Nederlandse Samenvatting

De Oorsprong en Eigenschappen van Sterrenstelsels

ONS HEELAL is ongeveer 13,7 miljard jaar geleden ontstaan tijdens de oerknal[1]. Vanaf dit moment is het Heelal gaan uitdijen en afkoelen. In de begintijd van het Heelal was de materie gelijkmatig verdeeld, met slechts minieme rimpels. Aangezien de dichtheid in deze rimpels hoger was geschiedde de uitdijing hier langzamer dan in de omliggende gebieden. Door de verdere afkoeling en onder invloed van de zwaartekracht groeiden deze rimpels uiteindelijk uit tot de sterrenstelsels in ons huidige Heelal. Bijvoorbeeld, de ruimte rond onze Melkweg had 500 000 jaar na de oerknal, toen het Heelal 1000 maal kleiner was dan vandaag de dag, een dichtheid die slechts 0,5% hoger was dan de gemiddelde dichtheid.

In het nabije Heelal komen ruwweg twee soorten sterrenstelsels voor: spiraalvormige en elliptische sterrenstelsels (zie Figuur 1). Spiraalvormige sterrenstelsels zijn spectaculaire verschijningen. De sterren, het stof en het gas vormen spiraalarmen, die zich in een roterende schijf om het centrum van het sterrenstelsel heen bewegen. De sterren in deze spiraalarmen zijn jong, en nieuwe sterren worden nog steeds gevormd. Spiraalvormige sterrenstelsels bestaan uit ongeveer 10 miljard sterren en behoren tot de lichtere sterrenstelsels in ons Heelal. Ze bevinden zich over het algemeen in dunbevolkte gebieden. Een voorbeeld van een spiraalvormig sterrenstelsel is onze Melkweg.

In elliptische sterrenstelsels worden geen nieuwe sterren meer gevormd, en de sterren zijn doorgaans dus veel ouder dan die in spiraalvormige sterrenstelsels. Elliptische sterrenstelsels bevinden zich in de meer dichtbevolkte delen van ons Heelal en zijn over het algemeen zwaarder. Ze bestaan uit ongeveer 100 miljard sterren die gelijkmatiger zijn verdeeld dan in spiraalvormige sterrenstelsels en vertonen een tragere en minder gestructureerde rotatie. De combinatie van het grote aantal sterren en het lage huidige geboortegetal impliceert dat de stervorming in elliptische sterrenstelsels in het verleden veel hoger moet zijn geweest.

Waar komt deze tweedeling vandaan en waarom vormen spiraalvormige sterrenstelsels vandaag de dag wel sterren en elliptische sterrenstelsels niet? Dit is een vraag waar veel astronomen zich mee bezighouden. In de huidige theorie ontstaan elliptische sterrenstelsels door het botsen en samensmelten van twee of meer spiraalvormige sterrenstelsels. Sommige astronomen denken dat deze botsingen ervoor zorgen dat de stervorming in elliptische sterrenstelsels wordt gestopt. Echter, andere astronomen denken dat het gewicht van een sterrenstelsel bepaalt of er wel of geen stervorming plaatsvindt. Boven een bepaald gewicht zouden er processen optreden in de ster-

[1]Ondanks wat de naam doet vermoeden, is de oerknal niet een ontploffing in de ruimte, maar een staat van oneindige dichtheid en temperatuur

Figuur 1 — *Links:* Voorbeeld van een elliptisch sterrenstelsel (M87). *Rechts:* Voorbeeld van een spiraalvormig sterrenstelsel (NGC 2903).

renstelsels waardoor het gas wordt verwarmd of naar buiten wordt geblazen, zodat stervorming onmogelijk is. In beide scenario's zouden de enorme zwarte gaten in het midden van deze grote sterrenstelsels een belangrijke rol kunnen spelen. De waargenomen relaties tussen zowel het gewicht, de stervorming en de verschijning van de sterrenstelsels maken beide theorieën aannemelijk.

