



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Freezing conditions in warm disks: snowlines and their effect on the chemical structure of planet-forming disks

Leemker, M.

### Citation

Leemker, M. (2024, February 14). *Freezing conditions in warm disks: snowlines and their effect on the chemical structure of planet-forming disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3717617>

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/1887/3717617>

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

---

# Nederlandse samenvatting

---

Naar de sterrenhemel boven ons kijken is iets wat mensen al eeuwen lang doen. Zo lang al dat er aanwijzingen zijn dat de gebouwen uit de prehistorie werden gebruikt om te zien wanneer een belangrijke en heldere ster opkwam of onderging. 's Nachts kijken naar de sterren heeft ons niet alleen een klok gebracht, maar ook ook de vraag: zijn wij alleen of is er ook ergens anders in leven in het heelal?

Op dit moment zijn er meer dan 5500 exoplaneten gevonden en de zoektocht naar nieuwe planeten gaat door. Genoeg plekken dus waar mogelijk leven zou kunnen zijn. Toch zijn de meeste van die planeten heel anders dan de Aarde. Sommigen zijn veel zwaarder, zoals Jupiter, en staan heel dicht bij de ster waardoor ze in minder dan één Aardse dag om hun ster draaien. Anderen staan juist heel ver weg en doen meer dan duizend Aardse jaren over één jaar in hun systeem. Van de meer dan 5500 ontdekte planeten zijn er maar zo'n 200 die lijken op de Aarde. Is de Aarde dan toch uniek? Of zijn er andere planeten die over alle ingrediënten beschikken om leven te laten ontstaan. En wat bepaalt welke ingrediënten aanwezig zijn op een planeet?

Om die vragen te kunnen beantwoorden hebben we krachtige telescopen nodig. Sommige van deze telescopen kunnen we richten op de exoplaneten die we al gevonden hebben om te bepalen of ze een atmosfeer hebben en of de gassen in die atmosfeer giftig zijn voor leven zoals we het kennen, of dat er misschien een kans is dat er leven op die planeet is of kan ontstaan. Andere telescopen kijken naar de plek waar jonge sterren en planeten geboren worden omdat het bestuderen van het gas en stof rond een jonge ster ons kan vertellen welke ingrediënten we kunnen verwachten op planeten. Waarnemingen laten zien dat sterren en planeten tegelijkertijd vormen en dat om zo'n jonge ster een schijf van gas en stof met een laagje ijs ronddraait. Een deel van het gas en stof in de schijf valt op de ster, en een ander deel vormt planeten of wordt weggeblazen.

Dit proefschrift richt zich op de vraag wat de chemische samenstelling is van het gas en ijs in protoplanetaire schijven. Een combinatie van waarnemingen en chemische modellen wordt gebruikt om deze vragen op te helderen. De waarnemingen laten zien dat bijna geen enkele schijf glad is, bijna elke schijf heeft ringen, gaten en bogen waar meer stof of een bepaald soort gas aanwezig is. Schijven met grote centrale gaten ("holtes") noemen we ook wel overgangsschijven. Deze structuren zouden veroorzaakt kunnen worden door planeten maar ook andere



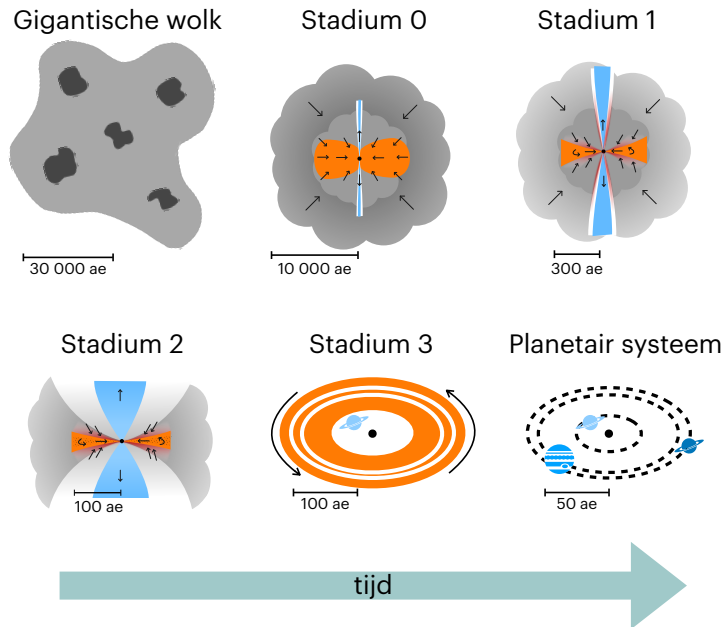
**Figuur 1:** Infrarood waarneming met JWST van de pilaren van creatie, een gigantische moleculaire wolk. In de donker bruine, compacte gebieden vormen jonge sterren. Afbeelding van: NASA, ESA, CSA, STScI.

