

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32843> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Smit, Renske

**Title:** Star-forming galaxies at the cosmic dawn = Stervormende sterrenstelsels tijdens het kosmische ochtendgloren

**Issue Date:** 2015-04-28

# Nederlandse samenvatting

Het vraagstuk van onze oorsprong fascineert mensen van jong tot oud. Binnen dit vraagstuk specialiseert de extragalactische sterrenkunde zich op het ontstaan van sterrenstelsels en daarmee op de oorsprong van onze Melkweg. Door het installeren van de nieuwste camera op de *Hubble Space Telescope*, tijdens één van de laatste missies van de *Space Shuttle* in 2009, is een hele nieuwe generatie sterrenstelsels gevonden, die we nu kunnen waarnemen slechts een paar honderd miljoen jaar na de oerknal, het kosmische ochtendgloren van de geschiedenis van ons heelal. Dit proefschrift presenteert innovatieve observatieve studies naar de eigenschappen van deze vroege sterrenstelsels, om daarmee inzicht te verkrijgen in de fysische processen achter het ontstaan van de allereerste sterren en sterrenstelsels.

## Kosmologie en het vroege universum

Het grondwerk voor het bouwen van sterrenstelsels wordt gelegd bij het allereerste moment van onze kosmische geschiedenis: de oerknal. Bij het exploderen van de oerknal, 13.8 miljard jaar geleden, ligt de huidige verdeling van de verschillende materialen in het heelal meteen vast: 69% is donkere energie, een eigenschap van het heelal die we kunnen meten maar geenszins kunnen verklaren, 27% is donkere materie, deeltjes die waarschijnlijk vergelijkbare eigenschappen hebben als het neutrino maar met een veel grotere massa, en tenslotte is slechts 4% baryonische materie, een verzamelnaam voor alle deeltjes die we kennen en begrijpen zoals bijvoorbeeld waterstof, helium, koolstof en zuurstof, oftewel de bouwstenen van onze planeet.

Gedurende de eerste 400 duizend jaar na de oerknal dijt het universum uit en koelt het af, van bijna oneindig hoge temperaturen tot aan een paar duizend graden Kelvin. Op dat moment kan neutraal waterstof zich vormen en kan tegelijkertijd het allereerste licht uitgezonden worden, wat we vandaag de dag nog steeds kunnen zien in de vorm van de kosmische achtergrondstraling. De achtergrondstraling is een bijna perfect uniforme warmtebron, met slechts hele kleine variaties in de temperatuur op verschillende plekken aan de hemel. Die kleine variaties geven bewijs van de onregelmatigheden in de dichtheidsverdeling van de donkere en baryonische materie in dit vroege stadium van het universum. De periode tussen 400 duizend jaar en 400 miljoen jaar na de oerknal wordt ook wel de *donkere eeuwen* genoemd. In deze periode is er nog (bijna) geen sterrenlicht te zien, maar de gebieden met de hoogste dichtheid trekken steeds meer materie naar zich toe onder de invloed van de zwaartekracht om zo de nestjes te vormen waar de eerste sterren en sterrenstelsels geboren worden.

Uit de polarisatiemetingen van de kosmische achtergrondstraling kunnen we bepalen dat ongeveer 400 miljoen jaar na de oerknal de eerste sterrenstelsels genoeg hoogerenergetische straling produceren om het neutrale waterstofgas dat overal in het universum aanwezig is te ioniseren. Uit de spectra van enkele hele vroege *Quasars* (fel brandende accretieschijven rond supermassieve zwarte gaten) kunnen we opmaken dat dit reïonisatieproces pas voltooid is ongeveer 1 miljard jaar na de oerknal. Deze meetgegevens geven inzicht in de totale hoeveelheid straling die er door de eerste sterren en sterrenstelsels geproduceerd moet worden om het geïoniseerde gas in ons heelal te verklaren.

Het uitkarteren van de kosmische dichtheid van sterformatie als een functie van de tijd heeft

laten zien dat het hoogtepunt van activiteit in ons heelal ongeveer 8 tot 10 miljard geleden plaatsvond, slechts een paar miljard jaar na de oerknal. Als we sterrenstelsels in dat tijdperk bekijken vinden we grote roterende en stervormende schijven, gigantisch zware, dode sterrenstelsels en door stof verduisterde stelsels die een extreme uitbarsting van sterformatie ondergaan. De ontdekkingen van deze ver ontwikkelde stelsels leidden tot de verrassende conclusie dat de eerste generaties van sterrenstelsels een razend snelle ontwikkeling moeten doormaken in de 2 miljard jaar na de reïonisatieperiode.

