

Nederlandse Samenvatting

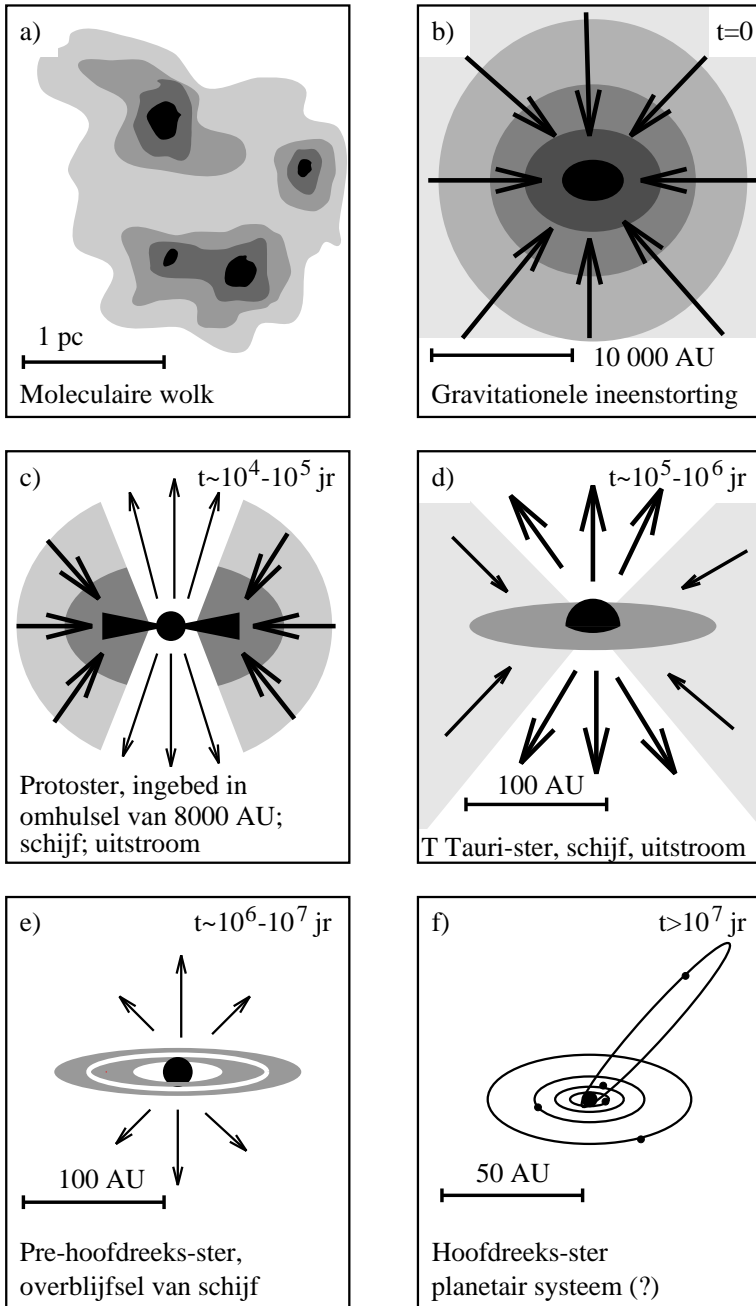
Het onderzoek in dit proefschrift concentreert zich op het warme gas dichtbij jonge pas gevormde sterren. De bestudeerde gebieden bevinden zich zowel in ons Melkwegstelsel als ook in ver verwijderde sterrenstelsels. Om dit gas waar te nemen is gebruik gemaakt van instrumenten aan boord van satellieten buiten de dampkring van onze aarde. Of zoals in de titel van mijn proefschrift is verwoord:

*Moleculaire vingerafdrukken van stervorming door het heelal
– een infrarood studie vanuit de ruimte –*

Een belangrijk deel van de sterrenjeugd vindt plaats in gebieden waar met het blote oog niets te zien is. Sterren worden geboren in dichte wolken van koud stof en gas die vrijwel geen zichtbaar licht doorlaten. De stofdeeltjes zijn kleine silicaat deeltjes zoals het zand aan het Noordzeestrand, maar dan veel kleiner. Het gas bestaat voornamelijk uit waterstof, de brandstof van sterren. Het stof neemt de energie van het zichtbare licht van de jonge sterren op, wordt warmer en straalt warmtestraling (infrarood licht) uit.

