



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Measuring gold molecular gas across cosmic time

Frias Castillo, M.

### Citation

Frias Castillo, M. (2024, June 20). *Measuring gold molecular gas across cosmic time*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3764659>

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/1887/3764659>

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

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

Als we op een heldere nacht omhoog kijken, zien we een witte band van sterren die de hemel doorkruist. Dat is de Melkweg, ons eigen sterrenstelsel. Het bevat ongeveer honderd miljard sterren, samen met andere componenten zoals gas, stof en donkere materie. Ons heelal bevat miljarden sterrenstelsels vergelijkbaar met de Melkweg. De ontdekking van andere sterrenstelsels is relatief recent en dateert iets meer dan een eeuw terug naar de baanbrekende onthulling van Edwin Hubble. Hij toonde aan dat zwakke ‘nevels’ die aan de hemel werden waargenomen, eigenlijk verre sterrenstelsels waren, miljoenen lichtjaren ver weg. Sterrenstelsels bevatten twee soorten materie: donkere en lichte materie. De eerste vormt eigenlijk het grootste deel van de materie in een sterrenstelsel, ongeveer 85%. Er is echter nog steeds veel discussie over wat donkere materie precies is, omdat het geen interactie vertoont met fotonen en we het dus niet rechtstreeks kunnen waarnemen met onze telescopen. Lichtgevende materie daarentegen, hoewel er minder van is, omvat de miljarden sterren, planeten, gas en stof binnen sterrenstelsels. Het gas en stof dat tussen de sterren is verspreid, vormt het interstellair medium (ISM).

Sterrenstelsels vallen in twee brede categorieën: stervormende sterrenstelsels, die heel snel sterren vormen en grote hoeveelheden gas hebben; en rustige sterrenstelsels, die een lage stervormingssnelheid hebben en meestal bijna geen gas meer over hebben. Het gas dat in sterrenstelsels wordt gevonden, bestaat voornamelijk uit waterstof, helium en sporen van zwaardere elementen. Bij de koudste temperaturen (ongeveer -220 graden Celsius) combineren twee waterstofatomen zich tot moleculaire waterstof ( $H_2$ ), dat onder invloed van zwaartekracht ineens stort om nieuwe sterren te vormen. Dit koude moleculaire gas dient dus als primaire brandstof voor stervorming in sterrenstelsels en speelt een cruciale rol in ons begrip van de vorming en evolutie van sterrenstelsels.

De evolutie van sterrenstelsels is echter een complex proces dat miljarden jaren omspant, op ruimtelijke schalen variërend van enkele tot honderdduizenden lichtjaren. Het is daarom niet mogelijk om veranderingen in een bepaald sterrenstelsel gedurende één mensenleven te bestuderen. In plaats daarvan maken we gebruik van de eindige snelheid van het licht om sterrenstelsels te observeren zoals ze in het verleden verschenen. Licht dat uit verre sterrenstelsels wordt uitgezonden, heeft tijd nodig om naar onze telescopen te reizen, waardoor we deze sterrenstelsels waarnemen zoals ze waren toen het licht aan zijn reis begon. Doordat het heelal voortdurend uitdijt, ondergaat licht dat door verre sterrenstelsels uitgezonden is een verschijnsel dat bekend staat als roodverschuiving, waardoor de golflengte ervan langer wordt en verschuift naar het ‘rode’ uiteinde van het spectrum. Deze

roodverschuiving ( $z$ ) kan nauwkeurig worden gemeten om de afstand tot een sterrenstelsel te bepalen, waardoor de tijd wordt onthuld die is verstreken sinds de emissie van het licht. Door grote hoeveelheden van sterrenstelsels op verschillende roodverschuivingen (dat wil zeggen in verschillende kosmische tijdperken) te observeren, kunnen we verschillende evolutionaire fasen verkennen en de paden onthullen die de sterrenstelsels hebben gevormd die we vandaag in ons lokale heelal waarnemen.