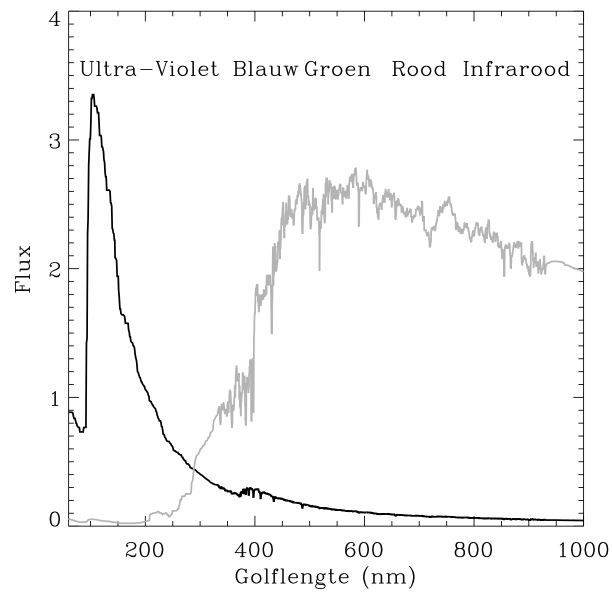
Waarnemingen van Sterrenstelsels door de Tijd heen

Licht heeft een eindige snelheid en doet er dus een bepaalde tijd over om zich te verplaatsen. Op de Aarde merken wij hier weinig van, aangezien deze snelheid heel hoog is. Maar over lange afstanden is het wel merkbaar. Bijvoorbeeld, het licht dat we van de Zon ontvangen heeft er iets meer dan acht minuten over gedaan om de Aarde te bereiken. Dit heeft tot gevolg dat, wanneer we het Heelal bestuderen, we terugkijken in de tijd. We kunnen het Heelal dus waarnemen op het moment dat het jonger was dan nu. Maar hoe weten we hoe lang het licht heeft gereisd, en dus hoe ver het bestudeerde sterrenstelsel van ons is verwijderd?

Om de afstand tot een sterrenstelsel te meten hebben we een spectrum nodig. In een spectrum wordt het ontvangen licht van een sterrenstelsel gescheiden in verschillende kleuren. Bij elke kleur hoort een bepaalde golflengte. Rood licht bestaat bijvoorbeeld uit lange golven, terwijl de golflengte van blauw licht heel kort is. Een spectrum geeft aan wat de intensiteit of helderheid van het licht is bij een bepaalde golflengte of kleur.

Sterrenstelsels zijn opgebouwd uit vele sterren, die allemaal verschillende kleuren licht uitzenden. Jonge sterren stralen vooral ultra-violet en blauw licht uit, terwijl oude sterren er voor ons rood uitzien. Aangezien elliptische sterrenstelsels worden gedomineerd door oude sterren, en spiraalvormige sterrenstelsels door jonge sterren, zijn de kleuren van deze sterrenstelsels respectievelijk rood en blauw. Figuur 2 laat de spectra van een elliptisch en een spiraalvormig sterrenstelsel zien. Het spectrum van het oude sterrenstelsel is inderdaad het helderst bij groen en (infra-)rood, terwijl het spectrum van het jonge sterrenstelsel vooral erg sterk is in het ultra-violet en in het blauw.

Door de uitdijing van het Heelal is het licht van een sterrenstelsel dat op weg is naar de Aarde mee uitgedijd. De lichtgolven zijn hierdoor langer geworden. Afhankelijk van de precieze afstand tussen het sterrenstelsel en de Aarde, kan oorspronkelijk blauw licht er voor ons groen of rood uitzien. Dit wordt roodverschuiving genoemd. Hoe groter de roodverschuiving, hoe meer het Heelal is uitgedijd in de tussentijd, en dus hoe groter de afstand tot het sterrenstelsel.



Figuur 2 — Modelspectra van een sterrenstelsel met jonge (*zwart*) en één met oude sterren (*grijs*).