processen kunnen een rol spelen. Dit proefschrift onderzoekt de oorzaak van deze structuren – planeten, een verandering in de dichtheid, of chemie – door te kijken naar verschillende moleculen in de gasfase en deze te vergelijken met het stof.

## Jonge sterren

Jonge sterren worden geboren in hele grote moleculaire wolken, zie Fig. 1. Deze wolken bestaan uit koud gas en kleine stofdeeltjes met een laag ijs. Op sommige plekken is meer gas aanwezig dan op andere plekken. Onder bepaalde omstandigheden kunnen deze gebieden instorten waardoor deze niet alleen kleiner, maar ook warmer worden. In het centrum van de kern ontstaat een jonge protoster met daaromheen een protoplanetaire schijf. In deze schijf zit al het materiaal met een groot hoekmoment, omdat de wetten van de natuurkunde voorschrijven dat het hoekmoment behouden moet blijven.

De evolutie van een gigantische moleculaire wolk naar een planetair systeem wordt gepresenteerd in Fig. 2. De fase van de gigantische moleculaire wolk met vijf kernen is schematisch weergegeven in de linker bovenhoek. Stadium 0 laat zien hoe een ineengestorte kern eruit ziet. In het centrum is een jonge protoster aanwezig met daaromheen een schijf van gas en stof waar materiaal van de wolk op regent, maar die zelf ook uitregent op de protoster. Een deel van het materiaal van de schijf valt echter niet op de ster maar wordt via een straalstroom weggeblazen uit het systeem. Naar mate het systeem ouder wordt, wordt het materiaal dat de ster en de schijf omhult minder en wordt de straalstroom breder, zie Stadium 1.

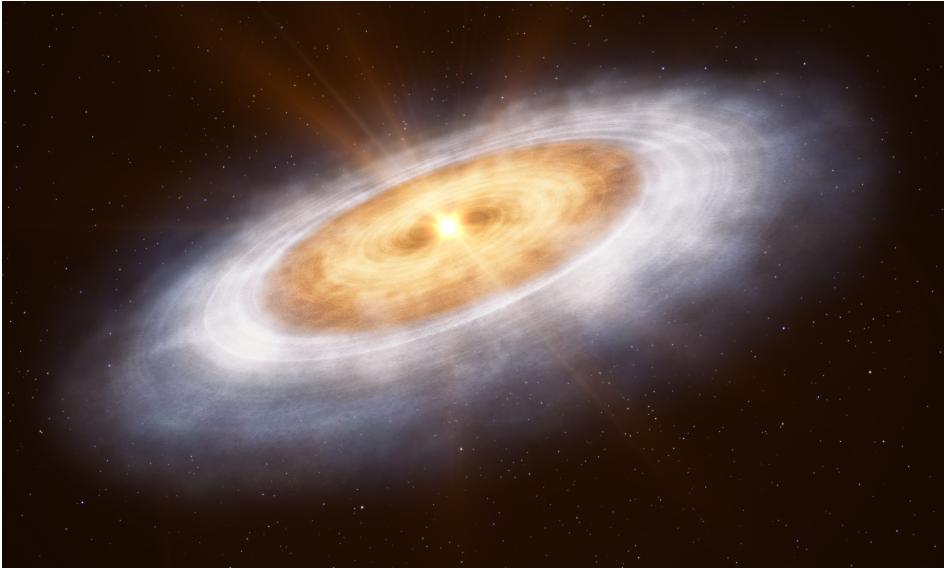


**Figuur 2:** De evolutie van een gigantische moleculaire wolk naar een planetair systeem. Figuur aangepast van M. Persson.

