



Universiteit
Leiden
The Netherlands

From star-formation to recombination: expanding our view of the radio recombination line universe

Emig, K.L.

Citation

Emig, K. L. (2021, April 29). *From star-formation to recombination: expanding our view of the radio recombination line universe*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3160759>

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/1887/3160759>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <https://hdl.handle.net/1887/3160759> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Emig, K.L.

Title: From star-formation to recombination: expanding our view of the radio recombination line universe

Issue Date: 2021-04-29

Samenvatting

Sterrenstelsels zijn grote, door zwaartekracht gebonden, verzamelingen van sterren (en alle planeten die hen omgeven), gas, stof, kosmische straling, massarijke zwarte gaten en donkere materie. Grote wolken van gas en stof, aangeduid als het interstellaire medium, vullen het merendeel van het volume van een sterrenstelsel. Daardoorheen verspreid zitten glimmende punten van sterrenlicht — sterren met een hele verscheidenheid aan verschillende grootten, massa's en helderheden. Hoogenergetische deeltjes, die zich met relativistische³ snelheden voortbewegen, bekend als kosmische straling, vliegen door het sterrenstelsel dankzij magnetische velden die hen gevangen houden. Het centrum van de meeste sterrenstelsels bevat een superzwaar zwart gat. Behalve materie die met licht in het elektromagnetische spectrum interageert is er ook “donkere materie” die sterrenstelsels gravitationeel beïnvloedt.

Hoe deze basisingrediënten zich vormen, ontwikkelen en een sterrenstelsel beïnvloeden, stuurt modern astrofysisch onderzoek. Wanneer we kijken naar de gebieden in sterrenstelsels waar sterren gevormd worden, lijkt het bijna op een borrelde ketel. Als nieuwe sterren zich in (koude) interstellaire wolken vormen, vormen zij bellen van geïoniseerd en uitgestoten gas. Grote interstellaire wolken bestaan in verschillende karakteristieke fases (met uiteenlopende temperaturen, dichtheden en omvang) — grotendeels weerspiegelen ze hiermee de globale invloed van sterren op het sterrenstelsel. De eigenschappen van deze wolken bepalen echter de omstandigheden voor nieuwe stervorming. Of een superzwaar zwart gat actief vrijelijk straling uitzendt of jets van stromende kosmische straling gevormd heeft, kan de samenstelling van een sterrenstelsel diepgaand beïnvloeden. Door de wisselwerking van deze fysische processen wordt een complex, wederzijds afhankelijk ecosysteem gecreëerd.

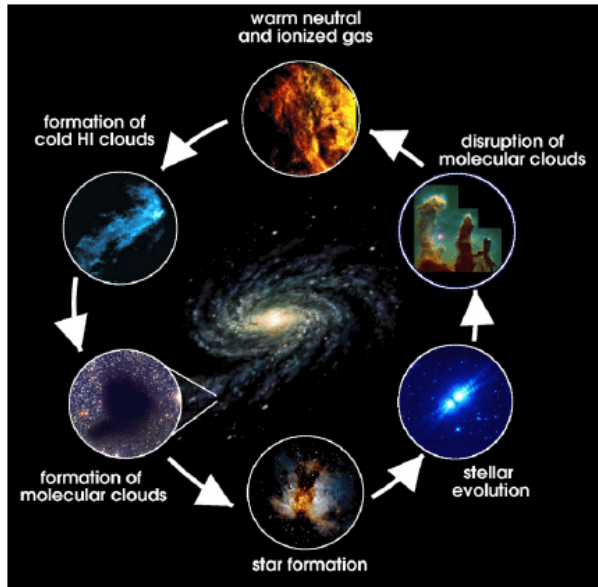
Deze ingewikkelde balans tussen deze processen bepaalt, hoe ingewikkeld ook, een aantal karakteristieke eigenschappen van een sterrenstelsel en zijn levensloop, die door sterrenkundigen vergaard worden.

Wat is de levenscyclus van een sterrenstelsel?

