



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Cold gas in distant galaxies

Boogaard, L.A.

Citation

Boogaard, L. A. (2021, February 25). *Cold gas in distant galaxies*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3147175>

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/1887/3147175>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/3147175> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Boogaard, L.A.

Title: Cold gas in distant galaxies

Issue date: 2021-02-25

Nederlandse samenvatting

Kort overzicht

De vorming en evolutie van sterrenstelsels wordt aangedreven door de vorming van nieuwe sterren uit koud gas. Waarnemingen van jonge sterren in verre sterrenstelsels in het vroege universum, zoals in het *Hubble Ultra Deep Field*, hebben laten zien hoe de kosmische dichtheid van de stervormingssnelheid evolueert. Maar, terwijl het *gevolg* van stervorming—de jonge sterren—met steeds meer detail in kaart is gebracht, blijft de *oorzaak*—het koude gas dat de brandstof is voor de stervorming—ongrijpbaar. Dit proefschrift presenteert een observationele studie van het koude interstellair medium van verre sterrenstelsels in het vroege universum, met behulp van de meest gevoelige submillimeter telescoop tot nu toe, de *Atacama Large Millimeter Array*, en nieuwe *integral-field* spectrografen, zoals de *Multi Unit Spectroscopic Explorer* op de *Very Large Telescope*. Het brengt de eigenschappen van stervormende sterrenstelsels en hun moleculaire gas in kaart en beschrijft de evolutie van de kosmische dichtheid van moleculair gas—*de brandstof voor stervorming*.

Uitgebreide samenvatting

Van gevolg naar oorzaak

Het is bijna honderd jaar geleden dat Edwin Hubble aantoonde dat sommige ‘nevels’ in feite aparte *sterrenstelsels* zijn; eilanden van sterren die op grote afstand staan van het sterrenstelsel waar onze Zon zich in bevindt, de *Melkweg*. Een sterrenstelsel zoals de Melkweg bevat miljarden sterren. Tussen de sterren in een sterrenstelsel bevindt zich gas en stof, dat het *interstellair medium* wordt genoemd. Sterrenstelsels kunnen grofweg worden onderverdeeld in twee categorieën: *stervormende* sterrenstelsels, met veel gas, en *passieve* sterrenstelsels, met weinig gas. Het gas bestaat voornamelijk uit waterstof en helium, dat verrijkt is met zwaardere elementen die zijn gevormd door kernfusie in de kernen van sterren. Het gas kan worden verhit (bijvoorbeeld door sterlicht) en afkoelen, en zich op die manier in verschillende fasen bevinden. In de koudste fase, waar individuele waterstofmoleculen (H) zich kunnen binden en moleculair waterstof (H₂) vormen, kunnen wolken van gas ineensorten onder de zwaartekracht en zo nieuwe sterren vormen. Het koude gas in sterrenstelsels is dus de *brandstof voor stervorming*.

Dat het heelal gevuld is met sterrenstelsels wordt op een prachtige manier zichtbaar in de *Ultra Deep Field* opname van de *Hubble* ruimtetelescoop, die te zien is in Figuur 1.1 in hoofdstuk 1. Door dagenlang naar hetzelfde deel van de nachtelijke hemel te staren, wordt langzaam het zwakke licht zichtbaar dat is uitgezonden door verre sterrenstelsels, op een moment waarop het heelal nog veel minder oud was. Metingen aan onder andere de *kosmische achtergrondstraling* hebben laten zien dat het uitdijende heelal nu ongeveer 13.8 miljard jaar oud is en in het begin gevuld was met gas van een hoge temperatuur en dichtheid, tijdens wat de *big bang* wordt genoemd. Een van de grote vragen in de moderne sterrenkunde is hoe de sterrenstelsels sinds dit begin zijn gevormd en geëvolueerd tot de diverse populatie die we vandaag de dag zien.

