



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Painting with starlight : optical techniques for the high-contrast imaging of exoplanets

Wilby, M.J.

Citation

Wilby, M. J. (2018, November 27). *Painting with starlight : optical techniques for the high-contrast imaging of exoplanets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/67531>

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/1887/67531>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/67531> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Wilby, M.J.

Title: Painting with starlight : optical techniques for the high-contrast imaging of exoplanets

Issue Date: 2018-11-27

Chapter 6

Nederlandse Samenvatting

Al eeuwen worden filosofen, wetenschappers en science fiction schrijvers gefascineerd door het mogelijk bestaan van planetenstelsels rondom andere sterren dan de zon. En, zoals Giovanni Schiaparelli claimde kunstmatige kanalen op Mars te zien in 1877 of zoals de fantasieën over het bestaan van tropische paradijzen onder het dikke wolkendeken van Venus uit het begin van de 19de eeuw, gaat deze fascinatie bijna altijd gepaard met de begeerte om te weten: zou er leven kunnen bestaan op deze planeten?

Sinds deze oude mijmeringen, is onze wetenschappelijk kennis over planeten buiten ons eigen zonnestelsel (exoplaneten) bijzonder veel gegroeid. Te beginnen met de ontdekking van de eerste exoplaneet in 1992, kennen we nu bijna 4,000 planeet kandidaten en kunnen we steeds beter hun compositie, atmosfeer en oppervlakte bestuderen.

6.1 Hoe vinden we exoplaneten?

6.1.1 Indirecte detectie methodes

Het hoofdeel van de tot nu toe gedetecteerde exoplaneten zijn gevonden met indirecte methodes, waar de invloed van de planeet op het licht van zijn ster wordt gebruikt. De meest succesvolle van deze methodes zijn de overgang methode, waar de planeet een klein beetje van het ster light blokkeert als het voor zijn ster beweegt, en de rood verschuiving methode, waar gebruik wordt gemaakt van periodieke verschuivingen van kenmerken in het spectrum van de hoofdster doordat deze om een gemeenschappelijk middelpunt draait met de planeet.

Deze indirecte methodes hebben een groot aantal planeten gevonden doordat het mogelijk is om hoge precisie te halen met relatief kleine telescopen en instrumenten, wat ze zeer geschikt maakt voor zoektochten op grote schaal. Ze zijn ook meer gevoelig voor zware planeten die dicht om hun hoofdster draaien, wat een gedeelte is van de exoplaneten parameter ruimte waar meer planeten voorkomen dan het gedeelte dat toegankelijk is voor andere methoden, zoals door middel van directe detectie.

De indirecte methodes hebben echter een nadeel, ze zijn namelijk alleen gevoelig zijn voor de planeten waarvan de baan overeenkomt met ons gezichtspunt, en daardoor wordt een groot gedeelte van de exoplaneten waarvoor dit niet geldt gemist. De detecteerbaarheid van planeten met deze methodes is ook intrinsiek gebonden aan de omlooptijd, wat betekent dat er over meerder jaren of zelfs meerdere decennia moeten worden geobserveerd wanneer er wordt gezocht voor systemen zoals ons eigen zonnestelsel.

6.1.2 Directe detectie

Als we in plaats daarvan licht van een aardachtige planeet willen onderscheiden van zijn hoofdstel, hebben we instrumenten nodig die hoeken kunnen onderscheiden tot op een fractie van een boogseconde ($1/3600$ ste van een graad) voor planeet licht dat ongeveer een miljard keer zwakker is dan dat van de ster. Deze technische uitdaging is vergelijkbaar met het vinden van een vuurvliegje dat een paar centimeter van een vuurtoren vliegt op een afstand van 200 km. Als dit kan worden bereikt, zal directe detectie een heel krachtig hulpmiddel zijn om planeten in ongeëvenaard detail te bestuderen en karakteriseren.

Deze precisie kan het beste worden bereikt door gebruik te maken van de grootst mogelijke telescopen, en geavanceerde coronagrafische optica dat het ongewenste licht van de ster kan wegfilteren en het signaal van de planeet intact laat. Deze optische technieken worden aangevuld met observatie technieken die het vermogen hebben om planeet licht te onderscheiden van sterlicht door gebruik te maken van fundamentele verschillen tussen het planeet en sterlicht. Technieken zoals polarimetrie en spectroscopie worden veel gebruikt om het zwakke planeet licht uit de zee van sterlicht waarin het zich bevindt te ontwaren.

