



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## The demographics of protoplanetary disks: from Lupus to Orion

Terwisga, S.E. van

### Citation

Terwisga, S. E. van. (2019, December 11). *The demographics of protoplanetary disks: from Lupus to Orion*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/81573>

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/1887/81573>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The following handle holds various files of this Leiden University dissertation:  
<http://hdl.handle.net/1887/81573>

**Author:** Terwisga, S.E. van

**Title:** The demographics of protoplanetary disks: from Lupus to Orion

**Issue Date:** 2019-12-11

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

Hoe ontstaat een planeet als de Aarde? Of, iets algemener, hoe ontstaat een zonnestelsel als het onze – en hoe kunnen we de uiteindelijke architectuur van een planetenstelsel verbinden met de eigenschappen van het materiaal dat rondom jonge sterren wordt waargenomen? Dit is, in de breedste zin, de vraag die aan de basis ligt van het onderzoek naar protoplanetaire schijven en dus ook aan dit proefschrift.

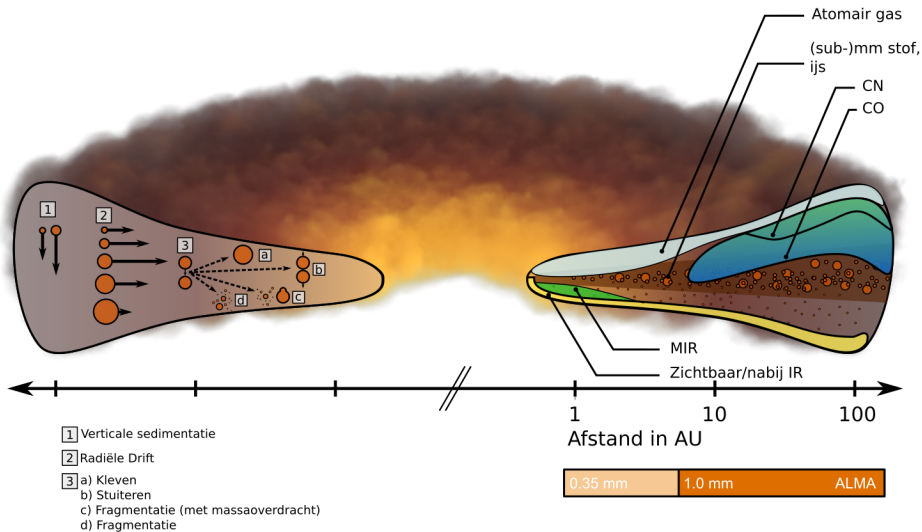
Dit soort vragen zijn heel oud: ze komen terug in scheppingsmythen over de hele wereld. Het is dus ook niet zo verwonderlijk dat ook de astronomen van de zeventiende eeuw, zoals Christiaan Huygens, zich bezighielden met “den oorsprong der Hairstarren [kometen] als mede van de Dwaalstarren, en van de Wereld”. Wat Huygens’ behandeling van deze vragen interessant maakt is zijn conclusie dat er met de middelen van zijn tijd geen goed antwoord op te geven was. Vanuit de huidige wetenschap moeten we hem daar gelijk in geven. Maar de sterrenkunde is bij uitstek een vakgebied dat door waarnemingen wordt gedreven. Het ontwikkelen en verfijnen van telescopen en lenzen om met het blote oog door te kijken was in Huygens’ tijd revolutionair; in de 21ste eeuw heeft de ontwikkeling van infrarood- en submillimeter-telescopen gezorgd voor een enorme sprong in het vermogen van astronomie om onderzoek te doen naar de koude, donkere omgevingen waarin planetenstelsels ontstaan. Wat echter ook niet onderschat moet worden, is het verschil in wereldbeeld tussen de moderne astronomie en dat in Huygens’ tijd. Zijn heelal was – een enkele komeet of nova daargelaten – nogal statisch, en het ontstaan van planeten was letterlijk buiten bereik. Tegenwoordig weten we dat het ontstaan van sterren en van planeten om die sterren een proces is dat nog steeds gaande is.

