



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

Hidden star formation in the early Universe

Leeuwen, I. F. van

Citation

Leeuwen, I. F. van. (2026, April 9). *Hidden star formation in the early Universe*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4301034>

Version: Publisher's Version

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4301034>

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

NEDERLANDSE SAMENVATTING

In het huidige, meest geaccepteerde kosmologische model begint het heelal met de Oerknal (*Big Bang*). Het heelal had een extreem hoge en vrijwel uniforme dichtheid en dijde in een fractie van een seconde na de Oerknal zeer snel uit. Hierdoor groeiden kleine afwijkingen in de dichtheid, totdat gebieden met hogere dichtheden ineenstortten en halo's van donkere materie vormden. In deze halo's verzamelde gas zich, waardoor enkele honderden miljoenen jaren na de Oerknal de eerste sterren ontstonden, gevolgd door de vorming van de eerste sterrenstelsels.

Om de evolutie van het heelal te begrijpen is het cruciaal om de sterrenstelsels in het jonge heelal waar te nemen. Licht heeft een constante snelheid (ongeveer 300.000 km/s) en hierdoor duurt het enkele honderden miljoenen jaren totdat het licht van verre sterrenstelsels onze telescopen bereikt. De afstand tot sterrenstelsels wordt gemeten aan de hand van de verschuiving van het licht naar langere golflengtes, de zogenaamde roodverschuiving (*redshift*; z). Waarnemingen van sterrenstelsels met hoge roodverschuiving geven inzicht in het heelal zoals het er honderden miljoenen jaren na de Oerknal uitzag. Het bestuderen van zulke verre sterrenstelsels is echter uitdagend en vereist telescopen met hoge resolutie en gevoeligheid. Met de komst van nieuwe telescopen, zoals de *James Webb Space Telescope* (JWST), worden steeds verder gelegen sterrenstelsels waargenomen, wat astronomen ertoe dwingt bestaande theorieën over de evolutie van sterrenstelsels en het heelal te herzien.

Stervorming

Sterren worden gevormd in sterrenstelsels, waardoor stervorming en de evolutie van een sterrenstelsel nauw met elkaar verbonden zijn. De mate waarin sterren worden gevormd wordt uitgedrukt in zonsmassa's (ongeveer 2×10^{30} kg) per jaar en wordt aangeduid als de stervormingssnelheid (*star formation rate*; *SFR*). Voor verre sterrenstelsels is het echter niet mogelijk om individuele sterren te onderscheiden en te tellen. In plaats hiervan wordt het gecombineerde licht van vele sterren waargenomen. Door het gebruik van modellen van verschillende populaties van sterren wordt de stervormingssnelheid van een sterrenstelsel bepaald.

Sterrenstelsels worden waargenomen over een breed bereik aan golflengtes. Om stervorming waar te nemen wordt vaak ultraviolet licht gebruikt. Naast sterren bevatten sterrenstelsels ook stof (*dust*), bestaande uit microscopisch kleine deeltjes die ultraviolet licht efficiënt absorberen. Van sterrenstelsels die veel stof bevatten wordt hierdoor minder ultraviolet licht waargenomen. Ultravioletwaarnemingen geven alleen informatie over de

onverborgen stervorming (*unobscured star formation*) en kunnen de totale stervorming onderschatten.

Het door stofdeeltjes geabsorbeerde licht wordt opnieuw uitgezonden op langere golflengtes in het infrarood. Infraroodwaarnemingen maken het daarom mogelijk om de door stof verborgen (*dust-obscured*) stervorming waar te nemen. Door ultraviolet- en infraroodwaarnemingen te combineren kan de totale stervorming in een sterrenstelsel worden bepaald.

Een alternatieve methode om de totale stervorming te onderzoeken is het gebruik van specifieke infrarode emissielijnen. Twee belangrijke emissielijnen voor waarnemingen van verre sterrenstelsels zijn van geïoniseerd koolstof ($[\text{CII}]_{158\mu\text{m}}$) en dubbel geïoniseerd zuurstof ($[\text{OIII}]_{88\mu\text{m}}$). Deze emissielijnen worden niet negatief beïnvloed door stof en worden veel gebruikt om sterrenstelsels met hoge roodverschuiving te identificeren en te bestuderen.

Waarnemingen van de stervorming in grote aantallen sterrenstelsels worden gebruikt om de dichtheid van de stervormingssnelheid (*star formation rate density; SFRD*) op een specifieke roodverschuiving te bepalen: de hoeveelheid sterren die gevormd wordt in zonsmassa's per jaar in een vast volume van het heelal. Ongeveer drie miljard jaar na de Oerknal bereikt de dichtheid van de stervormingssnelheid een maximum. Verder terug in de tijd neemt de dichtheid van de stervormingssnelheid af. Metingen van de stervormingssnelheid in het jonge heelal zijn echter beperkt en grotendeels gebaseerd op ultravioletwaarnemingen van onverborgen stervorming. Hierdoor is de SFRD op hoge roodverschuiving onzeker en zijn aanvullende waarnemingen nodig die ook rekening houden met de verborgen stervorming.