In Stadium 2 wordt de protoplanetaire schijf goed zichtbaar. In deze schijf zijn planeten aan het vormen en tegelijkertijd wordt een deel van het gas weggeblazen door de ster. Wanneer bijna al het gas en stof van de schijf verwijderd is, wordt er gesproken van een systeem in Stadium 3. Uiteindelijk is al het gas en stof verdwenen en blijft de ster met één of meer planeten over.

## Protoplanetaire schijven

Protoplanetaire schijven zijn geen statische objecten maar evolueren van een jonge schijf met veel gas en stof naar een schijf die voornamelijk bestaat uit overgebleven puin over een tijdschaal van een paar miljoen jaar. Wat het mechanisme is achter de evolutie van de schijf is nog niet bekend maar er zijn twee theoriën die mogelijk allebei belangrijk zijn. Wat de theoriën gemeen hebben is dat ze een manier hebben gevonden om het hoekmoment van het materiaal in de schijf te veranderen, dit is cruciaal omdat de schijf anders altijd blijft draaien zoals die dat in het begin deed. De eerste theorie is de visceuse evolutie van de schijf. Het gas dichtbij de ster draait sneller rond dan het gas ver weg. Hierdoor ontstaat wrijving tussen twee gedeeltes van het gas die tegen elkaar aan schuren. Dit versnelt het gas verder weg van de ster en vertraagt het gas dichterbij. Hierdoor wordt het hoekmoment van de schijf effectief naar buiten getransporteerd en kan het materiaal in het binnenste



**Figuur 3:** Artistieke afbeelding van een warme protoplanetaire schijf. Dichtbij de ster in het oranje gebied is het warm waardoor bijna alle moleculen, inclusief water, in de gasfase zijn. Verder weg van de ster is de schijf kouder (witte gebied) en is water bevroren. De overgang tussen deze twee gebieden is de watersneeuwlijn. De ringen in deze schijf zouden veroorzaakt kunnen worden door onder andere planeten. Afbeelding van ESO/L. Calçada.

van de schijf op de ster vallen. Een andere manier om hoekmoment te verplaatsen is door een wind vanaf het oppervlak te laten waaien. Dit kan als een magnetisch veld aanwezig is en het gas in de bovenste lagen geïoniseerd is. De hoeveelheid gas die met de wind meegevoerd wordt is klein maar het hoekmoment hiervan is relatief groot. Hierdoor kan de rest van de schijf verder evolueren.

Tijdens deze evolutie van de schijf groeit het stof groter tot deeltjes van 1 cm, 1 m en waarschijnlijk nog groter tot de grootte van rotsachtige planeten. Hoe dit precies gebeurt wordt op dit moment actief onderzocht. Het is waarschijnlijk dat er speciale plekken zijn in de schijf waar het stof groter kan groeien en niet naar binnen drijft door de continue tegenwind van het gas dat net wat langzamer ronddraait dan het stof. Een van de plekken waar planeten mogelijk makkelijker kunnen vormen is net buiten de watersneeuwlijn, de plek in de schijf waar water bevroert. Voor sterren die lichter zijn dan onze zon ligt dit op ongeveer dezelfde afstand als de Aarde, een afstand die voor sterrenkundige begrippen extreem dichtbij is en dus moeilijk te zien is met telescopen. Daarom wordt vaak naar zwaardere sterren of zelfs uitbarstende sterren gekeken waar de sneeuwlijn verder weg ligt en ook andere moleculen beter waar te nemen zijn, een voorbeeld hiervan is te zien in Fig. 3 waar de sneeuwlijn ten minste even ver van de ster ligt als Pluto van onze zon staat.

## Dit proefschrift

Dit proefschrift richt zich op de temperatuur structuur in protoplanetaire schijven en hoe deze zich verhoudt tot de structuren in de emissie van verschillende moleculen in de gasfase en het stof. Kennis van de temperatuur structuur in protoplanetaire schijven is cruciaal om de hoeveelheid gas en de chemische samenstelling daarvan te bepalen. De hoofdvragen die in dit proefschrift behandeld worden zijn:

- Waar bevriest water in een protoplanetaire schijf en hoe kunnen we deze locatie vinden?
- Worden de grote centrale holtes in overgangsschijven gevormd door planeten of door andere processen?
- Wat is de relatie tussen de structuren die te zien zijn in het stof en in verschillende moleculen?

