
Hoofdstuk VI

Nederlandse Samenvatting

1 Achtergrond

De vorming en de evolutie van sterrenstelsels is de moeder van alle sterrenkundige problemen. In haar bereik overbruggt ze de kloof tussen kosmologie en de vorming van sterren en planeten binnen sterrenstelsels. De studie naar de evolutie van sterrenstelsels verbindt op die manier de twee grote vraagstukken in de astronomie: hoe is het heelal begonnen, en hoe is voor het eerst leven ontstaan? Elk van de processen die naar vermoed belangrijk zijn in het vormen en ontwikkelen van sterrenstelsels — bijvoorbeeld de vorming van kosmische structuur, het afkoelen en aantrekken van gas; stervorming; stervolutie; de vorming en groei van zwarte gaten, zogenaamde ‘feedback’ door zwarte gaten en supernova’s; de invloed van de omgeving; interactie tussen sterrenstelsels — vormt een actief veld van theoretische of observationele studie. Op deze manier maakt het onderzoek naar de evolutie van sterrenstelsels niet alleen gebruik van veel astronomische disciplines, maar weet deze ze ook in zich te verenigen.

Sterrenstelsels zijn ingewikkelde monsters. Wat hun voornaamste eigenschappen betreft, zoals massa, lichtkracht, afmeting en stervormingssnelheid, beslaat de verscheidenheid van sterrenstelsels verschillende ordes van grootte. Maar ondanks de brede variatie in ontstaansgeschiedenissen, gedragen sterrenstelsels zich tegelijkertijd zeer fatsoenlijk. Er zijn veel nauwe en goed gedefinieerde ‘schalingsrelaties’ die deze eigenschappen terugbrengen tot slechts een of twee blijkbaar ‘fundamentele’ eigenschappen. De stellaire massa (of wellicht dichtheid) lijkt in dit opzicht bijzonder belangrijk: wanneer de massa van een sterrenstelsel bekend is, is het mogelijk om vrijwel alle andere eigenschappen van het stelsel met een opmerkelijke precisie te voorspellen. Het doorgronden van de fysische processen die aan deze schalingsrelaties ten grondslag liggen, is al lange tijd een van de belangrijkste doelen voor theoretici die de evolutie van sterrenstelsels modelleren.

De huidige modellen zijn nog niet in staat om de vorming en evolutie van sterrenstelsels op basis van grondprincipes te beschrijven. De fysische schalen van de verschillende processen reiken van megaparsecs tot luttele kilometers. Rekenkundig gezien kunnen deze processen alleen bij benadering beschreven worden. Erger nog, van nagenoeg geen van de belangrijke processen is duidelijk hoe het zich in isolatie manifesteert, laat staan in relatie tot andere processen; de onzekerheden zijn enorm. In plaats daarvan proberen de huidige modellen een statistische beschrijving van de eigenschappen van sterrenstelsels af te leiden (zoals de massa-

verdeling en stervormingssnelheden). Hiertoe gebruiken ze empirische resultaten (zoals bijvoorbeeld de stervormings‘wet’) en verstelbare parameters (bijvoorbeeld de hoeveelheid energie die vrijkomt bij een supernova explosie). Wanneer de resultaten van het model verschillen van wat wordt waargenomen, wordt het model bijgesteld om de discrepantie terug te brengen. Met de grote onzekerheden en vele benaderingen die er zijn, hebben theoretici geen tekort aan knoppen en hendels om hun modellen bij te stellen. Op dit moment is het veld van de vorming en evolutie van sterrenstelsels wetenschappelijk gezien voornamelijk gebaseerd op waarnemingen.

In deze context is het doel van dit proefschrift om te voorzien in nieuwe observationele limieten voor de evolutie van sterrenstelsels, waarmee de zojuist beschreven modellen getest kunnen worden. In het bijzonder *is het doel geweest om de groei en evolutie van sterrenstelsels gedurende 80 % van de geschiedenis van het heelal in kaart te brengen en te quantificeren, in termen van aantallen, stervormingsactiviteit en structuur.*

2 Terugkijken in de Tijd

Omdat de snelheid van het licht eindig is, kost het tijd voor licht om van de ene plek naar de andere te reizen. Dit betekent dat als je verder weg kijkt, je delen van het heelal ziet, die jonger zijn dan het hier en nu. *Door de eigenschappen van sterrenstelsels over een groot bereik afstanden te vergelijken, is het dus mogelijk om direct te zien hoe sterrenstelsels zich ontwikkelen.*