De vraag die hierboven gesteld werd is natuurlijk te breed om in een korte samenvatting te beantwoorden. Dit proefschrift gaat daarom uit van een specifiekere vraag: wat kunnen we leren over de evolutie van protoplanetaire schijven, en in het bijzonder van hun massa en structuur, door te kijken vanuit het perspectief van populaties? Om deze vraag te beantwoorden, is het eerst handig om kort te kijken naar de structuur van een protoplanetaire schijf in het algemeen en naar de manier waarop sterren vormen in de Melkweg. Het blijkt namelijk zo te zijn dat we, met de juiste telescoop, daadwerkelijk kunnen beginnen aan een demografische aanpak als deze.

## Protoplanetaire schijven

Wat is een protoplanetaire schijf eigenlijk – en waarom een schijf en geen bol, of iets dergelijks? Het ontstaan van een ster begint als een wolk stof en gas onder zijn eigen zwaartekracht samentrekt en, van binnen naar buiten, ineenstort. In het midden van de wolk ontstaat een protoster. Maar niet al het materiaal in de wolk kan naar het zwaartepunt vallen: de wolk draait gemiddeld een klein beetje rond, en die draaiing gaat moeilijk weg. Formeel gezegd blijft het hoekmoment van de wolk behouden. Het gevolg is dat er een schijf ontstaat van

om de ster draaiend gas en stof: een protoplanetaire schijf. De rest van de wolk verdwijnt, in de loop van ongeveer een half miljoen jaar, in de schijf en ster of in de interstellaire ruimte. Daarna is echter de protoplanetaire schijf nog een paar miljoen jaar zichtbaar om de ster, totdat ook de schijf verdwijnt en er alleen een planetenstelsel, kometen en wat overgebleven stof om de ster over zijn.



**Figuur 1:** Schematisch overzicht van de evolutie van stofdeeltjes (*links*) in een protoplanetaire schijf, en van de delen van de schijf die met verschillende golflengtes kunnen worden waargenomen (*rechts*). Figuur aangepast uit Testi et al. (2014)

De naam 'schijf' doet de complexe structuur van deze objecten niet veel eer aan. Zoals te zien is in Figuur 1 is een protoplanetaire schijf niet vlak, maar wordt hij hoger verder van de ster. Naar binnen en boven toe is de schijf warmer. Bovendien neemt de dichtheid naar buiten toe af. Het is geen verrassing dat het gas in de schijf dus ook niet overal dezelfde samenstelling heeft. Moleculair waterstof,  $H_2$ , domineert de totale massa van de schijf, maar is moeilijk waar te nemen. Koolmonoxide, CO, is met ALMA wél goed waarneembaar, maar bevriest in het midden van de schijf, waar het donker en koud genoeg (minder dan 20 K) is. Te hoog in de schijf kan de felle ultraviolette (UV) straling van de jonge ster door het ijlere stof en gas dringen en wordt CO vernietigd; maar diezelfde UV-straling zorgt ook indirect voor de productie van andere moleculen, zoals het cyanide-radicaal (CN), dat zich in vergelijking met CO wat hoger in de schijf bevindt. Door te begrijpen hoe een molecuul wordt geproduceerd en afgebroken, en door modellen van een protoplanetaire schijf te vergelijken met waarnemingen, is het dus mogelijk om uitspraken te doen over de structuur van de schijf.

Het stof in de schijf zit ook niet stil: vergeleken met de interstellaire ruimte en zelfs de wolk waaruit de schijf ontstond zijn de dichtheden hoger. Stofdeeltjes groeien en bewegen ten opzichte van het gas. Er spelen allerlei processen tegelijkertijd een rol, maar het netto-effect is dat kleine stofdeeltjes (ongeveer een micrometer in diameter) door de hele schijf te vinden zijn. Stofdeeltjes die door botsingen zijn gegroeid tot groottes van ongeveer een

millimeter of meer zakken naar het midden (als we de schijf van opzij bekijken, zoals in Figuur 1) en vormen in vergelijking met het kleine stof en het gas een veel plattere schijf. Dit zijn de stofdeeltjes die we met de ALMA-telescoop waarnemen.