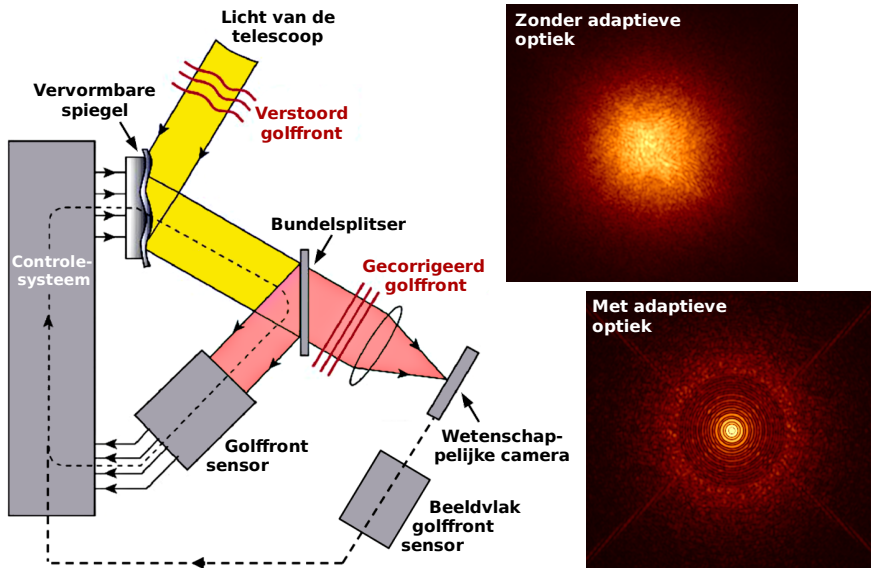
Instrumenten die bevestigd zijn aan telescopen op de Aarde hebben de extra uitdaging om te observeren door de turbulente, vervormende effecten van de atmosfeer van de Aarde. Adaptieve optische technologieën, waar een of meerdere vervormbare spiegels duizenden keren per seconden worden aangestuurd, zijn nu geavanceerd genoeg om effectief te compenseren voor deze vervormingen. In Figuur 6.1 is een schematisch overzicht van adaptieve optiek geschetst. Naarmate we licht zwakkere planeten met kleinere banen proberen te detecteren, worden vervormingen door imperfecties in de optica van het instrument zelf ook belangrijk. In het bijzonder de zogenoemde niet gemeenschappelijke pad aberraties (NGPAs), die worden veroorzaakt door gebieden van het instrument die niet goed gecontroleerd kunnen worden door het adaptieve optiek systeem, zijn op dit moment een van de grootste limiterende factoren voor de planeet zoekende instrumenten.

Een oplossing voor deze NGPAs is de techniek van beeldvlak golffront metingen, waar de informatie van de camera in het beeldvlak wordt gebruikt om de precieze correctie voor een perfecte afbeelding wordt bepaald. Een groot gedeelte van deze proefschrift is toegewijd aan het ontwikkelen van effectieve methodes om deze techniek toe te passen.

6.2 Hoe karakteriseren we exoplaneten?

Het detecteren van planeetachtige objecten rondom andere sterren geeft ons al een idee over het aantal exoplaneten in ons sterrenstelsel. Echter, om ons begrip te vergroten van deze complexe lichamen voorbij een enkel data punt, moeten we een gedetailleerde karakterisatie studie doen met gebruik van de vele beschikbare observatie technieken.

Overgang en roodverschuiving observaties zorgen respectievelijk voor de mogelijkheid tot het meten van de straal en massa van deze planeten relatief ten opzichte van hun ster. Door het combineren van deze twee metingen kunnen we de gemiddelde dichtheid van de planeet schatten, en daarmee concluderen of deze een rotsachtige, ijsachtige of gasachtige compositie heeft.



Figuur 6.1: Een schematische weergave van een adaptief optiek (AO) systeem: een gedeelte van het licht van een telescoop wordt afgesplitst van het wetenschappelijke pad naar een golffront sensor, die een vervormbare spiegel aandrijft om te compenseren voor de verstoringen van de atmosfeer. De inzetpanelen laten gesimuleerde afbeeldingen zien van een ster voor (boven) en na (onder) AO correctie. Niet gemeenschappelijke pad aberraties treden op in het rood aangeven gebied van het instrument, en kunnen niet correct worden gemeten door het adaptieve optiek systeem. Deze kunnen worden gecontroleerd door een beeldvlak golffront sensor toe te voegen, die de afbeeldingen gebruikt van de wetenschappelijke camera om de goede correctie te meten. Dit figuur is aangepast van <http://lyot.org>.

