



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Sizing up protoplanetary disks

Trapman, L.

Citation

Trapman, L. (2020, November 5). *Sizing up protoplanetary disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/138010>

Version: 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/1887/138010>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/138010> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Trapman, L.

Title: Sizing up protoplanetary disks

Issue date: 2020-11-05

SAMENVATTING

De vraag “waar komen we vandaan?” is er één die ons al sinds mensenheugenis bezig houdt. Een belangrijk onderdeel daarvan is “hoe is onze aarde ontstaan?” Een antwoord op deze vraag kan ons helpen met begrijpen hoe leven zich hier heeft kunnen vormen. En het geeft ons misschien ook een idee waar in het heelal we zouden kunnen gaan zoeken naar leven op andere planeten.

Onze aarde is net iets minder oud dan de zon. Dit vertelt ons dat de aarde gevormd is toen de zon nog vrij jong was. Het liefst zouden we de tijd terugspoelen naar dit moment om het vormen van de aarde en de andere planeten in ons zonnestelsel bij te kunnen wonen. Dit is natuurlijk niet mogelijk. Wat we wel kunnen doen is op zoek gaan jonge zon-achtige sterren die nog bezig zijn met het vormen van hun eigen planetenstelsel. Door onze telescopen op deze sterren te richten kijken we als het ware terug in de tijd, naar de babyfoto's van onze zonnestelsel. Of in ieder geval iets wat hier dicht bij in de buurt komt.

De telescoop die we hier het meeste voor gebruiken is de Atacama Large Millimeter/ sub-millimeter Array, voor het gemak afgekort tot ALMA (zie figuur 1). Deze telescoop staat op het Chajnantor plateau, een hoogvlakte op meer dan 5000 meter boven zeeniveau, in de Atacamawoestijn in Noord-Chili. Wanneer we ALMA op deze jonge sterren richten zien we dat ze omringd zijn door dunne schijven van gas en stof. Aangezien we denken dat planeten in deze schijven gevormd worden noemen we ze “protoplanetaire schijven”. Door deze schijven te bestuderen en te achterhalen wat er zich binnenin deze schijf afspeelt krijgen we een beter beeld van hoe planeten zoals onze aarde gevormd kunnen worden.

Dit proefschrift richt zich op deze protoplanetaire schijven, waarbij twee vragen centraal staan. Hoeveel massa hebben deze schijven, oftewel hoeveel bouw materiaal is er beschikbaar om planeten mee te kunnen vormen? En hoe groot zijn protoplanetaire schijven? Zijn ze heel groot en is dus al dat bouw materiaal dun uitgesmeerd? Of zijn ze juist heel compact, met al het materiaal opgepropt in een klein gebied?

Van gaswolk tot ster

Het vormen van planeten is maar een klein deel van het grotere proces van hoe sterren gevormd worden. Het is daarom een goed idee om dit proces eerst globaal door te lopen. Sterren worden geboren in grote wolken van gas en stof. In deze wolken kunnen verdichtingen ontstaan, een soort klonten, die zwaar genoeg zijn dat ze onder hun eigen zwaartekracht bezwijken. De klont van gas en stof blijft ineensinken en vormt een veel dichtere kern, totdat het in het midden van deze kern heet genoeg is voor kernfusie. Deze bron van energie zorgt ervoor dat het binnenste van de kern niet verder kan instorten en daarmee is de ster geboren. De buitenste delen van de kern willen ook



Figuur 1: De ALMA telescoop is een verzameling van 66 radio antennes, elk met een doorsnede van 7 of 12 meter, die wordt gebruikt voor waarnemingen van protoplanetaire schijven. Door de signalen van alle antennes te combineren kunnen plaatjes met ongekend scherpte worden gemaakt. Credit: Y. Beletsky/ESO

op de ster vallen, maar kunnen dat niet direct doen. De kern heeft namelijk een klein beetje draaiing. Dit is haast niet merkbaar aan de buitenrand van de wolk, maar zodra deze buitenste delen naar binnen vallen zorgt het behoud van hoekmoment er voor dat ze steeds sneller om de ster beginnen te draaien.² De doorsnede van de kern is meer dan 100 000 keer groter dan die van de ster, dus tegen de tijd dat materiaal van de oorspronkelijke buitenrand van de kern bij de ster aangekomen is, draait het 100 000 keer sneller om de ster heen. Als de ster dit materiaal zou willen opslokken dan moet hij zo snel om zijn eigen as draaien dat hij zichzelf kapot draait.