De vorming en evolutie van sterrenstelsels is een complex fenomeen, met processen die werken op uiteenlopende afstanden en tijdschalen. Aan de ene kant vormen individuele groepen sterren zich gedurende miljoenen jaren diep in het koude interstellair medium, op schalen die veel kleiner zijn dan een enkel sterrenstelsel. Aan de andere kant duurt de opbouw van de populatie van sterren miljarden jaren en moet het gas dat hiervoor nodig is afkoelen en van grote afstanden in het sterrenstelsel vallen. Door de lange tijdschalen kan de vorming en evolutie van sterrenstelsels dan ook niet direct door de mensheid worden bestudeerd. In plaats daarvan maakt men gebruik van het feit dat het licht dat wordt uitgezonden door verre sterrenstelsels naar ons toe reist met de snelheid van het licht en dus tijd nodig heeft om onze telescopen te bereiken. We zien sterrenstelsels nu dus zoals ze eruit zagen in het verleden. Door de uitdijing van het heelal wordt de golflengte van dit licht onderweg langer en het licht daardoor roder. Door precieze metingen van dit effect, dat de *roodverschuiving* wordt genoemd, kan nauwkeurig de afstand tot verre sterrenstelsels worden bepaald en daarmee het tijdstip in het verleden dat ze hun licht uitzonden. Met deze informatie kan de evolutie van sterrenstelsels worden bestudeerd, door de hele populatie van sterrenstelsels op verschillende momenten in het verleden op een statistische manier met elkaar te verbinden en te vergelijken.

Een van de centrale vraagstukken binnen het vakgebied van de vorming en evolutie van sterrenstelsels is waar, wanneer en onder welke omstandigheden de sterren in sterrenstelsels zijn gevormd. Uitgebreide waarnemingcampagnes met verschillende telescopen (zoals het *Hubble* Ultra Deep Field), theoretisch ondersteund door grote computersimulaties, hebben hierover heel veel aan het licht gebracht in de afgelopen jaren. Het *gevolg* van de stervorming—de mate waarin sterrenstelsels groeien—is steeds gedetailleerder in kaart gebracht. Daarentegen is kennis van de *oorzaak*—het koude gas dat de brandstof is voor de stervorming—beperkt gebleven. Dit komt omdat koud gas moeilijk te meten is in verre sterrenstelsels. De aanleiding voor dit proefschrift zijn de recente technologische ontwikkelingen, in de vorm van nieuwe telescopen en instrumenten, die het mogelijk maken om het koude gas in verre sterrenstelsels in ongekend detail te meten.

De instrumenten

De eerste telescoop die een belangrijke rol speelt is de *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA), die in 2011 in gebruik is genomen. ALMA is een radio-interferometer, die bestaat uit 66 individuele telescopen (antennes) variërend van 7 tot 12 meter in diameter, die samen één gedetailleerd en gevoelig beeld vormen. Deze antennes staan verspreid over het Chajnantor-plateau, op meer dan 5000 meter hoogte in de Atacama woestijn in Chili. Het ongekende formaat van de telescoop in combinatie met het droge klimaat en de hoogte (wat minder versturende atmosfeer tussen de telescoop en de ruimte betekent) stellen ALMA in staat om het zwakke signaal van koud gas en stof in verre sterrenstelsels te meten; straling die de aarde bereikt met golflengten van iets minder dan een millimeter.

De tweede telescoop is de *Very Large Telescope* (VLT) in Paranal, Chili, en dan specifiek het instrument MUSE (*Multi Unit Spectroscopic Explorer*) dat in 2014 in gebruik is genomen. MUSE is een *integral-field* spectrograaf die het zichtbare licht dat op elke pixel valt uiteen breekt in alle kleuren van de regenboog. Op deze manier kan een driedimensionale opname worden gemaakt (zie voor een voorbeeld Figuur 1.5). Hieruit kunnen kenmerken van het hete gas en het sterlicht kunnen worden gemeten, die gebruikt worden om de eigenschappen van het sterrenstelsel en de roodverschuiving, en dus de afstand, te meten. MUSE is dusdanig efficiënt dat uit de waarnemingen van het *Hubble* Ultra Deep Field tien keer zoveel roodverschuivingen konden worden gemeten dan eerder bekend waren.