De technische moeilijkheid van dit soort dataverzameling, ofwel ‘terugblik onderzoek’ genaamd, zit hem in het bepalen van de afstand van een object. Op hun tocht door de kosmos, worden fotonen beïnvloed door de uitdijning van het heelal; hun golflengte wordt hierdoor uitgerekt, ofwel roodverschoven. Het is mogelijk om uit het waargenomen lichtspectrum van een sterrenstelsel de roodverschuiving ‘ z ’ te bepalen, en daarmee dus ook de afstand. Maar het verzamelen van grote hoeveelheden van dit soort spectra is observationeel gezien duur. Het alternatief is om waar te nemen op zoveel mogelijk golflengten door brede filters te gebruiken. Hoe meer (of hoe nauwere) filters gebruikt worden, des te beter kan het spectrum nagebootst worden. Deze methode wordt ‘fotometrie’ genoemd. Roodverschuivingen kunnen dan worden afgeleid aan de hand van een wat grovere weergave van het spectrum. Vergeleken met spectroscopie maakt fotometrie het mogelijk om veel grotere verzamelingen van zwakke, afgelegen sterrenstelsels te analyseren, zij het met aanzienlijk grotere onzekerheden.

De technieken die gebruikt worden om fotometrische roodverschuivingen te bepalen, zijn voornamelijk gebaseerd op de optische kenmerken in het spectrum. Van bronnen die zich op roodverschuiving bevinden groter dan $z \sim 1$ (wat overeenkomt met hoe het heelal er 7 Gyr geleden uitzag, op 50 % van zijn huidige leeftijd), zijn deze kenmerken roodverschoven naar het nabij-infrarode (NIR) gebied. *Waarnemingen in het nabij infrarood zijn dus de sleutel om toegang te krijgen tot het heelal op $z > 1$.*

Met dit in het achterhoofd, beschrijft **Hoofdstuk II** een nieuwe, publiekelijk toegankelijke catalogus van bronnen die geselecteerd zijn in het NIR in het Extended Chandra Deep Field South (ECDFS), samengesteld als deel van het Multiwavelength Survey by Yale–Chile (MUSYC). Het ECDFS is een van de meest vooraanstaande velden voor het terugblik onderzoek. Het is het doelwit geweest van tal van grote projecten, waardoor er nu waarnemingen beschikbaar zijn in het ultraviolet en het optische regime (breed-, medium-, en nauwe-filters), afbeeldingen verkregen met behulp van de *Hubble Space Telescope* en de *Spitzer Space telescope* en ook radio interferometrie. In een poging om de waarde van de MUSYC ECDFS waarnemingen te maximaliseren, is er een aanzienlijke hoeveelheid tijd en moeite in gestoken om de kwaliteit van de data te optimaliseren en testen. Door NIR waarnemingen te verzamelen van hoge kwaliteit, heeft MUSYC een cruciaal gat gevuld in de tot nu toe aanwezige data van dit belangrijke veld. De MUSYC NIR data vormen het uitgangspunt van drie andere, nog lopende, projecten die aan de huidige hoeveelheid waarnemingen diepe Spitzer data zullen toevoegen, alsook medium-filter optische en NIR data. *Voorname-lijk in combinatie met de rijkdom aan aanvullende data, bieden de MUSYC ECDFS data een uitgelezen mogelijkheid om het heelal op $z \lesssim 2$ te verkennen.*

De catalogus bevat meer dan 10.000 bronnen, geselecteerd in het NIR, inclusief een compilatie van spectroscopische roodverschuivingen voor bijna 2.000 sterrenstelsels. Naast de fotometrie, zijn ook catalogi van fotometrische roodverschuivingen en van intrinsieke, ofwel ware kleuren uitgebracht. De fotometrische roodverschuivingen zijn afgeleid met behulp van een nieuw algoritme dat door MUSYC teamleden is ontwikkeld. Deze waarden zijn tot op heden de meest nauwkeurig bepaalde roodverschuivingen gebaseerd op breed-band fotometrie en zijn op dit gebied momenteel het neusje van de zalm. De restframe fotometrie is bepaald met behulp van een nieuwe voorziening genaamd InterRest, die in Hoofdstuk II beschreven en getest is. Ook InterRest is voor het publiek toegankelijk gemaakt.

