



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

The chemistry of planet-forming disks: a story from inner to outer disk

Temmink, M.

Citation

Temmink, M. (2026, June 5). *The chemistry of planet-forming disks: a story from inner to outer disk*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4304669>

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/1887/4304669>

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

Nederlandse samenvatting

Een belangrijke vraag die zowel astronomen als het algemene publiek bezig houdt is: "Bestaat buitenaards leven?" Met het ontelbare aantal sterrenstelsels en sterren dat het universum kent, is het bijna ondenkbaar dat buitenaards leven niet zou bestaan. Nog belangrijker, op dit moment zijn meer dan 6,000 exoplaneten - planeten in een baan rondom een andere ster dan onze zon - ontdekt. Statistisch gezien is de huidige verwachting dat elke ster tenminste omringd wordt door één planeet. De vraag zou daardoor niet moeten gaan over het bestaan van buitenaards leven, maar waar het zich bevindt en waar het kan ontstaan. Om dat te bepalen moeten we niet alleen kijken naar de exoplaneten zelf, maar ook de gebieden waarin deze planeten vormen: planeetvormende schijven.

Planeetvormende schijven zijn schijven bestaande uit stof en gas, die rondom een pasgeboren ster draaien. Waarnemingen hebben aangetoond dat planeten ontstaan in deze schijven tegelijkertijd met hun moederster. Om te achterhalen wat de ingrediënten zijn van een planeet en of die vatbaar is voor leven, is het van cruciaal belang dat de chemische samenstelling van planeetvormende schijven in detail onderzocht wordt. Om de samenstelling te bepalen zijn krachtige telescopen nodig. Momenteel wordt onze kennis dagelijks vergroot door waarnemingen van de *James Webb* Space Telescope (JWST) en de Atacama Large Millimeter Array (ALMA).

Dit proefschrift houdt zich bezig met het onderzoek naar de chemische samenstelling van het gas in planeetvormende schijven. Met behulp van JWST wordt de samenstelling onderzocht in de warme, binnenste 10 astronomische eenheden, d.w.z. binnen 10 keer de afstand tussen de zon en de aarde. Deze waarnemingen geven direct inzicht in de samenstelling van het gas in het gebied waar de aardachtige planeten vormen. Daarentegen worden ALMA waarnemingen gebruikt om de samenstelling van het gas in de koude, buitenste regionen van de schijf te onderzoeken.

Ster- en planeetvorming

Het proces van ster- en planeetvorming speelt zich af in verschillende fases, zoals afgebeeld in Figuur 1). Sterren ontstaan in grote moleculaire wolken (paneel a)

die grotendeels bestaan uit gas (99% in massa) en voor een klein gedeelte uit stof (1% in massa). Het gas in een wolk is niet egaal verdeeld en er zijn plekken waar de gasdichtheid groter is dan op andere plekken. Gebieden met een hoge gasdichtheid worden ook wel kernen genoemd. Als de zwaartekracht van zo'n kern te groot wordt, stort de kern ineen en ontstaat er een protoster (paneel b). Door materie van de wolk in zich op te nemen, groeit de jonge protoster in massa, maar een deel van het gas en stof wordt ook weggeblazen in sterke straalstromen (paneel c). Tegelijkertijd ontstaat er een schijf rondom de jonge ster, de planeetvormende schijf. Met tijd zal de jonge protoster het restant van zijn geboortewolk hebben weggeblazen en is de jonge protoster, samen met zijn planeetvormende schijf, zichtbaar voor het blote oog (paneel d). Door het samenklonteren van stofdeeltjes in de schijf ontstaan planeten, waarvan de samenstelling zal afhangen van de samenstelling van de schijven. Met tijd zal ook het gas en stof uit de schijf verdwijnen en blijft een volwassen ster met een planetenstelsel over (paneel e).

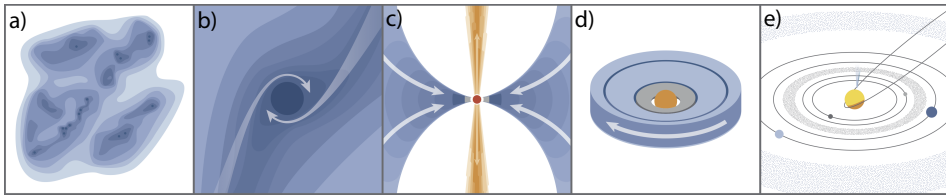


Figure 1: De verschillende fases van ster- en planeetvorming. Dit figuur is overgenomen van Öberg & Bergin (2021).

