
Nederlandse Samenvatting

*"Als je iets niet op een eenvoudige manier kunt uitleggen
dan begrijp je het niet goed genoeg."*
-Albert Einstein

Onze plaats in het heelal

Ons perspectief op de plaats van de mensheid in het universum heeft zich de afgelopen eeuwen sterk ontwikkeld. Tot minder dan 25 menselijke generaties geleden was het geocentrische model, waarin de Aarde het centrum van het universum inneemt, nog de algemeen aangenomen beschrijving van het heelal. Sindsdien hebben nieuwe inzichten tot een geheel ander beeld geleid. Zo werd in de 16de eeuw het heliocentrische model, waarin de planeten zich rond een stationaire Zon bewegen, geformuleerd door o.a. Nicolaas Copernicus en Galileo Galilei. Dit model voorziet in een eenvoudiger en elegantere beschrijving van de planeetbanen in het zonnestelsel. Ook weten we nu dat de andere sterren aan de hemel eigenschappen hebben die vergelijkbaar zijn met de kenmerken van onze Zon, alhoewel ze op aanzienlijk grotere afstanden staan.

Om de enorme afstanden in het heelal te beschrijven is het gebruikelijk deze uit te drukken met behulp van de lichtsnelheid. Als een lichtstraal in de lege ruimte van het heelal reist, legt deze per seconde een indrukwekkende afstand af van ongeveer 300.000 km. De afstand naar de Maan is zo'n 380.000 km, oftewel ruim één lichtseconde. De Zon staat op zo'n acht lichtminuten, wat betekent dat we de Zon eigenlijk zien zoals hij acht minuten geleden straalde. De afstand tot de eerstvolgende ster is meer dan vier lichtjaar, een treffende illustratie van de uitgestrektheid van het heelal. Deze eindigheid van de lichtsnelheid zorgt er ook voor dat we binnen de sterrenkunde effectief terugkijken in de tijd als we het verre heelal bestuderen.

De Melkweg bestaat uit zo'n 100 miljard sterren, verdeeld over een dunne

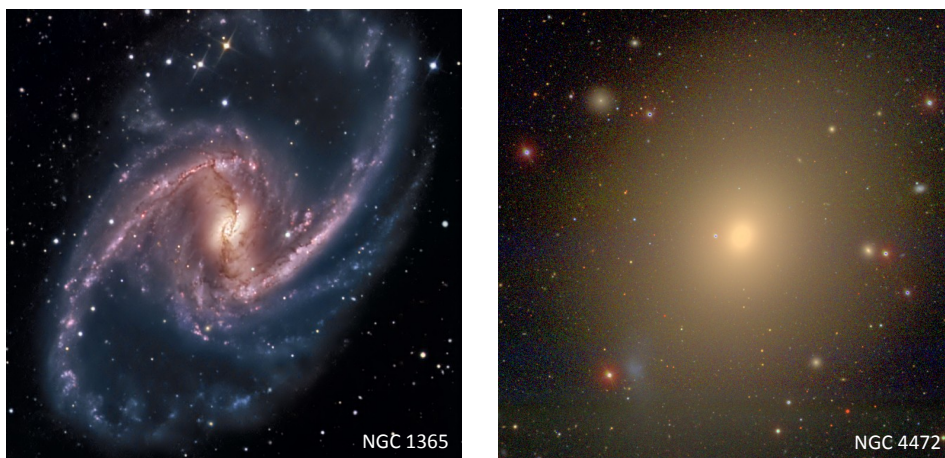
schijf met een diameter van ongeveer 100.000 lichtjaar. De Zon bevindt zich in één van de spiraalarmen binnen deze schijf. In de twintiger jaren van de vorige eeuw werd duidelijk dat de Melkweg niet uniek is, maar dat er vele sterrenstelsels bestaan op nog grotere afstanden. De Andromedanevel is het meest nabije sterrenstelsel dat van vergelijkbare grootte is als de Melkweg, en staat op een afstand van zo'n 2,5 miljoen lichtjaar. Met deze ontdekking vond men ook dat nagenoeg alle sterrenstelsels van ons af bewegen, en wel met een snelheid die lineair toeneemt met hun afstand. De implicatie van deze waargenomen uitdijng van het heelal is dat de bestandsdelen van het heelal in het verleden dichter op elkaar gepakt moeten hebben gezeten, en dit heeft geleid tot de oerknaltheorie.