Echter, hoge resolutie spectroscopische studies verschaffen verreweg het meest krachtige en veelzijdige gereedschap om bijkomende eigenschappen te bepalen van deze planeten. Niet alleen kan het gebruikt worden om de spectrale vingerafdruk van moleculen in de atmosfeer te identificeren, maar de analyse van de spectrale kenmerken zelf kan gebruikt worden om eigenschappen zoals de temperatuur en druk in de bovenste lagen van de atmosfeer te bepalen, en zelfs de draaisnelheid van de planeet. For onopgeloste planeten in een overgang, kan dit worden gedaan door het analyseren van het kleine gedeelte sterlicht dat door de planeet atmosfeer gaat, waardoor het de spectrale vingerafdruk van de planeet oppikt. Het is ook mogelijk om een spectrograaf direct te koppelen aan een hoog contrast camera systeem, wat ervoor zorgt dat ook planeten die geen overgang veroorzaken met hetzelfde detail kunnen worden gekarakteriseerd als ze via de directe methode gedetecteerd kunnen worden.

6.3 Protoplanetaire schijven en planeet formatie

Protoplanetaire schijven vormen tijdens het begin van de ineenstorting van stof en gas tijdens de eerste fase van ster formatie, en zijn op hun beurt de geboorteplaats van planeten. Daarom zal het beter begrijpen van de fysische processen die plaats vinden in deze schijven leiden tot beter begrip van planeet formatie en hoe deze systemen daarna evolueren tot volwassen zonnestelsels. Door een grote hoeveelheid van deze jonge ster systemen met verschillende leeftijden te bestuderen, kunnen we

de stukje bij elkaar leggen om een tijdlijn over de formatie van ons eigen zonnestelsel te schetsen.

Afbeeldingen van deze schijven op nabij infrarode golflengtes vertellen ons over hun buitenste lagen: het detecteren van openingen en spiralen in deze lagen geeft ons een indicatie van hun leeftijd, en potentiële regio's waar op dit moment planeet formatie plaats vind. Echter, door de zwakheid van deze schijven vergeleken met het licht van hun ster, is het maken van afbeeldingen technisch bijna net zo uitdagend als het vinden van planeten, vooral omdat het moet gebeuren over een groot oppervlak zonder dat er beeld artefacten optreden.

Polarimetrie is een extreem effectieve techniek om deze uitdaging te overkomen, doordat sterlicht van nature ongepolariseerd is maar gedeeltelijk gepolariseerd raakt wanneer het wordt verstrooid door stof deeltjes. Het meten en aftrekken van al het ongepolariseerde licht laat daardoor een afbeelding achter van de regio's waar sterlicht wordt verstrooid. Het huidige generatie hoge contrast instrument SPHERE op de VLT is erg succesvol op dit terrein, en de opgave om de prestatie van dit instrument verder te verhogen is het onderwerp van drie hoofdstukken van deze thesis.

6.4 Dit proefschrift

In dit proefschrift richt ik me op twee hoofddoelen: het ontwikkelen van nieuwe optische technieken om de uiteindelijke bereikbare contrast ratio van directe detectie methodes te verbeteren, en het adresseren van sommige openstaande beperkingen van huidige generatie instrumenten. Dit werk is verdeeld over de volgende hoofdstukken:

Hoofdstuk 2: De grootste uitdaging van golffront metingen met het beeldvlak is het effectief gebruik maken van de afbeeldingen van de wetenschappelijke camera, doordat de informatie over de aberraties die de lichtstraal verstoren verloren raakt tijdens het nemen van de afbeeldingen. In dit hoofdstuk presenteren we de theorie, de laboratorium implementatie en de eerste validatie op een echte ster van de coronagraphic Modal Wavefront Sensor (cMWS): een optische element dat gebruikt maakt van holografische technieken om het licht te manipuleren op een zo danige manier dat het tegelijk functioneert als coronagrafische camera en makkelijk te gebruiken lage orde golffront sensor. Na de validatie van het concept in numerieke simulaties, hebben we een prototype ontwerp van de cMWS ingezet op de 4.2 m William Herschel Telescoop (WHT) op La Palma. We hebben aangetoond dat deze cMWS gebruikt kan worden om passief de lage orde golffront fouten te meten op hoge snelheid (50 Hz frame-rate) en over een grote spectrale bandbreedte (50% in R-band), beide zijn grote uitdagingen voor de meeste beeldvlak golffront metingen. Nadat dit werk gepubliceerd was, is de cMWS verder gevalideerd als onderdeel van de Leiden EXoplanet Instrument (LEXI), inclusief succesvolle terugkoppeling voor actieve correctie tijdens observaties. Daarnaast zijn er verschillende andere cMWS optische elementen geïnstalleerd in telescopen over heel de wereld, inclusief een recente succesvolle vlucht op grote hoogte met de HiCIBaS ballon.