Hoofdstuk 2 gaat in op de eerste vraag: hoe kan de watersneeuwlijn gelokaliseerd worden in een protoplanetaire schijf. Het waarnemen van water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) en water isotopologen (bv.  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ) vanaf de Aarde is lastig omdat er veel water in onze atmosfeer zit dat de emissie van water in een protoplanetaire schijf blokkeert. Telescopen in de ruimte missen echter de spatiële resolutie om de watersneeuwlijn ruimtelijk op te kunnen lossen. Om deze redenen richt dit hoofdstuk zich op het chemisch modelleren van een molecuul dat vernietigd wordt door water in de gasfase:  $\text{HCO}^+$  en de isotopoloog  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ . Een thermo-chemisch model wordt gekoppeld aan een chemisch netwerk speciaal voor  $\text{HCO}^+$  om synthetische waarnemingen te maken. Deze resultaten laten zien dat hoge resolutie waarnemingen van  $\text{HCO}^+$  kunnen worden gebruikt om de water sneeuwlijn te vinden in protoplanetaire schijven waarbij de water sneeuwlijn op een plek ligt waar niet al te veel stof aanwezig is. De toepassing van deze methode op een hete schijf rond een uitbarstende ster waar twee conflicterende locaties voor de watersneeuwlijn zijn gevonden, één op basis van het stof en één op basis van methanol in de gasfase, laat zien dat waarnemingen van gasfase moleculen cruciaal zijn om de watersneeuwlijn te vinden.

Hoofdstuk 3 gaat dieper in op de precieze locatie van de watersneeuwlijn in deze schijf door de 2D verdeling van HDO, een isotopoloog van water, te bestuderen. Door in detail te kijken naar de structuur van de HDO emissie op elke gemeten snelheid, kan de plek waar HDO emissie vandaan komt in straal en hoogte boven het middenvlak van de schijf bepaald worden. Deze methode laat het verrassende resultaat zien dat het sneeuwoppervlak, de 2D equivalent van de sneeuwlijn, bijna verticaal is. Verder is de locatie van het gevonden oppervlak consistent met de resultaten uit Hoofdstuk 2. Een zelfde analyse voor methanol, een molecuul dat op een net iets lagere temperatuur sublimiert dan water, laat een vergelijkbaar resultaat zien: een bijna verticaal oppervlak. Het oppervlak van methanol ligt ongeveer 10 tot 20 ae verder van de ster dan dat van water. Dit laat direct zien dat elk molecuul op zijn eigen temperatuur sublimiert en dat het ijs op stofdeeltjes

mogelijk bestaat uit verschillende lagen in plaats van dat het ijs een mix is van alle moleculen samen.

Hoofdstuk 4 richt zich op de tweede vraag die in dit proefschrift behandeld wordt. Bijna alle heldere en zware protoplanetaire schijven die worden waargenomen met ALMA laten structuren zien zoals ringen, gaten, holtes en bogen. Deze structuren zouden gevormd kunnen worden door zware planeten, maar op dit moment is maar in één schijf overvloedig bewijs voor actief vormende planeten gevonden terwijl een handvol andere schijven veelbelovende signalen laten zien. Dit hoofdstuk meet de hoeveelheid gas in de holtes in twee overgangsschijven en daarmee de massa van de planeten als die er zijn. Om de hoeveelheid gas te bepalen is kennis van de temperatuur van dat gas cruciaal. Dit hoofdstuk laat zien dat het gas in de holtes van de twee bestudeerde schijven warm is. Toch zijn de schijven ook verschillend omdat de ene schijf waarschijnlijk een zware planeet heeft terwijl de andere meerdere lichte planeten heeft gevormd.

