



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Resolving the building blocks of galaxies in space and time

Clauwens, B.J.F.; Clauwens B.J.F.

Citation

Clauwens, B. J. F. (2017, December 6). *Resolving the building blocks of galaxies in space and time. Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/56022>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/56022>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/56022> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Clauwens, B.J.F.

Title: Resolving the building blocks of galaxies in space and time

Issue Date: 2017-12-06

7 | Samenvatting in het Nederlands

7.1 De vorming van sterrenstelsels

7.1.1 Sterrenstelsels

Sterrenstelsels zijn enorme conglomeraties van werelden, die bestaan uit biljoenen sterren en planeten en zo mogelijk nog meer levende wezens die hun planeet, hun zonnestelsel of hun sterrenstelsel 'thuis' noemen. Voor ons, sterrenkundigen, zijn sterrenstelsels echter slechts testdeeltjes die de structuur van het Heelal uitlichten op de grootste schalen. Het zijn vage lichtvlekken in de nachtelijke hemel waarvan we een mooie foto proberen te nemen. Nadat we veel van deze foto's hebben bestudeerd, komen deze sterrenstelsels langzaam tot leven. In onze verbeelding worden sterrenstelsels levende wezens, die gas in- en uitademen en nieuw weefsel vormen in de vorm van sterren en planeten.

Deze wezens groeien op in een harde wereld van eten of gegeten worden. Zelfs als hun omgeving hen niet verslindt dan nog speelt het een belangrijke rol in hun ontwikkeling. Echter, nog belangrijker voor de ontwikkeling van een sterrenstelsel zijn interne processen. Deze processen spelen zich af in de stellaire geboortewolken, in individuele sterren of zelfs in de individuele atomen waaruit een sterrenstelsel bestaat. We proberen deze processen beter te begrijpen door virtuele sterrenstelsels te creëren die als een soort van laboratorium ratten in onze grootste supercomputers leven.

Ondanks het feit dat onze perceptie van sterrenstelsel steeds verfijnder wordt, worden zij in veel van onze wetenschappelijke figuren gereduceerd tot datapunten in een enorme puntenwolk, wat je zou kunnen beschouwen als een versimpeling. Ongetwijfeld komt onze eigen Melkweg in vele vergelijkbare figuren voor in vele uithoeken van het Heelal, zonder dat iemand zich daar druk maakt over ons leven hier op aarde. Voor dit proefschrift zullen sterrenstelsels deze verfijnde, doch

hoogst versimpelde, mentale plaatjes zijn, los van emotionele lading of een echt gevoel van plaats, tijd of verbondenheid. Dit komt deels door een gebrek aan verbeeldingskracht, maar voornamelijk door een gebrek aan informatie.

7.1.2 De bouwstenen van sterrenstelsels

De precisie waarmee we alles behalve de meest dichtstbijzijnde sterrenstelsels waarnemen stelt ons niet in staat om de individuele sterren, die het licht van een sterrenstelsel produceren, te tellen, noch laat onze korte levensduur ons toe om deze sterrenstelsels te zien evolueren. We moeten vertrouwen op een scala aan technieken en modellen om deze informatie te distilleren uit wat ons gegeven is door de nachtelijke hemel. Hieronder zal ik een korte samenvatting geven van de successen van de wetenschappelijke gemeenschap in het ontrafelen van de bouwstenen van sterrenstelsels zowel in de ruimte als in de tijd. Dit is geen gebalanceerde beschrijving van alle factoren die bijdragen aan de evolutie van sterrenstelsels. Ik zal vooral ingaan op de belangrijkste concepten die nodig zijn voor een begrip van hoofdstukken 2 t/m 6 van dit proefschrift.

Sterren

We denken dat sterrenstelsels bestaan uit vele componenten, te weten een halo van heet gas, koude wolken van moleculair gas, een donkere-materie halo en massieve (centrale) zwarte gaten, maar er is slechts één component die cruciaal is voor een alleenstaande, door zwaartekracht gebonden structuur om te classificeren als een sterrenstelsel: het moet vele sterren bevatten. Waarnemingen laten zien dat 'veel' alles kan betekenen van ongeveer 10^3 tot 10^{12} sterren. Er zijn veel meer lichtgewicht of middelzware sterrenstelsels dan dat er massieve sterrenstelsels zijn, maar alsnog bevinden de meeste sterren zich in massieve sterrenstelsels. Onze zon is hierop geen uitzondering, aangezien de Melkweg ongeveer 2.5×10^{11} sterren bevat.

