



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Hot chemistry and physics in the planet-forming zones of disks

Bast, J.E.

Citation

Bast, J. E. (2013, January 10). *Hot chemistry and physics in the planet-forming zones of disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/20396>

Version: Corrected 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/1887/20396>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/20396> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Bast, Jeanette Elisabeth

Title: Hot chemistry and physics in the planet-forming zones of disks

Issue Date: 2013-01-10

Nederlandse samenvatting¹

Er worden voortdurend nieuwe planeten geboren en we kunnen bijna wekelijks lezen over nieuwe planetenstelsels die worden ontdekt. Met dit in het achterhoofd, is het wonderbaarlijk hoe de menselijke wil om nieuwe werelden te verkennen de sterrenkunde een impuls heeft gegeven. Zo kunnen we, binnen 20 jaar na het detecteren van de eerste planeet buiten ons eigen zonnestelsel, bepalen welk type atmosferen deze planeten hebben en zelfs of ze aan voorwaarden voor mogelijk leven voldoen. Dit soort ontdekkingen leiden echter tot nog meer vragen dan antwoorden. Vragen als: Zijn planetenstelsels zoals ons zonnestelsel gangbaar, en zijn er andere planeten die op de Aarde lijken? Zijn wij en andere levensvormen op deze planeet ontstaan door puur toeval, en kan zoiets ook ontstaan op andere plaatsen in het heelal? Om deze vragen te kunnen beantwoorden is het van belang te begrijpen hoe verschillende soorten planeten kunnen vormen. Het belangrijkste doel van dit proefschrift is dan ook om bij te dragen aan de kennis over het ontstaan van verschillende soorten, en in het bijzonder dat van aardachtige, planeten.

Planeetvorming

Om het onderzoek in dit proefschrift te begrijpen, zullen we met wat achtergrondinformatie beginnen over wat we momenteel weten over planeetvorming. In alle sterrenstelsels, waaronder ons eigen, zijn er vele grote wolken van gas en stof met diameters tot 300 lichtjaar. Deze wolken worden koude moleculaire wolken genoemd, omdat ze temperaturen hebben rond -250 graden Celsius. Wanneer zo'n wolk begint te krimpen onder zijn eigen zwaartekracht, zal de dichtheid ervan hoger en hoger worden totdat de binnenste delen ervan zo dicht en warm zijn, dat er een ster wordt geboren. Het overblijvende gas en stof zal dan een schijf beginnen te vormen die draait rond de ster. In de loop van de tijd zal een deel van het stof en gas in de schijf aan elkaar beginnen te plakken. Zo kunnen steeds grotere klonten ontstaan, totdat enkele ervan groot genoeg zijn om van een planeet te kunnen spreken. Aangezien deze schijf de geboorteplaats is van de planeten, wordt het

¹Translation from English to Dutch made by R.F.J. van der Burg.

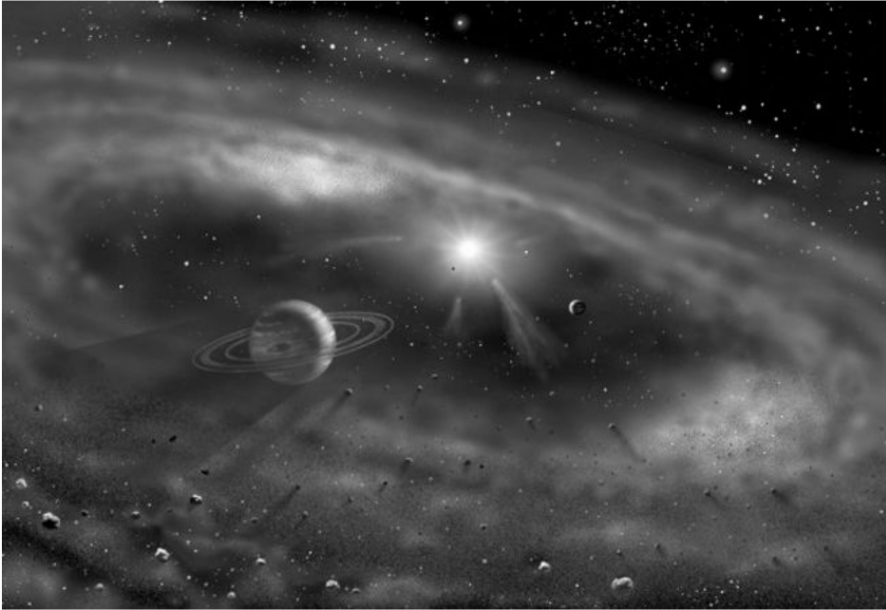


Figure 1 Een jonge ster met zijn protoplanetaire schijf waarin planeten worden gevormd (een artistieke voorstelling, © David A. Hardy/www.astroart.org).

wel een protoplanetaire schijf genoemd. Fig. 1 laat een artistieke voorstelling van zo'n protoplanetaire schijf zien.

