



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Mind the gap : gas and dust in planet-forming disks

Marel, N.

Citation

Marel, N. (2015, September 29). *Mind the gap : gas and dust in planet-forming disks*. PhD Thesis. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/35579>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/35579>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/35579> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Marel, Nienke van der

Title: Mind the gap : gas and dust in planet-forming disks

Issue Date: 2015-09-29

Nederlandse samenvatting

Gas en stof in planeet-vormende schijven

"We leven in een heelal waarvan we de leeftijd amper kunnen berekenen, omringd door sterren waarvan we de afstanden niet weten, gevuld met materie die we niet kunnen identificeren, dat fysische wetten volgt die we niet werkelijk begrijpen." - Bill Bryson: 'Een kleine geschiedenis van bijna alles'

Sinds het begin van de mensheid hebben we omhoog gekeken naar de hemel en zich afgevraagd waar we vandaan komen. Zowel religie als filosofie hebben een belangrijke rol gespeeld om de zaken te verklaren die we niet konden begrijpen. De studie van de bewegingen en verschijnselen aan de hemel vanuit het menselijk perspectief geeft slechts een beperkt beeld van wat er in het heelal gebeurt. Het is dus al helemaal niet voor te stellen dat er een connectie bestaat tussen de aarde waarop wij leven, de zon die elke dag op- en ondergaat en de twinkellende puntjes aan de nachthemel. De rode draad in de historie van de sterrenkunde is de vraag wat de plaats van mensheid (en hun thuisplaneet) in het heelal nu eigenlijk is: van Aristarchos die voor het eerst suggereerde dat de aarde in plaats van de zon het middelpunt van het heelal was, Galileo's ontdekking van manen rond Jupiter, William Herschel die de zon definieerde als een gewone ster ergens in de buitenwijken van de Melkweg, tot exoplaneten die niet bepaald de 'perfecte' configuratie van ons zonnestelsel volgen. Met de jaren werden ideologieën en filosofische theorieën overgenomen door wetenschap en empirisch onderzoek. Ook nu nog worden nieuwe ontdekkingen continu ingehaald door de kennis van dat moment, waarbij nieuwe problemen en uitdagingen voor wetenschappers worden gecreëerd en nieuwe ideeën onderzocht.

Een van de meest noemenswaardige revoluties in de sterrenkunde was het idee dat sterren en planeten niet voor altijd bestaan, maar dat ze geboren worden, leven en sterven. Een van de aanleidingen voor dit idee was de ontdekking van kernfusie als belangrijkste energiebron voor sterren in het begin van de 20^e eeuw, waarmee direct duidelijk werd dat er een begin en einde van het fusieproces moet zijn, simpelweg door de beschikbaarheid van brandstof. De hypothese van de Zonnenevel, die stelt dat sterren en planeten op een zeker moment worden gevormd, was overigens al in de 18^e eeuw ontwikkeld, onder andere door Emanuel Swedenborg en Immanuel Kant. Het is verrassend dat het idee van een oneindig, niet-veranderlijk heelal zo lang als de standaard werd gezien, terwijl we in het dagelijks leven continu omringd zijn door bewijzen van leven en dood. Dit komt opnieuw door de beperkingen van het menselijk perspectief: de ruimte- en tijdschalen waarin gebeurtenissen plaatsvinden in het heelal, gaan ver voorbij ons voorstellingsvermogen. Zelfs als we hier getallen en eenheden aan vastplakken is het lastig om een gevoel te krijgen voor hoe het er werkelijk aan toe gaat. Daarom werd sterrenkunde voor lange tijd gedreven door de ontwikkeling van de natuurkunde.

Met de technologische ontwikkelingen en exponentiële toename van nieuwe telescopen en instrumenten in de tweede helft van de 20^e eeuw werden waarnemingen niet meer alleen een bevestiging van bestaande theorieën, maar een drijfveer voor het ontwikkelen van nieuwe theorieën. De komst van elke nieuwe telescoop onthulde nieuwe objecten, nieuwe structuren, nieuwe vooruitzichten voor ons begrip van het heelal. Ons inzicht in de vorming van sterren, schijven en planeten is enorm toegenomen met telescopen zoals *IRAS*, *Spitzer*, *Herschel* in het infrarood, en JCMT, IRAM, APEX en SMA op (sub)millimeter golflengtes, waar deze

objecten het meeste licht uitzenden.

