



Universiteit
Leiden
The Netherlands

High-resolution integral-field spectroscopy of exoplanets

Haffert, S.Y.

Citation

Haffert, S. Y. (2019, November 26). *High-resolution integral-field spectroscopy of exoplanets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/80839>

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/1887/80839>

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

9 | Nederlandse samenvatting

Het veld van exoplaneten is in de afgelopen dertig jaar in een stroom versnelling beland na de ontdekking van de eerste paar exoplaneten. In 1992 was de eerst planeet rondom een andere ster dan de zon gevonden, en nog geen drie jaar later in 1995 werd de eerste exoplaneet rondom een zonachtige ster gevonden. Ondertussen zijn er duizenden planeten meer ontdekt, die zo divers zijn dat het erop lijkt dat elk systeem uniek is. Er zijn vreemde planeten zoals Kepler 51 b en d die een vergelijkbare dichtheid hebben als een suikerspin of de extreem hete planeet KELT-9b waar er ijzer en titanium in gas vorm in de atmosfeer aanwezig is. Naast de diversiteit in de planeten zelf is er ook een grote diversiteit in de planeetstelsels. Aan de ene kant is er Trappist-1 met 7 aardachtige planeten rondom een rode dwerg, en aan de andere kant hebben we HR8799 met vier gas reuzen die zich bevinden op een gigantische afstand van hun ster. Deze verscheidenheid in planeten en planeetstelsel stelt onze theorie over het ontstaan van planeten op de proef, aangezien we alles zouden moeten kunnen verklaren. Een van de hoofd vragen op dit moment is hoe planeten reageren op hun geboorte omgeving, doordat dit een erg belangrijke rol speelt in hun opbouw en uiteindelijke positie.

Het direct waarnemen van exoplaneten heeft een sleutelrol in het beantwoorden van deze vraag. Door de planeet te onderscheiden van de stofschiif waarin hij zich bevind kunnen we de interactie tussen de twee waarnemen. Naast dat deze fase belangrijke vragen beantwoordt over het ontstaan van planeten, is deze fase ook makkelijker waar te nemen doordat de planeten in deze fase nog heet en helder zijn. In oude systemen zoals ons zonnestelsel zijn de meeste planeten afgekoeld en zenden daardoor veel minder licht uit, het beste zouden we ons zonnestelsel nog kunnen zien door te kijken naar gereflecteerd zonlicht. De ratio tussen het uitgezonden licht van de zon en het gereflecteerde licht van de Aarde of Jupiter ligt rond de 10^{-10} en 10^{-9} . In vergelijking ligt dit intrinsieke contrast in de begin fase rond de 10^{-5} tot 10^{-6} , wat veel makkelijker waar te nemen is.

Helaas is het direct waarnemen van planeten nog steeds een heel uitdagende taak, zelfs voor de hete gas reuzen doordat het contrast heel docht bij de ster bereikt moeten worden. Alhoewel de huidige generatie telescopen zoals de Very Large Telescope (VLT) van ESO, met een 8.2m diameter, de planeten zouden moeten kunnen onderscheiden van de ster spelen er twee problemen die ons daarin beperken. De eerste is de turbulentie van de atmosfeer en de tweede is het intrinsieke contrast tussen de planeet en ster. Door de turbulentie wordt het pad van het licht verstoord waardoor de resolutie van de telescope wordt verminderd. Op goede sterrewachten

in de wereld wordt een resolutie van 1 arsecond gehaald in gemiddelde omstandigheden, bijna 40 keer groter dan het diffractie limiet! Tegenwoordig gebruiken bijna alle grote telescopen adaptieve optiek om de effecten van de atmosfeer tegen te gaan. Hierin wordt een vervormbare spiegel bestuurd om enkele honderden Hz to enkele duizenden Hz. Voor instrumenten gespecialiseerd voor de zoektocht naar exoplaneten worden zulke systemen tot het uiterste gedreven en worden daarom soms ook extreem adaptieve optiek (xAO) systemen genoemd.

Met de huidige generatie xAO systemen kunnen we het diffractie limiet van de telescope halen in het nabij infrarood. Maar dit is niet genoeg om de licht zwakke planeten te vinden doordat zij nog steeds veel zwakker zijn dan het diffractie patroon van de ster. Een coronagraaf is een gespecialiseerd stukje optiek dat ontworpen is als een extreem hoek gevoelig filter; het diffractie patroon van de ster wordt zoveel mogelijk onderdrukt terwijl er wordt geprobeerd zoveel mogelijk licht door te laten van de planeten. Helaas zijn coronagraven gevoelig voor elke golffrontfout die zich nog in het systeem bevindt, waardoor er toch nog ster licht wordt door gelaten. De golffrontfouten bestaan uit twee componenten. De eerste komt door atmosferische turbulentie die niet volledig gecorrigeerd is ofwel doordat het systeem niet perfect werkt danwel doordat het systeem specifieke fouten niet kan corrigeren. De tweede worden door het instrument zelf gemaakt. Er zijn namelijk verschillen tussen de optische elementen van het adaptieve optieke systeem waar de fouten worden gemeten en de uiteindelijke camera. Door dit verschil in optika zullen er kleine verschillen in de golffrontfouten zijn. Deze worden niet gemeenschappelijke pad fouten genoemd. Zowel de overgebleven turbulentie als de niet gemeenschappelijk pad fouten zorgen ervoor dat het sterlicht niet volledig weg gefilterd is. Daarom gebruiken we geavanceerde beeld verwerking technieken om de laatste beetje sterlicht weg te halen.