Niet alle sterren worden gelijk geboren. Ze hebben een verscheidenheid aan intrinsieke eigenschappen zoals massa, hoekmoment, metalliciteit¹ en leeftijd en afgeleide eigenschappen zoals, grootte, lichtkracht en temperatuur. Veruit de belangrijkste eigenschap is de massa van een ster. Sterren worden geboren met een grote range aan massa's ($0.08M_{\odot} \lesssim M \lesssim 120M_{\odot}$)² welke hun uiterlijk en hun lot bepaalt.

¹De metalliciteit van een ster, gaswolk of ander astronomisch object is de fractie van elementen zwaarder dan helium. Zuurstof wordt, binnen de astronomie, dus gezien als een metaal. De exacte definitie van metalliciteit loopt uiteen, afhankelijk van de manier waarop deze waargenomen wordt.

²De gebruikelijke eenheid voor massa in de astronomie is zonsmassa's, $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30}$ kg.

Lichte sterren leiden een rustig en lang leven, terwijl zware sterren fel schijnen, hun brandstof snel opbranden en sterven in massieve explosies die grote hoeveelheden aan heet, metaal-rijk gas injecteren in de interstellaire ruimte. Het verschil in energie uitstoting tussen lage- en hoge massa sterren is enorm. De lichtkracht van een ster schaalst ruwweg met de 3.5^e macht van zijn massa, wat betekent dat de lichtkracht per massa eenheid schaalst met de 2.5^e macht van de massa. Er is slechts een eindige hoeveelheid energie die vrij kan komen uit een eenheid aan stellaire massa, voordat een ster begint aan zijn laatste fase. Hoe sneller een ster zijn energie opbrandt des te sneller zal dit einde komen. De levensduur van een ster is dus grofweg proportioneel met de -2.5^e macht van de massa. Dit betekent dat een ster die 10 keer zwaarder is, ongeveer 3000 keer feller zal schijnen (met een hetere blauwe kleur), maar een levensduur zal hebben die ongeveer 300 keer korter is. In de praktijk betekent dit dat het licht van een sterrenstelsel gedomineerd wordt door jonge, massieve sterren, zolang deze aanwezig zijn. Wanneer deze massieve sterren verdwijnen zal een sterrenstelsel rood worden en minder fel schijnen. Zelfs voor sterrenstelsels die niet langer actief sterren vormen, zal het meeste licht komen van de zwaarste, nog aanwezige sterren. Deze sterren kunnen slechts een klein deel van de massa van een sterrenstelsel uitmaken, aangezien een aanzienlijk deel van de stellaire massa opgesloten kan zijn in dwergsterren en in de overblijfsels van de overleden massieve sterren zoals neutronen sterren en zwarte gaten.

Het tempo waarmee sterren energie en metalen terug geven aan de gaswolken waaruit zij geboren zijn hangt dus sterk af van de massa van deze sterren. We noemen dit proces 'stellaire feedback'. Sterren worden geboren in zeer koude (≈ 30 K) en dichte wolken van moleculair gas. Deze feedback, die kan bestaan uit licht, stellaire winden, kosmische straling of supernova explosies, kan deze stellaire geboorte wolken opwarmen of wegblazen en daarmee het tempo waarmee nieuwe sterren vormen reguleren. Zonder stellaire feedback kunnen hydrodynamische simulaties niet voorkomen dat ster-vorming escaleert, maar deze feedback kan ook lokaal ster-vorming stimuleren door de interstellaire materie samen te drukken in schokgolven en het kan ster-vorming op latere tijdstippen stimuleren door de interstellaire materie te verrijken met metalen, die zorgdragen voor een effectieve koeling van het interstellaire gas.

Waarnemingen van het lokale deel van het Heelal, het deel waarin we de sterren kunnen tellen (e.g. de Melkweg, haar globulaire clusters, jonge clusters in Andromeda) laten zien dat de verdeling van ster massa's bij geboorte hetzelfde is in verschillende omgevingen. We noemen deze verdeling van de massa's waarmee sterren geboren worden de initiële massa functie (IMF). Zie paragraaf 3.2 voor een precieze definitie en Fig. 3.1 voor de vorm van de IMF in het lokale Heelal, zoals deze bepaald is door Chabrier (2003). Voor lange tijd sinds de introductie van de IMF door Salpeter (1955), is de consensus, gedreven door waarnemingen,

dat de IMF universeel is. Dit betekent dat hij hetzelfde is in het hele Heelal en dus niet afhangt van de eigenschappen van de stellaire geboorte wolken.