In dit proefschrift zijn we met name geïnteresseerd in de protoplanetaire schijven van gas en stof rond jonge sterren, aangezien hierin de planeten worden gevormd. De focus ligt op zogenaamde transitieschijven: schijven met een gat in het binnenste deel van de stofschijs (zie Figuur 10.2). De belangrijkste vraag waarop een antwoord wordt gezocht is: wat is de rol van transitieschijven in het proces van planeetvorming en wat vertellen ze ons over jonge planeten?

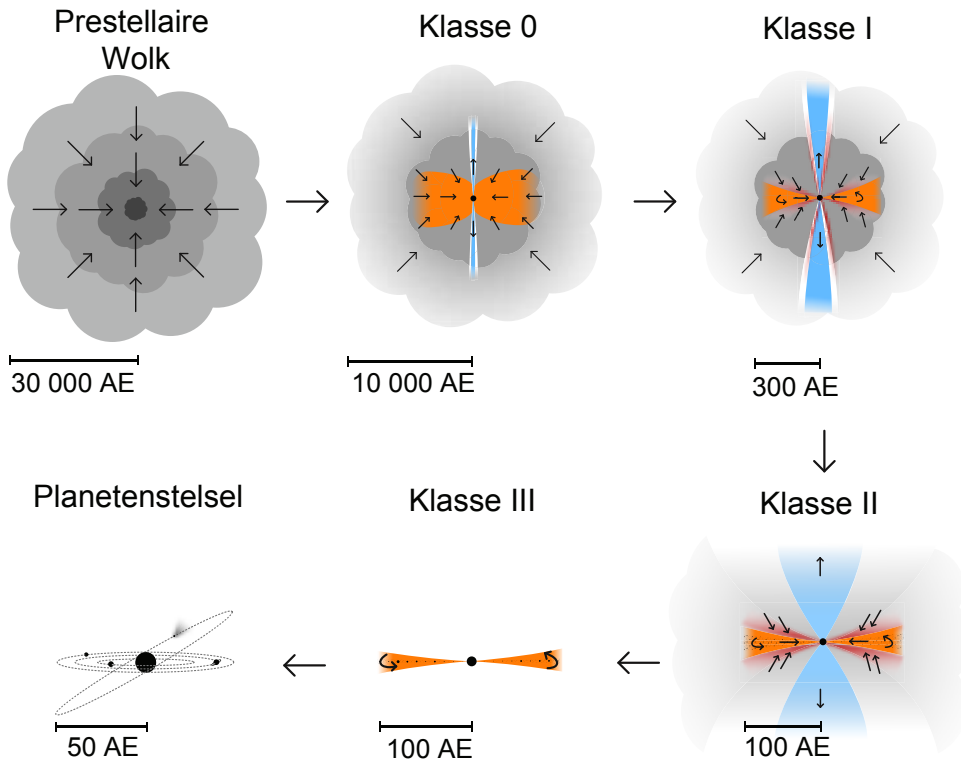
ALMA, de Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, speelt een cruciale rol in het beantwoorden van deze vraag. ALMA komt voort uit een wereldwijd samenwerkingsproject en bestaat uit een groep van 66 telescopen werkzaam op (sub)millimeter golflengtes. De signalen van de gehele groep worden met elkaar worden verbonden in een zogenaamde synthese telescoop. Het is gebouwd op het Chajnantorplateau op 5000 meter hoogte in de Atacamawoestijn in Chili. Zowel de gevoeligheid als de spatiële resolutie zijn tot twee ordes van grootte beter dan vorige millimeter arrays. Nederland is een belangrijke partner in het ALMA-project: de ALMA Band 9 ontvangers, die op hoge frequentie opereren, zijn ontworpen en gebouwd door NOVA (Nederlandse Onderzoekschool Voor Astronomie) in samenwerking met SRON (Stichting Ruimte Onderzoek Nederland). ALMA begon haar waarnemingen in 2011 met een gedeelte van de array, en heeft in de jaren erna haar capaciteiten verder uitvergroott. ALMA geeft ons een kijkje in de kraamkamers van de planeten met scherpere details dan ooit tevoren, en stelt ons in staat om meer vragen te beantwoorden over onze oorsprong dan we ons ooit hadden kunnen voorstellen.