Door middel van spectroscopie kunnen we de verschillen zien tussen het planeet licht en het ster licht. Door dit verschil tussen de ster en planeet kunnen we met speciaal afgestemde spectraal filters het ster licht weg halen terwijl we het planeet signaal zoveel mogelijk ongemoeid laten. Een van de voordelen van deze techniek is dat het niet wordt gelimiteerd door de aanwezigheid van golffront fouten, wat wel een limiteerende factor is voor andere beeldverwerkings technieken. Verschillende keren is dit nu toegepast om exoplaneten te karakteriseren. Helaas hebben geen van de huidige xAO instrumenten voor exoplaneten de benodigde spectrale resolutie om deze techniek toe te passen. Als er hogere resolutie spectroscopie

beschikbaar is zou er dichter bij de ster gezocht kunnen worden; precies waar we verwachten dat de planeten zich bevinden! In deze thesis kijken we naar verschillende aspecten van hogere resolutie spectroscopie voor het direct waarnemen van exoplaneten.

Hoofdstuk 2+3: The Leiden EXoplanet Instrument

Door de jaren heen zijn er verschillende versies van het Leiden EXoplanet Instrument (LEXI) gebouwd. LEXI is een instrument dat elk jaar tijdelijk naar de William Herschel Telescope op La Palma wordt gebracht om daar te observeren. Het doel van LEXI was om verschillende manieren te testen hoe we instrumenten die adaptieve optiek bezitten het beste kunnen combineren met ruimtelijk opgeloste spectroscopie. Onze eerste versie van LEXI was een adaptief optiek systeem waarbij het veld van de spectrograaf werd gekozen doormiddel van een lange spleet. De resultaten die genomen zijn tijdens de eerste observatie ronde laten zien dat AO zowel de efficiëntie als de ruimtelijke resolutie verbeterd van dit type spectrograven. Na de bemoedigende resultaten is LEXI verbeterd. De tweede observatie ronde had het doel om de beeld kwaliteit te verbeteren en het spectraal bereik uit te breiden. De beeld kwaliteit hebben we verbeterd door de golffront sensor te vervangen van een Shack-Hartmann sensor naar de generalized Optical Differentiation Wavefront Sensor en door de apertuur van de telescoop te verkleinen. Door de verbeteringen konden we nieuwe xAO technieken testen die niet gemeenschappelijke fouten proberen te meten en corrigeren. Tijdens onze tweede keer op de telescoop hebben we succesvol de coronagraphic Modal Wavefront Sensor kunnen testen waarmee we bijna een factor 2 wonnen in contrast.

Daarnaast hebben we ook dankzij de goede kwaliteit van het AO systeem licht kunnen koppellen in een single-mode fibre. Een single-mode fibre kan worden gezien als een diffractie gelimiteerde fibre. LEXI gebruikt de single-mode fibre om het licht te transporteren naar een compacte cross-dispersed echelle spectrograaf die een design resolutie heeft van rond de $\lambda/\Delta\lambda \approx 100000$. De resultaten die we hebben behaald met observaties van de ster Aldebaran laten zien dat onze uiteindelijk resolutie boven de 92000 ligt. Onze volgende stap was het ontwikkelen van een bundle van single-mode fibres die door de spectrograaf werd geanalyseerd waarmee we ruimtelijk opgeloste spectra konden nemen. Uiteindelijk was deze nieuwe versie getest tijdens de derde observatie ronde van LEXI.

Chapter 4+5: De Single-mode Complex Amplitude Refiner (SCAR) coronagraaf

In deze twee hoofdstukken wordt het concept van de Single-mode Complex

Amplitude Refiner coronagraaf en de eerste lab experimenten gedemonstreerd. De SCAR coronagraaf maakt gebruik van de extra vrijheids graad die single-mode fibers bieden dankzij hun vermogen om elektrische velden te filteren. De fibers worden door micro-lenses belicht om het beeldveld te vergroten zodat het mogelijk wordt om ook met een single-mode fiber bundel naar exoplaneten te zoeken. We combineren dit met een stuk optiek in de apertuur van het systeem dat de fase van het inkomende licht aanpast, hierdoor kunnen wij het sterlicht in gekozen fibers weg filteren. De coronagraaf heeft een aantal nuttige voordelen zoals de kleine minimale hoek separatie waar planeten gezocht kunnen worden en de relatief hoge throughput. Onze lab resultaten bevestigen het principe achter de coronagraaf en demonstreren ook dat we minimaal een contrast van 10000 op 1 λ/D kunnen halen.

