



Universiteit
Leiden
The Netherlands

High-contrast imaging of protoplanetary disks

Boer, J. de

Citation

Boer, J. de. (2018, January 10). *High-contrast imaging of protoplanetary disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/57806>

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/1887/57806>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/57806> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Boer, Jozua de

Title: High-contrast imaging of protoplanetary disks

Date: 2018-01-10

Chapter 7

Nederlandse samenvatting

7.1 Het ontstaan van zonnestelsels

Om te bestuderen hoe planetenstelsels zoals ons Zonnestelsel ontstaan kunnen we ervoor kiezen om de huidige staat van ons Zonnestelsel te bestuderen en daardoor theorieën te vormen over haar geschiedenis; of we kunnen veel jongere, momenteel vormende stelsels bestuderen. De 18^e eeuwse Duitse filosoof Immanuel Kant deed het eerste en vormde zijn “Nevelhypothese”, slechts op basis van twee eenvoudige waarnemingen: 1) In de huidige configuratie van de planeetbanen draaien zij in één vlak en één richting rondom de Zon; 2) De ruimte tussen de planeten is grotendeels leeg. Omdat de tweede waarneming van de lege ruimte ogenschijnlijk uitsluit dat er momenteel een mechanisme werkzaam is om de eerste waarneming te verklaren (waarom de planeten in één vlak en één richting draaien) moet zo’n mechanisme in het verleden werkzaam zijn geweest. Kant stelde dat de ruimte tijdens de vroegste ontwikkelingsstadia van ons Zonnestelsel gevuld moet zijn geweest met gas en stof, aanvankelijk in een driedimensionale nevel. Het gas en stof in deze wolk, dat de bouwstenen voor de huidige lichamen (e.g. planeten, kometen) van het Zonnestelsel vormen, platte al snel af tot een schijf rondom een centrale kern met een verhoogde dichtheid. Deze kern zal in massa toenemen door aantrekking van materiaal uit de schijf om uiteindelijk uit te groeien tot onze Zon, terwijl in andere regionen de schijf samenklontert om uit te groeien tot planeten.

Het is verrassend om te zien hoe sterk de Neveltheorie van Kant overeenkomt met ons huidige begrip van het ontstaan van planetenstelsels. Dit terwijl laatstgenoemde vooral is gebaseerd op waarnemingen van sterren (met massa’s

vergelijkbaar aan de Zon) die in de vroege stadia van hun ontwikkeling zijn. Moleculaire reuzenwolken bestaande uit gas en stof storten in om *globules* te vormen, waarin kernen van hoge dichtheid samentrekken tot protosterren. Terwijl schijven vormen rondom deze protosterren, worden de laatstgenoemden zo helder dat hun straling de omringende wolk verdrijft nabij de polen van de protosterren (loodrecht op de schijven). Zodra de omringende nevel volledig is verdreven of op de schijf is gevallen wordt de ster zichtbaar in optische golflengtes en wordt deze nu een *pre-hoofdreksster* genoemd. Aanvankelijk is de schijf rondom de jonge ster gevuld met gas en kleine stofdeeltjes. We verwachten dat de reuzenplaneten (zoals Jupiter, Saturnus en Uranus) tijdens deze fase ontstaan omdat we vermoeden dat deze planeten hun zware gasmantels pas in de laatste stadia van hun vormingsproces aantrekken. Daarom noemen we deze gasrijke schijven *protoplanetaire schijven*.

Terwijl de stofdeeltjes in protoplanetaire schijven tot steeds grotere deeltjes groeien veranderd de algehele vorm van de schijven door verschillende processen zoals de verstoring veroorzaakt door aanwezigheid van planeten in wording, het door de stellaire straling van binnen naar buiten schoonvegen (*foto-evaporatie*) van de schijf, en het verzamelen van grote stofdeeltjes rondom drukmaxima in de gasschijf. Uiteindelijk zal de straling van de ster het gas en de oorspronkelijke kleine stofdeeltjes volledig verwijderen. Omdat de enige kleine stofdeeltjes die overblijven zijn ontstaan als puin uit de botsingen van grotere lichamen worden schijven in hun laatste ontwikkelingsstadium *puin-schijven* genoemd. Gedurende de tijd die nodig is voor de ster om te komen tot "volwassenheid" (de *hoofdreks*, waarbij kernfusie van waterstof naar helium in de sterkern de belangrijkste energiebron voor de ster wordt) zal het merendeel van het puin verdwijnen, waarna een planetenstelsel overblijft.