Figuur 5.22 vat de levenscyclus van sterren en interstellaire wolken samen voor een sterrenstelsel dat op onze Melkweg lijkt.

Gas dat koud is (10 K boven het absolute nulpunt!) en voornamelijk uit moleculen (niet uit atomen) bestaat vormt coherente gravitationeel gebonden wolken. Een tur-

³dat wil zeggen, met snelheden die een significant percentage van de snelheid van licht zijn



Figuur 5.22: De levenscyclus van interstellaire wolken

bulente gebeurtenis⁴ in het sterrenstelsel veroorzaakt instabiliteiten en verdichtingen in een zogenaamde moleculaire reuzenwolk. Deze moleculaire reuzenwolk stort dan in, de verdichte klonten trekken in toenemende mate materiaal aan, en nieuwe sterren ontstaan.

Sterren fuseren elementen in hun kern — zo fuseren vier protonen, die elk ieder apart een waterstofkern zijn, tot een heliumkern. De sterren stralen licht uit en hebben een harde wind van kosmische straling aan hun oppervlak. Stellaire straling, in het bijzonder van de meest massarijke sterren, verhit het omliggende gas en stof, breekt moleculen af en stroopt elektronen van atomen af (ionisatie). Stellaire winden (en zelfs druk van de straling) duwen effectief tegen omliggende wolken aan, schokken en verhitten hen. Straling en winden stoppen instortend materiaal en vernietigen de restanten van hun geboorteplek — de moleculaire reuzenwolk — waardoor ze nieuwe stervorming tegenhouden.⁵ Na een paar miljoen jaren zijn massarijke sterren niet langer omkleed in hun geboortemateriaal. Hun straling kan ver reiken, waardoor ze interstellaire wolken van het sterrenstelsel verhitten en uitgestrekte en doordringende componenten van het geïoniseerde interstellaire medium in stand houden.

Het leven van een ster eindigt wanneer hij niet langer atomaire kernen in zijn kern kan fuseren. Als sterren het einde van hun leven naderen, worden de buitenste lagen te zwaar om gedragen te kunnen worden. Sommige sterren stoten materiaal van hun

⁴Turbulentie kan ontstaan door een dichtbijge exploderende ster of een grotere structuur in het sterrenstelsel zoals een spiraalarm of door een botsing met een ander sterrenstelsel.

⁵Tenminste, meestal wordt de wolk afgebroken en stervorming gestopt. Soms kunnen de schokken (van winden en straling) die door het medium bewegen ervoor zorgen dat sommige gebieden alsnog instorten en in deze dichte gebieden vormen wederom nieuwe sterren. Echter, onder de streep wordt meer stervorming voorkomen dan opgestart.

oppervlak af, materiaal dat gemaakt is van de kernen van “zware” elementen die in hun kern gefuseerd zijn. De meest massarijke sterren beëindigen hun leven met grote explosies genaamd supernova’s. Door deze explosie stromen zware elementen nabije gaswolken in en verrijken hen. De schokgolf van de explosie dijt naar buiten uit, waarbij hij het medium verhit en kinetische energie omzet in een buitenwaartse druk.

Als sterren echter sterven, beginnen ook de interstellaire wolken die ze verwarmd hebben af te koelen. Soms hebben het gas en het stof in de omgeving van een ster of een groep van sterren zo’n grote zet meegekregen dat ze ver van de schijf van het sterrenstelsel vandaan vliegen en, ver van alles verwijderd, worden zij niet meer verhit. In elk geval koelen de gaswolken af. Moleculen beginnen zich te vormen, die afscherming van de wolk van straling vormen, en het materiaal koelt verder af en condenseert in een nieuwe moleculaire reuzenwolk. De voorwaarden voor nieuwe stervorming zijn bepaald, en de kringloop herhaalt zich.

Hoe ontstaan en ontwikkelen sterrenstelsels zich?