Naast *Hubble* en de bovengenoemde telescopen worden in dit proefschrift nog een reeks aan andere telescopen en instrumenten gebruikt. Onder andere de ruimtetelescopen *Chandra*, *Spitzer* en *Herschel*, en nabij-infrarood spectrografen ‘op de grond’, zoals de *K-band Multi Object Spectrograph* (KMOS) op de VLT en de *Multi-Object Spectrometer For Infra-Red Exploration* (MOSFIRE) op de Keck telescoop in Hawaï. Samen geven deze instrumenten een volledig beeld van het licht dat sterrenstelsels uitzenden. Hieruit kunnen vervolgens de eigenschappen van sterrenstelsels worden afgeleid, zoals de totale massa in sterren, de snelheid waarmee nieuwe sterren gevormd worden, de mate waarin het gas verrijkt is met zwaardere elementen (het *metaalgehalte*⁵²), en de mogelijke aanwezigheid van een sterk stralingsveld afkomstig

⁵²In de sterrenkunde wordt naar alle elementen zwaarder dan waterstof en helium (de twee elementen die samen > 99% van het kosmische massabudget bevatten) verwezen als ‘metalen’. De massafractie van metalen in een bepaalde omgeving wordt het metaalgehalte of de *metalliciteit* genoemd.

van het gas rondom een superzwaar zwart gat. Deze eigenschappen zijn essentieel voor het interpreteren van de metingen aan het koude gas.

Recente resultaten

Onderzoek naar de vorming van sterren in verre sterrenstelsels heeft laten zien dat er 10 miljard jaar geleden ongeveer acht keer meer sterren in het heelal werden gevormd dan vandaag de dag (zie ook Figuur 1.6, dat de kosmische dichtheid van de stervormingssnelheid als een functie van de tijd laat zien). Een belangrijk vraag is wat dit ons leert over het proces van stervorming in sterrenstelsels: was stervorming efficiënter in verre sterrenstelsels in het vroege universum, of hadden ze bijvoorbeeld meer (koud) gas tot hun beschikking?

Voor individuele sterrenstelsels is er een verband waargenomen tussen de totale massa in sterren (alle sterren die tot nu toe gevormd zijn) en het aantal sterren dat nieuw gevormd wordt (de stervormingssnelheid). Dit verband wordt ook wel de *hoofdreeks van stervormende sterrenstelsels* genoemd.⁵³ Belangrijke vragen in deze context betreffen de oorzaak van dit verband, of het ook stand houdt voor sterrenstelsels met een hele lage massa en in hoeverre dit verband samenhangt met de hoeveelheid gas in sterrenstelsels.

Metingen met ALMA en andere telescopen hebben in de afgelopen jaren steeds meer bewijs verzameld voor een scenario waarin de hoeveelheid gas in stervormende sterrenstelsels groter was in het verleden dan in huidige stelsels. Omdat deze metingen zelfs op de grootste telescopen veel tijd kosten, zijn ze voornamelijk uitgevoerd door het gericht waarnemen van sterrenstelsels die verwacht worden (veel) gas te bevatten op basis van hun (stervormende) eigenschappen. Deze waarnemingen geven daarom een onvolledig beeld van welke stelsels daadwerkelijk het meeste koude gas bevatten en de totale hoeveelheid koud gas in het heelal. Om een volledig beeld te krijgen zijn metingen nodig van de totale hoeveelheid koud gas in het heelal, of een representatief deel daarvan, tot een voldoende gevoelige limiet.

ALMA Spectroscopic Survey of the Hubble Ultra Deep Field

De *ALMA Spectroscopic Survey of the Hubble Ultra Deep Field* (ASPECS) is een driedimensionaal waarneemprogramma met ALMA, met als doel om de totale hoeveelheid koud gas in het heelal door de tijd heen te meten. Het is het eerste grote waarneemprogramma dat is toegekend aan extragalactische studies en beslaat in totaal 150 uur aan telescooptijd.

