

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/24302> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Verdolini, Silvia

Title: Modeling interstellar bubbles : near and far

Issue Date: 2014-02-20

Het modelleren van interstellaire bellen: dichtbij en veraf

Het leven van een ster

Sterren zijn de bouwstenen van het zichtbare heelal. Ze zijn de grootste bron van licht dat we 's nachts kunnen zien en grote hoeveelheden sterren vormen tezamen sterrenstelsels. Een typisch sterrenstelsel, zoals ons Melkwegstelsel, bevat ongeveer 100 miljard sterren en het heelal als geheel bevat weer miljarden sterrenstelsels.

Sterren zijn gaswolken die bij elkaar worden gehouden door zwaartekracht. Elke ster heeft zijn eigen levensloop. Astronomen categoriseren sterren op basis van massa. De massa van een ster is zijn belangrijkste karakteristiek en bepaalt in grote mate andere eigenschappen van de ster, waaronder hoe het leven van de ster verloopt. Sterren met een kleine massa, zoals onze zon, zijn zeer stabiel en leven lang: tot ruim 10 miljard jaar. Ze verbranden waterstof in hun kern om de energie te produceren die als licht wordt uitgestraald. Dit licht is wat we zien als sterren aan de hemel en ook het licht van de zon wordt op deze manier geproduceerd.

Sterrenkundigen bestuderen de vorming en evolutie van sterren. Sterren met een kleine massa worden redelijk goed begrepen, maar over sterren met een grote massa van 10 tot 50 keer de massa van de zon is nog veel onduidelijk. Ondanks dat deze sterren een grotere massa en daardoor veel meer brandstof hebben, leven ze toch maar tot een fractie van de leeftijd van de lichtere sterren. Dit komt doordat massieve sterren naar verhouding veel meer licht uitstralen en daardoor veel sneller door hun brandstof heen branden. Massieve sterren leven daardoor 'slechts' een aantal miljoen jaar. De grote hoeveelheid licht die deze sterren uitstralen, ioniseert het omliggende gas, waardoor een plasma ontstaat dat licht uitstraalt in ultraviolet, optische, infrarood en radio golflengtes. Gedurende hun leven stoten zware sterren ook een deel van hun massa uit naar hun omgeving in de vorm van stellaire winden en aan het einde van hun levensloop in een supernova explosie. Deze massieve sterren en hun impact op hun omgeving zijn het onderwerp van dit proefschrift.

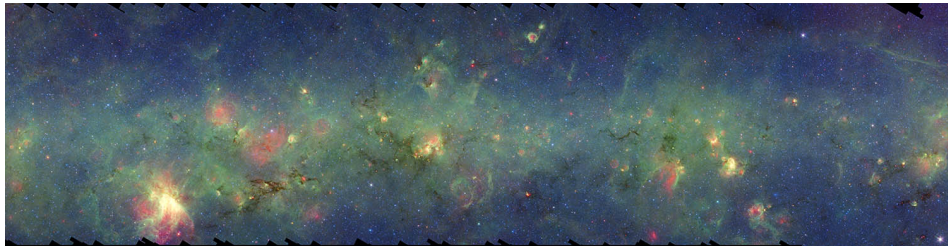
De geboorte van een ster

Sterren vormen uit zeer ijle gaswolken die voornamelijk bestaan uit waterstof en een kleine hoeveelheid moleculen. Deze wolken worden moleculaire wolken genoemd. Mo-

leculaire wolken willen in elkaar storten onder hun eigen zwaartekracht, maar worden in stand gehouden door thermische en magnetische krachten en turbulentie. Echter, de wolken zijn niet homogeen en hebben gebieden van hogere dichtheid. Deze dichtere gebieden zullen onder hun eigen zwaartekracht inkrimpen en in elkaar storten. Dit proces resulteert in een dichte kern waar een ster zal vormen. Rond de ster vormt zich een envelop van materiaal dat op de ster valt. Deze envelop vormt uiteindelijk een schijf rond de ster en loodrecht op de schijf wordt een deel van het materiaal weer uitgestoten. Zodra de gasbol in de kern een dichtheid heeft bereikt die groot genoeg is om waterstoffusie tot stand te brengen, is een nieuwe ster geboren.

