



Universiteit
Leiden
The Netherlands

High angular resolution studies of protoplanetary discs

Panic, O.

Citation

Panic, O. (2009, October 27). *High angular resolution studies of protoplanetary discs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/14267>

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/1887/14267>

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

Nederlandse Samenvatting

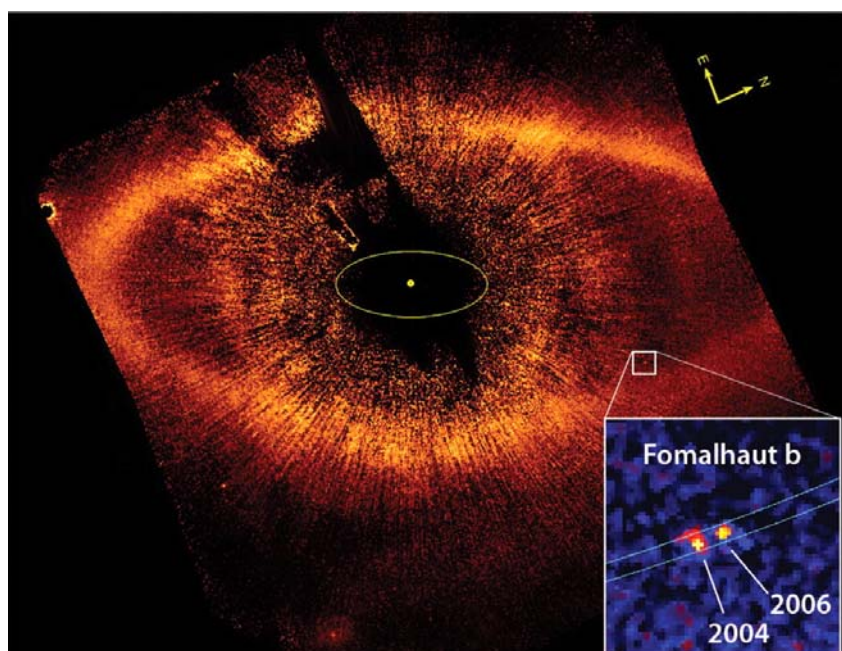
IN de afgelopen 15 jaar zijn door astronomen veel planeten ontdekt rond sterren. Het aantal groeit nog steeds, tot inmiddels circa 300 planeten. Dit zijn meestal grote planeten, zoals Jupiter, omdat een grotere planeet makkelijker te detecteren is. Maar er zijn redenen om aan te nemen dat kleine planeten, zoals de Aarde of Mars, niet zeldzaam zijn. Een van de laatste sensationele ontdekkingen is de planeet genaamd Fomalhaut b, in beeld gebracht in zijn baan binnen de schijf rond de ster Fomalhaut (Fig. 8.1).

Planeten worden gevormd in een gigantische schijf van gas en kleine stofdeeltjes die draait rond een jonge ster, honderden keren groter dan de afstand zon-aarde¹. Hoe dit proces precies werkt en waarom niet alle sterren schijven of planeten hebben, is een van de grootste motivaties om naar jonge sterren te kijken met heel geavanceerde instrumenten: telescopen werkzaam van optische golflengtes tot het radio gebied. Figuur 8.2 laat een artistieke interpretatie van zo'n schijf van gas zien, met stofbrokken en planeten die rond de ster draaien. Op de kaft van dit proefschrift staat een schilderij van de Spaanse kunstenaar Miquel Barceló geïnspireerd door de sterrenkunde en genoemd 'Konstelatie'. Dit schilderij zie ik echt als een protoplanetaire schijf: stofdeeltjes, stenen en proto-planeten draaien rond de ster in een schijf van gas. Het oppervlak van de schijf wordt belicht door de ster (gele kleur) en is niet perfect symmetrisch. Kouder materiaal binnen de schijf is geschilderd met een donkere, grijze kleur. Insekten die samen met proto-planeten rond de ster draaien, representeren de mogelijkheid voor leven: het is niet duidelijk dat deze insecten zullen overleven, net zoals het ook niet duidelijk is of leven echt kan ontstaan in de planetenstelsels die wij rond andere sterren ontdekt hebben. De vorming van planeten waar leven mogelijk is, en het ontstaan van het leven zijn delicate en complexe processen die de wetenschap niet nog volledig kan begrijpen. Met het onderzoek aan protoplanetaire schijven komen wij een klein stap verder naar het begrip van het ontstaan van de aarde en het leven.

Eenzijds wordt er veel theoretisch onderzoek gedaan om, met de kennis over ster-
vorming die we nu hebben, te bepalen welke 'ingredienten' nodig zijn om planeten te vormen en wat de consequenties daarvan zijn voor de waargenomen schijfstructuur.

