



Universiteit
Leiden
The Netherlands

From midplane to planets : the chemical fingerprint of a disk

Eistrup, C.

Citation

Eistrup, C. (2018, October 16). *From midplane to planets : the chemical fingerprint of a disk*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/66260>

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/1887/66260>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/66260> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Eistrup, C.

Title: From midplane to planets : the chemical fingerprint of a disk

Issue Date: 2018-10-16

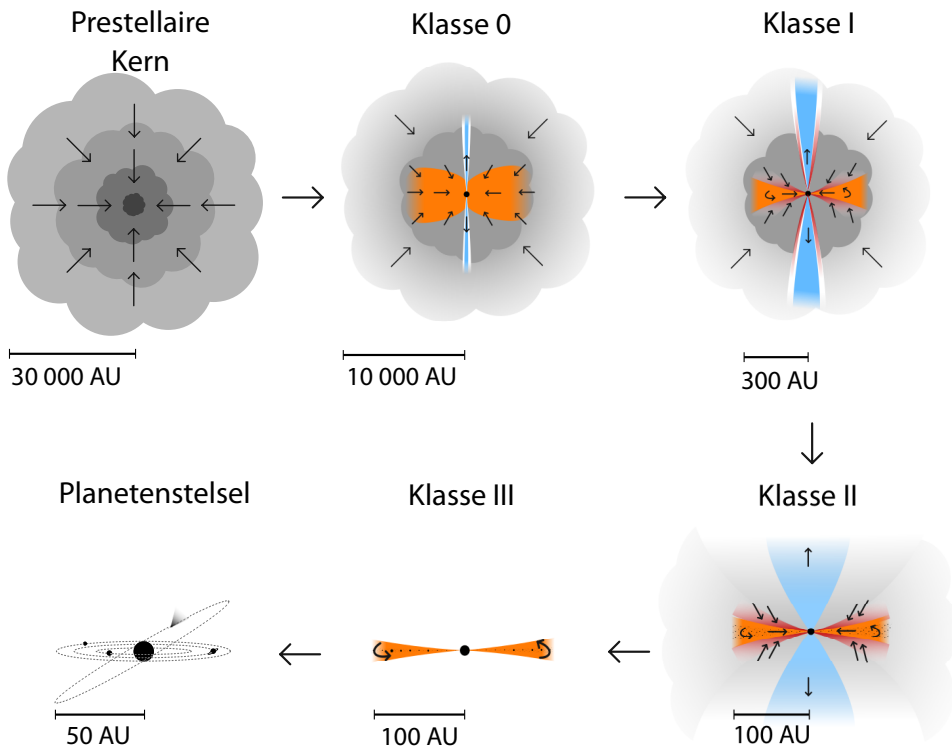
NEDERLANDSE SAMENVATTING

Planeten en de zoektocht naar leven in het heelal. Waar komen we vandaan en zijn we alleen? Dit zijn vragen waar de mensheid zich altijd al mee bezig heeft gehouden. De laatste vraag betreft het leven en hoe het kan ontstaan. Het enige leven dat we kennen is het leven hier op onze eigen planeet, de aarde. De zoektocht naar leven elders in het heelal is dus vaak een zoektocht naar planeten en exoplaneten die op de aarde lijken.

Het leven op onze planeet zou bijna net zou oud kunnen zijn als de aarde zelf. Ter vergelijking: het eerste leven begon waarschijnlijk 3,6 miljard jaar geleden en de aarde is 4,6 miljard jaar oud. De ingrediënten van het leven zijn gebaseerd op hetzelfde materiaal dat onze planeet heeft gevormd, en daarom is het begrijpen van planeetvorming en van welk materiaal planeten worden gevormd, de sleutel tot het begrijpen van zowel de evolutie van de aarde, als het leven daarop.

Planeetvorming. Planeten vormen rondom sterren, die op hun beurt vormen wanneer grote wolken van gas en stof instorten onder invloed van de zwaartekracht van al het materiaal dat zich daarin bevindt (zie “Prestellaire Kern” in figuur 5.13, waar de zwaartekracht al het materiaal van de grijze wolk naar binnen trekt, in de richting van de pijlen). De vorming van planeten is een actief onderzoeksgebied in de astronomie. Het probeert te beschrijven hoe het proces van stervorming kan leiden tot planeetvorming uit het materiaal rondom de ster (geïllustreerd door alle zes evolutiestappen in figuur 5.13). Het begrijpen van de grootte, de bewegingen en de samenstelling van de resulterende planeten vereist kennis van zowel de fysische als chemische processen die plaatsvinden tijdens het vormingsproces.