Het bovenstaande beschrijft het proces voor lichte sterren, maar het is niet duidelijk in hoeverre dit ook geldt voor massievere sterren. Over zware sterren is veel minder bekend doordat ze zeer moeilijk te observeren te zijn. Omdat ze relatief zo kort leven is de kans ze te vinden klein. Daarnaast worden er minder zware sterren gevormd. In plaats van één zware ster is de kans groter dat er meerdere lichtere sterren gevormd worden. Als laatste vormt de moleculaire wolk een barrière. Als de ster geboren wordt, bevindt deze zich middenin een dichte moleculaire wolk. De wolk is zo dicht dat het licht van de ster er niet doorheen kan dringen. Dit betekent dat de ster effectief aan het zicht onttrokken wordt.

H II gebieden en interstellair bellen



Figuur 1 – Segment van een infrarood portret van stof en sterren in de binnenste regionen van de Melkweg. Blauw is IRAC 3.6 μm (de PAH deeltjes), groen is IRAC 8 μm (de PAH deeltjes), en rood is MIPS GAL 24 μm (warme stofdeeltjes). Credit: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Wisconsin.

Ondanks de observationele moeilijkheden is er wel een stadium van massieve stervorming dat waarneembaar is: zodra de ster grote hoeveelheden hoge-energie ultraviolette fotonen begint uit te stralen, zal hij het gas in de directe omgeving beginnen te ioniseren. Dit resulteert in wat astronomen een H II gebied noemen. Deze bestaat voornamelijk uit waterstof. Dit wordt al door de naam aangegeven, H II staat voor geïoniseerd waterstof, een atoom waterstof zonder zijn elektron. Het H II gebied heeft een temperatuur van rond de 10.000 graden Kelvin. Het licht dat deze H II gebieden uitstralen, geeft ons informatie over de omgeving van massieve sterren in wording.

Behalve het ioniseren van waterstof (en andere elementen) in hun omgeving kunnen sterren ook speciale moleculen aanslaan. Deze moleculen heten polycyclische aromatisch koolwaterstoffen (PAKs). Ze bestaan uit koolstofatomen in een honingraatstructuur om-

geven door waterstofatomen. Als deze aangeslagen worden door ultraviolette fotonen van een massieve ster dan fluoresceren ze in het mid-infrarood. Ook stofdeeltjes worden door de ster beïnvloed. Stofdeeltjes zijn in dit geval zeer kleine deeltjes die vooral bestaan uit koolstof, silicium en zuurstof. Deze worden door de ster opgewarmd, waardoor het stof licht uitstraalt in langere golflengtes. Zowel PAKs als stofdeeltjes bevinden zich in het interstellaire medium – het materiaal dat zich tussen sterren in een sterrenstelsel bevindt – tezamen met sterk verdund waterstofgas.

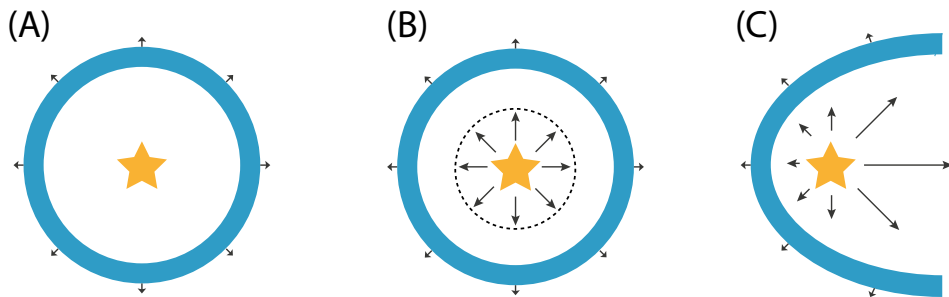
Al deze processen rondom de massieve ster resulteren in de indrukwekkende foto's van het Galactisch vlak genomen door de *Spitzer Space Telescope* (zie Figuur 1). Opvallend zijn de complexiteit en de variatie in de soort 'bellen' die waar te nemen zijn. Sommige regionen zijn complex van vorm en uitgebreid qua formaat, terwijl anderen kleiner zijn en minder grillig van vorm. Dergelijke structuren worden 'bellen' genoemd, ze zijn driedimensionale schillen die geassocieerd worden met de eerder genoemde H II gebieden. In principe zijn de schillen en de H II gebieden onderdeel van hetzelfde proces – een ster die zijn directe omgeving beïnvloedt – maar gezien op verschillende manieren. Het H II gebied is de binnenkant van het object, terwijl de bel de grens van het gebied met de omliggende omgeving is. Mede dankzij het Milky Way Project, een wetenschappelijk burgerinitiatief, is het aantal bekende infrarode bellen in het Galactisch vlak gegroeid naar ongeveer 5100. Dit is 10 keer zoveel als voorheen ontdekt was door reguliere studies ondernomen door astronomen.

