



Universiteit
Leiden

The Netherlands

A Sub-mm perspective on massive galaxies in the early universe

Schouws; S.T.M.

Citation

A Sub-mm perspective on massive galaxies in the early universe. (2026, September 1). *A Sub-mm perspective on massive galaxies in the early universe*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4309150>

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/1887/4309150>

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

Nederlandse Samenvatting

Een reis terug in de tijd

Wanneer we 's nachts naar de hemel kijken, zien we de sterren niet zoals ze nu zijn, maar zoals ze in het verleden waren. Omdat licht een vaste snelheid heeft (bijna 300.000 kilometer per seconde), kost het tijd voordat het licht van verre objecten ons bereikt. Hoe verder we het heelal in kijken, hoe verder we terugkijken in de tijd. Het heelal is ongeveer 13,8 miljard jaar oud. Met de huidige generatie telescopen kunnen we zó ver kijken, dat we sterrenstelsels waarnemen die al bestonden toen het heelal nog maar een fractie van zijn huidige leeftijd had: slechts een paar honderd miljoen jaar na de oerknal. Dit tijdperk markeert de 'kosmische dageraad', de periode waarin de allereerste sterren en sterrenstelsels het heelal begonnen te verlichten.

Het bestuderen van deze allereerste stelsels is echter een enorme uitdaging. Doordat het heelal uitdijt, wordt de ruimte zélf opgerekt. Hierdoor wordt het licht van verre stelsels uitgerekt terwijl het naar ons toe reist. De golflengte van het licht verschuift hierdoor naar het roodere, onzichtbare deel van het spectrum. Dit fenomeen noemen we roodverschuiving. Om sterrenstelsels in het vroege heelal te bestuderen, hebben we daarom telescopen nodig die heel gevoelig zijn voor infraroodstraling en radiogolven.

In de afgelopen jaren heeft de James Webb Space Telescope (JWST) spectaculaire ontdekkingen gedaan door het infrarode licht van vroege sterrenstelsels vast te leggen. In dit proefschrift maken we echter gebruik van een heel ander instrument: de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). ALMA is een netwerk van meer dan vijftig radioschotels, gelegen op een hoogvlakte in Chili. In plaats van naar het licht van de sterren zelf te kijken, vangt ALMA submillimeterstraling op. Hiermee observeren we niet de sterren, maar de grondstoffen waaruit sterren worden geboren: de ijskoude wolken van gas en stof die de ruimte tussen de sterren vullen, en het gas dat door jonge sterren wordt verhit. Dit stof en gas maken deel uit van het Interstellair Medium (ISM).

Het Interstellair Medium en het Mysterie van 'Feedback'

Sterrenstelsels vormen zich in zogeheten 'halo's' van donkere materie. De zwaartekracht van deze donkere materie trekt oergas (voornamelijk waterstof en helium) naar zich toe. Terwijl het gas naar binnen valt, warmt het

op. Om nieuwe sterren te kunnen vormen, moet dit hete gas afkoelen en samentrekken. Dat afkoelen gebeurt doordat atomen en moleculen in het gas energie uitstralen.

Theoretische modellen voorspelden lange tijd dat bijna ál het gas in een halo snel zou moeten afkoelen en in sterren zou veranderen. In werkelijkheid observeren we dat sterrenstelsels veel minder efficiënt zijn in het vormen van sterren. Er moet dus een proces zijn dat het gas verhit, uit het stelsel verdrijft of verhindert af te koelen, zodat stervorming wordt afgeremd. In de sterrenkunde noemen we dit proces feedback. Deze feedback kan afkomstig zijn van de intense straling van jonge sterren, ontplofende sterren (supernova's) of superzwarte zwarte gaten. De grote open vraag is hoe deze feedbackprocessen precies werken en hoe ze de allereerste sterrenstelsels vormgaven.

Om de fysieke omstandigheden in deze vroege stelsels te meten, bestuderen we specifieke specifieke emissielijnen en kosmisch stof. Kosmisch stof bestaat uit piepkleine vaste deeltjes van zware elementen, zoals koolstof en silicaten, die voornamelijk geproduceerd worden tijdens supernova-explosies. Emissielijnen zijn als de vingerafdrukken van specifieke gassen (zoals geïoniseerd koolstof ([CII]) en zuurstof ([OIII])). Door de helderheid van deze lijnen met ALMA te meten, kunnen we de temperatuur, gasdichtheid en de chemische samenstelling (metalliciteit) van de stelsels bepalen.

Kosmisch stof en verborgen stervorming (Hoofdstuk 2)

In hoofdstuk 2 onderzoeken we een groep van vijftien zeer heldere sterrenstelsels toen het heelal ongeveer 700 tot 800 miljoen jaar oud was (een roodverschuiving van $z \sim 7-8$). Voor de komst van telescopen zoals ALMA werd de mate van stervorming in het vroege heelal vooral gemeten aan de hand van ultraviolet (UV) licht van jonge sterren. UV-licht wordt echter heel makkelijk geabsorbeerd door kosmisch stof. Het stof warmt hierdoor op en straalt de energie weer uit als ver-infrarode straling, wat wij met ALMA kunnen detecteren.

Voorheen werd aangenomen dat er zo vroeg in de geschiedenis van het heelal nog niet veel stof zou zijn. Uit onze diepe ALMA-waarnemingen blijkt echter dat we in maar liefst zes van deze stelsels grote hoeveelheden stof waarnemen. Door het UV-licht (zichtbare stervorming) te combineren met de ALMA-data (verborgen stervorming), toonden we aan dat zelfs in de vroegste tijdperken ongeveer één derde van de stervorming in zware stelsels door stof aan het zicht wordt onttrokken. Omdat deze stelsels zo

jong zijn, betekent dit dat het stof in een extreem hoog tempo moet zijn geproduceerd, zeer waarschijnlijk door vroege supernova's.

