



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Chemistry in evolving protoplanetary disks

Jonkheid, Bastiaan Johan

Citation

Jonkheid, B. J. (2006, June 28). *Chemistry in evolving protoplanetary disks*.
Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4451>

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/1887/4451>

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

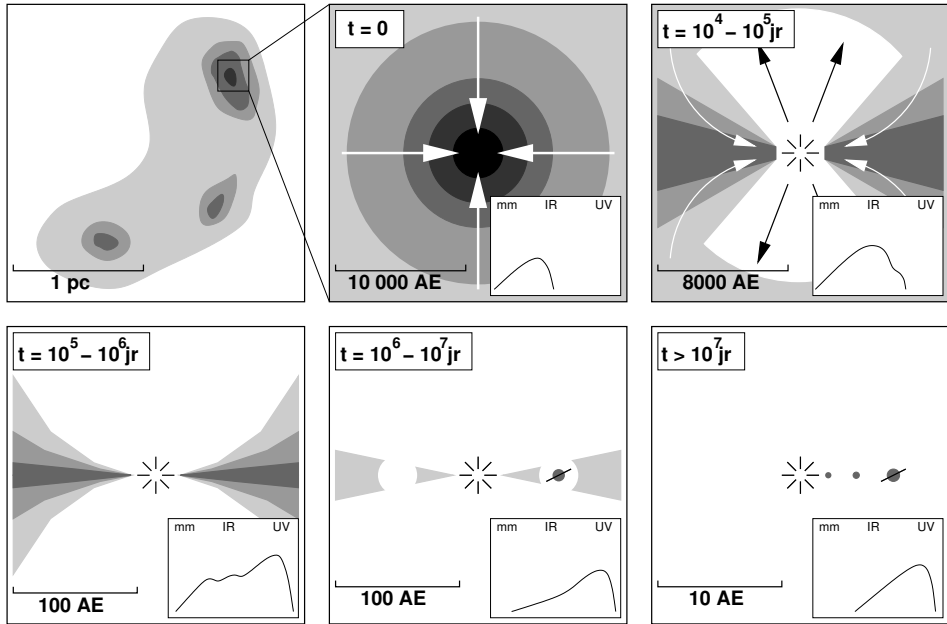
Nederlandse samenvatting

Stervorming

Sterren worden gevormd in dichte gebieden in interstellaire moleculaire wolken. Deze wolken bestaan voornamelijk uit waterstof en helium, met sporen van koolstof, zuurstof en zwaardere elementen; ongeveer 1% van de massa van deze wolken bestaat uit stof, grafiet- en silicaatdeeltjes met een doorsnede van 0.1 micrometer (μm). Wanneer deze gebieden een kritieke dichtheid bereiken trekken ze zich onder invloed van hun eigen zwaartekracht samen. Aanvankelijk gaat dit erg langzaam doordat turbulentie in de wolk en de aanwezigheid van magnetische velden nog wat tegendruk geven, maar uiteindelijk wint de zwaartekracht en stort de wolk in elkaar. Dit proces staat geïllustreerd in Figuur 1. Al het gas en stof dat zo naar binnen valt, vormt samen een protoster, die het omhullende materiaal van binnenuit opwarmt. Vergelijkbaar met een leeglopende badkuip gaat het naar binnen bewegende materiaal steeds sneller om de protoster heen draaien. Hierdoor kan het niet rechtstreeks op de ster vallen, maar komt het materiaal eerst in een schijf er omheen terecht. In deze schijf kan het zijn snelheid kwijtraken en zo alsnog op de protoster terecht komen. Terwijl het gas en stof op de ster valt wordt een deel ervan weggestuwd in straalstromen langs de rotatie-as van de schijf; deze straalstromen blazen vervolgens het omhullende materiaal weg.

Schijfevolutie

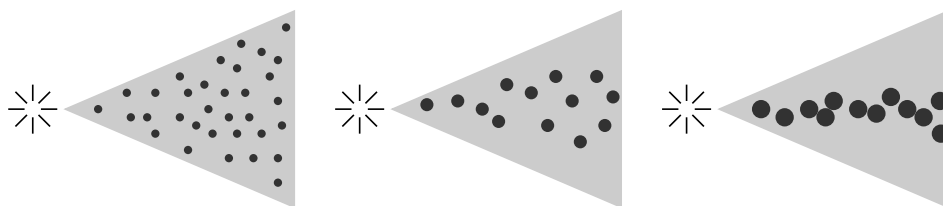
Na verloop van tijd is zo het hele omhulsel verdwenen, en blijft er alleen een ster met een gas- en stofschijf over. De schijf is nu tot rust gekomen, en de snelheid waarmee schijfmateriaal op de ster valt is nu veel lager. Afhankelijk van de massa van de ster wordt dit een T-Tauri ster (voor sterren met lage massa) of een Herbig Ae/Be ster genoemd (voor sterren met een middelmatige massa; rond zware sterren vormen geen stabiele schijven). In dit stadium is de schijf relatief zwaar (ongeveer 1% van de massa van de ster). Doordat er zoveel materiaal aanwezig is kan het genoeg druk opbouwen om boven het symmetrievlak van de schijf uit te stijgen; het ontvangt dan meer straling van de ster, warmt op, en stijgt nog verder. Uiteindelijk ontstaat er een vorm die geschetst is in het vierde paneel van Figuur 1: hoe verder van de ster, hoe hoger het materiaal wordt opgestuwd. Al dit materiaal aan de oppervlakte van de schijf absorbeert een relatief groot deel van de straling



