



Universiteit
Leiden
The Netherlands

High-contrast spectroscopy of exoplanet atmospheres

Landman, R.

Citation

Landman, R. (2024, June 11). *High-contrast spectroscopy of exoplanet atmospheres*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3762663>

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/1887/3762663>

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

Nederlandstalige samenvatting

In 1995 werd de eerste exoplaneet gevonden rondom een ster vergelijkbaar met onze eigen zon. Michel Mayor en Didier Queloz vonden een zogenaamde hete Jupiter, een planeet met vergelijkbare grootte als Jupiter maar dan heel dicht bij zijn ster. Sinds die ontdekking zijn er meer dan 5000 exoplaneten gevonden met verschillende ontdekkingsmethoden. De belangrijkste ontdekkingsmethoden zijn de transit methode, waarbij een kleine verzwakking van de ster wordt waargenomen als een planeet een deel van het licht blokkeert, de radiële snelheids methode, waarbij een Dopplerverschuiving van de ster wordt waargenomen als gevolg van de zwaartekracht van de planeet, en het direct fotograferen van exoplaneten. Met deze methodes hebben we ontdekt dat er een grote diversiteit is in het type planeet en dat er veel stelsels zijn die heel anders zijn dan ons eigen zonnestelsel. De ontdekking van deze verschillende planeten leidt tot vele vragen: Hoe ontstaan deze planeten? Hoe zien deze werelden eruit? Is er leven mogelijk op deze andere werelden?

Exoplaneet atmosferen

De ontdekkingsmethoden kunnen ons al iets over de algemene eigenschappen van de planeet vertellen. De transit methode geeft ons bijvoorbeeld de straal van de planeet en de radiële snelheidsmethode de massa. Toch willen we meer leren over de exoplaneten. Het karakteriseren van de oppervlakte van exoplaneten is met huidige technieken nog onmogelijk, maar we kunnen wel wat leren over de atmosferen van deze planeten. Dit wordt voornamelijk gedaan door spectroscopische analyse van de exoplaneet. Dit kan ons bijvoorbeeld iets vertellen over de chemische samenstelling, de aanwezigheid van wolken, en de sterkte van luchtstromingen in de atmosfeer van de planeet.

Transmissie spectroscopie

Bij transmissie spectroscopie wordt gebruik gemaakt van de unieke oriëntatie van transit planeten. Als de planeet voor de ster beweegt, gaat een deel van het sterlicht door de dunne laag atmosfeer van de planeet heen. Afhankelijk van de samenstelling en eigenschappen van de atmosfeer wordt een gedeelte van het spectrum geabsorbeerd. Deze methode is bijvoorbeeld gebruikt om waterdamp te vinden in een groot aantal planeten. Eerst werd dit voornamelijk vanuit de ruimte gedaan met de Hubble Space Telescope (HST). Met de komst van de James Webb Space Telescope (JWST) kunnen we naar meer verschillende moleculen zoeken en kleinere planeten karakteriseren. Ook kunnen we dit tegenwoordig vanaf de

grond met hoge resolutie spectroscopie. Hierbij gebruiken we de snel veranderende Dopplerverschuiving van de exoplaneet om absorptie van de planeet te onderscheiden met absorptie door de atmosfeer van de aarde.

Directe spectroscopie

De andere optie is om de ster en planeet ruimtelijk van elkaar te onderscheiden en het uitgestraalde of gereflecteerde licht van de planeet direct waar te nemen. Dit is met de huidige telescoop alleen nog mogelijk voor jonge massieve planeten die op grote afstand van hun ster staan. Een belangrijke eigenschap van deze planeten is de koolstof tot zuurstof ratio, die ons iets kan vertellen over chemische samenstelling van de geboorteplaats van dit soort planeten. Daarnaast kan de rotatiesnelheid van de planeet ons iets vertellen over zijn evolutie. Bij het samentrekken van de planeet onder zijn eigen zwaartekracht zou de planeet steeds sneller moeten gaan ronddraaien door behoud van hoekmoment. Het bestuderen van de rotatiesnelheid van een populatie van planeten kan ons dus iets vertellen over de fysische processen die een rol spelen bij het samentrekken van de planeet.