Planeetvormende schijven

Planeetvormende schijven zijn dynamische objecten die evolueren met de tijd. Het zijn objecten die, net als de moleculaire wolk waarin ze ontstaan, voor het grootste gedeelte bestaan uit gas en een klein beetje uit stof. Terwijl het gas door de hele schijf verdeeld is, hangt de locatie van het stof af van de grootte van de deeltjes. De kleine, micrometer stofdeeltjes bevinden zich vooral in de bovenlagen van de schijf, maar zodra deze groeien - naar millimeter en centimeter groottes, en uiteindelijk zelfs rotsblokken - zullen deze neerdalen in het middenvlak van de schijf. Terwijl de kleine stofdeeltjes zich voortbewegen met het gas, is er een snelheidsverschil tussen het gas en de grotere stofdeeltjes. Als gevolg van deze frictie verliezen de grote stofdeeltjes snelheid - dit is vergelijkbaar met het fietsen met tegenwind - en bewegen ze radieel naar de moederster toe. Deze radiële beweging leidt tot zowel een probleem voor planeetvorming als een verrijking van het gas in het binnenste gebied van de schijf.

Het probleem van deze beweging is de theoretische voorspelling dat de stofdeeltjes niet kunnen groeien voorbij groottes van ongeveer één meter voordat ze worden opgeslokt door hun moederster. Het bestaan van planeten, planetoïden en kometen spreekt deze verwachting natuurlijk tegen: er moet een manier zijn hoe de stofdeeltjes kunnen groeien tot enorme groottes. Een optie om de radiële

beweging van het stof te stoppen is met behulp van stofvallen, locaties in de schijf waar stof zich effectief kan ophopen. Binnenin deze stofvallen kan planeetvorming dan zijn weg vervolgen. Deze stofvallen kunnen direct worden waargenomen met ALMA via de warmtestraling van de stofdeeltjes. Totdusver dienen deze stofvallen zich voor in verschillende varianten: van ringen met bijbehorende gaten en holtes tot spiraalstructuren en grote asymmetrieën (zie Figuur 2).

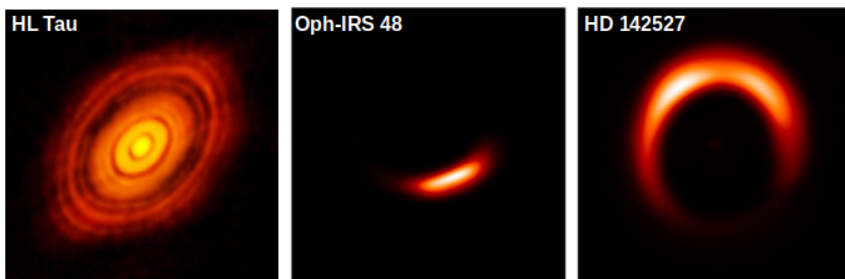


Figure 2: Warmtestraling van het stof in de planeetvormende schijven rondom de jonge sterren HL Tau (links), Oph-IRS 48 (midden) en HD 142527 (rechts). De stofschijf van HL Tau bestaat uit meerdere ringen en gaten (zwarte banden), terwijl die van Oph-IRS 48 en HD 142527 bestaan uit holtes en grote asymmetrieën. Dit figuur maakt gebruik van data gepubliceerd in ALMA Partnership et al. (2015) en Yang et al. (2023).

De verrijking van het gas gebeurt als een stofdeeltje een zogenoemde sneeuwlijn van een molecuul doorkruist. De sneeuwlijn is een scheidingslijn in de schijf die bepaalt in welke vorm (gasfase of ijsfase) een molecuul zich bevindt: binnen de sneeuwlijn is de temperatuur boven de sublimatietemperatuur van het molecuul en bevindt het zich in de gasfase. Buiten de sneeuwlijn is het te koud voor het molecuul en zal het gecondenseerd zijn op het stof – het vormt dan een laagje ijs rondom de stofdeeltjes. De radiële verplaatsing van het stof van buiten de sneeuwlijn naar binnen kan daardoor voor een verhoging van de abundantie van een molecuul zorgen. Het onderzoek naar deze verhoging is een actief onderzoeksveld binnen de astronomie.