H II gebieden: ballonnen tussen de sterren

Eén van de vragen die wij proberen te beantwoorden in dit proefschrift is gerelateerd aan de evolutie van een H II gebied. De uitdijng van een H II gebied is vergelijkbaar met het opblazen van een ballon: de afmeting van de ballon neemt toe naarmate er meer lucht in de ballon wordt geblazen. Wat er fysisch gezien gebeurt is dat de druk binnen de ballon toeneemt ten opzichte van de druk van de omgeving. In een soortgelijk proces weet de ster de druk in zijn directe omgeving te verhogen. Hierdoor ontstaat er een bel om de ster heen die uitzet en daarbij het omliggende materiaal naar buiten opveegt. De bel is dus een radiaal uitzettende schil van materiaal.

Er is een open discussie over wat de precieze oorzaak is van de druktoename in de omgeving rond de ster. Volgens sommigen is deze het gevolg van straling, terwijl het volgens anderen door stellaire winden wordt veroorzaakt. Figuur 2 illustreert enkele oplossingen aangedragen door astronomen om H II gebieden te verklaren. Als het gas rondom de ster homogeen is, dan zal het H II gebied bolvormig zijn. In Figuur 2 wordt dit geïllustreerd in scenario's (A) en (B).

In het geval van scenario (A) wordt het medium rondom de ster simpelweg geïoniseerd door de straling van de ster. Door deze ionisatie heeft het medium een hogere temperatuur en druk dan zijn omgeving en zal hierdoor uitdijen. Deze uitdijng neemt de vorm aan van een schokgolf die het omliggende materiaal als het ware opveegt. Scenario (B) in Figuur 2 laat de structuur van een H II gebied zien als er stellaire winden aanwezig zijn. Dergelijke uitstromen met hoge snelheid veroorzaken een extra schokgolf binnenin het H II gebied. Als laatste wordt in scenario (C) geïllustreerd wat er gebeurt als het omliggende materiaal



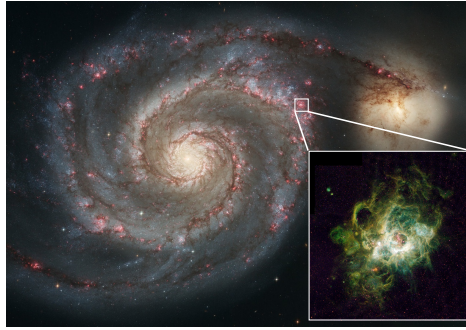
Figuur 2 – Schetsen van H II gebieden (A) gedreven door overdruk veroorzaakt door het geïoniseerde gas; (B) gedreven door stellaire winden ; en (C) als er een dichtheidsgradiënt in het omliggende materiaal aanwezig is (het zogenaamde champagne model). Credit: Bram Ochsendorf.

een gradiënt in dichtheid heeft. Een gradiënt in de dichtheid betekent dat de dichtheid rondom de ster niet overal even groot is en dus bijvoorbeeld hoger is aan één zijde van een ster en langzaam afneemt richting de andere zijde. In dit geval is het H II gebied niet langer bolvormig, maar krijgt deze de vorm van een komeet. Het gas in het H II gebied beweegt naar buiten waardoor dit model ook wel het champagne model genoemd wordt.

Er zijn veel factoren die bijdragen aan de vorming en evolutie van H II gebieden en het is niet moeilijk om voor te stellen dat de natuurkunde die hierbij aan te pas komt zeer complex kan zijn. Men hoeft maar naar het bekendste voorbeeld van een H II gebied te kijken, de Orion nevel (Figuur 1.1), om dit te beseffen.

