



Universiteit
Leiden
The Netherlands

A Herbig disk view of planet formation

Stapper, L.M.

Citation

Stapper, L. M. (2024, October 16). *A Herbig disk view of planet formation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4098009>

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/1887/4098009>

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

Nederlandse samenvatting

Planeten spelen al sinds mensenheugenis een belangrijke rol in onze cultuur. Van hoofdrollen in mythologieën van over de hele wereld, tot het helpen met het nemen van onze eerste stappen om het heelal om ons heen te begrijpen. Sinds de dagen van Copernicus, Galileo en Kepler is onze kennis over planeten al enorm toegenomen. Niet alleen kunnen we nu ruimtesondes naar planeten toe sturen, we hebben nu ook planeten die rond andere sterren draaien ontdekt. Sinds de eerste exoplaneet was gevonden in 1995 is er een heuse exoplaneet revolutie gaande: er zijn al meer dan 5500 exoplaneten gevonden. Deze planeten verschillen enorm van elkaar. Sommige planeten zijn zwaarder en groter dan Jupiter, maar zitten dichterbij hun ster dan Mercurius om de zon. Zo een planeet wordt een ‘hete Jupiter’ genoemd en heeft typisch een omlooptijd van maar enkele Aardse dagen. Aan het andere uiteinde zijn er planeten die heel ver weg van hun ster staan, op honderden keren de afstand van de aarde tot de zon³. Om zo een grote diversiteit aan planeten te kunnen begrijpen moeten we gaan kijken naar hoe die planeten worden gemaakt. Hiervoor hebben we grote telescopen nodig, zowel op aarde als in de ruimte. Onder andere de Atacama Large (sub)millimeter Array (ALMA) in Chili en de James Webb Space Telescope (JWST) worden op dit moment druk gebruikt om onze kennis op het gebied van planeetformatie te vergroten (zie figuur 1). Planeetformatie blijft nog steeds een ingewikkelde puzzel, waar nog veel stukjes van missen, maar we hebben de afgelopen jaren aanzienlijke vooruitgang geboekt in ons begrip ervan.

Ster- en planeetformatie

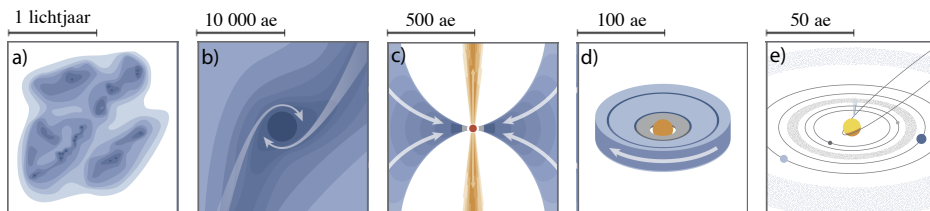
Voordat een planeet heeft kunnen ontstaan zijn er al honderden miljoenen jaren voorbij gegaan. Figuur 2 laat de verschillende stadia zien die doorlopen moeten worden voordat een ster met planeten eromheen is ontstaan. Het begint met een grote interstellaire wolk die tientallen lichtjaren groot kan zijn, en bestaat voornamelijk uit gas en een beetje stof (ongeveer 1%). Die wolk zal, na bijvoorbeeld onstabiel te zijn gemaakt door een supernova in de buurt, door de zwaartekracht ineenvallen naar de plekken met de hoogste dichtheid (zie figuur 2a). Doordat de wolk een klein beetje beweegt, zal de ineenvallende materie gaan ronddraaien

³Een astronomische eenheid, of ae.



Figuur 1: Een protoster in de absorptienevel L1527 in het sterrenbeeld de Stier (Taurus) zoals gezien door de James Webb Ruimtetelescoop. De wolk waaruit de protoster ontstaat valt op de ster via een protoplanetaire schijf. Boven en onder die schijf is het interstellair medium weggeblazen doordat de ster ook materiaal van zich af werpt. Bron: NASA, ESA, CSA en STScI

door behoud van impulsmoment, zoals een kunstschaatser die een pirouette maakt sneller zal ronddraaien als de armen worden ingetrokken (zie figuur 2b). Uiteindelijk ontstaat er een accretieschijf waarlangs de materie op de protoster valt (zie figuur 2c), dit is te zien als de langwerpige schaduw in het midden van Figuur 1. De wolk waaruit de ster ontstaat zal langzaam opgaan in de ster of schijf, of worden weggeblazen door straalstromen die van de ster afkomen. Uiteindelijk blijft er een jonge ster met een zogenaamde protoplanetaire, of planeet vormende, schijf over (zie figuur 2d). De materie in de schijf zal uiteindelijk in planeten of op de ster terechtkomen, of worden weggeblazen door een sterrenwind. Een zogenaamde



Figuur 2: De verschillende stadia van ster- en planeetformatie. Een gas wolk (a) valt ineen door de zwaartekracht (b), en een protoster ontstaat die gevoed wordt door de wolk eromheen (c). Een protoplanetaire schijf ontstaat (d), waaruit een planetenstelsel zal ontstaan (e). Bron: Öberg & Bergin (2021).

