



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Distant star formation in the faint radio sky

Algera, H.S.B.

Citation

Algera, H. S. B. (2021, October 27). *Distant star formation in the faint radio sky*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3221280>

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/1887/3221280>

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

Samenvatting

Wanneer deze wordt waargenomen vanaf een donkere locatie op Aarde, lijkt de nachtelijke hemel te bestaan uit een langgerekte, witte wolk van sterren, zo ver als men kan zien. Deze verzameling sterren, plus een aantal andere ingrediënten die niet zo goed met het blote oog te zien zijn (kosmisch gas, stof en een mysterieuze substantie die we als donkere materie bestempelen), noemen we de *Melkweg*. Pas in de jaren '20 van de vorige eeuw beseften sterrenkundigen dat de Melkweg slechts één van een gigantisch aantal andere “Melkwegen” is. Onze Melkweg, evenals de vele soortgelijke objecten in het heelal, noemen we *sterrenstelsels*.

Al snel na het ontstaan van het helaal in de zogeheten *Oerknal*, die grofweg 13.8 miljard jaar geleden plaatsvond, vormden de eerste sterrenstelsels (ter vergelijking, de Aarde en de Zon zijn ongeveer 4.5 miljard jaar oud). Sindsdien hebben sterrenstelsels een divers aantal vormen en groottes aangenomen, zoals is te zien in Afbeelding 1.2 in Hoofdstuk 1. Als het mogelijk was geweest om de Melkweg van een afstand te bekijken, zouden we haar waarnemen als een blauwe schijf met daarin een karakteristieke spiraalstructuur. Andere stelsels, echter, ogen rood, en zijn nagenoeg rond of elliptisch. Er bestaan zelfs sterrenstelsels die omhuld zijn in zoveel kosmisch stof, dat (bijna) al het licht wordt uitgezonden op golflengten die niet met het blote oog te zien zijn. Wat sterrenkundigen daarom graag zouden begrijpen is hoe sterrenstelsels evolueren van kleine, jonge stelsels in het vroege Universum, tot aan de verscheidenheid van stelsels die we vandaag de dag met telescopen kunnen waarnemen.

Het begrijpen van de evolutie van sterrenstelsels wordt echter bemoeilijkt door het feit dat de evolutie van individuele stelsels een erg langzaam proces is. De tijd die de Zon nodig heeft om eenmaal de Melkweg te doorkruisen is ongeveer 200 miljoen jaar, oftewel, de laatste keer dat de Zon zich op haar huidige positie bevond, bewandelden de dinosauriërs nog de Aarde. De evolutie van sterrenstelsels kan daarom niet simpelweg begrepen worden door stelsels langere tijd te bekijken. In plaats daarvan is het nodig om een groot aantal verschillende sterrenstelsels te bestuderen – zowel jonge als oude stelsels – en deze met elkaar te vergelijken. Alleen op deze

manier kunnen mogelijke evolutionaire paden waarop sterrenstelsels de tijd doorkruisen worden begrepen. Gelukkig is dit mogelijk binnen de sterrenkunde, omdat de natuur ons een handje helpt. De snelheid van licht is niet oneindig, en is zelfs redelijk langzaam op de schaal van het Universum. Het licht dat wordt uitgezonden door verafgelegen sterrenstelsels heeft daarom een lange tijd nodig om onze telescopen te bereiken. Het waarnemen van de verste sterrenstelsels vormt dus de manier om ook de jongste stelsels te bestuderen en te begrijpen, en maakt het mogelijk om een theorie van de evolutie van sterrenstelsels op te bouwen.

Één van de meest nuttige parameters die de evolutie van sterrenstelsels beschrijft is de *stervormingssnelheid*, welke meet hoeveel zonsmassa's in sterren er jaarlijks worden gevormd in een sterrenstelsel. Sterren zelf worden geboren uit gigantische stofwolken, zoals de prachtige Orionnevel, getoond in Afbeelding 3. Zelfs de geboorte van individuele sterren, echter, is een tijdrovend proces wat miljoenen jaren in beslag neemt. Bovendien is het doorgaans onmogelijk om zulke individuele stofwolken waar te nemen in verafgelegen sterrenstelsels, laat staan individuele sterren. Het is daarom nodig om meer geraffineerde technieken te gebruiken om stervorming in verre sterrenstelsels te meten. Zulke technieken maken niet alleen gebruik van de golflengten waarop het menselijk oog werkt, maar ook van ultraviolet licht, alsmede infrarode en radio golflengten.

