



## UvA-DARE (Digital Academic Repository)

### Protoplanetary disks and exoplanets in scattered light

Stolker, T.

**Publication date**

2017

**Document Version**

Other version

**License**

Other

[Link to publication](#)

**Citation for published version (APA):**

Stolker, T. (2017). *Protoplanetary disks and exoplanets in scattered light*. [Thesis, fully internal, Universiteit van Amsterdam].

**General rights**

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

**Disclaimer/Complaints regulations**

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

# Samenvatting

## *Protoplanetaire schijven en exoplaneten in verstrooid licht*

De vorming van planeten vindt plaats in protoplanetaire schijven rond jonge sterren. Deze afgeplatte schijven van gas en stof zijn een bijproduct van een gevormde ster en bevatten de bouwstenen voor planetenstelsels. Het grootste deel van het gas en stof reservoir beweegt binnen tien miljoen jaar naar de ster toe of wordt uiteen gedreven. De vorming van asteroïden, kometen, rotsachtige planeten, en gasreuzen moet dus binnen een relatief korte tijdsspanne plaatsvinden. Het is fascinerend hoe enorm efficiënt het proces van planeetvorming is aangezien al meer dan 3600 exoplaneten zijn ontdekt in onze directe omgeving van de Melkweg. Statistische analyses voorspellen dat rotsachtige planeten zich bevinden bij enkele tientallen procenten van de lage-massa sterren, wat zou betekenen dat de Melkweg krioelt van de planeten. Dit soort bevindingen roepen veel vragen op met betrekking tot de vorming en evolutie van planetenstelsels, de kosmische context van ons zonnestelsel en de bewoonbaarheid van exoplaneten.

Onderzoek naar planeetvorming is een nieuw tijdperk ingegaan door de komst van waarnemingen met een hoge ruimtelijke resolutie. Substructuren in protoplanetaire schijven, waaronder uithollingen en spiraalarmen, worden regelmatig gedetecteerd en zijn mogelijk een gevolg van vormende planeten of andere evolutionaire processen. Het waarnemen met hoge ruimtelijke resolutie van de geboorte-omgevingen van planeten is een flinke uitdaging. De hoekgrootte van een protoplanetaire schijf is namelijk zelfs in de meest nabij gelegen stervormingsgebieden niet meer dan een boogseconde, dit is ongeveer 2000 keer kleiner dan de hoekgrootte van de maan. De relatieve helderheid van de centrale ster zorgt voor nog een extra uitdaging bij korte golflengtes omdat een protoplanetaire schijf in verstrooid licht wel duizenden keren minder helder is. Differentiële waarneemtechnieken worden gebruikt om afbeeldingen van protoplanetaire schijven te maken in verstrooid licht en ook om de thermische straling van jonge gasreuzen te detecteren. SPHERE is een instrument dat speciaal is gebouwd voor de directe detectie van exoplaneten en

circumstellaire omgevingen en is een paar jaar geleden in gebruik genomen bij de Very Large Telescope in Chili.

In dit proefschrift bestudeer ik protoplanetaire schijven met hoge-contrast en hoge-resolutie waarnemingen van verstrooid licht, met als doel om substructuren en helderheidsasymmetrieën in het oppervlak te onthullen. De afbeeldingen van het verstrooide licht geven inzicht in de structuur van de protoplanetaire schijven, de verspreiding en eigenschappen van de kleine stofkorrels en de fysische processen die de schijfevolutie aandrijven. De variabiliteit van schaduwen is gebruikt als uniek diagnostisch middel voor het bestuderen van de binnenste schijfgebieden die buiten het bereik zijn van hoge-contrast waarnemingen. Verder zijn simulaties van stralingstransport toegepast om kwantitatief inzicht te krijgen in de schijfstructuur en stofeigenschappen. Jonge gasreuzen zijn in de nabije toekomst mogelijk te detecteren in gepolariseerd licht wat de mogelijkheid biedt om atmosferische asymmetrieën te bestuderen. Een nieuwe code voor berekeningen van verstrooid licht is gebruikt om het polarisatiesignaal te voorspellen van jonge gasreuzen met inhomogene wolkenverdelingen en circumplanetaire schijven.