De verschillende stadia van planeetvorming kunnen worden gesimuleerd in een planeetformatie model, en de evolutie van het gas en stof in de schijf door een schijfevolutie model. Er zijn vandaag de dag verschillende soorten planeetvorming en schijfevolutie modellen en het is nog onduidelijk welke het meest correct zijn. Een andere manier om naar deze modellen te kijken is om ze te beschouwen als recept voor het maken van planeten. De invoerwaarden in het model, bijvoorbeeld de temperatuur en dichtheid van het gas op verschillende afstanden van de ster, kunnen worden gezien als de ingrediënten in het recept voor het maken van een planetenstelsel. Het is ook interessant om te zien wat voor soort moleculen zich bevinden in de zones van schijven waar planeten vormen, omdat moleculen de bouwstenen van het leven zijn.

Een molecuul is een groep van verbonden atomen. Zo is water bijvoorbeeld een molecuul dat bestaat uit twee waterstofatomen en een zuurstofatoom. Omdat alles is opgebouwd uit moleculen is het zo belangrijk om te zien welke moleculen er in deze protoplanetaire schijven voorkomen. Hieruit kunnen we voorspellen waar de

planeten en hun atmosferen uit zullen gaan bestaan. Bovendien is het interessant om te onderzoeken hoeveel je van elk molecuul op verschillende plaatsen in de schijf aantreft. Als je bijvoorbeeld weet dat er veel water in de binnenste delen van deze protoplanetaire schijven voorkomt, dan kunnen we afleiden dat er een grote kans is dat hier ook planeten vormen met water erop. Hoe kunnen we dus helpen deze modellen te verbeteren en controleren of ze juist zijn of niet?

De eerste stap om deze modellen te verbeteren is om limieten te bepalen voor de invoerparameters, ofwel de ingrediënten, van de modellen. Dit kan worden gedaan door uit waarnemingen van het gas in deze schijven bijvoorbeeld de temperaturen en dichtheden van het gas in deze regio te schatten. Een alternatief is om de verschillende soorten moleculen die hier voorkomen op te sporen en hun relatieve hoeveelheden te schatten. Deze resultaten kunnen dan worden vergeleken met de exoplaneten die we momenteel ontdekt hebben. Voorspellen deze modellen bijvoorbeeld planeetstelsels met grote gasplaneten dicht bij de ster, zoals in sommige gevallen in de waarnemingen gevonden is? Of is het gebruikelijk dat deze regio's aan de juiste fysieke voorwaarden voldoen, zoals de juiste temperatuur en de aanwezigheid van voldoende basale organische moleculen, om complexe organische moleculen zoals aminozuren te kunnen produceren die belangrijke ingrediënten zijn voor het ontstaan van leven?

Waarnemingen van protoplanetaire schijven

Het belangrijkste doel van dit proefschrift is het verstrekken van de invoerparameters voor schijfevolutie en de planeetformatie modellen, en hier limieten op te stellen door de eigenschappen van gas in protoplanetaire schijven te bepalen. Door gebruik te maken van waarnemingen willen we een aantal specifieke vragen beantwoorden, zoals:

- Welk type moleculen vinden we in deze gebieden?
- Wat zijn de temperaturen en dichtheden van het moleculaire gas?
- Wat is de oorsprong van deze moleculen?

Waarnemingen van protoplanetaire schijven kunnen op verschillende manieren gedaan worden, afhankelijk van het deel van de protoplanetaire schijf dat we willen onderzoeken. Onze grootste interesse is om de binnenste gebieden van de schijf te onderzoeken, die op dezelfde afstand van de ster liggen als Aarde, Mars en Venus ten opzichte van de Zon. Dit is dus het gebied binnen protoplanetaire schijven waar meer aardachtige planeten gevormd zouden kunnen worden, of tenminste, in tegenstelling tot Jupiter en Saturnus die voornamelijk uit gas bestaan, planeten met een vaste ondergrond. Dit betekent dat we door het bestuderen van deze gebieden beter kunnen begrijpen hoe onze eigen planeet ongeveer 4,6 miljard jaar geleden gevormd is. Bovendien krijgen we zo meer informatie of andere sterren aan goede voorwaarden voldoen om aardachtige planeten te kunnen vormen.