3 De Opkomst van de Rode Sterrenstelsels

In het lokale heelal, zijn de meeste sterrenstelsels ‘rood en dood’. Er worden in deze stelsels geen nieuwe sterren meer gevormd en hun licht wordt daarom gedomineerd door oude, rode sterren. Deze passieve sterrenstelsels vormen een nauwe ‘rode reeks’ in een kleur–magnitude diagram, die goed te onderscheiden is van de ‘blauwe wolk’ van minder massieve sterrenstelsels die nog steeds sterren vormen. Optische terugblik projecten hebben aangetoond dat deze gescheiden rode en blauwe populaties al bestaan sinds $z \sim 1$. Bovendien hebben ze laten zien dat het aantal rode stelsels met een factor ~ 2 is toegenomen tussen $z \sim 1$ en het heden. De totale massa van de blauwe stelsels is daarentegen redelijk constant gebleven. Deze waarneming — een groeiend aantal passieve stelsels en een constant aantal stervormende stelsels — kan enkel begrepen worden als een mechanisme wordt ingeroepen dat de stervorming in massieve stelsels ontwricht en verder voorkomt, zodat een overgang van actief naar passief, ofwel van blauw naar rood mogelijk wordt.

Met het doel om beperkingen op te leggen aan het tijdstip en ook het precieze proces van dit smoren van de stervorming is in Hoofdstuk III de MUSYC ECDFS catalogus gebruikt om de evolutie te quantificeren sinds $z \lesssim 2$, van massieve stelsels in het algemeen en massieve rode stelsels in het bijzonder. De totale hoeveelheid sterrenstelsels met een massa groter dan 10^{11} zonsmassa's neemt tussen $z \sim 2$ en $z \sim 1$ met een factor ~ 2 toe en is daarna ongeveer constant. De fractie rode stelsels daarentegen groeit van $\sim 33\%$ op $z \sim 2$ naar $\sim 50\%$ op $z \sim 1$ en $\sim 95\%$ op $z \sim 0$.

Alle passieve sterrenstelsels zijn rood, maar niet alle rode sterrenstelsels zijn passief. Het aantal massieve, rode stelsels kan daarom gezien worden als een bovenlimiet voor het aantal sterrenstelsels waarvan de vorming van sterren werkelijk gestopt is. De resultaten van Hoofdstuk III laten dus zien *dat maximaal 1/6 van de massieve sterrenstelsels in het lokale heelal, reeds op $z \sim 2$ passief was; tenminste de helft van die stelsels vormden op $z \sim 1$ nog actief nieuwe sterren.* Wat het precieze mechanisme dat verantwoordelijk is voor het stopzetten van de stervorming ook mag zijn, dit is het moment waarop het werkzaam is.

De studie die in Hoofdstuk III gepresenteerd wordt, was de eerste in zijn soort die een gedetailleerde, systematische studie bood van de onzekerheden die gepaard gaan met de experimentele werkwijze. Deze analyse is niet alleen nuttig voor het interpreteren van de specifieke resultaten die in Hoofdstuk III gepresenteerd worden, maar ook als leidraad voor het ontwerp van toekomstige projecten en experimenten. Zo wordt er bijvoorbeeld aangetoond dat de nauwkeurigheid van de resultaten gelimiteerd wordt door systematische fouten die samenhangen met de analyse van de data en door onzekerheden in de fundamentele fotometrische calibratie van de waarnemingen — en niet door statistische fouten die gerelateerd zijn aan de hoeveelheid of kwaliteit van de data. *Dit betekent dat, in plaats van betere waarnemingen, toekomstige projecten en experimenten allereerst betere methoden en technieken vereisen om de resultaten die in Hoofdstuk III gepresenteerd worden, te verbeteren.*

4 De Groei van Passieve Sterrenstelsels

De zojuist beschreven resultaten laten zien dat op een roodverschuiving $z \sim 2.3$, sommige sterrenstelsels het overgrote deel van hun massa al verzameld hadden, en ook gestopt waren met het vormen van nieuwe sterren. In termen van stellaire populaties, lijken deze passieve stelsels volledig ontwikkeld, en dat op een tijdstip dat het heelal slechts op 20 % van zijn huidige leeftijd was. Er is echter een groot verschil tussen de massieve sterrenstelsels op $z \sim 2.3$ en die van $z \sim 0$: de stelsels op hoge roodverschuiving zijn veel kleiner. Ze hebben afmetingen die 3–10 keer kleiner zijn dan lokale stelsels met dezelfde massa. Dit betekent dat *elk* van die stelsels behoorlijk moet groeien om zich te kunnen ontwikkelen tot het soort stelsels dat we in het lokale heelal zien — en dat nadat hun stervorming is gestopt.