De oplossing hiervoor is dat het materiaal uit de buitenste delen niet op de ster valt, maar in plaats daarvan om de ster heen gaat draaien. Zoals eerder gezegd noemen we deze schijf van gas en stof de protoplanetaire schijf. In deze schijf kan het materiaal genoeg afgeremd worden om door de ster opgeslokt te worden. Hoe dit precies gebeurt is nog niet helemaal duidelijk en daarom gaan we daar in hoofdstukken 4 en 5 dieper op in. Na ongeveer 5 tot 10 miljoen jaar is het grootste deel van het materiaal in de schijf opgegaan in de ster of omgezet in planeten. De restjes die zijn overgebleven worden weggeblazen door straling van de ster. Tien miljoen jaar klinkt misschien als een lange tijd, maar voor het vormen van een planeet is dit vrij krap. Om het ontstaan van planeten te begrijpen is het daarom zaak dat we goed begrijpen hoe de protoplanetaire schijf in elkaar zit.

De protoplanetaire schijf

Net als het materiaal waaruit hij gevormd is bestaat de schijf uit twee componenten. Veruit het meeste van de schijf is gas, naar schatting zo'n 99%. De andere 1% zijn stofdeeltjes die klein beginnen maar uiteindelijk uit moeten groeien tot planeten. Omdat er zoveel meer gas dan stof in de schijf is, bepaalt het gas hoe de schijf verandert

²Je kunt dit zelf ook uitproberen: ga op een bureaustoel zitten (die kan draaien), voeten van de vloer en draai langzaam rond met uitgestrekte armen. Als je je armen nu naar binnen trekt zul je merken dat je sneller gaat draaien.

met de tijd. En, zoals we zo dadelijk zullen zien, heeft het gas ook een grote invloed op hoe de stofdeeltjes samenklonteren en groeien.

Het gas is een mengsel van voornamelijk waterstof moleculen³ en helium atomen⁴. Het gas bevat ook kleine hoeveelheden (1-0.1 promille) koolstofmonoxide (CO), stikstof (N₂) en water (H₂O). Vooral de aanwezigheid van CO is fijn voor sterrenkundigen. Waterstof en helium zenden maar heel weinig licht uit en zijn daarom heel moeilijk te zien. CO daarentegen zendt wel veel licht uit en wordt daarom veel ingezet om indirect het gas te kunnen volgen.

Ondanks het feit dat het in de ruimte vele malen kouder en leger is dan hier op aarde vinden er toch nog steeds chemische reacties plaats. Deze zorgen er onder andere voor dat het percentage CO niet overal in de schijf hetzelfde is. Dit is problematisch wanneer we CO gebruiken om te achterhalen wat de waterstof moleculen aan het doen zijn. Zien we nou ver van de ster weinig CO omdat daar weinig gas zit? Of juist omdat CO door middel van een chemische reactie is omgezet in een ander molecuul? Het is daarom voor sterrenkundigen de moeite waard om goed te begrijpen hoe de chemie van CO in protoplanetaire schijven in elkaar zit.

Chemisch gezien kun je een protoplanetaire schijf opdelen in drie lagen. De bovenste laag van de schijf wordt blootgesteld aan directe straling van de ster. Moleculen in deze laag, waaronder CO, worden binnen de kortste keren kapot gemaakt door deze straling. De bovenste laag bestaat daarom vooral uit losse atomen. De middelste laag ligt diep genoeg in de schijf dat het grootste deel van de straling van de ster er niet bij kan komen. Deze laag is daarom rijk aan moleculen. In onze waarnemingen zien wij vooral licht afkomstig van CO moleculen uit deze laag. De onderste laag ligt in het midden van de schijf en is heel erg koud. De temperatuur is hier zo laag dat moleculen zoals CO vastvriezen op de stofdeeltjes. In de ijslaag op de stofdeeltjes gaat de chemie door en worden simpele moleculen omgezet in complexere moleculen zoals methaan en methanol. Het feit dat de meeste moleculen hier bevroren zijn betekent ook dat we deze laag van de schijf moeilijk kunnen zien in onze waarnemingen.

