



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## A radio view of dust-obscured star formation

Vlugt, D. van der

### Citation

Vlugt, D. van der. (2023, December 6). *A radio view of dust-obscured star formation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3665936>

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/1887/3665936>

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

# Nederlandse samenvatting

Pas een paar honderd miljoen jaar na de *Big bang* – het ontstaan van het universum dat ongeveer 13 miljard jaar geleden plaatsvond – vormden zich de eerste sterren en sterrenstelsels. De basis voor het ontstaan van deze sterrenstelsels werd echter al kort na de Big Bang gelegd. Het begrijpen van de vorming van sterren en sterrenstelsels is complex en uitdagend. Dit omdat deze processen sterk variëren in zowel grootte als tijd. De formatie van een sterrenstelsel vindt plaats op veel grotere schaal dan de vorming van een groep sterren. Bovendien duurt het miljoenen jaren om een populatie sterren op te bouwen met de grootte van een sterrenstelsel. Het gas waar de sterren van gevormd worden moet namelijk eerst afkoelen en van grote afstanden op het sterrenstelsel vallen. Omdat de evolutie van een sterrenstelsel niet in werkelijke tijd gevolgd kan worden, wordt gebruik gemaakt van de eindige lichtsnelheid. Het licht dat wordt uitgezonden door sterrenstelsels heeft namelijk veel tijd nodig om onze telescopen op grote afstand van deze sterrenstelsels te bereiken. Wij zien de sterrenstelsels dus zoals ze waren toen het licht werd uitgezonden. Bovendien wordt de golflengte van het uitgezonden licht langer door de uitdijning van het heelal. Hoe groter de afstand die het door sterrenstelsels uitgezonden licht naar zijn waarnemers moet afleggen, hoe roder dit licht wordt. Dit effect heet *roodverschuiving* ( $z$ ) en is meetbaar. Aan de hand van de roodverschuiving kan de afstand tot een sterrenstelsel, en dus de tijd waarop het licht werd uitgezonden, precies bepaald worden. Door verschillende sterrenstelsels waar te nemen op verschillende momenten in hun evolutie en tijdens verschillende kosmische perioden proberen we om de ontwikkelingen van sterrenstelsels te beschrijven en aan elkaar te verbinden.

Sterren zijn het meest zichtbare onderdeel van sterrenstelsels en kunnen gebruikt worden om te bestuderen hoe sterrenstelsels zich ontwikkelen. Sterren worden geboren uit moleculaire wolken en de snelheid waarmee ze worden gevormd, de *ster-vormingssnelheid*, is een cruciale parameter die gebruikt wordt om de evolutie van sterrenstelsels te beschrijven. Omdat sterren in sterrenstelsels die zich op grote afstand bevinden niet afzonderlijk kunnen worden waargenomen, zijn er geavanceerde technieken nodig om de vorming van deze sterren te meten. Om zoveel mogelijk informatie te vergaren wordt niet enkel optisch licht, maar ook licht dat wordt uitgezonden op andere golflengten zoals ultraviolet, lage energie infrarood, millimeter en radiogolflengten gebruikt. Ultraviolet licht wordt uitgezonden door jonge, zware sterren. Dit golflengtebereik van het spectrum kan daarom gelinkt worden aan sterrenstelsels die actief sterren vormen. Stof verduistert ultraviolet licht en verhult daarmee een deel van de stervorming. Ook kunnen de meest heftig *stervormende sterrenstelsels* er donker uitzien op ultravioletgolflengten waardoor deze sterrenstelsels niet direct waargenomen worden in ultravioletwaarnemingen. Het verduisterende stof wordt verhit door de jonge, zware sterren en zendt het geabsorbeerde licht opnieuw uit op (langere) infraroodgolflengten. Aan de hand van die infraroodwaarnemingen kan dus de met stof verhulde stervorming bepaald worden. Op hun beurt hebben infraroodmetingen echter ook eigenschappen die het vermogen om accuraat de stervorming

te bepalen beperken. Infrarood telescopen missen bijvoorbeeld de gevoeligheid om sterrenstelsels waar te nemen in het jonge heelal. Door de slechtere resolutie worden sterrenstelsels niet scherp waargenomen waardoor sommige sterrenstelsels mogelijk niet meer te onderscheiden zijn. Aardse submillimeter/millimeter continue waarnemingen hebben een hogere resolutie en kunnen helpen om dit probleem van vermenigving op te lossen. Millimeter waarnemingen kunnen echter slechts een klein deel van de hemel waarnemen waardoor veel dure waarnemingen nodig zijn om het probleem van kosmische variantie te ondervangen. Waarnemingen op radiogolflengten hebben daarentegen geen last van het verduisterende stof en zijn bovendien in hoge resolutie. Ook nemen ze over het algemeen een groot deel van de hemel waar. Omdat radiowaarnemingen een alternatieve manier bieden om de stervorming in sterrenstelsels te bestuderen, vormen zij het hoofdonderwerp van dit proefschrift.