De afstand waarop een sterrenstelsel van de Aarde staat, ofwel de roodverschuiving, kunnen we direct meten uit het spectrum. Zoals zichtbaar in Figuur 2 hebben de spectra van sterrenstelsels specifieke vormen. Deze vormen zijn nog steeds herkenbaar in een roodverschoven spectrum. Het verschil tussen de golflengte waarop we deze specifieke vormen verwachten en de waargenomen golflengte geeft ons de roodverschuiving en dus de afstandsbepaling tot het sterrenstelsel. Op deze manier kunnen we de sterrenstelsels in het Heelal in zowel ruimte als in tijd in kaart brengen.

Sterrenstelsels in het Vroege Heelal

Gedetailleerde onderzoeken van sterrenstelsels in het nabije Heelal geven ons een goed idee van de stervormingsgeschiedenis van deze sterrenstelsels. Echter, zoals uitgelegd in de vorige sectie, kunnen we de evolutie van sterrenstelsels ook direct volgen door verder weg gelegen sterrenstelsels te bestuderen. Dit biedt een aantal voordelen. Ten eerste is het interessant om te weten of sterrenstelsels in het vroege Heelal ook een duidelijke tweedeling vertoonden. Ten tweede botsen sterrenstelsels voortdurend met elkaar, waardoor de meeste sterren niet meer leven in het sterrenstelsel waarin ze ooit zijn geboren. Dit maakt de interpretatie van de trends tussen gewicht en andere eigenschappen van lokale sterrenstelsels erg ingewikkeld. Tenslotte kunnen we door het terugkijken in de tijd misschien direct waarnemen waardoor de stervorming in elliptische sterrenstelsels wordt gestopt.

Uit de leeftijden van de sterren in elliptische sterrenstelsels in het nabije Heelal kunnen we afleiden dat de meeste sterren in deze sterrenstelsels zijn gevormd toen het Heelal ongeveer 25% van zijn huidige leeftijd had. Daarom dachten veel astronomen dat het Heelal toentertijd werd bewoond door sterrenstelsels die enorm veel nieuwe sterren tegelijkertijd vormden. Echter, door direct het Heelal te bestuderen toen het nog maar 3 miljard jaar oud was, zijn astronomen erachter gekomen dat een groot aantal zware sterrenstelsels in het vroege Heelal al rood was. Dit doet vermoeden dat de stervorming in zware sterrenstelsels al eerder was gestopt dan men dacht. Er is alleen één complicatie: niet alleen oude sterren, maar ook stof tussen de sterren kan sterrenstelsels rood maken. De vraag is dus of deze sterrenstelsels rood zijn door stof of door het gebrek aan stervorming. Het antwoord op deze vraag heeft directe gevolgen voor ons begrip van de stervormingsgeschiedenis van het Heelal. Spectroscopie, ofwel het bestuderen van de spectra van deze sterrenstelsels, biedt de beste optie om dit vraagstuk op te lossen.

Dit Proefschrift

In dit proefschrift proberen we een aantal belangrijke vragen, die ter spraken kwamen in de voorgaande secties, te beantwoorden. Hiervoor maken we gebruik van waarnemingen met de Gemini Telescoop and de Very Large Telescoop (VLT) in Chili. Met behulp van spectrografen die gevoelig zijn in het nabij-infrarood (de Gemini Near-InfraRed Spectrograph en SINFONI op de VLT) bestuderen we het licht van sterrenstelsels in het vroege Heelal. Deze sterrenstelsels staan zo ver weg, dat het licht er 11 miljard jaar over heeft gedaan om ons te bereiken. In totaal hebben we het licht van 36 sterrenstelsels onderzocht.

Spectroscopie in het nabij-infrarood verschaft nieuwe methoden voor het bestuderen van verre sterrenstelsels. Doordat het licht van deze sterrenstelsels er ongeveer 11 miljard jaar over heeft gedaan om de Aarde te bereiken, is de roodverschuiving aanzienlijk. Jonge sterrenstelsels in het vroege Heelal zien er voor ons nu rood uit. Het licht van oude sterrenstelsels is zo ver roodverschoven dat hun licht is omgezet in warmtestraling (infrarood licht) en dus niet meer zichtbaar is met het oog. Gelukkig kunnen we het licht nog wel detecteren met camera's die gevoelig zijn voor infrarode straling.