Het zichtbare licht dat wij mensen kunnen zien is maar een klein deel van het spectrum waaruit licht bestaat. Naast de zichtbare kleuren die we zien in een regenboog, bevinden zich röntgen (X-ray), ultraviolet (UV), en het voornoemde infrarood licht. Sommige dieren hebben ogen die gevoelig zijn voor UV of infrarood licht. De ogen van valken zijn bijvoorbeeld gevoelig voor ultraviolet licht om de urine-sporen van muizen te zien die sterk oplichten in het UV. Padden, adders en veel vissen kunnen infrarood licht zien zodat zij in het donker een prooi kunnen onderscheiden als die warmer is dan de omgeving.

Als wij mensen in het donker willen zien moeten we gebruik maken van instrumenten zoals nachtkijkers. Voor de bestudering van jonge sterren diep in grote stofwolken is dat echter niet voldoende. Ook infrarood camera's op grote telescopen zijn niet toereikend. Onze dampkring bestaat voor een groot gedeelte uit stoffen zoals waterdamp en koolstofdioxide. Deze moleculen absorberen heel efficiënt infrarood licht. Het gevolg is dat er vrijwel niets van de infrarood straling uit de ruimte op de aarde terecht komt. Om deze toch waar te kunnen nemen moeten we infrarood instrumenten in de ruimte buiten de dampkring van onze aarde plaatsen aan boord van satellieten.



Michiel Hogerheijde (1998, proefschrift), naar Shu, Adams, & Lizano (1987).

Figure 1 Een pictogram weergave van lage massa stervorming met aangegeven de typische tijdsfasen voor de verschillende stadia in de ontwikkeling van de ster en de bijbehorende afmetingen. AU staat voor astronomical unit en is gelijk aan de gemiddelde afstand van de aarde tot de zon, ongeveer 150 miljoen kilometer. Een pc (parsec) is gelijk aan ongeveer 206 duizend AU.

Kosmische kraamkamers

Sterren ontstaan in een grote variëteit van klein tot super groot en worden ruwweg ingedeeld in lage massa sterren en hoge massa sterren. Lage massa sterren hebben een massa en lichtsterkte tot een paar maal die van de zon (één zonsmassa = 2×10^{30} kg). Hoge massa sterren hebben massa's tot een aantal tientallen zonsmassa met een lichtsterkte tot wel honderd duizendmaal die van de zon.

De geboorte van een ster begint als een deel van een koude stof- en gaswolk ineens stort. Dit kan spontaan gebeuren als in een deel van de wolk een voldoende grote concentratie aan stof en gas is zodat dit deel van de wolk door zijn eigen zwaartekracht instort. Ook kunnen sterren gevormd worden als er een drukgolf door de wolk gaat die het gas en stof sterk samenperst. Zo'n drukgolf kan bijvoorbeeld afkomstig zijn van supernovae, massieve sterren die aan het eind van hun leven exploderen, dichtbij de wolk.

De meest extreme vorm van stervorming, een sterren geboortegolf, vindt plaats in de kernen van sommige sterrenstelsels. Als twee sterrenstelsels elkaar op korte afstand passeren of elkaar raken wordt het stof en gas sterk samengedrukt. Dit kan zo sterk zijn dat op vrijwel hetzelfde moment door het gehele stelsel sterren gevormd worden, dit noemen sterrenkundigen een *starburst*. Een extreme vorm van starburst activiteit vinden we in de centrale delen van ULIRGs (Ultra Luminous Infrared Galaxies, super heldere infrarode sterrenstelsels). ULIRGs komen meestal voort uit de botsing van twee sterrenstelsels waarbij vrijwel al het stof in het centrum wordt samengeperst en een extreme starburst ontstaat. ULIRGs behoren tot de meest heldere objecten in het gehele heelal, zo helder als honderden normale sterrenstelsels zoals ons Melkwegstelsel tezamen. Figuur 1.2 laat een bekende starburst, M82, zien. Deze laat een plaatje zien in voor ons zichtbaar licht (links) en een in infrarood licht (rechts). Links lijkt M82 een vrij normaal stelsel, echter het infrarood geeft een heel ander beeld. Daar zien we een enorme hoeveelheid gas dat door de starburst, veroorzaakt door de gravitationele inwerking van de grote broer M81, sterk verhit is en uit het stelsel wordt weggeblazen alsof het gehele stelsel explodeert.