Een universeel IMF is handig voor het modelleren van ster populaties en sterrenstelsels. Over het algemeen is de aanname dat de stellaire opbouw van een sterrenstelsel een superpositie is van meerdere simpele stellaire populaties (SSPs): populaties met een enkele metalliciteit en leeftijd, geëvolueerd vanuit een universeel IMF. Observatieve methodes voor het matchen van spectra van sterrenstelsels gaan over het algemeen uit van een enkele metalliciteit en een simpele functionele vorm voor de superpositie van verschillende stellaire leeftijden. In hydrodynamische simulaties stelt typisch elk virtueel ster-deeltje een simpele stellaire populatie voor. De stellaire opbouw van een sterrenstelsel wordt dan gegeven door een superpositie van vele ster-deeltjes, die elk een andere leeftijd en metalliciteit kunnen hebben.

Echter, in het laatste decennium wordt de universaliteit van het IMF in twijfel getrokken door interpretaties van een scala aan waarnemingen. Vele teams hebben geprobeerd het IMF op galactische schalen of in extreme omgevingen te bepalen. Hierbij gebruiken zij diverse creatieve methodes, anders dan het direct tellen van sterren. Er zijn nu vele claims van waargenomen IMF variaties, wat bijdraagt aan een interessant en levendig vakgebied. Echter de diverse claims zijn vaak moeilijk met elkaar te verenigen. De meest invloedrijke bijdragen zijn van van Dokkum and Conroy (2012) & Conroy and van Dokkum (2012) en van Cappellari et al. (2012).

Van Dokkum and Conroy (2012), Conroy and van Dokkum (2012) schatten het IMF van vroeg-type³ sterrenstelsels door precieze modellen van absorptie lijnen te fitten aan het geïntegreerde licht van deze sterrenstelsels, inclusief lijnen die een andere sterkte hebben in dwerg sterren dan in reuzen sterren.

Cappellari et al. (2012) gebruiken een compleet andere methode om het IMF te bepalen. Zij proberen het centrale deel van nabije, vroeg-type sterrenstelsels te wegen door de bewegingen van de sterren te modelleren. Vervolgens schrijven zij het surplus aan gravitationele massa, bovenop wat verwacht wordt van sterren, een centraal zwart gat en donkere materie, toe aan 'onzichtbare' sterren.

Beide groepen concluderen, losjes gezegd, dat sterrenstelsels met hoge snelheid dispersies (wat overeenkomt met hoge massa's) neigen naar een IMF met een surplus aan 'onzichtbare' sterren ten opzichte van een Chabrier IMF. Bij van Dokkum and Conroy (2012); Conroy and van Dokkum (2012) is dit surplus toe te schrijven aan dwerg sterren. Bij Cappellari et al. (2012) is het toe te schrijven aan dwerg sterren of aan de overblijfsels van massieve sterren. Beide studies lijken

³De term 'vroeg-type' wordt grofweg inwisselbaar gebruikt met 'elliptisch' of 'sferisch'. 'Laat-type' is vergelijkbaar met 'schijf' of 'spiraal'. Zie de subsectie 'morfologische componenten' voor een korte introductie in de classificatie van sterrenstelsels gebaseerd op morfologie en/of kleur.

op de oppervlakte overeen te komen. Echter, deze overeenkomst verdwijnt bij een vergelijk in detail. Secties 2.1 en 3.1 geven een meer gedetailleerde discussie van de huidige staat aangaande waarnemingen die geïnterpreteerd kunnen worden als bewijs voor IMF variaties.

