



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Novel approaches for direct exoplanet imaging: Theory, simulations and experiments

Por, E.H.

Citation

Por, E. H. (2020, December 11). *Novel approaches for direct exoplanet imaging: Theory, simulations and experiments*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/138516>

Version: 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/1887/138516>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/138516> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Por, E.H.

Title: Novel approaches for direct exoplanet imaging: Theory, simulations and experiments

Issue date: 2020-12-11

Nederlandse samenvatting

Sinds de oudheid heeft de mensheid gefilosofeerd over de veelvoud der werelden en het bestaan van buitenaards leven. Alleen in de laatste jaren zijn we begonnen deze vraag te beantwoorden. De eerste exoplaneet, een planeet die om een ster draait anders dan onze eigen Zon, werd ontdekt in 1992. Sindsdien hebben we duizenden anderen gevonden, van gasreuzen, zwaarder dan Jupiter, die in een paar dagen om hun ster draaien, tot planeten die verdacht veel lijken op onze Aarde.

Verschillende methodes zijn in de afgelopen jaren ontwikkeld om deze planeten te kunnen vinden. Veel van deze methods zijn indirect en leiden het bestaan van een planeet af door te kijken naar het licht van de ster waar die omheen draait. Om de chemische compositie van de atmosfeer van de planeten waar te kunnen nemen, moeten we echter kijken naar het licht van de planeet zelf. Het direct waarnemen van exoplaneten speelt hier een grote rol in. Door het licht van de ster en de planeet ruimtelijk van elkaar te onderscheiden, zijn we in staat om hoge kwaliteit spectra te nemen van het licht wat door de atmosfeer van de planeet heenschijnt. Hierdoor kunnen we zoeken naar de spectrale vingerafdruk van de bestanddelen van de atmosfeer.

Het direct waarnemen van exoplaneten is echter niet zo simpel als een telescoop op een ster richten en een plaatje schieten. Ten eerste, exoplaneten staan zeer dicht bij hun ster. De hoekscheiding is typisch tussen de een boogseconde en een aantal milli-boogseconden, wat overeenkomt met een aantal tientallen tot een aantal tienden van de Rayleigh limiet, de fundamentele oplossingslimiet door de golfeigenschappen van licht, voor huidige observatoria en de relevante golflengtes. Ten tweede is het licht van exoplaneten zeer zwak. Op de golflengtes die wij kunnen zien, kijken we naar het licht wat reflecteerd vanaf het planeet oppervlak. Op deze golflengtes verwachten we dat aardachtige planeten een contrast hebben van tussen de 10^{-9} en de 10^{-11} ten opzichte van hun ster. Zelfs in het nabij-infrarood, wanneer we het thermisch licht bekijken van de exoplaneten die nog steeds warm zijn van hun formatie, hebben gasreuzen nog steeds maar een contrast van 10^{-5} tot 10^{-6} .

Deze uitdagingen kunnen we aan door gebruik te maken van geavanceerde instrumentatie. Een typisch hoog-contrast cameras op een telescoop

maakt gebruikt van drie verschillende aanvalsvectoren, welke allemaal samen moeten werken om de beste kwaliteit afbeeldingen te kunnen nemen.

1. **Een coronagraaf.** Coronagraven zijn gecompliceerde optische apparaten die sterlicht wegfilteren uit onze afbeeldingen. Tegelijkertijd moet een coronagraaf zo veel mogelijk licht van de planeet doorlaten. Coronagraven worden vergeleken op basis van hun optische complexiteit, de hoeveelheid sterlicht die ze wegfilteren, de hoeveelheid planeetlicht die ze doorlaten en de minimale hoekafstand waarop ze genoeg planeetlicht doorlaten, de robustheid ten aanzien van kleine golffrontfouten, en hun vermogen om efficient golffront telemetrie te kunnen meten.
2. **Een adaptief optisch systeem of golffrontcontrole systeem.** Polijstfouten in de spiegels en lenzen, trillingen en vervormingen in het optisch systeem en, voor telescopen op Aarde, de turbulentie in de atmosfeer zorgen ervoor dat het binnenkomt licht vervormd en wordt verspreid in een wolk van licht in onze coronagrafische afbeelding. We maken gebruik van een adaptieve optisch of golffrontcontrole systeem om het golffront te stabilizeren, wat de coronagraaf in staat stelt om het sterlicht weg te filteren. Typisch meet een adaptief optisch systeem de vervorming van het golffront een aantal honderd tot een aantal duizend keer per seconde en gebruikt een vervormbare spiegel om een gelijke en tegenovergestelde vervorming tewegg te brengen om zo de vervorming op te heffen.
3. **Beeldverwerkingstechnieken.** Na het adaptief optisch systeem en de coronagraaf blijkt er nog steeds een wolk van licht op onze afbeelding te zitten. Dit is het resultaat van imperfecties in de twee hiervoor beschreven systemen. Geavanceerde Beeldverwerkingstechnieken benutten de overbodige informatie in onze afbeeldingen om zo het overige sterlicht weg te filteren. Dit geeft ons uiteindelijk een gecalibreerde afbeelding van de omgeving van onze ster.

Dit proefschrift tracht bij te dragen aan onze kennis van coronagraven en hun integratie in hoog-contrast cameras op een telescoop.

Hoofdstuk 2: het optimaal ontwerpen van geapodizeerde fase-masker coronagraven Een geapodiseerd fasemasker (APP) coronagraaf bestaat uit een enkele apodizerend fasemasker in een pupil vlak. In tegenstelling tot de meeste andere coronagraven filtert de APP coronagraaf niet

het sterlicht compleet weg, maar alleen in een gebied van interesse, ook wel “donkere zone” genoemd. Dit hoofdstuk presenteert een nieuwe manier om het fasepatroon te vinden, die het meeste planeetlicht doorlaat, voor een gegeven contrastniveau en vorm van de donkere zone en telescoop pupil. Dit geeft de fundamentele limieten van dit type coronagraaf.