Figuur 1: Een dwarsdoorsnede van de verschillende stadia van ster- en planeetvorming. In de linker boven- en benedenhoeken zijn de tijd- en afstandsschalen aangegeven; pc staat voor parsec (ongeveer 30 biljoen kilometer), en AE staat voor astronomische eenheid, de gemiddelde afstand tussen de aarde en de zon (ongeveer 150 miljoen kilometer). In de rechter benedenhoeken staan schetsen van het spectrum dat het object uitstraalt.

van de ster en straalt dit weer uit als infraroodstraling. Dit is ook terug te zien in de spectra —de verdelingen van licht over verschillende golflengten— van dit soort schijven.

Over een tijdsspanne van ongeveer een miljoen jaar is een groot deel van de schijf verdampt door de continue straling van de ster. Er is niet meer genoeg materiaal om boven het vlak van de schijf uit te stijgen en meer sterlicht op te vangen, en de schijf zal daarom een veel vlakkere vorm aannemen. De schijf straalt nog steeds infraroodstraling uit, maar veel zwakker dan voorheen. Het spectrum van de schijf valt dan ook bijna weg tegen dat van de ster, er is nog een geringe hoeveelheid extra infraroodstraling. Na verloop van tijd verdwijnen ook deze laatste overblijfselen van de schijf.

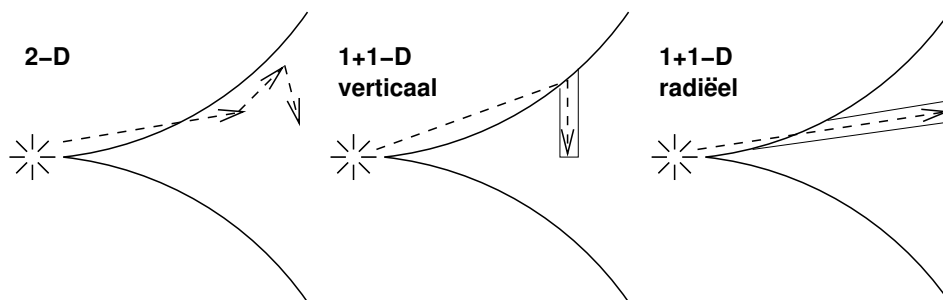


Figuur 2: De evolutie van stofdeeltjes. In jonge schijven zijn de stofdeeltjes klein ($0.1\ \mu\text{m}$) en vermengd met het gas. De stofdeeltjes kleven aan elkaar terwijl ze langzaam naar het middenvlak van de schijf zakken. De grote stofdeeltjes zakken sneller en verzamelen zich in een dunne laag in het middenvlak.

Planeetvorming

De eerste stadia van planeetvorming vinden plaats als de schijf nog jong en zwaar is. Dit proces is geïllustreerd in Figuur 2: de kleine stofdeeltjes afkomstig uit de oorspronkelijke moleculaire wolk worden nauwelijks door de gasdruk ondersteund en zakken naar het middenvlak. Terwijl dit gebeurt botsen ze met elkaar en blijven aan elkaar kleven. De zo gevormde grotere stofdeeltjes vallen nog sneller naar het middenvlak, en verzamelen zich in een dunne laag rond het middenvlak. De dichtheid van grote stofdeeltjes in het middenvlak is nu erg hoog, en de stofdeeltjes botsen steeds vaker en blijven dan aan elkaar kleven totdat ze rotsblokken vormen die de bouwstenen zijn van planeten. Deze rotsblokken worden wel planetesimalen genoemd.