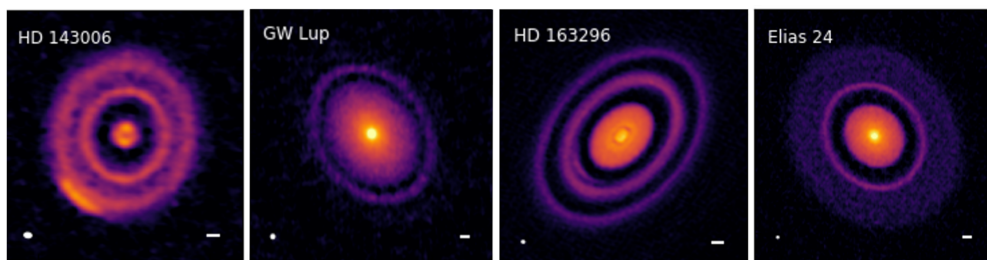
Van stofdeeltje tot planeet

Hoewel het stof maar 1 % is van de totale hoeveelheid materiaal in de schijf zijn het wel deze stofdeeltjes die uiteindelijk uitgroeien tot de planeten waar we in geïnteresseerd zijn. Ook gasreuzen zoals Jupiter en Saturnus hebben naar alle waarschijnlijkheid een rotsachtige kern die ongeveer 10 keer zo zwaar is als onze aarde. De stofdeeltjes beginnen heel klein, ongeveer een duizendste van een millimeter. In de schijf kunnen deze deeltjes op elkaar botsen en blijven plakken, om op die manier te groeien tot het formaat van een zandkorrel (± 1 mm) of zelfs een kleine kiezel (± 1 cm). Dit gaat extra goed in het midden van de schijf, omdat de stofdeeltjes hier bedekt zijn met een ijslaag. Deze maakt ze plakkerig, waardoor ze beter aan elkaar blijven kleven.

Één van de grootste vragen op het gebied van het vormen van planeten is hoe deze zandkorrels en kiezels verder groeien. We hebben een vrij goed beeld van hoe rotsblokken met een doorsnede van meer dan honderd meter op elkaar kunnen botsen en langzaam kunnen uitgroeien tot het formaat van een planeet, enkele duizenden kilometers in doorsnede. Wat we niet goed weten is hoe deze rotsblokken kunnen

³het gas in zeppelins

⁴het gas in ballonnen



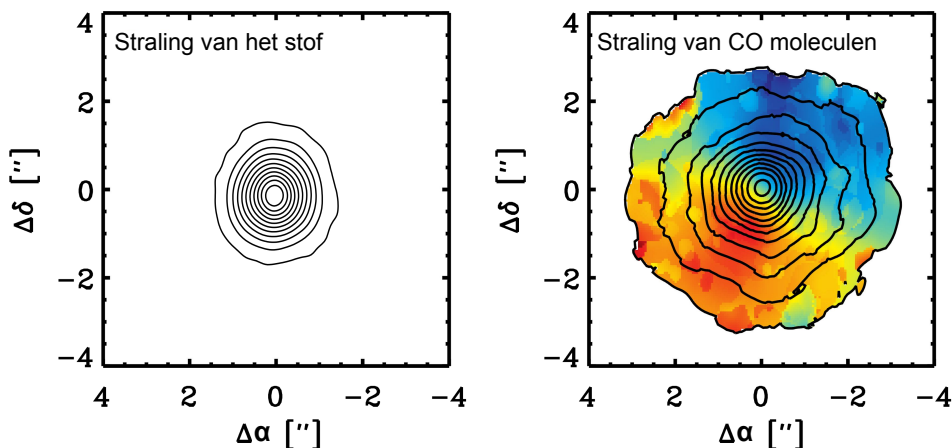
Figuur 2: Een selectie van waarnemingen gedaan met ALMA van het stof in protoplanetaire schijven. Hoe lichter de kleur in het plaatje, hoe meer stof er op dat punt van de schijf zit. Hier is goed te zien dat het stof zich heeft verzameld in 1 of meer ringen rond de ster. Credit: Andrews et al. (2018a)

ontstaan uit de stofdeeltjes van millimeter formaat.

