



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Paving the path between low- and high-mass star formation : dynamics probed by Herschel far-infrared spectroscopy**

San Jose Garcia, I.

### **Citation**

San Jose Garcia, I. (2015, June 18). *Paving the path between low- and high-mass star formation : dynamics probed by Herschel far-infrared spectroscopy*. PhD Thesis. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/33224>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/33224>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/33224> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** San José García, Irene

**Title:** Paving the path between low- and high-mass star formation : dynamics probed by *Herschel* far-infrared spectroscopy

**Issue Date:** 2015-06-18

## De vorming van een ster

Op een donkere en heldere nacht vult het licht van miljarden twinkelende sterren vanuit het hele Universum het hemelgewelf. Deze hemellichamen hebben verschillende massa's, groottes, leeftijden en kunnen ook planeten zijn zoals de Aarde. Deze en andere intrinsieke eigenschappen worden bepaald tijdens hun groeiperiode, voordat ze volwassen sterren zijn, de zogenaamde jonge stellaire objecten.

Om de vorming van deze jonge objecten te bestuderen moeten we een stapje terug doen en eerst de feitelijke bakermat van sterren introduceren: de Gigantische Moleculaire Wolken. Dit zijn grote en koude gebieden in ons Melkwegstelsel en in andere sterrenstelsels die bestaan uit stof en gas met verschillende elementen en moleculen, zoals water, koolstof monoxide, etc., en filament (zie voor een voorbeeld Fig. 1). In bepaalde delen van de wolk is de dichtheid van materiaal zo groot dat de wolk in elkaar stort wat de oorzaak is van de vorming van kernen met grote dichtheden. Dit zijn de kiemen van toekomstige sterren waar de jonge stellaire objecten worden gevormd en zich zullen ontwikkelen.

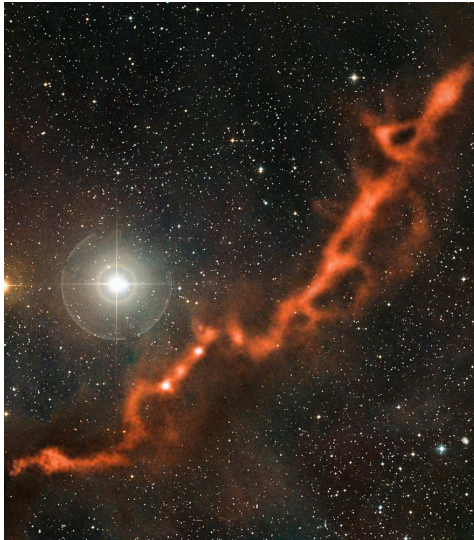
De evolutie en vorming van elk van deze objecten is echter sterk gerelateerd aan de aanvankelijke massa en er bestaat nog geen gestaafde, uitgebreide theorie over hoe sterren ontstaan. In plaats daarvan zijn hoofdzakelijk twee stervormingsroutes bestudeerd in het verleden: één richt zich op het verklaren van hoe sterren met een lage massa, zoals onze Zon, ontstaan en de andere op de zware sterren, met een massa van meer dan acht keer de zonsmassa.

