



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Shaping massive galaxies: the structural evolution of galaxies across $0 < z < 1$

Graaff, A.G. de

Citation

Graaff, A. G. de. (2022, September 15). *Shaping massive galaxies: the structural evolution of galaxies across $0 < z < 1$* . Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3458576>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3458576>

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

NEDERLANDSE SAMENVATTING

De Melkweg

Onze Melkweg is op een donkere, heldere nacht te zien als een lichte band van sterren aan de hemel. Achter dit zwakke licht schuilt een ingewikkelde structuur. Inmiddels weten we dat ons sterrenstelsel bestaat uit ruim 100 miljard sterren en grote hoeveelheden gas en stof, die samen een platte schijf vormen met daarbinnen grote spiraalarmen.

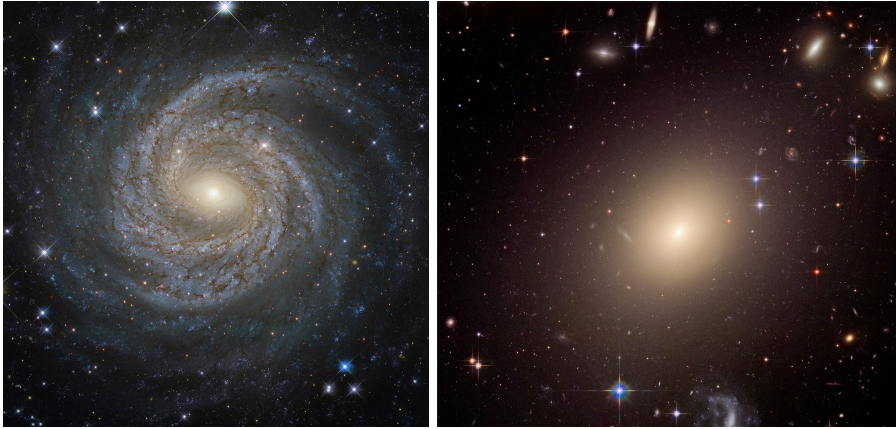
Echter, de Melkweg is, in al haar complexiteit, slechts een van de vele sterrenstelsels in het heelal. Deze ontdekking is relatief nieuw: ongeveer honderd jaar geleden werd voor het eerst aangetoond dat enkele waargenomen 'gasnevels' zó ver weg staan (zoals Andromeda), dat het op zichzelf staande sterrenstelsels moeten zijn. Sindsdien is het vakgebied van de extragalactische sterrenkunde exponentieel gegroeid. Dankzij moderne telescopen, die zeer efficiënt sterrenstelsels over de gehele hemel en tot op grote afstanden in kaart hebben gebracht, weten we nu van het bestaan en de eigenschappen van miljoenen sterrenstelsels.

De grote vraag die rijst: hoe is de Melkweg ontstaan, en hoe verhoudt deze geschiedenis zich tot de rest van het universum? Hoewel er veel vooruitgang is geboekt in de afgelopen decennia, is de zoektocht naar het antwoord hierop nog in volle gang.

Een extragalactische tweedeling

Onder de miljoenen sterrenstelsels die zijn ontdekt heerst grote diversiteit. Desalniettemin kan de verscheidenheid aan sterrenstelsels worden samengevat in een beperkt aantal soorten. Deze classificatie, ontworpen door Edwin Hubble, bevat twee belangrijke types: de spiraalvormige stelsels, en de elliptische stelsels (zie Figuur 1). Een derde categorie is die van de onregelmatige stelsels, dat wil zeggen, zonder kenmerkende structuur (ook wel 'trainwrecks' genoemd).

Het meest voorkomend in aantal zijn de spiraalvormige, stervormende stelsels, zo ook onze Melkweg. Deze stelsels hebben in gemeen dat ze ongeveer dezelfde structuur hebben, bestaande uit een platte schijf met spiraalarmen. Ze hebben veelal ook dezelfde blauwe kleur, veroorzaakt door de aanwezigheid van veel jonge sterren. Daar tegenover staan de elliptische stelsels, ook wel passieve stelsels genoemd: deze sterrenstelsels hebben een rondere vorm en een egale structuur. Daarnaast bevatten deze stelsels voornamelijk oude sterren en vrijwel geen gas waarvan nieuwe sterren kunnen worden gevormd, en zijn zij daarom roder van kleur ('rood en dood').