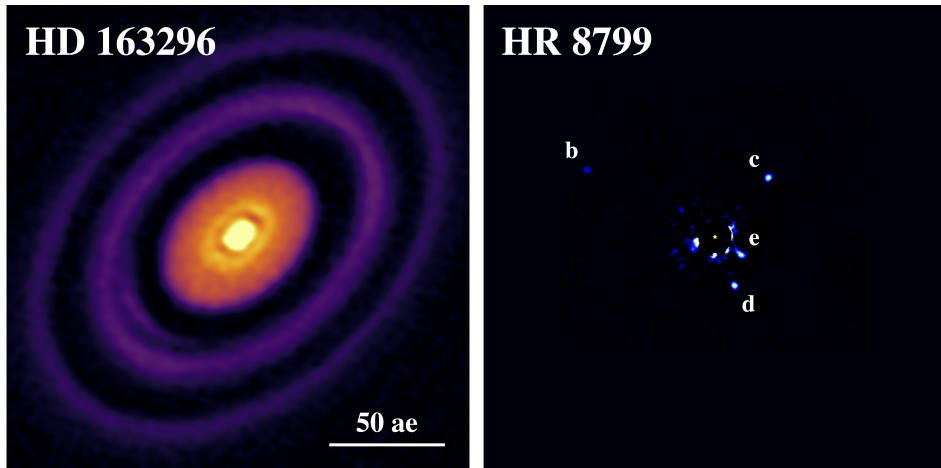
puinschijf blijft over. In deze schijf is planeetformatie nog ver van afgelopen: jonge planeten kunnen nog van plek wisselen en er zijn puinschijven gevonden met een hoop tweede generatie stof en gas, wat waarschijnlijk is vrijgekomen door botsingen tussen overgebleven brokstukken.

Protoplanetaire schijven

De focus van dit proefschrift ligt op protoplanetaire schijven, de schijven van stof en gas rond jonge sterren die planeten maken. In deze schijven beïnvloeden vele processen de evolutie van zowel het gas als het stof. Het stof begint ter grootte van een paar micrometer en moet uiteindelijk groeien tot planeten van duizenden kilometers in diameter. Vele hindernissen moeten hiervoor worden overwonnen en veel is nog onbekend. We weten in elk geval dat het kleine stof meebeweegt met het gas, maar dat grotere stofdeeltjes dat niet doen. Doordat het gas iets trager rond de ster draaid dan de grotere stofdeeltjes zullen die een tegenwind ervaren wat ervoor zorgt dat het stof richting de ster beweegt. Deze beweging moet worden gestopt, wat waarschijnlijk gebeurt door structuren die in de schijf ontstaan, zie het linker paneel van figuur 3. Als er eenmaal genoeg stofdeeltjes aaneen zijn geklonterd zal er ook gas worden vastgehouden en ontstaan er grote planeten zoals Jupiter, zie het linker paneel van figuur 3.

Dankzij de grote hoeveelheid data dat nu beschikbaar is door demografische studies van schijven in verschillende stervormingsgebieden kunnen nu ook vergelijkingen worden gedaan tussen protoplanetaire schijven en exoplaneten. Uit deze demografische studies blijkt dat de hoeveelheid materiaal dat beschikbaar is hand in hand gaat met de massa van de ster. Hoe zwaarder de ster, hoe meer massa er in de schijf eromheen zit. Verder lijkt de massa ook van de grootte van de schijf af te hangen, wat mogelijk komt door structuren in de schijf.

Doordat lage massa sterren, die ook wel T Tauri sterren worden genoemd met een massa van minder dan 1.5 keer die van de zon, vaker voorkomen bestaat het grootste deel van deze demografische studies uit deze lage massa sterren. Hierdoor weten we veel minder over wat er gebeurt rond zwaardere sterren. De focus van dit proefschrift ligt daarom op de schijven rond de zogenaamde Herbig sterren.



Figuur 3: Links wordt een waarneming van de Herbig schijf HD 163296 (Andrews et al. 2018b) gemaakt met de ALMA telescoop getoond. Rechts is een waarneming van het planetenstelsel HR 8799 wat uit vier planeten (b tot en met e) elk met een massa van ongeveer 7 keer de massa van Jupiter bestaat (Marois et al. 2008, 2010). De grootte van beide objecten is hetzelfde, misschien zien we in het figuur links wel de geboorte van een planetenstelsel zoals dat van HR 8799.