Sterren en schijven

Voor we ingaan op de vraagstukken van dit proefschrift volgt eerst een korte beschrijving van wat bekend is over de vorming van sterren en planeten. Planeten worden gevormd in protoplanetaire schijven rond jonge sterren. Deze schijven zijn een natuurlijk gevolg van stervorming zelf. Een ster wordt gevormd door de gravitationele instorting van een wolk van gas en stof. Er is een kleine rotatie in de wolk, en door het behoud van hoekimpuls vormt zich dan een afgeplatte, roterende structuur ('schijf') rond de ster, net als bij het ronddraaien van een deegbal voor een pizza. De wolk verdwijnt binnen een miljoen jaar en de schijf ontwikkelt zich over een tijdsduur van enkele miljoenen jaren tot een planetenstelsel rond de ster. Dit proces wordt geïllustreerd in Figuur 10.1.

Een van de grote raadsels is hoe planeten gevormd worden in de schijf. Er worden steeds meer nieuwe exoplaneten (planeten rond andere sterren) ontdekt, met name door de *Kepler* satelliet, en de teller staat nu op zo'n 2000 planeten. Dit betekent dat planeten zeker geen zeldzaamheid zijn en dus relatief eenvoudig moeten vormen. Toch hebben de huidige theorieën van planeetvorming moeite om waarnemingen te verklaren: door een lokale *gravitationele instabiliteit* in de schijf kunnen Jupiter-achtige planeten weliswaar snel worden gevormd, maar de gemeten massa's van schijven zijn niet hoog genoeg om dit proces te laten plaatsvinden. Volgens een andere theorie, waar *stofdeeltjes samenklonteren* en vervolgens groeien tot gasplaneten via *kern-accretie*, heeft planeetvorming een veel langere tijdsduur nodig dan realistisch is voor de levensduur van een schijf.

Het planeetvormingsproces is te traag om direct te volgen en objecten met groottes tussen ~10 cm en 10000 km kunnen niet direct worden waargenomen. Daarom bestuderen we in plaats daarvan de structuur van het gas en stof in de schijven waarin deze planeten gevormd worden om de relevante fysische processen beter te begrijpen. Stof kan worden waargenomen als continuüm straling: thermische straling als gevolg van de opwarming van het stof door



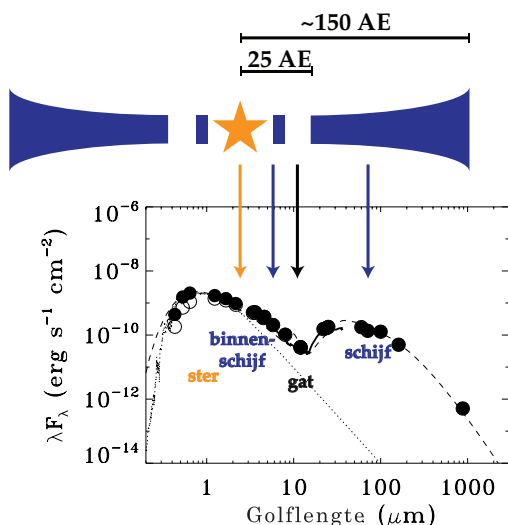
Figuur 10.1: Het evolutieproces van ster- en planeetvorming. Een wolk van gas en stof stort in onder haar eigen zwaartekracht tot een jonge ster, waarbij ook een roterende schijf rond de ster wordt gevormd. Na het verdwijnen van de wolk evolueert de schijf tot een planetenstelsel. *Figuur door Magnus Persson.*