Deze processen worden op verschillende manieren bestudeerd in astronomisch onderzoek: door theoretisch inzicht in de processen en het voorspellen waartoe ze zullen leiden, door astronomische waarnemingen van het heelal en door laboratoriumexperimenten op de aarde. In het geval van planeetvorming is het theoretisch inzicht in de fysische processen die zich voordoen recentelijk enorm verbeterd. Computersimulaties hebben voorspellingen gedaan over welke soorten planeten zich op welke plek vormen. Waarnemingen van planeten, exoplaneten en planeetvormende gebieden hebben op hun beurt deze voorspellingen bevestigd of ontkracht. Laboratoriumexperimenten hebben bijgedragen aan het begrip van de moleculen die in het heelal bestaan, hoe we ze kunnen detecteren en welke chemische reacties er tussen hen kunnen plaatsvinden. Dit alles helpt om de samenstelling van het materiaal waaruit planeten vormen te begrijpen.

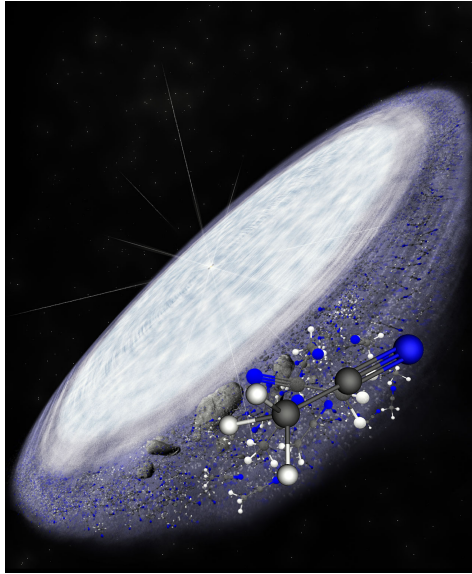


Figuur 5.13: Verschillende stadia van ster- en planeetvorming. De chemische simulaties in dit proefschrift concentreren zich voornamelijk op klassen 2 en 3, maar er worden koppelingen gemaakt met zowel de prestellaire kern als het eindproduct, namelijk het planetenstelsel. Afbeelding: "Current view of protostellar evolution" door Magnus Vilhelm Persson.

Fysische en chemische effecten tijdens planeetvorming. Het begrip van de fysica van planeetvorming is ver gekomen. Daarnaast hebben waarnemingen van planeetvormende gebieden, vooral met de Atacama Large Millimeter / submillimeter Array (ALMA) in Chili, een schat aan informatie opgeleverd over de structuur en moleculaire samenstelling van dergelijke gebieden. ALMA is een telescoop die bestaat uit 66 radioantennes gelegen op 5000 meter hoogte in de droogste woestijn op aarde. In deze omgeving is ALMA het beste observatorium ter wereld voor het waarnemen van elektromagnetische straling op golflengten van ongeveer 1 millimeter. Dit maakt ALMA optimaal voor vele waarnemingen, inclusief die van ster- en planeetvormingsgebieden, en ook voor het detecteren van specifieke moleculen in deze gebieden. Onder andere zijn zogenaamde ijslijnen van verschillende moleculen gedetecteerd met behulp van ALMA. Een ijslijn markeert het gebied in de schijf dichtbij de ster waar het warm genoeg is voor een molecuul (bv. koolmonoxide) om zich in de gasfase te bevinden. Buiten de ijslijn is het zo koud dat het molecuul alleen als ijs op het oppervlak van een stofkorrel bestaat. Het theoretisch inzicht in de chemische processen die plaatsvinden tijdens de planeetvorming, vooral voordat de planeten zich beginnen te vormen, is echter minder goed begrepen. Chemische reacties tussen moleculen zullen waarschijnlijk, zowel in het gas- als in de ijsfase op het oppervlak van kleine stofkorrels plaatsvinden.

Dit proefschrift probeert te begrijpen hoe planeetvormend materiaal in de loop van de tijd wordt veranderd door deze chemische reacties. Ook onderzoekt het hoe de hoeveelheden van verschillende gangbare moleculen veranderen in de loop van de tijd en hoeveel materiaal, met name hoeveel koolstof en zuurstof, respectievelijk in de gas- en ijsfase aanwezig is wanneer planeten zich beginnen te vormen. Omdat planeetvormingsmodellen tot nu toe alleen onveranderde chemische samenstellingen van dit materiaal, of enigszins vereenvoudigde chemie, hebben overwogen, is het doel van dit proefschrift om de trends te verkennen waarin chemische veranderingen plaatsvinden in planeetvormend materiaal voordat planeten beginnen te vormen. De resultaten kunnen mogelijk nuttig zijn, zowel voor onderzoek naar planeetvorming, als voor het begrijpen van de aanwezigheid van bepaalde moleculen in de atmosferen van planeten, exoplaneten en kometen. Deze moleculen vertellen verhalen over de vorming en evolutie van deze planeten en kometen, en de resultaten van dit proefschrift zouden kunnen worden gebruikt om de planeten en kometen die vandaag worden waargenomen te verbinden met waar en hoe ze werden gevormd.

