



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

**A molecular journey : tales of sublimating ices from hot cores to comets**  
Bogelund, E.G.

**Citation**

Bogelund, E. G. (2019, March 14). *A molecular journey : tales of sublimating ices from hot cores to comets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/69725>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/69725>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/69725> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Bogelund, E.G.

**Title:** A molecular journey : tales of sublimating ices from hot cores to comets

**Issue Date:** 2019-03-14

---

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

---

Ons sterrenstelsel, de Melkweg, bevat ongeveer 400 miljard sterren. Een van deze sterren is onze zon. Rond de zon draaien acht planeten. Vier hiervan zijn zogenaamde rotsplaneten, wat betekent dat ze een hard oppervlak hebben. Tussen deze rotsplaneten bevindt zich onze thuisplaneet: aarde. De andere vier planeten zijn zogenaamde gasreuzen. Deze planeten zijn veel groter en zwaarder dan de rotsplaneten en bestaan voornamelijk uit gas zonder hard oppervlak. Behalve planeten draaien kleinere rotsen, die asteroïden genoemd worden, en ijs- en rotsformaties genaamd kometen om de zon. Samen vormen de zon, planeten, asteroïden en kometen het zonnestelsel.

In astronomische termen is de zon een niet zo bijzondere ster. Sterker nog, de meeste sterren in de Melkweg lijken veel op onze zon; ze hebben ongeveer dezelfde massa, ze bestaan uit hetzelfde materiaal en ze zijn van vergelijkbare grootte. Ons planetenstelsel is ook niet ongevoen: in de Melkweg hebben het merendeel van de sterren, die vergelijkbaar zijn met onze zon, tenminste één planeet. Hierbij moet vermeld worden dat de combinatie van planeten in ons zonnestelsel wel redelijk uniek lijkt te zijn. Wat het zonnestelsel special maakt, is dat het de enige plek in het heelal is waarvan we zeker weten dat er leven bestaat. Maar, hoe heeft leven hier tot stand kunnen komen? En, misschien wel een spannendere vraag, wat is de kans dat leven bestaat of zal ontstaan op andere plekken in het heelal? Om deze vragen te beantwoorden, moeten we eerste begrijpen hoe zowel het zonnestelsel als leven op aarde zijn ontstaan. We moeten ontrafelen hoe sterren en planeten vormen, maar ook de vorming van moleculen (structuren van atomen die bij elkaar gehouden worden door chemische bindingen) die de bouwstenen vormen voor leven zoals wij het kennen.

## De vorming van sterren en planetenstelsels

De plekken waar sterren geboren worden, worden stervormingsgebieden genoemd. Deze gebieden bestaan uit wolken van gas en stof. De meest voorkomende gassen zijn waterstof en helium, maar kleine hoeveelheden zuurstof, koolstof en stikstof zijn ook aanwezig. Deze atomen zijn interessant voor de vorming van leven, aangezien zuurstof, koolstof, waterstof en stikstof de vier meest voorkomende elementen zijn in het menselijk lichaam. Een voorbeeld van een stervormingsgebied is te zien in Figuur 1. Deze spectaculaire afbeelding toont hoe een groot aantal sterren gevormd wordt in de gas en stof structuren van deze regio.

Zodra een stervormingsgebied genoeg in massa is toegenomen wordt deze onstabiel en stort deze in elkaar. Deze ineenstorting wordt veroorzaakt door zwaartekracht die werkt op alle atomen in het gas en stof en deze naar elkaar toe trekt. Na de ineenstorting wordt een jonge ster, een zogenaamde protoster, gevormd in de kern van de stervormingswolk. Rondom de protoster ontstaat een schijf van gas en stof, die materiaal van de stervormingswolk voedt aan de jonge ster. Gedurende dit proces zal een gedeelte van



**Figuur 1:** De 'Mystieke Berg' in de Carina Nevel gefotografeerd door de *Hubble* Space Telescope. Dit stervormingsgebied staat 7500 lichtjaar van ons af in het zuidelijke sterrenbeeld Carina. De afbeelding toont bergen en pilaren van stof en gas waarin de kraamkamers voor nieuwe sterren verborgen zijn. De pilaren worden gevormd en samengedrukt door de sterke straling van pasgeboren sterren, wat op die manier zorgt voor de vorming van meer nieuwe sterren. Op de toppen van de bergen zijn sterren te zien die omgeven worden door gasstromen. Langs de randen van de wolk zijn stromen geïoniseerd gas te zien, gecombineerd met normaal gas en stof dat verlicht wordt door sterren. De hoge concentratie gas en stof in de binnenste gedeeltes van de bergen en pilaren voorkomt dat sterrenlicht deze gedeeltes van de wolk eroderen. Afbeelding van: NASA, ESA, M. Livio en het Hubble 20th Anniversary Team (STScI).