De botsing van sterrenstelsels

Het kost veel tijd om een sterrenstelsel te groeien. Voor de meeste sterrenstelsels kost het de leeftijd van het Heelal om hen te groeien tot aan hun huidige grootte en massa. Deze groei neemt deels plaats in isolatie van andere sterrenstelsels. Gas koelt af en wordt gevangen door de zwaartekracht van een sterrenstelsel. Over het algemeen vormt het daar een draaiende schijf van koud gas waaruit sterren geboren worden. Deze ster-vorming kan geleidelijk plaats vinden of het kan plaats vinden in episodes van verhoogde ster-vorming afgelost met episodes waarin feedback tijdelijk de ster-vorming reduceert. Waarnemingen van de mate van ster-vorming als een functie van de massa van een sterrenstelsel laten zien dat ster-vorming goed gereguleerd is. Dat wil zeggen, het is gereguleerd tot het moment dat een sterrenstelsel stopt met het vormen van nieuwe sterren. Deze nauwe relatie tussen de massa en ster-vorming snelheid van een sterrenstelsel wordt genoemd de 'ster-vorming hoofdreeks' (Brinchmann et al. 2004; Salim et al. 2007). Deze relatie geldt niet alleen nu, maar ook in het vroege Heelal (zij het met een andere normalisatie). Er is echter ook een compleet andere manier waarop sterrenstelsels kunnen groeien. Ze kunnen groeien door op elkaar te botsen. Dit proces, waarbij typisch een minder massief sterrenstelsel gevangen wordt in het zwaartekrachtsveld van een massiever stelsel, waarna beide sterrenstelsels samensmelten, wordt een 'merger' genoemd.

Mergers kunnen een effect hebben op de vorm van een sterrenstelsel. Mergers van twee sterrenstelsels met een vergelijkbare massa kunnen een geordende, draaiende stellaire schijf veranderen in een meer willekeurige sferische vorm. Fig. 1.1 laat twee sterrenstelsels zien die aan het mergen zijn. Mergers kunnen ook een direct effect hebben op het gas tussen de sterren, de interstellaire materie, aangezien dit gas daadwerkelijk botst (in tegenstelling tot de sterren die gewoon langs elkaar vliegen). Dit kan zorgen voor een compressie van het gas, gevolgd door afkoeling en een fase van verhoogde ster-vorming. Een sterrenstelsel kan dus tijdens een merger in massa toenemen door oude sterren in te vangen of door nieuwe sterren te vormen. Dit laatste, verhoogde ster-vorming als gevolg van een merger, moet voldoen aan dezelfde waargenomen beperking op de fluctuaties in de ster-vorming snelheid die ook geldt voor sterrenstelsels in isolatie, te weten de ster-vorming hoofdreeks.

Een typisch sterrenstelsel maakt veel mergers mee tijdens zijn leven. Het volgen van een sterrenstelsel terug in de tijd is alleen mogelijk op een letterlijke manier

voor sterrenstelsels in een kosmologische simulatie, waarvoor we toegang hebben tot de gehele historie. Als we een typisch sterrenstelsel terug in de tijd volgen, vertakt het zich in vele kleinere 'progenitor' sterrenstelsels, de bouwstenen waaruit het uiteindelijke sterrenstelsel is opgebouwd. De stamboom van een sterrenstelsel, aldus verkregen, heet ook wel de 'merger tree'. In deze stamboom definiëren we de meest massieve aftakking als de hoofdtak, die bestaat uit 'main progenitor' sterrenstelsels (op elk tijdstip is slechts één progenitor de main progenitor). In de meeste gevallen is deze main progenitor duidelijk het meest prominente sterrenstelsel die de basis vormde voor het huidige sterrenstelsel. Echter, in het zeldzame geval dat twee sterrenstelsels van gelijke massa mergen, is de keuze welk sterrenstelsel de main progenitor is enigszins willekeurig. Onder de evolutie van sterrenstelsels wordt over het algemeen verstaan de evolutie van de eigenschappen van de main progenitor. Alle andere progenitors verdwijnen op een gegeven moment, doordat ze opgeslokt worden door de main progenitor.

Het tempo waarmee sterrenstelsels van uiteenlopende massa's mergen, ofwel de 'merger rate', wordt relatief goed begrepen binnen de Λ CDM⁴ kosmologie. Sterrenstelsels worden gedomineerd in massa door een koude donkere-materie component. Deze component is minder geconcentreerd dan de gewone materie, aangezien het zijn energie niet kan uitstralen en dus niet kan afkoelen en samenklonteren, omdat donkere materie, zover we weten, alleen interactie heeft via zwaartekracht. We denken dat elk sterrenstelsel zich bevindt in een donkere materie halo. Precies om de reden dat donkere materie alleen op zwaartekracht reageert, is het veel makkelijker te simuleren. Simulaties (e.g. Genel et al. 2009) laten zien dat donkere-materie halos deels vormen door continue accretie en deels door mergers in een 'bottom-up' manier. Lichte halos mergen gemiddeld eerder dan zware halos. Het belangrijke punt hier is dat de vorming van donkere-materie halos zich weinig aantrekt van de normale materie die zich in deze halos bevindt. Binnen de Λ CDM kosmologie zijn de merger rates dus direct af te leiden uit simpele principes. Ze zijn niet onderhevig aan de vele onzekerheden die ons begrip van de veel complexere 'normale' materie plagen. De grootste onzekerheid in de afleiding van de merger rates van sterrenstelsels binnen de Λ CDM kosmologie komt van de vertaling van de massa van donkere-materie halo's naar de stellaire massa van de sterrenstelsels die zich hierin bevinden. Niet alle donkere materie halo's bevatten dezelfde fractie aan stellaire massa. Een donkere-materie merger