Deze bewering is getest in **Hoofdstuk IV**, dat een speurtocht beschrijft naar stelsels in het lokale heelal met afmetingen en massa's die te vergelijken zijn met die van de compacte stelsels op $z \sim 2.3$. Deze speurtocht is uitgevoerd aan de

hand van data van de Sloan Digital Sky Survey (SDSS); een uitgebreid spectroscopisch overzicht van de lokale populatie sterrenstelsels. Het SDSS algoritme dat ervoor zorgt dat bronnen met een hoge oppervlaktehelderheid worden uitgesloten van de spectroscopische selectie gaat uit van twee selectiecriteria. Deze criteria zorgen ervoor dat, zelfs als er lokale stelsels zouden zijn met afmetingen en massa's die vergelijkbaar zijn met de compacte stelsels op $z \sim 2.3$, ze niet in de SDSS catalogus van bronnen op $z < 0.05$ zouden verschijnen. Om deze reden beschrijft hoofdstuk IV een zoektocht naar massieve, compacte sterrenstelsels in het roodverschuivingsgebied tussen $0.066 < z < 0.12$, waar de SDSS catalogus vrijwel compleet zou moeten zijn.

Nadat sterrenstelsels die duidelijk verdacht waren wat betreft hun afmetingen/of massabepaling, uit de selectie verwijderd waren, bleef een verzameling van 63 compacte kandidaten over. De snelheidsdispersies van deze stelsels zijn grofweg consistent met hun afgeleide kleine afmetingen en hoge massa's. Echter, geen van deze stelsels heeft een afmeting of massa die overeenkomt met de stelsels die op $z \sim 2.3$ gevonden zijn. De resultaten in Hoofdstuk IV bevestigen dus dat *de massieve, compacte sterrenstelsels die op $z \sim 2.3$ worden waargenomen, niet zomaar ontbreken in de SDSS catalogus, maar dat ze simpelweg niet voorkomen in het lokale heelal.*

De grote systematische onzekerheden in de $z \sim 2.3$ metingen negerend, bieden deze resultaten overtuigend bewijs dat massieve sterrenstelsels niet 'monolithisch', dat wil zeggen niet in een klap gevormd worden: de compacte stelsels op $z \sim 2.3$ zijn nog niet volledig gevormd, maar moeten tussen toen en nu nog behoorlijk in grootte groeien. Het blijkt dat een aanzienlijke fractie ($\lesssim 50\%$) van deze groei al rond $z \sim 1.5$ heeft plaatsgevonden. Het mechanisme verantwoordelijk voor deze sterke, structurele evolutie is niet bekend. Wel kan aan de hand van een simpel statistisch argument, namelijk het feit dat *elk* van de $z \sim 2.3$ sterrenstelsels een aanzienlijke groei moet doormaken, een stochastisch proces zoals grote samensmeltingen van sterrenstelsels uitgesloten worden als oorzaak.

5 Stellaire Massa's van Sterrenstelsels

Al het werk dat hierboven is beschreven, is afhankelijk van onze bekwaamheid om stellaire massa's af te leiden uit de breedband fotometrie van sterrenstelsels. Het bepalen van de massa van een sterrenstelsel is een lastige aangelegenheid. De gangbare methode is om modellen te gebruiken die de stellaire evolutie beschrijven, gecombineerd met een geparmetriseerde beschrijving van een reeks plausibele stervormingsgeschiedenissen. Hiermee kan een acceptabele beschrijving van de waargenomen vorm van het spectrum worden verkregen. De massa en lichtkracht van het model kan dan worden gebruikt om de stellaire massa van het waargenomen stelsel af te leiden. De nauwkeurigheid van dit soort technieken wordt gelimiteerd door bijvoorbeeld dupliciteit van verschillende parameters in de modellen en onzekerheden inherent aan de modellen zelf.

