



Universiteit  
Leiden

The Netherlands

## The first steps of planet formation : studying grain growth with millimetre interferometers

Lommen, D.J.P.

### Citation

Lommen, D. J. P. (2009, April 23). *The first steps of planet formation : studying grain growth with millimetre interferometers*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/13752>

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/1887/13752>

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

# Nederlandse samenvatting

## Introductie: stervorming

De zon is slechts één onbeduidend exemplaar van de circa 200 miljard sterren die onze Melkweg rijk is en de Aarde is één van de acht planeten die hun baantjes rond de zon draaien. Er wordt al duizenden jaren gefilosofeerd over planetenstelsels bij andere sterren. Het heeft echter tot de jaren '90 van de afgelopen eeuw geduurd voordat er daadwerkelijk planeten bij andere sterren gevonden werden. Inmiddels zijn er al meer dan 300 zogenaamde exoplaneten gevonden. De centrale vraag van dit proefschrift is: hoe worden planeten gemaakt? We weten dat planeten een bijproduct zijn van sterren en als we planeetvorming willen begrijpen, zullen we ons ook bezig moeten houden met stervorming. Sterren worden gevormd uit grote interstellaire wolken van stof en gas. Deze kunnen zich onder invloed van de zwaartekracht gaan samentrekken. Binnen de wolk zullen verdichtingen ontstaan, die ieder ook zelf gaan samentrekken, waardoor dichte klompen van stof en gas zullen vormen. Elk van deze klompen kan uiteindelijk een ster of enkele sterren opleveren en op die manier kan één interstellaire wolk de kraamkamer vormen van honderden of duizenden sterren.

In elke wolk en ook in elke klomp is altijd wel wat draaiing oftewel impulsmoment aanwezig. Het is een fundamentele natuurwet dat het impulsmoment behouden moet blijven, net als bijvoorbeeld de totale massa. Als gevolg hiervan gaan klompen die instorten steeds harder draaien. Hetzelfde effect zie je bij een kunstschaatser die een pirouette draait en zijn armen intrekt: die gaat ook steeds sneller ronddraaien. Een ander effect van het behoud van impulsmoment is dat niet alle massa direct naar het centrum kan vallen, waardoor zich een schijf rond de jonge ster zal vormen. Een groot deel van de massa zal door de schijf naar het centrum bewegen en alsnog op de centrale ster terecht komen. Een paar procent van de oorspronkelijke massa blijft achter in de schijf en in die schijf kunnen zich uiteindelijk planeten vormen. Daarom worden deze schijven ook wel proto-planetaire schijven genoemd.

## Stofgroei en planeetvorming

Interstellaire wolken bestaan voor zo'n 99% qua massa uit gas en voor maar 1% uit stof, minieme korreltjes van kleiner dan een micrometer<sup>4</sup> groot. Planeten zoals de Aarde en Mars, met diameters van zo'n 10.000 km, zijn gevormd uit ontelbare deeltjes die oorspronkelijk zo klein waren. We denken dat gasreuzen zoals Jupiter ook een vaste kern hebben van misschien wel tien keer de massa van de Aarde. Hoe komen we van zo klein naar zo groot?

De eerste stap is vooral met computersimulaties bestudeerd en lijkt vrij gemakkelijk te gaan. Deeltjes van kleiner dan een micrometer plakken vrijwel altijd aan elkaar als ze botsen en groeien snel tot deeltjes van een micrometer of tien. De reden dat dit in de interstellaire wolken niet gebeurt, is dat daar de dichtheden veel lager zijn dan in een schijf rond een jonge ster: de deeltjes komen elkaar simpelweg nooit tegen. De volgende stap, van micrometers tot millimeters, centimeters en decimeters, wordt vooral in laboratoria onderzocht. Alhoewel hier groei niet meer vanzelfsprekend is — soms gaan stofdeeltjes kapot als ze botsen — lijkt het er toch wel op dat ook stofklonten van een centimeter of tien vrij gemakkelijk gemaakt kunnen worden.

Als deeltjes eenmaal groter zijn dan, pak en beet, een decimeter, kunnen ze niet langer in een laboratorium onderzocht worden en moeten we weer onze toevlucht nemen tot computersimulaties. Voor deze volgende stap is turbulentie in de schijf — en misschien op sommige plaatsen juist de afwezigheid ervan — van groot belang. Turbulentie zorgt voor dichtheids- en snelheidsverschillen in de schijf en beide zorgen ervoor dat stenen en rotsen weer vaker botsen en samenklonteren. Op deze manier kunnen kilometersgrote embryo's van planeten vormen, waarna de zwaartekracht het overneemt en deze zogenaamde planetesimalen laat doorgroeien brokken zo groot als de maan of zelfs zwaarder dan enkele keren de massa van de aarde.