Figure 2 De Very Large Telescope (VLT) op Paranal in Chili. De telescopen zijn geplaatst op één van de bergtoppen van de Atacama woestijn op 2635 meter boven zeeniveau (ESO/G.Gillet).

Omdat dit gebied van een protoplanetaire schijf behoorlijk dicht bij de ster staat, is het gas dat we bestuderen zeer warm, met temperaturen variërend van enkele honderden tot enkele duizenden graden Celsius. Dergelijk warm gas zendt infrarode straling uit (hetzelfde type straling als andere warme voorwerpen uitstralen, en wat we voelen als warmte). Dit soort straling kan worden waargenomen met behulp van één van de Very Large Telescopen (VLT), die liggen in de Atacama woestijn in Chili (zie Fig. 2). Deze 4 telescopen hebben spiegels met een diameter van 8,2 meter en bevinden zich op 2635 meter boven zeeniveau. De belangrijkste resultaten van dit proefschrift kwamen tot stand uit een groot waarnemingsprogramma van 24 nachten met één van deze telescopen bestaande uit waarnemingen van meer dan 50 protoplanetaire schijven. Het voordeel van een dergelijke grote steekproef is dat we schijven met verschillende leeftijden kunnen bestuderen, wat ons informatie verschaft over de wijze waarop het gas in deze schijven evolueert met de tijd.

Hoe een astronoom temperaturen en dichtheden van gas kan schatten op lichtjaren afstand.

Dan rest ons toch nog één centrale vraag. Hoe kunnen we bijvoorbeeld de temperatuur en de dichtheid van het gas schatten, zonder de mogelijkheid er heen te gaan om het te meten? Dit is het grootste probleem voor een astronoom, we kunnen niet naar de objecten die we bestuderen reizen om onze theorieën te testen. De oplossing is om in plaats daarvan het licht van deze objecten te bestuderen, en te bepalen hoe dit licht wordt beïnvloed door fysische omstandigheden op de plaats waar het wordt uitgezonden. De belangrijkste methode om dit licht te meten en om informatie te extraheren heet spectroscopie.

Een manier om spectroscopie uit te leggen is om eerst te realiseren dat wit licht bestaat uit veel verschillende kleuren. Dat blijkt wanneer je wit licht door een prisma laat vallen. Dan kun je zien hoe het licht van wit naar alle kleuren van de regenboog gaat. Wat een spectrometer doet is meten hoeveel van elk soort kleur aanwezig is in het licht dat wordt waargenomen, dus bijvoorbeeld of het meer rood licht heeft dan blauw. De verdeling van de verschillende kleuren is gerelateerd aan de temperatuur van de lichtbron.

In dit geval kunnen we de ster beschouwen als een lamp die wit licht uitzendt. Als we dit licht met een telescoop verzamelen en door een spectrometer laten gaan, zouden we een regenboog zien. Maar als het licht een wolk van gas zou passeren, dat zich tussen ons en de ster bevindt, zou een deel van het licht worden geabsorbeerd door de gaswolk. Afhankelijk van het soort gas in de wolk, worden bepaalde kleuren geabsorbeerd en deze kleuren worden dan niet gezien in de spectrometer op Aarde. Op deze manier zie je een regenboog patroon met zwarte lijnen op plaatsen waar de kleuren geabsorbeerd zijn. Zo heeft elk type gas zijn eigen vingerafdruk. Dus door het sterlicht dat een gasschijf rond de ster passeert

te meten, kunnen we zien of er zich water bevindt of niet. We kunnen dan ook meten hoeveel water er aanwezig is, en een schatting maken van de temperatuur van zowel de ster als de waterdamp in de schijf. Dit is één van de belangrijkste methoden die in dit proefschrift wordt gebruikt voor het bestuderen van protoplanetaire schijven.

De belangrijkste ontdekkingen in dit proefschrift

Een nieuwe onverwachte locatie van koolmonoxide en water.