De oerknaltheorie is in de loop van de jaren verfijnd door verschillende waarnemingen te combineren. Volgens deze theorie is het heelal zo'n 13,8 miljard jaar geleden uit een singulariteit ontstaan, en is sindsdien afgekoeld en in omvang toegenomen tot het huidige heelal. Hierbij zijn alle structuren gevormd die het heelal rijk is; van de grootste verzameling sterrenstelsels tot planeten zoals de Aarde. Alhoewel dit model in eerste instantie misschien bizar zal klinken, kunnen veel waargenomen verschijnselen in het heelal hierdoor verklaard worden. Zo heeft de meting van de gloed van de oerknal, in de vorm van kosmische achtergrondstraling, in 2006 de Nobelprijs voor de Natuurkunde opgeleverd, en dit wordt gezien als het belangrijkste argument voor de oerknaltheorie. Sinds de oerknal heeft de zwaartekracht ervoor gezorgd dat het contrast tussen hoge en lage dichtheidsgebieden in de loop van de tijd steeds groter is geworden, en ook dit is waargenomen in de verdeling van materie in het heelal.

Halverwege de 20ste eeuw werd nog een andere grote ontdekking gedaan. De beweging van sterren in sterrenstelsels en de beweging van sterrenstelsels in clusters van sterrenstelsels, kunnen alleen begrepen worden als er buiten de materie die we kunnen zien, een aanzienlijke hoeveelheid materie aanwezig is die niet direct waarneembaar is. Aangezien deze donkere materie geen licht uitstraalt, is het bestaan ervan uitsluitend af te leiden aan de hand van de zwaartekracht. Door verschillende metingen te combineren wordt geschat dat 80% van de massa in het heelal de eigenschappen van donkere materie heeft.

Structuurformatie met behulp van donkere materie

Volgens het standaardmodel binnen de kosmologie (de oerknaltheorie) speelt donkere materie een belangrijke rol bij het vormen van structuren in het heelal dankzij de bijzondere eigenschap dat donkeremateriedeeltjes niet kunnen botsen. Deze eigenschap zorgt er ook voor dat de vorming van structuren met donkere materie relatief makkelijk te simuleren is met de computer. Op de omslag van dit proefschrift zijn twee gesimuleerde verdelingen van donkere



Figuur 7.1: *Links:* Voorbeeld van een spiraalvormig stelsel in het nabije heelal, waarin actief sterren worden gevormd. Ook de Melkweg behoort tot dit type. *Rechts:* Voorbeeld van een passief stelsel in het nabije heelal, waarin praktisch geen nieuwe sterren ontstaan.

materie op de achtergrond te zien. De voorzijde toont de gesimuleerde verdeling binnen een groot volume in het huidige heelal, terwijl de achterzijde de verdeling in hetzelfde volume toont, maar dan op het moment dat het gesimuleerde heelal minder dan vijf miljard jaar oud is. Als we deze beide zijden met elkaar vergelijken blijkt inderdaad dat het contrast tussen hoge en lage dichtheidsgebieden toeneemt met de tijd. De donkeremateriewolken (ook halo's genoemd) die ontstaan binnen deze simulatie zijn verdeeld langs filamenten, en deze verdeling heeft iets weg van een spinnenweb. Alhoewel de verdeling van donkere materie niet direct waar te nemen is in het heelal, blijkt de verdeling van sterrenstelsels op grote schaal goed overeen te komen met de gesimuleerde verdeling van donkere materie. Volgens de theorie bevinden de sterrenstelsels in ons heelal zich dus in halo's van donkere materie. Ook dit vermoeden wordt bevestigd door indirecte metingen.

Op relatief kleinere schaal, de schaal van de sterrenstelsels zelf, zijn de eigenschappen van baryonische materie (zoals de deeltjes waar wij van gemaakt zijn) van grote invloed op het vormen van sterren, planeten en uiteindelijk ook de levensvormen op Aarde. Door kernreacties in de centra van sterren worden voortdurend nieuwe elementen gevormd, en door stellaire winden en supernova-ontploffingen worden deze deeltjes het heelal in geblazen. Door dergelijke processen wordt het vormen van nieuwe sterren beïnvloed, alsmede door de energetische straling die wordt uitgezonden wanneer zwarte gaten in de centra van sterrenstelsels groeien door de aanwas van nieuwe materie. Het samenspel tussen deze processen en de natuurkundige principes die hierbij een rol spelen zijn zodanig complex dat er nog veel open vragen zijn betreffende de formatie en evolutie van sterrenstelsels.