In dit proefschrift bestudeer ik grootschalige structuren in protoplanetaire schijven doormiddel van het *afbeelden met hoog contrast* van de verstrooiingsoppervlakken van deze schijven. Om deze schijven in optische golflengtes waar te nemen moeten we er rekening mee houden dat de centrale ster veel helderder is dan het (ster)licht dat wordt gereflecteerd door het schijfoppervlak: er is dus hoog contrast tussen het licht van de ster en van de schijf. Daarnaast wordt het licht van de ster & schijf verstoord door de Aardatmosfeer. Daarom hebben we gespecialiseerde hoog contrast afbeeldende instrumenten nodig om te corrigeren voor de atmosferische verstoring van het sterlicht (doormiddel van *adaptieve optica*) om het hoogst mogelijke contrast en ruimtelijk oplossende vermogen (*resolutie*) te verkrijgen. Een verhoogd begrip van de hoog contrast afbeeldende instrumenten is noodzakelijk om de data die is waargenomen met deze instrumenten beter te kunnen interpreteren. De interpretatie van schijfstructuren die zijn waargenomen met een hoge ruimtelijke resolutie vormt een cruciale stap in ons begrip van de algemene principes waaraan de ontwikkeling van schijven en

planeetvorming onderhevig zijn.

Mijn bijdrage aan het onderzoeksgebied van planeetvorming is tweevoudig: Ik heb specifieke belangrijke eigenschappen van schijven bepaald door het direct afbeelden van schijven, en ik heb twee hoog contrast afbeeldende instrumenten gekalibreerd. Het hierdoor verbeterde begrip van de instrumenten is een cruciale stap om de nauwkeurigheid in onze metingen te halen die nodig is om de meer degeneratieve schijfeigenschappen te bepalen, zoals de grootteverdeling van stofdeeltjes.

De hoofdstukken 2, 3 & 4 van dit proefschrift beschrijven VLT/SPHERE waarnemingen van protoplanetaire schijven rond de sterren BP Psc, J1604, en RXJ1615, respectievelijk. In deze hoofdstukken bepaal ik schijfeigenschappen (zoals variabiliteit, de vorm van de schijf op grote schaal en de hoogte van het verstrooiingsoppervlak) en heb ik nieuwe kenmerken gevonden (zoals schijven met ringen en potentiële planeten) die instrumenteel zijn voor het bevorderen van ons begrip van de ontwikkeling van protoplanetaire schijven. De hoofdstukken 5 & 6 beschrijven de kalibratie van de polarimetrische modi van twee hoog contrast afbeeldende instrumenten die zijn geïnstalleerd aan de Zeer Grote Telescoop (Very Large Telescope, VLT) op Cerro Paranal in Chili: het NAOS/CONICA (VLT/NACO) instrument en het Spectro-Polarimetric High-Contrast Exoplanet REsearch (VLT/SPHERE) instrument.

7.2 Dit proefschrift: Hoog contrast afbeelden van protoplanetaire schijven

BP Piscium: zijn uitgewaaierde schijf afgebeeld met SPHERE/ZIMPOL. Hoewel deze ster aanvankelijk was geclassificeerd als jonge (pre-hoofdreks)ster omringd door een protoplanetaire schijf zijn de leeftijd en het ontwikkelingsstadium van BP Piscium (BP Psc) een onderwerp van discussie. Het is of één van de meest nabije jonge sterren met een lage ster massa (T Tauri ster van 10 miljoen jaar oud op ~ 80 parsec = 260 lichtjaar) dan wel een oude (paar miljard jaar) post-hoofdreksster die zojuist gestopt is met waterstoffusie in zijn kern en is begonnen met het uitzetten van zijn mantel om een *rode reus* te worden. Als het inderdaad een oude ster is, welke veel helderder is en dus veel verder weg (~ 300 parsec) zou moeten staan, zou dit het eerste voorbeeld zijn van een ster in dit stadium van zijn ontwikkeling waarbij een omringende schijf is waargenomen.

We hebben dit stelsel waargenomen met SPHERE/ZIMPOL en zijn erin geslaagd om de circumstellaire schijf direct af te beelden. Omdat we de schijf zowat vanaf de zijkant zien kunnen we duidelijke tekenen van een sterke uitwaaiing (snel toenemende schijfhoogte met toenemende radius). Onze stral-

ingstransport modellering van het stelsel bevestigen dat de schijf uitzonderlijk sterk is uitgewaaid voor de kleine (micrometer) stofdeeltjes, terwijl de schijf van grotere (millimeter) stofdeeltjes veel platter moet zijn. Deze eigenschappen zijn zo atypisch voor een schijf rond een jonge ster dat wij concluderen dat de ster waarschijnlijk een oude reus (bezig met waterstoffusie in schillen rondom de kern) is.