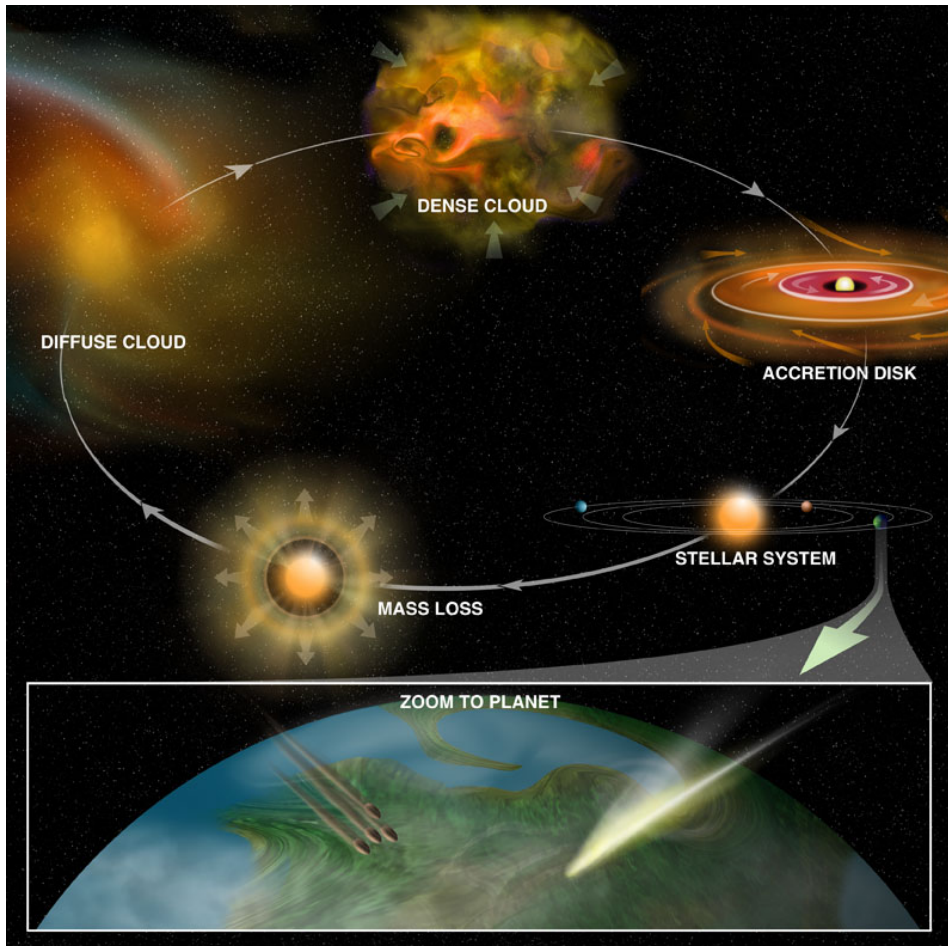
het materiaal in deze schijf samenklonteren en over tijd zullen deze klonten meer materiaal uit de schijf opvegen en een planeetachtig object vormen. Sommige planeetachtige objecten zullen verder groeien tot planeten, terwijl andere klein blijven. Deze kleinere objecten worden asteroïden genoemd als ze voornamelijk uit rotsachtig materiaal bestaan en kometen als ze voornamelijk uit ijs bestaan. Het gas in de stervormingswolk warmt op doordat energie uit zwaartekracht omgezet wordt naar warmte. Nadat de protoster is gevormd en in zijn kern een temperatuur van ongeveer 1 miljoen graden Celsius bereikt, zal kernfusie beginnen. In eerste instantie fuseren deuterium atomen naar heliumatomen, totdat de temperatuur verder is toegenomen en hoog genoeg is om waterstofatomen te laten fuseren. Dit gebeurt wanneer de temperatuur van de kern ongeveer 10 miljoen graden Celsius is. De hoeveelheid energie die vrijkomt bij kernfusie is gigantisch. Zodra de ster waterstof begint te verbranden, is de straling die de ster uitzendt sterk genoeg om het overgebleven materiaal van de planeetvormende schijf weg te blazen. Op dit punt zijn de ster en het planetenstelsel volledig gevormd. Afhankelijk van de massa van de nieuwe ster wordt het een hoge-massa ster of een lage-massa ster genoemd. In het algemeen hebben lage-massa sterren een massa kleiner of gelijk aan dat van de zon. Hoge-massa sterren kunnen echter meer dan honderd keer zo zwaar zijn als de zon. Afhankelijk van de massa van de ster zullen verschillende elementen gevormd worden in het kernfusieproces. Uiteindelijk, wanneer de ster sterft, worden deze elementen verstrooid door de ruimte en gerecycled in nieuwe sterren en planeten. Een overzicht van het stervormingsproces wordt gegeven in Figuur 2.