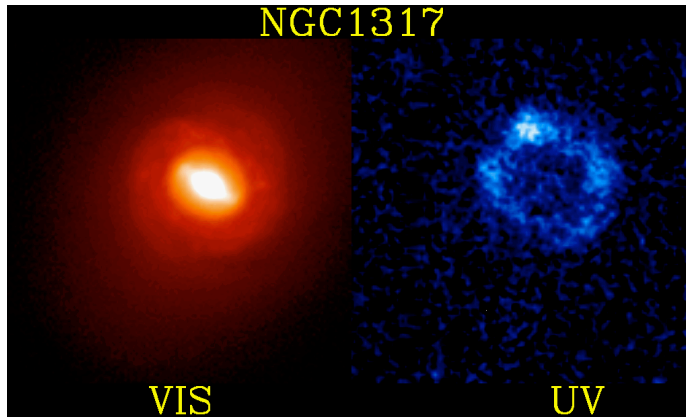
De bovenstaande kennis die in de afgelopen twee decennia is verzameld motiveert de observationele studie van sterrenstelsels in de eerste paar miljard jaar na de oerknal. Ondanks de aanzienlijke technische beperkingen en uitdagingen, proberen we het licht te zien van sterrenstelsels vele miljarden lichtjaren ver weg om een antwoord te krijgen op vragen zoals: Hoe zijn de allereerste sterren ontstaan? Hoe kunnen de eerste generatie sterrenstelsels genoeg straling produceren om al het neutrale waterstof gas in het universum te reïoniseren? Hoe ontwikkelen de eerste generaties van sterrenstelsels zich om uiteindelijk de diverse en geavanceerde sterrenstelsel populatie te vormen die we zien tijdens de piekperiode in de historie van onze kosmos?

## Terugkijken in de tijd

Om de geschiedenis van het universum in beeld te brengen, maken we gebruik van het feit dat licht een hele grote maar toch eindige snelheid heeft. Als een gevolg hiervan zien we de objecten aan de hemel altijd in het verleden. Het licht van de zon heeft 8 minuten nodig om de aarde te bereiken en zodoende kijken we 8 minuten terug in de tijd als we naar de zon kijken. De meeste sterren aan de hemel zien we een aantal duizenden jaren terug in het verleden, simpelweg omdat het licht er een paar duizend jaar over doet om de afstand van een ster tot onze aarde af te leggen. Als we buiten onze eigen Melkweg naar andere sterrenstelsels kijken gaan we al snel miljoenen jaren terug in de geschiedenis van deze objecten. In theorie kunnen we diep genoeg het heelal in kijken om 13,8 miljard jaar geleden het begin van van onze tijdlijn te zien. In de praktijk zijn sterrenstelsels die miljarden lichtjaren van ons weg staan echter extreem lichtzwak en kunnen we alleen door vele telescoopnames met hele lange sluitertijden bij elkaar op te tellen het licht van deze objecten onderscheiden van de instrumentruis.

Het waarnemen van verre, lichtzwakke sterrenstelsels vormt een extreme uitdaging voor het ontwerpen en bouwen van onze telescopen, maar daarnaast moet ook nog eens rekening gehouden worden met het uitdijen van het universum. Door het uitdijende heelal bewegen alle sterrenstelsels van ons af en rekt hun licht uit naar langere (rodere) golflengtes. Dit fenomeen noemen we roodverschuiving en is te vergelijken met het welbekende dopplereffect dat verklaart waarom een voorbijrijdende raceauto een hogere frequentie heeft wanneer het naar ons toe komt en een lagere frequentie wanneer het van ons weg rijdt. Hoe verder een sterrenstelsel van ons af staat, hoe sneller het sterrenstelsel van ons weg gaat en hoe roder het licht dat wij bij onze detectoren waarnemen. Door de hoge mate van roodverschuiving van sterrenstelsels die miljarden lichtjaren ver weg staan is het belangrijk om telescopen te gebruiken die niet alleen heel lichtgevoelig zijn voor het visuele licht dat wij met onze ogen zien, maar ook voor het nabije- en middel-infrarode spectrum.