⁴Dit is het huidige kosmologische model, welke aangenomen wordt voor alle 'observabelen' zoals intrinsieke helderheden van sterrenstelsels, groottes, leeftijden, massa's en ster-vorming snelheden, met de uitzondering van ruwe data zoals schijnbare helderheden en spectraal-lijn ratios. Λ representeert 'donkere energie' of de kosmologische constante geïntroduceerd door Einstein. Het zorgt voor een versnelde expansie van het huidige Heelal. CDM staat voor 'cold dark matter' oftewel 'koude donkere materie', de dominante vorm van gravitationele massa in het Heelal.

massa-ratio kan dus niet direct vertaald worden in een sterrenstelsel merger massa-ratio. Een manier om dit probleem te omzeilen is door aan te nemen dat, op elk moment in de tijd, de stellaire massa van de waargenomen sterrenstelsels monotoon geprojecteerd kan worden op de theoretische donkere materie halo populatie, zodat het meest massieve sterrenstelsel in een gegeven volume zich bevindt in de meest massieve donkere materie halo, etc. Voor massieve sterrenstelsels betekent dit dat een relatief breed interval van halo massa's correspondeert met een relatief smal interval van stellaire massa's. Mergers tussen deze sterrenstelsels hebben dus een massa-ratio dichter bij één als deze massa-ratio gedefinieerd wordt met betrekking tot stellaire massa in plaats van donkere-materie massa. Merger rates en ratios kunnen ook waargenomen worden, door botsende sterrenstelsels en sterrenstelsels die tekenen van recente mergers vertonen, te tellen, maar dit is vrij inexact, omdat het afhangt van aannames aangaande de tijd die een merger in beslag neemt en de mate waarin mergers leiden tot waarneembare morfologische afwijkingen.

Morfologische componenten

Sterrenstelsels komen in verschillende vormen en maten. Sommige sterrenstelsels hebben een zeer georganiseerde structuur, een platte ronddraaiende schijf, terwijl andere sterrenstelsels een chaotisch uiterlijk hebben, wellicht midden in een merger episode zitten, of een sferische morfologie hebben waarbij de sterren op zeer radiële, in plaats van circulaire, banen bewegen. De meeste stellaire massa in het Universum kan echter toegeschreven worden aan twee morfologische componenten: schijven en sferoïden. Het merendeel van de huidige sterrenstelsels classificeren óf als een pure schijf, zie Fig. 1.2, óf als een schijf met een centrale sferoïde (een bulge), zie Fig. 1.3, óf als een pure sferoïde (een elliptisch sterrenstelsel), zie Fig. 1.4.

Waarnemingen laten zien dat de morfologie van een sterrenstelsel nauw verbonden is aan zijn kleur. De kleur-distributie van sterrenstelsels is ruwweg bimodaal. Sterrenstelsels worden, op basis van hun kleur, geclassificeerd in 'blauwe wolk' sterrenstelsels en 'rode reeks' sterrenstelsels (Strateva et al. 2001; Bell et al. 2004). Blauwe-wolk sterrenstelsels vormen actief sterren en hebben overwegend een schijf-achtige morfologie. Hun licht wordt gedomineerd door massieve jonge sterren. Rode-reeks sterrenstelsels vormen niet of nauwelijks sterren meer en hebben overwegend een sferische morfologie. Hun licht wordt gedomineerd door oudere sterren van middelmatige massa. De centrale sferoïden van schijf stelsels (bulges) zijn over het algemeen ook rood. Zij bestaan voornamelijk uit oude sterren en laten weinig tekenen van ster-vorming zien.