Hoofdstuk 5 richt zich op de derde en laatste vraag die in dit proefschrift centraal staat. Waarnemingen van de asymmetrische schijf Oph-IRS 48 laten zien dat het mm-stof extreem asymmetrisch is terwijl er geen indicaties zijn dat het gas dat ook is. De grote verscheidenheid aan moleculen die alleen worden gezien op de plek van het stof en niet in andere delen van de schijf laat zien dat de stofval een ijsval is. In dit hoofdstuk wordt de eerste detectie van NO gemodelleerd met behulp van een thermo-chemisch model. Deze modellen reproduceren de emissie van de andere bestudeerde moleculen, maar om de emissie van NO te verklaren moet extra NO toegevoegd worden aan de begincondities van het netwerk. Dit wordt verklaard door het sublimeren van stikstofdragende moleculen in het ijs. Het gebrek aan CN in deze schijf laat zien dat het planeet-vormende materiaal rijk is aan zuurstof en arm in koolstof, twee van de cruciale elementen voor leven op Aarde.

Het laatste hoofdstuk, Hoofdstuk 6, richt zich op de correlatie tussen structuren in het stof en in het gas gezien in verschillende moleculen. De schijf die bestudeerd wordt is een overgangsschijf met een stofring relatief dichtbij de ster (20 – 40 ae) en een tweede stofring op ongeveer 200 ae. Deze tweede ring is heel licht, met een massa < 1% van de massa van de binnenste ring. Toch laten ALMA waarnemingen zien dat de moleculen goed te zien zijn in *allebei* de ringen ondanks het grote verschil in massa en afstand tot de ster voor allebei de ringen. Met behulp van thermo-chemische modellen wordt de meest voor de hand liggende verklaring voor de dubbele ring structuur in de moleculen uitgesloten: de CO isotopologen laten geen bewijs zien voor een gebrek aan gas tussen de stofringen. Het variëren van andere parameters in de modellen laat zien dat de voorspelde locatie van moleculaire ringen over het algemeen niet overeen komt met de plek van stofringen tenzij er bijvoorbeeld geen gas is tussen de stofringen of de chemische samenstelling in de ringen anders is dan daarbuiten. Om de waarnemingen in de HD 100546 schijf te verklaren is een combinatie nodig van model parameters waaronder een bijna perfect gebalanceerde hoeveelheid koolstof en zuurstof atomen in de ringen.

## Toekomstperspectief

ALMA heeft onze ogen geopend voor de fysische en chemische structuren in protoplanetaire schijven. Waarnemingen richtten zich tot nu toe vooral op de grootste en helderste schijven, maar nieuwe programma's om de chemie in een grotere groep schijven te bestuderen worden nu waargenomen zoals het DECO programma in navolging van MAPS. Toch blijven studies die één bron in detail bestuderen onmisbaar omdat hier nieuwe fenomenen zoals een ijssval ontdekt kunnen worden. Daarbij zijn diepe waarnemingen onmisbaar om zwakke emissielijnen die veel informatie bevatten te detecteren.

De kracht van ALMA is niet alleen de hoge spatiële resolutie om de emissie ruimtelijk op te lossen maar ook de resolutie langs de frequentie-as. Hierdoor kan de snelheid van het gas nauwkeurig gemeten worden waardoor verstoringen in de snelheid van het gas door planeten gemeten kunnen worden. Daarbij kunnen ook verstoringen op grote schaal gemeten worden, zo kan bepaald worden of bijvoorbeeld de gehele schijf instabiel is.

De waarnemingen met ALMA zijn vooral gevoelig voor het buitenste gedeelte van protoplanetaire schijven. De recent gelanceerde JWST ruimtetelescoop is gevoelig voor de binnenste, warme gedeeltes van de schijf. De combinatie van deze twee telescopen geeft de mogelijkheid om een veel completer beeld te krijgen van de chemische samenstelling van de schijven en of deze samenstelling anders is in de binnenste gedeeltes dan in de buitenste gedeeltes. Bovendien kan met de JWST de samenstelling van het ijs bepaald worden, iets wat cruciaal is om te bepalen welke ingrediënten op een vormende planeet terechtkomen. Verder zal de ELT de plek in schijven kunnen laten zien waar Aardachtige planeten waarschijnlijk vormen. Met al deze nieuwe mogelijkheden zal er de komende jaren een nieuwe wereld aan planeetvorming te ontdekken zijn.