Er zijn twee hindernissen die de stofdeeltjes moeten over komen om uit te kunnen groeien tot rotsblok. De eerste heeft te maken met wat er gebeurt wanneer twee stofdeeltjes op elkaar botsen. Wanneer dit plaatsvindt bij lage snelheden is de kans groot dat ze aan elkaar blijven plakken. Echter als de snelheid waarmee ze botsen groter wordt dan kunnen ze ook van elkaar af stuiteren of zelfs kapot breken. In de meeste gevallen voorkomt dit dat de stofdeeltjes groter kunnen worden dan ongeveer 1 meter in doorsnede.

De tweede hindernis is dat het gas de grotere stofdeeltjes afremt, waardoor ze naar binnen vallen en op de ster terecht komen. In het begin zijn de stofdeeltjes klein genoeg dat ze door het gas worden meegevoerd. Wanneer de stofdeeltjes groter geworden zijn is dit niet meer het geval. De snelheid waarmee de stofdeeltjes rond de ster bewegen wordt bepaald door zwaartekracht. Het gas daarentegen kan voor een deel steunen op zijn eigen gasdruk en beweegt daarom met een iets lagere snelheid rond de ster. Voor het stof voelt dit als een “tegenwind” terwijl het zich een weg baant door het langzaam bewegende gas. Hierdoor wordt het stof afgeremd en begint het naar binnen richting de ster te vallen. Hoe groter het stofdeeltje, hoe sneller deze wordt afgeremd: een kei met een doorsnede van 1 meter die begint op de afstand die de aarde van de zon staat verdwijnt binnen 100 jaar.

Een mogelijke oplossing om te voorkomen dat alle grote stofdeeltjes in de ster verdwijnen is de aanwezigheid van een planeet in de schijf. Deze vervormd de schijf buiten zijn baan op zo’n manier dat er een soort blokkade ontstaat die voorkomt dat de stofdeeltjes verder naar binnen kunnen vallen. Daarom begint het zich hier op te hopen. Deze ophoping van stof is een ideale plek om planeten te kunnen vormen. De ALMA telescoop heeft ons recent in staat gesteld om protoplanetaire schijven waar te nemen met een zeer hoge resolutie. In figuur 2 zien we een aantal van deze waarnemingen. Daarin lijkt het stof zich inderdaad te verzamelen in één of meer ringen rond de ster. Het feit dat er al een planeet moet zijn om deze ringen te vormen lijkt een beetje het kip en ei probleem, maar er zijn ook andere processen die een vergelijkbare barrière kunnen maken.



Figuur 3: Waarnemingen van de nabij gelegen protoplanetaire schijf TW Hya. Links zien we de straling van stofdeeltjes van ongeveer 1 millimeter in doorsnede. We zien hier een bovenaanzicht van de schijf, met de ster (niet zichtbaar bij deze golflengte) in het midden. De contouren laten zien dat straling minder wordt naarmate we verder van de ster komen. Rechts zien we de straling van de CO moleculen, die nog tot op veel grotere afstanden van de ster te zien is. De kleuren hier laten zien dat de schijf draait: een deel van de straling is blauw verschoven en komt naar ons toe, terwijl een ander deel van de straling rood verschoven is en van ons af beweegt. Credits: Andrews et al. (2011)

Dit proefschrift

In dit proefschrift richten we ons op drie onderwerpen: In hoofdstukken 2 en 3 kijken we naar wat de waarnemingen ons vertellen over hoeveel het stof naar binnen gedreven is. Hoofdstukken 4 en 5 proberen vast te stellen welk proces verantwoordelijk is voor hoe een protoplanetaire schijf verandert over de tijd. Hoofdstuk 6, en tot op zekere hoogte hoofdstuk 5, richt zich op de vraag: hoeveel gas zit er in totaal in een protoplanetaire schijf? Om de waarnemingen te kunnen interpreteren en om voorspellingen te kunnen maken gebruiken we geavanceerde computer modellen. Zo'n computermodel kun je zien als een protoplanetaire schijf in het klein: gegeven een beschrijving van een schijf rekent het model uit hoeveel de schijf opgewarmd wordt door straling van de ster en hoeveel de schijf afkoelt door straling uit te zenden. Ook rekent het model de chemie in de schijf uit, om bijvoorbeeld te bepalen wat het percentage CO is op verschillende plekken in de schijf. Als laatste berekent het model hoe onze schijf er uit zou zien als we hem zouden waarnemen.