Er is nog een tweede manier waarop planeten zich kunnen vormen in proto-planetaire schijven. Die manier lijkt veel op de wijze waarop sterren ontstaan uit interstellaire wolken. Het idee is dat lokaal in de schijf weer dichtheidsverschillen ontstaan die op een bepaald moment zo groot worden dat de zwaartekracht het overneemt. Op deze manier kan zich al in een vrij vroeg stadium een planeet beginnen te vormen.

Het lijkt er dus eigenlijk wel op dat we planeetvorming vrij goed begrepen hebben. Alle theoretische modellen moeten echter altijd getoetst worden aan de hand van waarnemingen. Het blijkt dan toch vaak dat de theorie die we gebruiken

---

<sup>4</sup>Een micrometer = 1  $\mu\text{m}$  = 0,001 mm.

niet helemaal juist of misschien te simpel is. Zo geven sommige modellen aan dat rotsen van een meter groot in de ster vallen voordat ze groter groeien. Andere modellen voorspellen dat gasrijke planeten veel langer nodig hebben om te vormen dan de tien miljoen jaar die we volgens de waarnemingen beschikbaar hebben. Dit proefschrift houdt zich bezig met de waarnemingen van jonge sterren die nodig zijn om de theorieën en modellen te testen.

## Het waarnemen van jonge sterren

Jonge sterren worden veel bestudeerd met infrarood-telescopen. Een van de redenen dat infrarood en bijvoorbeeld niet zichtbaar licht gebruikt wordt, is dat jonge ster-systemen het helderst zijn bij infrarood-golflengten. Sterker nog, in de fase dat de vormende ster en schijf nog verborgen zijn in een omhulsel, kunnen we het niet eens waarnemen in zichtbaar licht. We gebruiken daarom infrarood-telescopen om het systeem waar te nemen. Het spectrum<sup>5</sup> wordt volledig overheerst door het omhulsel en het systeem wordt wel een klasse I-systeem genoemd, zie bovenaan in Fig. 5.9 op de volgende pagina. Als het omhulsel opgelost en de centrale ster zichtbaar is, spreken we van een klasse II-systeem, in het midden van Fig. 5.9. De laatste fase voordat de jonge ster de volwassenheid bereikt, is de klasse III-fase. Het gas is dan uit de schijf verdwenen, het spectrum wordt gedomineerd door de ster en er is nog slechts een kleine hoeveelheid extra straling in het infrarood afkomstig van de schijf, zoals weergegeven in het onderste deel van Fig. 5.9.

De zogenaamde Lada-classificatie van jonge sterren is niet perfect. Zo komt het geregeld voor dat een systeem waarvan het omhulsel al is opgelost nog wordt geclassificeerd als klasse I. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat we van de zijkant naar het systeem kijken en de centrale ster waarnemen door de dichte schijf heen. Afgezien hiervan heeft sowieso elke waarneemtechniek haar voor- en nadelen en een nadeel van infrarood-waarnemingen is dat we er niet alle massa in de schijf mee kunnen zien; in feite zien we alleen het toplaagje ervan. Als we alle massa in de schijf willen waarnemen moeten we naar nog langere golflengten, oftewel het radio-regime. De golflengte van radiogolven varieert van enkele honderden micrometers tot meerdere kilometers. Wij hebben waarnemingen gedaan

---

<sup>5</sup>Een spectrum laat zien hoeveel licht er van elke golflengte binnenkomt. Het zichtbare spectrum loopt van rood via oranje, geel, groen, blauw en indigo naar violet, de zeven kleuren van de regenboog. Het spectrum loopt daarbuiten nog door naar langere golflengten (infrarood en radiogolven) en aan de andere kant naar kortere golflengten (ultraviolet, röntgenstraling en gammastraling). De zon geeft op alle golflengten licht, maar het meeste in geel en daarom lijkt zij geel.