ALMA als ‘roodverschuivingsmachine’ (Hoofdstuk 3)

Om de eigenschappen van vroege sterrenstelsels goed te kunnen bestuderen, is het cruciaal om hun exacte afstand te weten. Dit gebeurt door hun precieze roodverschuiving te bepalen. Vóór de lancering van JWST was dit enorm lastig, omdat we vanaf de aarde het benodigde licht door de blokkerende werking van de aardatmosfeer vaak niet konden zien.

In hoofdstuk 3 demonstreren we een innovatieve methode: we gebruiken ALMA om zonder vooraf bekende spectroscopische roodverschuiving een frequentiebereik af te zoeken naar de emissielijn van geïoniseerd koolstof ([CII]). We selecteerden hiervoor zes extreem heldere stelsels op basis van hun specifieke kleuren in archiefdata van de Spitzer-ruimtetelescoop. Dit bleek een efficiënte strategie: in 50% van de gevallen vonden we exact de gezochte koolstoflijn.

Deze waarnemingen gaven ons niet alleen de exacte roodverschuiving, maar onthulden ook de interne dynamiek van deze stelsels. Het koolstofsignaal is zo sterk dat we konden zien hoe het gas beweegt (kinematica). We ontdekten een verrassende diversiteit: één stelsel vertoonde de kalme, geordende rotatie van een schijf, een ander bleek de chaotische nasleep van twee op elkaar botsende sterrenstelsels (een merger), en een derde leek gedomineerd te worden door wilde interne turbulentie met lokaal extreem heldere klonters van stervorming.

Naar de Grens van het Heelal: GS-z14 (Hoofdstuk 4 & 5)

Hoofdstukken 4 en 5 richten zich op slechts één object, maar wel een hele speciale: JADES-GS-z14-0. Dit stelsel werd onlangs met de JWST ontdekt en was tot voor kort het verste sterrenstelsel dat de mensheid kende. We zien dit stelsel zoals het was op een roodverschuiving van $z=14.2$, wat betekent dat het heelal op dat moment slechts 300 miljoen jaar oud was (ongeveer 2% van de huidige leeftijd). Desondanks is dit stelsel bijzonder helder en groot.

In hoofdstuk 4 presenteren we de succesvolle ALMA-waarneming van geïoniseerde zuurstof ([OIII]) in dit stelsel. Dit was een opmerkelijke ontdekking. Om zuurstof te kunnen waarnemen, moesten eerdere generaties sterren in het stelsel (die nagenoeg volledig bestonden uit waterstof en

helium) al in de kern zuurstof hebben geproduceerd, geëxplodeerd zijn, en dit zuurstof door het stelsel hebben verspreid. Onze detectie laat zien dat dit stelsel al opvallend rijk is aan “metalen” (astronomisch jargon voor elementen zwaarder dan helium). Dit bevestigt dat de evolutie van de eerste sterrenstelsels veel sneller verliep dan we voorheen voor mogelijk hielden.

In hoofdstuk 5 presenteren we vervolgonderzoek om nóg dieper naar de geheimen van GS-z14 te kijken. We scanden met ALMA langdurig naar de koolstoflijn [CII] (net als hoofdstuk 3) en koud stof, om zo te bepalen hoeveel koud gas (brandstof voor toekomstige sterren) er in het stelsel aanwezig is. Tot onze verbazing vonden we... niets. We registreerden uiterst lage bovengrenzen voor de hoeveelheid van dit koolstof.

Deze ‘non-detectie’ vertelt echter een cruciaal verhaal. De verhouding tussen de grote hoeveelheid zuurstof enerzijds, en het gebrek aan koolstof, koud stof en koud gas anderzijds, wijst op extreme omstandigheden in het stelsel. Uit onze modellen blijkt dat het gas in het stelsel niet alleen heel ijl is, maar ook blootstaat aan extreem intense, “harde” straling.

Dit is een interessante indicatie voor de feedback die we in de inleiding bespraken. Een mogelijke interpretatie is dat we GS-z14 waarnemen in een dynamische “post-outflow” fase. Er heeft onlangs een extreem heftige stervormingspiek (een starburst) plaatsgevonden. De energie en straling van deze pasgeboren, hete sterren, samen met de vele supernova’s, is zó krachtig geweest dat het koudere gas en het stof het stelsel uit zijn geblazen. Het lijkt er dus op dat dit sterrenstelsel een deel van zijn eigen stervormingsbrandstof aan het verdrijven of ioniseren is.

Conclusie

Dit proefschrift toont aan dat het vroege heelal allesbehalve een rustige plek was waar structuren langzaam vormkregen. Door vanuit een submillimeter perspectief te kijken, met ALMA als ons voornaamste instrument, zien we een uiterst dynamisch plaatje. De allereerste sterrenstelsels ontwikkelden zich in een ongekend hoog tempo, verrijkten zichzelf in korte tijd met zware elementen, produceerden massaal grote hoeveelheden kosmisch stof, én bliezen zichzelf leeg door de ongekende kracht van hun eigen ontluikende sterren. Deze ontdekkingen helpen ons te begrijpen hoe een oersoep van koud waterstofgas uiteindelijk evolueerde tot de majestueuze, gestructureerde sterrenstelsels – inclusief onze eigen Melkweg – die we vandaag de dag in het lokale heelal om ons heen zien.