Wanneer we ALMA op een protoplanetaire schijf richten dan zien we de straling van zowel het stof als van de CO moleculen in het gas. In figuur 3 zijn deze twee componenten naast elkaar geplaatst. In deze waarnemingen lijkt het alsof het gas zich veel verder van de ster uitstrekt dan de stofdeeltjes. De straling die we hier zien komt van stofdeeltjes van ongeveer een millimeter in doorsnede. De waarnemingen lijken dus te suggereren dat het deze stofdeeltjes naar binnen zijn gedreven richting de ster. Het gas is daarentegen op dezelfde plek gebleven. Hoeveel kleiner de stofschijs is in

vergelijking met de gasschijf zou ons dus kunnen vertellen hoeveel de stofdeeltjes naar binnen zijn gedreven.

Dit is echter niet het enige proces wat kan verklaren wat we hier zien. CO zendt ook bij lage dichtheden nog straling uit en is daarom nog steeds zichtbaar op grote afstanden van de ster. Dit is in tegenstelling tot de straling van het stof, die al veel eerder te zwak wordt om waar te kunnen nemen. Wat we zien in figuur 3 is dus ook wat we verwachten waar te nemen als het stof niet naar binnen gedreven is.

In hoofdstuk 2 gebruiken we computermodellen van een protoplanetaire schijf om onderscheid te kunnen maken tussen deze twee processen. In ons computermodel kunnen we er voor kiezen of het stof wel of niet naar binnen laten drijven. Voor beide gevallen kunnen we dan berekenen hoe we deze schijf zouden zien met onze telescoop. Uit ons onderzoek blijkt dat we met zekerheid kunnen zeggen dat het stof naar binnen gedreven is als de doorsnede van de gasschijf, gemeten van de straling van de CO moleculen, meer dan 4 keer zo groot is als de doorsnede van de stofschijf. In het geval dat het verschil kleiner is kunnen we dit niet met zekerheid zeggen zonder eerst in meer detail naar de schijf in kwestie te kijken. Ook laten we zien dat het niet mogelijk is iets te zeggen over hoe snel het stof naar binnen gedreven is aan de hand van hoeveel kleiner de stofschijf is ten opzichte van de gasschijf. Er spelen hier simpelweg teveel andere factoren een rol.

Deze bevindingen worden in hoofdstuk 3 toegepast op waarnemingen van 10 protoplanetaire schijven. De sterren waar deze schijven om heen draaien liggen allemaal in dezelfde wolk en zijn allemaal rond dezelfde tijd gevormd. Door deze schijven tegelijk te onderzoeken en met elkaar te vergelijken krijgen we een beeld van de overeenkomsten en verschillen binnen één generatie van sterren. Deze schijven hebben allemaal een gasschijf die groter is dan hun stofschijf, maar het verschil in doorsnede is kleiner dan 4. Er is dus geen duidelijk teken dat het stof naar binnen gedreven is voor deze schijven. Voor ons onderzoek maken we voor elk van de 10 schijven een computermodel op zo'n manier dat het precies de waarnemingen van het stof nabootst, waarbij we het stof niet naar binnen laten drijven. Er vanuit gaande dat dit klopt zou dit model ook de waargenomen grootte van de gasschijf moeten nabootsen. Als het stof in de waargenomen schijf wel naar binnen gedreven is dan zal ons model een te kleine gasschijf hebben in vergelijking met de waarnemingen. Dit blijkt voor 5 van de 10 het geval te zijn. Voor deze 5 schijven moet het stof naar binnen gedreven zijn om te verklaren wat we zien. Voor de andere 5 is de gasschijf van ons model even groot als de waargenomen schijf en lijkt het stof dus niet naar binnen gedreven te zijn.