Het ontstaan en de ontwikkeling van sterrenstelsels is nauw verweven met de cyclische terugkoppelingsprocessen tussen sterren en interstellaire materie, wat sterrenkundigen stellaire feedback noemen. Afhankelijk van de nettohoeveelheid aan verhitting en koeling door de gezamenlijke eigenschappen van de sterren in een sterrenstelsel bereikt het interstellaire medium een evenwicht, waarin het gelaagde wolken met karakteristieke eigenschappen vormt. De omstandigheden in deze wolken reguleren het aantal sterren dat gevormd wordt. Echter, zoals we boven opmerkten, beïnvloeden sterren de wolken ook op kleinere (niet-globale) schalen door hen te verstrooien, en ze kunnen ook als de turbulente bemiddelaar optreden die ervoor zorgt dat andere moleculaire reuzenwolken instorten.

Het is zeer uitdagend om de wisselwerking tussen de verschillende betrokkene processen te begrijpen, want we kunnen de gebeurtenissen niet in echte tijd nabootsen. Ze voltrekken zich typisch in duizenden tot miljarden jaren; we krijgen slechts momentopnamen van de processen met onze huidige waarnemingen, en we proberen verschillende stadia van die processen aan elkaar te verbinden. Het is nog niet helemaal mogelijk om gesimuleerde films te creëren van de volledige collectieve processen door de fysische grondbeginselen die hen aansturen in te bouwen (hoewel veel voortgang geboekt is in het begrijpen van stukken daarvan!). Complexe interacties werken door van de kleinste schalen — met chemische netwerken in moleculaire wolken en invloedrijke processen van individuele sterren en zonnestelsels — helemaal tot de schaal van een geheel sterrenstelsel.

In de levensloop, die ik boven beschreven heb, is de relatie voornamelijk beschreven als die tussen een enkele ster en nabije wolken. Echter, sterren worden geboren in groepen op nagenoeg hetzelfde tijdstip en sommigen bevinden zich dicht genoeg bij elkaar zodat hun gezamenlijke bezigheid een eigen leven kan gaan leiden. Een typische moleculaire reuzenwolk heeft een massa van een miljoen zonnemassa’s ($10^6 M_{\odot}$); dat wil zeggen, als het stervormingsproces 100% efficiënt is (en als slechts één soort ster gevormd wordt), zouden een miljoen kopieën van onze zon gevormd kunnen worden in de wolk. De turbulente gebeurtenissen die zich aan de wolk voltrekken, bewerkstel-

ligen dat de hele moleculaire reuzenwolk instort, en laat zo een stellaire wieg ontstaan van sterren met dezelfde leeftijd en plaats in het sterrenstelsel.

Ondanks dat moleculaire reuzenwolken gravitationeel gebonden zijn, geldt dit niet noodzakelijkerwijs voor de sterren die erin gevormd worden. Echter, we zien groepen van sterren die gevormd zijn en die gravitationeel gebonden zijn — we noemen deze groepen sterrenhopen. De meest massarijke en compacte sterrenhopen zijn vaak het meest efficiënt in het creëren van sterren. Waar in een sterrenstelsel deze sterren gevormd worden maakt ook verschil. In de schijf van een spiraalvormig sterrenstelsel, bijvoorbeeld, vormen zich nieuwe sterren typisch in de spiraalarmen. Massarijke en compacte sterrenhopen worden vaak dichter bij het centrum van een sterrenstelsel gevonden of grifweg als twee sterrenstelsels samensmelten.

Tot dusver heb ik de innige verbinding tussen sterren (hun locaties) en het interstellair medium beschreven, en dit is waarop ik me hoofdzakelijk richt in mijn proefschrift. Hier is een lijst van andere factoren die ook belangrijk zijn voor de ontwikkeling van sterrenstelsels, maar die ik niet uitgebreid zal bespreken: (i) intergalactisch gas dat op sterrenstelsels accreteert en nieuw materiaal in het levenscyclusproces injecteert, (ii) de omgeving van een sterrenstelsel en hoe vaak het wisselwerkt met andere sterrenstelsels, (iii) een actief superzwaar zwart gat in het centrum van een sterrenstelsel dat interstellair materie verslindt en waarvan straling en/of relativistische jets van heet plasma de kringloop van fasen tussen de wolken beïnvloedt, en (iv) de aanvankelijke verdichting in de ruimte na de oerknal, die de formatie van een sterrenstelsel op gang heeft gebracht, zou een hoofddeterminant van de eigenschappen van een sterrenstelsel kunnen zijn.