De planetesimalen zijn zwaar genoeg om elkaars zwaartekracht te voelen, en kunnen elkaar nu over grote afstanden aantrekken. Niet iedere botsing resulteert echter in een groter object; de botsingen zijn soms zo heftig dat de planetesimalen elkaar verpulveren. In de wat oudere schijven zijn daarom nog steeds relatief kleine stofdeeltjes aanwezig (met afmetingen van een paar μm) die voor een groot deel van de infraroodstraling van de schijf zorgen. Deze schijven worden dan ook wel puinschijven genoemd. Als de planetesimalen uiteindelijk planeten vormen zullen deze het gas dat in hun baan aanwezig is “opvegen”, zodat er een onderbreking in de gasschijf ontstaat. Het binnendeel en het buitendeel van de schijf (zoals geïllustreerd in het vijfde paneel van Figuur 1) zullen beiden aan de planeet trekken, met als gevolg dat de baan van de planeet nog veel kan veranderen voordat de restanten van de schijf zijn verdwenen.



Figuur 3: Manieren om de UV intensiteiten in de schijf te bepalen: volledig 2-dimensionaal, 1-dimensionaal in verticale richting, en 1-dimensionaal in radiële richting.

Dit proefschrift

Het doel van dit proefschrift is uit te zoeken hoe de chemie en temperatuurstructuur eruit zien in de verschillende evolutionaire stadia van een schijf, en hoe straling van atomen en moleculen (in zogenaamde emissielijnen) gebruikt kunnen worden om de fysische eigenschappen van een schijf te achterhalen. De meeste informatie over schijven komen nu van de stofemissie in het infrarood en bij (sub-)millimeter golflengten. Het gedrag van het stof in schijven wordt echter sterk beïnvloed door het gas, en stofemissie op zichzelf kan geen informatie verstrekken over de massa, structuur en dynamica van het gas. Het is daarom belangrijk om het gas zelf te onderzoeken.

De emissielijnen zijn sterk afhankelijk van de chemische abundenties en gas-temperatuur en hun verdeling over de schijf. Om de lijnen te simuleren voor een bepaald type schijf wordt een verdeling aangenomen van de dichtheid en de stof-temperatuur. Ook wordt er een sterkte van het ultraviolet (UV) stralingsveld van de ster aangenomen, dit is belangrijk omdat UV-straling moleculen uit elkaar kan halen tot losse atomen. De dichtheid, stoftemperatuur en UV-straling worden als invoer gebruikt voor een computercode die de chemische abundenties en gastemperaturen bepaalt. Aan de hand van deze resultaten worden dan de lijnprofielen en intensiteiten bepaald.

Zoals gezegd heeft UV-straling een sterke invloed op de berekende chemische abundenties. Het is daarom belangrijk om de UV-intensiteiten in de schijf zo correct mogelijk te berekenen. Een aantal manieren om dit stralingstransport te berekenen zijn geïllustreerd in Figuur 3. De meest betrouwbare resultaten komen van een volledig 2-dimensionale aanpak, die rekening houdt met zowel absorptie als verstrooiing. Deze methode is helaas erg tijdsintensief, vooral omdat de

beste resultaten worden verkregen door het stralingstransport en de chemieberekeningen een paar keer te itereren. Het is voor veel toepassingen dan ook praktischer om de 2-dimensionale doorsnede van de schijf op te delen in een serie 1-dimensionale structuren. Deze aanpak heet daarom ook wel 1+1-dimensionaal. Een 1+1-dimensionale aanpak kan op twee manieren: een aantal verticale structuren wordt in radiële richting naast elkaar gezet, of een aantal radiële structuren wordt in verticale richting op elkaar gelegd. Deze laatste optie heeft de voorkeur bij optisch dunne schijven (bijvoorbeeld puinschijven), waar verstrooiing geen noemenswaardige rol speelt en de UV straling zich dus langs rechte lijnen van de ster verplaatst. Voor de optisch dikke jonge schijven is er geen duidelijke voorkeur voor de ene of de andere aanpak; vaak worden bij deze schijven verticale structuren gebruikt, omdat deze het makkelijker maken om de straling die verantwoordelijk is voor de afkoeling van de schijf juist te berekenen.

In hoofdstuk 2 van dit proefschrift wordt een beschrijving gegeven van een test van de hier gebruikte chemiecode tegen andere, vergelijkbare codes voor een gestandaardiseerde set problemen, naar aanleiding van een workshop die in 2004 in Leiden werd gehouden. Het bleek dat de resultaten van de chemiecodes goed overeen komen in modellen waar de gasttemperatuur wordt vastgezet op 50 K (-223° C, een typische temperatuur voor interstellaire wolken). De grootste afwijkingen tussen de codes zitten in modellen waar de gasttemperatuur apart wordt berekend. In die modellen hangt de temperatuur van de chemie af, en de chemie weer van de temperatuur, dus kunnen er al snel terugkoppelingsverschijnselen optreden die grote verschillen veroorzaken. Een gedetailleerde studie heeft uitgewezen dat de verschillen voornamelijk worden veroorzaakt door kleine verschillen in de manier waarop bepaalde fysische processen (zoals fotoëlektrische verhitte) worden benaderd. Door deze formuleringen te standaardiseren kunnen de meeste verschillen worden weggewerkt.