Voor hoofdstuk 4 stappen we over naar gas en kijken we hoe de protoplanetaire schijf verandert met de tijd. Ondanks de aantrekkende werking van de zwaartekracht van de ster kan materiaal van de schijf niet zomaar op de ster vallen. Het behoud van hoekmoment zegt dat hoe meer een deeltje naar binnen richting de ster beweegt, hoe sneller het om de ster moet gaan draaien. Toch zien we wel dat er materiaal op de ster valt. Één van de mogelijke theorieën om dit te verklaren is dat het gas dichter bij de ster wordt afgeremd door het gas verder weg van de ster. Stel je voor dat de schijf is opgebouwd uit een opeenvolging van steeds grotere ringen die rond de ster draaien. Een ring dichter bij de ster beweegt sneller rond dan de volgende ring in de rij. Dit zorgt voor wrijving tussen de twee ringen. De binnenste ring wordt hierdoor afgeremd en valt naar binnen, terwijl de buitenste ring juist versnelt en naar buiten geslingerd wordt. Globaal gezien over de hele schijf betekent dit dat het gas vlak bij de ster op de ster valt, terwijl het gas aan de buitenrand van de schijf steeds verder weg van de

ster komt te staan.

In ons onderzoek hebben we gekeken naar hoe goed dit effect te zien zou moeten zijn in onze waarnemingen. Gebruikmakende van een computermodel kijken we naar een opeenvolging van momentopnames uit het leven van een protoplanetaire schijf die steeds groter wordt. Van elk van deze momentopnames berekenen we hoe groot de schijf er uit zou zien in onze waarnemingen. Hieruit blijkt dat het groeien van de schijf inderdaad terug te zien is in de waarnemingen. Echter, puur uitgaande van deze waarnemingen overschat je met een factor 10 hoe snel de schijf daadwerkelijk groeit. Wanneer we onze computermodellen vergelijken met daadwerkelijke waarnemingen blijkt dat deze overeenkomen mits de schijven heel klein begonnen zijn en heel langzaam groeien.

In de laatste twee hoofdstukken gaan we aan de slag met de vraag: Hoeveel gas zit er in totaal in een protoplanetaire schijf. De totale gas massa van de schijf geeft ons de totale hoeveelheid bouw materiaal die beschikbaar is om planeten, specifiek gasreuzen, mee te vormen. Hoeveel gas er is heeft ook invloed op hoe snel het stof naar binnen drijft en het is één van de factoren die bepaalt hoe lang de schijf kan blijven bestaan. Het bepalen van de totale gas massa van de schijf is zeer lastig, omdat het gas voornamelijk bestaat uit waterstof moleculen die haast geen straling uitzenden. Het “wegen” van een protoplanetaire schijf kan daarom niet direct. In plaats daarvan maken we gebruik van computermodellen om de waargenomen straling van CO te vertalen naar de totale hoeveelheid waterstof in de schijf.

Hoofdstuk 5 ligt in het verlengde van hoofdstuk 4. De theorie dat protoplanetaire schijven groeien naarmate ze ouder worden doet ook een voorspelling over een verband tussen hoe snel materiaal uit de schijf op de ster valt en hoeveel materiaal er in de schijf zit. Huidige waarnemingen laten dit verband echter niet zien, zij suggereren dat schijven veel minder gas bevatten dan verwacht. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat we een proces niet hebben meegenomen in onze omrekening van het aantal CO moleculen naar het aantal waterstof moleculen. Één van de mogelijkheden is dat we de chemie van CO die we in onze modellen stoppen niet compleet is. Recente onderzoeken hebben bijvoorbeeld laten zien dat CO door middel van chemische reacties kan worden omgezet in grotere moleculen zoals methanol, een proces dat momenteel niet in onze modellen zit.

In dit onderzoek nemen we de computermodellen van hoofdstuk 5 en breiden ze uit met een beschrijving van hoeveel CO er wordt omgezet in andere moleculen. Door op deze manier CO uit onze modellen weg te halen proberen we de waargenomen lage hoeveelheden straling van CO na te bootsen. Deze toevoeging lijkt inderdaad iets te helpen, maar bij lange na niet genoeg om de modellen op één lijn te krijgen met de waarnemingen. Hoewel CO efficiënt wordt weggehaald dieper in de schijf gebeurt er vrij weinig in de laag van CO die we zien in onze waarnemingen. Wat hier een uitweg zou kunnen bieden is als het CO-arme gas van dieper in de schijf op efficiënte wijze gemengd kan worden met het CO-rijke gas in de laag waar de waargenomen straling vandaan komt.

