
Nederlandse samenvatting

Al sinds het ontstaan van de mensheid kijken we regelmatig omhoog naar de sterrenhemel en vragen we ons af wat die verre lichtpuntjes zijn. Al snel zagen we hier patronen in, de sterrenbeelden, en leerden we de sterren gebruiken als navigatie. Zelfs de planeten in ons eigen zonnestelsel konden al herkend worden aangezien deze lichtpuntjes zich anders aan de hemel bewegen dan de rest. Door de jaren heen werd het steeds duidelijker dat deze lichtpuntjes sterren zijn die heel ver van onze Aarde af liggen. Onze eigen Zon is ook een ster en alleen speciaal omdat deze zo dichtbij staat en ons van licht en warmte voorziet. Ondertussen weten we ook al dat er planeten rond andere sterren hangen. Inmiddels zijn er al meer dan 5000 planeten ontdekt rond andere sterren dan de Zon, wat statistisch gezien suggereert dat er gemiddeld één planeet rond elke ster draait. Planeten zijn dus heel gewoon in het universum, maar de diversiteit in planeten is groot. Rond sommige sterren draait bijvoorbeeld een Jupiter-achtige planeet ver binnen de baan van Mercurius, terwijl in andere planetenstelsels helemaal geen Jupiter-achtige planeet voorkomt. Ook de atmosferen van deze planeten verschillen enorm. Sommige zijn zoals hier op Aarde maar andere worden juist gedomineerd door methaan of zwavel.

Dit roept gelijk ook een aantal vragen op: hoe vormen sterren zoals de Zon? Hoe zijn de planeten in ons eigen zonnestelsel en rond andere sterren gevormd? Wat bepaalt de chemische samenstelling van deze planeten en is er ook leven op deze planeten? Inmiddels weten we dat planeten tegelijkertijd vormen met hun ster. Om dus te onderzoeken hoe de samenstelling van planeten tot stand komt kan men naar jonge sterren in vorming kijken. Dit proefschrift kijkt specifiek naar dit soort jonge sterren in vorming en onderzoekt of de samenstelling van het materiaal waaruit sterren en planeten vormen is geërfd van de moleculaire wolk waar ze uit worden geboren of dat de samenstelling onderweg verandert.

Jonge protosterren

Sterren vormen uit gigantische wolken die bestaan uit moleculair gas en kleine stofkorrels. Een voorbeeld van zo'n stervormingsgebied is afgebeeld in Fig. 1. Een wolk is heel dynamisch met een onregelmatige vorm en uit één wolk vormen zich

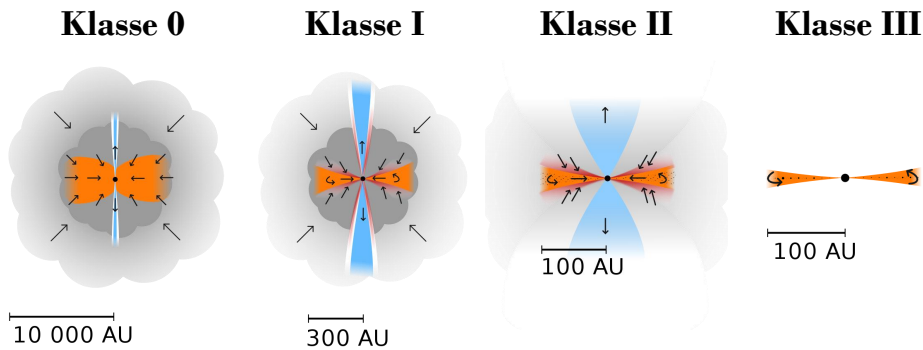


Figuur 1: De Carinanevel zoals gezien door de James Webb Ruimtetelescoop. In deze wolken worden nieuwe sterren en planeten geboren. De blauwe en gele sterren liggen op de voorgrond, terwijl de meest rode sterren zich diep in de moleculaire wolk bevinden. Afbeelding van: NASA, ESA, CSA, en STScI.

vaak ook meerdere sterren. Door een lokale instabiliteit kan een deel van de wolk ineens storten onder zijn eigen zwaartekracht. In de volgende fasen van stervorming is het belangrijk om een onderscheid te maken tussen hoe lage massa sterren (zoals de Zon) vormen en hoe hoge massa sterren, sterren die veel zwaarder zijn dan de Zon, vormen.