Figuur 1: Voorbeeld van een spiraalvormig sterrenstelsel (NGC 6814; links) en een elliptisch sterrenstelsel (Abell S0740; rechts) in het nabije heelal. *Bron: NASA, ESA, en The Hubble Heritage Team*

Het feit dat sommige sterrenstelsels spiraalvormig zijn en andere elliptisch, suggereert dat er grote verschillen zijn in de ontstaansgeschiedenis van deze stelsels. Er wordt daarom actief onderzoek gedaan om te begrijpen wat de verschillen, en overeenkomsten, zijn tussen sterrenstelsels.

Hier wordt een combinatie van waarnemingen voor gebruikt: gezien de evolutie van sterrenstelsels traag verloopt (over miljarden jaren), kunnen we niet de ontwikkeling van individuele stelsels volgen. Wel kunnen we gebruik maken van het feit dat de snelheid van het licht constant is, en we daardoor van verre sterrenstelsels het licht zien dat miljarden jaren geleden was uitgezonden. Door waarnemingen van nabije en verre sterrenstelsels te combineren, kunnen we een reconstructie maken van de tijdlijn van de geschiedenis van het heelal en de sterrenstelsels daarbinnen.

Ontstaan en evolutie van sterrenstelsels

De oorsprong van sterrenstelsels ligt in de allervroegste periode van het heelal. Vlak na de oerknal (13,8 miljard jaar geleden) was alle materie extreem heet en nagenoeg gelijk verdeeld: het heelal zag er in alle richtingen hetzelfde uit (isotroop) en met een gelijke samenstelling (homogeen). De nadruk hier ligt op het woord *nagenoeg*: piepkleine fluctuaties in de dichtheid van de materie werden met de tijd groter onder de invloed van de zwaartekracht, terwijl de materie langzaam afkoelde. Tegenwoordig zijn deze kiemen uitgegroeid tot gigantische structuren van enkele miljarden lichtjaren groot (zo'n 10^{20} meter).

Een belangrijke ontdekking is dat deze structuren bestaan uit meer dan alleen de materie zoals wij deze op Aarde kennen. Volgens huidige theorieën, die een zeer goede beschrijving van onze waarnemingen vormen, bestaat er vijf keer meer materie dan wat wij kunnen zien. Dit mysterieuze component wordt ook wel donkere materie genoemd, en heeft speciale eigenschappen. Hoewel gewone materie

allerlei natuurkundige en scheikundige processen kan doorlopen, waarbij bijvoorbeeld zware atomen en complexe moleculen worden gevormd, hebben de deeltjes van donkere materie nauwelijks interactie met elkaar dan wel met gewone materie.

Toch speelt donkere materie een belangrijke rol in de geschiedenis van het heelal en de sterrenstelsels. In het vroege heelal klontert de donkere materie namelijk sneller samen, en vormt zo de basis van de structuren op grote schaal. Deze structuren hebben een vorm vergelijkbaar met een spinnenweb ('kosmisch web'): lange draden (filamenten) van donkere materie verbinden de knopen van het web. Deze knopen van donkere materie worden ook wel halo's genoemd, en zijn de geboorteplaats van sterrenstelsels.

De gewone materie, in de vorm van heet gas, klontert verder samen binnenin de halo's, en koelt af via straling. Wanneer de dichtheid van het gas hoog genoeg is en de temperatuur laag genoeg, vormen zich de eerste sterren. Met de tijd wordt steeds meer gas aangevoerd vanuit het kosmische web en neemt het aantal sterren toe, wat samen een jong sterrenstelsel vormt.

Hoewel de details van deze processen onduidelijk zijn, gezien de eerste generatie sterren nog nooit is waargenomen, weten we wel met zekerheid dat er 500 miljoen jaar na de oerknal al sterrenstelsels bestonden. Wat later, ongeveer 2-3 miljard jaar na de oerknal, begint de tweedeling tussen sterrenstelsels al langzaam zichtbaar te worden. Echter, zijn er nog grote verschillen tussen deze jonge sterrenstelsels en de spiraalvormige en elliptische stelsels in het huidige heelal.