Technologieën voor het direct waarnemen van exoplaneten

Het direct waarnemen van exoplaneten is een enorme technologische uitdaging. Dit komt doordat de exoplaneet vele malen minder licht uitstraalt dan de ster en heel erg dichtbij staat. Een aardachtige planeet om een ster zoals de zon heeft een contrast van 10^{-10} , en staat op een afstand van ongeveer 100 milliboogseconde (ongeveer 0.00003 graden). Dit is met de huidige telescopen en technologie nog onmogelijk, maar het is wel mogelijk om zogenaamde super-Jupiters te observeren. Dit zijn planeten die nog jong zijn en daardoor nog veel warmte over hebben van hun formatie. Deze hebben typische contrasten van $\sim 10^{-5}$ in het nabij-infrarood. Om dit te doen zijn er speciale hoog-contrast instrumenten, die bestaan uit de volgende componenten:

- **Een adaptief optiek systeem:** Het golffront van het licht van de ster wordt vertroebeld door onze atmosfeer. Dit leidt tot onscherpe plaatjes van de ster, waardoor we de exoplaneet niet meer kunnen zien. Daarom gebruiken we adaptieve optiek om het golffront weer vlak te maken. Een adaptief optiek systeem bestaat ten eerste uit een golffront sensor om het golffront te meten. Typische golffront sensoren die tegenwoordig gebruikt worden zijn de pyramide-golffront sensor en de Zernike golffront sensor. Dit zijn twee van de meest gevoelige golffront sensoren, die optimaal gebruik maken van het aanwezige sterlicht om nauwkeurig het golffront te bepalen. Een nadeel

van deze gevoelige sensoren is dat ze niet lineair zijn bij sterke turbulentie. Dit zorgt ervoor dat ze niet gebruikt kunnen worden onder slechte omstandigheden of dat we ze moeten aanpassen om toch te kunnen werken, wat ten koste gaat van hun gevoeligheid.

- **Een coronagraaf:** Zelfs als we het golffront corrigeren en scherpe foto's kunnen maken van de ster, zorgt diffractie ervoor dat de planeet verstopt zit in het sterlicht. Om zo veel mogelijk sterlicht te blokkeren maken we gebruik van een coronagraaf. Dit is een optische component die het sterlicht blokkeert, maar zoveel mogelijk van het signaal van de planeet doorlaat.
- **Een data-reductie algoritme:** Helaas lekt er vaak toch sterlicht door de coronagraaf door niet gecorrigeerde golffrontfouten. Daarom gebruiken we slimme data-reductie algoritmes om toch de planeet te kunnen vinden. Er zijn verschillende algoritmes, die allemaal gebruik maken van een zogenaamde diversiteit tussen het sterlicht en het planeetlicht. Van belang voor dit proefschrift is de spectrale diversiteit tussen de ster en de planeet. Ten eerste heeft het spectrum van de planeet een andere Dopplerverschuiving dan de ster omdat hij om zijn ster heen beweegt met grote snelheid. Daarnaast heeft de planeet moleculen in zijn atmosfeer, terwijl dit niet het geval is voor de meeste sterren. Door naar de unieke vingerafdruk van deze moleculen te zoeken kunnen we toch de planeet vinden.

Dit proefschrift

Dit proefschrift kan opgesplitst worden in twee delen: Het eerste deel (hoofdstukken 2 en 3) gebruikt huidige instrumenten om de atmosferen van twee van de meest toegankelijke soorten planeten te karakteriseren: een ultra-hete Jupiter en een super-Jupiter. Het tweede deel (hoofdstukken 4, 5 en 6) beschrijft de ontwikkeling van belangrijke technologieën om in de toekomst kleinere en koudere planeten direct waar te nemen.

Hoofdstuk 2: OH in de atmosfeer van een ultra-hete Jupiter

Ultra-hete Jupiters zijn planeten met een temperatuur van > 2000 K op hun dagzijde. Bij deze temperaturen worden de meeste moleculen, zoals water, thermisch gedissocieerd in hun atomaire componenten. Een van de dissociatieproducten van water is het molecuul OH. Dit hoofdstuk presenteert de detectie van OH in de atmosfeer van de ultra-hete Jupiter WASP-76b. Dit molecuul hebben we gevonden met behulp van hoge resolutie transmissiespectroscopie met het CARMENES-

instrument. De detectie van dit molecuul bevestigt dat water thermisch wordt gedissocieerd in deze planeet.