Jonge, massieve sterren, bijvoorbeeld, zijn veel heter dan de Zon, en stralen vele malen meer ultraviolet licht uit. Van een sterrenstelsel dat helder is op ultraviolette golflengten kunnen we daarom veronderstellen dat het op hoge snelheid sterren aan het vormen is. De meest stervormende sterrenstelsels zijn echter verrassend zwak in het ultraviolet, omdat ze omgeven zijn door grote hoeveelheden kosmisch stof. Zulk stof absorbeert ultraviolet licht, en zendt het weer uit op infrarode golflengten. Op deze manier kan stervorming ook worden gemeten door middel van het infrarode licht van sterrenstelsels. Gezamenlijk hebben ultraviolette en infrarode metingen aan sterrenstelsels de *kosmische stervormingssnelheid* weten te bepalen; dit is de gemiddelde stervormingssnelheid van alle sterrenstelsels in het heelal, op een gegeven ogenblik in het kosmisch verleden. Vandaag de dag hebben metingen aan de kosmische stervormingssnelheid deze weten te bepalen tot aan de eerste miljard jaar na de Oerknal (Afbeelding 1.7).

Ultraviolette en infrarode metingen van stervorming zijn echter niet zonder problemen. Zoals genoemd zijn ultraviolette waarnemingen erg



Figure 3: De dichtstbijzijnde – en hoogstwaarschijnlijk ook meest beroemde – stervormingsnevel; Orion. Deze foto is genomen met de ruimtetelescoop Hubble, en maakt gebruik van verschillende optische en infrarode golflengten. Gaswolken zoals de Orionnevel vormen de geboorteplaats van sterren in sterrenstelsels. Bron: NASA, ESA, M. Robberto (STSCI/ESA) en het Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team.

vatbaar voor de aanwezigheid van kosmisch stof, en kunnen erg stofrijke sterrenstelsels niet op deze golflengten worden waargenomen. Telescopen die gebruik maken van infrarood licht zijn echter vaak minder gevoelig, waardoor het vaak onmogelijk is om de meest afgelegen sterrenstelsels waar te nemen. Bovendien zien infrarode telescopen vaak minder scherp, wat waarnemingen van jonge, kleine sterrenstelsels verder bemoeilijkt. Een mogelijke oplossing die deze problemen weet te omzeilen, is het waarnemen van sterrenstelsels met radiostraling.

Sterrenstelsels op Radiogolflengten

De meest krachtige radiotelescopen zijn zogeheten *interferometers*. Zulke interferometers bestaan uit meerdere kleinere telescopen die allen samenwerken om een scherp beeld van de radiohemel te produceren. Bovendien schaalt de gevoeligheid van een interferometer met het aantal telescopen



Figure 4: De Karl G. Jansky Very Large Array (VLA), oorspronkelijk gebouwd in the de jaren '70 van de 20ste eeuw in de Verenigde Staten, is de meest productieve (én iconische) radiotelescoop ter wereld. Hoewel het wolkendek hangende boven de telescoop elke optische waarnemingen zou verhinderen, is dit geen probleem voor een radiotelescoop. Bron: National Radio Astronomy Observatory.

waaruit deze bestaat, zodat een grote interferometer in staat is om zwakke en afgelegen sterrenstelsels waar te nemen. De radiotelescoop die voor dit proefschrift het meest essentieel is geweest, is de *Very Large Array* (VLA) in de Verenigde Staten, bestaande uit 27 telescopen elk met een diameter van 25 meter. De VLA is te zien in Afbeelding 4.

