

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/38641> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Straatman, Caroline Margaretha Stefanie

**Title:** Early death of massive galaxies in the distant universe

**Issue Date:** 2016-03-29

# 6

---

## Samenvatting van dit proefschrift in het Nederlands

---

### 6.1 Inleiding

Een van de belangrijkste onopgeloste vraagstukken in de hedendaagse sterrenkunde is: *Hoe worden sterrenstelsels gevormd en hoe evolueren ze?* Een vraag die niet zo gemakkelijk valt te beantwoorden. Dit komt omdat de ontwikkeling van een stelsel plaats heeft gedurende een paar miljard jaar en de afstand tot de te bestuderen stelsels ontzettend groot is. De evolutie van sterrenstelsels hangt nauw samen met de verdeling van donkere materie in het heelal en een zo mogelijk nog groter mysterie betreft de eigenschappen van die donkere materie.

De oorsprong van sterrenstelsels gaat volgens sommige theorieën terug tot een korte periode van inflatie vlak na de oerknal, waarin het heelal zeer snel uitdijde. Door die snelle uitdijng bleven zogenoemde quantumfluctuaties in stand en die vormden de basis van de latere dichtheidsfluctuaties waaruit sterrenstelsels zijn ontstaan. In het huidige universum zijn sterrenstelsels alom tegenwoordig. We leven zelf in een sterrenstelsel, namelijk de Melkweg, zichtbaar als een lichtgevende band aan de hemel.

Zover in de tijd als tot de oerknal kunnen we niet terugkijken, omdat het heelal pas na 377 000 jaar doorschijnend werd. Voor dat moment was de dichtheid van het heelal zo groot, dat lichtdeeltjes altijd vrijwel meteen een interactie ondergingen met andere deeltjes. De allereerste lichtdeeltjes die zich vrijelijk over lange afstanden door de ruimte konden bewegen nemen we waar als de kosmische achtergrondstraling. Studies van de kosmische achtergrondstraling hebben al geleid tot veel inzichten, bijvoorbeeld over de samenstelling van het heelal. De materie waaruit sterren, planeten, de flora en fauna op aarde en de waarneembare gedeeltes van sterrenstelsels bestaan, oftewel baryonische materie, beslaat maar 4.9% van de totale energiedicht-

## Hoofdstuk 6. Samenvatting van dit proefschrift in het Nederlands

heid van het universum. Dat is vijf keer zo weinig als de totale hoeveelheid donkere materie.

In de kosmische achtergrondstraling zien we ook temperatuurfluctuaties: het begin van de latere structuur van donkere materie en sterrenstelsels. De eerste sterrenstelsels zijn ontstaan na het door de zwaartekracht ineenstorten van materie in wat we ook wel halo's van donkere materie noemen. Baryonische materie, meestal waterstofgas, beweegt zich in dat proces helemaal tot in het centrum van zo'n halo en hoopt zich opeen tot sterren in een sterrenstelsel.

Een sterrenstelsel kan verschillende vormen aannemen. Zo is de Melkweg, voor zover wij dat vanuit ons perspectief kunnen bepalen, een spiraalvormig stelsel. Een eigenschap van spiraalstelsels is dat ze over het algemeen ster-vormend zijn. Dat betekent dat uit wolken gas in het stelsel nog altijd relatief veel sterren worden geboren. Een spiraalvormig stelsel kenmerkt zich daarnaast door een wat blauwere kleur, vanwege het sterke ultraviolette spectrum van jonge sterren. Zo'n stelsel kan al wel heel massief zijn. Zo heeft de Melkweg ongeveer 100 miljard keer zoveel massa als één keer onze zon.

Een ander type stelsel is elliptisch van vorm, niet blauw van kleur maar rood, en heeft gemiddeld een oude populatie van sterren, terwijl er weinig nieuwe sterren meer bijkomen. Vanwege deze eigenschappen wordt een dergelijk stelsel ook wel passief of "rood en dood" genoemd. Passieve stelsels behoren voornamelijk tot de meest massieve. Een van de vragen die astronomen bezighouden met betrekking tot passieve stelsels is: *Wat is de reden dat er in sterrenstelsels na verloop van tijd geen nieuwe sterren meer worden gevormd?* Er zijn verschillende verklaringen voor het "uitdoven" van een stelsel. Deze hebben er allemaal mee te maken dat het gas waaruit sterren worden gevormd niet genoeg afkoelt – een voorbeeld is het invallende gas in de meest massieve halo's – of wordt verstoord door factoren in de omgeving. Zo'n factor is bijvoorbeeld de grote hoeveelheid energie die vrijkomt bij de aanwas van materie rond het centrale massieve zwarte gat in een stelsel of de energie die vrijkomt door exploderende, massieve sterren. Minder massieve sterren kunnen materie uit hun buitenste lagen verliezen en ook op die manier invloed hebben op hun omgeving.