Ultracompacte H II gebieden

De vroege fase in de evolutie van een H II gebied heet een Ultracompacte H II gebied. In Hoofdstuk 2 bestuderen we dergelijke objecten. In dit hoofdstuk focussen wij ons op een prototypische gebied, G29.96-0.02, en onderzoeken we de ontbrekende röntgenemissie bij stellaire wind bellen in H II gebieden. We voeren een brede studie uit waarbij we röntgenwaarnemingen van het hete gas combineren met een spectroscopische studie naar de eigenschappen van de ioniserende ster en een hydrodynamische studie naar de dynamische evolutie van deze gebieden. We construeren een driedimensionaal hydrodynamisch model van de Ultracompacte H II gebied. Hierbij wordt rekening gehouden met de effecten van foto-ionisatie, stellaire winden, radiatieve processen en de boegschok veroorzaakt door de beweging van de ster door de wolk. Ook wordt rekening gehouden met 'mass loading'. In de omgeving van de ster zijn vaak dichte wolken gas en stof te vinden. Deze worden niet zomaar geïoniseerd, maar verdampen langzaam. Dit kan gevolgen hebben voor het H II gebied. We vinden dat het champagne model het beste de morfologie en gasdynamica verklaren. Ook blijkt dat 'mass loading' nodig is om het gas in de stellaire wind af te koelen, zodat het consistent is met de röntgenwaarnemingen.



Figuur 3 – De verhouding tussen een sterrenstelsel en een H II gebied. De grote afbeelding is M51, een spiraalstelsel, en de kleine afbeelding is NGC 604, een gigantische H II gebied in M33. De afstandsschalen van de beide figuren zijn niet vergelijkbaar. De vergelijking is voornamelijk om te illustreren hoeveel meer we zouden kunnen zien als het sterrenstelsel dichtbij genoeg zou staan om de individuele sterren te onderscheiden.

Stoffige H II gebieden

In Hoofdstuk 3 presenteren we een klasse van H II gebieden die gevormd zijn door het champagne model om de komeetvorm van de stofemissie te verklaren zoals deze wordt waargenomen in H II gebieden. Wij denken dat de boogachtige structuur waargenomen bij $24\ \mu\text{m}$ het resultaat is van de stralingsdruk van sterfotonen op het stof dat zich in de stroom van geïoniseerd gas bevindt. Dit geïoniseerde gas is afkomstig van de moleculaire wolk waarin de ster zich heeft gevormd. Deze interactie tussen ster en stof noemen wij een *dust wave*. We laten zien dat als het champagne model geldt, het geïoniseerde gas in het H II gebied snelheden bereikt op de locatie van de ster die groot genoeg zijn om een dergelijke *dust wave* mogelijk te maken. Deze modellen kunnen ook waargenomen morfologieën en emissiekenmerken van H II gebieden reproduceren.

Van sterren naar sterrenstelsels

Sterrenstelsels zijn verzamelingen van miljarden sterren. Op basis van waarnemingen kunnen we sterrenstelsels opdelen in twee categorieën: elliptische stelsels en spiraalstelsels. In dit werk zijn we geïnteresseerder in spiraalsterrenstelsels omdat deze nog actief sterren vormen, terwijl elliptische stelsels dit niet meer doen. Dit onderscheid is belangrijk omdat onze focus op zware sterren ligt en deze slechts zeer kort leven. Figuur 3 toont een typisch spiraalsterrenstelsel (M51). Langs de spiraalarmen worden grote hoeveelheden sterren gevormd en zijn er veel H II gebieden zichtbaar. In dezelfde figuur wordt ook NGC 604 getoond. Dit is een gigantische H II gebied in M33, een sterrenstelsel dichtbij onze Melkweg. De figuur laat zien hoe de afmeting van een sterrenstelsel zich verhoudt tot de afmeting van een H II gebied. Veel van het licht afkomstig van een stervormend sterrenstelsel is het resultaat van alle H II gebieden binnen het sterrenstelsel. Echter, de

meeste sterrenstelsels staan op grote afstanden van ons en daardoor is het onmogelijk om ze zo mooi in beeld te brengen zoals in Figuur 3. Meestal is een sterrenstelsel zelfs niet meer dan een vage lichtvlek omdat ze zo ver weg staan. Desondanks willen we de eigenschappen van sterrenstelsels begrijpen. Daarom bestuderen we H II gebieden in ons eigen sterrenstelsel waar we ze makkelijk kunnen waarnemen. Vervolgens proberen we deze informatie te generaliseren naar sterrenstelsels in het algemeen.

Iets dergelijks doen in wij in **Hoofdstuk 4**, waar we twee H II gebieden in het dichtbijzijnde sterrenstelsel NGC 6822 bestuderen. We bestuderen en modelleren de H II gebieden in het sterrenstelsel en gebruiken deze informatie om duizenden sterrenstelsels in het heelal te begrijpen. Eigenschappen van H II gebieden, zoals leeftijd, straal of afmeting en dichtheid van het omliggende medium, zijn belangrijk om te begrijpen hoe hoge massa sterren hun omgeving beïnvloeden, welke mechanismen verantwoordelijk zijn voor de uitdijning van het geïoniseerde gas en de link tussen stervormende sterrenstelsels en individuele H II gebieden. We selecteren twee H II gebieden in het sterrenstelsel NGC 6822 die in het verleden uitgebreid zijn bestudeerd: Hubble V en Hubble X.