De radiostraling afkomstig van sterrenstelsels heeft twee mogelijke oorsprongen: een superzwaar zwart gat (EN: *supermassive black hole*) in het centrum van sterrenstelsels kan een bron van sterke radiostraling zijn, in welk geval het een *Active Galactic Nucleus* (AGN; actieve galactische kern) genoemd wordt. Radiostraling kan ook het gevolg zijn van stervorming, hoewel stervormende sterrenstelsels vaak vele malen zwakker zijn dan AGN. Als gevolg daarvan zijn waarnemingen met radiogolven in het verleden vooral beperkt gebleven tot heldere AGN, nabijgelegen sterrenstelsels, en extreem heldere stelsels in het vroege Universum. 'Gewone' sterrenstelsels zijn een stuk zwakkere radiobronnen, en waren daarom niet waarneembaar met oudere telescopen (zie ook Afbeelding 1.8). Echter, nadat de VLA in 2012 een grote upgrade is ondergaan, is de gevoeligheid van de telescoop met een orde van grootte verbeterd. Sindsdien is het eindelijk mogelijk om

de *faint radio sky* – de lichtzwakke radiohemel – waar te nemen, welke het onderwerp vormt van dit proefschrift.

Een stervormend sterrenstelsel zendt radiogolven uit via twee processen: *synchrotronstraling* en *free-free straling*. De laatste wordt geproduceerd bij de vorming van zware sterren, terwijl synchrotronstraling wordt uitgezonden wanneer een zware ster sterft in een krachtige *supernova-explosie*. Free-free straling biedt daarom een directe meting van recente stervorming, maar is erg lastig waar te nemen in verre sterrenstelsels, aangezien het een stuk zwakker is dan de ook aanwezige synchrotronstraling (zie bijvoorbeeld Afbeelding 1.7). Vandaar wordt synchrotron veel meer gebruikt om stervorming te meten, ondanks dat dit eigenlijk de dood van sterren meet, en niet het ontstaan ervan. Dit proefschrift begint daarom met twee hoofdstukken die de synchrotronstraling van lichtzwakke sterrenstelsels bestuderen (Hoofdstukken 2 & 3). Daaropvolgend beschrijven we in Hoofdstukken 4 & 5 twee onderzoeken waarin voor het eerst systematisch naar free-free straling in het vroege heelal wordt gekeken.

Dit Proefschrift

In het afgelopen decennium heeft de radiosterrenkunde een heuse revolutie doorgaan: diverse nieuwe radiotelescopen zijn (of worden nog) gebouwd, en anderen, zoals de eerdergenoemde VLA, zijn flink gemoderniseerd. De steeds gevoeliger waarnemingen die hierdoor mogelijk zijn vervolledigen ons begrip van de lichtzwakke radiohemel. In **Hoofdstuk Één** beginnen we dit proefschrift met een gedetailleerde uitleg over de evolutie van sterrenstelsels en de radiosterrenkunde, en beschrijven we de benodigde achtergrondinformatie voor de latere hoofdstukken.

In **Hoofdstuk Twee** introduceren we gevoelige waarnemingen van de vernieuwde VLA als onderdeel van de zogeheten *COSMOS-XS survey*. COSMOS-XS verschaft radiowaarnemingen op twee verschillende frequenties, beiden een van de meest gevoelige die tot op heden bestaan. We maken gebruik van de waarnemingen op 3 GHz, in combinatie met observaties op een hoop andere golflengten van röntgenstraling tot microgolven, om de samenstelling van de radiohemel te onderzoeken, en sterrenstelsels in te delen als AGN of stervormend. We vinden dat meer dan 90% van de 1500 sterrenstelsels die zijn gedetecteerd in COSMOS-XS radiostraling uitzenden die afkomstig is van stervorming, en dat dit percentage oploopt voor zwakkere stelsels. Daarnaast ontdekken we ook een aantal sterrenstelsels

die niet gedetecteerd zijn in gevoelige waarnemingen op optische en infrarode golflengten. Door middel van een zogeheten *stacking* techniek, waarbij we de gemiddelde emissie van deze stelsels kunnen meten, laten we zien dat deze “donkere” stelsels waarschijnlijk erg verafgelegen zijn en een roodverschuiving van $z \sim 4 - 5$ hebben, wat inhoudt dat ze een belangrijk aandeel kunnen vormen in de kosmische stervormingssnelheid in het vroege Universum.