de centrale ster, waarbij het stof dichtbij de ster heter is en dus op kortere golflengtes straalt dan het stof verder naar buiten. Gas kan worden waargenomen door middel van moleculaire lijnen, waarvoor een veel hogere gevoeligheid nodig is. Hierin ligt de kracht van ALMA: niet alleen kan ALMA in detail inzoomen op deze schijven, maar ook zowel gas als stof detecteren. De focus ligt op het materiaal dichtbij de ster, in het ‘stofgat’ van de transitie-schijven. Een mogelijke verklaring voor de aanwezigheid voor dit gat is dat een planeet zich heeft gevormd in het binnenste deel van de schijf en daarbij zijn baan heeft schoongeveegd. Om dit scenario te bevestigen moet de structuur van zowel het gas als het stof bestudeerd worden.

Dit proefschrift

In dit proefschrift bestuderen we een aantal transitie-schijven met ALMA waarnemingen in gas en stof met hoge spatiële resolutie (~ 0.25 boogseconden of 30 AE^4 , een fractie van de totale

⁴AE = astronomische eenheid, afstand zon-aarde of 150 miljoen kilometer

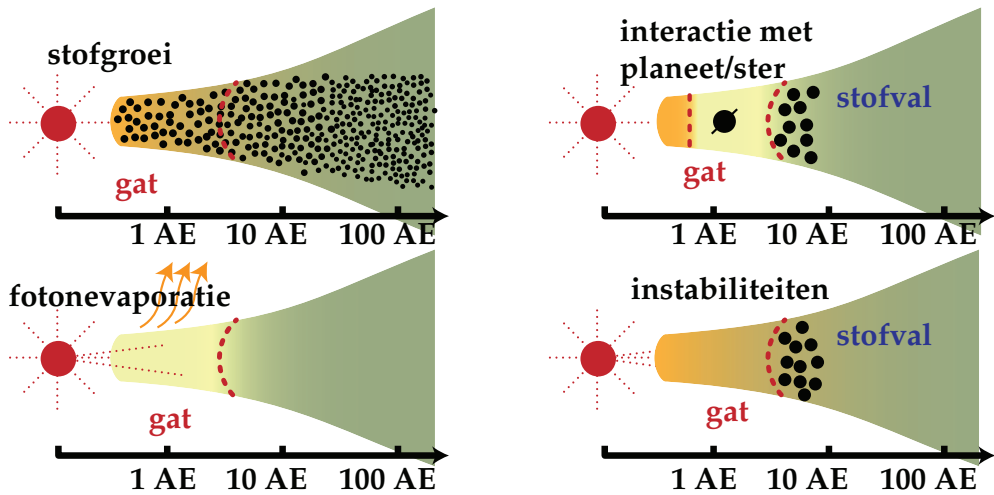


Figuur 10.2: Een schematische weergave van een transitieschijf met de verschillende onderdelen en de golflengtes waar deze licht uitstralen in een Spectraal Energie Diagram (SED). De ster straalt in het optisch en nabij-infrarood, een binnenschijf kan worden herkend als nabij-infrarode emissie bovenop de steremissie, het stofgat als een gebrek aan middel-infrarood emissie en het stof in het buitenste deel van de schijf straalt in het ver-infrarood tot millimeter golflengtes.

grootte van de schijf). De waarnemingen zijn genomen gedurende ALMA Early Science, de eerste jaren dat ALMA in operatie was, met een beperkt aantal basislijnen van minder dan 1 km (hoe langer de basislijnen, hoe scherper de details van de waarnemingen). De waarnemingen bestaan uit submillimeter continuüm emissie van het stof en CO rotationele lijnen. De CO-emissie kon worden geïnterpreteerd als een maat van de gasdichtheid met behulp van de recent geschreven code DALI (Bruderer 2013). Met de waarnemingen van het gas binnen het gat kunnen de verschillende scenario's voor de oorsprong van het gat worden onderscheiden (Figuur 10.3).

De inhoud van de hoofdstukken kan als volgt worden samengevat.