Gegeven ons uitgestrekte heelal en de enorme hoeveelheid sterrenstelsels (naar schatting rond de 100 miljard, met elk ook ruwweg 100 miljard sterren), is het opmerkelijk dat sterrenstelsels grofweg in twee soorten te classificeren zijn, zie Fig. 7.1. Spiraalvormige stelsels zijn actief in het vormen van sterren; zo vormt de Melkweg tegenwoordig enkele nieuwe sterren per jaar. De aanwezigheid van deze jonge sterren geeft spiraalvormige stelsels een blauwe kleur. Het tweede type bestaat uit sterrenstelsels met een vaak elliptische vorm, waarin niet of nauwelijks nieuwe sterren worden gevormd. Door het gebrek aan jonge sterren hebben deze passieve stelsels een rode kleur. Verschillende factoren bepalen van welk type een gegeven sterrenstelsel is. Vooral de massa van een stelsel en de hoeveelheid naburige sterrenstelsels spelen hierbij een belangrijke rol, maar ook de leeftijd van het heelal op het moment dat we een sterrenstelsel waarnemen is van invloed. In het algemeen geldt dat sterrenstelsels een grotere kans hebben om passief te zijn naarmate hun massa hoger is, ze meer naburige sterrenstelsels hebben en het heelal ouder is (dus wanneer we in het nabijgelegen heelal kijken). Dergelijke metingen zijn belangrijk voor het verfijnen van ons begrip van de natuurkundige processen die ten grondslag liggen aan het transformeren van blauwe actieve sterrenstelsels naar rode passieve sterrenstelsels.

Dit proefschrift

Om te begrijpen hoe sterrenstelsels gevormd worden in dit door donkere materie gedomineerde heelal, en omdat de transformatie van sterrenstelsels van verschillende factoren afhankelijk is, is het van belang om de invloed van massa, omgeving en de leeftijd van het heelal los van elkaar te beschouwen. Zo is het bijvoorbeeld nog onduidelijk welke processen precies zorgen voor het doven (d.w.z. rood worden) van blauwe sterrenstelsels in gebieden met een hoge dichtheid (d.w.z. sterrenstelsels met veel burens). Een gerelateerde vraag is wat precies het verband is tussen de verdeling van stellaire materie en de verdeling van donkere materie. In dit proefschrift richten we ons op dergelijke vragen en gebruiken we precieze waarnemingen van de meeste massieve structuren die gevormd zijn in het heelal, namelijk clusters van sterrenstelsels, om onze huidige theorieën te kunnen toetsen en verder te verfijnen. Specifiek staat de vraag centraal wat de invloed van zulke extreme omgevingen is op de evolutie van sterrenstelsels.

In **Hoofdstuk 1** geven we meer achtergrondinformatie en introduceren we begrippen waar in de rest van het proefschrift op voortgebouwd wordt. Centraal in dit proefschrift staat het karakteriseren van sterrenstelsels aan de hand van hun stellaire massa. Deze kunnen we schatten door te kijken hoeveel licht een sterrenstelsel uitstraalt in verschillende kleuren. Alhoewel de stellaire massa maar een klein deel is van de totale massa (welke wordt gedomineerd

door donkere materie en gas tussen de sterren), geeft dit veel informatie over natuurkundige processen die een rol spelen bij het vormen van sterren.

In de **Hoofdstukken 2-4** bestuderen we de verdeling van stellaire materie in tien clusters in het jonge heelal, toen het heelal ongeveer de helft van zijn huidige leeftijd had. Het gebruik van gevoelige waarnemingen van telescopen op Chili, Hawaii en ook de Spitzer ruimtetelescoop, geeft ons een gedetailleerde kijk op deze jonge systemen die tot dusver ongeëvenaard is in de literatuur. De achterzijde van dit proefschrift toont een foto van één van deze clusters, geconstrueerd door meerdere waarnemingen te combineren.

In **Hoofdstuk 2** bestuderen we specifiek de verdeling van sterrenstelsels in deze clusters als functie van hun stellaire massa en vergelijken dit met sterrenstelsels erbuiten. We vinden dat deze massaverdelingen significant van elkaar verschillen. Echter, wanneer we de twee typen sterrenstelsels los van elkaar beschouwen, zien we dat elk type wordt beschreven door een verdeling die onafhankelijk is van de omgeving. Het verschil in de totale massaverdeling wordt derhalve veroorzaakt doordat de clusters ook in het jonge heelal al een relatief hoog aantal passieve sterrenstelsels bevatten. We vergelijken deze metingen met een model dat het doven van sterrenstelsels beschrijft en vinden hiermee een goede beschrijving van de data.