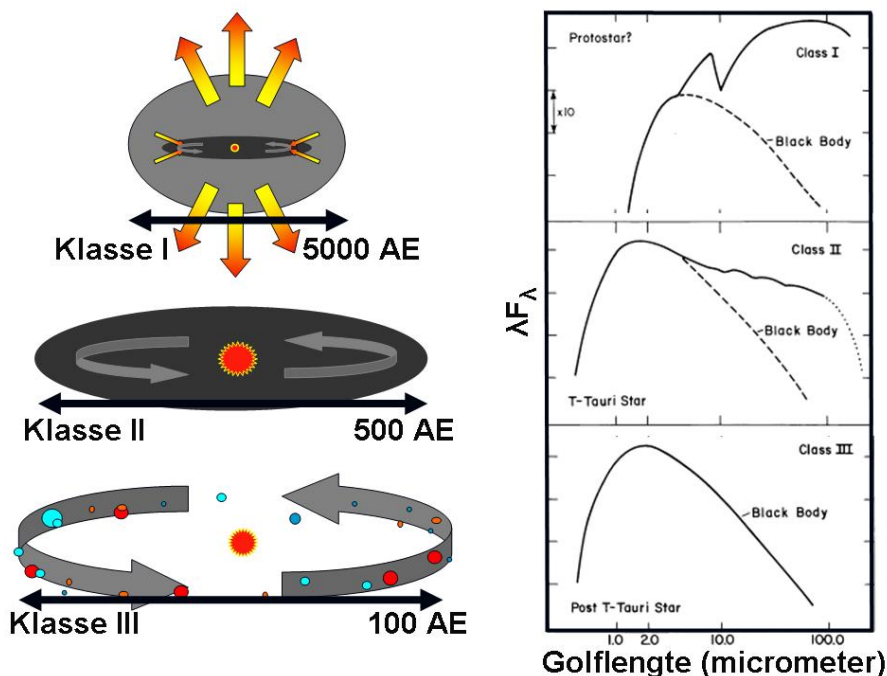


Figure 5.9: Van boven naar beneden zijn hier weergegeven de drie verschillende fasen in het leven van een jonge ster volgens de Lada-classificatie. Links staan schematische tekeningen van de verschillende klassen met een indicatie voor de grootte van het systeem in AE<sup>6</sup>. Rechts staan de bijbehorende infrarood-spectra. *Klasse I*: de vormende ster en protoplanetaire schijf zijn nog omgeven door een omhulsel en het spectrum wordt volledig gedomineerd door dit omhulsel. *Klasse II*: het omhulsel is verdwenen en de centrale protoster is inmiddels zichtbaar. Het infrarood-spectrum wordt echter nog gedomineerd door de schijf van stof en gas die zich rond de jonge ster bevindt. *Klasse III*: het gas is nu uit de schijf verdwenen. Het spectrum wordt gedomineerd door de centrale ster met op de langere golflengten nog wat extra straling afkomstig van de stoffige schijf.

bij golflengtes van ongeveer 1 millimeter tot 6 centimeter.

Voor het werk in dit proefschrift zijn waarnemingen gebruikt van verschillende radio-telescopen, zoals de Submillimeter Array op Hawaii en de Australia

<sup>6</sup>AE staat voor Astronomische Eenheid, de afstand tussen de Aarde en de zon. Deze is 149,6 miljoen km.

Telescope Compact Array in New South Wales. Dit zijn zogenaamde interferometers. Bij een interferometer wordt een aantal telescopen aan elkaar gekoppeld om één grotere telescoop te simuleren, zodat een heel scherp beeld gevormd kan worden. Een extra voordeel van deze radio-interferometers is dat ze omliggende materie kunnen wegfilteren. Ze zijn vooral gevoelig voor structuren op een relatief kleine schaal en dit geeft ons de gelegenheid om in te zoomen op de planeetvormende schijf.

## **Dit proefschrift**

Zoals gezegd is het centrale onderwerp van dit proefschrift de vorming van planeten in schijven rond jonge sterren. Meer specifiek kijken we naar de eerste stappen van planeetvorming, waarbij stof moet groeien van kleiner dan een micrometer tot millimeters en centimeters. De belangrijkste techniek die daarbij gebruikt wordt, is de radio-interferometrie.

In Hoofdstuk 2 presenteren we waarnemingen van twee klasse I-objecten, gedaan met de Submillimeter Array. De jonge systemen IRS 63 en Elias 29 bevinden zich in het sterrenbeeld Slangendrager, op zo'n 400 lichtjaar van de Aarde<sup>7</sup>. Door onze nieuwe waarnemingen te combineren met waarnemingen van een klassieke schotel-antenne, kunnen we de straling van de schijf en die van het omhulsel van elkaar scheiden en de massa van de verschillende componenten bepalen. Het blijkt dat bij IRS 63 de schijf ongeveer vijf keer zo zwaar is als het omhulsel, terwijl bij Elias 29 juist het omhulsel zo'n zes keer zo zwaar is als de schijf. Elias 29 is dus nog grotendeels verborgen in het omhulsel en IRS 63 is al bijna bij de klasse II-fase aangeland. Door te kijken naar de beweging van het gas in de schijf, kunnen we ook de massa van de centrale ster bepalen. Die bleek ongeveer 0,4 maal die van de zon te zijn voor IRS 63 en zo'n 2,5 maal de massa van de zon voor Elias 29. Hieruit maken we op dat, alhoewel de systemen nog vrij jong zijn, de centrale ster bijna zijn uiteindelijke massa heeft bereikt.