## Lage-massa versus hoge-massa jonge stellaire objecten

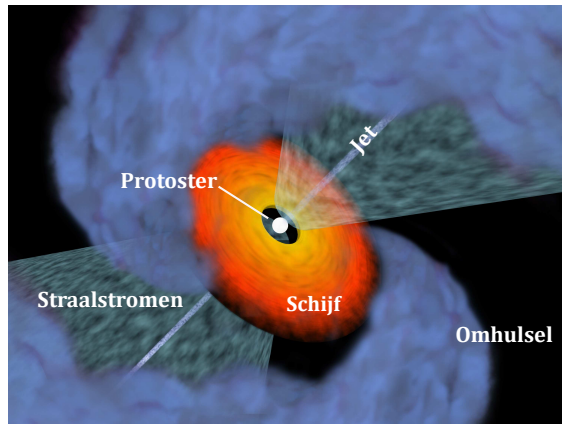
De vorming van zonsachtige sterren begint in het centrum van hoge dichtheid kernen die ineenstorten en waarbij een protoster ontstaat. In dat stadium is het jonge object ingebed in een dik en stofrijk omhulsel dat bestaat uit honderden verschillende moleculen zoals water, koolmonoxide (CO) en methanol. Een deel van het omringende gas wordt langzaam door de protoster opgenomen middels een schijf of wordt verwijderd door sterke energetische jets die loodrecht op de schijf staan. Deze jets boren een gat naar buiten door het omringende materiaal en vormen daarmee een kegelvormige holte. Het opgeveegde materiaal komt in de scheidingslaag terecht tussen de holte en de omringende wolk. De jet, holte en tussenlaag vormen samen de moleculaire straalstroom, een cruciaal onderdeel van het jonge stellaire object waar complexe fysische processen plaatsvinden en de gastemperatuur hoog kan oplopen. Figuur 2 illustreert de verschillende componenten van een jong stellair object. Dat is de reden dat moleculen zoals water en CO overal rondom het jonge object gevonden kunnen worden in de vaste en gasvormige fase.

Gedurende de evolutie van het jonge stellaire object blijft de centrale protoster een deel van het materiaal uit de schijf opnemen, de schijf groeit en wordt vlakker, en de kegelvormige holte van de moleculaire straalstromen wordt breder. Uiteindelijk dissipeert het omringende gasomhulsel volledig, stopt de protoster met het opnemen van gas en verdwijnen de jetstromen. Bovendien klonteren stofdeeltjes samen tot kiezelstenen en worden daarmee de bouwstenen van toekomstige planeten. Tot slot begint het centrale object waterstof te verbranden waarmee het een ster wordt zoals onze Zon.

Sterren met massa's tussen de twee en acht zonsmassa's vormen een categorie van sterren die een overgang vormen van de lage massa sterren (zie hierboven) naar de hoge massa sterren (zie hieronder). Dit type ster is in het verleden niet grondig bestudeerd omdat ze verder weg gelegen zijn dan lage-massa protosterren en minder helder zijn dan de hoge-massa objecten. Deze condities



Figuur 1: De Taurus moleculaire wolk: een gebied waar lage-massa sterren vormen dat zich op een afstand van 460 lichtjaar bevindt ten opzichte van de Zon ( $4.3 \times 10^{15}$  km of 29 miljoen keer de afstand van de Zon tot de Aarde). Credits voor het figuur: Hacar et al. (2013).



Figuur 2: Versimpelde schets van een jong stellair object met diens belangrijkste componenten: het omhulsel, de jet, schijf, protoster en moleculaire straalstromen. Stof en verschillende moleculen, zoals water en CO in de vaste en gasvormige fase, zijn aanwezig rondom het object. Credits voor het figuur: Murillo et al. (2013).

zorgen ervoor dat jonge stellaire objecten met een middelgrote massa een minder aantrekkelijk studieobject zijn vanuit het oogpunt van een waarnemer. Er is echter een aantal studies van zulke bronnen dat erop wijst dat hun structuur en evolutie vergelijkbaar is met dat van de lage-massa protosterren, maar met een grotere massa en omvang. Daarom kunnen de meeste objecten met een tussenliggende massa worden gezien als een opgeschaalde versie van de lage-massa tegenhangers.

Over hoe sterren met een hoge massa vormen wordt discussie gevoerd, er zijn twee belangrijke theorieën te onderscheiden, namelijk *turbulente kern groei* en *competitieve groei*. De eerste theorie bepleit een opgeschaalde versie van de lage-massa stervorming, maar dan beginnende vanuit zwaardere kernen met meer turbulentie. Dit impliceert grotere straalstromen en een groter centraal object, een warmer omhulsel en meer energetische jets als gevolg van de grote massa en hogere temperaturen van de vormende ster.