Omdat het koude H_2 gas dat betrokken is bij de stervorming zelf geen straling uitzendt moeten andere *tracers* van dit gas worden waargenomen. Een van de beste kandidaten hiervoor is koolstofmonoxide (CO), dat straling uitzendt op specifieke submillimeter golflengten (de zogenaamde rotationele overgangen) die niet worden tegengehouden door de aardse atmosfeer en dus goed waarneembaar zijn met een telescoop (Figuur 1.2). De mate waarin de hogere rotationele energieniveaus van CO aangeslagen worden (de CO *excitatie*) is afhankelijk van de temperatuur en de dichtheid van het gas (Figuur 1.3). De verhouding tussen CO en de totale massa van het koude gas is daarnaast onder andere afhankelijk van het metaalgehalte. Kennis van de eigenschappen van de sterrenstelsels is dus essentieel om hun massa in koud

⁵³Deze term is afgeleid van de *hoofdreeks* van sterren in het Hertzsprung-Russell diagram die in hun kern waterstof fuseren tot helium; al is deze parallel te betwisten (zie ook voetnoot 11).

gas te bepalen. Het *Hubble* Ultra Deep Field is om onder andere deze reden uitgekozen als het ideale doelwit voor ASPECS, aangezien het door meeste grote telescopen uitgebreid is (en wordt) bestudeerd.

ASPECS is zo opgezet dat het een volledige scan van het frequentiebereik uitvoert (in twee verschillende frequentiebanden) en is op deze manier gevoelig voor alle straling van CO in het kosmische volume (zie Figuur 1.7), zonder van te voren specifieke sterrenstelsels uit te kiezen. Het product van de waarnemingen zijn twee *datakubussen*, te zien in Figuur 1.10, met als assen de positie aan de hemel en de frequentie (die zich, via de roodverschuiving, vertaalt tot afstand). Tegelijkertijd geven deze kubussen ook de gevoeligste metingen van het koude stof in verre sterrenstelsels tot nu toe (Figuur 1.8). De analyse van het signaal van het koude gas (en ook het stof) uit deze data, en de conclusies die we hieruit kunnen trekken over het koude gas in verre sterrenstelsels, zijn het onderwerp van dit proefschrift.

Dit proefschrift

Dit proefschrift presenteert een reeks aan studies van het koude gas in verre sterrenstelsels in het *Hubble* Ultra Deep Field, mogelijk gemaakt door gevoelige waarneemprogramma's met MUSE en ALMA, in het bijzonder ASPECS. De hoofdstukken hebben de volgende onderwerpen.

Hoofdstuk 1 bevat de inleiding en achtergrondinformatie bij het proefschrift, en stelt de centrale vraagstelling aan de orde: hoe evolueert het koude interstellair medium van sterrenstelsels met de (kosmische) tijd, in relatie tot hun stervormende eigenschappen, en hoe dicteert dit de evolutie van sterrenstelsels?

Hoofdstuk 2 bestudeert allereerst de 'hoofdreeks' van stervormende sterrenstelsels. Het richt zich specifiek op sterrenstelsels met de laagste massa, die een fundamentele rol spelen in de groei van sterrenstelsels, maar nog niet uitgebreid bestudeerd zijn. Hiervoor gebruiken we nauwkeurig gemeten stervormingssnelheden voor alle sterrenstelsels (tot een bepaalde fluxlimiet) in combinatie met een nieuw-ontwikkeld, Bayesiaans statistisch model om tegelijkertijd de intrinsieke spreiding in de populatie te meten. Het resultaat dat de intrinsieke spreiding van stervormingssnelheden groter is dan voor massievere stelsels, kan verklaard worden door sterkere fluctuaties in de stervormingssnelheid van lage-massa stelsels met de tijd. Daarnaast vinden we een discrepantie met computersimulaties, die erop wijst dat modellen van *feedback* in lage-massa stelsels nog onvolledig zijn.