Ten eerste, zoals redelijkerwijs te verwachten, zijn de jonge stelsels kleiner en minder massief. De verschillen tussen de verre sterrenstelsels en die van vandaag de dag gaan echter verder dan alleen hun formaat. Ten tweede zijn de sterren in de vroege stelsels gemiddeld een stuk jonger, en bevatten de sterren en het gas een andere chemische samenstelling, met minder 'metalen' (een verwarrende term onder sterrenkundigen voor elementen met hogere massa dan waterstof). Ten derde is er een groot verschil in de structuur van de sterrenstelsels, gezien waarnemingen van verre sterrenstelsels aantonen dat de sterren en het gas binnen deze stelsels dikke schijven vormen. Bovendien, in tegenstelling tot de sterren in een spiraalstelsel die in een vrijwel circulaire baan rond het centrum van het stelsel draaien, zijn de bewegingen van de sterren en het gas binnen deze jonge stelsels een stuk turbulenter.

Onder de structuur valt ook de rol van de donkere materie op de galactische schaal. De halo is grofweg een factor 10-100 maal groter dan het sterrenstelsel zelf, en 100-1000 keer zwaarder dan de totale massa van alle sterren binnen het stelsel. Toch domineert de gewone materie op kleine schaal, binnenin het sterrenstelsel, gezien binnen een straal van een paar lichtjaren slechts een klein deel van de massa "donker" is. Hier schijnt ook evolutie in te bestaan, omdat voor jonge sterrenstelsels de fractie aan donkere materie op kleine schaal lager lijkt te zijn dan voor oudere stelsels, hoewel dit berust op slechts een klein aantal, lastig te verkrijgen metingen.

Het waarnemen van sterrenstelsels

Uniek aan de wetenschap van de sterrenkunde is dat het heelal ons laboratorium vormt, en het ontwerpen van 'experimenten' daardoor een ander karakter aan-

neemt. Het bepalen van de meest basale eigenschappen, zoals een gewicht of een afstand, is niet triviaal, niet in de laatste plaats omdat onze metingen puur berusten op het licht dat wordt uitgezonden door de verre sterrenstelsels. Telescopen verrichten metingen van dit licht, en door middel van de juiste waarneemstrategie kan men hieruit de eigenschappen en ontwikkeling van sterrenstelsels afleiden.

Op basis van een enkel beeld ('image') krijgen we inzicht in de helderheid en de distributie van het licht binnen een sterrenstelsel, en daarmee de geprojecteerde (2-dimensionale) vorm en de relatieve grootte (de hoekdiameter). Om de absolute grootte te bepalen is meer informatie nodig, namelijk de afstand tot het stelsel. Dit is mogelijk door het meten van kleuren: de verhouding tussen de helderheid van het licht op verschillende golflengtes.

Het meten van verschillende kleuren is in meerdere opzichten cruciaal. Zoals eerder benoemd, correleert de kleur met het type sterrenstelsel (de Melkweg is bijvoorbeeld relatief blauw), en biedt daardoor inzicht in de eigenschappen van de stellaire populaties. Een belangrijke observatie is echter dat verre sterrenstelsels allemaal rood blijken te zijn, wat tegen onze verwachting in lijkt te gaan. Dit wordt veroorzaakt door de uitdijning van het heelal: jonge sterrenstelsels, die ver van ons staan, zijn intrinsiek blauw, maar hun licht wordt tijdens de lange reis door het heelal langzaam uitgerekt tot langere (en dus roodere) golflengtes. Dit effect heet roodverschuiving, en de mate van roodverschuiving is direct afhankelijk van de afstand tussen de Aarde en het waargenomen object. Door meerdere kleuren te meten kan de roodverschuiving van een sterrenstelsel worden bepaald, en daarmee de afstand tot en grootte van het stelsel.

Wanneer de afstand eenmaal bekend is, biedt de combinatie van de totale helderheid en de verschillende kleuren ook inzicht in het gewicht en andere eigenschappen van de sterpopulatie van een sterrenstelsel. Door deze metingen te vergelijken met modellen van sterpopulaties, krijgen we een schatting van de gemiddelde leeftijd en totale massa van de sterren, evenals de mate van stervorming.