Met behulp van de waargenomen spectra bepalen we de exacte roodverschuivingen en dus de afstanden tot de sterrenstelsels. Dit zijn de eerste nauwkeurige afstandsbepalingen voor een dergelijke groep van zware sterrenstelsels in het vroege Heelal. Daarnaast vertellen de spectra ons uit wat voor soort sterren deze sterrenstelsels zijn opgebouwd en hoe de rode sterrenstelsels in het vroege Heelal aan hun kleur komen. Wordt deze rode kleur veroorzaakt door stof of door oude stellaire populaties? Door de spectra te vergelijken met modelspectra van sterrenstelsels, kunnen we meer leren over de leeftijd van de sterren, het huidige geboortecijfer, het gewicht van het sterrenstelsel, en hoeveel stof zich tussen de sterren bevindt. Deze modelspectra zijn opgebouwd uit de afzonderlijke spectra van sterren. De afstandsbepalingen, de vergelijkingen met de modelspectra en de bepalingen van de eigenschappen van de sterpopulaties worden uitgelegd in Hoofdstuk 2 en 5 van dit proefschrift.

Opmerkelijk genoeg vinden we voor een groot gedeelte van de waargenomen sterrenstelsels geen aanwijzingen voor stervorming (Hoofdstuk 3). Voor deze sterrenstelsels wordt de rode kleur dus niet veroorzaakt door stof, maar door oude sterren. Deze nieuwe ontdekking draagt bij aan het steeds sterker wordende bewijs dat de vorming van nieuwe sterren in zware sterrenstelsels sterk is afgeremd na een initiële explosieve geboortegolf. De spectra van de sterrenstelsels zonder stervorming worden gedomineerd door A-type sterren. Deze sterren hebben een levensduur van ongeveer 1 miljard jaar. De aanwezigheid van deze sterren in de sterrenstelsels geeft dus een bovenlimiet op de tijdsduur sinds de laatste periode van stervorming. Dit impliceert dat de stervorming in deze sterrenstelsels minder dan 1 miljard jaar geleden is opgehouden.

Niet alle sterrenstelsels stoppen met het vormen van sterren op hetzelfde moment. In Hoofdstuk 6 laten we zien dat de dichtheid van zware sterrenstelsels zonder stervorming in het nabije Heelal ongeveer een factor 8 hoger is dan in het vroege Heelal. Dit betekent dat een gedeelte van de lokale zware sterrenstelsels al is opgehouden met het vormen van sterren toen het Heelal nog maar 20% van zijn huidige leeftijd had. De overige sterrenstelsels waren waarschijnlijk nog actief sterren aan het vormen op het moment van onze waarnemingen. Veel van deze zware sterrenstelsels zullen op een later tijdstip hun stervorming stoppen.

De grote vraag is wat de geboortestop in sterrenstelsels veroorzaakt. Eerder werd er al een aantal oorzaken genoemd. Een mogelijke verklaring voor deze vondst is dat de enorme zwarte gaten in het midden van deze grote sterrenstelsels de stervorming afremmen. De grote hoeveelheid aan materiaal dat door de zwarte gaten wordt aangetrokken genereert paradoxaal genoeg zeer veel energie, die vervolgens het gas in het sterrenstelsel verhit. Door deze opwarming is het gas niet meer in staat nieuwe sterren te vormen. In een aantal van de onderzochte sterrenstelsels is de aanwezigheid van een zwart gat inderdaad bewezen. Dit is beschreven in Hoofdstuk 4 van dit proefschrift. Deze zwarte gaten bevinden zich vooral in de stelsels waar de stervorming net (minder dan 1 miljard jaar geleden) is afgeremd. Verder vertoont de opbouw van zwarte gaten eenzelfde soort verloop als de opbouw van sterrenstelsels, namelijk dat zowel de zware sterrenstelsels en zware zwarte gaten vooral groeien in het vroege Heelal, terwijl lichte sterrenstelsels en lichte zwarte gaten vooral groeien als het Heelal al wat ouder is. Deze resultaten zouden het idee dat zwarte gaten de geboorte van nieuwe sterren in het jonge Heelal beperken, kunnen ondersteunen. Echter, directe bewijzen ontbreken vooralsnog.