Aan de andere kant kijken astronomen met steeds meer raffineerde en precieze telescopen naar jonge sterren, schijven en planeten om te proberen te begrijpen wat voor soort ster en omgeving er nodig zijn om een zware schijf te vormen en welk soort schijf er nodig is om planeten te vormen. Helaas is het niet voldoende om naar slechts

¹Eén astronomische eenheid (AE), circa 150 miljoen km



Figuur 8.1: Een voorbeeld van een planeet in een baan rond een jonge ster, Fomalhaut, op 25 lichtjaar van de aarde (Kalas et al., Science, 2008). De planeet, Fomalhaut b, is aangegeven met het witte kader. De beweging van de planeet is te zien in de inzet, waar de verschillende posities van de planeet in waarnemingen uit 2004 en 2006 te zien is. Directe opnames zoals deze zijn een recente techniek – de meeste planeten zijn tot nu toe ontdekt via indirecte waarnemingen, door het effect van hun baanbeweging op de beweging van de ster en sterlicht.

een aantal sterren te kijken en zo de schijfevolutie te begrijpen. Er zijn jonge sterren met lichte, geëvolueerde schijven, en er zijn soms oudere sterren met nog steeds gas-rijke, primitieve schijven. Dit laat zien dat het schijfevolutie een complexe proces is, niet alleen bepaald door de ster maar ook door andere factoren zoals de stellaire omgeving, eventuele begeleiders van de ster, de initiële rotatie en magnetische velden.

Het onderzoek in dit veld richt zich vooral op jonge sterren van lage massa, bijna zo zwaar als de zon tot enkele malen de massa van de zon², omdat deze ons een momentopname laten zien van de zon en het zonnestelsel toen deze nog erg jong waren.

VORMING VAN STERREN EN PLANETEN

³ Sterren en planeten worden geboren in de ijle volken die zich overal tussen de sterren in onze Melkweg bevinden. De interstellaire volken bestaan uit gas (99% qua massa, meest waterstof en helium) en kleine stofdeeltjes (1% qua massa, vooral silicaten en koolstofachtige verbindingen) van ongeveer een tienduizendste millimeter grootte, ruim duizend keer kleiner dan een zandkorreltje op het strand. De wolken van gas en

²De massa van de zon is 1.99×10^{33} g

³Deze paragraaf is voornamelijk gebaseerd op de lezing van Prof.dr. E. F. van Dishoeck tijdens de 434^e dies natalis van de Universiteit Leiden, 2009.



Figuur 8.2: Artistieke interpretatie van de schijf rond Fomalhaut met de planeet Fomalhaut b. Bron: D. A. Hardy, ROE, ATC, NSF, NASA.

stof tussen de sterren kunnen zichzelf maar zo'n 10 miljoen jaar in fragiel evenwicht houden, en stortten op een gegeven moment onder hun eigen gewicht ineens. Hierbij ontstaat een protoster in het centrum van de wolk. In de eerste honderdduizendjaar blijft nog materiaal uit de wolk op de jonge ster regenen, waardoor deze blijft groeien. Op een gegeven moment stopt de inval omdat de wolk door de wind van de jonge ster uiteen is gedreven.

Omdat de wolk altijd wel een klein beetje hoekmoment ('draaiing') heeft, kan het materiaal niet van alle kanten recht op de ster blijven vallen, maar komt het merendeel in een roterende platte schijf rond de ster terecht. Het bestaan van zulke circumstellaire schijven was al bedacht door o.a. Emmanuel Kant in 1755 omdat alle planeten in ons zonnestelsel in één vlak liggen en dezelfde kant opdraaien. Heel lang kwam men niet verder dan dit beeld van onze Oernevel. Pas zo'n 40 jaar geleden zijn meer gedetailleerde theorieën over planeetvorming ontwikkeld. In het meest gangbare scenario klitten de stofdeeltjes in de schijf aaneen tot steeds grotere rotsblokken, die uiteindelijk planeten worden. Hoe dit proces gebeurt is overigens nog een raadsel: twee bakstenen blijven niet zomaar aan elkaar plakken. De meest zware protoplaneten trekken het gas aan, en vormen gasrijke planeten als Jupiter.

De schijven rond jonge sterren waarin planeten worden gevormd zijn pas zo'n 15 jaar geleden voor het eerst in beeld gebracht, ongeveer op hetzelfde moment dat de eerste exoplaneten werden ontdekt. Het heeft zo lang geduurd omdat deze schijven veel kleiner en zwakker zijn dan de wolken waaruit de sterren gevormd worden, en door het sterlicht makkelijk overstraald worden. Inmiddels is het detecteren van schijven een routineklus geworden en weten we dat vrijwel alle sterren in onze Melkweg met zo'n schijf geboren worden. Meestal bevatten ze voldoende materiaal om een zon-

nestelsel te vormen, waarvoor ongeveer 10 keer de massa van Jupiter nodig is. Voor planeetvorming, is het ook belangrijk te weten hoe de massa in de schijf gedistribueerd is, en wat de structuur van de schijf is. Het in kaart brengen van de structuur van de schijven is echter veel moeilijker. In dit proefschrift presenteer ik verschillende manieren om dit te doen met de beste telescopen dat ons nu ter beschikking staan. De nieuwe generatie telescopen, die ik later zal beschrijven, zal onze kennis van de schijfstructuur veel verbeteren.