Hoewel deze massaschattingen relatief eenvoudig te verkrijgen zijn, berusten ze op meerdere onzekere aannames, wat leidt tot een onzekerheid van een factor 2-3 in de massa. Bovendien betreft deze schatting alleen de *stellaire* massa, en gaat dus voorbij aan de eventuele extra massa van het gas en de donkere materie binnen het sterrenstelsel.

Een methode om de *totale* massa van een sterrenstelsel te meten is gebaseerd op de bewegingen van sterren binnen het stelsel. Zo is de snelheid van een ster draaiend in een circulaire baan rond een sterrenstelsel enkel afhankelijk van de straal van de baan en de totale massa binnen deze straal. Het meten van individuele sterren is alleen mogelijk voor zeer nabije sterrenstelsels, maar het meten van een grotere populatie van sterren biedt ook inzicht in de typische snelheid van de sterren, en daarmee een schatting van de totale massa. Voor deze bepaling is wel een spectrum nodig: voor sterren die zich van ons af bewegen, zullen de spectraallijnen een grotere roodverschuiving hebben dan voor sterren die zich iets naar ons toe bewegen. De spectraallijnen in het spectrum van een sterrenstelsel zijn daardoor verbreed, en deze verbreding kan eenvoudig worden omgerekend naar een snelheid. Dit wordt ook wel de snelheidsdispersie genoemd, en beschrijft de snelheid waarmee sterren ten opzichte van elkaar bewegen.

In tegenstelling tot de waarnemingen in de vorm van beelden zijn spectra erg lastig te verkrijgen, gezien al gauw een hele nacht nodig is om genoeg data te verzamelen voor een object met lage helderheid. Hoewel er ongeveer een miljoen spectra zijn van relatief nabije, heldere sterrenstelsels, zijn er tot nog toe slechts een paar honderd spectra genomen van jongere sterrenstelsels met een hogere roodverschuiving, die minder helder zijn. Een groot deel van de conclusies over verre sterrenstelsels is dus gebaseerd op een kleine hoeveelheid data. Bovendien, gezien de moeilijkheid van het verkrijgen van de spectra, zijn deze vooral genomen voor de helderste verre sterrenstelsels, die zeer waarschijnlijk niet representatief zijn voor de algehele populatie van sterrenstelsels. Om de evolutie van sterrenstelsels beter te begrijpen en bestaande theorieën te testen, is het daarom cruciaal om meer spectra te verzamelen en analyseren van verre sterrenstelsels.

Dit Proefschrift

Centraal in dit proefschrift staat de vraag wat de eigenschappen van sterrenstelsels op hogere roodverschuiving zijn, en hoe deze zich verhouden tot de sterrenstelsels van nu. In het bijzonder ligt de focus op de structuur van sterrenstelsels: de massa en de verdeling daarvan binnen het stelsel.

Voor de beantwoording maken we gebruik van een groot aantal waarnemingen met de Very Large Telescope in Chili. Deze waarnemingen maken deel uit van de LEGA-C Survey, en bestaan uit diepe spectra van ongeveer 3000 massieve sterrenstelsels met een roodverschuiving van 0.6 tot 1.0, toen het heelal ongeveer de helft van de huidige leeftijd was (6-8 miljard jaar oud). Van deze spectra meten we de snelheidsdispersies en andere eigenschappen van de sterrenstelsels, zoals een schatting van de leeftijd. Verder gebruiken we bestaande waarnemingen van de ruimtetelescoop *Hubble* om de grootte van en de lichtdistributie binnen de stelsels te meten. Ook meten we, met behulp van een verzameling aan data van verschillende telescopen uit de literatuur, de kleuren van dezelfde stelsels en maken zo een schatting van de stellaire massa's.

Uniek aan deze uitgebreide dataset is niet alleen de omvang, maar ook de selectie: in tegenstelling tot eerdere studies zijn de sterrenstelsels in LEGA-C representatief voor de populatie van massieve sterrenstelsels op de hogere roodverschuiving van ongeveer $z \approx 0.8$. Daarom kunnen we, door vergelijking met data op lage roodverschuiving in het nabije heelal, de evolutie in de eigenschappen van sterrenstelsels onderzoeken.