De protoplanetaire schijf in Figuur 1 is vrij glad. Eén van de belangrijkste ontdekkingen van de laatste jaren is echter dat, in het stof maar ook in het gas, allerlei structuur zichtbaar is. In plaats van een vlakke verdeling van stof zien we ringen stof om de jonge ster, en zelfs asymmetrische structuren. Op dit moment lijkt de invloed van de zwaartekracht van een verder niet zichtbare planeet in de ruimtes tussen de ringen de beste verklaring, een onderwerp dat ook wordt behandeld in Hoofdstuk 2 van dit proefschrift.

## Van individu naar populatie

### Stervorming in de nabije Melkweg

Wie demografisch onderzoek wil doen, moet goed nadenken over het soort populatie dat wordt bekeken. Hoe selecteer je leden van een vergelijkbare groep, in termen van de omgeving waarin ze leven en leeftijd? In dit geval gaat het natuurlijk niet om mensen maar om jonge sterren. Gelukkig blijkt de natuur ons hier te helpen: sterren ontstaan niet alleen, maar in groepen uit reusachtige moleculaire wolken. Deze wolken produceren genoeg sterren dat we er statistische methodes op kunnen loslaten. Bovendien zijn alle jonge sterren die uit zo'n wolk ontstaan van ongeveer dezelfde leeftijd. Zulke stervormingsgebieden worden genoemd naar het sterrenbeeld waarin ze te vinden zijn. In de nabije Melkweg zijn lang niet alle gebieden waarin jonge sterren ontstaan hetzelfde: sommige zijn ouder, sommige jonger. Dit betekent dat het mogelijk is om de eigenschappen van protoplanetaire schijven in zulke gebieden te vergelijken, om hun evolutie te bestuderen.

Een ander belangrijk punt waarop stervormingsgebieden van elkaar kunnen verschillen, is de aanwezigheid van massieve sterren. Sterren met een massa vanaf ongeveer acht keer die van de zon produceren enorme hoeveelheden ultraviolette straling die een dramatisch effect op hun directe omgeving hebben: ze verlichten (en vernietigen) de wolken moleculair gas waaruit ze zijn ontstaan en kunnen ook het gas en stof aan de buitenranden van protoplanetaire schijven om sterren in de buurt verhitten, tot de schijf als het ware verdampt. Maar zulke sterren zijn zeldzaam: in de buurt van de Zon vinden we ze alleen in Orion, in het zogenaamde Trapezium in de Orionnevel, en in de Vlamnevel (NGC 2024). Ze zijn daarom extra interessant vanuit het perspectief van de evolutie van protoplanetaire schijven, zeker omdat NGC 2024 één van de jongste stervormingsgebieden is, met een leeftijd van minder dan een miljoen jaar, terwijl de sterren rond het Trapezium ongeveer één tot drie miljoen jaar oud zijn (zie Hoofdstuk 4 en 5).

Het stervormingsgebied in Lupus is, daarbij vergeleken, vrij kalm: er is een populatie van ongeveer honderd schijven van één tot drie miljoen jaar oud. Deze populatie is goed vergelijkbaar met een aantal andere minder massieve stervormingsgebieden in de buurt van de zon, en heeft het voordeel dat zowel het stof, CO en CN, en de eigenschappen van de sterren goed bekend zijn. In dit proefschrift wordt eerst gekeken naar de eigenschappen van de protoplanetaire schijven in Lupus, om daarna de blik te verleggen naar de populaties jonge sterren met schijven in OMC-2 (een moleculaire wolk net ten noorden van het Trapezium) en NGC 2024.

## Demografie van protoplanetaire schijven

Zoals we hebben gezien is het dus mogelijk om populaties van protoplanetaire schijven te vinden van verschillende leeftijden op verschillende plekken in de – relatieve – buurt van de zon. Een belangrijke eerste vraag om te stellen is dan hoeveel sterren met een protoplanetaire schijf in een stervormingsgebied te vinden zijn, als fractie van de leeftijd van zo'n gebied. De conclusie van dit onderzoek, dat werd gedaan op infrarode golflengtes, is dat protoplanetaire schijven inderdaad zeldzamer zijn in oudere gebieden, zoals we zouden verwachten op basis van de theorieën van stervorming die hierboven zijn beschreven.