DIT PROEFSCHRIFT

Dit proefschrift gaat over protoplanetaire schijven die rond jonge sterren van lage massa gevonden worden.

In hoofdstuk 2 analyseren wij waarnemingen van de schijf rond de ster HD169142, die zijn gedaan met een submillimeter interferometer. De hoge ruimtelijke resolutie van deze data en de drie verschillende isotopen van CO die zijn waargenomen, zijn een krachtig middel om de drie-dimensionale structuur van de schijf te onderzoeken. Met deze methode testen wij de structuur van het schijfmodel dat gebaseerd is op straling van het stof alleen (zonder het gas). We vinden een goede overeenkomst tussen de gas- en stofstructuur van de schijf. De schijf is klein; alle massa bevindt zich vlakbij de ster en wordt daardoor verwarmd door de straling van de ster. Omdat de temperatuur hoog genoeg is, bevinden zich de meeste CO moleculen in de gasfase⁴, en daarom zijn CO waarnemingen een goede maat voor de totale massa van het moleculaire gas (99% van de totale massa van de schijf). Nooit eerder was de gasmassa van een schijf zo precies bepaald. Geïnspireerd door de mogelijkheid om de gasmassa te meten, bestuderen we meer schijven rond jonge sterren van middelgrote massa zoals HD169142, in hoofdstuk 5.

In hoofdstuk 3 wordt de schijf rond de jonge, lage-massa ster IM Lup geanalyseerd middels vergelijkbare submillimeter waarnemingen als beschreven in hoofdstuk 2. In deze schijf bevinden veel CO moleculen zich voornamelijk op het oppervlak van de stofdeeltjes, zodat wij de gasmassa in deze schijf niet kunnen bepalen. Onze waarnemingen van het CO gas laten zien dat de schijfstructuur erg bijzonder is. Het is een van de grootste schijven die ooit in beeld zijn gebracht (1800 AE in diameter) en vertoont een groot verschil in dichtheid tussen de buitenste en de binnenste helft. De schijfstructuur verandert dus drastisch op een afstand van 400 AE van de ster, waarna het verder een heel lage dichtheid heeft. De ontdekking van deze unieke structuur geeft belangrijk inzicht in het vormingsproces van schijven. Zo'n dergelijke structuur zou nooit met waarnemingen van alleen stofstraling ontdekt kunnen zijn.

DoAr 21 is een erg jonge ster met een middelgrote massa, en is omringd door gas en stof die de resten zouden kunnen zijn van een geëvolueerde schijf. Het is te zwak voor submillimeter waarnemingen, zoals gedaan in de andere hoofdstukken van dit proefschrift. Wij gebruiken daarom een nieuwe waarnemingstechniek om moleculair

⁴In koude gebieden daarentegen vindt adsorptie van CO op het stof plaats en 'verdwijnt' de submillimeter emissielijn



Figuur 8.3: Een van de ALMA prototype antennes op locatie van de Antenna Testing Facility in Socorro, New Mexico. Opname genomen in juli 2004. Bron: European Southern Observatory.

waterstof (H_2) te kunnen detecteren. Waterstof heeft echter geen overgangen op sub-millimeter golflengtes, zoals CO. Onze waarnemingen zijn daarom gedaan op meer energetische golflengtes, het infrarood. Voor het eerst is een schijf met waterstof-waarnemingen in kaart gebracht. Omdat de waarnemingen een erg asymmetrische structuur laten zien (emissie van alleen één kant van de schijf), vermoeden wij dat hier wellicht sprake is van een tweede object (een bruine dwerg met een eigen schijf), die langzaam wordt vernietigd door de zwaartekracht van DoAr 21. Schijf of geen schijf, uit onze waarnemingen blijkt dat het mogelijk is om de structuur van sommige schijven van lage massa te bepalen middels waterstofovergangen in het infrarood, iets dat niet mogelijk is in het submillimeter.