Daarnaast maken we gebruik van grote computersimulaties, die het ontstaan en de evolutie van sterrenstelsels simuleren op basis van de meest recente theorieën. Aan de ene kant bieden deze simulaties een handvat voor de interpretatie van de waargenomen data, en aan de andere kant kunnen we op deze manier onze huidige theorieën over de ontwikkeling van sterrenstelsels testen.

In **Hoofdstuk 2** presenteren we ten eerste de verschillende waarnemingen en maken we een zorgvuldige selectie van sterrenstelsels uit de LEGA-C Survey, op basis van strikte kwaliteitseisen. Vervolgens tonen we aan dat er voor deze sterrenstelsels een sterke correlatie is tussen de grootte, de snelheidsdispersie, en de helderheid.

Deze relatie staat beter bekend als de ‘fundamental plane’: sterrenstelsels liggen op een vlak binnen deze 3-dimensionale ruimte. Dit is eerder ook aangetoond op zowel lagere als hogere roodverschuiving voor elliptische en passieve sterrenstelsels.

Een nieuwe bevinding is dat de spiraalvormige en stervormende sterrenstelsels bijna dezelfde relatie lijken te volgen, maar met een grotere spreiding. We laten zien dat deze spreiding enkel wordt veroorzaakt door grote verschillen in de eigenschappen van de sterpopulaties van sterrenstelsels, zoals de leeftijd en mate van stervorming. Wanneer we in plaats van de helderheid kijken naar de relatie tussen de grootte, snelheidsdispersie en de stellaire massa, vinden we één ‘stellar mass fundamental plane’: zowel passieve als stervormende sterrenstelsels volgen dezelfde 2-dimensionale relatie met een erg lage spreiding, ondanks de enorme aanwezige verschillen in de eigenschappen van de sterrenstelsels.

We vergelijken deze resultaten met waarnemingen van het nabije heelal in **Hoofdstuk 3**. Er is sterke evolutie in de fundamental plane, wat aangeeft dat er over de periode van 8 miljard jaar significante veranderingen hebben plaatsgevonden in de stellaire populaties of in de structuren van sterrenstelsels. Verrassend genoeg vinden we echter geen evolutie in de stellar mass fundamental plane. Dit suggereert dat, voor een stelsel van een bepaalde grootte en snelheidsdispersie, het verschil tussen een hoge en lage roodverschuiving voornamelijk wordt veroorzaakt door een verandering in de stellaire populatie. Overigens betekent dit niet dat individuele sterrenstelsels niet van structuur veranderen. Integendeel, sterrenstelsels veranderen met de tijd van structuur, maar deze evolutie is sterk gereguleerd, in de zin dat bijvoorbeeld een verandering in de grootte van het stelsel direct is gekoppeld aan een verandering in de snelheidsdispersie.

In **Hoofdstuk 4** betrekken we voor het eerst de computersimulaties erbij. We maken gebruik van de EAGLE simulaties en onderzoeken hoe deze simulaties ter ondersteuning van de waarnemingen kunnen dienen. Aangezien de simulaties de 3-dimensionale massadistributies van sterrenstelsels modelleren, wat substantieel verschilt van hoe we sterrenstelsels waarnemen, creëren we eerst ‘namaak’-beelden van de ruim 3000 gesimuleerde sterrenstelsels. Deze beelden zijn gemaakt door het licht dat de gesimuleerde sterrenstelsels uitstralen te modelleren en te projecteren, en bevatten, net als echte waarnemingen, ruis en de effecten van atmosferische turbulentie.

Door de gebruikelijke waarneemtechnieken toe te passen voor de analyse van deze beelden, vinden we dat er grote verschillen zijn tussen de structuren gemeten van de beelden en die van de 3-dimensionale massadistributies uit de simulatie. We laten zien dat dit een significant effect heeft op de gemeten relatie tussen de grootte en de stellaire massa van sterrenstelsels, een relatie die vaak als succes criterium wordt gebruikt voor simulaties. De EAGLE simulaties reproduceren de waargenomen relatie zeer goed, inclusief de spreiding binnen de relatie. Echter, vinden we ook enkele belangrijke verschillen: de structuren van de gesimuleerde sterrenstelsels zijn minder compact in vergelijking met de echte waarnemingen. Daarnaast zijn de spiraalvormige stelsels niet plat genoeg, en de elliptische stelsels niet rond genoeg.