## Stervorming bepalen met radiowaarnemingen

Om de stervorming in sterrenstelsels te bepalen wordt in dit proefschrift gebruik gemaakt van radiowaarnemingen van de *Very Large Array* (VLA) in New Mexico in de Verenigde Staten. De VLA is een *interferometer* bestaande uit 27 antennes waarmee de hoge resolutie en de gevoeligheid bereikt kunnen worden die nodig zijn om stervorming in sterrenstelsels op hoge roodverschuiving te kunnen bestuderen. Radiostraling afkomstig van stervormende sterrenstelsels bestaat uit twee componenten die gerelateerd zijn aan stervorming: *remstraling* and *synchrotronstraling*. Remstraling komt direct van jonge, massieve sterren; synchrotronstraling daarentegen komt voort uit de overblijfselen van *supernova's* ontstaan door de dood van deze jonge, massieve sterren. Omdat remstraling gekenmerkt wordt door een lagere flux dan synchrotronstraling, is het isoleren van deze straling en het meten van de bijbehorende fluxdichtheid lastig. Synchrotronstraling kan daarom beter gebruikt worden om stervorming te bepalen. Wel is het bij het bestuderen van stervorming met behulp van radiowaarnemingen belangrijk om te verifiëren dat de radio-emissie daadwerkelijk door sterren geproduceerd wordt. Synchrotronstraling kan namelijk ook geproduceerd worden door *superzwarte zwarte gaten* die materie accrediteren. Deze zwarte gaten die zich in het midden van sterrenstelsels bevinden, worden ook wel *actieve sterrenstelsels* genoemd.

De roodverschuivingen van waargenomen radiobronnen zijn essentieel voor het meten van de evolutie van de stervormingssnelheid als functie van tijd. Het radiospectrum kan echter niet op zichzelf gebruikt worden om de roodverschuiving te achterhalen. Dit omdat de machtsfunctie die dit spectrum beschrijft geen kenmerken heeft. Door metingen op meerdere golflengtes – van *fotometrische* of *spectroscopische* waarnemingsprogramma's – te gebruiken, kunnen de roodverschuivingen van radiobronnen vastgesteld worden. Fotometrische waarnemingsprogramma's meten de gemiddelde helderheid van een sterrenstelsel over een vaste golflengteband, met een enkel meetpunt per band. Het verkrijgen van fotometrische roodverschuivingen is daardoor relatief goedkoop en de waarnemingen beslaan bovendien een groter deel van de hemel. Wel zijn verkregen fotometrische roodverschuivingen minder precies dan spectroscopische, die het spectrum van een sterrenstelsel op hoge resolutie meten. Al-

hoewel spectroscopische waarnemingsprogramma's veel tijd kosten en daardoor kostbaarder zijn, zijn spectroscopische roodverschuivingen dus beduidend betrouwbaarder dan fotometrische. Om spectroscopische roodverschuivingen te verkrijgen voor radiobronnen met fotometrische roodverschuivingen kan gebruik worden gemaakt van de straling die koolstofmonoxide (CO) uitzendt. CO is het tweede meest voorkomende molecuul in het gas en stof dat zich bevindt tussen de sterren in een sterrenstelsel, het *interstellair medium*. De rotationele overgangen van CO worden op lage temperaturen aangeslagen waardoor CO zelfs in koude moleculaire wolken makkelijk wordt aangeslagen en straling uitzendt. Deze straling wordt uitgezonden op specifieke submillimeter golflengten. De *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) in de Atacama woestijn in Chili is een interferometer bestaande uit 66 antennes die door haar golflengtebereik en gevoeligheid gebruikt kan worden voor het waarnemen van deze CO-overgangen. Met ALMA kunnen dus de zo cruciale spectroscopische roodverschuivingen van gas- en/of stofrijke bronnen op hoge roodverschuiving verkregen worden.