In hoofdstuk 5 bestuderen we schijven rond sterren van middelgrote massa, zoals gedaan hoofdstuk 1. Deze keer maken wij geen afbeeldingen van schijven, maar meten wij hun spectrum: de totale emissie in een klein gebied van sub-millimeter golflengtes waarop CO straalt. Ondanks dat het spectrum geen ruimtelijke dimensie heeft, kun-

nen we toch informatie over de ruimtelijke structuur verkrijgen door gebruik te maken van de rotatie van de schijf: aan de ene kant verwijderd het gas zich van ons (en domineren rode golflengtes van het spectrum door roodverschuiving) en aan de andere kant komt het gas naar ons toe (en domineren blauwe golflengtes). Met een eenvoudig model voor schijven bepalen wij hun grootte en orientatie en concluderen dat de meeste schijven (75%) klein en warm zijn, zoals HD169142 (hoofdstuk 2). Met deze informatie en vervolgwaaarnemingen kunnen wij ook de schijfmassa bepalen.

In hoofdstuk 6 bestuderen wij schijven rond sterren met massa's zo laag als onze zon, en maken we een vergelijking tussen de stof- en de gasemissie in het submillimeter. Onze waarnemingen zijn niet nauwkeurig genoeg om de schijfstructuur in detail te kunnen analyseren, maar we kunnen wel de schijfemissie onderscheiden van de emissie van de gaswolk rondom de schijf, wat vaak een probleem is bij spectrale waarnemingen met een lage ruimtelijke resolutie. Met behulp van onze modellen van deze schijven concluderen wij dat deze objecten een vergelijkbare stofemissie en stofmassa hebben, maar dat de CO emissie soms heel zwak en soms juist heel sterk is. Hieruit concluderen wij dat de totale massa afgeleid uit stofemissie alléén niet voldoende is om te weten hoeveel (CO) gas er zich in de schijf bevindt, en dat waarnemingen van CO en/of andere moleculen nodig zijn.

In het laatste hoofdstuk gebruiken wij een nieuw instrument op het zuidelijke halfrond: de submillimeter emissielijn 'camera' CHAMP⁺ op de APEX (Atacama Pathfinder EXperiment). Deze telescoop in Chili is een eerste test voor toekomstige ALMA waarnemingen (zie sectie: Toekomst met ALMA). De schijven aan de zuidelijke hemel waren tot nu toe nog niet veel bestudeerd, omdat de meeste submillimeter telescopen zich in het noordelijke halfrond bevinden. Wij kijken naar een van de helderste schijven, HD100546, en detecteren CO spectra op meerdere golflengtes in het submillimeter. Zoals genoemd in de beschrijving van hoofdstuk 5 geven deze spectra informatie over de twee kanten van de schijf. Om de asymmetrie in de gedetecteerde lijn te verklaren, denken wij dat één kant van de schijf kouder is dan de andere kant. Dit kan duiden op een asymmetrische belichting door de ster: de kant van de schijf die minder sterlicht krijgt, wordt minder warm. Toekomstige waarnemingen met ALMA zijn vereist om dit fenomeen in HD100546 verder te onderzoeken.

TOEKOMST MET ALMA

Over een paar jaren bevinden we ons in de toekomst: de langverwachte interferometer Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) zal het onderzoek in het veld van ster- en planeetvorming in sneller vaarwater brengen. Wij hebben al veel ontdekt over schijven met bestaande telescopen. In dit proefschrift maken wij gebruik van nu bestaande submillimetrische interferometers - een soort mini-ALMA's met 8 tot 15 individuele antennes. ALMA zal 66 grote antennes hebben (een van die antennes is te zien in Fig. 8.3) en wordt gebouwd op een van de hoogste en droogste plekken ter aarde, precies wat dit soort instrumenten nodig heeft om de beperkende effecten van de atmosfeer op de straling zo veel mogelijk te verwijderen.

Het onderzoek aan protoplanetaire schijven is een van de velden waar onze kennis

het meest zal groeien met ALMA. Wij zullen de schijfstructuur van moleculair gas en stof in zoveel detail zien, dat het mogelijk zal zijn de effecten van planeten op de structuur, zoals gaten, direct in beeld te brengen. De grote gevoeligheid van ALMA zal het ons ook mogelijk maken de oudere schijven met weinig gas, zogenaamde 'transitionele schijven', te detecteren om zo een link te kunnen leggen tussen gas-rijke jonge schijven zoals bestudeerd in dit proefschrift, en de laatste fase van schijfevolutie: schijven zonder gas, bestaande uit grote stof-brokken, stenen en soms planetenstelsels. Een mogelijk exemplaar van een transitioneel schijf is wellicht het materiaal rond DoAr 21 dat, met andere technieken, wordt bestudeerd in hoofdstuk 4 van dit proefschrift. Met zijn grote gevoeligheid zal ALMA geschikt zijn veel nieuwe moleculen te detecteren en ons meer te leren over de chemische samenstelling van de schijven. Sommige moleculen zoals CN zijn erg afhankelijk van de straling van de ster en de effecten die straling heeft op het gas in de schijf. De hoeveelheid van deze moleculen is een belangrijke indicator voor het deel van de straling die op het schijfoppervlak valt en voor de natuurkunde die zich in de schijf afspeelt.