Variabiliteit en stoffiltering in de transitieschijf J160421.7-213028, zoals waargenomen in optisch verstrooid licht. Transitieschijven zijn protoplanetaire schijven die sterke tekenen vertonen van grote leegtes in de binnenste regionen (vlakbij de ster). Ze danken hun naam aan de veronderstelling dat ze in een transitie of overgang zijn van een gasrijke protoplanetaire schijf naar een gasarme puinschijf. De best bestudeerde leden van de kleine groep transitie schijven zijn allemaal rijkelijk bedeed met structuren op grote schaal, zoals spiraal armen, ringstructuren en grote leegtes in de binnenste regionen.

Wij hebben J160421.7-213028 (J1604) waargenomen in zichtbaar licht met SPHERE/ZIMPOL om te zoeken naar voorheen niet gevonden schijfstructuren en om onze waarnemingen te vergelijken met afbeeldingen die zijn genomen op andere golflengtes. We nemen een enkele ring waar in de schijf met een zeer grote leegte erbinnen van ~ 40 astronomische eenheden ($ae =$ de afstand tussen de Aarde en de Zon).

We meten dat de oppervlaktehelderheid van de schijf een maximum bereikt op 61 ae van de ster, wat 20 ae dichterbij is dan wat is gevonden voor eerdere waarnemingen in sub-mm golflengtes. Wij verklaren deze discrepantie met stoffiltering: een ruimtelijk scheiding tussen deeltjes van mm grootte (nabij een maximum in de gasdruk) en deeltjes van micrometer grootte (welke de algehele verdeling van het gas volgen). Waarnemingen in het nabije infrarood van drie jaar eerder toonden een sterke dip (lokale afzwakking in oppervlaktehelderheid) aan de oostkant van de schijf, terwijl onze afbeeldingen een vergelijkbare dip vertonen in het noordoosten. Zulke snelle variaties kunnen niet worden verklaard met de baanbeweging van een lokale afname in de oppervlaktedichtheid van de buitenschijf. Daarom concluderen we dat de dip moet zijn veroorzaakt door een object dicht bij de ster dat een schaduw werpt op de buitenschijf. Het object dat de schaduw werpt zou een plooi kunnen zijn in een vooralsnog niet waargenomen binnenschijf, of een planeet die omringt wordt door circumplanetair materiaal, in elk geval verblijvend binnen ~ 9.6 ae vanaf de ster.

Meervoudige ringstructuren in de transitieschijf en potentiële planeetaire/stellare metgezellen rondom RXJ1615.3-3255. Omdat enorme gasmantels de buitenlagen vormen van reuzenplaneten verwachten we dat deze planeten ontstaan zolang de circumstellare schijf nog voldoende gas bevat om

aan te trekken. Aangezien schijven alleen voldoende gasrijk zijn om dit proces mogelijk te maken tot aan het einde van de protoplanetaire fase hebben we de grootste kans om interacties tussen reuzenplaneten en hun geboorteschijven te vinden tijdens het einde van deze fase, oftewel in transitieschijven.

Om dergelijke tekenen van planeet-schijf wisselwerkingen te vinden hebben we de transitieschijf rondom RXJ1615.3-3255 (RXJ1615) waargenomen met verschillende modi van SPHERE (ZIMPOL, IRDIS & IFS). Deze schijf die niet eerder in optisch licht was afgebeeld werd in al onze waarnemingen duidelijk gedetecteerd en vertoonde meervoudige elliptische ringstructuren. Voorts vonden we negen puntbronnen rondom de ster, buiten de schijf. Deze puntbronnen beschouwden wij als potentiële planetaire/stellare metgezellen van RXJ1615. In oude NACO data hebben we eveneens vier van de negen puntbronnen teruggevonden waarvoor we hebben vastgesteld dat deze niet meebewegen met de centrale ster. Daarom beschouwen wij deze vier puntbronnen niet langer als objecten verbonden aan het RXJ1615 system, maar als sterren die toevallig op de achtergrond staan.

De elliptische ringen in de schijf zijn niet gecentreerd rondom de ster, maar verschoven over de korte as van de ellipsen. Wij verklaren de ellipticiteit en de verschoven ellips-centra als een gevolg van de hoek (47°) waaronder we de schijf waarnemen. De ellipticiteit wordt dan veroorzaakt door de projectie van cirkelvormige structuren gezien onder deze hoek, terwijl de verschuiving van de ellipsen ten opzichte van het ster-centrum kan worden verklaard door een significante hoogte van het schijf te veronderstellen boven het middenvlak van de schijf (waarin ook de ster zich bevindt), omdat we namelijk het verstrooiingsoppervlak van schijven waarnemen. Onze afbeeldingen van RXJ1615 maken het voor het eerst mogelijk om modelonafhankelijk de hoogte te bepalen van het verstrooiingsoppervlak van een protoplanetaire schijf. Deze hoogte lijkt niet noemenswaardig sneller toe te nemen dan de straal van de schijf (oftewel: geen uitwaaiering). Voorts geven we twee mogelijke verklaringen voor de aanwezigheid van een boog aan de buitenkant van de schijf: of het is een deel van een volledige nieuwe (buitenste) ring of het de onderkant van de laatste ring binnen de boog. Om het mogelijk te maken om de onderkant van een ring te kunnen waarnemen is het nodig dat de schijf net buiten de ring is afgekapt, anders blokkeert deze het licht van de onderkant van de ring. We speculeren dat deze afkapping kan zijn veroorzaakt door de aanwezigheid van een planeet in een baan net buiten de schijf. De potentiële planetaire metgezel die het dichtst bij de schijf is, waarvoor we nog niet zeker weten of deze inderdaad onderdeel is van het RXJ1615 stelsel, zou verantwoordelijk kunnen zijn voor het afpellen van de buitenrand van de schijf.