Hoofdstuk 3: Terwijl niet gemeenschappelijke pad fouten de meest geciteerde

limiterende factor voor directe detectie instrumenten is, is het niet altijd het meest significante effect. In dit hoofdstuk ontwikkelen en testen wij een potentiële controle oplossing voor het zogenoemde langzame wind effect (LWE) dat optreedt in de hoge contrast camera SPHERE: dit is een golffront controle probleem wat de prestatie significant vermindert tijdens optimale observatie condities. In dit hoofdstuk passen wij het zogeheten “Fast & Furious” (F&F) beeld golffront meting controle algoritme toe op het specifieke geval van het LWE, en simuleren we de techniek met terugkoppeling onder realistische observatie condities die de condities van SPHERE nabootsen. Wij merken op dat dit algoritme extreem stabiel is tegen alle gesimuleerde observatie condities, waardoor het een zeer effectieve belooft te zijn om het LWE te verwijderen en als groot voordeel is gelijk implementeerbaar als softwarematige oplossing voor SPHERE.

Hoofdstuk 4: Met gelijk een vervolg op hoofdstuk 3, valideren wij in dit hoofdstuk F&F op het MITHIC hoge contrast test systeem in het Laboratoire d’Astrophysique de Marseille, om de effectiviteit te evalueren in het gevecht tegen de LWE in een realistische lab omgeving. Wij merken op dat de laboratorium prestatie van F&F consistent zijn met de simulaties, en dat het in staat is om op een robuuste wijze kunstmatig geïnjecteerde LWE effecten te verwijderen binnen vijf terugkoppeling iteraties, zelfs wanneer lage signaal ruis afbeeldingen worden gebruikt als input. Hoewel het algoritme nog steeds gevalideerd moet worden wanneer er ook tegelijk met een adaptief optiek systeem wordt gewerkt dat atmosferische turbulentie corrigeert, concluderen wij dat F&F een uitstekende oplossing is voor het LWE in het SPHERE instrument, en dat het in staat is om op een robuuste manier in real-time golffront controle uit te voeren zelfs onder de meest uitdagende observationele condities zonder dat het de wetenschappelijk observaties verslechterd.

Hoofdstuk 5: Optimale data reductie technieken zijn net zo cruciaal als hoge precisie optica wanneer je het meeste uit de data wilt halen dat geproduceerd wordt door hoge contrast systemen. Dit hoofdstuk presenteert de inspanningen om voor de apodised Lyot coronagraaf van het IRDIS nabij-infrarood subsysteem van SPHERE een kalibratie methode te ontwikkelen dat het mogelijk maakt om op een juiste manier coronagrafische en polarimetrische data te reduceren. Dit is belangrijk want de binnenste regio van circumstellaire schijf observaties, die cruciaal zijn voor het identificeren van de centrale holten in protoplanetaire transitie schijven, worden vaak gedomineerd door artefacten van het camera systeem. Kalibratie observaties met behulp van de kleine planeet Ceres zijn gebruikt om het extinctie profiel van de coronagraaf te bepalen, en deze zijn gecombineerd met uitgebreide optische modellen om het geobserveerde signaal volledig te begrijpen. Wij concluderen dat de coronagrafische en polarimetrische observaties van protoplanetaire schijven een volledig gemodelleerde analyse vereisen om op een goede manier de niet-lineaire diffractie effecten en polarisatie effecten mee te nemen: het is niet voldoende om simpelweg te normaliseren voor de coronagrafische verliezen. Wij valideren de accuraatheid van onze kalibratieroutine op polarimetrische observaties van de goed bestudeerde protoplanetaire schijf TW Hydrae, waar we met succes de bekende centrale holte kunnen terugvinden na het corrigeren voor instrumentele effecten.

6.5 Algemene conclusies

Het werk in hoofdstukken 2 tot en met 4 kaarten het eerste doel van dit proefschrift aan, door middel van demonstraties van meerdere technieken om beeldvlak golffront metingen uit te voeren met behulp van de wetenschappelijke camera afbeeldingen. Als deze worden geïmplementeerd in de beste instrumenten, kunnen deze technieken het uiteindelijk gehaalde contrast verbeteren met meerdere magnitudes door betere beeld stabilisatie te leveren. Het gebruik van holografische technieken is een krachtige en flexibele technologie om de informatie die een afbeelding bevat aan te passen, wat op dit moment ook al toepassingen vindt in andere gebieden van hoge contrast instrumenten. Voor de volgende generatie van hoge contrast instrumenten voor de ELT klasse telescopen waarvan het eerste licht wordt verwacht eind 2020 en begin 2030, laten hoofdstukken 3 & 5 zien hoe de combinatie van expertise in optica en data reductie bijna zeker nodig zal zijn om de onvoorziene uitdagingen voor deze instrumenten aan te gaan. Het streven is daarom dat dit proefschrift zal bijdrage aan een geïnformeerd ontwerp van de volgende generatie instrumenten, waardoor deze in staat gesteld worden om zwakkere planeten met kleinere banen en dus meer aardachtige planeten direct te detecteren en karakteriseren.