



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Protostellar jets and planet-forming disks: Witnessing the formation of Solar System analogues with interferometry

Tychoniec, Ł.

### Citation

Tychoniec, Ł. (2021, March 9). *Protostellar jets and planet-forming disks: Witnessing the formation of Solar System analogues with interferometry*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3147349>

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/1887/3147349>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/3147349> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Tychoniec, Ł.

**Title:** Protostellar jets and planet-forming disks: Witnessing the formation of Solar System analogues with interferometry

**Issue date:** 2021-03-09

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

## Hoe worden sterren en planeten gevormd?

De nieuwsgierigheid naar hoe de Aarde, planeten en de Zon zijn gevormd geeft een constante drang naar nieuwe astronomische ontdekkingen. Het is geen verrassing dat we met elke nieuwe technologische ontwikkeling - beginnende bij een simpele handtelescoop ontwikkeld door Lippershey en gebruikt door Galileo, tot de Very Large Telescope met een diameter van 8 meter en de 66 radio antennes van de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array - proberen te leren over onze herkomst door naar de hemel te kijken. De ontdekkingen van de afgelopen 30 jaar hebben laten zien dat ons zonnestelsel slechts één voorbeeld is van de vele planetenstelsels rondom andere sterren, met meer dan 4000 planeten die tot op heden ontdekt zijn. Om uit te vinden hoe deze planeten gevormd worden is het niet genoeg om alleen planeten waar te nemen die al geboren zijn, maar is het ook essentieel om onze telescopen te richten op de geboorteplaatsen van sterren en planeten: moleculaire wolken.



**Figuur 1:** *Links:* *Spitzer* samengestelde afbeelding van het NGC1333 stervormingscomplex in de Perseus moleculaire wolk. Kleuren representeren verschillende golflengtes van de waarnemingen:  $3.6\ \mu\text{m}$  (blauw),  $4.5\ \mu\text{m}$  (groen),  $5.8\ \mu\text{m}$  (oranje),  $8.0\ \mu\text{m}$  (rood). Auteursrechten figuur: NASA/JPL-Caltech/R. A. Gutermuth (Harvard-Smithsonian CfA). *Rechts:* Afbeelding van hetzelfde gebied in het optisch in een blauwe, groene en rode filter. Auteursrechten figuur: Robert Franke.

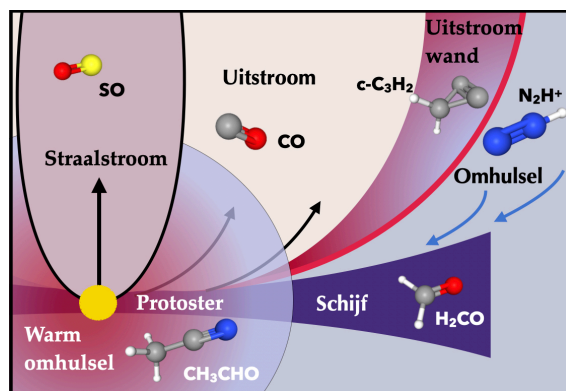
Er is de afgelopen jaren genoeg bewijs gevonden dat de vorming van planeten heel snel van start gaat op een kosmische tijdschaal. In dit proefschrift zal ik bewijs leveren dat het vormen van planeten al in de eerste 100 000 jaar na het begin van stervormingsproces moet beginnen. Dit is slechts een oogwenk vergeleken met de leeftijd van onze Zon: 4.6 miljard jaar. Dit heeft belangrijke implicaties: om te begrijpen wat het planeetvormingsproces beïnvloed en onder welke condities ze vormen moeten we zeer jonge sterren waarnemen. De condities in dit soort systemen zijn alles behalve kalm en rustig: krachtige supersonische straalstromen worden gelanceerd vanuit de ster en schijf, en de temperatuur is hoog doordat een hoop gas nog steeds op de ster valt. De chemische compositie wordt hevig beïnvloed door deze omgeving. Een voorbeeld van een jong stervormingsgebied is de Perseus moleculaire wolk, met een van de meeste spectaculaire wolken, NGC1333, uitgebeeld in Fig. 1.