Hoofdstuk 2 maakt gebruik van een computercode (de BADASS-code) die chemische reacties in het heelal kan simuleren. Deze code bevat informatie over de fysische toestanden van planeetvormende gebieden, zoals temperatuur, dichtheid en het niveau van ionisatie (de hoeveelheid nieuwe ionen die per seconde gemaakt worden door interacties van energetische kosmische deeltjes met neutrale atomen of moleculen). De code is ingesteld om alleen chemische reacties in de gasfase te simuleren, of om ook rekening te houden met reacties die plaatsvinden tussen moleculen in de ijsfase op de oppervlakken van stofkorrels. De code simuleert een astronomisch interval van 1 miljoen jaar. De tijdschaal vanaf het begin van de stervorming tot aan de tijd dat de ster en de omliggende planeten allemaal zijn gevormd, wordt geschat op ongeveer 10 miljoen jaar. De vraag is: zouden



Figuur 5.14: In het midden van een schijf van moleculen en stofkorrels (die eruit kunnen zien als rotsen) vormt zich een ster. De moleculen in de schijf kunnen met elkaar in contact komen, zowel in de gasfase, als bevroren als ijs op de oppervlakken van de stofkorrels. Credit: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

chemische reacties de samenstelling van het materiaal in de loop van de tijd kunnen veranderen.

Het blijkt dat alleen wanneer het ionisatieniveau laag is, en de simulatie begint met neutrale moleculen, er geen significante chemische veranderingen in het materiaal worden waargenomen. Significante veranderingen worden gezien voor alle andere versies van de simulatie, en zowel chemische reacties op de oppervlakken van de stofkorrels als het niveau van ionisatie veroorzaken belangrijke effecten.

Hoofdstuk 3 is een uitbreiding van de simulatie-opzet in hoofdstuk 2. Er wordt uitgegaan van een langere astronomische tijdschaal (7 miljoen jaar) en de fysische omstandigheden, zoals de temperatuur, worden verondersteld te evolueren (af te koelen) gedurende de 7 miljoen jaar. Dit in tegenstelling tot in hoofdstuk 2, waarin ze constant worden gehouden. Het rekening houden met veranderende fysische omstandigheden bemoeilijkt de berekeningen, maar dit is een meer realistisch scenario, omdat niet alleen de chemie, maar ook de fysische omgeving in het planeetvormende gebied in de loop van de tijd verandert.

Er is vastgesteld dat chemische evolutie de chemische samenstelling van het planeetvormende materiaal continu verandert tot ten minste 7 miljoen jaar. De zich veranderende fysische omstandigheden veroorzaken geen sterk verschillend effect in vergelijking met de onveranderlijke omstandigheden uit hoofdstuk 2, behalve dat wanneer de temperatuur met de tijd afneemt, er meer moleculen zich in ijs op de stofkorrels bevinden. Alleen dicht bij de ster, waar het warm genoeg is, zullen de meeste moleculen zich in de gasfase bevinden. Het blijkt ook dat de chemische

samenstelling van het materiaal na 7 miljoen jaar geëvolueerd is tot een stabiele toestand, waarbij de samenstelling onafhankelijk is van de chemische samenstelling (enkel atomen of zuiver stabiele moleculen) waarmee de simulatie was begonnen. Deze steady-state chemische samenstelling blijkt op haar beurt weer heel anders te zijn dan de typische samenstellingen die in traditionele planeetvormingsmodellen worden verondersteld met een eenvoudigere behandeling van de chemie.

Het idee voor **Hoofdstuk 4** is geïnspireerd door de detectie van grote hoeveelheden moleculair zuurstofijs (O_2 -ijs) in kometen 1P en 67P in ons zonnestelsel en het feit dat de simulaties in hoofdstuk 2 (voor bepaalde modelopstellingen) aantonen dat O_2 -ijs in vergelijkbare hoeveelheden wordt geproduceerd als die werden gedetecteerd in de kometen. In dit hoofdstuk is onderzocht hoe en onder welke voorwaarden O_2 -ijs kan worden geproduceerd op de oppervlakken van stofkorrels in het gebied waar kometen werden gevormd in de periode waarin ons zonnestelsel nog in aanbouw was. Verschillende chemische parameters voor de manier waarop reacties tussen ijsmoleculen plaatsvinden, worden onderzocht en O_3 -ijs wordt opgenomen in de chemische code in tegenstelling tot in hoofdstuk 2.