In dit proefschrift maken we gebruik van data van de *Hubble Space Telescope* en de *Spitzer Space Telescope* om eigenschappen van sterrenstelsels in het vroege universum te meten. De installatie van de Wide Field Camera 3 (WFC3) op *Hubble* in 2009 heeft ervoor gezorgd dat we lichtgevoe-



**Figuur 5.10:** Het nabije sterrenstelsel NGC1317, ook wel Fornax A genoemd, afgebeeld in twee onderdelen van het electromagnetische spectrum: visueel (links) genomen door *Cerro Tololo Interamerican Observatory* en ultraviolet (rechts) door de *Ultraviolet Imager Telescope*. Langlevende sterren zoals de zon zien we links, ze laten de structuur en de totale massa van het sterrenstelsel zien. Kortlevende sterren zien we rechts, ze laten zien welke delen van het sterrenstelsel nog steeds nieuwe sterren vormen. *Credit: UIT, NASA*

lige en hoge resolutie opnames hebben in het nabije-infrarood. Door de hoge roodverschuiving zien we zelfs met deze camera alleen de sterren die veel ultraviolette (UV) straling uitzenden in sterrenstelsels meer dan 10 miljard lichtjaar ver weg. Sterren met veel UV straling hebben een zeer korte levensduur naar astronomische maatstaven: het duurt slechts 100 miljoen jaar voordat ze exploderen en vervolgens uitdoven. Dit betekent dat UV licht informatie geeft over het aantal kortlevende sterren dat in de laatste 100 miljoen jaar in een sterrenstelsel geboren werden. In de Melkweg zien we dat kortlevende en langlevende sterren altijd met een vaste verhouding geboren worden. Met dit gegeven en met de aanname dat de mate van stervorming in sterrenstelsels geen grote schommelingen ondervindt in de 100 miljoen jaar voorafgaand aan de waarneming, berekenen we met onze *Hubble* metingen van vroege sterrenstelsels het totale aantal sterren dat in deze stelsels per jaar geboren worden.

Om een beeld te vormen van de totale hoeveelheid sterren die een sterrenstelsel omvat is het nodig om naar sterren te kijken met een langere levensduur. Dit zijn bijvoorbeeld sterren zoals de zon, die veel straling uitzenden in het visuele spectrum. Figuur 5.10 geeft een illustratie van een nabij sterrenstelsel NGC1317, waarbij de twee opnames het visuele licht (links) en het uitgezonden UV licht (rechts) laten zien. De visuele opname toont een duidelijke schijf van sterren met de bulk van het sterrenlicht afkomstig uit een platte kern. Het UV licht benadrukt geheel andere gebieden in het sterrenstelsel: daar waar stervorming nog hevig gaande is. Terwijl *Hubble* het UV licht van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving nog nét kan zien met een nabij-infrarood camera, is het visuele licht verschoven naar het middel-infrarode spectrum, wat alleen maar zichtbaar is met *Spitzer*.

## Metingen aan sterrenstelsels in het vroege heelal

Om de fysische processen achter het ontstaan en ontwikkelen van sterrenstelsels bloot te leggen worden zo groot mogelijke steekproeven van sterrenstelsels verzameld. Deze steekproeven kunnen bijvoorbeeld gevonden worden in blanke velden: stukken van de hemel met zo weinig mogelijk Melkweg sterren die uitermate geschikt zijn voor lange sluitertijden. Een alternatieve steekproef kan plaatsvinden in het gezichtsveld van een massief cluster van sterrenstelsels, de meest massieve structuren in ons universum. Door de grote massa van deze clusters buigen inkomende lichtstralen om de structuur heen en daarmee ontstaat een lenseffect, ookwel een zwaartekracht lens genoemd. Het licht van verre sterrenstelsels achter de clusters zien we als onder een vergrootglas: helderder en enigszins uitgerekt. Dit heeft als voordeel dat we een hogere signaal/ruis verhouding krijgen bij metingen van de lichtzwakke achtergrondstelsels, maar ook het nadeel dat de mate van vergroting en daarmee de meting van de intrinsieke lichtintensiteit van het sterrenstelsel erg onzeker is. Hoewel recente metingen vooral gebaseerd zijn op blanke steekproeven, zijn lensstudies in opkomst. Zo deelde *Hubble* in 2013 bijvoorbeeld 840 uur waarnemings tijd toe aan het prestigieuze Frontier Fields programma, dat in de komende jaren extreem diep het heelal in zal kijken in 6 clustervelden.