Een van de belangrijkste processen die veranderingen in sterrenstelsels teweegbrengen, is stervorming. Talloze onderzoeken uitgevoerd met telescopen zoals de Hubble Space Telescope, de Herschel Space Telescope en GALEX hebben waardevolle inzichten gegeven in de evolutie van de stervormingssnelheid van het heelal, met name tot  $z \sim 4$ , toen het heelal ongeveer 1,6 miljard jaar oud was. Er is de afgelopen jaren ook een parallelle inspanning geleverd om vast te stellen hoe de gasinhoud in sterrenstelsels met de tijd verandert. De resultaten van dit onderzoeken suggereren dat er een nauwe verbinding is tussen het beschikbare moleculaire gas in sterrenstelsels en hoeveel sterren er gedurende een bepaald kosmisch tijdperk worden gevormd. Het waarnemen van koud gas is echter een uitdagende taak, vooral in verre sterrenstelsels. Om licht uit te zenden, hebben  $\text{H}_2$ -moleculen specifieke omstandigheden nodig, zoals hoge temperaturen of nabijgelegen energieke bronnen, die niet altijd aanwezig zijn waar het meeste koude moleculaire gas zich in een sterrenstelsel bevindt. Om deze uitdaging te overwinnen, kunnen we afleiden hoeveel  $\text{H}_2$  er in een sterrenstelsel in het lokale heelal is door de emissie te observeren die afkomstig is van de eerste geëxciteerde toestand van het koolmonoxidemolecuul,  $\text{CO}(1-0)$ . Bij hogere roodverschuivingen wordt deze emissie echter te zwak, wat vaak heeft geleid tot het gebruik van alternatieve methoden. De interpretatie van resultaten die gebruik maken van deze alternatieve methoden is lastiger door de systematische onzekerheden van deze methoden, die mogelijk van invloed zijn op onze modellen van de evolutie van sterrenstelsels.

## Radio-interferometers

De atomen en moleculen die het gas in sterrenstelsels vormen, zenden straling uit in submillimetergolflengten. Om ze te observeren, is het noodzakelijk om radio-interferometers te gebruiken. Dit zijn arrays van antennes die over een groot gebied zijn verspreid en samen functioneren als één telescoop wanneer hun signalen worden gecombineerd. Radio-interferometers worden meestal op grote hoogte geplaatst om atmosferische verstoringen te beperken. In dit proefschrift hebben we gebruikgemaakt van de Karl J. Jansky Very Large Array (JVLA) in New Mexico, de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) in de Atacama-woestijn, Chili, en de Northern Extended Millimeter Array (NOEMA) in de Franse Alpen. Deze instrumenten, werkend op golflengten net korter dan één millimeter, zijn in staat om zwakke signalen van koud gas in verre sterrenstelsels te detecteren.

De meest voor de hand liggende objecten om de zwakke  $\text{CO}(1-0)$ -emissie in te detecteren zijn de zeer stoffige, sterk stervormende sterrenstelsels die bekend staan als submillimetersterrenstelsels (SMG's, vanwege de golflengte waarbij ze voor het

eerst werden ontdekt). Echter, om koud gas in een sterrenstelsel waar te nemen, is het noodzakelijk om hun afstand of roodverschuiving te weten. Er zijn twee manieren om de roodverschuiving te berekenen: fotometrisch en spectroscopisch. Fotometrische roodverschuivingen worden afgeleid door de gemiddelde helderheid van een sterrenstelsel over een vast golflengtebereik te meten en een passend emissiemodel te vinden om de roodverschuiving te bepalen. Dit betekent dat fotometrische roodverschuivingen goedkoper zijn om te verkrijgen voor grote aantallen van sterrenstelsels, hoewel ze zeer onzeker zijn. Spectroscopische roodverschuivingen daarentegen vergen meer tijd maar zijn meer betrouwbaar in vergelijking tot fotometrische methoden. Ze vereisen het observeren van de emissie die afkomstig is van een sterrenstelsel over een continu bereik in frequentie, totdat een of meer emissielijnen worden gedetecteerd en geïdentificeerd. Als gevolg daarvan hebben slechts een beperkt aantal SMG's bevestigde spectroscopische roodverschuivingen. Recente onderzoeken met ALMA en NOEMA hebben zich gericht op enkele honderden SMG's in uitgebreid bestudeerde hemelgebieden, waardoor de groep van SMG's waar we nu CO(1-0)-emissie kunnen waarnemen, is uitgebreid.