Als we de herkomst van complexe organische moleculen en prebiotische moleculen op Aarde willen ontdekken moeten de eerste 100 000 jaar van de stervormingscyclus bestuderen. Deze fase, waarin de ster geboren wordt, heet de protostellaire fase en is de focus van dit proefschrift.

## Waarnemingen van jonge sterren

Jonge sterren zijn diep gelegen in de stoffige wolken waaruit ze worden gevormd. Dit betekent dat zelfs de meest krachtige optische telescopen niet goed geschikt zijn om ze te observeren door de zware extinctie. Een andere factor die waarnemingen van jonge sterren niet eenvoudiger maakt is dat de geboorteplaatsen van sterren koud zijn. De aard van licht (elektromagnetische golven) is zo dat de Zon met een oppervlakte temperatuur van 5400 K helder schijnt in het optische bereik. Daarentegen kan licht van protosterren gekarakteriseerd worden met een temperatuur van 30 - 500 K, wat betekent dat ze het meeste licht uitstralen op langere golflengtes dan de Zon - in het infrarood en submillimeter regime van het elektromagnetische spectrum. Daarom worden in dit proefschrift observatoria gebruikt die werken bij submillimeter en centimeter golflengtes zoals de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) en Very Large Array (VLA). Dit zijn interferometrische faciliteiten, hetgeen betekent dat ze het signaal van meerdere antennes combineren om tot een resolutie te komen die equivalent is aan die van een enkelvoudige schotel met een even grote diameter als de afstand tussen de antennes.

Thermische straling van koud stof rondom protosterren manifesteert zich breedbandig, over een groot golflengtebereik. Spectroscopie, aan de andere kant, focuseert zich op discrete pieken en dalen in het licht en is een uniek hulpmiddel om de chemie en fysica in zulke gebieden te bestuderen. Het submillimeter bereik is rijk aan moleculaire rotatie spectraallijnen die informatie geven over de abundanties van moleculen en de energie die ze bezitten. Wat cruciaal is, is dat verschillende moleculen te vinden zijn onder verschillende fysische condities. Met deze kennis kunnen we een protostellair systeem ontleden in meerdere componenten en moleculen daarmee associëren (zie Fig. 2). In dit proefschrift worden continuüm waarnemingen gebruikt om de thermische straling van stof in protoplanetaire schijven en de omhullende wolk van jonge protosterren te bestuderen, en spectroscopie om de moleculaire emissie van het gas in verschillende delen van het protostellaire systeem te analyseren.



**Figuur 2:** Cartoon die de verschillende fysische componenten van een protostellair systeem illustreert. Pijlen geven de richting van bewegend materiaal weer; de protostellaire straalstroom verrijst in het binnenste gebied van het systeem, maar niet exclusief vanuit de protoster zelf. Voorbeelden van moleculen die goed geassocieerd kunnen worden met de verschillende componenten zijn uitgelicht. Molecuul figuren zijn afkomstig uit: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.

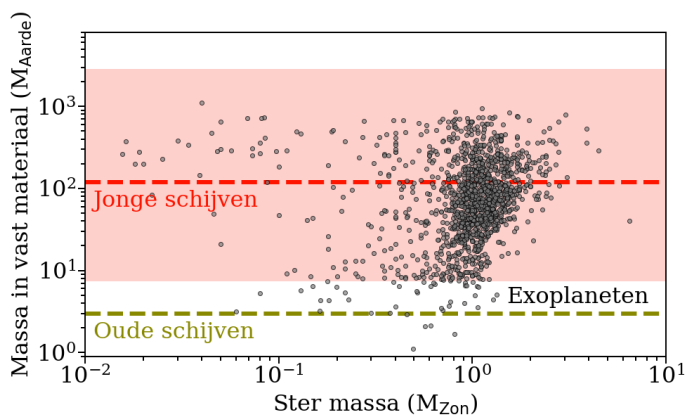
## Protostellaire straalstromen en schijven