Het model dat het doven van sterrenstelsels beschrijft, voorspelt in onze clusters de aanwezigheid van een populatie sterrenstelsels die recentelijk en abrupt uitgedoofd zijn. Deze recent uitgedoofde sterrenstelsels hebben specifieke kenmerken, en in **Hoofdstuk 3** identificeren we deze stelsels in onze tien clusters in het jonge heelal. We vinden dat sterrenstelsels van dit type kenmerkende relatieve snelheden en posities hebben ten opzichte van de clustercentra. Dit heeft mogelijk te maken met een plotselinge verwijdering van het gas uit deze sterrenstelsels, dat daardoor niet meer beschikbaar is voor het vormen van sterren. Door deze studie kunnen we zo meer leren over het proces dat ten grondslag ligt aan het doven van sterrenstelsels in hoge dichtheidsgebieden.

In **Hoofdstuk 4** verschuift onze focus van de individuele sterrenstelsels binnen de clusters naar de eigenschappen van de clusters zelf. Op de schaal van clusters verwachten we dat ongeveer 80% van de massa de eigenschappen heeft van donkere materie, en dat de baryonische fractie (bestaande uit gas en sterren) dus nagenoeg gelijk is aan de gemiddelde waarde in het heelal. Door de totale hoeveelheid donkere materie, die we middels indirecte methodes kunnen bepalen, en de stellaire materie te vergelijken, kunnen we zo iets leren over de efficiëntie waarmee sterren zich vormen in clusters van sterrenstelsels. Ook kijken we naar de ruimtelijke verdeling van stellaire materie in deze clusters en vinden dat de profielen die deze verdeling beschrijven meer gepiekt zijn dan de verdeling van donkere materie voor dergelijke clusters in de simulaties.

In **Hoofdstuk 5** bouwen we hierop voort, en beschrijven een meting van de ruimtelijke verdeling van stellaire materie binnen tien clusters van sterrenstelsels in het nabije heelal, op basis van waarnemingen gedaan in Hawaii en

op La Palma. De voorzijde van dit proefschrift laat een kleurenfoto van één van deze clusters zien. Omdat deze tien clusters in het nabije heelal staan, hebben ze bijna de gehele leeftijd van het heelal gehad om zich tot deze staat te ontwikkelen. Door deze clusters te vergelijken met de clusters uit het jonge heelal (d.w.z. degene die we bestudeerd hebben de in de hoofdstukken 2-4), kunnen we bestuderen hoe de ruimtelijke verdeling van stellaire materie evolueert in de loop van de tijd. Vergeleken met de evoluerende verdeling van donkere materie in simulaties, nemen we een significant andere evolutie waar in de verdeling van stellaire materie. We beschouwen verschillende scenario's om deze verschillen te kunnen verklaren. Zo is het mogelijk dat de voorspellingen van simulaties herzien moeten worden door het toevoegen van baryonische processen, of dat we een deel van de sterren niet kunnen waarnemen doordat ze te diffuus verdeeld zijn tussen de sterrenstelsels in.

In **Hoofdstuk 6** bestuderen we het heelal zoals het er minder dan twee miljard jaar na de oerknal uit zag, een periode waarin sterrenstelsels zeer actief waren in het vormen van sterren. Door specifiek te focussen op het uitgestraalde ultraviolette licht door deze sterrenstelsels, kunnen we een inventarisatie maken van de hoeveelheid sterren die gevormd wordt per sterrenstelsel. Vergeleken met voorgaande metingen in de literatuur, maken we gebruik van waarnemingen van een groter stuk aan de hemel, wat een statistisch betere representatie geeft van het totale heelal. Met behulp van deze meting kunnen we dergelijke verafgelegen sterrenstelsels zelfs gebruiken om iets te leren over de donkerematerieverdeling in het tussenliggende heelal. Wat hieraan ten grondslag ligt is het vermogen van massa om lichtstralen af te buigen, wat leidt tot een waargenomen helderheidsverdeling die anders is dan de intrinsieke verdeling.

Door de waarnemingen die beschreven staan in de hoofdstukken van dit proefschrift met modellen en steeds geavanceerdere simulaties te vergelijken, leren we meer over de natuurkundige processen die een rol spelen bij het ontstaan van structuur in het heelal en de evolutie van sterrenstelsels.