De vorming van een ster en planetenstelsel is slechts de eerste stap op weg naar een leefbare planeet zoals aarde. In het geval van het zonnestelsel is 4,6 miljard jaar gepasseerd tussen haar ontstaan en hoe de aarde in haar huidige vorm is. Gedurende deze tijd heeft het stelsel een aantal radicale veranderingen ondergaan. De meest dramatische hiervan zijn een verschuiving van de positie van gasreuzen die zich waarschijnlijk heeft voorgedaan en de botsingen tussen verschillende objecten, die tot op de dag van vandaag voortduren. Voor aarde zijn de meest belangrijke veranderingen de vorming van een atmosfeer en de komst van water aan haar oppervlakte geweest. De aanwezigheid van water op de jonge aarde was waarschijnlijk van groot belang voor het ontstaan van de eerste levensvormen. Mogelijk zijn de moleculen waaruit deze eerste levensvormen zijn ontstaan op aarde gebracht door asteroïden en kometen.

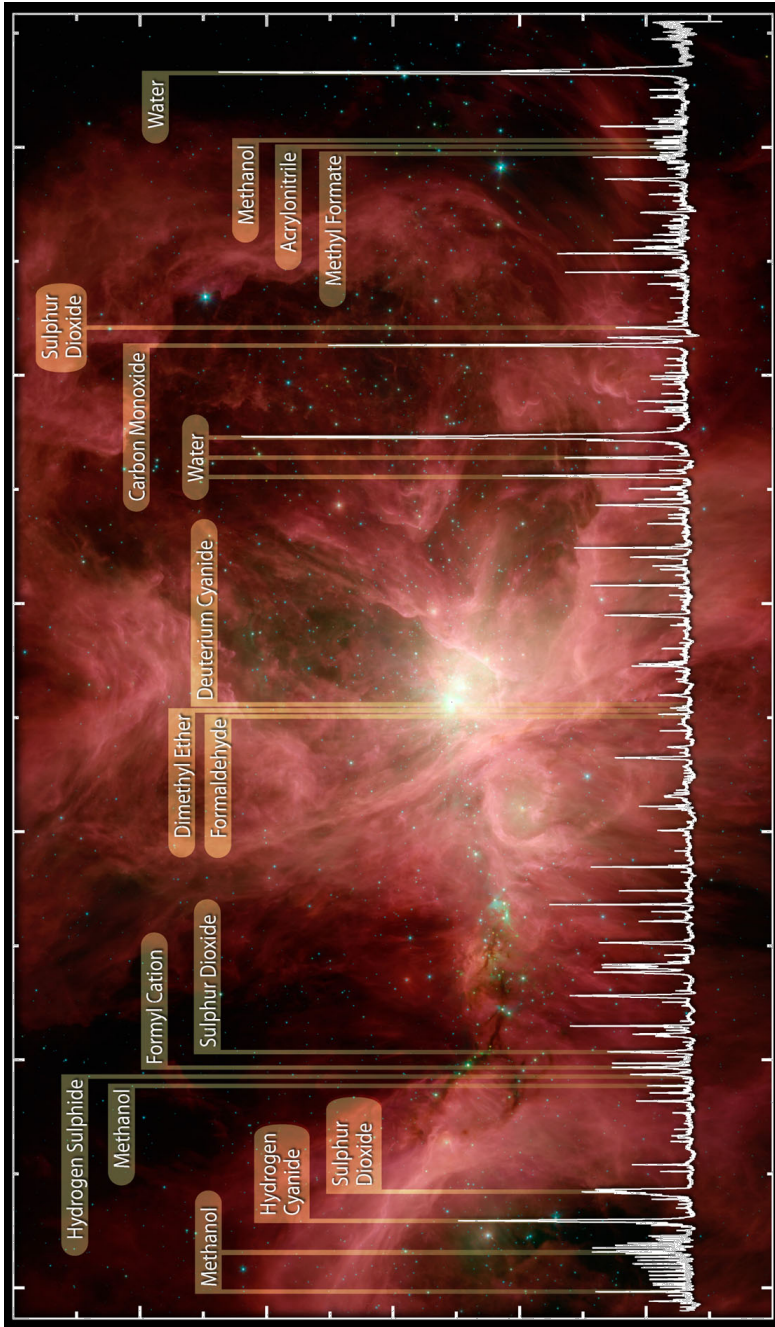
Aangezien we niet direct kunnen onderzoeken hoe de jonge zon en aarde er uitzagen, kijken we naar andere stelsels die op dit moment gevormd worden. Door deze stelsels te observeren en de moleculen die zich daar bevinden te bestuderen krijgen wij een beter idee wat er gebeurde gedurende de vorming van ons eigen zonnestelsel. Om deze stelsels te bestuderen zijn geavanceerde telescopen nodig. Deze telescopen kunnen inzoomen op de gebieden waar nieuwe sterren geboren worden en hebben de gevoeligheid om de vele atomen en moleculen die daar aanwezig zijn te detecteren.