Eén van de belangrijkste metingen die we met *Hubble* kunnen uitvoeren is de zogeheten UV-lichtkrachtfunctie: een meting van de dichtheid van sterrenstelsels als functie van hun UV lichtintensiteit. Recente studies laten zien dat we na de oerknal voornamelijk voor de helderste stelsels de dichtheid zeer snel zien toenemen. De fysische interpretatie die we hieraan kunnen toebedelen is dat terwijl het heelal ouder wordt opeenvolgende generaties sterrenstelsels steeds grotere bronnen van stervorming worden. Een belangrijke onzekerheid in het kwantificeren van deze meting is de hoeveelheid kosmisch stof in sterrenstelsels. Interstellaire stofwolken bestaan uit vaste deeltjes ter grootte van een paar micrometer die een gedeelte van de straling van sterren absorbeert, vergelijkbaar met een wolk dichte sigarettenrook die donker afsteekt tegen een lichtbron. Kosmisch stof heeft de typerende eigenschap dat het meer licht absorbeert op korte dan op langere golflengtes. Een simpele manier om te corrigeren voor de geabsorbeerde straling door stof is dan ook aan de hand van de kleur van een sterrenstelsel. Kleuren worden gemeten door de lichtkracht van sterrenstelsels te bepalen in twee opnames waarbij het spectrum gefilterd is op het licht van aangrenzende golflengtegebieden. Een rode kleur correspondeert met een deficiëntie in lichtintensiteit van de korte golflengtes, een indicatie voor kosmisch stof.

Als we niet alleen de opnames van *Hubble* maar ook de data van *Spitzer* gebruiken kunnen we naast de mate van stervorming bijvoorbeeld ook de sterrenmassa van een sterrenstelsel meten. Daarnaast geeft de verhouding tussen stervorming en sterrenmassa een mate van efficiëntie van de sterformatie. In de huidige fysische modellen over de vorming van sterrenstelsels, correleert de stervormingsefficiëntie sterk met de mate van toevoer van vers gas uit de intergalactische ruimte. Doordat ons universum uitdijt wordt deze toevoer vrijgesteld door de lagere dichtheid van gas in het heelal en we verwachten dus een hoge mate van stervormingsefficiëntie in het vroege heelal en een gestage afname met de tijd. Gedurende de afgelopen 10 jaar hebben meerdere onafhankelijke studies met *Spitzer* metingen verricht aan sterrenstelsels in de eerste paar miljard jaar na de oerknal. Verassend genoeg vonden de meeste studies constante lage stervormingsefficiënties, zelfs bij de vroegste generaties sterrenstelsels. Deze discrepantie tussen modellen en waarnemingen geeft ofwel een gebrek in onze theoretische kennis, ofwel een systematische afwijking in de metingen aan.

De interpretatie van het licht dat we waarnemen met *Spitzer* wordt bemoeilijkt door de emis-

sielijnen die worden geproduceerd in de gasnevels van stervormingsgebieden. Deze emissielijnen worden opgevangen in de *Spitzer* opnames en kunnen de oorzaak zijn van een te hoge meting van de totale lichtintensiteit van hoge roodverschuiving sterrenstelsels, wat tot gevolg heeft dat we een te zware massa en te lage stervormingsefficiëntie meten. In 2018 zal de *James Webb Space Telescope* gelanceerd worden, waarmee we deze emissielijnen direct kunnen meten met mid-infrarood spectroscopie. Tot die tijd echter moeten we ons beperken tot de fotometrie van *Spitzer*.

## Dit proefschrift

Dit proefschrift presenteert studies naar de eigenschappen van sterrenstelsels die we waarnemen tussen 800 miljoen en 1.5 miljard jaar na de oerknal. Hoofdstuk 2 en 5 onderzoeken eigenschappen van sterformatie in deze stelsels, terwijl hoofdstuk 3 en 4 zich richten op de invloed van emissielijnen bij het meten van sterrenmassa en efficiëntie van de sterformatie.