In dit proefschrift ligt de focus op het karakteriseren van de verschillende componenten van protostellaire systemen, in het bijzonder de straalstromen en schijven. Straalstromen bestaan uit gas dat met hoge snelheid (tientallen tot honderden kilometers per seconde) vanuit het binnenste gedeelte van het protostellaire systeem worden gelanceerd. Tijdens de ineenstorting van de wolk gaat het materiaal sneller ronddraaien doordat impulsmoment behouden is. Een deel van deze overmaat aan rotatie-energie komt vrij in hoge-snelheid straalstromen. Omdat de snelheden waarmee deze straalstromen zich bewegen zeer supersonisch zijn, ontstaan er schokken met het omringend materiaal die tot gevolg hebben dat de condities zoals temperatuur en dichtheid drastisch veranderen. Straalstromen zijn omringd door een langzamere en bredere lage-snelheid uitstroom. Deze bestaat voornamelijk uit materiaal uit de omhullende wolk dat wordt meegesleurd door de straalstroom. Het bestuderen van jonge straalstromen kan informatie geven over de compositie van het gelanceerde materiaal in het binnenste deel van de schijf en de impact die schokken kunnen hebben op de chemische compositie van het gehele systeem.

Het sneller ronddraaien van materiaal in de ineenstortende wolk zorgt ervoor dat het materiaal dicht bij de ster wordt platgedrukt tot een schijfachtige structuur. In die schijven wordt het proces van planeetvorming geïnitieerd door het botsen en samenvoegen van kleine stofdeeltjes. Deze stofdeeltjes zijn gecoat met een laag ijs dat voornamelijk, maar niet alleen, bestaat uit water. Andere moleculen zoals CO (koolmonoxide) kunnen ook vanuit het gas bevriezen op de stofdeeltjes en daar omgezet naar moleculen zoals CH<sub>3</sub>OH (methanol) en H<sub>2</sub>CO (formaldehyde).

Als de samenstelling van deze ijzen bekend is weten we wat het bouw materiaal van de kernen van planeten is. Of een molecuul zich in de gasfase of in het ijs bevindt is afhankelijk van de temperatuur: water bevriest op de stofdeeltjes beneden 100 K en CO beneden 20 K. De temperatuur van de schijf neemt af met toenemende afstand tot de protoster en de laag

waarbuiten een bepaald molecuul zich vooral in het ijs bevindt wordt de ijslijn genoemd. Deze ijslijnen spelen een belangrijke rol bij het vormen van planeten aangezien ze kunnen zorgen voor een opeenstapeling van stofdeeltjes, maar ook omdat ze de chemische samenstelling van de bouwstenen van planeten effectief kunnen veranderen. Gemeten massa's van oudere schijven laten zien dat, als de omliggende wolk verdwenen is, er niet genoeg massa is om planeten te maken. Betekent dit dat planeten al eerder beginnen te vormen? Er zijn meerdere bewijzen hiervoor: meteorieten in ons zonnestelsel zijn onderverdeeld in twee categorieën tussen het binnenste en buitenste deel, alsof een zware planeet vroeg gevormd was en deze twee categorieën gescheiden hield. Tevens is waargenomen dat stofdeeltjes snel groeien in schijven.



**Figuur 3:** Figuur die de distributie van massa's van de rotsachtige kernen van exoplanetaire systemen rondom hoofdreekssterren met een gemeten massa (gehaald van exoplanet.eu) laat zien. Het rood gearceerde gebied laat het bereik zien van beste schatting van stofschijfmassa's in de Perseus moleculaire wolk, met de mediaan weergegeven als de rood gestreepte lijn. De mediaan van de stofmassa's van oudere schijven is weergegeven als de geel gestreepte lijn.