De tweede theorie is gebaseerd op de competitie van het beschikbare materiaal in de wolk rondom de verschillende sterren die gelijktijdig vormen. De meest massieve objecten worden geassocieerd met een groter gebied met beschikbaar materiaal dat in de vormende ster kan worden

verwerkt. Daardoor worden zij nog zwaarder en vergroten dus het bereik van het materiaal dat betrokken is bij de ster. Daarnaast is het zo dat de jonge stellaire objecten in de gebieden met de grootste dichtheid in de wolk een grotere hoeveelheid gas tot hun beschikking hebben staan en daarom is de kans groter dat dit zwaardere objecten worden. Als gevolg hiervan kan de grootte van het bereik van materiaal variëren tijdens de evolutie van een object.

Het gebrek aan overeenstemming over de ontstaansgeschiedenis van hoge-massa jonge stellaire objecten gaat gepaard met een slecht begrepen evolutionair pad. De evolutie in de eerste fase van de stervorming kan niet ondubbelzinnig worden bestudeerd, deels omdat de tussenliggende fases gelijktijdig kunnen plaatsvinden in de gebieden waar hoge-massa stervorming plaatsvindt en deels omdat het waarnemen van deze objecten een uitdaging is als gevolg van de grote afstand.

Samenvattend is lage-massa stervorming een beter begrepen scenario dan dat van hoge-massa sterren. Dit hangt samen met het feit dat er een groter aantal lage-massa objecten bekend is, dat deze zich kleinere afstanden te vinden zijn en dat zij door minder andere objecten omgeven worden dan de massieve analogen. Bovendien genereren zwaardere objecten sterkere UV straling en stellaire winden dan de lage-massa variant. Deze straling is energetisch genoeg om een extra druk te genereren die, samen met de sterke wind, het vormingsproces tot stilstand kunnen brengen en het gas omhulsel kan dissiperen.

Het grote aantal verschillen lijkt op het eerste oog de zoektocht naar mogelijke overeenkomsten tussen lage en hoge-massa jonge stellaire objecten te ontmoedigen en lijkt aan te geven dat hoge-massa objecten niet kunnen worden beschouwd als opgeschaalde versies van de lage-massa analogen. Niettemin suggereert de aanwezigheid van gemeenschappelijke kenmerken, zoals straalstromen of schijven en de bepaling van verschillende relaties die gelden voor zowel lage- als hoge-massa objecten dat vergelijkbare processen optreden tijdens de vorming van de twee types sterren, onafhankelijk van de massa. Deze processen zijn belangrijk genoeg om te overheersen over de inherent aanwezige verschillen tussen de objecten. Daarom kan de studie van stervormingsprocessen als functie van massa profiteren van het algehele begrip in dit vakgebied. Voorts kunnen we de kennis over hoe lage massa sterren vormen gebruiken om beter te begrijpen hoe de massieve tegenhangers vormen. Dit zou kunnen helpen om onderscheid te maken tussen de twee verschillende theorieën. Anderzijds kunnen we van de hoge-massa stervorming leren hoe de aanwezigheid van andere objecten in de directe omgeving de vorming van sterren beïnvloedt en dit meenemen in het scenario voor lage-massa stervorming.

Binnen deze context is het doel van dit proefschrift om een link te vinden tussen lage- en hoge-massa jonge stellaire objecten en zo enig licht te werpen op de stervormingsprocessen als een functie van massa. In het bijzonder richt dit werk zich op het nagaan van de fysische condities van het warme moleculaire gas in de binnenste gebieden van het omhulsel dichtbij de vormende ster. Ook wordt gekeken of deze condities veranderen met de massa van de vormende ster. Aangezien er in deze gebieden verschillende soorten moleculen in de gasfase aanwezig zijn bestuderen wij water en CO, omdat met hun uitgezonden licht de energetische processen onomstotelijk kunnen worden vastgesteld. Hierbij moet gedacht worden aan schokken in de straalstromen die de versnelling van materiaal veroorzaken, maar ook aan de snelheidsstructuur van het gas dat in de binnenste gebieden van het omhulsel en straalstromen aanwezig is. Om te bestuderen hoe de massa van een centraal object deze processen en condities beïnvloedt zijn deze twee moleculen in 51 jonge stellaire objecten waargenomen. Hiervan zijn 26 objecten lage-massa protosterren, 6 hebben een tussenliggende massa en 19 een hoge massa. Deze groep omvat een groot bereik aan massa's en type objecten met een verschillend evolutionair stadium.