Hoofdstuk 3 verschuift de focus naar het koude gas. Dit hoofdstuk beantwoordt in zekere zin de meest simpele vraag die men kan stellen bij een waarneemprogramma zoals ASPECS: wat is de aard en wat zijn de fysieke eigenschappen van de sterrenstelsels waarin koud gas (via CO) gedetecteerd wordt? We identificeren alle emissie als roodverschoven CO lijnen, uitgezonden door koud gas in sterrenstelsels die zichtbaar zijn met *Hubble*. Met behulp van MUSE laten we zien dat de stelsels een gelijkaardig metaalgehalte hebben aan de Zon, wat ons in staat stelt om de CO emissie te vertalen naar de totale massa in koud gas. De resultaten laten zien dat ASPECS het moleculaire gas in de meeste massieve, stervormende sterrenstelsels rond 10 miljard jaar geleden in kaart brengt. De lage stervormingssnelheid van sommige stelsels waarin wel een significant reservoir van koud gas is gemeten laat zien dat eerdere waarnemingen een deel van de gasrijke populatie hebben gemist.

Hoofdstuk 4 bestudeert vervolgens de fysische condities in het koude interstellair medium van de sterrenstelsels die gedetecteerd zijn door ASPECS, door middel van hun CO excitatie en de emissie van neutraal koolstof en van koud stof. Door de waarnemingen van ALMA te combineren met waarnemingen van de *Very Large Array* (New Mexico, VS), meten en voorspellen we (met behulp van modellen) de gemiddelde excitatie van CO in verschillende overgangen. Voor CO blijkt dat de excitatie, en dus de gemiddelde dichtheid en temperatuur van het koude medium, afneemt met de tijd (toeneemt met roodverschuiving). Tegelijkertijd laten de ASPECS-stelsels een lagere excitatie zien dan eerdere waarnemingen van optisch- en submillimeter-geselecteerde stelsels op vergelijkbare roodverschuiving. Beide fenomenen kunnen worden verklaard door een lagere (oppervlakte)dichtheid van de stervormingssnelheid in deze sterrenstelsels, ten opzichte van eerder waargenomen sterrenstelsels.

Hoofdstuk 5: Voortbouwend op de resultaten van hoofdstukken 3 en 4 komen alle aspecten in dit hoofdstuk samen, waar een inventarisatie en statistische analyse van het signaal van alle emissielijnen in de ASPECS data wordt uitgevoerd. We combineren de noodzakelijke informatie over de roodverschuiving en het metaalgehalte (hoofdstuk 3) met de kennis over de CO excitatie en de condities in het gas (hoofdstuk 4) om de kosmische dichtheid van moleculair gas te bepalen. Het centrale resultaat is dat deze toeneemt met tijd, tot een piek rond 9,5 miljard jaar geleden, en daarna afneemt tot vandaag de dag, vergelijkbaar met de kosmische dichtheid van de stervormingssnelheid. Dit impliceert dat de toename en afname van de kosmische dichtheid van de stervormingssnelheid inderdaad gerelateerd is aan de toename van de hoeveelheid gas in sterrenstelsels, en dat de tijdschaal waarop het gas verbruikt wordt grofweg constant is met roodverschuiving, gemiddeld genomen over de hele populatie van sterrenstelsels.

Hoofdstuk 6: In dit laatste hoofdstuk brengen we ASPECS nog één stap verder. Voor sterrenstelsels die worden gezien op het moment dat het heelal slechts 1,5 à 2 miljard jaar oud is, meet MUSE de roodverschuiving door middel van de Lyman α lijn van waterstof. Deze lijn wordt verstrooid door gas dat uit sterrenstelsels vloeit en kan daardoor licht verschoven zijn ten opzichte van het sterrenstelsel zelf. Door waarnemingen te doen met KMOS en MOSFIRE bepalen we precieze roodverschuivingen voor een deel van deze sterrenstelsels. Deze worden vervolgens gebruikt om het signaal van het koude gas en stof te combineren en zo gemiddeld zwakkere signalen te kunnen meten. De resultaten laten zien dat het gas en stof in deze vroege stelsels zeer moeilijk te detecteren is, omdat het metaalgehalte nog heel laag is. Tot slot worden daarom enkele andere methoden besproken waarmee het gas in deze verre sterrenstelsels kan worden gemeten.