**Figuur 2:** In deze foto (gedeeld door de Joint ALMA Observatory) is een groot deel van de primaire ALMA-antennes te zien. Het werk dat in dit proefschrift wordt behandeld is gebaseerd op waarnemingen met deze telescoop – zie de verschillende Hoofdstukken 2 – 5 voor voorbeelden. Door de signalen van alle antennes aan elkaar te verbinden is het mogelijk om een extreem hoge resolutie en gevoeligheid te bereiken.

In de afgelopen jaren is de bijdrage van ALMA (Figuur 2) aan dit soort onderzoek van groot belang geweest. ALMA – de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array – is in staat om zowel het moleculaire gas als stofdeeltjes ter grootte van een millimeter in een protoplanetaire schijf waar te nemen. Dankzij ALMA's indrukwekkende gevoeligheid is het mogelijk om met waarneemtijden van een minuut per object alsnog een flink percentage van de populatie te detecteren, en zelfs om stof- en gasstructuren waar te nemen.

Eén van de belangrijkste resultaten van ALMA, en van de Submillimeter Array (SMA), een andere telescoop die op vergelijkbare golflengtes waarneemt, is dat niet alleen de fractie protoplanetaire schijven afhangt van de leeftijd van een stervormingsgebied, maar dat er ook een trend lijkt te zijn in de hoeveelheid stof die we waarnemen om jonge schijven als functie van de ouderdom van een stervormingsgebied. Op dezelfde manier is duidelijk geworden dat de hoeveelheid UV-straling in een gebied een sterk effect kan hebben op de evolutie van protoplanetaire schijven.

## Dit proefschrift

Het werk dat in dit proefschrift wordt behandeld is gebaseerd op ALMA-surveys van protoplanetaire schijven in drie stervormingsgebieden: Lupus, OMC-2, en NGC 2024 – de laatste allebei in Orion. Elk van deze gebieden biedt nieuwe informatie vanuit het perspectief van demografische analyse. Lupus (Hoofdstuk 2 en 3) kan gezien worden als prototype van een stervormingsgebied zonder massieve sterren. De hoofdstukken waarin wordt gekeken naar

Orion gaan juist in op de invloed van die massieve sterren op de evolutie van protoplanetaire schijven.

## **V1094 Sco – Een zeldzaam grote protoplanetaire schijf met meerdere ringen**

In Hoofdstuk Twee wordt gekeken naar de eigenschappen van een onverwachte protoplanetaire schijf in Lupus. Vergeleken met de andere schijven in de Lupus survey is V1094 Sco op meerdere manieren bijzonder: allereerst, omdat het een bijzonder helder (en dus massief) object is. Ten tweede, omdat er twee stofringen in de schijf te zien zijn. Hoewel er meerdere ‘transition disks’ in Lupus zijn, waarin de stofring een enkel diep gat laat zien, zijn dit soort goed gedefinieerde ringen in verhouding zeldzamer. Tenslotte is V1094 Sco interessant vanwege de grootte van de stofschijf: tot 300 AU van de ster, waarbij 1 AU de gemiddelde afstand tussen de Aarde en Zon is, en de gemiddelde schijf in Lupus kleiner is dan 60 AU (in het stof).

Deze laatste eigenschap is interessant omdat het nieuw licht werpt op het ontstaan van planeten. De meest voor de hand liggende verklaring van de ringen van V1094 Sco is dat één of meerdere onzichtbare planeten het stof wegduwen uit hun baan. Dit was, in andere protoplanetaire schijven met vergelijkbare structuren, ambiguër.

De waarde van de survey in Lupus ligt erin dat we deze schijf kunnen vergelijken met andere protoplanetaire schijven in Lupus, zonder dat er grote verschillen in gevoeligheid of resolutie zijn. De conclusie daarvan is dat protoplanetaire schijven als V1094 Sco zeldzaam zijn: IM Lup en V1094 Sco zijn beide  $\sim 300$  AU groot, maar de derde grootste protoplanetaire schijf in Lupus is  $\sim 160$  AU; de totale fractie reuzenschijven is ongeveer 2%.