Hoe bestuderen sterrenkundigen interstellair wolken en de effecten van sterren?

Om de wisselwerking tussen sterren en het interstellair medium te begrijpen middels waarnemingen, voeren sterrenkundigen gedetailleerde hoge-resolutiestudies van individuele sterren en wolkenklonten uit, gebruiken ze grote steekproeven en overzichtsonderzoeken van astronomische objecten om statistisch inzicht te verkrijgen in fysische mechanismen, en maken ze schattingen op galactische schaal en hoe hun eigenschappen ontwikkelen in kosmische tijd. Zo worden dieptestudies gewoonlijk uitgevoerd in onze eigen Melkweg. De nabijheid staat toe dat we hen goed zien en we hebben een grote verscheidenheid aan manieren om het gas te detecteren en de invloed van fysische processen af te leiden, wat niet mogelijk zou zijn in sterrenstelsels die verder weg zijn en daardoor zwakkere signalen hebben. Echter, het is vaak nuttig om een vogelperspectief in te nemen en nabije sterrenstelsels in uiteenlopende oriëntaties, die verschillende omgevingen kunnen herbergen, te observeren. Omdat licht met een eindige snelheid voortbeweegt ($c = \nu\lambda = 1$ miljard kilometer per uur)⁶, werd het licht dat ons nu bereikt van de meest afgelegen sterrenstelsel uitgezonden

⁶In de vergelijking $c = \nu\lambda$ is ν de frequentie van het licht en λ de golflengte; de snelheid van licht is constant (in een vacuüm), dus als de golflengte kleiner wordt, wordt de frequentie groter, en andersom, als de golflengte langer wordt, wordt de frequentie korter en het licht heeft lagere energie (omdat energie met de frequentie schaal).

toen die sterrenstelsels jong waren. Zodanig (en omdat er aanwijzingen zijn dat het heelal homogeen en isotroop is) kunnen we sterrenstelsels observeren als functie van de leeftijd van het heelal om te zien hoe de eigenschappen van sterrenstelsels zich ontwikkelen in kosmische tijd.

Een schoonheid van de sterrenkunde is dat we het werkelijk eenvoudige concept gebruiken van het waarnemen van licht over het electromagnetische spectrum met verschillende golflengtes (frequenties, energie) om de fysica en de wonderen van ons heelal af te leiden.⁷ Van het simpele concept om tweedimensionale plaatjes op verschillende golflengtes te maken, kunnen we de aanwezigheid van astronomische objecten, de fysische eigenschappen van deze objecten, hun driedimensionale verdeling en bewegingen construeren, hoe objecten elkaar beïnvloeden en hoe ze zich ontwikkelen in de tijd (vier dimensies).

De hoofdwegen om interstellaire wolken door continuümlicht te bestuderen zijn: infraroodlicht (golflengtes van $\lambda \sim 0.001 - 0.5$ mm) van stof met uiteenlopende temperaturen; het licht van vrije elektronen op radiogolflengtes ($\lambda \sim 5$ mm – 30 m); Röntgenstraling dat in een continuüm door heet gas uitgezonden wordt; en gammastraling, fotonen met de hoogste energie (en onvoorstelbaar kleine golflengtes, $\lambda < 10^{-11}$ mm) die uitgezonden worden als hoogenergetische deeltjes met interstellaire wolken botsen.