Hoofdstuk Drie betreft een uitvoerige studie van de *ver-infrarood/radio correlatie* in extreem stervormende en stofrijke sterrenstelsels in het jonge Universum. Deze relatie tussen ver-infrarood en radiostraling, die standhoudt in een verscheidenheid aan sterrenstelsels – van dwergsystemen tot massieve, stervormende sterrenstelsels – alsmede op hoge roodverschuiving, is cruciaal om radio synchrotronstraling te gebruiken als een maat voor stervorming. De theoretische onderbouwing van deze relatie is tot op heden echter enigszins onduidelijk gebleken, en wordt verondersteld het gevolg te zijn van een scala aan fysische processen. Snel snervormende sterrenstelsels vormen nuttige laboratoria om de ver-infrarood/radio correlatie te bestuderen, omdat deze hier kan worden getest in extreme fysische omstandigheden, zonder te worden geteisterd door systematische selectie-effecten.

Door het combineren van gedetailleerde observaties van de *Atacama Large Millimeter Array* voor ongeveer 700 stofrijke sterrenstelsels met gevoelige radiowaarnemingen van de VLA, meten we dat de ver-infrarood/radio correlatie niet afhankelijk is van roodverschuiving. Dit is in tegenstelling tot eerdere onderzoeken naar de correlatie, die minder homogene verzamelingen van sterrenstelsels bekeken, en daardoor meer last hebben van selectie-invloeden. Desalniettemin vinden we dat de correlatie voor stofrijke sterrenstelsels op hoge roodverschuiving verschilt van die van stervormende stelsels in het huidige Universum, waaronder die voor de nabije stofrijke stelsels. Dit is waarschijnlijk vanwege de veranderende fysische omstandigheden in sterrenstelsels in het verre Universum.

In **Hoofdstuk Vier** presenteren we een pionerende studie naar free-free straling in sterrenstelsels in het jonge Universum. Door middel van nieuwe waarnemingen van de VLA op 34 GHz als onderdeel van het COLD z project, alsmede waarnemingen op verschillende lagere frequenties, verkrijgen we een ongekend inzicht in de *radiospectra* van lichtzwakke sterrenstelsels. We detecteren 18 sterrenstelsels in de nieuwe waarnemingen op

34 GHz, waarvan we zeven classificeren als stervormende stelsels. Gebruik makende van de bestaande data op diverse radiofrequenties, extraheren we de synchrotron- en free-free straling uit de totale radiospectra. Op die manier kan de free-free straling gebruikt worden om stervorming in het vroege Universum te meten. We tonen aan dat de stervormingssnelheden verkregen van de free-free straling overeenkomen met deze van meer gebruikelijke meetmethoden, en beschrijven hoe de volgende generatie radiotelescopen cruciaal zullen zijn om onderzoek naar free-free straling te vervolgen.

Hoofdstuk Vijf bouwt voort op het onderzoek beschreven in het voorgaande hoofdstuk door gebruik te maken van een *stackinganalyse*, welk inzicht verschaft in veel grotere (en nog lichtzwakkere) verzamelingen sterrenstelsels. Op deze manier kunnen de gemiddelde radiospectra van sterrenstelsels met slechts bescheiden stervorming – de meest veelvoorkomende stelsels in het Universum – worden bestudeerd.

We tonen aan dat sterrenstelsels in het jonge Universum lichtzwakker zijn op hoge frequenties dan verwacht op basis van een extrapolatie van een typisch radiospectrum, welk vaak wordt aangenomen in de literatuur. We veronderstellen dat dit het resultaat is van het “verouderen” van de spectra, wat de afname van synchrotronstraling in oudere sterrenstelsels tot gevolg heeft. De free-free straling is hierdoor echter onaangetast, zodat we deze gebruiken om de kosmische stervormingssnelheid te bepalen – de eerste meting op deze manier, die in de toekomst hoogstwaarschijnlijk gangbaar zal zijn.