Lage massa versus hoge massa jonge sterren

Het best bestudeerde scenario van stervorming is dat van lage massa sterren. Er zijn een paar eenvoudige redenen waarom dit zo is. De eerste is simpelweg dat de meeste sterren die gevormd worden een lage massa hebben. De tweede reden is dat de tijdsperiode waarover lage massa sterren gevormd worden (enkele miljoenen jaren) een factor tien langer is dan die voor hoge massa sterren. Jonge hoge massa sterren worden bovendien gedurende een relatief langere tijd omgeven door een dicht omhulsel van stof en gas. Hierdoor zijn de hoge massa jonge sterren zelf en hun directe omgeving moeilijker te bestuderen.

De groei van een lage massa ster doorloopt een viertal stadia. In het begin is de net gevormde ster geheel omgeven door een wolk van stof en gas. Doordat er altijd wel enige vorm van draaiing in de wolk aanwezig is vormt er zich een schijf van stof en gas om de ster. De nog aanwezige wolk wordt door sterwinden langzaam aan weggeblazen en de ster met schijf blijft over. In deze schijf kunnen zich later planeten vormen. Het overgebleven gas wordt als de ster bijna volwassen is als het ware uit de

schijf verdampt en een ster met mogelijk een planetenstelsel blijft over. Figuur 1 geeft een pictogram weergave van de verschillende ontwikkelingsstadia van een lage massa ster.

Een actuele vraag is of hoge massa sterren een vergelijkbare ontwikkeling doormaken. De laatste paar jaar zijn er aanwijzingen dat dit inderdaad het geval kan zijn. Een hoge massa ster heeft echter een veel sterker stralingsveld die inwerkt op zijn omgeving. Het kan dus zijn dat bij veel hoge massa sterren zich wel een schijf vormt, maar dat deze schijf ook snel weer vernietigd wordt.

Een belangrijk verschijnsel in de ontwikkeling van hoge massa sterren is de *hot-core* fase. De hot-core ontstaat door de inwerking van het sterke stralingsveld van de jonge massieve ster op de wolk om de ster. Hierdoor wordt het binnenste deel hiervan zeer heet, tot wel meer dan 1000 °C, en neemt de druk sterk toe. Deze combinatie van een hoge druk en een hoge temperatuur zorgt voor een bijzondere chemie waarbij de aanmaak van bepaalde moleculen zoals aceyleen en blauwzuur zeer groot is.

Chemische laboratoria

Stervormingsgebieden zijn als het ware super chemische fabrieken. De processen die zich afspelen in deze gebieden zijn zeer gevarieerd. Voordat sterren gevormd worden is de wolk zeer koud en bevinden veel van de moleculen, zoals water, koolstofdioxide, methaan, en koolstofmonoxide, zich in laagjes ijs op de stofdeeltjes. In deze ijslagen vinden reacties plaats tussen de moleculen en kunnen er grotere en complexere moleculen gevormd worden. Als een ster zich vormt en de wolk instort wordt deze van binnenuit door de ster opgewarmd. De ijslagen verdampen van de stofdeeltjes en de moleculen die zich in het ijs bevinden, het water, koolstofdioxide, methaan, koolstofmonoxide, en de complexere moleculen, veranderen zodoende de samenstelling van het gas. Bovendien veranderen bij het opwarmen de chemische reacties en worden er andere moleculen gemaakt dan op het koude ijsoppervlak op de stofdeeltjes.