Dit zijn middelzware jonge sterren met massa's tussen de 2 en 8 keer die van de zon. Uit exoplaneet studies blijkt dat hoe vaak zware planeten voorkomen afhangt van de massa van de ster en dat dit het hoogste is rond middelzware sterren. Veel direct geobserveerde planeten (zoals in figuur 3) zijn ook rond dit soort sterren gevonden. Het is daarom belangrijk om een systematisch onderzoek te doen naar de schijven rond de voorlopers van deze sterren, de Herbig sterren.

Dit proefschrift

Dit proefschrift focust op de massa en structuur, zowel in het gas en het stof, van schijven rond Herbig sterren. Deze Herbig schijven worden vergeleken met schijven rond de T Tauri sterren, om te zien wat de verschillen zijn. De hoeveelheid massa die beschikbaar is en de mogelijke correlatie met de structuren die zichtbaar zijn zegt veel over de mogelijkheid om planeten in deze schijven te vormen.

Hoofdstuk 2 focust op de massa van het stof in Herbig schijven. Alle data van Herbig schijven geobserveerd met de ALMA telescoop is verzameld, tot en met de Orion nevel op ongeveer 1500 lichtjaar. De stofmassa is bepaald met behulp van de ALMA data en vergeleken met T Tauri schijven in twee andere stervormingsgebieden, Lupus (Wolf) dat maar 1-3 miljoen jaar oud is en Scorpius (Schorpioen) dat 5-11 miljoen jaar oud is. Vergeleken met de stofmassa beschikbaar in de schijven van de T Tauri sterren in Lupus en Scorpius zijn Herbig schijven respectievelijk een factor 3 tot 7 keer zwaarder. Dit grote verschil is vooral opmerkelijk als je bedenkt dat de leeftijd van de Herbig schijven hetzelfde is als die van Scorpius

Verder zijn de schijven rond Herbig sterren ook significant groter dan de T Tauri schijven. Dit is waarschijnlijk gerelateerd aan het feit dat reuzenplaneten vaak rond middelzware sterren worden gevonden. Deze planeten stoppen het naar binnen drijven van de stofdeeltjes, waardoor het emissie oppervlak groter is en er dus een hogere stofmassa wordt gevonden. Dit is in tegenstelling tot de T Tauri schijven, waar dit proces pas op veel kortere afstanden tot de ster wordt gestopt.

De stofmassa is maar een klein gedeelte van de totale massa. De gasmassa is daarom belangrijk om te bepalen om het ontstaan van planeten goed te kunnen begrijpen, wat in hoofdstuk 3 wordt gedaan. De meerderheid van het gas bestaat uit H_2 , maar dat is moeilijk te observeren. Daarom wordt vaak naar het op-een-na meest voorkomende molecuul gebruikt: koolstofmonoxide (CO). Omdat dit molecuul veel voorkomt is het nog steeds moeilijk om de hele schijf te kunnen zien doordat het ondoorzichtig is, daarom wordt vaak naar de minder voorkomende varianten van koolstofmonoxide gekeken ^{13}CO en $C^{18}O$. Alle beschikbare ALMA waarnemingen van deze zogenaamde isotopologen⁴ van 35 Herbig schijven zijn verzameld, en met gebruik van het chemische modelleer programma DALI kan de emissiesterkte van deze stoffen worden vergeleken met modellen met een bepaalde gasmassa. De gasmassa's die hier uitkomen zijn minstens een factor 100 zwaarder vergeleken met de stofmassa's uit het vorige hoofdstuk, wat consistent is met de verhouding in het interstellair gas. Dit is in tegenstelling tot wat er voor T Tauri schijven is gevonden, waar die gas-stof verhouding maar een factor tien is. Dit komt doordat in T Tauri schijven CO bevriest en dan wordt omgezet in andere moleculen. Maar Herbig schijven zijn warmer door de hogere lichtkracht van de ster waardoor CO niet bevriest en dus gebruikt kan worden om de gasmassa te bepalen.

Omdat de met ALMA geobserveerde Herbig schijven vooral richting de zwaarste en grootste schijven kunnen neigen, is het belangrijk om een volledige populatie te hebben om dit vertekend beeld recht te kunnen zetten. Hoofdstuk 4 presenteert het eerste volledige overzicht van alle Herbig schijven in een enkel stervormingsgebied: Orion. Met behulp van de NOEMA telescoop zijn er 25 nieuwe Herbig schijven geobserveerd, wat in combinatie met ALMA data van 10 andere schijven alle Herbig schijven in Orion zijn. De mediaan van de stofmassa's die hieruit bepaald zijn is 11.7 aardmassa's. Dit betekent dat ongeveer 50% van alle Herbig schijven zwaarder zijn dan 10 aardmassa's, wat het geval is voor minder dan 25% van de T Tauri schijven. De massaverdeling uit hoofdstuk 2 is iets vertekend richting de zwaardere schijven.