We zetten deze analyse voort in **Hoofdstuk 5**, waar we de oorsprong van de fundamental plane relatie doorgronden met behulp van dezelfde simulaties. Eerst

laten we zien dat er voor alle sterrenstelsels een zeer nauwe relatie bestaat tussen de totale massa, de grootte, en de snelheidsdispersie. Deze relatie ligt ook dichtbij de theoretische verwachting, met kleine afwijkingen die kunnen worden verklaard door verschillen in de structuren tussen de gesimuleerde sterrenstelsels.

Vervolgens vervangen we de totale massa door de stellaire massa, en tonen aan dat de gesimuleerde sterrenstelsels ook op één stellar mass fundamental plane liggen, net als de waargenomen sterrenstelsels. In tegenstelling tot de waarnemingen, bieden de simulaties inzicht in de oorsprong van deze relatie. We vinden dat de hoeveelheid donkere materie binnen een sterrenstelsel sterk afhankelijk is van de grootte en de stellaire massa. Deze afhankelijkheid is vervolgens verantwoordelijk voor de precieze verhoudingen in de relatie tussen de stellaire massa, de grootte en de snelheidsdispersie van de stellar mass fundamental plane. Dit verklaart ook waarom we, ondanks de tweedeling binnen de populatie van sterrenstelsels, slechts één relatie vinden: de variatie in de donkere materie massa als functie van de grootte en de stellaire massa is nagenoeg hetzelfde voor zowel passieve als stervormende sterrenstelsels.

Ten slotte gebruiken we de eerder gemaakte beelden van de simulaties, en maken we ook metingen van de snelheidsdispersies van de gesimuleerde stelsels op een manier lijkend op echte waarnemingen. We tonen aan dat waarneemeffecten een significante invloed hebben op de gemeten structuur en fundamental plane van sterrenstelsels, en dat dit met name de spreiding in de relatie beïnvloedt. Door zo een eerlijke vergelijking te maken tussen de simulaties en waarnemingen, vinden we dat de massadistributies van de gesimuleerde sterrenstelsels systematisch verschillen van de waargenomen stelsels. Het is daardoor lastig te zeggen of de interpretatie van de oorsprong van de fundamental plane relatie zoals hierboven beschreven ook direct toepasbaar is op de waargenomen stelsels. Aan de andere kant toont dit werk aan dat de fundamental plane relatie, wat op zichzelf een zeer eenvoudig te meten relatie is, een nieuwe, simpele test biedt om na te gaan hoe goed een computersimulatie het heelal nabootst.

Toekomstige simulaties, waarvan de sterrenstelsels nog dichter bij de werkelijkheid zullen liggen, zullen moeten uitwijzen wat de rol van donkere en gewone materie in de massadistributie op de galactische schaal precies is. Het voordeel van de gesimuleerde sterrenstelsels ten opzichte van de waargenomen stelsels, waarvan we slechts een momentopname krijgen, is dat de ontwikkeling vanaf het ontstaan van de eerste sterren volledig kan worden gevolgd. Er valt dus nog een hoop te leren over de tijdsevolutie van sterrenstelsels op basis van deze simulaties.

Tegelijkertijd zijn nieuwe waarnemingen uiteraard ook van belang, die bijvoorbeeld kunnen helpen bij het verbeteren en aanscherpen van de theorieën aan de hand waarvan de simulaties worden ontwikkeld. Bovendien bieden nieuwe telescopen en instrumenten, zoals de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array of de *James Webb Space Telescope*, een zeer hoge resolutie waarmee zelfs de verste sterrenstelsels scherp kunnen worden waargenomen en dus de structuren van sterrenstelsels kunnen worden ontrafeld. In de komende jaren kunnen we verwachten grote vooruitgang te boeken in onze kennis over de ontwikkeling van sterrenstelsels.