In het geval van lage massa sterren begint er in de kern van de ineensstortende wolk een protoster te vormen, zie Fig. 2. Door het behoud van draaimoment in de wolk vormt zich rond deze jonge protoster een schijf van materiaal. Gedurende de volgende 500 000 jaar groeit de massa van de ster doordat materiaal van de schijf op de ster valt. De schijf zelf groeit ook doordat de omliggende wolk op de schijf blijft vallen (Klassen 0 en I). Geleidelijk verdwijnt de omliggende wolk doordat deze op de schijf valt, maar ook omdat er sterke straalstromen worden gelanceerd vanuit de protoster die de wolk meeslepen. Er blijft een voor-hoofdreeksster over die is omringd door een protoplanetaire schijf (Klasse II). In deze protoplanetaire schijven bevinden zich hoogstwaarschijnlijk al embryo's van planeten. Gedurende de volgende tien miljoen jaar verdwijnt de protoplanetaire schijf doordat deze op planeten of de centrale ster valt en doordat deze wordt weggeblazen door de straling van de ster. Er blijft een zogeheten puinschijf over (Klasse III). Uiteindelijk wordt de ster geboren als er waterstoffusie begint in diens kern.

In het geval van een hoge massa ster (> 8 keer zo zwaar als de Zon) verschilt de evolutie van die van een lagere massa ster. Allereerst vormt een hoge massa ster vele malen sneller, binnen ongeveer 100 000 jaar. Al vroeg in diens evolutie worden de centrale regionen van het protostellair systeem warm genoeg om een



Figuur 2: Schematische weergave van de verschillende stadia van stervorming. In dit proefschrift ligt de focus op de jongste stadia, de Klasse 0 en Klasse I protosterren. Een AU is gelijk aan de (gemiddelde) afstand tussen de Aarde en de Zon (~ 150 miljoen kilometer). Afbeelding van: Magnus Persson.

rijke en complexe moleculaire chemie mogelijk te maken. Tevens begint er al ver voordat de omliggende wolk verdwenen is waterstoffusie in de kern van de zware ster, waardoor deze grote hoeveelheden ultraviolet (UV) licht gaat produceren. Dit leidt tot de totstandkoming van een klein gebied van geïoniseerd waterstof, een zogeheten HII gebied. Vergelijkbaar met lage massa sterren vormt zich een schijf van materiaal rondom de zware ster waardoor de ster zelf nog in massa kan toenemen. Uiteindelijk zorgt de grote stralingsdruk van de hoge massa ster ervoor dat de schijf en de omliggende wolk compleet worden weggeblazen.

Complexe organische moleculen

Gedurende alle stadia van het stervormingsproces kunnen waarnemingen van moleculen gebruikt worden om de eigenschappen van het protostellair systeem te beschrijven. Moleculair waterstof (H_2) is het meest voorkomende molecuul, gevolgd door koolstofmonoxide (CO). Andere veelvoorkomende moleculen zijn water (H_2O), ammonia (NH_3) en methaan (CH_4). De chemie in de interstellaire ruimte kan echter nog veel complexere moleculen produceren. Het meest voorkomende *complexe organische molecuul*, een molecuul met 6 of meer atomen waarvan één koolstof is, is methanol (CH_3OH). Deze organische moleculen kunnen echter nog meer complex worden zoals ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), methylformiaat (CH_3OCHO) en glycolaldehyde (CH_2OHCHO). Ook prebiotische moleculen zoals formamide (NH_2CHO) en ureum ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) zijn gedetecteerd rond jonge protosterren.