De selectie van sterrenstelsels

In dit proefschrift ligt de focus op twee verschillende populaties van sterrenstelsels. De eerste populatie bestaat uit sterrenstelsels geselecteerd op helder ultraviolet licht en is afkomstig van het REBELS project. De REBELS sterrenstelsels zijn waargenomen in het infrarood met als doel de $[\text{CII}]$ - of $[\text{OIII}]$ -emissielijn te detecteren. Voor 25 sterrenstelsels is $[\text{CII}]$ -emissie waargenomen waardoor het REBELS project een grote bijdrage levert aan het begrip van sterrenstelsels in het jonge heelal.

De tweede populatie bestaat uit sterrenstelsels die per toeval zijn ontdekt. Sterrenstelsels bevinden zich vaak in groepen, waardoor waarnemingen gericht op één object ook informatie kunnen bevatten over nabijgelegen sterrenstelsels. Deze zogenoemde *serendipitously identified* sterrenstelsels zijn gevonden in $[\text{CII}]$ -waarnemingen van andere objecten. Een belangrijk voordeel van deze selectie is dat de waarnemingen niet bevooroordeeld zijn ten opzichte van onverborgen stervorming, in tegenstelling tot ultravioletwaarnemingen.

Instrumenten

De drie belangrijkste instrumenten die in dit proefschrift worden gebruikt zijn de *Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array* (ALMA), *Hubble Space Telescope* (HST) en JWST. ALMA is een interferometer in de Atacamawoestijn in Chili, waarbij signalen van meerdere antennes worden gecombineerd. ALMA neemt het infrarode licht van verre sterrenstelsels waar en is geschikt voor het detecteren van de verborgen stervorming. HST bevindt zich in een baan om de aarde en wordt gebruikt voor ultravioletwaarnemingen, waarmee onverborgen stervorming kan worden bestudeerd. JWST bevindt zich op ongeveer 1,5 miljoen kilometer van de aarde en heeft een hogere gevoeligheid dan HST. JWST observeert zowel ultraviolet licht van sterrenstelsels met hoge roodverschuiving, als licht met iets langere golflengtes, waardoor aanvullende informatie over de eigenschappen van sterrenstelsels kan worden verkregen.

Dit proefschrift

In **Hoofdstuk 1** wordt de wetenschappelijke achtergrond van dit proefschrift uitgebreider besproken. In de daaropvolgende hoofdstukken worden waarnemingen met ALMA, HST en JWST gebruikt om zowel de verborgen als de onverborgen stervorming in sterrenstelsels in het jonge heelal te onderzoeken.

In **Hoofdstuk 2** wordt een nieuwe methode gepresenteerd om de dichtheid van stervormingssnelheid te bepalen. Hiervoor worden achttien sterrenstelsels met [CII]-emissie gebruikt, die per toeval zijn ontdekt in ALMA waarnemingen. Met deze waarnemingen stellen we vast welk deel van de stervorming in sterrenstelsels met hoge roodverschuiving doorgaans door stof wordt verborgen. Deze resultaten worden vervolgens gebruikt om modellen gebaseerd op ultravioletwaarnemingen te corrigeren voor verborgen stervorming. We vinden dat verborgen licht een belangrijke bijdrage levert aan het totale stervormingsbudget van het jonge heelal.

In **Hoofdstuk 3** worden de resultaten besproken van vier REBELS sterrenstelsels waarvoor specifiek naar [OIII]-emissie is gezocht. In geen van deze objecten is [OIII]-emissie waargenomen, ondanks dat bij twee sterrenstelsels wel emissie van stof is gedetecteerd. Met name voor sterrenstelsel REBELS-04 is het ontbreken van [OIII]-emissie verrassend en onderzoeken we welke fysische condities dit kunnen verklaren. Indien in de toekomst de roodverschuiving van REBELS-04 wordt bevestigd, zou dit het verste sterrenstelsel zijn met een detectie van stof door ALMA. Daarnaast gebruiken we meerdere waarnemingen van een ander sterrenstelsel, REBELS-37, om de eigenschappen van het stof te bestuderen. We concluderen dat zeer lage temperaturen van het stof in het sterrenstelsel (lager dan 28 Kelvin, ofwel -245 °C) onwaarschijnlijk zijn.

In **Hoofdstuk 4** worden de sterrenstelsels uit Hoofdstuk 2 opnieuw onderzocht met nieuwe JWST-waarnemingen. Voor negen sterrenstelsels combineren we de gegevens van onder andere HST en JWST om het licht op korte golflengtes te modelleren. Om vast te stellen of de met ALMA waargenomen emissie daadwerkelijk afkomstig is van [CII] bij een hoge roodverschuiving, modelleren we de waarschijnlijkheidsverdeling van de roodverschuiving. Bovendien bepalen we de stellaire massa's van de sterrenstelsels, oftewel de massa die zich in sterren bevindt. We vinden dat de stervorming en massa consistent zijn met die van de algemene populatie van verre sterrenstelsels. Hoewel deze sterrenstelsels kunnen worden geïdentificeerd via [CII]-emissie, blijkt het moeilijker om ze te detecteren met emissielijnen toegankelijk voor JWST. Hierdoor zijn sterrenstelsels geïdentificeerd via [CII] met ALMA van bijzondere waarde voor het bepalen van de verborgen stervorming in het jonge heelal.