De massa van een schijf kan vergeleken worden met de hoeveelheid massa die op de ster valt (ofwel de accretie snelheid) om een idee te krijgen van hoe lang een schijf kan blijven bestaan. In hoofdstuk 5 worden de massa's uit hoofdstuk 2 vergeleken met de accretie snelheid, omdat dit voor T Tauri schijven een duidelijke relatie geeft. Voor Herbig schijven lijkt de relatie voor de zwaarste schijven overeen te komen met die van T Tauri schijven, maar voor de laagste massa schijven lijkt de accretie snelheid niet af te nemen, terwijl dit wel zo is voor de T Tauri schijven. Verschillende oplossingen worden gesuggereerd: mogelijk zijn de stofmassa's te

⁴Moleculen waarvan minstens een van de atomen een isotoop is, oftewel een atoom met een ander aantal neutronen maar met hetzelfde aantal protonen.

laag doordat niet al het stof te zien is, of worden de accretie snelheden overschat.

In hoofdstuk zes wordt gekeken naar de verticale hoogte van het gas in acht Herbig schijven. De groep I schijven worden van origine gezien als verticaal ‘dikke’ schijven, terwijl de groep II schijven dun zouden zijn. Met behulp van ALMA data is de dikte bepaald van de schijf en is gevonden dat groep II schijven inderdaad dun kunnen zijn, maar dat dat niet per se het geval hoeft te zijn. De groep II classificatie kan dan komen doordat het grootste gedeelte in de schaduw zit door een verdikking dichtbij de ster.

Herbig sterren zijn over het algemeen al redelijk oud, rond de 5 miljoen jaar. Er zijn jonge sterren die middelzware T Tauri sterren worden genoemd, die even zwaar zijn als Herbig sterren maar eruit zien als T Tauri sterren omdat de ster zelf nog niet zo warm is. Uiteindelijk zullen deze middelzware T Tauri sterren een Herbig ster worden en het is daarom belangrijk om de schijven rond deze populatie sterren te onderzoeken. Het laatste hoofdstuk, hoofdstuk 7, kijkt naar zowel de gas- en stofmassa in de schijven rond deze sterren. De massa’s blijken hetzelfde te zijn als voor de Herbig schijven.

De volgende belangrijkste conclusies kunnen getrokken worden:

1. Herbig schijven zijn zwaar, zowel in het gas als het stof.
2. Reuzenplaneten hebben een grote impact op de evolutie van Herbig schijven.
3. Herbig schijven zijn zowel groter als zwaarder dan T Tauri schijven.

Toekomstperspectief

De hoofdstukken in dit proefschrift hebben laten zien dat er nog een hoop te leren valt wat betreft Herbig schijven. Het doel in de nabije toekomst is daarom ook om een volledig overzicht te krijgen van alle Herbig schijven binnen een bepaalde afstand tot de aarde. Tot nu toe zijn er al meerdere telescopen druk bezig geweest met het krijgen van data van een groot gedeelte van de Herbig populatie en dit zal binnenkort worden voltooid. Deze set van Herbig schijven zal een factor vijf groter zijn dan die uit hoofdstuk 2 en zal daarom veel inzichten in de Herbig populatie geven. Geplande upgrades aan ALMA zullen vervolg onderzoek op deze data ook gaan vermakkelijken, doordat de bandbreedte en gevoeligheid van de telescoop verbeterd zullen worden.

Directe waarnemingen van exoplaneten in schijven zal een van de hoofddoelen zijn voor de planeetformatie gemeenschap de komende jaren. Herbig schijven zullen hierin waarschijnlijk een belangrijke rol gaan spelen omdat dit de schijven zijn waarin reuzenplaneten ontstaan, die makkelijker zijn om met de huidige telescopen te detecteren. Terwijl ALMA vooral focust op de buitenste gebieden van protoplanetaire schijven, zullen de recent gelanceerde James Webb Space Telescope (JWST) en de geplande Extremely Large Telescope (ELT) in Chile een belangrijke rol spelen voor de binnenste gedeeltes van de schijven.

Wat betreft het bepalen van de massa van schijven zullen waarnemingen van nog minder veel voorkomende CO isotopologen een belangrijke eerste stap zijn

naar het nauwkeurig bepalen van de gasmassa's. Dit is al mogelijk met de ALMA telescoop. Verder zullen geplande telescopen zoals de Square Kilometer Array en de Next Generation Very Large Array, die op centimeter golflengtes observeren in plaats van millimeter zoals ALMA, inzichten geven in de distributie van centimeter stofdeeltjes.