Sterrenstelsels op grote afstand

Licht heeft een constante snelheid. Het licht dat afkomstig is van sterrenstelsels die zeer ver weg staan, heeft daarom een lange tijd nodig om ons te bereiken. Deze sterrenstelsels zien wij daarom zoals zij waren toen het licht bij hen vertrok. Het is daardoor mogelijk om de geschiedenis van het heelal waar te nemen door naar deze sterrenstelsels te kijken. Door dit te doen kunnen wij veel leren over de formatie en evolutie van sterrenstelsels, een onderwerp waar veel sterrenkundigen een grote hoeveelheid tijd en energie in stoppen. Het begrijpen van de eigenschappen van sterrenstelsels die ver weg staan en het begrijpen van overeenkomsten en verschillen met lokale sterrenstelsels is essentieel om de evolutie van sterrenstelsels te begrijpen en verklaren.

In **Hoofdstuk 5** en **6** doen we een poging om deze overeenkomsten en verschillen te begrijpen door middel van simpele principes en modellen. De verhoudingen tussen specifieke emissielijnen in het spectrum van een sterrenstelsel zijn hierbij belangrijke hulpmiddelen. De emissielijn ratios $[O III]/H\beta$ en $[N II]/H\alpha$ worden vaak gebruikt als een empirische methode om verschillende ionisatiemechanismen te kunnen onderscheiden. Bij de interpretatie van deze diagnostieken is het echter noodzakelijk om berekeningen te maken voor de interne structuur van de H II gebieden. Deze berekeningen zijn op hun beurt weer afhankelijk van de aannames die gemaakt worden over de relatieve bijdrages van stralingsdruk en stellaire winden.

Wij maken modellen van individuele H II gebieden zowel met als zonder stralingsdruk en stellaire winden in **Hoofdstuk 5**. In **Hoofdstuk 6** wordt vervolgens een populatie synthese-code beschreven die deze modellen gebruikt om een sterrenstelsel te simuleren met een verscheidenheid aan H II gebieden met verschillende eigenschappen. We laten zien dat emissielijn ratios op sterrenstelsel niveau sterk afhankelijk zijn van de exacte waarden voor de verschillende bepalende parameters. In sommige gevallen zijn emissielijn ratios te produceren die voorheen gestelde theoretische limieten overschrijden.

Een stukje van de puzzel

Dit proefschrift, net als vele andere werken in de wetenschap, heeft niet de verwachting dat het alle grote onopgeloste vragen in de sterrenkunde op zal lossen. Tot de volgende Galileo, Newton of Einstein opstaat om de natuurkundewereld te revolutioneren zal een simpele astronoom, zoals ikzelf, de grote problemen moeten opbreken in kleine vraagstukken. Het is echter altijd van belang het grotere geheel te blijven zien. Daarom hier een aantal van de belangrijkste vraagstukken in de sterrenkunde die te maken hebben met dit werk. Hoe vormen sterrenstelsels zich en hoe evolueren ze zich naar wat wij nu waarnemen in onze directe omgeving? Hoe vormen sterren zich in een sterrenstelsel? Wat bepaalt de massa van sterren?

Meer specifiek gerelateerd aan het werk beschreven in dit proefschrift is de vraag hoe zware sterren zich vormen en hoe ze hun omgeving beïnvloeden gedurende de geschiedenis van het heelal. Mijn kleine bijdrage bestaat uit het bestuderen van sommige aspecten van deze kosmische stervorminggeschiedenis en de manier waarop zware sterren de evolutie van sterrenstelsels sturen. We analyseerden hiervoor optische waarnemingen van stervormende sterrenstelsel en bepaalden de fysische eigenschappen van het gas in H II gebieden rond massieve sterren. Ook hebben wij de dynamische uitdijing van de H II gebieden door stralingsdruk en stellaire winden op numerieke wijze gesimuleerd. We hebben vergelijkingen gemaakt tussen voorspellingen op basis van theorie en numerieke simulaties en waarnemingen van zowel H II gebieden en interstellaire bellen.