De resultaten tonen aan dat na het opnemen van O_3 -ijs in de code, O_3 -ijs in plaats van O_2 -ijs in grote hoeveelheden wordt geproduceerd, wat niet overeenkomt met de waarnemingen van die moleculen in de twee kometen. Het blijkt dat de resultaten van de code alleen overeenkomen met de waarnemingen van de kometen voor een zeer specifieke simulatie-opzet, en het is daarom waarschijnlijker dat het O_2 -ijs zich al in de komeetvormende regio rondom de zon bevond voordat daar chemische reacties plaatsvonden, in plaats van te worden geproduceerd door deze reacties. Chemische reacties op de oppervlakken van stofkorrels zijn echter minder goed begrepen dan reacties in de gasfase. De chemische interacties tussen O_2 -ijs, O_3 -ijs en enkele andere chemisch gerelateerde atomen en moleculen moeten misschien eerst beter onderzocht worden voordat we kunnen uitsluiten dat het O_2 -ijs geproduceerd kan zijn via chemische reacties op de oppervlakken van de stofkorrels, leidend tot de gedetecteerde hoeveelheden in de kometen.

Hoofdstuk 5 gaat verder in op de kometen. Hoofdstuk 3 biedt gesimuleerde hoeveelheden van vele verschillende bevroren moleculen als een functie van astronomische tijd en als een functie van afstand (straal) van de ster. Het idee was om deze relatieve hoeveelheden van elk bevroren molecuul statistisch te matchen met de hoeveelheden van elk molecuul die in verschillende kometen zijn gedetecteerd. Dergelijke gegevens over de hoeveelheden van elk molecuul in verschillende kometen zijn beschikbaar in de wetenschappelijke literatuur. Een χ^2 -methode wordt gebruikt voor deze statistische vergelijking. Het doel van dit onderzoek is om door het vergelijken van hoeveelheden van moleculen in simulaties en in waargenomen kometen de meest waarschijnlijke locaties van de komeet- en planeetvormende gebieden rondom de jonge zon te bepalen.

Met behulp van een set van 15 verschillende kometen met gedetecteerde hoeveelheden van verschillende bevroren moleculen, suggereert deze statistische analyse dat 14 van de kometen waarschijnlijk in de buurt van de ijslijn van koolmonoxide (CO) zijn gevormd, hoewel op verschillende tijdstippen tijdens de evolutie van het zonnestelsel. Deze methode toont een mogelijke nieuwe manier aan om kometen te categoriseren: in plaats van ze rechtstreeks te categoriseren op basis

van de hoeveelheden van elk molecuul die in hen werden gedetecteerd, houdt deze nieuwe methode rekening met de chemische veranderingen van het materiaal tijdens de evolutie van het zonnestelsel. De nieuwe methode toont aan dat 14 van de 15 kometen zich rond dezelfde ijslijn hadden gevormd, hoewel op verschillende tijdstippen.

De belangrijkste conclusies van dit proefschrift zijn:

- Chemische evolutie in planeet- en komeetvormende gebieden kan de chemische samenstelling van het materiaal in de loop van de tijd aanzienlijk veranderen. Dit kan van invloed zijn op de chemische samenstelling van de planeten, exoplaneten en kometen die zich vormen. Modellen die planeetvorming en -samenstelling simuleren, zouden er goed aan doen om hier rekening mee te houden.
- De hoeveelheid O₂-ijs gedetecteerd in kometen 1P en 67P blijft het best te verklaren met O₂-ijs dat is gevormd voor de periode waardoor de chemie werd gesimuleerd. Dat wil zeggen dat het O₂-ijs waarschijnlijk al aanwezig was voordat het zonnestelsel begon te vormen.
- Chemische evolutiemodellen kunnen worden gebruikt om te spreken over de geschiedenis van de vorming van niet alleen planeten maar ook kometen. Uit een statistische vergelijking tussen gedetecteerde moleculen in kometen in het zonnestelsel en gesimuleerde hoeveelheden moleculen in een komeetvormingsgebied, blijkt dat bijna alle onderzochte kometen waarschijnlijk rond de CO-ijslijn zijn gevormd.
- Chemische reacties tussen bevroren moleculen op de oppervlakken van stofkorrels spelen een belangrijke rol bij het veranderen van de chemische samenstelling van het materiaal in gebieden waarin planeten vormen. Deze reacties zijn echter minder goed begrepen dan reacties in de gasfase. Toekomstige laboratoriumexperimenten op aarde zullen helpen om deze reacties beter te begrijpen, en dit verbeterde begrip zal waardevol zijn in codes die de chemische evolutie in het heelal simuleren.