Er zijn slechts weinig sterrenstelsels die tussen de 'blauwe wolk' en de 'rode reeks' vallen in de zogenaamde 'groene vallei'. Dit betekent dat de overgang van

de blauwe wolk naar de rode reeks relatief snel moet verlopen. Één van de belangrijkste uitdagingen in het onderzoek naar de vorming van sterrenstelsels is om een representatieve populatie van sterrenstelsels te creëren, binnen de gecontroleerde omgeving van een kosmologische simulatie, die deze bimodaliteit deelt.

Sectie 6.1 geeft een meer gedetailleerd overzicht van de morfologische componenten van sterrenstelsels, van de manier waarop deze bepaald worden en van hun potentiële vormings-mechanismen.

7.2 Dit proefschrift

7.2.1 Hoofdstuk 2: Een analyse van het bewijs van ATLAS^{3D} voor een variabele initiële massa functie

Cappellari et al. (2012) bepalen IMF variaties door het centrale deel van 260 nabije vroeg-type sterrenstelsels te wegen. Deze sterrenstelsels zijn waargenomen met de SAURON integral field spectograph op de William Herschel Telescope. Dit geeft ons, na het verwerken van de ruwe data, een twee-dimensionale afbeelding, waarin elke pixel een verdeling van de stellaire snelheden in de kijkrichting bevat. Cappellari et al. (2012) modelleren deze stellaire bewegingen onder de aanname dat ze in dynamisch evenwicht zijn en de onderliggende massa verdeling traceren. Van deze, kinematisch bepaalde, massa trekken ze de verwachte donkere materie massa af. Zodoende bepalen zij de gravitationele stellaire massa in het centrale deel van deze sterrenstelsels. Onafhankelijk hiervan bepalen ze een 'fotometrische' stellaire massa, door modellen van galactische spectra te fitten aan het geïntegreerde licht van deze galactische centra. Deze modellen bouwen een galactisch spectrum op als een som over de spectra van individuele sterren, waarvoor zij een universeel IMF aannemen. Verschillen tussen de gravitationele stellaire massa en de fotometrische stellaire massa worden vervolgens toegeschreven aan IMF variaties.

Dit is een riskante procedure, omdat verschillen in de twee massa bepalingen ook het gevolg kunnen zijn van een scala aan waarneem- en model-onzekerheden. Een onderschatting van deze onzekerheden zal leiden tot een overschatting van de intrinsieke IMF variaties.

Dit hoofdstuk onderzoekt deze onzekerheden. We laten zien dat de resultaten van Cappellari et al. (2012) grotendeels gerepliceerd kunnen worden door een universeel IMF aan te nemen in combinatie met grotere model-onzekerheden. Verder onderzoeken we compleetheid effecten en selectie effecten. We rapporteren een onverwachte trend van de afgeleide IMF variaties met de afstand tot de aarde en we leiden af hoe de voorgestelde IMF variaties, indien echt, de massa verdeling van de waargenomen populatie aan sterrenstelsels in het Heelal zouden

veranderen⁵.

7.2.2 Hoofdstuk 3: Implicaties van een variabel IMF voor de interpretatie van waarnemingen van populaties van sterrenstelsels

Martín-Navarro et al. (2015d) bepalen de IMF in galactische deelgebieden, gebaseerd op de analyse van IMF-gevoelige spectraal-lijnen in de CALIFA survey. Hun sample bevat een grote diversiteit aan metalliciteiten en zij rapporteren een sterke metalliciteits-afhankelijkheid van het door hun bepaalde IMF.

In dit hoofdstuk onderzoeken we wat de voorgestelde metalliciteits-afhankelijkheid van de IMF zou betekenen voor de interpretatie van waargenomen eigenschappen van sterrenstelsels. We passen de voorgestelde IMF toe op een sterrenstelsel-voor-sterrenstelsel basis op een sample van 186,886 sterrenstelsels uit de Sloan Digital Sky Survey. We laten zien dat de implicaties voor de ster-vorming hoofdreeks, de galactische stellaire massa functie en de massa-metalliciteit relatie sterk afhangen van aannames over de functionele vorm van de IMF en uiteenlopen van mild, doch significant, tot zeer omvangrijk.