Deze complexe organische moleculen worden geproduceerd op de oppervlakte van stofkorrels in moleculaire wolken. De temperaturen in deze wolken zijn te laag (< 15 K) voor actieve chemie in de gasfase. Ook al bevatten de stofkorrels, die bestaan uit silicaten en koolstofachtig materiaal, maar ongeveer 1% van de totale massa, ze zijn ideale katalysatoren onder deze condities. Onder lage temperaturen blijven simpele moleculen, zoals CO , namelijk plakken aan deze stofkorrels en deze

vormen zo een *ijslaag* op het oppervlak. In dit ijs landen ook waterstofatomen die zich gemakkelijk door het ijs kunnen bewegen en kunnen reageren met moleculen in het ijs. Door opeenvolgende reacties van CO met waterstof worden HCO, formaldehyde (H_2CO) en uiteindelijk CH_3OH gevormd. Reacties tussen radicalen (zeer reactieve moleculen) leiden ook tot de vorming van nog complexere moleculen in het ijs zoals CH_3OCHO en CH_2OHCHO . Deze complexe moleculen blijven ook plakken in het ijs zolang de temperatuur beneden de ~ 100 K blijft.

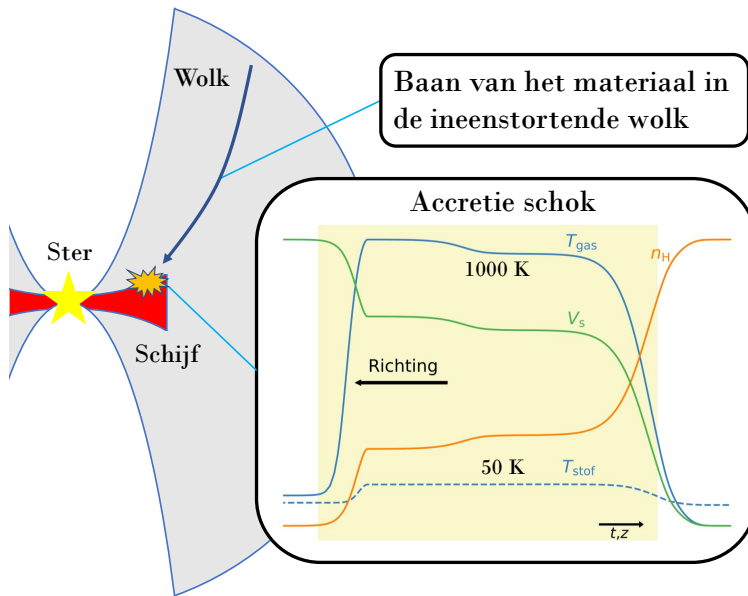
De temperatuur stijgt echter als het materiaal in de ineenstortende wolk dicht bij de centrale protoster komt. Wanneer de temperatuur boven de 100 K komt, sublimeren alle complexe moleculen tezamen met water van de stofkorrels. Dit gebeurt in de zogenaamde *hete kernen* van protostellaire systemen. Voornamelijk in de jongste protostellaire systemen (Klasse 0) zijn deze hete kernen groot in omvang waardoor deze complexe moleculen daar makkelijker zijn waar te nemen. In oudere systemen (Klasse I, II) is de temperatuur lager door de aanwezigheid van een (grote) protoplanetaire schijf. In de gasfase zijn complexe moleculen gemakkelijk waar te nemen met telescopen zoals de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Deze telescoop bevindt zich in Chili en kijkt op millimeter golflengten die mensen met het blote oog niet kunnen zien.

Gedurende de afgelopen jaren zijn deze complexe moleculen gronding bestudeerd in meerdere protostellaire systemen. Interessant genoeg lijken sommige verhoudingen tussen de abundanties van deze moleculen heel constant te zijn tussen de verschillende bronnen. Een goed voorbeeld is de verhouding tussen CH_3OCHO en CH_3OCH_3 , die ongeveer één is in zowel lage massa protosterren, hoge massa sterren en kometen. Dit geeft aan dat deze moleculen in vergelijkbare fysische condities vormen, in de moleculaire wolken op de oppervlakte van stofkorrels. De verhoudingen tussen andere complexe moleculen, zoals NH_2CHO en CH_3OH , laten echter grotere variaties zien, wat erop kan duiden dat lokale fysische condities in de hete kernen de verhoudingen kunnen veranderen. Het is dus interessant om de complexe moleculen te bestuderen en zo meer te weten komen over de chemische samenstelling en ook over de fysische condities in deze jonge protostellaire systemen.