Gas waarnemingen

Welk molecuul kan worden waargenomen met welke telescoop hangt af van de golflengte waarvoor de telescoop gevoelig is en de locatie van de sneeuwlijn van het molecuul. Een molecuul zoals water (H_2O) heeft bijvoorbeeld een sneeuwlijn locatie van een paar astronomische eenheden. Dit betekent dat emissielijnen van H_2O gas goed kunnen worden waargenomen met JWST. Waarnemingen van JWST, en in het bijzonder die van het MIRI instrument, bestaan uit een spectrum: de helderheid van het waargenomen licht als functie van golflengte. Naast H_2O wordt een MIRI spectrum van een schijf rondom een zonachtige ster gekarakteriseerd door signalen van moleculen zoals koolstofmonoxide (CO), koolstofdiox-

ide (CO_2), waterstofcyanide (HCN), acetyleen (C_2H_2) en het hydroxylradicaal (OH) (zie Figuur 3).

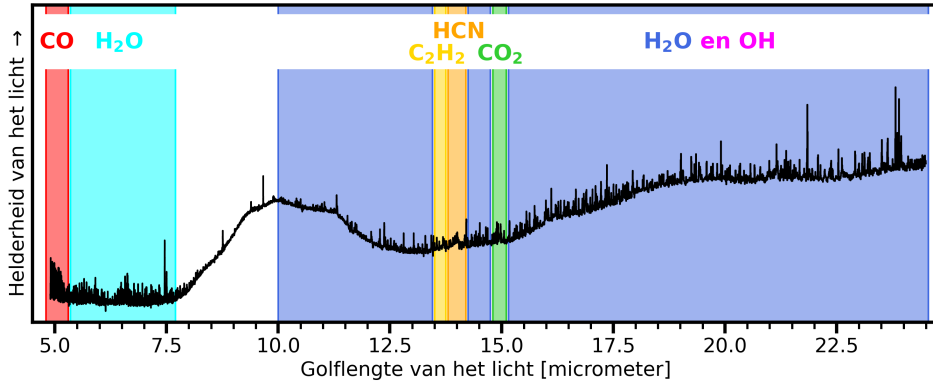


Figure 3: Het JWST-MIRI spectrum van de schijf rondom de jonge ster FT Tau. De gekleurde banden duiden aan welk molecuul zichtbaar is.

In tegenstelling tot de JWST waarnemingen, bestaan de ALMA waarnemingen niet alleen uit spectra, maar kan de emissie van moleculen ook worden vastgelegd in een 2D afbeelding. Hierdoor kan ook direct vastgesteld worden waar de moleculen zich bevinden in de schijf. Grote onderzoeken van meerdere moleculen in een schijf hebben aangetoond dat niet alle moleculen zich bevinden op dezelfde locatie, maar ook dat de emissie van moleculen verschillende structuren kan aannemen, net als het stof. ALMA waarnemingen van moleculen lopen uiteen van hele simpele moleculen, zoals CO, cyanide (CN), HCN, koolstofmonosulfide (CS) en zwavelmonoxide (SO), tot meer complexere moleculen, zoals formaldehyde (H_2CO), methanol (CH_3OH), methylformiaat (CH_3OCHO) en dimethylether (CH_3OCH_3). Figuur 4 toont ALMA waarnemingen van verschillende moleculen in een planeetvormende schijf.

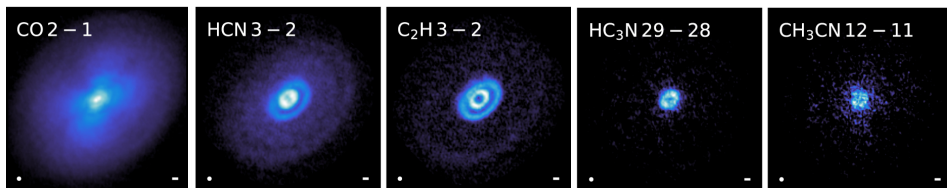


Figure 4: Een overzicht van een aantal moleculen waargenomen in de schijf rondom de jonge ster HD 163296 met ALMA. Dit figuur is aangepast overgenomen van Öberg et al. (2021).

Dit proefschrift

Zoals eerder benoemd houdt dit proefschrift zich bezig met de chemische samenstelling van planeetvormende schijven. Om deze samenstelling te onderzoeken wordt zowel gebruik gemaakt van JWST waarnemingen gericht op de binnenste regionen (Hoofdstukken 2-4) als ALMA waarnemingen van de buitenste delen van de schijven (Hoofdstukken 5-7). Nu volgt een korte samenvatting van elk hoofdstuk.