Bovendien onderzoeken we een scenario waarin ster-vorming in de late, metaalrijke, fase van de evolutie van een sterrenstelsel, gedomineerd wordt door dwergsterren. Dit kan helpen de bimodaliteit in de waargenomen populatie van sterrenstelsels te verklaren door, aan de ene kant, de ster-vorming snelheid van deze 'dode' sterrenstelsels te vergroten (en dus tevens de intrinsieke bimodaliteit in ster-vorming snelheden te verminderen) en, aan de andere kant, de gas consumptie tijd te verlagen, resulterend in een snellere overgang van de 'blauwe wolk' naar de 'rode reeks'.

7.2.3 Hoofdstuk 4: Een groot verschil in de progenitor massa's van actieve en passieve sterrenstelsels in de EAGLE simulatie

Een belangrijke vraag aangaande de vorming van sterrenstelsels is hoe, uit de waargenomen evolutie van de populatie van sterrenstelsels, de typische evolutie van individuele sterrenstelsels te distilleren. Als we hiervoor een precieze methode hadden, zou het ons enorm helpen om de opbouw van sterrenstelsels te traceren en de hieraan gerelateerde evolutie van hun eigenschappen zoals grootte, metalliciteit,

⁵De getalsmatige dichtheid van sterrenstelsels als een functie van stellaire massa, gecorrigeerd voor compleetheid effecten, wordt ook wel de 'galactische stellaire massa functie' (GSMF) genoemd. Deze wordt gekarakteriseerd door een steile daling boven $\approx 10^{10.75} M_{\odot}$. De meeste stellaire massa in het Heelal bevindt zich net hieronder.

morfologie en ster-vorming activiteit te begrijpen. Helaas bestaat zo een precieze methode niet. We moeten vertrouwen op versimpelde aannames. Over het algemeen gebruiken we een methode genaamd 'cumulative number density matching', welke aanneemt dat main progenitors geïdentificeert kunnen worden op basis van hun cumulatieve⁶ getals-dichtheid.

De prestatie van deze methode kan alleen gecontroleerd worden binnen een kosmologische simulatie, waarvoor we toegang hebben tot de gehele merger tree vanaf het begin der tijden. Ik had het geluk dat tijdens mijn tijd als promotie student, de EAGLE kosmologische simulatie het licht zag (Schaye et al. 2015). Dit is, naar mijn mening, de eerste kosmologische simulatie die voldoende overeenstemt met het waargenomen Heelal om hem met vertrouwen toe te passen op dit probleem.

We vinden dat, in de EAGLE simulatie, de mediaan van de stellaire massa van de main progenitors in het vroege heelal sterk afhangt van de ster-vorming activiteit van de huidige sterrenstelsels (geselecteerd in een vast massa interval). Dit is het geval voor huidige sterrenstelsels met een massa tot aan $10^{10.75} M_{\odot}$.

Als het zelfde geldt voor het echte Heelal dan beperkt dit drastisch de toepasbaarheid van de 'cumulative number density matching' methode, in ieder geval in zijn huidige vorm. Bovendien is het moeilijk een extensie van het model voor te stellen dat dit probleem vermijdt zonder uit te gaan van input uit een kosmologische simulatie/model (wat het belangrijkste pluspunt van de methode teniet zou doen: dat het alleen afhangt van waarnemingen en robuuste donkere-materie simulaties).

7.2.4 Hoofdstuk 5: De gemiddelde structurele evolutie van massieve sterrenstelsels kan op een betrouwbare manier bepaald worden op basis van cumulatieve getals-dichtheden van sterrenstelsels.

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat de 'cumulative number density matching' methode verwacht wordt onbetrouwbaar te zijn voor massa's lager dan $10^{10.75} M_{\odot}$ vanwege een groot verschil in de progenitor massa's van actieve- en passieve sterrenstelsels. Voor massievere sterrenstelsels komt dit probleem niet voor en kunnen we verwachten dat de methode goed werkt.

Echter, voor deze massieve sterrenstelsels is er nog steeds een grote variatie

⁶Cumulatief refereert hier aan de stellaire massa, hoewel andere variabelen zoals snelheidsdispersie ook gebruikt worden. De cumulatieve getals-dichtheid van een gegeven sterrenstelsel op een gegeven kosmische tijdstip is gedefinieerd als de getals-dichtheid van sterrenstelsels die een stellaire massa hebben groter dan het gegeven sterrenstelsel, op hetzelfde tijdstip, binnen een, met de kosmische uitdijing meebewegend, volume (Mpc^{-3}).

in main progenitor massa's. Dit maakt het noodzakelijk om de methode apart te toetsen voor iedere eigenschap van een sterrenstelsel. De mediaan/gemiddelde eigenschap van de echte main progenitor sample (met een brede massa distributie) is niet noodzakelijkerwijs hetzelfde als de mediaan/gemiddelde eigenschap van een sample van sterrenstelsels die geselecteerd zijn op de 'median cumulative number density' (met een smalle massa distributie).