**Hoofdstuk 2** geeft de eerste bepaling van de stervormingsfunctie in de eerste paar miljard jaar na de oerknal. Met behulp van een steekproef van 2500 sterrenstelsel met gedetailleerde kleurmetingen, corrigeren we de UV-lichtkrachtfunctie van vier generaties sterrenstelsels tussen 800 miljoen en 1.5 miljard jaar na de oerknal voor de effecten van stofabsorptie om zodoende de mate van stervorming te quantificeren. De stervormingsfunctie geeft een gedetailleerde meting van de dichtheid van sterrenstelsels als een functie van hun mate van stervorming en hiermee fungeert het als een belangrijke test voor modellen en simulaties van het vroege universum.

**Hoofdstuk 3** introduceert de eerste metingen over de invloed van emissielijnen uit gasnevels op de gemeten *Spitzer* lichtintensiteit van sterrenstelsels slechts 800 miljoen jaar na de oerknal. We maken gebruik van sterrenstelsels gevonden in de CLASH survey, een dataset speciaal gericht op cluster velden, waardoor we gebruik kunnen maken van de vergroting door de zwaartekrachten om voldoende signaal/ruis verhouding te krijgen in de *Spitzer* opnames. We selecteren sterrenstelsels in een specifieke tijdszone waar we weten dat de *Spitzer* meting op 4.5 micrometer geen invloed ondervindt van emissielijnen en we vergelijken dit met een meting op 3.6 micrometer waar deze lijnen wél een rol spelen. We concluderen dat emissielijnen gemiddeld genomen een zeer belangrijke invloed hebben op de gemeten *Spitzer* lichtintensiteit ten opzichte van sterrenlicht. In sommige individuele gevallen wordt de gemeten *Spitzer* lichtintensiteit zelfs compleet gedomineerd door gasnevellijnen. Als gevolg hiervan zijn onze nieuwe metingen van de sterrenmassa veel lager dan voorheen en is de gemiddelde stervormingsefficiëntie in goede overeenkomst met theoretische voorspellingen.

**Hoofdstuk 4** beschrijft een nieuwe techniek om met hoge precisie afstandsbevestigingen te verrichten van sterrenstelsels 800 miljoen jaar na de oerknal. Door gebruik te maken van de resultaten in hoofdstuk 3 waar we sterrenstelsels vonden met dominante gasnevellijnen, kunnen we nieuwe sterrenstelsels vinden met deze specifieke eigenschappen. We gebruiken de kleur van sterrenstelsels afgeleid van metingen op 3.6 en 4.5 micrometer. Dominante emissielijnen produceren alleen extreem rode of extreem blauwe kleuren bij een bepaalde roodverschuiving, doordat de afstanden in golflengte tussen de verschillende lijnen en het golflengtegebied waar *Spitzer* gevoelig is een specifieke verhouding tot elkaar hebben. Dit kunnen we dan weer gebruiken om de afstandsbevestiging aanzienlijk te verbeteren. Deze nieuwe afstandsbevestigingen zijn zeer belangrijk om vervolgstudies te kunnen ondernemen met de nieuwe *Atacama Large Millimetre Array* telescoop, waarmee we beter inzicht kunnen krijgen in bijvoorbeeld de gasinhoud van vroege sterrenstelsels.

**Hoofdstuk 5** onderzoekt twee indicatoren voor de mate van stervorming in sterrenstelsels ongeveer 1 tot 2 miljard jaar na de oerknal. Tijdens deze periode kunnen we aan de hand van de invloed van gasnevellijnen op de *Spitzer* metingen een schatting maken van de totale mate van stervorming in sterrenstelsels op tijdschalen van ongeveer 10 miljoen jaar. Door deze schattingen uit te zetten tegen de voor stof gecorrigeerde UV lichtkracht metingen, die gevoelig zijn voor de sterren die gevormd zijn over een tijdschaal van 100 miljoen jaar, kunnen we inzicht krijgen in de recente historie van sterformatie. We vinden een uitstekende overeenkomst tussen de twee onafhankelijke bepalingen van de mate van stervorming met een kleine spreiding in de individuele metingen. We concluderen dat er weinig stochastische variatie is in de mate van stervorming op tijdschalen van tientallen miljoenen jaren. Deze metingen zijn van belang voor ons fysisch inzicht in het evenwicht tussen verse toevoer van gas uit de intergalactische ruimte en eventuele tegenwerkende krachten zoals exploderende supernovae.