Welke reacties overheersen hangt af van de plaats waar het ijs en gas zich bevindt. In gebieden die blootstaan aan de directe straling van de ster worden veel van de complexere moleculen weer afgebroken en vind je meer kleine moleculen en atomen, de bouwstenen waaruit moleculen zijn opgebouwd. In gebieden die afgeschermd worden maar wel voldoende verhit worden kunnen de moleculen overleven en vinden gas-fase reacties plaats die de aanwezigheid van bepaalde molecuulsoorten sterk verhogen. In gebieden die verder verwijderd of sterk afgeschermd zijn van het sterlicht wordt de temperatuur niet hoog genoeg om de ijslagen van het stof af te dampen. Ook kan gas dat bij hogere temperaturen van samenstelling veranderd is door turbulentie naar koudere gebieden getransporteerd worden waar het weer uit kan vriezen op de stofdeeltjes.

Een deel van het stof, ijs, en gas met de eenvoudige en ook complexe moleculen zal deel gaan uitmaken van planeten, hun manen, en de kometen. De samenstelling en verdere ontwikkeling van de planeten en hun manen zal dan ook sterk afhangen van waar deze gevormd worden. Zo bestaat de atmosfeer van Venus voor het grootste gedeelte uit koolstofdioxide met wolken van zwavelzuur. De atmosfeer van Titan, de grootste maan van Saturnus, bestaat voor een groot gedeelte uit stikstof en methaan, zoals de aardse oeratmosfeer er waarschijnlijk uit heeft gezien.

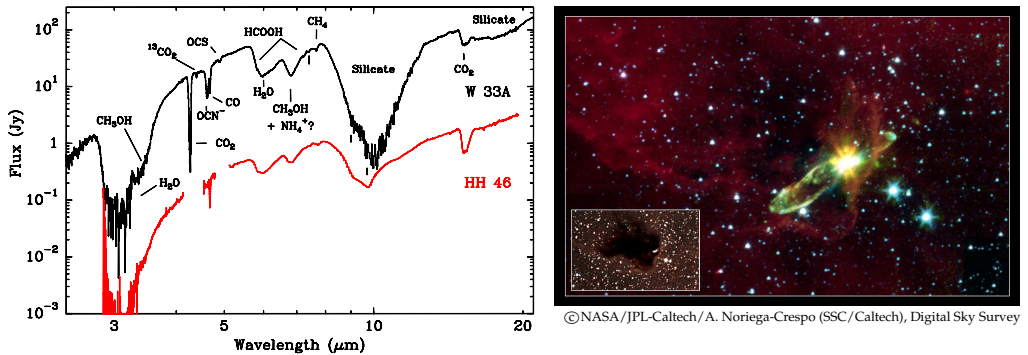


Figure 2 Links een deel van het ISO SWS spectrum van de massieve jonge ster W33A en een deel van het *Spitzer* IRS spectrum van de lage massa ster HH 46 plus spectra bij 3 en 4 μm van de grond. Met name het spectrum van W33A laat een grote verscheidenheid aan spectrale vingerafdrukken zien. Dit zijn absorptiebanden van silicaat stofdeeltjes en van moleculen in ijs, zoals water (H_2O), koolstofmonoxide (CO), koolstofdioxide (CO_2), en methaan (CH_4). Het rechter plaatje laat een *Spitzer* infrarode opname zien van HH 46 met gas weggeblazen van de jonge ster. Het kleine plaatje linksonder in beeld toont een opname in zichtbaar licht van hetzelfde gebied. Hier is alleen een donkere vlek, de wolk waarin HH 46 zich bevindt, te zien. De protooster zelf is onzichtbaar in zichtbaar licht.

Infrarood spectroscopie

Moleculen zijn opgebouwd uit atomen volgens een voor ieder molecuul unieke structuur. Deze structuur ligt vast, maar het molecuul kan wel vibreren, roteren, en uitrekken. Deze bewegingen zijn niet continue, maar vinden plaats in discrete stappen, van één toestand naar een andere. Als een molecuul in een andere toestand overgaat verandert zijn energietoestand. Deze energieverandering vindt plaats middels het uitzenden of absorberen van licht. De golflengte of kleur hiervan is direct gerelateerd aan de energieovergangen die verschillend zijn voor alle overgangen en voor verschillende moleculen.