## De studie van atomen en moleculen in de ruimte

Het meest krachtige instrument om atomen en moleculen in de ruimte te bestuderen zijn hun spectroscopische vingerafdrukken. Net zoals vingerafdrukken van mensen hebben atomen en moleculen hun eigen unieke vingerafdrukken waarmee ze geïdentificeerd kunnen worden. Deze vingerafdrukken bestaan uit duidelijke patronen van lijnen die gemeten kunnen worden in laboratoriumexperimenten en het spectrum van een atoom of molecuul genoemd worden. Als meerdere atomen en moleculen aanwezig zijn in een bepaald stervormingsgebied, kunnen meerdere spectroscopische vingerafdrukken tegelijk geobserveerd worden. Figuur 3 is een voorbeeld van zo'n spectrum waarin meerdere vingerafdrukken



**Figuur 2:** Schematisch overzicht van ster en planeet vorming in de cyclus van interstellair materiaal. Uit de compacte stervormingswolk (Dense Cloud) die bestaat uit gas en stof, wordt een zogenaamd protostellair object gevormd. Dit stelsel bestaat uit een protoster in het midden omgeven door een roterende schijf van gas en stof (Accretion Disk) die materiaal vanuit de stervormingswolk naar de protoster brengt. Gedurende de evolutie van het stelsel zullen de temperatuur en dichtheid toenemen wat leidt tot de start van kernfusie. In dit proces worden lichte elementen omgevoerd tot zwaardere elementen in de binnenste regionen van de ster. Straling van de nieuwgevormde ster verwijdert gas en stof uit de schijf, waarna alleen planeten, kometen en asteroïden overblijven (Stellar System). Een uitvergroting van één van de planeten in dit stelsel laat zien hoe organisch materiaal mogelijk op het oppervlakte van de planeet terecht is gekomen door kometen en asteroïden. Gedurende de evolutie van de ster worden nieuwe geproduceerde elementen de ruimte in gebracht en gerecycled (Mass Loss). Dit kan bijvoorbeeld door zonnewinden die materiaal de ruimte in slingeren of door een supernova wanneer de ster sterft. Het vrijgekomen materiaal wordt uiteindelijk gerecycled in nieuwe stervormingswolken (Diffuse Cloud), waar nieuwe sterren en planeten vormen. Afbeelding van: B. Saxton, NRAO/AUI/NSF.



**Figuur 3:** Een gedetailleerd spectrum (weergegeven in wit) van de Orion Nevel (achtergrond afbeelding). De Orion Nevel staat ongeveer 1300 lichtjaar van ons vandaan, waarmee het één van de meest dichtbijstaande kraamkamers voor nieuwe sterren in de Melkweg is. Dit spectrum is genomen met het HIFI instrument op het *Herschel* Space Observatory. Het patroon aan 'pieken' in het spectrum, emissielijnen genaamd, laat de straling op specifieke golflengtes door specifieke elementen of moleculen zien. Enkele van de meest prominente pieken zijn gelabeld. De gedetecteerde moleculen zijn onder andere: water ( $H_2O$ ), koolstofmonoxide (carbon monoxide,  $CO$ ), formaldehyde ( $H_2CO$ ), methanol ( $CH_3OH$ ), dimethylether ( $CH_3OCH_3$ ), waterstofcyanide (hydrogen cyanide,  $HCN$ ), zwavelmonoxide (sulphur oxide,  $SO$ ) en zwaveldioxide (sulphur dioxide,  $SO_2$ ). Afbeelding van: ESA/HIFI/HEXOS; NASA/Spitzer (achtergrond afbeelding).