In hoofdstuk 2 presenteren we een nieuwe, driedimensionale stralingstransportcode (ARTES) voor berekeningen van verstrooid licht in atmosferen van (exo)planeten waarbij meervoudige verstrooiing en polarisatie volledig worden meegenomen. De code past de Monte Carlo stralingstransportmethode toe door fotonpakketjes stochastisch door een atmosferisch grid te volgen wat willekeurige dichtheidsverdelingen en verstrooiingseigenschappen toelaat. Simulaties van zowel gereflecteerd licht en thermische emissie zijn mogelijk waarvoor spectra, fase-curves en afbeeldingen kunnen worden berekend. Na het zorgvuldig testen van de code hebben we voorspellingen gedaan over de ruimtelijk geïntegreerde graad en richting van polarisatie van jonge gasreuzen met horizontale wolken variaties, circumplanetaire schijven, rotationeel afgeplatte atmosferen en verschillende verstrooiingseigenschappen van de wolken. We tonen aan dat de graad van polarisatie maximaal is voor afgeplatte atmosferen met wolken op grote hoogte waarbij de wolken relatief dik zijn rond rond de evenaar. De graad van polarisatie van een afgeplatte atmosfeer kan zowel groter of kleiner zijn ten opzichte van een bolvormige atmosfeer, wat afhangt van de horizontale verdeling en de dikte van de wolken. De ruimtelijk geïntegreerde richting van polarisatie is parallel of loodrecht ten opzichte van de geprojecteerde rotatie-as van de planeet indien de wolken een bandenstructuur hebben. Verder kan de aanwezigheid van een hete of koude circumplanetaire schijf een polarisatie signaal tot 1% produceren als gevolg van het verduisteren van de planeet atmosfeer, en verstrooiing van fotonen in de circumplanetaire schijf.

In hoofdstuk 3 construeren we een numerieke methode om afbeeldingen van verstrooid licht te linken aan de intrinsieke oppervlakte geometrie van protoplanetaire schijven. Het begrijpen van de fysieke afstanden en verstrooiingshoeken die geassocieerd zijn met elke pixel is met name belangrijk voor geïnclineerde schijven vanwege projectie effecten. Door de hoogte van het verstrooiingsoppervlak te parametriseren met een machtsfunctie, kunnen afbeeldingen worden gecorrigeerd voor het stralingsveld van de ster. Hierbij worden zowel

---

de inclinatie als hoogte van de schijf meegenomen. Verder kan de fasefunctie van de verstrooiing door het stof worden afgeleid met deze methode, wat voor afbeeldingen van gepolariseerde intensiteit een aanname vereist over de graad van polarisatie. De methode is toegepast op afbeeldingen van de protoplanetaire schijf rond HD 100546 in gepolariseerd verstrooid licht. In tegenstelling tot eerdere studies rapporteren we dat de nabije kant van de schijf helderder is in gepolariseerd licht ten opzichte van de verre kant. De fasefuncties vertonen een deel van een piek in voorwaardsverstrooiende richting welke toeneemt in sterkte bij kortere golflengtes, met de aanname dat de graad van polarisatie beschreven wordt door een klokvormige kromme. Dit geeft aan dat stofkorrels van ongeveer een micrometer of groter de verstrooiingsopaciteit in het schijfoppervlak domineren, waarschijnlijk met een aggregaat-achtige structuur.

In hoofdstuk 4 presenteren we afbeeldingen in verstrooid licht van de transitie-schijf rond HD 135344B welke zijn verkregen met het SPHERE instrument in het optisch en nabij-infrarood. De aanwezigheid van de spiraalarmen en uitholling zijn met hoge ruimtelijke resolutie en gevoeligheid bevestigd en meerdere lokale helderheidsminima zijn ontdekt. We suggereren dat de binnenste schijfgebieden schaduwen werpen op de buitenschijf. Een brede schaduw is geïdentificeerd in noordelijke richting van alle afbeeldingen terwijl één van de smalle schaduwen alleen aanwezig is in de *J*-band afbeelding wat duidt op een kortstondig of variabel verschijnsel. We onderzoeken de mogelijke aanwezigheid van een kromming in de schijf met een stralingstransportmodel welke kwalitatief met een aantal van de schaduwkarakteristieken overeenkomt. Behalve de azimutale schaduwvariëaties identificeren we ook een globale helderheidsgradient welke samenvalt met de asymmetrie in de (sub)millimeter continuüm emissie, wat aanduidt dat er een mogelijke link is tussen het verhoogde schijfoppervlak en een temperatuur- en/of dichtheidsverstoring door de passerende spiraalarmen. De golflengte-afhankelijke verstrooiingsefficiëntie neemt toe richting langere golflengtes wat we toeschrijven aan stofkorrels die vergelijkbaar of groter in grootte zijn als de golflengte van het waargenomen licht waardoor voorwaartse verstrooiing voor een rode kleur zorgt. De aanwezigheid van de spiraalarmen kan het beste worden verklaard door de aanwezigheid van één of meerdere recent gevormde planeten in de buitengebieden van de schijf hoewel geen opening van de schijf is gedetecteerd voorbij de spiraalarmen. Een deel van het aanwezige signaal dat niet azimutaal gepolariseerd is in de hoge kwaliteit *J*-band afbeelding kan een gevolg zijn van meervoudige verstrooiing in de schijf.