## **De ALMA survey van protoplanetaire schijven in Lupus – Bewijs voor compacte gasschijven en moleculaire ringen uit CN-waarnemingen**

Het cyanideradicaal CN is een vrij algemeen voorkomend molecuul in protoplanetaire schijven, en goed waar te nemen op millimeter-golflengtes. Uit modellen is bekend dat de hoeveelheid CN-emissie afhangt van in het bijzonder de grootte van de gasschijf, en – zoals gezegd – van de hoeveelheid UV-straling. Op basis van modellen verwachten we bovendien dat emissie het helderste is in een ring om de ster.

In dit hoofdstuk wordt gebruik gemaakt van de CN-waarnemingen die zijn gedaan als onderdeel van de survey van protoplanetaire schijven in Lupus geleid door Jonathan Williams en Megan Ansdell (Univ. Hawaii). Een opvallende waarneming is dat een aantal protoplanetaire schijven zowel in continuüm- als in CN-emissie erg zwak is. Door de CN- en continuüm-flux tegen elkaar uit te zetten, en te vergelijken met de gesimuleerde data van een grid van modellen van protoplanetaire schijven (ontwikkeld door Paolo Cazzoletti) is het mogelijk om te bepalen welke eigenschap van de schijven hiervoor zorgt. Het blijkt dat alleen modellen met een compacte gasschijf ( $\leq 15$  AU) deze waarnemingen reproduceren. Dit is een belangrijke conclusie omdat op basis van stofemissie alleen het lastig is om te zeggen of een protoplanetaire schijf compact is.

Tenslotte wordt in dit hoofdstuk de in de modellen voorspelde emissie-ring van CN waargenomen in twee protoplanetaire schijven uit het Lupus-sample. Ook wordt bevestigd dat er geen aanpassingen in het dichtheidsprofiel van de schijf nodig zijn om deze ringen te reproduceren, maar dat de sterkte van het UV-stralingsveld van groot belang is. Dit betekent dat,

als de verdere eigenschappen van de protoplanetaire schijf bekend zijn, CN ook kan dienen als tracer van de lastig waar te nemen UV-straling tussen 91.2 en 110 nm.

## **De massa's van protoplanetaire schijven in de Orion Molecular Cloud-2: het onderscheid tussen tijd en omgeving**

Zoals gezegd zijn er meerdere gebieden in Orion waarin jonge massieve sterren een grote invloed hebben op hun omgeving. Het scheiden van de invloed van de felle UV-straling van jonge sterren, waardoor materiaal van de protoplanetaire schijven in de buurt wordt weggeblazen, en van de tijdsevolutie van een schijf, waarbij de totale massa ook afneemt, is echter lastig.

Het is al langer bekend dat protoplanetaire schijven dicht bij de massieve sterren in het Trapezium-cluster in massa afnemen. De massa's van de protoplanetaire schijven op afstanden van meer dan 0.5 pc van deze sterren, maar in dezelfde wolk, zijn dus een belangrijke bron van informatie over hoe een populatie schijven van dezelfde leeftijd eruit ziet zonder het effect van de Trapezium-sterren, maar waren tot nu toe niet goed gekarakteriseerd. In dit hoofdstuk wordt deze vergelijking gemaakt met behulp van een continuüm-survey van protoplanetaire schijven in OMC-2.

Het belangrijkste resultaat van dit hoofdstuk is dat de massa's van protoplanetaire schijven in OMC-2 niet te onderscheiden zijn van die in Lupus en een aantal andere nabije stervormingsgebieden van dezelfde leeftijd, maar waarin geen massieve sterren te vinden zijn. Tegelijkertijd is het verschil in massa's tussen het hier onderzochte sample en de eerdere waarnemingen van protoplanetaire schijven in de buurt van het Trapezium consistent met de interpretatie dat de laatste groep hun massa heeft verloren door externe irradiatie met ver-ultraviolette straling. De interpretatie van dit resultaat is dat, mits geïsoleerd van externe invloeden, de evolutie en het ontstaan van een protoplanetaire schijf overal op dezelfde manier kunnen gebeuren.