De detectie van water in de binnenste zones van protoplanetaire schijven was een grote ontdekking in 2008 (Carr & Najita 2008, Salyk et al. 2008). Deze ontdekking, plus daaropvolgende waarnemingen, laten zien dat water een veelvoorkomend molecuul is op plaatsen waar planeten ontstaan. Dit proefschrift laat echter zien dat deze analyses, waaruit wordt opgemaakt dat het water zich in een schijf bevindt, niet altijd het water en andere moleculen zoals koolmonoxide en het hydroxyl radicaal op een juiste manier lokaliseren. Deze moleculen lijken namelijk zowel in een roterende schijf als een schijfwind voor te komen. Een schijfwind wordt veroorzaakt door gas dat uit de schijf wordt geworpen doordat het wordt opgewarmd door straling afkomstig van de ster. Het is belangrijk om rekening te houden met de verschillende locaties van de moleculen. Anders zullen we de moleculaire abundanties verkeerd schatten, wat zou leiden tot verkeerde resultaten over de soorten planeten die kunnen vormen, of over hoe de chemie zal evolueren in de protoplanetaire schijven.

Detecties van nieuwe moleculen

In vorige studies werden uitsluitend water, koolmonoxide en hydroxyl-radicalen gedetecteerd in de warme binnengebieden van de schijf. Nu detecteren we echter ook blauwzuur en acetyleen met een nieuwe waarnemingstechniek die we hebben ontwikkeld. We laten zien dat deze methode kan worden gebruikt om naar nog meer moleculen te zoeken, zoals ammoniak en methaan. Omdat dit cruciale bouwstenen zijn voor complexere organische moleculen is het van belang om al deze moleculen te detecteren en om een schatting te maken van hun hoeveelheden. Bovendien wordt de temperatuur van het gas waarin ze zich bevinden, geschat op ongeveer 800 – 1200 graden Celsius, wat zal helpen om limieten te stellen op de temperatuurverdeling van de schijfevolutie modellen in deze gebieden.

Stralingsvelden in protoplanetaire schijf modellen

Wanneer sterrenkundigen het licht van de sterren dat door het gas is gegaan detecteren, moeten ze verschillende benaderingen maken om de temperatuur en dichtheid van het gas te kunnen schatten. Dit wordt gedaan om de berekeningen

makkelijker te maken, aangezien ze al zeer complex zijn. In dit proefschrift wordt aangetoond dat het belangrijk is om zowel de UV- als de Röntgen-straling van de ster mee te nemen in de modellen. Echter, in het algemeen wordt slechts met één van de twee rekening gehouden, wat onjuiste schattingen geeft voor de moleculaire abundanties.

Een inventarisatie van organische moleculen in schijven

Er zijn nog maar weinig moleculen ontdekt in de binnenste regionen rond sterren waar planeten vormen. De modellen voorspellen dat er daar ook grotere organische moleculen voor zouden moeten komen die belangrijk zijn voor het vormen van planeten die omgeven worden door een atmosfeer met goede leefomstandigheden. Een zoektocht naar deze grotere organische moleculen werd daarom uitgevoerd omdat dit nog niet eerder is gedaan. De resultaten toonden slechts bovengrenzen aan in plaats van duidelijke detecties. Dit komt doordat de huidige telescopen nog niet krachtig genoeg zijn. Echter, onze resultaten laten zien dat nieuwe telescopen die nu worden gebouwd deze moleculen wel kunnen gaan detecteren. We tonen ook aan dat de moleculaire abundanties in kometen vergelijkbaar zijn met die in de protoplanetaire schijven zijn waargenomen, wat de theorie ondersteunt dat kometen worden gevormd in dezelfde chemische omgeving als de planeten.

Laatste woorden

Zoals eerder vermeld, kan een planeetformatie of schijfevolutie model gezien worden als een recept over hoe we verschillende soorten planeetstelsels kunnen bouwen, waar de specifieke uitkomst afhankelijk is van de ingrediënten in het recept. Dit proefschrift heeft bijgedragen door ons veel meer van deze ingrediënten te verschaffen, door detecties van nieuwe moleculen, door het bepalen van hun locaties, door het meten van de temperatuurvariatie binnen de schijf, en door te verduidelijken hoe we verschillen soorten straling van de sterren in rekening moeten brengen. Dit toont aan hoe we met de huidige waarnemingen niet alleen kunnen leren begrijpen hoe andere planeetstelsels gevormd zijn, maar ook hoe onze naburige planeten gevormd zijn en of er andere werelden zoals de onze zijn.