Chapter 6: A duo of accreting proto-planets around the young star PDS 70

In dit hoofdstuk heb ik de resultaten gepresenteerd van observaties die waren genomen met MUSE op de Very Large Telescope. MUSE is AO gecorrigeerde spectrograaf met een ruimtelijke resolutie van 50 milliarcseconden. Met MUSE is het gelukt om rondom de jonge ster PDS 70 twee proto planeten te detecteren die nog actief aan het accreteren zijn. De planeten zijn gas reuzen met een massa van een paar keer die van Jupiter. Waarschijnlijk zijn de twee ook aan het einde van hun groei fase gezien de accretie snelheid van $\approx 10^{-8} M_J/\text{yr}$. Volgens onze observaties bevinden deze planeten zich ook dichtbij een 2:1 baan resonantie, wat door veel modellen werd voorspeld als waarschijnlijk configuratie voor systeem met meerdere planeten. De vondst van dit systeem is erg belangrijk aangezien dit tot nu toe het enige systeem is met meerdere planeten die zich nog in de stofschijf van de ster bevinden. Hierdoor kunnen veel planeet schijf interactie theorieën getoetst worden, waardoor we weer meer te weten komen over het ontstaan van planeten.

Chapter 7: Highly multiplexed Bragg gratings

Voor een spectrograaf met een groot beeldveld is er een afweging tussen het spectraal bereik, spectrale resolutie en beeldveld voor gegeven detector. In dit hoofdstuk presenteren we een nieuwe methode die gebaseerd is op gemultiplexde Volume Bragg Gratings (VBGs) die het spectrum optisch analyseren, waardoor de noodzaak verdwijnt om heel het spectrum waar te nemen. We hebben laten zien dat zulke VBGs met veel gemultiplexde lijnen gebruikt kunnen worden voor kwantitatieve detectie van gas soorten met een significant kleinere detector. Daardoor is het mogelijk om voor

een gegeven detector een groter beeldveld te hebben dan voor een conventionele spectrograaf. We stellen voor om de VBGs te implementeren met akoesto-optische tralies die dynamisch ingesteld kunnen worden op hoge snelheid en werken over heel het spectraal bereik van het nabij UV to in het infrarood. Doordat de grating dynamisch ingesteld kan worden kan er ook makkelijk gezocht worden naar verschillende gas soorten wat het instrument erg flexibel maakt.

Een blik op de toekomst

Onze observaties met MUSE laten zien dat hogere resolutie spectroscopy erg geschikt is voor het direct waarnemen van planeten. Er zijn plannen om in de komende jaren meerdere xAO instrumenten een upgrade te geven zodat ze toegang hebben tot spectroscopy. SPHERE wordt gekoppeld aan de spectrograaf CRIRES+, de KECK telescoop krijgt een ook een glasvezel verbinding van de xAO imager naar NIRSPEC en SCEXAO op de SUBARU telescoop wordt gekoppeld aan RHEA. De technieken die ontwikkeld zijn in deze thesis om xAO systemen te koppelen met spectrograven zijn daar in het bijzonder geschikt voor.

Dit werk legt de fundering om in de toekomst met de Extremely Large Telescope hoge resolutie spectroscopy te gebruiken voor de detectie van gereflecteerd licht van oude en koude exoplaneten zoals de Aarde. Daarnaast zou deze techniek ook gebruikt kunnen worden om biosignalen te detecteren zoals de zuurstof band. Hoge resolutie spectroscopy is een techniek die gelimiteerd is door fotonen ruis. Daarom wordt het detectie limiet bepaald door de hoeveelheid licht die we kunnen ontvangen van de ster en planeet. Het is mogelijk om met de huidige telescopen Proxima Centauri b te karakteriseren, alleen zijn er bijna honderd nachten aan observatie tijd voor nodig om een detectie te garanderen. Met een ELT zouden we de tijd die nodig is drastisch kunnen verlagen. ELTs komen met twee voordelen, de eerste is dat de telescope een groter oppervlak heeft en meer licht verzamelt, en de tweede is de hogere ruimtelijke resolutie. Met een ELT zouden we Proxima Centauri b kunnen detecteren in een enkele nacht in tegenstelling tot de honderd nachten met de Very Large Telescope. Door hoge resolutie spectroscopy met extreme adaptieve optica toe te voegen aan ELTs kunnen we beginnen met het bestuderen van oudere en mogelijk ook bewoonbare planeten en daarmee kunnen we een van de oudste vragen van de mensheid beantwoorden; Zijn wij alleen?