Naast continuümemissie kunnen bestanddelen van sterrenstelsels ook waargenomen worden door middel van spectroscopische signalen. Een wolk kan licht met een specifieke frequentie uitzenden (of absorberen) ten gevolge van overgangen van elektronen, vibraties en rotaties in atomen en/of moleculen. We weten bijvoorbeeld van het bestaan van grote wolken van atomaire waterstof door een spinomkering van een elektron in een waterstofatoom — wat zich bij een golflengte van 21 cm in het radioregime van het spectrum voltrekt. De meest gebruikelijke manier waarmee we moleculaire reuzenwolken kunnen zien is door het waarnemen van rotaties van koolstofmonoxidemoleculen (CO-moleculen) als spectraallijnen. Warm geïoniseerd gas dichtbij massarijke sterren, in de buitengebieden van een galactische schijf of in de buurt van massarijke zwarte gaten, emitteren spectraalovergangen van waterstof bij optische/zichtbare golflengten (zoals ook sommige overgangen van elementen als zuurstof en zwafel). Op lange infraroodgolflengten emitteren wolken een overschot van emissie van een overgang van koolstof. Met verbeterde technologie kunnen we steeds zwakkere signalen ontdekken en kunnen we telescopen bouwen die op golflengten van het electromagnetische spectrum waarnemen die voorheen te gecompliceerd waren om na te jagen (terwijl veel makkelijkere dingen nog steeds onontdekt bleven!).

Zwakke spectrale signalen die ik waarneem (en voor het eerst in verre sterrenstelsels) worden **radiorecombinatielijnen** genoemd. Radiorecombinatielijnen worden uitgezonden wanneer een geïoniseerd atoom (in het geval van waterstof een proton) en een elektron recombineren, en de elektronen recombineren naar een hoog energieniveau en vervolgens naar lagere energieniveaus vallen. De elektronenovergangen die tussen de hoge toestanden plaatsvinden — de radiorecombinatielijnen — hebben zeer lage energie en zijn daarom op radiogolflengtes waar te nemen. De intensiteit van

⁷Uitzonderingen daarvan ontsluiten de directe detectie van kosmische straling (hoogenergetische deeltjes) vanuit de ruimte of nieuwe detectoren van zwaartekrachtsgolven. Deze waarnemingen zijn zo uniek waardevol omdat ze het heelal om een geheel andere manier verkennen dan traditionele sterrenkunde.

de recombinatielijnen is direct evenredig met het invallende ioniserende stralingsveld. Terwijl optische en infraroodlijnen verzwakt of verstrooid kunnen worden door stof, komen deze spectraallijnen onverzwakt uit het medium. Alhoewel zwak en moeilijk te detecteren, zijn ze bijzonder nuttig om de aanwezigheid van massarijke sterren af te leiden in ondoorzichtige zichtlijnen (bijvoorbeeld in het vlak van de Melkweg) en in dichte omgevingen van jonge stervormingsgebieden.

In gas met lage dichtheid kan iets gebeuren terwijl de elektronen door de energieniveaus van het atoom vallen: botsingen met een ander vrij elektron of radiostraling kan met het atoom wisselwerken. De fysische eigenschappen (temperatuur en dichtheid) van het diffuse gas zijn zeer gevoelig voor hoe effectief deze twee processen zijn en bij welke energieniveaus zij plaatsvinden. We nemen de radiorecombinatielijnen op verschillende frequenties waar, meten hoe de intensiteit verandert, en gebruiken dat om de temperatuur, dichtheid en omvang van de gaswolken te achterhalen. Als we de fysische toestand meten, kunnen we de invloed van de verschillende mechanismes kwantificeren, zoals verhitting/koeling, duwing, verspreiding of opschudding van het gas. Omdat we geen manier hebben om dat te doen met eerder gebruikte spectraal- en continuümssignalen leveren waarnemingen van radiorecombinatielijnen diepe inzichten op.

Ik gebruik een nieuw geconstrueerde radiotelescoop, de Low Frequency Array, **LOFAR**, om continuümemissie en radiorecombinatielijnemissie waar te nemen. LOFAR is gecentreerd in en wordt bestuurd vanuit Nederland. LOFAR is ontworpen om radiogolflengten van 1 – 30 m of frequenties van 10 – 250 MHz waar te nemen, met een gat bij 90 – 100 MHz dat de FM-banden van de radio die we in onze auto's oppikken ompant. Dit zijn de laagste frequenties waarmee de buitenaardse hemel vanaf de grond waargenomen kan worden, met een kantelwaarde bij ongeveer 10 MHz. Lagere frequenties worden slechts door de atmosfeer teruggekaatst. Naarmate radiogolven dichter bij de kantelfrequentie komen, worden ze steeds meer verstoord (gebroken en gedraaid in polarisatie) als ze door de atmosfeer gaan. De laag die hiervoor verantwoordelijk is wordt ionosfeer genoemd en de verstorende effecten variëren in tijd en plaats in het waargenomen gezichtsveld.