Wanneer de radiohelderheid van een groep radiobronnen enkel voortkomt uit stervorming en de roodverschuiving van deze bronnen bekend is, kunnen zij gebruikt worden om de evolutie van stervorming gedurende de geschiedenis van het heelal vast te stellen. Radiowaarnemingen stellen ons in staat om zowel recente stervorming als de meest extreem stervormende sterrenstelsels gehuld in stof te bestuderen. Zij zijn daarom erg waardevol. Toch is het niet geheel triviaal om radiowaarnemingen te gebruiken voor het vaststellen van de stervormingssnelheid. De eerdergenoemde fysische processen die ertoe leiden dat supernova overblijfselen uiteindelijk synchrotronstraling uitstralen zijn complex. Gelukkig biedt de zogenoemde *ver-infrarood-radio-correlatie* uitkomst. Deze correlatie beschrijft de link tussen de radio- en infraroodhelderheid van sterrenstelsels en is waargenomen voor veel verschillende typen sterrenstelsels en tot op hoge roodverschuiving. Omdat de ver-infraroodhelderheid evenredig is met stervorming, kan de ver-infrarood-radio-correlatie ons helpen om de synchrotonhelderheid te vertalen naar stervormingssnelheid.

Met behulp van de ver-infrarood-radio-correlatie kunnen radiowaarnemingen gebruikt worden om de evolutie van de stervormingssnelheid per eenheid van volume – de *kosmische dichtheid van stervormingssnelheid* – als functie van roodverschuiving te bestuderen. Deze parameter maakt inzichtelijk hoe stervorming globaal verloopt over kosmische tijd. Onderzoek toont aan dat ongeveer 10 miljard jaar geleden acht keer meer sterren werden gevormd in het universum dan vandaag de dag. Dit kan ook worden gezien in Figuur 1.4, dat de kosmische dichtheid van de stervormingssnelheid als een functie van roodverschuiving laat zien. De meeste studies die de kosmische dichtheid van stervormingssnelheid meten op hoge roodverschuiving maken echter gebruik van ultravioletwaarnemingen, een golflengte vatbaar voor verduistering door stof. In de eerste twee hoofdstukken van dit proefschrift beschrijven we onze radiowaarnemingen en hoe wij deze gebruiken als een indicator van de kosmische dichtheid van stervormingssnelheid. Deze radiowaarnemingen worden ook gebruikt om de zogenoemde ‘*optisch donkere*’ populatie waar te nemen. Deze extreem door stof omhulde bronnen zijn namelijk onzichtbaar voor zelfs de gevoeligste ultravioletwaarnemingen. De bijdrage van deze ‘optisch donkere’ bronnen aan de kosmische dichtheid van stervormingssnelheid is onderwerp van discussie: verschillende studies

vonden sterk uiteenlopende bijdragen. In hoofdstuk drie en vier stellen we vast wat de bijdrage van de uit onze radiowaarnemingen geselecteerde ‘optisch donkere’ bronnen is aan de kosmische dichtheid van stervormingssnelheid.

## Het COSMOS-XS waarnemingsprogramma

In dit proefschrift maken we gebruik van het gevoelige COSMOS-XS waarnemingsprogramma. Dit programma stelt ons in staat om de met stof verduisterde stervorming te bestuderen. Uitgevoerd met de verbeterde VLA biedt het enkele van de gevoeligste radiowaarnemingen tot nu toe op twee golflengten: 10 en 3 GHz (ofwel de X en S band). Deze radiowaarnemingen richtten zich op het COSMOS veld, een veld van  $2 \text{ deg}^2$  dat al vaak met behulp van verschillende toonaangevende instrumenten – zowel op aarde als in de ruimte – en op meerdere golflengtes onder de loep genomen werd. Door deze datasets te combineren hebben wij een unieke dataset gecreëerd waarmee zelfs de zwakste radiopopulaties bestudeerd kunnen worden. Het COSMOS-XS waarnemingsprogramma is daarbij een van de gevoeligste radiowaarnemingsprogramma’s tot nu toe. Het meet zwakke fluxdichtheden waarmee ‘normale’ sterrenstelsels kunnen worden waargenomen gedurende het tijdperk dat stervorming in het universum zo’n 10 miljard jaar geleden piekte. De analyse van het COSMOS-XS waarnemingsprogramma en de conclusies over de met stof verduisterde stervorming op hoge roodverschuiving zijn het onderwerp van dit proefschrift. De hoofdstukken worden hieronder samengevat.

## Dit proefschrift

In dit proefschrift presenteren we de waarnemingen gedaan binnen het VLA COSMOS-XS waarnemingsprogramma. Onze bevindingen geven een nieuw beeld van de met stof verduisterde stervorming. **Hoofdstuk Een** introduceert de huidige stand van zaken in het bredere vakgebied. Het biedt de nodige achtergrondkennis om de daaropvolgende hoofdstukken te begrijpen.