Accretie schokken

De complexe organische moleculen worden dus vooral gevormd in de koude moleculaire wolken, maar met de ALMA telescoop nemen we ze vooral waar in de centrale en warme regionen rond protosterren. Tussen de koude wolk en de hete kern veranderen de fysische condities drastisch, zowel de temperatuur en dichtheid als de sterkte van de UV straling. Dit kan op zijn beurt effect hebben op de chemie. Het is daarom nog steeds onduidelijk of de chemische samenstelling in de schijf en hete kern worden geërfd van de koude wolk of dat deze (deels) wordt gereset, waar de moleculaire samenstelling (deels) wordt veranderd. Een mogelijke manier die tot zo'n reset kan leiden, is een *accretie schok* op de grens tussen de ineenstortende wolk en de schijf, zie Fig. 3.

Een schok ontstaat als twee materialen met elkaar botsen en resulteert in een



Figuur 3: Schematische weergave van een protostellair systeem. De centrale protoster is weergegeven als de gele ster en de schijf in het rood. De ineenstortende wolk is afgebeeld in het grijs met daarin een voorbeeld van een baan die het materiaal richting de schijf volgt. Als het materiaal de schijf raakt, ontstaat er een accretie schok.

significante verhoging van de temperatuur en een onomkeerbare verhoging van de dichtheid. De sterkte van de schok hangt af van verschillende fysische factoren, voornamelijk de dichtheid, snelheid en de sterkte van het magnetisch veld. In het geval van accretie schokken is de snelheid relatief laag ($< 10 \text{ km s}^{-1}$) waardoor de temperatuur niet ver boven een paar duizend graden uit komt. Onder deze temperaturen dissociëert H_2 niet, maar het zorgt ervoor dat chemische reacties die niet gebeuren in de koude wolk nu wel plaats kunnen vinden. De temperatuur van het stof gaat ook omhoog, maar wordt niet veel hoger dan 50 K ($-223 \text{ }^\circ\text{C}$). Hierdoor sublimeren simpele ijzen zoals CO en CH_4 , maar blijven water en complexe organische moleculen bevroren op de stofkorrels. Een deel van deze ijzen kan wel van de stofkorrels worden gesputterd door botsingen tussen stofkorrels en gas.

Voor de gasfase chemie van interstellaire schokken is het OH radicaal cruciaal. Deze wordt gevormd onder hoge temperaturen ($> 100 \text{ K}$) door een chemische reactie tussen H_2 en atomair zuurstof. Het OH radicaal is heel reactief en reageert daardoor snel met andere moleculen zoals H_2 wat leidt tot de vorming van water. Dit is vooral relevant als de temperatuur boven de 300 K ligt. Voor lagere temperaturen wordt geen water gevormd, maar reageert het OH radicaal vooral met zavel (S) waardoor er zwavelmonoxide (SO) en zwaveldioxide ontstaan (SO_2).

Het zijn ook deze twee moleculen (SO en SO_2) die vaak worden geassocieerd met accretie schokken. Waarnemingen met ALMA hebben laten zien dat warme straling van deze twee moleculen zich kan bevinden bij de grens van wolk en

schijf. Echter, straling van deze twee moleculen kan ook uit andere plekken van het protostellaire systeem komen, zoals uit de straalstromen. Het is daardoor nog onzeker of accretie schokken echt bestaan. Om robuuste conclusies te trekken over de oorsprong van de SO en SO₂ straling moet deze daarom goed vergeleken worden met schokmodellen. Dit is ook belangrijk om de sterkte van een accretie schok te bepalen en daarmee hoeveel de schok de chemie uit de wolk reset als het materiaal de schijf invloeit.