Hoofdstuk 3: Atmosferische karakterisatie van β Pictoris b

Direct waargenomen super-Jupiters bieden een uniek laboratorium voor het testen van theorieën over planetenvorming en -migratie. Hoge resolutie spectrografen met adaptieve optiek laten ons de atmosferen van dit soort planeten karakteriseren. We hebben β Pictoris b waargenomen met behulp van het gerenoveerde CRIRES+ instrument. Met behulp van deze waarnemingen konden we koolmonoxide en water in zijn atmosfeer detecteren en vonden we dat de planeet een lagere C/O-verhouding heeft dan de zon. Bovendien vinden we dat de planeet een rotatiesnelheid ($v \sin i$) van 19.9 ± 1.0 km/s heeft, wat een daglengte van 8.7 ± 0.8 uur geeft. Tot slot laten we ook de aanzienlijk verbeterde kwaliteit van CRIRES+ ten opzichte van de oude CRIRES zien voor dergelijke waarnemingen.

Hoofdstuk 4: Afwegingen in hoog-contrast integraalveldspectroscopie

Het combineren van hoogcontrastbeeldvorming met middelmatige tot hoge resolutie spectroscopie heeft het potentieel om de detectiemogelijkheden aanzienlijk te verbeteren. Deze integraalveldspectrografen worden echter vaak beperkt door de grootte van de detector. In dit hoofdstuk proberen we het optimale instrument te vinden voor het detecteren van exoplaneten met zo'n instrument. We bestuderen de afwegingen tussen spectrale resolutie, spectrale bandbreedte, golflengtebereik en gezichtsveld en leiden nieuwe relaties af tussen de signaal-ruisverhouding en deze eigenschappen. We vinden dat middelmatige spectrale resoluties al een aanzienlijke toename van de detectiemogelijkheden bieden en dat deze techniek het meest gunstig is voor dichtbijgelegen exoplaneten, waar we beperkt zijn door ruis van stellaire speckles.

Hoofdstuk 5: Optimaal ontwerp van golffront sensoren

Adaptieve optiek (AO) is een van de cruciale technologieën om het potentieel van de ELT's te vervullen. Directe beeldvormingsinstrumenten op deze ELT's moeten hun aansturingscyclus met meerdere kHz draaien om mogelijk aardachtige planeten waar te nemen. Dit betekent dat we zeer efficiënte golffront sensoren nodig hebben die het golffront nauwkeurig kunnen meten met een minimum aantal fotonen. Dit hoofdstuk rapporteert over de zoektocht naar een "optimale" golffront sensor, die alle beschikbare fotonen gebruikt om de golffront te meten. We presenteren optimale ontwerpen voor verschillende telescopen en laten zien dat deze ontwerpen dicht bij de theoretische limiet liggen. Daarnaast onderzoeken

we de mogelijkheid om de sensor en het reconstructiealgoritme gezamenlijk te optimaliseren en vinden dat dit het ontwerpbereik vergroot, wat leidt tot sensoren met een groter dynamisch bereik.

Hoofdstuk 6: Golffront reconstructie met neurale netwerken

Een van de belangrijkste problemen met zeer gevoelige golffront sensoren, zoals de pyramide golffront sensor (PWFS), is dat ze zeer niet-lineair worden voor grote golffrontfouten. Dit beperkt hun dynamisch bereik en daarmee de prestaties van het AO-systeem op de hemel. In dit hoofdstuk rapporteren we over tests om het dynamisch bereik van de niet-gemoduleerde PWFS uit te breiden door een niet-lineaire reconstructor te gebruiken op basis van convolutionele neurale netwerken. We laten zien dat onze niet-lineaire reconstructor het dynamisch bereik van de golffront sensor aanzienlijk kan verbeteren en leidt tot scherpere afbeeldingen met MagAO-X.