In het laatste hoofdstuk kijken we naar een andere manier om de totale hoeveelheid gas in een protoplanetaire schijf te meten. Hiervoor maken we gebruik van HD, een waterstof molecuul (H_2) waarbij één van de waterstof atomen vervangen is met een net iets zwaarder deuterium atoom. In tegenstelling tot zijn lichtere, symmetrische broertje H_2 zendt HD wel straling uit. Omdat HD zoveel lijkt op H_2 is het heel makkelijk om de vertaling te maken van de waargenomen hoeveelheid HD moleculen

naar de totale hoeveelheid gas in de schijf. Waarnemingen van de straling van HD zijn niet makkelijk en kunnen alleen met een telescoop vanuit de ruimte gedaan worden. De *Herschel Space Observatory* is er in geslaagd om HD te detecteren in een handjevol protoplanetaire schijven, maar is sinds 2011 gestopt met waarnemen.

In dit onderzoek kijken we naar een serie waarnemingen van 15 protoplanetaire schijven waarbij er naar straling van HD gezocht is, waarbij helaas niks is gevonden. Desalniettemin kunnen we hier nog steeds iets van leren, door met behulp van computermodellen te berekenen wat de maximale hoeveelheid gas is die deze schijven kunnen hebben voordat we ze hadden moeten zien in onze waarnemingen. Dit blijkt ongeveer 10% van de massa van onze zon te zijn. Dit blijkt een relevante grens te zijn, want dit betekent dat ze niet zo zwaar zijn dat delen van de schijf onder hun eigen zwaartekracht kunnen bezwijken en ter plekke een planeet of dwergster kunnen vormen. Voor 1 van de 15 schijven kunnen we zelfs zeggen dat de schijf niet zwaarder kan zijn dan 7% van de massa van onze zon. Dit maximum is lager dan sommige eerdere berekeningen van de massa van deze schijf gedaan aan de hand van CO. Tenslotte hebben we onze resultaten ook vergeleken met twee waargenomen planetenstelsels rond sterren die lijken op de jonge sterren waar wij naar gekeken hebben. Wanneer we de massa's van deze planeten optellen komen we dicht in de buurt ($\pm 40\%$) van de maximale hoeveelheid gas van onze schijven. Dit betekent dat deze planeten of heel efficiënt gevormd zijn of dat ze al eerder zijn gevormd, toen er nog meer gas in de schijf zat.

Toekomstperspectief

Telescopen zoals ALMA hebben ons de afgelopen jaren in staat gesteld om protoplanetaire schijven in ongelooflijk detail te kunnen bestuderen. Dit heeft tot veel nieuwe inzichten geleid. We hebben echter nog een lange weg te gaan voordat we precies begrijpen hoe protoplanetaire schijven in elkaar zitten en hoe zich hierin planeten kunnen vormen. Vooral over het gas in protoplanetaire schijven zijn nog veel vraagtekens. ALMA kan ons helpen deze weg te nemen, vooral door dieper te staren en de zwakke straling van het gas in meer detail waar te nemen. Het is hierbij ook belangrijk dat we dit doen voor een groot aantal schijven. Zo kunnen we een beeld krijgen van wat normaal is in een protoplanetaire schijf, of anders gezegd, hoe ziet de gemiddelde schijf er uit? Want dit is uiteindelijk de omgeving waarin de gemiddelde planeet gevormd gaat worden.

Het is nog steeds onduidelijk wat de totale hoeveelheid gas is in protoplanetaire schijven, ondanks de grote hoeveelheid aandacht voor dit onderwerp waaronder delen van dit proefschrift. Alles wijst erop dat de straling van HD moleculen de meest betrouwbare manier is om protoplanetaire schijven te wegen. Om deze straling waar te kunnen nemen moeten we een telescoop in de ruimte hebben. De huidige waarnemingen van HD zijn gedaan met de *Herschel Space Observatory*, maar helaas is deze sinds 2013 niet meer te gebruiken voor deze waarnemingen door een gebrek aan koelvloeistof. Er zijn momenteel plannen voor twee potentiële opvolgers: de *Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics* (SPICA) die hopelijk wordt goedgekeurd in het voorjaar van 2021 en de *Origin Space Telescope* (OST). Als de plannen voor deze telescopen worden goedgekeurd dan duurt het waarschijnlijk nog wel tot ongeveer 2035 voordat ze gelanceerd kunnen worden, maar het zal uiteindelijk het wachten waard zijn.