Dit proefschrift

Dit proefschrift onderzoekt de mate waarin de moleculaire samenstelling in protostellaire schijven geërfd wordt van de moleculaire wolk. Twee onderwerpen staan centraal:

1. Complexe organische moleculen en wat deze kunnen vertellen over de fysische condities in zowel het protostellaire systeem zelf als de moleculaire wolk waaruit de ster wordt gevormd (Hoofdstukken 2, 3 en 4).
2. Het waarnemen en modelleren van accretie schokken en wat voor invloed deze kunnen hebben op de moleculaire samenstelling van het materiaal dat de schijf invloeit (Hoofdstukken 5 en 6).

In de volgende paragrafen wordt per hoofdstuk een korte samenvatting gegeven van de belangrijkste resultaten.

Hoofdstuk 2 presenteert ALMA waarnemingen van drie lage massa Klasse 0 protosterren. Aan de hand van spectra worden de kolomdichtheden en excitatie temperaturen bepaald voor verschillende complexe organische moleculen die zuurstof bevatten. De abundanties van verscheidene moleculen zoals CH₃OCHO en di-methyl ether (CH₃OCH₃) ten opzichte van methanol zijn opmerkelijk constant in de drie bestudeerde protosterren, alsmede in andere protosterren die met ALMA zijn bestudeerd in de literatuur. Dit suggereert dat deze moleculen gevormd zijn onder vergelijkbare fysische condities, waarschijnlijk in de ijzen op het oppervlak van stofkorrels in de koude moleculaire wolken. Voor sommige bestudeerde moleculen zoals acetaldehyde (CH₃CHO) en C₂H₅OH zijn de abundanties ten opzichte van CH₃OH echter veel variabelere tussen de verschillende protosterren. Dit duidt erop dat voor deze moleculen de lokale fysische condities (o.a., temperatuur, UV straling) in de protostellaire systemen belangrijk zijn. In één van de protosterren is ook een koudere component van straling van de complexe moleculen aanwezig.

In *Hoofdstuk 3* kijken we alleen naar de straling van CH₃OH in zowel lage massa als hoge massa protosterren met als doel een link te leggen tussen de aanwezigheid van CH₃OH in de gasfase en fysische eigenschappen van het protostellaire systeem. Met het laatste wordt hier voornamelijk de aanwezigheid van een schijf bedoeld die de temperatuur in het systeem gemiddeld verlaagt of de aanwezigheid van optisch dikke stofkorrels die de straling van de hete kern van het protostellaire systeem blokkeren. Hiervoor worden ALMA waarnemingen gebruikt van Hoofdstuk 2 en uit het ALMA archief, van de Perseus ALMA Chemistry Survey (PEACHES) en

de ALMA Evolutionary study of High Mass Protocluster Formation in the Galaxy (ALMAGAL) programma's. Met data van de literatuur erbij worden er in totaal 184 verschillende protosterren bestudeerd. Er is duidelijk een correlatie tussen de totale methanol massa en de bolometrische lichtkracht, maar er is ook een spreiding van meer dan vier orden van grootte aanwezig voor zowel lage massa als hoge massa protosterren. Een simpel model van een sferische ineenstortende wolk beschrijft de bronnen met een hoge methanol massa heel goed, maar om de spreiding te kunnen verklaren zijn (grote) schijven en optisch dikke stofkorrels nodig.

In *Hoofdstuk 4* wordt er ook gekeken naar methanol, maar meer specifiek naar de verhouding van deuteriumatomen (D) tot waterstofatomen (H). De D/H verhouding van methanol is heel gevoelig voor de temperatuur in de koude moleculaire wolk en door deze te bestuderen in protostellaire systemen kunnen we dus achterhalen wat de temperatuur in eerdere stadia was. Hiervoor gebruiken we de ALMAGAL data uit Hoofdstuk 3 en kijken we naar de versies van methanol die deuterium bevatten: CH₂DOH en CHD₂OH. De CH₂DOH/CH₃OH verhouding in hoge massa protosterren is meer dan een orde van grootte lager dan in lage massa protosterren. Door dit te vergelijken met modellen in de literatuur kan geconcludeerd worden dat de wolken waar hoge massa sterren uit vormen waarschijnlijk warmer zijn ($\sim 20 - 25$ K) dan die van lage massa sterren (< 15 K). Een alternatief is dat de levensduur van hoge massa moleculaire wolken korter is. De verhouding tussen CHD₂OH en CH₂DOH laat echter weinig verschil zien tussen hoge en lage massa protosterren, wat suggereert dat herhaaldelijke deuteratie even efficiënt is.