## Sub-millimeter waarnemingen: *Herschel* en WISH

Het type faciliteiten dat de emissie van gas in de binnenste gebieden van jonge stellaire objecten kan vastleggen zijn sub-millimeter telescopen. Het gaat om licht dat onze ogen niet kunnen waarnemen. Zulke telescopen zijn op twee manieren gebouwd: óf ze geven de voorrang aan waarnemingen van grote gebieden en structuren óf ze bevatten informatie over kleine regio's. In dit proefschrift wordt gebruik gemaakt van het eerste type, dat een *enkele spiegel telescoop* heet,



Figuur 3: Van links naar rechts: de twee sub-millimeter telescopen JCMT en APEX en de ruimtetelescoop *Herschel*.

omdat het daarmee mogelijk is om op grote schaal gebieden van de jonge stellaire objecten waar te nemen zonder informatie te verliezen over de kleinschalige gebieden die bestudeerd worden aan de hand van de emissie van water en CO. Voorbeelden van zulke telescopen zijn te zien in Fig. 3.

Door de aanwezigheid van water in onze Aardse atmosfeer moet de emissie van dit molecuul in de gasfase worden waargenomen vanuit de ruimte. Daarom is de ruimtetelescoop *Herschel* in mei 2009 gelanceerd met als doel om objecten rijk in stof te bestuderen, zoals de geboorteplekken van sterren, verspreid over het heelal. Dit alles met een grotere gevoeligheid en resolutie dan het geval was in voorgaande missies. Van de drie instrumenten aan boord van de telescoop presenteren wij hier waarnemingen die verkregen zijn met het zogenaamde ‘Heterodyne Instrument for the Far Infrared (HIFI)’, gebouwd onder leiding van SRON Netherlands Institute for Space Research. De data genomen met dit instrument zorgen ervoor dat de snelheidsinformatie van het waargenomen gas kan worden gebruikt om het snel bewegende materiaal te onderscheiden van het kalmere gas dat zich waarschijnlijk in verschillende gebieden rondom het jonge stellaire object bevindt. De analyse die de emissie van verschillende moleculen relateert aan gas bij verschillende temperaturen geeft een uitgebreid beeld van de eigenschappen en condities van deze objecten die uiteindelijk sterren zullen vormen.

Een grote internationale samenwerking van wetenschappers dat gegarandeerd waarneemtijd van *Herschel* heeft gekregen is het “Water In Star-forming regions with *Herschel*” (WISH) programma. Het doel van WISH is om de fysische en chemische condities te onderzoeken van meer dan 80 jonge stellaire objecten met verschillende massa’s en evolutionaire stadia door water en gerelateerde moleculen waar te nemen. Daarnaast is gebruik gemaakt van andere vervolgpogramma’s van *Herschel* zoals het “William *Herschel* Line Legacy” overzicht (WILL) en het “Water emission from outflows and hot cores in the Cygnus X protostars” programma, die de WISH studies hebben uitgebreid naar een groter en meer standaard groep van 131 jonge stellaire objecten. Het doel is om de significantie te testen van de resultaten die behaald zijn in het WISH programma door de statistiek van dit werk te verbeteren.