LOFAR is een (van een paar) nieuwe generatie radiointerferometers en maakt voor het eerst waarnemingen op deze frequenties met hoge resolutie en hoge gevoeligheid mogelijk. Interferometers bevatten meerdere antennes die gezamenlijk gebruikt worden om een astronomisch object waar te nemen. In plaats van één gigantische telescoop wordt een virtuele telescoop opgericht door de signalen van de antennes te harmoniseren. LOFAR gebruikt heel simpele antennes — er zijn twee types voor de twee verschillende golflengtebereiken. In principe zijn het vier stukken metaal (of draad) met een specifieke lengte, zodat, als radiogolven met de gewenste lengte hen bereiken, het radiolicht een stroom in de antennes induceert. Sterrenkundige synthetiseren het uitgelezen signaal van de stroom om een beeld te maken. De antennes van LOFAR zijn goedkoop en kunnen veelvuldig worden neergezet om gevoeligheid en verzamelvlak op te bouwen. Traditioneel werden bestuurbare schotels gebruikt om op een specifieke plek op de hemel uit te richten. De LOFAR-telescoop wordt digitaal uitgericht door de verwachte vertraging over de telescoop voor een specifieke locatie op de hemel in te prenten. Dit antenneontwerp maakt het ook mogelijk om grote stukken hemel gelijktijdig waar te nemen — zo kan bijvoorbeeld een oppervlakte aan

de hemel waargenomen worden die gelijk is aan 38 manen (de grootste schijnbare grootte van de maan) bij de hoogste frequenties en een oppervlakte van groter dan 2800 manen bij de laagste frequenties!

Een andere telescoop die ik gebruik wordt de Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array, **ALMA**, genoemd, gelegen in Chili. Ook recent gebouwd (tenminste was het dat aan het begin van mijn promotietraject) in 2013 heeft het voor het eerst zeer gevoelige waarnemingen met hoge resolutie bij millimetergolflengtes mogelijk gemaakt. Er zijn veel moleculaire en atomaire overgangen die bij deze golflengtes waargenomen kunnen worden, hetgeen nieuwe manieren oplevert om astrofysische eigenschappen middels astrochemie te achterhalen. ALMA is ook een interferometer, maar het bevat radioschotels met instrumenten die licht met golflengtes van 0.8 – 3.5 mm opvangen. Het is de grootste sterrenwacht die op deze golflengtes opereert — de toegevoegde antennes bereiken een betere resolutie en sensitiviteit.

Wat heb ik onderzocht in dit proefschrift?

In mijn onderzoek tijdens mijn promotietraject heb ik interstellare wolken bestudeerd op schalen van sterrenstelsels tot schalen kleiner dan wolken. Ik neem radiocontinuï-emissie waar van het ijle geïoniseerde gas in een stervormingsgebied in onze Melkweg en bestudeer de invloed van massarijke sterren door hun vervoer van ioniserende fotonen. Ik onthul de aanwezigheid van een populatie van zeldzame supersterrenhopen en karakteriseer hun eigenschappen. Ik verken de mogelijkheid om radiorecombinatielijnen te gebruiken voor de studie van sterrenstelsels op kosmische afstanden en ik ontwikkel gereedschap en strategieën die nodig zijn om lage-frequentiewaarnemingen te verwerken. Terwijl ik deze inspanningen leid werd het onderzoek uitgevoerd met de hulp en bijdragen van een schare van medewerkers en teamleden en door de geleiding van mijn begeleiders.