## **Massa's van protoplanetaire schijven in NGC 2024: aanwijzingen voor twee populaties**

In Hoofdstuk 5 wordt gekeken naar de protoplanetaire schijven in NGC 2024. Vergeleken met het Trapezium en OMC-2 is NGC 2024 een jong stervormingsgebied, en bevat het tenminste één massieve ster, waardoor het een geschikt gebied is om de impact van de omgeving op de vroege evolutie van protoplanetaire schijven te bestuderen. Bovendien is dit gebied onderdeel van gegarandeerde waarneemtijd met de James Webb Space Telescope (JWST).

De waarnemingen die in dit hoofdstuk worden gebruikt beslaan een gebied van ongeveer 3 bij 3 boogminuten, een gebied dat zowel het binnenste deel van het cluster jonge sterren als de buitengebieden beslaat. Opvallend genoeg is het percentage gedetecteerde protoplanetaire schijven in de binnenste (oostelijke) delen van het cluster vergeleken met de buitendelen van het cluster in het westen veel hoger, ook al is juist in het oostelijke deel de geprojecteerde afstand tot de massieve ster(ren) het kleinst, en zouden we daar dus juist een lagere detectiefractie verwachten.

Om dit te verklaren grijpen we terug naar de grotere-schaal eigenschappen van zowel de sterpopulatie als de moleculaire wolken. In het oosten is een zeer jonge ( $\sim 0.5$  Myr) populatie sterren nog gedeeltelijk ingebed in een dichte moleculaire wolk, en daardoor nog niet sterk blootgesteld aan de invloed van de massieve sterren. Deze populatie lijkt, in termen van schijfmassa's, sterk op die van protoplanetaire schijven in Lupus, ook al zijn ze jong. De



westelijke populatie sterren is daarentegen ouder en veel sterker blootgesteld aan het UV-stralingsveld, en de protoplanetaire schijven in dit deel van het veld lijken dus ook sterk op die in de buurt van het Trapezium.

## Belangrijkste resultaten

Op een rij gezet zijn de belangrijkste resultaten van dit proefschrift als volgt:

- Protoplanetaire schijven met stof op afstanden van de ster buiten 150 AU zijn zeldzaam, terwijl compacte schijven in een populatie van een miljoen jaar oud veel algemener voorkomen.
- In totaal verschillende moleculaire wolken kunnen protoplanetaire schijven van dezelfde leeftijd er vergelijkbaar uitzien in termen van hun stofemissie, wat suggereert dat hun initiële eigenschappen ook vergelijkbaar zijn.
- Het is belangrijk om in complexe, massieve stervormingsgebieden rekening te houden met de mogelijke aanwezigheid van populaties sterren van verschillende leeftijden, omdat de eigenschappen van hun protoplanetaire schijven ook anders zijn.

## Toekomstperspectieven

Een paar van de vervolgstappen in het onderzoek naar protoplanetaire schijven zijn duidelijk. Het aantal gebieden waarin surveys van protoplanetaire schijven met ALMA zijn gedaan, is nog steeds relatief klein. Bovendien lijkt een aantal van deze gebieden relatief vrij sterk op elkaar. Dit geldt zowel voor waarnemingen van het stof in deze schijven als voor het gas, en in het bijzonder voor moleculen anders dan CO. Juist die moleculen kunnen waardevolle inzichten in de chemische processen en structuur van 'gewone' protoplanetaire schijven bieden, buiten onze huidige focus op de meest massieve objecten. De eigenschappen van de sterren zelf blijven ook een belangrijk ingrediënt in ons begrip van de (populaties van) protoplanetaire schijven die worden waargenomen.

Ons begrip van hoe de kometen en planeten ontstaan, en van het ontstaan van de Aarde zelf wordt steeds dieper dankzij de voortdurende nieuwe resultaten van ALMA, het steeds verbeteren van modellen, en in de nabije toekomst de lancering van de James Webb Space Telescope. Hoewel er nog steeds veel grote open vragen zijn, zijn het vragen waarop steeds vaker een steeds beter antwoord te geven is.