Helaas is het zo goed als onmogelijk om de stellaire massa op een onafhankelijke manier te bepalen, om de fotometrisch afgeleide stellaire massa te testen. In

plaats daarvan, wordt in **Hoofdstuk IV** een vergelijking gepresenteerd tussen de stellaire massa en de *totale* massa, die afgeleid kan worden van de dynamica van het stelsel en ook dynamische massa wordt genoemd. Bij een dergelijke vergelijking is het niet mogelijk om aan te wijzen dat een van de bepalingen goed of fout is, het is alleen te hopen dat de twee methoden consistent met elkaar zijn.

De overeenkomst tussen stellaire en dynamische massa's van een verzameling lokale stelsels van het SDSS blijkt zeer goed te zijn, maar alleen wanneer tijdens het afleiden van de dynamische massa's rekening gehouden wordt met verschillen in de structuur van de sterrenstelsels. Dit heeft het ongelukkige gevolg dat er een expliciete modelafhankelijkheid wordt geïntroduceerd tijdens de afleiding van dynamische massa's. Onder dit voorbehoud werden geen significante verschillen gevonden tussen de stellaire en dynamische massa's ten opzichte van een breed scala aan waarneembare grootheden (zoals schijnbare magnitude of lichtkracht), of modelparameters (zoals leeftijd, metalliciteit, of stofgehalte). De afwijking is hoogstens < 0.12 dex of 40 % (99 % betrouwbaar). Dit resultaat levert een sterke aanwijzing dat de twee methoden betrouwbaar zijn, inclusief de modellen en metingen waar deze op gebaseerd zijn.

6 Conclusies

De belangrijkste resultaten van dit proefschrift zijn:

1. Het samenstellen van een publiekelijk toegankelijke NIR-geselecteerde catalogus van een belangrijk veld voor de terugblik wetenschap, inclusief het opstellen van een lijst afgeleide grootheden zoals fotometrische roodverschuivingen, ware kleuren, en stellaire massa's. Het is te hopen dat deze verzameling data een nuttige hulpbron voor de sterrenkundige gemeenschap zal zijn. Derhalve is de kwaliteit van de data door middel van uitgebreide interne en externe tests zorgvuldig gewaarborgd.
2. Het quantificeren van de evolutie in de hoeveelheid massieve sterrenstelsels in het algemeen en van rode (passieve) sterrenstelsels in het bijzonder, over de laatste 10 Gyr. Deze resultaten bieden belangrijke limieten voor het tijdstip waarop massieve stelsels hun stellaire massa verzamelen en ook wanneer hun stervorming gesmoord wordt. Op deze manier bieden deze resultaten de mogelijkheid om beter in kaart te brengen wat de rol is van samensmeltingen van sterrenstelsels, de feedback van AGN, en het aantrekken van gas tijdens de evolutie van massieve sterrenstelsels.
3. De bevestiging dat massieve sterrenstelsels een sterke groei in afmeting doormaken, zelfs nadat ze gestopt zijn met het vormen van sterren. Het mechanisme voor deze groei is nog niet bekend. Verdere studie naar de evolutie vanaf $z \lesssim 2$ van de afmeting–massa–relatie voor massieve sterrenstelsels zal de gelegenheid bieden om niet alleen af te tasten wat het relatieve belang is van kleine en grote samensmeltingen voor de evolutie van sterrenstelsels, maar ook een beter beeld te krijgen van de recente samensmeltingen van massieve sterrenstelsels.

4. Een demonstratie van het feit dat stellare massa's die bepaald zijn met behulp van optische fotometrie wederzijds consistent zijn. Omdat de technieken die gebruikt worden om de massa's van sterrenstelsels te bepalen van cruciaal belang zijn in het onderzoek naar de evolutie van sterrenstelsels, is het al even belangrijk om deze technieken te testen en te valideren.

Een terugkerend thema in dit werk was het belang van systematische fouten en onzekerheden. In de afgelopen decennia heeft een reeks technologische en technische doorbraken onze kennis en ons begrip van de evolutie van sterrenstelsels over een tijdspanne die 80 % van de leeftijd van heelal beslaat, simpelweg gerevolutioneerd. Het lijkt er echter op dat deze verkennende fase ten einde loopt; de volgende 10 jaar zullen waarschijnlijk voornamelijk bestaan uit consolidatie en verfijning. In die context reflecteert het groeiende bewustzijn van het belang van systematische fouten de wasdom waartoe het veld van vorming en evolutie van sterrenstelsels gekomen is.