In 2005 hebben we vijftien jonge sterren, verdeeld over de sterrenbeelden Kameleon en Wolf, waargenomen met de Australia Telescope Compact Array. De vijf sterren in het sterrenbeeld Wolf hebben we bovendien nog waargenomen met de Submillimeter Array. Deze waarnemingen worden gepresenteerd in Hoofdstuk 3. We combineren deze waarnemingen met gegevens uit de literatuur om het spectrum van de systemen bij lange golflengten te bepalen. We vinden hieruit

---

<sup>7</sup>Een lichtjaar is de afstand die licht in een jaar aflegt. Licht reist met zo'n 300.000 km/s, dus 1 lichtjaar komt overeen met ongeveer 9.500.000.000.000 kilometer, ruim 60.000 keer de afstand tussen de Aarde en de zon.

dat zich in een groot deel van de schijven een flinke hoeveelheid stof moet bevinden dat al gegroeid is tot zeker enkele millimeters. Voor ongeveer de helft van de bronnen die we met deze radio-telescopen hebben waargenomen bezitten we ook infrarood-waarnemingen, waarmee we het warme toplaagje van het binnenste deel van de schijf kunnen bestuderen. Er lijkt een verband te zijn tussen de verschillende waarnemingen en dus ook tussen de twee verschillende gebieden in de schijven die we bestudeerd hebben. Dit kan erop wijzen dat stofgroei in protoplanetaire schijven snel moet plaatsvinden.

Om het verband dat we in Hoofdstuk 3 hebben gevonden te controleren, hebben we een grotere groep klasse II-sterren waargenomen met vier verschillende radio-interferometers en met de Spitzer Space Telescope. Deze waarnemingen hebben we bovendien nog samengevoegd met gegevens uit de literatuur om dezelfde informatie voor zo veel mogelijk bronnen te krijgen. Op deze manier hebben we het verband tussen de infrarood- en de millimeterwaarnemingen kunnen bevestigen, zoals uiteengezet in Hoofdstuk 4. Om dit verband te kunnen verklaren, hebben we diverse computer-simulaties uitgevoerd. De waarnemingen lijken erop te wijzen dat er erg veel turbulentie in de schijf aanwezig is, meer dan oorspronkelijk gedacht werd. Stofgroei vindt namelijk vooral in het koude binnenste van de schijf plaats, want daar zijn de dichtheden het grootst. We zien de grotere deeltjes echter vrijwel direct aan het oppervlak van de koude binnenschijf. Uit onze waarnemingen en modelleerwerk maken we verder nog op dat de evolutie zich in het ene stervormingsgebied sneller lijkt te voltrekken dan in het andere.

In het vijfde en laatste hoofdstuk presenteren we waarnemingen van de Australia Telescope Compact Array op golflengten van 7 mm en langer voor drie jonge systemen. Voor de systemen WW Cha en RU Lup hadden we vanuit ons werk in Hoofdstuk 3 al duidelijke aanwijzingen dat er stof van een millimeter of groter aanwezig moet zijn. CS Cha is een dubbelster-systeem met daaromheen een schijf van stof en gas. Voor alledrie de systemen zien we ook op 7 mm nog straling afkomstig van stofdeeltjes, wat betekent dat het stof al gegroeid moet zijn tot meerdere centimeters. We zien hier dus eigenlijk kiezelstenen in schijven rond jonge sterren op honderden lichtjaren afstand! WW Cha is ook nog gedetecteerd bij een golflengte van 3 cm en RU Lup zelfs nog bij 6 cm. Uit ons onderzoek blijkt echter dat deze straling niet meer van stof afkomstig is. Misschien is het het gevolg van magnetische activiteit op het oppervlak van de jonge sterren of van winden van geladen deeltjes die door de systemen worden uitgezonden. Om dit nieuwe probleem op te lossen zouden we de systemen met een nog grotere scherpte moeten waarnemen en daarvoor zouden we dan telescopen op verschillende continenten met elkaar moeten verbinden.