## Bijdrage van dit werk

Dit proefschrift presenteert de resultaten van de analyse van water en CO waarnemingen van 51 WISH jonge stellaire objecten, een groep dat een groot bereik aan massa’s omvat. Hoofdstuk 2 richt zich op de studie van de hoog frequente CO emissie, dat voornamelijk het warme materiaal van de tussenliggende lagen in de straalstromen traceert waar het gas wordt meegevoerd vanuit de envelop. Het waargenomen CO emissie profiel is vergelijkbaar tussen lage- en hoge-massa objecten, maar de intensiteit schaalst met de massa. Dit suggereert dat de gassnelheid en eigenschappen niet veranderen binnen de bestudeerde groep objecten en alleen de hoeveelheid materiaal dat afgetast wordt neemt toe voor zwaardere jonge stellaire objecten.

De snelheidsstructuur van het omhulsel is onderzocht van zowel lage- als hoge massa objecten in hoofdstuk 3. De belangrijkste conclusies van dit werk zijn dat voor alle jonge stellaire objecten het materiaal waaruit het omhulsel wordt opgebouwd zowel in de richting van het centrale vor-

mende object beweegt (het valt in de richting van het centrum), als ook rondom hun eigen positie volgens een systeem van chaotische bewegingen, genaamd turbulentie. Het niveau van turbulentie schaal met de massa.

In hoofdstuk 4 worden de uitkomsten van de analyse van de watermoleculen gepresenteerd en vergeleken met die van CO. Watermoleculen peilen éénduidig het geschokte materiaal in de straalstromen, dat het grootste percentage van gasfase water emissie opmaakt. Dit gas beweegt met vergelijkbare snelheden in alle jonge stellaire objecten, wat suggereert dat de fysische eigenschappen van deze schokken die optreden langs de straalstroom onafhankelijk zijn van de massa van de centrale vormende ster. Bovendien lijkt het warmere CO gas te bewegen met vergelijkbare snelheden als het materiaal dat getraceerd wordt door water voor zowel lage- als hoge-massa objecten. Dit CO gas bevindt zich dicht bij de gebieden die door de straling en wind van het centrale object worden beïnvloed. Voor lage-massa protosterren is de snelheidsstructuur van de buitengebieden van het meegevoerde CO gas echter verschillend van het geschokte gas dat door watermoleculen wordt gepuild. Dit is niet het geval voor de massievere tegenhangers. Dit verschil tussen lage- en hoge-massa objecten kan gerelateerd zijn aan de sterkere straling en stellaire winden die aanwezig zijn bij hoge-massa objecten vergeleken met lage-massa protosterren. Net als voor CO schaal de intensiteit van de water emissie ook met de massa van het omhulsel voor het gehele bereik aan massa dat door de WISH objecten wordt omvat.

Alle WISH resultaten worden bevestigd door de water en CO waarnemingen van de WILL en Cygnus programma's in hoofdstuk 5. Dit werk breidt de conclusies uit naar een breder en meer uniform verdeelde groep van jonge stellaire objecten. Het omvat een groter aantal objecten met een tussenliggende massa, waardoor het gat in massabereik dat in de eerdere hoofdstukken aanwezig was opgevuld wordt.

Tot slot, de opgeschaalde hypothese is geldig wanneer de fysische eigenschappen van het materiaal dicht in de buurt van de vormende ster worden beschouwd. De verschillen tussen lage- en hoge-massa objecten lijkt belangrijker te worden wanneer gas wordt vergeleken dat ver verwijderd is van het centrale object en daarom een lagere temperatuur heeft.

Dit werk draagt bij aan een beter begrip van de verschillen en overeenkomsten tussen lage- en hoge-massa jonge stellaire objecten waarmee een algeheel beeld kan worden gevormd van het ster-vormingsproces. Huidige telescopen als ook toekomstige generaties van waarnemstations kunnen de routes die de evolutie beschrijven van lage-, tussenliggende en hoge-massa jonge stellaire objecten verder onderzoeken en in het bijzonder of zij overeenkomen of juist ver uiteen liggen.