In **Hoofdstuk Twee** bespreken we het COSMOS-XS waarnemingsprogramma in detail en presenteren we de radiocatalogi van de geobserveerde radiobronnen. Het tellen van het aantal sterrenstelsels of, in andere woorden, het vaststellen van het aantal bronnen, is de eenvoudigst mogelijke statistische analyse. Hoewel dit waarnemingsprogramma door flux gelimiteerd is, geeft het aantal sterrenstelsels informatie over de evolutionaire eigenschappen van deze bronnen. De gevoelige waarnemingen op 10 en 3 GHz geven ons de mogelijkheid om het euclidische genormaliseerde bronnen-aantal tot zwakke fluxdichtheden vast te stellen. We laten zien dat onze waarnemingen consistent zijn met andere resultaten op 3 en 1.4 GHz binnen de onzekerheden maar dat we het bronnen-aantal tot zwakkere fluxdichtheden kunnen vaststellen dan vorige waarnemingen.

In **Hoofdstuk Drie** gebruiken we het COSMOS-XS waarnemingsprogramma om stervormende sterrenstelsels te selecteren met behulp van de ver-infrarood-radio-correlatie. Deze sterrenstelsels worden gebruikt om de radioverdelingsfunctie van

de helderheden van sterrenstelsels te bepalen. De verdelingsfunctie van helderheden laat de verdeling zien van de kosmische dichtheid van bronnen over verschillende klassenbreedten van helderheid. Deze functie kan gebruikt worden om de evolutie van stervormende sterrenstelsels vast te stellen. Wij presenteren bewijs voor significante evolutie van dichtheid over het geobserveerde roodverschuivingsbereik. We gebruiken de radioverdelingsfunctie van helderheden om de met stof verduisterde dichtheid van stervormingssnelheid te meten tot een roodverschuiving van  $z \sim 4.6$ . Het niet door stof gehinderde waarnemingsprogramma wordt ook gebruikt om te bewijzen dat de dichtheid van stervormingssnelheid wordt onderschat op hoge roodverschuiving door studies die zich baseren op de ultravioletverdelingsfunctie van helderheden.

In **Hoofdstuk Vier** verschuift de focus naar ‘optisch donkere’ sterrenstelsels. We gebruiken het 3 GHz radiobeeld waargenomen in het COSMOS-XS waarnemingsprogramma om deze bronnen te identificeren. Met de nieuwe ‘Super-deblended’ ver-infraroodcatalogus – gecreëerd door een innovatieve ‘deblending’ techniek die met elkaar vermengde bronnen ontwaart – achterhalen we de fotometrische roodverschuivingen van de ‘optisch donkere’ bronnen. De catalogus gebruikt de posities van de bronnen die waargenomen zijn met het COSMOS-XS waarnemingsprogramma als initiële informatie. We kunnen vaststellen dat de op de ‘Super-deblended’ catalogus gebaseerde ver-infrarood fotometrische roodverschuivingen tussen  $z = 2$  en  $z = 5$  liggen. Vervolgens stellen we vast hoeveel de ‘optisch donkere’ bronnen bijdragen aan de totale dichtheid van stervormingssnelheid met de methode beschreven in hoofdstuk drie. We kunnen concluderen dat deze bronnen een niet te verwaarlozen bijdrage hebben op hoge roodverschuiving.

Voortbouwend op de resultaten van hoofdstuk vier kunnen we in **Hoofdstuk Vijf** nieuwe ALMA waarnemingen van ‘optisch donkere’ bronnen presenteren. De ALMA waarnemingen geven een scan over het golflengtebereik van 84–108 GHz. Op deze manier zijn de waarnemingen gevoelig voor alle straling van CO in het kosmische volume zonder van te voren de specifieke CO-lijnen uit te kiezen. Met de ALMA scans kunnen we de spectroscopische roodverschuiving voor een kleine subgroep van 10 uit radiowaarnemingen geselecteerde ‘optisch donkere’ sterrenstelsels vaststellen. We vinden op CO gebaseerde roodverschuivingen die laten zien dat de uitgekozen ‘optisch donkere’ bronnen op roodverschuivingen liggen met  $z \gtrsim 3$ . We integreren de verdelingsfunctie van helderheden uit hoofdstuk vier tot de fluxlimiet die is gebruikt om de subgroep te selecteren en vinden zo dat de dichtheid van stervormingssnelheid overeenkomt met de dichtheid van stervormingssnelheid die werd gevonden voor de 10 met ALMA gedetecteerde ‘optisch donkere’ bronnen. Dit geeft aan dat deze bronnen van kosmisch belang zijn op hoge roodverschuiving.