Hoofdstuk 5 presenteert modellen van accretie schokken met als doel te bekijken onder welke condities de abundantie van SO en SO₂ significant hoger wordt. De gedetailleerde schokmodellen zijn berekend met de Paris-Durham schokcode voor gebieden met een zwak magnetisch veld. In lage snelheid accretie schokken (~ 3 km s⁻¹) stijgt alleen de SO abundantie. In hogere snelheid schokken (> 4 km s⁻¹) stijgt de abundantie van zowel SO als SO₂. Hierin is de sterkte van de UV straling cruciaal sinds deze H₂O dissocieert tot OH, wat op zijn beurt kan reageren met atomair zwavel. Als de dichtheid hoog genoeg is ($> 10^7$ cm⁻³) kunnen ook SO en SO₂ ijsen sublimeren wat diens abundanties in de gasfase verhogen.

In *Hoofdstuk 6* worden ALMA waarnemingen van drie Klasse I protosterren bekeken om te zoeken naar SO en SO₂ straling dat geassocieerd kan worden met accretie schokken. De schijven van alle drie de protostellaire systemen zijn ruimtelijk opgelost, maar SO en SO₂ zijn maar in één van de drie bronnen gedetecteerd. Door de fysische condities waar deze moleculen zich in bevinden te vergelijken met schokmodellen zoals beschreven in Hoofdstuk 5, kan geconcludeerd worden dat de SO en SO₂ zich niet in een accretie schok bevinden of dat deze schok heel zwak is. Dit suggereert dus dat de moleculaire samenstelling momenteel onveranderd de schijf in vloeit. In dit hoofdstuk wordt tevens een link gelegd tussen de aanwezigheid van straling van warm SO₂ en een hoge bolometrische lichtkracht, wat kan duiden op het belang van energetische processen zoals UV straling voor de chemie van SO₂.

Toekomstperspectief

De toekomst van het onderzoek naar complexe organische moleculen en accretie schokken is rooskleurig. Allereerst volgen er steeds meer waarnemingen van ALMA waarmee de vraagstukken van dit proefschrift verder bestudeerd kunnen worden. Er worden niet meer slechts enkele protostellaire systemen waargenomen, maar er wordt er ook naar meerdere bronnen tegelijkertijd gekeken. Dit zorgt ervoor dat de verbanden tussen verschillende protostellaire systemen steeds meer duidelijk worden. Tevens zullen meer ruimtelijk opgeloste waarnemingen van accretie schokken met ALMA duidelijkheid geven over hun aanwezigheid en effect op de chemische samenstelling van het materiaal dat de schijf in vloeit.

De lancering van de James Webb Ruimtetelescoop (JWST) maakt het ook weer mogelijk om met infraroodogen naar het heelal te kijken. Het ruimtelijk oplossend vermogen en de gevoeligheid van JWST zijn ongeëvenaard. Eén van de eerste resultaten die van JWST worden verwacht, zijn de ontdekkingen van complexe organische moleculen zoals acetaldehyde en ethanol in de ijsen. Dit zal antwoord geven op een groot vraagstuk waar nog veel over wordt gedebatteerd: vormen complexe organische moleculen in de ijsen op het oppervlak van stofkorrels of vormen ze vooral in de gasfase? Tevens kan JWST de locaties van accretie schokken nog helderder zien dan ALMA. Hierdoor kan de aanwezigheid en sterkte van accretie schokken verder in kaart worden gebracht en daarmee ook de vraag beantwoorden of de chemische samenstelling in protostellaire schijven is geërfd van de moleculaire wolken of niet.