Karakterisatie van de instrumentele effecten op polarisatie aan het Nasmyth focus met NACO. Om het polarimetrische gedrag van hoog contrast afbeeldende instrumenten beter te begrijpen heb ik een kalibratiemethode ontwikkeld voor de polarimetrische modus van VLT/NACO. Door het gepolariseerde Zonlicht dat door de Aardatmosfeer wordt verstrooid te gebruiken als een gepolariseerde kalibratiebron heb ik de variatie bepaald in de gemeten graad van polarisatie veroorzaakt door veranderende positionering van de telescoop en het instrument. Als we een component van het instrument draaien met 90° kunnen we de verschillende ongewenste instrumentele effecten ontrafelen. Door opeenvolgend te draaien met optische componenten binnen NACO, het gehele instrument aan de telescoop en tot slot de volledige telescoop zelf rond de verticale as kunnen we onderscheid maken tussen de instrumentale contributies van de optische componenten tussen deze draaiende segmenten.

Karakterisatie van de polarimetrische modus van SPHERE/IRDIS. Na de installatie van SPHERE aan de telescoop hebben we onze ervaring met de NACO kalibraties gebruikt om de polarimetrische modus van SPHERE/IRDIS te kalibreren. IRDIS (InfraRed Dual-beam Imager and Spectrograph) is het afbeeldende component van SPHERE dat werkt in het nabij infrarood. Voor deze kalibraties gebruikten we een interne lichtbron en een ongepolariseerde standaardster. Daarmee hebben we de polarisatie eigenschappen kunnen karakteriseren van opeenvolgend de telescoop spiegels (vooral de derde spiegel: M3), de eerste spiegel in het SPHERE instrument (M4), de *half-golflengteplaat*, en de *K*-vormige spiegel die gebruikt wordt om afbeeldingen indien gewenst te (de)roteren.

Op basis van onze metingen hebben we een volledige responsmodel voor de telescoop & instrument combinatie kunnen maken, waarmee we kunnen voorspellen wat het instrumentele effect op een inkomende lichtstraal zal zijn. Bijzonder opvallend was dat de polarimetrische efficiëntie (hoe hoog de gemeten polarisatiegraad is als je naar 100% gepolariseerd licht kijkt) onder de 10% kan uitkomen voor bepaalde kleurenfilters (*H* en *K* band) als de *K*-vormige spiegel in een ongunstige oriëntatie staat. We hebben op basis van deze studie dan ook harde aanbevelingen kunnen doen voor optimale waarneemstrategieën. Ook kunnen we corrigeren voor de polarimetrische effecten van de telescoop & instrument door ons model "om te draaien". Met dat omgekeerde model kunnen we dus nauwkeurig op basis van onze astronomische meetwaarden bepalen wat de werkelijke polarisatie van het astrofysische object is. Deze correctie illustreren we door waarnemingen van de schijf rondom de ster TW Hya te corrigeren. Deze correcties zijn noodzakelijk om de werkelijke richting en gepolariseerde oppervlaktehelderheid van een schijf te kunnen bepalen.

7.3 Tot slot

In dit proefschrift heb ik de capaciteit van VLT/SPHERE laten zien om proto-planetaire schijven te bestuderen met hoge ruimtelijke resolutie. Gedetailleerde kennis van het verstrooiingsoppervlak van schijven is cruciaal voor ons algehele begrip van deze schijven. Onze inzet om de polarimetrische modus van SPHERE/IRDIS te kalibreren heeft nieuwe mogelijkheden geopenbaard voor zeer nauwkeurige polarimetrische waarnemingen. Van deze hoge nauwkeurigheid zal niet alleen het onderzoek naar protoplanetaire schijven voordeel ondervinden, maar elk veld waarbij ruimtelijk opgeloste polarimetrische metingen nodig zijn, zoals de studie naar de stofrijke omgeving van oude sterren, reflecterende voorwerpen in ons Zonnestelsel (zoals kometen en manen) en de karakterisatie van de atmosferen van exoplaneten en hun circumplanetaire schijven.