## Dit Proefschrift

In dit proefschrift maken we gebruik van de grote gevoeligheid van de meest geavanceerde radio-interferometers om moleculair gas te detecteren en meten met de meest gebruikte gas-tracer: de overgang van de grondtoestand van koolmonoxide. **Hoofdstuk Een** introduceert de huidige stand van zaken in het vakgebied en verstrekt de nodige achtergrondinformatie voor de daaropvolgende hoofdstukken.

**Hoofdstuk Twee** presenteert enkele van de meest gevoelige waarnemingen van CO(1-0) in een stoffig, stervormend sterrenstelsel op  $z = 3.4$ , toen het heelal slechts 1,8 miljard jaar oud was. De verdeling van het gas is nogal verstoord en geconcentreerd in twee gebieden gescheiden door  $\sim 11$  kpc, wat suggereert dat het twee sterrenstelsels zijn die in het proces zijn om samen te voegen. Het sterrenstelsel vormt zeer snel sterren en zal binnenkort zijn gasreservoir uitputten en rustig worden. We stellen voor dat we de laatste stadia van het samenvoegingsproces observeren, wat snelle veranderingen in de fysieke eigenschappen van het sterrenstelsel veroorzaakt.

In **Hoofdstuk Drie** onderzoeken we de aanwezigheid van koud moleculair gas in quasars, een type sterrenstelsel met een actief zwart gat in het midden, die niet bedekt zijn door stof. Hoewel voorgelegd dat de energie-input van het zwarte gat het gas uit het sterrenstelsel zou verdrijven, vinden we dat 70% van de waargenomen sterrenstelsels nog steeds massieve moleculaire gasreservoirs behouden. Ze vormen echter ook zeer snel sterren, wat betekent dat ze al het gas snel zullen gebruiken en passieve, 'dode' sterrenstelsels zullen worden. We tonen aan dat kosmologische simulaties van de evolutie van sterrenstelsels nog steeds niet in staat zijn om dergelijke hoge stervormingssnelheden te reproduceren.

**Hoofdstuk Vier** presenteert de eerste resultaten van een grootschalig onderzoek op het koude moleculaire gas in 30 stoffige, stervormende sterrenstelsels met de JVLA tijdens een periode die bekend staat als 'Cosmic Noon' (2-4 miljard jaar na de oerknal). We vinden dat het gas een breed scala aan excitatiecondities ver-

toont, hoewel deze niet lijken af te hangen van enige fysieke eigenschappen van de sterrenstelsels die we bestuderen, zoals roodverschuiving of stervormingssnelheid. We tonen aan dat computersimulaties van sterrenstelsels grote vooruitgang hebben geboekt in het modelleren en voorspellen van de hoeveelheid gas aanwezig in deze massieve, stoffige sterrenstelsels.

**Hoofdstuk Vijf** presenteert waarnemingen van atomaire koolstof ( $[C\text{I}]$ ) en stof van een subset van de 30 sterrenstelsels van het JVLA-onderzoek. Door ze te combineren met de  $\text{CO}(1-0)$ -waarnemingen, dat de standaard tracer is van koud moleculair gas, kunnen we de omrekeningscoëfficiënten beter vaststellen die nodig zijn om ook  $[C\text{I}]$  en stof als gas-tracers te gebruiken. We berekenen gasmassa's met behulp van drie tracers die goed overeenkomen met elkaar, wat het gebruik van  $[C\text{I}]$  ondersteunt om gasmassa's in het verre heelal te meten. We benadrukken echter het belang van het maken van consistente aannames om uiteindelijke massa's te berekenen met de drie tracers. Tot slot onderzoeken we hoe de warmere straling van de Kosmische Achtergrondstraling op het moment waarop de sterrenstelsels worden waargenomen, ons vermogen beïnvloedt om de totale flux die door het sterrenstelsel wordt uitgezonden, te meten. Hoewel dit effect meer uitgesproken is bij koudere gastemperaturen, blijft de detectie ervan uitdagend met de momenteel beschikbare waarnemingen.