In hoeverre een van deze processen de evolutie van een sterrenstelsel bepaalt, hebben we met waarnemingen nog niet kunnen aantonen. We weten zelfs nog niet wanneer stelsels voor het eerst passief werden. Er zijn wel aanwijzingen dat massieve, passieve stelsels al 11 miljard jaar geleden bestaan hebben – relatief kort na de oerknal – en dat zou wijzen op de mogelijkheid van een snelle evolutie met een efficiënt uitdovingsmechanisme.

Onderzoek naar de evolutie van sterrenstelsels gebeurt de laatste jaren

op grote schaal, door data te verzamelen van tienduizenden tot honderdduizenden sterrenstelsels, en daarbij de grenzen te verleggen tot steeds dieper in het heelal, ofwel steeds verder terug in de tijd. Dit wordt meestal in internationaal verband gedaan en gebruikmakend van de meest geavanceerde telescopen en instrumenten. Door de uitdijning van het heelal nemen we het licht van verre bronnen waar op een langere golflengte dan oorspronkelijk, een effect dat we roodverschuiving noemen. Dit heeft tot gevolg dat observaties zich nu richten op infrarood licht, een uitdaging vanwege de optische dichtheid van de atmosfeer in het infrarood.

In dit proefschrift presenteren we een survey van verre sterrenstelsels: The FourStar Galaxy Evolution Survey (ZFOURGE) en maken we vervolgens van de data gebruik om sterrenstelsels diep in het heelal te bestuderen. We beschrijven de ontdekking van de verste passieve sterrenstelsels tot nu toe en analyseren hun eigenschappen. We onderzoeken ook stervormende stelsels in het verre universum, hoewel op iets kleinere afstand. Van deze stelsels meten we met behulp van spectroscopische waarnemingen de rotatiesnelheid en relateren deze aan de totale sterrenmassa van de stelsels. Deze relatie wordt ook wel de Tully-Fisher relatie genoemd (uitgevonden door de astronomen R. Tully en J. Fisher) en is al tot in detail bestudeerd voor sterrenstelsels die zich dicht bij ons bevinden. Door deze ook op hoge roodverschuiving te bestuderen, hopen we iets te leren over de aanwas van sterrenmassa en de relatie met donkere materie gedurende de actieve periode van sterrenstelsels.

## 6.2 Dit proefschrift

**Hoofdstuk 1** van dit proefschrift geeft een algemene introductie over sterrenstelsels, wat we al weten over hun evolutie en hoe we ze, gebruikmakend van surveys, in het verre heelal bestuderen.

In **hoofdstuk 2** presenteren we de data van ZFOURGE. ZFOURGE beslaat 45 nachten aan waarnemingen in het infrarood met het FourStar instrument op de Magellan Baade Telescoop in Chili. We analyseren de diepte van de opnames en beschrijven hoe we meer dan 70 000 lichtbronnen hebben gedetecteerd, tot zeer zwakke lichtsterktes. De opnames zijn gemaakt op zes verschillende golflengtes en vervolgens gecombineerd met data van andere instrumenten met een groot spectraal bereik, van het ultraviolet tot het verre infrarood. Hiermee stellen we voor iedere bron een spectraal distributie samen waarmee we zeer accuraat de roodverschuiving (een afstandsindicator) van de sterrenstelsels kunnen bepalen, evenals andere eigenschappen zoals leeftijd en de totale massa in sterren.

Passieve en stervormende stelsels hebben verschillende spectraal distri-

## Hoofdstuk 6. Samenvatting van dit proefschrift in het Nederlands

buties, die leiden tot de typische rode en blauwe kleuren. Om de stelsels van elkaar te onderscheiden, wordt daarom vaak een test met twee kleuren gebruikt, gebaseerd op de intensiteit van het licht in drie verschillende filters. De nauwkeurigheid van deze test is nog niet bewezen voor stelsels op hoge roodverschuiving. In **hoofdstuk 2** onderzoeken we met data in het verre infrarood, afkomstig van de Spitzer en Herschel ruimtetelescopen, de sterformatie van verre sterrenstelsels in ZFOURGE en bevestigen we het bestaan van massieve, passieve stelsels in de afgelopen 11.5 miljard jaar.