Hoofdstuk 2 richt zich op JWST waarnemingen van de schijf rondom de jongster DR Tau. De data toont de sterke emissie van de moleculen CO, H₂O (hoofdstuk 3), OH, CO₂, HCN, en C₂H₂. Om de emissie van CO goed te karakteriseren is extra gebruik gemaakt van waarnemingen van IRTF-iSHELL en VLT-CRIRES, instrumenten met een hogere spectrale resolutie dan JWST die zich op aarde bevinden. De analyse van de moleculen is gebruikt om de emissie structuur van de schijf bloot te leggen: de CO emissie komt van het binnenste gebied van de schijf, dichtbij de moederster, terwijl de banden van HCN en C₂H₂ komen uit een diepere laag van de schijf. De straling van CO₂ komt niet alleen dieper uit de schijf, maar ook van een grotere afstand ten opzichte van de moederster. De locaties van de moleculen zijn weergegeven in Figuur 5. Daarnaast suggereert de CO analyse dat de binnenste en buitenste delen van de schijf zich mogelijk niet op een lijn bevinden: het binnenste gedeelte zou zich in een ander vlak, gezien vanaf de evenaar van de moederster, bevinden ten opzichte van het buitenste gedeelte.

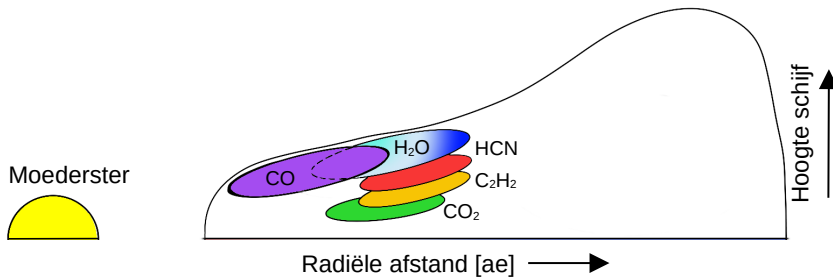


Figure 5: Schematische weergave van de verwachte locaties van CO, H₂O, CO₂, HCN en C₂H₂. Dit figuur is aangepast overgenomen van Temmink et al. (2024a,b).

Hoofdstuk 3 is gefocust op de H₂O emissie in de JWST waarnemingen van DR Tau. Het hoofdstuk maakt onderscheid tussen twee soorten emissielijnen: de ro-vibratoire lijnen, die ontstaan door een combinatie van de vibratie van de verschillende atomen in het molecuul met de rotatie van het hele molecuul, en de puur rotationele lijnen, die voortkomen uit pure rotatie. De ro-vibratoire lijnen van H₂O zijn zichtbaar op golflengtes kleiner dan 10 micrometer, terwijl de rotationele lijnen zich op grotere golflengtes bevinden. Deze verschillende soorten lijnen zijn

gebruikt om een radiële temperatuurgradiënt in de schijf bloot te leggen. Hierbij is gevonden dat de temperatuur omlaag gaat met de golflengte van de emissielijnen, terwijl ze worden uitgezonden op steeds grotere radiële locaties (zie Figuur 5). De puur rotationele lijnen kunnen worden onderverdeeld in drie verschillende reservoirs: een heet, een warm, en een koud reservoir. Er is gezocht naar aanwijzingen voor verrijking van het koude water door transport van de stofdeeltjes, maar dit kon niet worden vastgesteld voor deze schijf.

Hoofdstuk 4 vervolgt het onderzoek van Hoofdstuk 3 naar de verschillende rotationele H₂O reservoirs en de invloed van de radiële verplaatsing van het stof. In het bijzonder is gekeken naar de JWST waarnemingen van acht schijven die relatief compacte stof emissie tonen met ALMA, omdat het transport van ijsrijke stofdeeltjes in dit soort schijven als zeer effectief wordt beschouwd. Zes van de acht schijven tonen sterke emissie van alle drie de H₂O reservoirs, maar alleen twee van deze schijven tonen een mogelijke verrijking van het koude waterreservoir. Het kan niet worden vastgesteld of dit komt door radiële verplaatsing van de stofdeeltjes. De spectra van de laatste twee schijven worden niet gedomineerd door H₂O emissielijnen, maar door lijnen van andere moleculen, zoals CO₂.