In hoofdstuk 1 geef ik een inleiding (in groter detail, voor sterrenkundigen) om de concepten die we bestuderen in te kaderen. Specificeer zijn de vragen die ik in de daaropvolgende hoofdstukken wil aangaan:

- *Hoofdstuk 2:* Hoe beïnvloedt het ijle geïoniseerde gas de evolutie van het massarijke, galactische stervormingsgebied Cygnus X? Zijn dezelfde vingerafdrukken aanwezig in studies van het ijle gas in onze Melkweg?
- *Hoofdstuk 3:* Wat zijn de eigenschappen van stervorming (sterrenhopen) in de centrale *starburst* van het sterrenstelsel NGC 4945?
- *Hoofdstuk 4:* Kan het ISM worden verkend buiten het locale universum door waarnemingen van radiorecombinatielijnen? Wat zijn de ISM eigenschappen van een dwergachtig sterrenstelsel bij $z = 1.1$?
- *Hoofdstuk 5:* Welke technieken zijn het meest geschikt om zwakke radiorecombinatielijnen (bij onbekende roodverschuiving) in extragalactische bronnen te detecteren?

Vooruitzichten

Zo veel wacht erop om ontdekt te worden door op het onderzoek in dit proefschrift voort te bouwen. De analyse die we in *Hoofdstuk 2* presenteren — een analyse van het thermische radiocontinuüm van een stervormingsgebied in onze Melkweg — is de eerste van zijn aard die de LOFAR-telescoop gebruikt; ongeveer de helft van het galactische vlak kan door LOFAR waargenomen worden en verdere waarnemingen zullen onze kennis over de aanwezigheid en de oorsprong van deze overvloedige gasfase van het interstellair medium statistiek verbeteren. Bovendien legt deze arbeid de grondslag voor complete LOFAR-waarnemingen van radiorecombinatielijnen van diffuse moleculaire wolken en geïoniseerd gas in het gebied van Cygnus X. Door de aanwezigheid van een zeldzame populatie van supersterrenhopen te onthullen en hun fundamentele eigenschappen te karakteriseren in *Hoofdstuk 3* levert deze arbeid een waardevolle dataset op om stellaire terugkoppeling en de invloed van sterrenhopen op het medium te bestuderen, evenals de vroege formatiefasen in de ontwikkeling van deze typen van sterrenhopen, hoeveel sterrenhopen met een gegeven massa ontstaan en wat hun hiërarchie beïnvloedt, hoe eigenschappen van sterrenhopen zich verhouden met hun interstellair medium, en een breder perspectief is dat deze waarnemingen gebruikt kunnen worden samen met supersterrenhopen in andere nabije sterrenstelsels om mogelijkere typen van eigenschappen van stervorming aan te wijzen die vaker voorkwamen toen sterrenstelsels in het heelal gezamenlijk de meeste sterren vormden. Waarnemingen met ALMA om deze sterrenhopen te ontdekken en de inzichten in ons heelal die zij opleveren zijn pas begonnen. Een hoofdboodschap van dit proefschrift, en *Hoofdstukken 4 en 5* in het bijzonder, is dat de fysische eigenschappen in het diffuse interstellair medium verkend kunnen worden door middel van waarnemingen van radiorecombinatielijnen in en/of tegen radio-heldere sterrenstelsels tot op enorme afstanden. Dit opent de deur naar onderzoeken met bestaande faciliteiten zoals LOFAR, VLA, GMRT, WSRT en ASKAP. Voortgaande studies die naar de 21-centimeteremissie van atomaire waterstof in populaties van sterrenstelsels zoeken zijn prachtige complementen en kunnen gebruikt worden voor verdere detecties van radiorecombinatielijnen. De langere-termijn-toekomst is tamelijk glorend omdat een nieuwe telescoop, die nu net gebouwd wordt, de Square Kilometer Array (SKA), ons in staat zal stellen om aanzienlijk gevoeliger waarnemingen bij lage radiofrequenties uit te voeren en de (extragalactische) studies van radiorecombinatielijnen zal revolutioneren door de detectie van tienduizenden bronnen mogelijk te maken.