In **hoofdstuk 3** gaan we nog een stap verder en onderzoeken we of we op nog grotere afstand passieve stelsels kunnen vinden. Een moeilijkheid daarbij is dat stervormende stelsels met veel stofdeeltjes, die het ultraviolette licht van jonge sterren absorberen, ook een rode kleur hebben en sterk lijken op passieve stelsels. De test met twee kleuren helpt bij het onderscheiden van passieve stelsels en rode en blauwe stelsels met sterformatie. We kijken echter ook naar de data in het verre infrarood van de Spitzer en Herschel ruimtetelescopen, waarmee we de sterformatie in stelsels met veel stof kunnen bepalen.

Aan de hand van de kleurtest kunnen we met de diepe data van ZFOURGE 19 massieve, passieve stelsels onderscheiden, op een gemiddelde afstand van 12 miljard jaar. Hiervan hebben er vier sterke detecties in het verre infrarood. Dat duidt erop dat er in deze stelsels mogelijk juist wel veel sterformatie aan de gang is. Voor de overige 15 stelsels vinden we geen duidelijke aanwijzing voor actieve sterformatie, maar de data is niet diep genoeg om het voor de stelsels individueel uit te sluiten. We kijken daarom naar het gemiddelde van de verre infrarood data en leiden af dat de sterformatie in de passieve stelsels 10 keer lager is dan gemiddeld voor stervormende stelsels op dezelfde afstand en met dezelfde massa.

De 15 passieve stelsels zijn zeer massief, met een gemiddelde totale ster-massa van ongeveer 80 miljard keer de massa van de zon. Gezien de jonge leeftijd van het heelal (ongeveer 1.6 miljard jaar), betekent dit dat de sterformatie in deze stelsels ooit extreem hoog moet zijn geweest. We vergelijken onze bevindingen met huidige observaties van blauwe stervormende stelsels uit de periode waarin deze 15 massieve stelsels zich hebben gevormd, maar vinden niet genoeg voorbeelden van zulke hoge sterformatie. We speculeren dat de jonge versies van de 15 passieve stelsels wel eens zeer actieve stelsels met veel stofdeeltjes kunnen zijn geweest, die we zouden kunnen waarnemen door te kijken op submillimeter golflengtes.

Eerdere waarnemingen van passieve stelsels op hoge roodverschuiving hebben laten zien dat deze toen veel compacter waren dan nu en ook veel kleiner dan stervormende stelsels. De huidige interpretatie is dat deze stelsels

van binnen naar buiten groeien. Eerst wordt er een compacte kern gevormd, waarna er nog aanwas plaatsvindt door interactie met andere sterrenstelsels. Een interessante vraag daarbij is of het mechanisme dat leidt tot een compacte kern er ook voor zorgt dat het sterrenstelsel uitdooft. In **hoofdstuk 4** onderzoeken we de groottes van de 15 passieve stelsels in ZFOURGE en plaatsten die in een evolutionaire context. We maken gebruik van data afkomstig van de Hubble ruimtetelescoop, met een zeer hoge resolutie, en concluderen dat de passieve sterrenstelsels inderdaad zeer compact zijn. Ook passen ze binnen de evolutionaire trend van steeds kleinere stelsels op steeds grotere afstand. Wat betreft stervormende stelsels 12 miljard jaar geleden vinden we juist dat die gemiddeld veel groter zijn. Stervormende compacte stelsels, die mogelijk de voorlopers zijn van compacte passieve stelsels, zijn zeer zeldzaam. Dit duidt erop dat de formatie van een compacte kern op een zeer korte tijdschaal gebeurt en mogelijk verborgen is door grote hoeveelheden stof in de sterrenstelsels.