van verschillende moleculen gedetecteerd zijn in de richting van een stervormingsgebied in het sterrenbeeld Orion. Door de waarnemingen van dit gebied te vergelijken met spectra die in het laboratorium gemeten zijn kan bepaald worden welke moleculen aanwezig zijn in Orion. Veel gedetecteerde moleculen zijn 'organische' moleculen, wat niet betekent dat er leven is, maar dat deze moleculen bepaalde koolstof en waterstofverbindingen hebben. Dit soort moleculen waren waarschijnlijk aanwezig op en rond de jonge aarde. De organische moleculen zijn interessant omdat ze aan de basis staan van de vorming van leven. De identificatie van deze zogenaamde prebiotische moleculen in een stervormingsgebied zoals Orion geeft informatie over hoe deze moleculen gevormd worden.

## Dit proefschrift

In mijn proefschrift heb ik de moleculen die aanwezig zijn in verschillende stervormingsgebieden onderzocht. Ik heb de moleculaire inboedel van de verschillende gebieden vergeleken om te bepalen of sommige moleculen specifiek zijn voor een gebied. Op deze manier probeer ik te begrijpen welke condities nodig zijn om bepaalde moleculen te vormen. Tevens heb ik de moleculen bestudeerd die aanwezig zijn in twee kometen in ons zonnestelsel. Door de samenstelling van stervormingsgebieden te vergelijken met deze kometen kan er een link worden gemaakt tussen stervormingsgebieden en ons zonnestelsel. Dit kan omdat kometen materiaal bevatten uit de vroegste tijden toen het zonnestelsel gevormd werd.

Dit proefschrift is verdeeld in vijf hoofdstukken. Het eerste hoofdstuk bevat een introductie van het stervormingsproces en de gerelateerde chemische processen. De volgende hoofdstukken presenteren de resultaten van de analyse van verschillende stervormingsgebieden. De belangrijkste resultaten en conclusie van ieder hoofdstuk zijn als volgt:

**Hoofdstuk 2:** In dit hoofdstuk heb ik onderzocht in welke hoeveelheden het molecuul methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) aanwezig is in het stervormingsgebied NGC 6334I. Dit is een actief hoge-massa stervormingsgebied, waar nieuwe sterren die veel zwaarder zijn dan de zon gevormd worden. We zijn in methanol geïnteresseerd, omdat het één van de meest voorkomende organische moleculen in stervormingsgebieden is en daarom vaak een referentie om te bepalen of de moleculaire samenstelling vergelijkbaar is in verschillende gebieden. Een nauwkeurige bepaling van de hoeveelheid methanol is hiervoor noodzakelijk. De analyse die uitgevoerd wordt in dit hoofdstuk laat zien dat de samenstelling van methanol in NGC 6334I vergelijkbaar is met andere gebieden waar veel hoge-massa sterren gevormd worden, maar anders dan gebieden waar sterren met een massa gelijk aan de zon worden gevormd. Met computermodellen kunnen we bepalen dat dit verschil in de methanol samenstelling veroorzaakt kan worden door verschillen in de temperatuur van het stof dat aanwezig is in stervormingsgebieden. In dat geval is de temperatuur van het stof dat aanwezig is in NGC 6334I waarschijnlijk iets hoger dan het stof in gebieden waar sterren met een massa kleiner of gelijk aan de zon vormen.

**Hoofdstuk 3:** Dit hoofdstuk vervolgt de karakterisering van de moleculen in NGC 6334I, waarbij nu de focus ligt op simpele moleculen die stikstof atomen bevatten. Ik heb de moleculen methanimine ( $\text{CH}_2\text{NH}$ ), methylamine ( $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ), formamide ( $\text{NH}_2\text{CHO}$ ) en methylocyanide ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ) bestudeerd. Deze moleculen zijn van belang voor de bouwstenen van het leven, aangezien verscheidene stikstofverbindingen essentieel zijn voor de vorming van biologische structuren, zoals nucleobasen, de basis voor DNA. Vooral van het molecuul  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  wordt gedacht dat het van groot belang is. Echter,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  is slechts in één stervormingsgebied met zekerheid gedetecteerd, namelijk een hoge-massa