We laten zien dat, ondanks deze complicatie, de cumulative number density matching techniek redelijk goed werkt als deze toegepast wordt op de evolutie van de dichtheids-profielen van massieve sterrenstelsels in EAGLE. Dit kan verbeterd worden door ook de verwachte spreiding in main progenitor massa's te modelleren, gebaseerd op donkere-materie simulaties.

Verder passen we de methode toe op waarnemingen van UltraVISTA en CANDELS tot aan⁷ $z = 5$. We leiden af dat massieve sterrenstelsels van binnen uit gegroeid zijn sinds $z = 5$. Sinds $z = 2$ is deze trend bescheiden. Hier is de evolutie van de waargenomen dichtheids-profielen gelijkvormiger dan in de EAGLE simulatie, met een vergelijkbare relatieve groei op alle afstanden van het galactische centrum.

7.2.5 Hoofdstuk 6: De drie fases in de vorming van sterrenstelsels

Alhoewel de morfologie van sterrenstelsels uitgebreid bestudeerd is en we waargenomen sterrenstelsels in zeer specifieke morfologische types kunnen indelen, zijn de processen die de morfologie van een sterrenstelsel bepalen niet goed begrepen. Stellaire schijven vormen uit koude gas schijven, maar kosmologische simulaties laten zien dat hun grootte sterk afhangt van de implementatie van verscheidene feedback processen en dus, op het moment, niet vanuit simpele principes afgeleid kan worden. Voor sferoïden is er geen tekort aan hypothetische vormingsmechanismen, maar op het moment is het niet duidelijk welke mechanismen waar en wanneer dominant zijn.

In dit hoofdstuk bestuderen we de veranderingen in morfologie van sterrenstelsels in de EAGLE simulatie, met de nadruk op de vorming van sferoïden. Feedback processen in EAGLE zijn gekalibreerd om de lage-roodverschuiving massa-grootte relatie te reproduceren. De waargenomen groottes van stellaire schijven worden dus in goede benadering gereproduceerd (Schaye et al. 2015). Bovendien bevat de simulatie een representatieve populatie van massieve, rode, elliptische sterrenstelsels (Correa, Schaye, Clauwens et al. 2017). EAGLE is dus een bruikbare

⁷ z staat voor de roodverschuiving van het waargenomen licht. Roodverschuiving $z = 5$ verwijst naar waarnemingen van sterrenstelsels gezien op een tijd dat het Heelal een factor $z + 1 = 6$ kleiner was (of een factor $6^3 = 216$ in volume).

test-omgeving om de morfologie van sterrenstelsels te bestuderen.

We traceren de morfologische opbouw van de main progenitors van sterrenstelsels met een stellaire massa van $10^{10.5}M_{\odot} < M_* < 10^{12}M_{\odot}$. Hieruit concluderen we dat de vorming van sterrenstelsels in EAGLE een proces is dat drie fases kent. Op lage massa's ($M_* \lesssim 10^{9.5}M_{\odot}$) groeien sterrenstelsels op een chaotische manier, voornamelijk in, door mergers veroorzaakte, ster-vorming episodes die resulteren in sferische morfologiën. In de massa range $10^{9.5}M_{\odot} \lesssim M_* \lesssim 10^{10.5}M_{\odot}$ evolueren de sterrenstelsels op een meer geordende manier en bouwen zij een prominente stellaire schijf op door in-situ ster-vorming. Tijdens deze fase blijven de centrale bulges groeien. Zij bestaan voornamelijk uit sterren die in-situ gevormd zijn, maar alhoewel de bulges dus maar voor een insignificant deel bestaan uit sterren die tijdens mergers ingevangen zijn, is de groei van deze bulges wel degelijk toe te schrijven aan merger activiteit. Voor $M_* \gtrsim 10^{10.5}M_{\odot}$ gaan sterrenstelsels hun laatste fase in. De in-situ ster-vorming wordt sterk gereduceerd, terwijl schijf-gedomineerde sterrenstelsels veranderen in sferoïde-gedomineerde sterrenstelsels, onder de invloed van mergers.