Hoofdstukken 3 & 4: de enkele-modus complexe amplitude zuivering (SCAR) coronagraaf De SCAR coronagraaf combineert een rangschikking van glasvezels, elk gevoed door een microlens, in het brandspuntvlak en fasemasker in een pupilvlak hiervoor. Het vermogen de de enkele-modus glasvezels om modi te kunnen filteren relaxeert het fasepatroon op het fasemasker. Dit laat de SCAR coronagraaf veel kleinere hoekafstanden bereiken vergeleken met de APP coronagraaf voor vergelijkbare waarden voor de transmissie van planeetlicht. Deze twee hoofdstukken beslaan de theorie, simulaties en een prototype lab demonstratie dat een contrast bereikte van 10^{-4} op een hoekafstand van slechts $1\lambda/D$.

Hoofdstuk 5: Hoog-Contrast Cameras voor Python (HCIPy) HCIPy is een open-source software pakket geschreven in Python om de wisselwerking tussen golffrontcontrole en coronagrafische systemen te kunnen simuleren. Het beoogt om een modulair object-georiënteerd kader aan te bieden, om het mogelijk te maken om snel prototypes te kunnen ontwikkelen van een compleet hoog-contrast camera systeem. HCIPy wordt momenteel gebruikt op meerdere instituten ter wereld, zowel voor onderzoek als voor onderwijs.

Hoofdstuk 6: de asymmetrische wind-gevormde halo De straalstroom die zich op grote hoogte in onze atmosfeer bevindt, staat algemeen bekend als oorzaak voor een vlinderachige halo in coronagrafische afbeeldingen. Deze halo wordt veroorzaakt door de vertraging tussen de meting en de correctie door het adaptieve optisch systeem. We zien echter vaak een asymmetrie in de halo, waar een vleugel helderder is dan de andere. In dit hoofdstuk identificeren we de oorsprong van deze asymmetrie als de interferentie tussen de vertraagde fase-aberraties en de scintillatie veroorzaakt door de propagatie van licht van de straalstroom tot de grond. Deze asymmetrie kan nu worden opgenomen in het ontwerp voor toekomstige hoog-contrast camera instrumenten en mogelijkkerwijs kunnen worden verwijderd met beeldverwerkingstechnieken.

Hoofdstukken 7 & 8: de fase-geapodiseerd-pupil Lyot coronagraaf

De PAPLC combineert een fasemasker in de pupil met een standaard Lyot-achtige coronagraaf architectuur. In het bijzonder met een enkelzijdige donkere zone een mesvormig brandspuntvlakmasker, kan de coronagraaf minimale hoekafstanden bereiken van slechts $1.4\lambda/D$ met contrasten van 10^{-10} en met een planeettransmissie van $> 75\%$. Bovendien kan het licht wat op het brandspuntvlakmasker valt gebruikt worden voor het meten van golffrontfouten met veel vrijheidsgraden. Hoofdstuk 7 beslaat het ontwerproces en de theoretische eigenschappen van deze nieuwe coronagraaf. Hoofdstuk 8 presenteert de eerste lab demonstratie op de *Très Haute Dynamique 2* (THD2) proefbank bij de Observatoire de Paris. Deze demonstratie bereikte een gemiddeld contrast van 1.9×10^{-8} van $2\lambda/D$ tot $9\lambda/D$ in monochromatisch licht. Bovendien laten we golffrontmetingen zien, gebruikmakend van het licht wat gereflecteerd is vanaf het brandspuntvlakmasker, op ~ 3 maal het fundamentele limiet door fotonruis.

Een blik op de toekomst Hoewel de eerste generatie hoog-contrast camera instrumenten, VLT/SPHERE en Gemini/GPI, onze eerste poging was om extreme adaptieve optische systemen te combineren met coronagrafie, worden deze systemen momenteel geupgrade met de nieuwste coronagrafen en meer geavanceerde controle systemen. Bovendien worden nieuwe systemen zoals Magellan/MagAO-X en Keck/KPIC vanaf de grond opgebouwd om zo volledig te kunnen profiteren van de nieuwste technologieën. Hoog-contrast cameras op ruimtetelescopen zullen hun eerste grote test ondergaan met de lancering van de Roman Space Telescope. Dit zal golffrontcontrole met een coronagraaf demonstreren tot op contrasten die niet haalbaar zijn voor telescopen op Aarde.

De komende paar jaar zullen we de eerste afbeeldingen van de hemel gaan zien, genomen door deze nieuwe instrumenten. Dezelfde technologie zal worden toegepast op toekomstige observatoria op Aarde, zoals de ELT, de GMT en de TMT. Deze instrumenten zullen het mogelijk maken om rotsachtige exoplaneten om lichtere sterren in het mid- en nabij-infrarood te karakteriseren. Door fotometrie te doen op deze planeten kunnen we de rotatieperiode en misschien ook seizoenen en continenten zien. Kleine ruimtetelescopen zullen zoeken naar rotsachtige planeten rond Zonachtige sterren en deze karakteriseren. Over een aantal decennia, zullen toekomstige enorme ruimtetelescopen de hoekresolutie en de gevoeligheid hebben om een aantal dozijn Aardachtige exoplaneten vinden, zodat we misschien de vraag kunnen beantwoorden of er ergens anders leven is in dit universum.