## Dit proefschrift

Dit proefschrift presenteert waarnemingen die de vroegste stadia van ster- en planeetvorming karakteriseren. In Hoofdstuk 2 gebruiken we observaties met de VLA op 4 en 6.4 cm van 100 protosterren in de Perseus moleculaire wolk om de geïoniseerde straalstroom component te bestuderen. We laten zien dat eigenschappen van de geïoniseerde straalstroom gelinkt zijn aan de stellaire eigenschappen. Voor deze grote groep bronnen gebruiken we de informatie over de straalstroom om de metingen van schijfmassa's op lagere golflengtes te corrigeren voor deze component. Dit maakte het voor het eerst mogelijk om de massa van jonge schijven te meten en te vergelijken met die van oudere schijven, en leidde tot de volgende vraag: is er genoeg massa beschikbaar in de jongste schijven om planeten te vormen?

We vervolgen deze vraag in Hoofdstuk 3 waar we waarnemingen van ALMA en VLA combineren om het stof in jonge schijven te karakteriseren. Door het vergelijken van de stofmassa's van jonge schijven met exoplanetaire systemen laten we zien dat gasreuzen gevormd kunnen (en moeten) worden in de vroegste stadia. Dit resultaat is uitgelicht in Fig. 3:

waargenomen rotsachtige kernen van exoplaneten hebben veel grotere massa's dan oude stofschijven, maar de massa's zijn vergelijkbaar met die van jongere schijven.

In Hoofdstuk 4 onderzoeken we de chemische compositie van de hoge-snelheid straalstromen afkomstig van meerdere protosterren in de Serpens moleculaire wolk. We bevestigen dat de C/O ratio van de straalstroom lager is dan die van de omhullende wolk; dit laat zien dat het bestuderen van jonge straalstromen potentieel cruciaal kan zijn om de binnenste regio's van de schijf te kunnen bestuderen. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van welke moleculen voorkomen in welke fysische componenten van protostellaire systemen. ALMA waarnemingen van een tiental protosterren maakt het mogelijk om de verschillende componenten te onderscheiden. Dit kan ook gebruikt worden om de temperatuur (bijvoorbeeld door  $\text{DC}^+\text{O}^+$  en  $\text{N}_2\text{D}^+$  voor koud gas) of de oorsprong van hoog-energetische straling ( $\text{C}_2\text{H}$  en CN als producten van UV-gedomineerde chemie) te bepalen.

Dit proefschrift kan als volgt worden samengevat: planeetvorming begint vroeg, in de eerste 0.1 miljoen jaar van het leven van de ster, in zeer jonge schijven. Het karakteriseren van deze jonge systemen is essentieel voor het begrijpen van de condities van planeetvorming. Interferometrische waarnemingen van moleculen op schalen van het zonnestelsel zijn ongelooflijk behulpzaam om deze condities te beschrijven. Moleculaire straalstromen, waarvan we laten zien dat ze heel gebruikelijk zijn in jonge systemen, kunnen bijzonder belangrijk zijn om uit te vinden wat er zich afspeelt in de binnenste gebieden van jonge systemen.

## Toekomstperspectief

Waarnemers van jonge protostellaire systemen gaan een mooie toekomst tegemoet: ALMA is nu op volle snelheid en laat al zijn fantastische capaciteiten zien die ons in staat stellen om jonge protosterren en hun schijven op te lossen op schalen van het zonnestelsel. ALMA is in het bijzonder geschikt om jonge straalstromen te karakteriseren die ook het geheim van de chemische samenstelling van de binnenste delen van de schijf in zich dragen. Een revolutie is aanstaande met de JWST telescoop, de grootste schotel die ooit gelanceerd wordt in de ruimte. In het bijzonder zal het MIRI instrument protosterren karakteriseren met vergelijkbare resolutie als ALMA in het 5-28 micron golflengtebereik, wat onbereikbaar is vanaf de grond, en daarmee zowel het hete gas als de ijscompositie onthullen. Gecombineerd met informatie van ALMA over de condities, samenstelling en bewegingen van het koudere gas hebben we binnenkort de duidelijkste blik ooit op het begin van het planeetvormingsproces.