Moleculen in gas en ijs die zich bevinden voor een sterk stralende achtergrond zien we over het algemeen in absorptie. Moleculen en atomen die zich niet voor een heldere achtergrond bevinden kunnen we, als ze genoeg verhit worden, in emissie zien doordat ze licht uitstralen. Aan de hand van de golflengte van de absorptie of emissie lijnen kunnen we bepalen welke moleculen er in het gas of het ijs aanwezig zijn. Uit de sterkte van verschillende lijnen van een molecuul of de vorm van een absorptieband (een golflengtegebied waar veel lijnen dicht bij elkaar liggen en niet afzonderlijk zijn waar te nemen) kunnen we afleiden hoeveel van die moleculen er zijn en welke temperatuur ze hebben.

Deze informatie gebruiken we vervolgens om uit te vinden wat de structuur, de dichtheid en de temperatuur, van de wolk is. De verhouding waarin de moleculen aanwezig zijn vertelt ons iets over de chemische en fysieke processen die zich afspelen in het gebied. Dit geeft ons dan weer informatie over de ontwikkelingsfase waarin het bestudeerde object zich bevindt.

Dit proefschrift

In dit proefschrift maak ik gebruik van twee infrarood instrumenten aan boord van twee verschillende satellieten. De eerste is de Short Wave Spectrometer (SWS), gebouwd in Groningen, aan boord van de Infrared Space Observatory (ISO) van de Europese ruimtevaart organisatie ESA. ISO was operationeel van eind 1995 tot midden 1998. Het tweede instrument is de Infrared Spectrograph (IRS) aan boord van de *Spitzer* ruimte telescoop. De *Spitzer* telescoop is gelanceerd op 25 Augustus 2003 en is nog steeds operationeel.

Met de SWS zijn spectra van massieve jonge sterren waargenomen die gebruikt zijn om moleculen te bestuderen die karakteristiek zijn voor de hot-cores, het hete compacte binnenste van de omhulsels om deze jonge sterren (Hoofdstuk 4). Deze zelfde moleculen zijn vervolgens bestudeerd in *Spitzer* spectra van geheel andere objecten. Als eerste was dat in het spectrum van IRS 46, een jonge lage massa ster (Hoofdstuk 7 en Figuur 1.3 in de introductie van dit proefschrift). Gebruikmakend van theoretische modellen kon worden aangetoond dat deze moleculen zich in het hete binnenste deel van de schijf om deze jonge ster bevinden, in het gebied waar zich later planeten kunnen vormen. Daarna werden dezelfde moleculen ontdekt in de spectra van kernen van super heldere sterrenstelsels (ULIRGs) op een afstand van meer dan honderd miljoen lichtjaar (één lichtjaar is 9.460.730.472.580.800 meter). In Hoofdstuk 8 worden deze spectra geanalyseerd en wordt aangetoond dat deze moleculen waarschijnlijk geassocieerd zijn met sterke stervorming, lokale starburst concentraties, verborgen in de compacte kernen van deze sterrenstelsels. In Hoofdstuk 5 en 6 worden spectrale lijnen van waterstof en atomen, waargenomen met *Spitzer* gebruikt voor het bestuderen van het gas om lage massa sterren. In Hoofdstuk 5 is dit het gas in de schijven rond deze sterren en in Hoofdstuk 6 in de omhulsels om nog jongere sterren waarbij de ster en de schijf nog niet zichtbaar zijn. De waargenomen lijnen worden gebruikt om te achterhalen welke processen een rol spelen bij het verwarmen van het gas om lage massa sterren.

De toekomst

De toekomst voor onderzoek aan stervormingsgebieden is zeer veelbelovend. Op dit moment zijn er meerdere grote projecten met infrarood en submillimeter (straling met een iets langere golflengte dan infrarood) instrumenten in ontwikkeling die in de komende tien jaar operationeel zullen zijn. Voor onderzoek in het verlengde van wat is gepresenteerd in dit proefschrift is het Mid-Infrared Instrument (MIRI) voor de James Webb ruimte telescoop van groot belang. MIRI bestrijkt ongeveer hetzelfde golflengtegebied als de *Spitzer* IRS maar heeft een nog grotere gevoeligheid, een grotere spiegel waardoor het kleinere ruimtelijke details waar kan nemen, en een grotere spectrale resolutie waardoor de spectrale lijnen en banden van de moleculen nauwkeuriger waargenomen kunnen worden. MIRI is nu in ontwikkeling en de James Webb ruimte telescoop wordt in 2013 gelanceerd.