In hoofdstuk 3 worden de chemie, gasttemperaturen en emissielijnen berekend voor een jonge schijf rond een T-Tauri ster. Een verticale 1+1-dimensionale aanpak werd gebruikt voor het stralingstransport. De berekeningen werden uitgevoerd voor twee schijfmodellen, één met een constante stof/gas verhouding door de hele schijf, en één waarin de stofdeeltjes waren verwijderd uit de bovenlagen van de schijf om zo het neerslaan van stofdeeltjes te simuleren. Uit de berekeningen blijkt dat het neerslaan van stof deeltjes voornamelijk effect heeft op de gasttemperatuur. Dit komt doordat stofdeeltjes die UV-straling absorberen en vervolgens hoog-energetische elektronen uitzenden (fotoëlektrische verhitte) een belangrijke bron zijn voor de verhitte van het gas. Als de stofdeeltjes neerdalen koelt de bovenste laag van de schijf dus af. Het effect op de chemische abundancies is klein: de meeste moleculen kunnen iets dieper in de schijf nog door UV-

straling vernietigd worden doordat de UV straling dieper kan doordringen zonder geabsorbeerd te worden. De oorzaak hiervan is dat de allerkleinste stofdeeltjes (polycyclische aromatische koolwaterstoffen, of PAKs) zo klein zijn dat ze niet neerslaan, maar lange tijd in de bovenlagen kunnen blijven hangen. De PAKs leveren een belangrijke bijdrage in de absorptie van UV-straling en de vorming van H_2 moleculen. Het neerslaan van stofdeeltjes heeft het meeste effect op emissielijnen die bij hoge temperatuur worden aangeslagen, zoals de fijnstructuurlijnen van zuurstof en de hooggelegen rotationele lijnen van koolstofmonoxide (CO).

In hoofdstuk 4 wordt een model gemaakt van de puinschijf rond de ster HD 141569A. Uit waanemingen blijkt dat de stofverdeling van de schijf erg complex is: er zitten spiraalarmen in de stofschijf, en er blijkt geen stof aanwezig te zijn binnen 150 AE (d.w.z. 150 maal de afstand aarde-zon) van de ster. Daarbij is er gas waargenomen in deze schijf (in de vorm van CO), wat erop wijst dat deze zich in een overgangsstadium bevindt tussen een jonge gasschijf en een oudere puinschijf. Om te kunnen achterhalen hoe snel schijven in dit stadium hun gas verliezen werd aan de hand van de CO waarnemingen de massa en de verdeling van het gas bepaald. Het model dat de waarnemingen het best verklaart bevat 80 aardmassa's aan gas tussen 80 en 500 AE van de ster.

In hoofdstuk 5 worden de chemie, gastemperatuur en moleculaire lijnen bepaald voor een reeks modellen die verschillende stadia van schijfverdamping en stofneerslag simuleren. Beide processen kunnen een vlakke vorm van de schijf tot gevolg hebben, wat waargenomen kan worden door het infraroodspectrum van het stof te bestuderen. Het doel van het onderzoek is om te achterhalen welke lijnen er gebruikt kunnen worden om uitsluitel te geven welk proces er plaatsvindt. Het UV stralingstransport werd volledig 2-dimensionaal opgelost om zo accuraat mogelijke resultaten te krijgen. Om tijd te winnen werden er geen iteraties uitgevoerd met de chemieberekeningen. De gastemperatuur blijkt sterk af te hangen van de stof/gas verhouding (die verandert als de stofdeeltjes naar het middenvlak zakken), wat ook al in hoofdstuk 3 naar voren kwam, maar is nagenoeg onafhankelijk van de schijfmassa. De chemie laat wel sterke veranderingen zien als de schijfmassa afneemt, doordat zowel dichtheden als absorptie-effecten afnemen; als alleen de stof/gas verhouding afneemt zijn de veranderingen in de chemie vooral te wijten aan de lagere temperaturen. De intensiteiten van CO lijnen zijn niet gevoelig voor totale schijfmassa of stof/gas verhouding. De intensiteiten van de isotopische varianten op CO (^{13}CO en C^{18}O) vertonen een lichte afhankelijkheid op schijfmassa doordat ze snel optisch dun worden. Om te kunnen zeggen of een vlakke schijf massaverlies of stofneerslag heeft ondergaan is het bestuderen van de $\text{CO}/^{13}\text{CO}$ en $\text{O I } 63\text{ }\mu\text{m}/146\text{ }\mu\text{m}$ lijnverhoudingen het meest geschikt.