Hoofdstuk 5 richt zich niet direct op de chemische samenstelling van planeetvormende schijven, maar onderzoekt de structuren die zichtbaar zijn in de warmtestraling van het stof en hoe deze de JWST waarnemingen kunnen beïnvloeden. In dit hoofdstuk worden hoge resolutie ALMA waarnemingen in detail onderzocht om de locaties en dieptes van de gaten in het stof van acht verschillende schijven vast te stellen. De gevonden structuren bestaan uit verschillende gaten en bijbehorende ringen, maar er is ook een zogenaamde "holte" - een centraal gat in het stof rondom de moederster - gevonden in de schijf rondom de jonge ster BP Tau. Een directe connectie tussen de gevonden structuren en de sterkte van de moleculaire emissie in de JWST waarnemingen kon niet worden vastgesteld.

Hoofdstuk 6 bestudeert de emissie van de zwaveldioxide (SO₂), formaldehyde H₂CO en methanol CH₃OH in de asymmetrische stofval van de Oph-IRS 48 schijf. De binnenrand van de stofval wordt opgewarmd door straling van de moederster wat er voor zorgt dat de ijslagen rondom het stof sublimeren en dat deze moleculen zichtbaar zijn in het gas. In dit hoofdstuk is vastgesteld dat zowel de straling van H₂CO als CH₃OH wordt uitgezonden vanuit een klein gebied rondom de binnenrand, terwijl de emissie van SO₂ van een grotere afstand binnen de stofval komt. Verder is geconstateerd dat de straling van de moederster de H₂CO en CH₃OH moleculen opbreekt in kleinere bestanddelen en daardoor hun abundanties verlaagt. Effectieve vorming van H₂CO door gasfase reacties, gebruikmakend van de opgebroken bestanddelen van CH₃OH en ook van H₂O en methaan (CH₄), verhogen daarentegen ook weer de abundantie. Dit creëert twee verschillende reservoirs van H₂CO: de één ontstaat door sublimatie aan de binnenrand van de stofval, de ander door volgt uit effectieve vorming in de gasfase.

Hoofdstuk 7 houdt zich bezig met de chemische samenstelling van de asym-

metrische schijf rondom de jonge ster HD 142527. Deze schijf is bijzonder omdat niet alleen het stof asymmetrisch is verdeeld, maar ook de moleculaire emissie van ethynyl (C_2H), CN, CS en H_2CO . De emissiekaarten van C_2H , CN en H_2CO vertonen zelfs kenmerken van een spiraalarm in de schijf. Dit hoofdstuk stelt voor dat vertraagd invallend materiaal, voortkomend uit het restant van de moederwolk waaruit de ster is gevormd, de asymmetrische emissie kan verklaren. In het bijzonder zorgt het invallende materiaal voor een lokaal verhoogde elementaire koolstof-tot-zuurstof verhouding in de schijf en kan het tevens de spiraalstructuur verklaren. Een verhoogde koolstof-tot-zuurstof verhouding leidt tot meer effectieve vorming van koolwaterstoffen (zoals C_2H), CN, CS en zelfs H_2CO .

Toekomstperspectief

Waarnemingen van JWST en ALMA geven ons de kans om de chemische samenstelling van planeetvormende schijven in hoog detail te bestuderen. Omdat beide telescopen gevoelig zijn voor de verschillende delen van de schijven, is het van groot belang voor ons begrip van de dominante fysische en chemische processen dat toekomstige studies zich richten op het combineren van deze waarnemingen. Naast deze bestaande krachtige telescopen, zijn meer telescopen in aanbouw (zoals de Extremely Large Telescope, ELT) of zijn deze in de ontwerpfase (zoals de ver-infrarood missies POEMM en PRIMA). Ook deze telescopen zijn weer gevoelig voor net iets andere golflengtes dan JWST en ALMA, waardoor ze andere moleculen of andere soorten emissielijnen van de reeds onderzochte moleculen kunnen waarnemen. De toekomst van het onderzoek naar de chemische samenstelling van planeetvormende schijven is rooskleurig: de mogelijke 20-jarige levensduur van JWST, de geplande verbeteringen van ALMA en deze nieuwe telescopen in aanbouw bieden ons de unieke kans en tijd om de waarnemingen te combineren, gedetailleerde onderzoeken uit te voeren en om onze kennis over planeetvormende schijven daardoor enorm te vergroten.