van het cluster noch richting elkaar.

Een belangrijk aspect van de resultaten in **Hoofdstuk 4** is de verbinding tussen het voorkeursrichting van sterrenstelsels en metingen van de lenswerking door zwaartekracht. Metingen van zwakke zwaartekrachtslenzen worden uitgevoerd door naar de coherente vervorming van stelsels achter het cluster te kijken, die daardoor ook uitgelijnd worden. Onze resultaten suggereren dat enige uitlijning binnen het cluster door getijdenkracht erg klein is en niet metingen van zwakke zwaartekrachtslenzen beïnvloed. Toekomstige experimenten zullen met meer precisie zwaartekrachtslenzen bekijken en het moet nog uitgezocht worden of onze conclusie ook voor die metingen stand houdt.

In **Hoofdstuk 5** meten wij het effect van zwakke lenswerking door de zwaartekracht van satelliet stelsels in groepen van sterrenstelsels. Deze studie is pas de tweede die dit fenomeen bekijkt. Wij vinden dat deze sterrenstelsels een totale massa hebben, die ongeveer 20 keer groter is dan de massa die in hun sterren zit. Deze fractie is vergelijkbaar met de waarde voor centrale sterrenstelsels. We hebben ook laten zien, als richtlijn voor de toekomst, hoe preciezere metingen van dit fenomeen gebruikt zouden kunnen worden om verschillende kosmologische modellen uit te testen.

Uiteindelijk breiden wij in **Hoofdstuk 6** het onderzoek in **Hoofdstuk 5** uit naar de massieve clusters van sterrenstelsels, die ook gebruikt zijn in **Hoofdstuk 4**. We gebruiken dezelfde techniek van zwakke lenswerking door zwaartekracht om de hoeveelheid donkere materie in deze clusters te bepalen. Wij maken gebruik van de betere kwaliteit van de data in vergelijking met **Hoofdstuk 5** om de resultaten te ijken aan theoretische voorspellingen. Onze resultaten zijn consistent met deze voorspellingen: alle cluster stelsels hebben ongeveer dezelfde fractie van donkere materie van ongeveer 95%. In de toekomst zullen wij vergelijkbare metingen in computer simulaties onderzoeken. Dit zal ons in staat stellen om onze resultaten te vergelijken met voorspellingen en de onderliggende natuurkundige principes uit te zoeken.