In hoofdstuk 5 zetten we het onderzoek naar de schaduwen van HD 135344B voort met meerdere, op verschillende momenten uitgevoerde waarnemingen van verstrooid licht, gecombineerd met fotometrie van optisch en nabij-infrarood licht en interferometrie waarnemingen in het nabij-infrarood. We presenteren vier aanvullende SPHERE afbeeldingen waarin we azimutale helderheidsvariëaties identificeren met ook variëaties tussen de verschillende momenten waarop de afbeeldingen zijn verkregen. Er zijn smalle schaduwen aanwezig, die mogelijk geworpen worden door lokale verhogingen van de dichtheid, en brede schaduwen welke mogelijk de grootschalige dynamiek van de binnen schijf traceren.

De fotometrie in het nabij-infrarood, welke gedeeltelijk samenvallen met de SPHERE waarnemingen, vertoont variaties zo groot als 10% en is mogelijk gecorreleerd met de aanwezigheid van schaduwen. Analyse van gearchiveerde VLTI/PIONIER in de  $H$  band toont aan dat de binnenschijf waarschijnlijk dezelfde oriëntatie heeft als de buitenschijf of mogelijk een hoekverschil heeft van maximaal een paar graden. Een kleine kromming in de binnenschijf kan mogelijk de brede, min of meer stationaire schaduw in noord tot noordwestelijke richting verklaren wat we illustreren met een gesimuleerde afbeelding. We berekenen een groot aantal stralingstransportmodellen om de correlatie tussen de fotometrie in het nabij-infrarood en het belichten/beschaduwen van de buitenschijf te kwantificeren. De aanwezigheid van stofkorrels op relatief grote hoogte in de binnenschijf is vereist om de contrastvariatie van het verstrooide licht te verklaren. We bediscussiëren verschillende mechanismen die mogelijk verantwoordelijk zijn voor de azimuthaal asymmetrische variaties van de optische dikte door de binnenschijf, waaronder fluctuaties in turbulentie en een stoffige schijfwind.

In hoofdstuk 6 bestuderen we afbeeldingen van de protoplanetaire schijf rondom de Herbig Ae ster HD 97048 welke zijn verkregen met differentiële waarneemtechnieken gebruikmakend van polarisatie en rotatie en onthullen voor de eerste keer substructuren in het schijfoppervlak. We detecteren vier ringvormige helderheidstoenames en gerelateerde openingen in de schijf, op afstanden tussen 39 en 341 astronomische eenheden (ae) van de centrale ster. Het fitten van de concentrische structuren met ellipsen levert een afschatting van de inclinatie, positiehoek en hoogte van het verstrooiingsoppervlak op verschillende afstanden van de ster. De schijfhoogte is tot 270 ae goed te beschrijven met een machtsfunctie terwijl de schijf waarschijnlijk optisch dun wordt op grotere afstanden. We meten de fasefunctie van het stof langs één van de ringen welke consistent is met numerieke berekeningen van de eigenschappen van compacte stof aggregaten. Planeten zijn mogelijk verantwoordelijk voor de radiële openingen in de schijf. De breedtes van de openingen leveren een afschatting van de planeetmassa's welke naar verwachting minder massief zijn dan Jupiter. Bovenlimieten op de helderheid en massa van ingebedde planeten zijn afgeleid van de afbeeldingen verkregen met de rotationele differentietechniek.

In hoofdstuk 7 rapporteren we over SPHERE waarnemingen van een andere transienschijf, HD 100453, waarbij de gepolariseerde flux van het verstrooide licht ruimtelijk is opgelost in het optisch en nabij-infrarood. Aanvullende waarnemingen verkregen met de rotationele differentietechniek in het nabij-infrarood onthullen de schijf in de totale intensiteit van het verstrooide licht. We identificeren een uitholling in de schijf met langs de rand een azimuthale helderheidsmodulatie, twee lokale schaduwen en een symmetrisch paar spiraalarmen. De begeleidende M-ster op een afstand van 119 ae is waarschijnlijk verantwoordelijk voor de spiraalarmen. Echter, we speculeren dat de spiraalarmen ook gerelateerd kunnen zijn aan de schaduwen aangezien de spiraalarmen lijken te zijn ontstaan dichtbij de locatie van de schaduwen. Een lichtzwakke structuur is zichtbaar aan de nabije kant van de schijf welke mogelijk de onderkant van de schijf traceert indien de schijf is afgeknot door de getijdenkrachten van de begeleider. We construeren

---

een stralingstransportmodel met een groot verschil in de oriëntatie van de binnen- en buitenschijf welke goed overeenkomt met de locatie en breedte van de schaduwen. De azimuthale helderheidsvariatie is het best te verklaren door het effect van de verstrooiingshoek, maar we bediscussiëren ook de mogelijkheid dat de schaalhoogte is gemoduleerd door de schaduwen, afhankelijk van de tijdschalen waarbij de schijf opwarmt en afkoelt.