- In Hoofdstuk 2 wordt de ontdekking van een azimuthaal asymmetrische stofval in de Oph IRS 48 schijf gepresenteerd. Het millimeterstof is geconcentreerd aan één kant van de schijf, terwijl de kleinere micrometer stofdeeltjes en het gas een ringstructuur vormen. Een stofval werd al decennia voorspeld door theoretici als een mogelijke oplossing voor het trage stofgroei probleem in schijven, maar was nog niet eerder waargenomen. De azimuthale structuur wordt gemodelleerd als stof gevangen in een vortex, die is gevormd door een Rossby instabiliteit aan de rand van een gat dat is ontstaan door een jonge planeet.
- In Hoofdstuk 3 en 4 wordt het stofvalscenario verder bestudeerd en bevestigd aan de hand van centimeter-waarnemingen in Oph IRS 48 en de combinatie van millimeter-waarnemingen van twee andere transitieschijven.
- In Hoofdstuk 5 tot en met 7 worden CO-waarnemingen van verscheidene transitieschijven gepresenteerd. Alle schijven laten zien dat er gas in het stofgat aanwezig is, waarbij de structuur suggereert dat reuzenplaneten verantwoordelijk zijn voor het gat.



Figuur 10.3: Mechanismes voor het schoonvegen van het gat in een stofschiif. Het gas is weergegeven in geel, het stof met zwarte cirkels. **Linksboven:** toename stofgroei in het gat, waarbij de gasdichtheid hetzelfde blijft als in de oorspronkelijke schiif. **Linksonder:** fotonevaporatief schoonvegen, waarbij zowel het gas als stof tegelijkertijd van binnen naar buiten worden weggeblazen. **Rechtsboven:** schoonvegen door een tweede object (ster of planeet), waarbij de gasdichtheid binnen het gat lager wordt en de grote stofdeeltjes gevangen worden in een stofval aan de rand. **Rechtsonder:** instabiliteiten door bijvoorbeeld een viscositeit- of entropiegradiënt creëren een stofval, de gasdichtheid verandert niet ten opzichte van de oorspronkelijke schiif. Figuur gebaseerd op tekening door Simon Bruderer.

- Hoofdstuk 8 bespreekt de chemische complexiteit van de Oph IRS 48 schiif aan de hand van een detectie van warm formaldehyde en limieten van verschillende andere moleculen.
- Ten slotte wordt in Hoofdstuk 9 een brede studie van bijna 200 transitie-schijven gepresenteerd aan de hand van *Spitzer*, *Herschel* en submillimeter-waarnemingen, waarmee SEDs (Spectrale Energie Diagram) zijn samengesteld en geanalyseerd. Met dit uniforme sample worden algemene trends en eigenschappen van transitie-schijven bepaald.

Toekomstperspectief

In de komende jaren zal ALMA waarnemingen gaan doen met basislijnen tot wel 16 km lengte. Dit betekent dat details in schijven tot op het niveau van enkele astronomische eenheden zichtbaar zullen worden. De verwachting is dat dit tot nog beter begrip zal leiden van de structuur van het gas en stof. Bovendien zullen transitie-schijven met kleinere gaten kunnen worden bestudeerd, die wellicht een andere oorsprong hebben dan planeten. Ook zal het mogelijk zijn om exoplaneten in wording direct waar te nemen als ze een circumplanetaire schiif om zich heen hebben. De hogere gevoeligheid van de volledige array van ALMA zal ons in staat stellen om meer complexe moleculen waar te nemen, die de bouwstenen vormen van leven hier en op andere planeten.

Ook andere (toekomstige) telescopen en instrumenten zullen naar verwachting belangrijke bijdragen leveren aan de studies van protoplanetaire schijven en de studie van de vorming van planeten: de EVLA geeft inzicht in de verdeling van grotere stofdeeltjes, VLT-SPHERE in die van de kleinere stofdeeltjes, wat cruciaal is voor het begrijpen van de rol van stofvallen in schijven. Infraroodwaarnemingen met onder andere de *James Webb Space Telescope*, de *European Extremely Large Telescope* en de *Thirty Meter Telescope* geven verder inzicht in het hete, binnenste deel van de schijven, waar men verwacht dat de meeste planeten zich vormen.