stervormingsgebied in het centrum van de Melkweg. Als  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  inderdaad een belangrijke bouwsteen voor biologische moleculen is, dan verwachten we dat het aanwezig is in meerdere stervormingsgebieden. Om te bepalen hoe  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  gevormd wordt en hoe belangrijk het is voor de vorming van complexere moleculen, is het noodzakelijk om dit molecuul in andere stervormingsgebieden naast het centrum van het Melkweg te detecteren. Dit hoofdstuk presenteert de eerste detectie van  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  in NGC 6334I. Dit resultaat geeft aan dat  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  niet een zeldzaam molecuul is. De reden dat het niet eerder gedetecteerd wordt ligt aan de zwakke spectroscopische vingerafdruk van dit molecuul en het is nu pas dat we telescopen hebben die gevoelig genoeg zijn om het signaal te detecteren.

**Hoofdstuk 4:** In dit hoofdstuk wordt een uitgebreide analyse van de moleculaire samenstelling van de hoge-massa protoster AFGL 4176 gepresenteerd. Het AFGL 4176 systeem is interessant aangezien het één van de weinige hoge-massa protosterren is waar een schijf omheen draait. In vergelijking met lage-massa sterren waar deze schijven vrijwel altijd gezien worden, gebeurt dit zelden voor hoge-massa sterren. In het spectrum van AFGL 4176 werden 23 verschillende moleculen gevonden. De meerderheid van deze moleculen bevat een zuurstofatoom. Een kleinere hoeveelheid moleculen bevat een stikstof of zwavel atoom. Ik heb de moleculaire samenstelling van AFGL 4176 vergeleken met die van andere stervormingsgebieden. Hieruit wordt duidelijk dat AFGL 4176 een grotere overeenkomst vertoont met de lage-massa protoster IRAS 16293-2422B dan met het hoge-massa stervormingsgebied Sagittarius B2(N). De vergelijkbare samenstelling van AFGL 4176 en IRAS 16293-2422B geeft aan dat de productie van moleculen niet veel afhangt van het type object. Aan de andere kant geeft het aan dat de moleculen die gedetecteerd zijn in de twee objecten al gevormd zijn in de stervormingswolk voordat er een protoster is.

**Hoofdstuk 5:** In dit hoofdstuk bestudeer ik twee kometen, genaamd C/2012 F6 (Lemmon) en C/2012 (ISON). Kometen bestaan uit ijs en stof die hun oorsprong hebben in de vroegste momenten dat het zonnestelsel gevormd werd. In tegenstelling tot planeten, is er weinig gebeurd met het materiaal op kometen sinds deze gevormd zijn. Daarom kunnen kometen gezien worden als fossielen van de schijf waaruit het zonnestelsel gevormd is. Door kometen te bestuderen kan een link worden gemaakt tussen de samenstelling van de stervormingswolk waaruit de zon is ontstaan en het planetenstelsel wat tegenwoordig rond de zon draait. Het grootste gedeelte van hun leven zijn kometen ver weg van de zon en bevroren. Echter, wanneer een komeet dicht bij de zon komt zal het ijs gaan verdampen. In dit hoofdstuk worden waarnemingen van een aantal moleculen getoond die van de komeet afkomen als deze verwarmd wordt door de zon. Ik heb de waarnemingen gemodelleerd om te bepalen welke gedetecteerde moleculen direct van het oppervlakte van de komeet komen, en welke gevormd worden door chemische reacties in het gas. Hierdoor hebben we een beter idee welke moleculen aanwezig waren in de schijf rond de proto-zon.

Gebaseerd op de resultaten van ieder hoofdstuk, is de conclusie van dit proefschrift dat de meeste moleculen die aanwezig zijn in hoge- en lage-massa stervormingsgebieden ook aanwezig zijn in kometen in het zonnestelsel. Dit geeft aan dat moleculen die aanwezig waren toen het zonnestelsel vormde, en waar uiteindelijk leven ontstaan is, ook aanwezig zijn in andere stervormingsgebieden. Dus ook al is er nog geen leven gevonden buiten dat op aarde, de moleculaire bouwstenen voor leven zijn zeker aanwezig in andere stervormingsgebieden. Verdere studies van deze objecten zullen belangrijke informatie opleveren om de vraag te beantwoorden hoe het leven in het zonnestelsel is ontstaan.