In **hoofdstuk 5** onderzoeken we de Tully-Fisher relatie (stermassa versus rotatiesnelheid) voor verre stervormende stelsels, zo'n 10 tot 11 miljard jaar geleden. We onderzoeken of en hoe sterk deze relatie verandert met de tijd, wat een belangrijke aanwijzing zou zijn over hoe efficiënt stelsels gas omzetten in sterren en hoe de stermassa zich ontwikkelt ten opzichte van de donkere materie. Er zijn al een aantal studies verricht voor verre sterrenstelsels. Deze studies maken gebruik van verschillende methodes en geven verschillende resultaten. Een duidelijk beeld van de evolutie van de Tully-Fisher relatie is er dus nog niet.

We meten de rotatiesnelheden van 19 massieve sterrenstelsels aan de hand van infrarode spectra, gemeten met het MOSFIRE instrument op de Keck-I telescoop in Hawaii. De metingen zijn onderdeel van de spectroscopische survey ZFIRE, gebaseerd op lichtbronnen in ZFOURGE. We bestuderen een optische emissielijn die voortkomt uit waterstofgas, maar vanwege de grote afstand is verschoven naar het infrarood. Vanwege de rotatie binnen een stelsel is de lijn uitgerekt, met een gedeelte dat meer en een gedeelte dat minder roodverschoven is. Hieruit leiden we de rotatiesnelheid af. We onderzoeken daarbij uitgebreid mogelijke systematische effecten, om er zeker van te zijn dat we de rotatiesnelheid niet onderschatten.

We vinden dat stervormende stelsels op hoge roodverschuiving bij een bepaalde rotatiesnelheid gemiddeld een lagere totale stermassa hebben, wat duidt op evolutie van de Tully-Fisher relatie. We vergelijken ons resultaat met eerdere studies, maar corrigeren die eerst voor de door ons onderzochte systematische effecten. Dit is een belangrijke stap, omdat de eerdere resultaten zeer sterk van elkaar verschilden, en we nu voor het eerst kunnen aan-

## Hoofdstuk 6. Samenvatting van dit proefschrift in het Nederlands

tonen wat daarvan de oorzaak zou kunnen zijn, namelijk het gebruik van verschillende methodes om de rotatiesnelheid te meten. Het uiteindelijke resultaat wijst op een geleidelijke evolutie over de laatste 10 tot 11 miljard jaar.

We vergelijken de waarnemingen ook met modellen en vinden dat de voorspelde evolutie redelijk overeenkomt met onze waarnemingen op hoge roodverschuiving (10 tot 11 miljard jaar geleden), maar niet met de gecorrigeerde resultaten van eerdere studies in de periode daarna. Een verklaring zou kunnen zijn dat sterren in stelsels op hoge roodverschuiving vaak mindere geordende banen volgen, terwijl dat niet is meegenomen in de modellen waarmee we vergelijken. Waar het verschil precies vandaan komt blijft gissen, totdat we met betere data een duidelijker beeld van de Tully-Fisher relatie kunnen vormen.

### 6.3 Blik op de toekomst

We hebben in dit proefschrift aangetoond dat passieve sterrenstelsels al zeer vroeg, slechts 1.6 miljard jaar na de oerknal, in het universum voorkwamen. De volgende stap is nu om het vroege bestaan en de gemiddelde eigenschappen, zoals massa en grootte, van deze stelsels toe te voegen aan modellen. Er wacht nog wel een andere taak, namelijk het bevestigen van de vondst door het meten van de precieze roodverschuiving met behulp van spectroscopie. De mogelijkheid tot het meten van infrarode spectra van sterrenstelsels is er al, bijvoorbeeld met MOSFIRE. In 2018 staat ook de lancering van de James Webb op het programma, die gaat zorgen voor nog diepere infrarood data, waarmee we mogelijk de allereerste passieve stelsels, en wellicht ook hun voorlopers, kunnen gaan vinden.

Met MOSFIRE, de James Webb en nog een aantal andere instrumenten kunnen we ook voor grote hoeveelheden stervormende sterrenstelsels spectroscopische waarnemingen gaan doen. Het is van belang om voor een breed roodverschuivingsbereik en met een consistente methodologie de rotatiesnelheid van de stelsels te bepalen, om de evolutie van de Tully-Fisher relatie nog beter te kwantificeren voor we proberen die te begrijpen.

Tenslotte is het nog de moeite waard om de ALMA telescoop in de Atacama woestijn in Chili te noemen. Met deze telescoop kunnen we submillimeter opnames maken van zeer actieve, maar door stof omgeven sterrenstelsels en beter inzicht krijgen in alle fases van de evolutie van sterrenstelsels.