



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Spectroscopic characterization of exoplanets : from LOUPE to SINFONI

Hoeijmakers, H.J.

Citation

Hoeijmakers, H. J. (2017, November 23). *Spectroscopic characterization of exoplanets : from LOUPE to SINFONI*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/57507>

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/1887/57507>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/57507> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Hoeijmakers, Jens

Title: Spectroscopic characterization of exoplanets : from LOUPE to SINFONI

Date: 2017-11-23

NEDERLANDSE SAMENVATTING

HET BESTAAN VAN EXOPLANETEN

Het zonnestelsel herbergt acht planeten, waarvan er vier rotsachtig zijn die zich in de binnenste delen van het zonnestelsel bevinden, en vier grotere planeten bestaande uit voornamelijk gas en ijs, verder weg van de Zon. Speculaties over het bestaan van soortgelijke planetensels rond andere sterren worden al vele honderden jaren gedaan, al ver voor het tijdperk van de moderne sterrenkunde. Het heeft echter tot 1995 geduurd voordat de eerste zogeheten *exoplaneet* daadwerkelijk werd ontdekt. Deze planeet draait rond de ster 51 Pegasi, een met het blote oog nauwelijks waarneembare ster in het sterrenbeeld Pegasus. 51 Pegasi b bleek een gasreus te zijn in een zeer korte baan om zijn ster, op een afstand die 20 keer kleiner is dan de afstand tussen de Aarde en de Zon. Op deze geringe afstand tot de ster ontvangt de planeet extreme hoeveelheden sterlicht, waardoor de temperatuur oploopt tot meer dan 1000 graden Celcius. Een dergelijke planeet komt in ons eigen zonnestelsel niet voor, en dus kwam de ontdekking van deze zgn. *hete Jupiter* erg onverwacht. In de jaren na 1995 werden al snel meerdere van dit soort planeten ontdekt, en de vraag rees of de configuratie van ons zonnestelsel (met rotsachtige planeten dichtbij de zon en gasreuzen verder weg) misschien eerder uitzondering dan regel is. De theorieën over de vorming van ons zonnestelsel waren evenmin toereikend om het bestaan van dit type planeet te verklaren, en er moest naar nieuwe mechanismen voor planeetvorming worden gezocht. Zodoende had de ontdekking van 51 Pegasi b onmiddellijk een enorme wetenschappelijke impact.

RADIËLE SNELHEDEN EN TRANSITS

Exoplaneten zijn moeilijk waar te nemen omdat ze veelal te dicht bij hun moederster staan om ze direct te kunnen onderscheiden, daar de ster vele malen meer licht uitzendt dan de planeet. Het grootste deel van de tot nu toe bekende exoplaneten zijn daarom ontdekt door hun indirecte effecten op het licht van de ster.

Doordat de planeet en de ster zwaartekracht op elkaar uitoefenen draaien beiden om het gemeenschappelijke zwaartepunt. Hierdoor beweegt de ster periodiek heen en weer, en de radiële component van deze beweging (langs de kijklijn zoals gezien vanaf de Aarde) is te meten via het Doppler effect in het spectrum van de ster. Omdat dit effect wordt veroorzaakt door de

zwaartekracht, is het groter voor planeten die zwaar zijn en dicht bij hun ster staan. Bovendien kunnen de massa en de baan van de planeet worden afgeleid.

In een klein deel van de gevallen ligt de kijklijn vanaf Aarde precies in het baanvlak van de planeet. Vanaf Aarde gezien gaat zo'n planeet eens per omwenteling (dus eens per exoplaneet-jaar) voor de moederster langs. Wanneer dit gebeurt blokkeert deze een deel van het sterlicht, waardoor de ster een fractie minder helder lijkt te worden. Dit effect heet een planeetovergang ofwel *transit*, en komt eens per omwenteling voor.

Evenals de radiële snelheidsmethode is ook de transitmethode vooral gevoelig voor grote planeten die dicht bij hun ster staan. Een grote planeet zorgt namelijk voor een groter helderheidsverschil, en wanneer hij dichtbij staat komt de transit vaker voor, waardoor deze makkelijker te herkennen is. Bovendien is de kans dat het baanvlak precies gunstig ligt hoger als de planeet dicht bij de ster staat. De kans dat de baan van een willekeurig gekozen hete Jupiter voor de ster langs gaat kan oplopen tot $\sim 10\%$, terwijl dit voor een planeet zoals de Aarde minder dan $0,5\%$ is. Door deze selectie-effecten is het niet verwonderlijk dat hete Jupiters de eerste exoplaneten zijn die met deze methoden zijn gevonden.

DE POPULATIE VAN EXOPLANETEN

Sinds de ontdekking van de eerste hete Jupiters zijn er middels beide detectiemethoden meer dan 3000 exoplaneten ontdekt. Veel van deze planeten zijn kleiner en koeler dan hete Jupiters. Hierdoor is duidelijk geworden dat hete Jupiters relatief zeldzame planeten zijn en dat de populatie van exoplaneten erg divers is. Ook blijkt uit de statistiek dat een groot deel van de sterren een planetenstelsel herbergt, en dat de configuratie van ons eigen zonnestelsel niet per sé bijzonder, noch typisch is. Dit doet vermoeden dat er vele planeten bestaan die lijken op de Aarde: Rotsachtige planeten met een atmosfeer waarin leven mogelijk kan bestaan. Aard-achtige planeten zijn relatief klein en koel, en zijn daardoor nog moeilijker waar te nemen dan de veel zwaardere hete Jupiters. De zoektocht naar dit soort planeten is daarom in volle gang, en er worden regelmatig veelbelovende kandidaten gevonden. Zo is er in augustus 2016 middels de radiële snelheidsmethode een rots-achtige planeet gevonden rond de ster Proxima Centauri b. Deze ster staat van alle sterren het dichtst bij ons zonnestelsel, en de planeet draait op een zodanige afstand dat de temperatuur waarschijnlijk laag genoeg is voor het bestaan van vloeibaar water op het planeetoppervlak. Vloeibaar water wordt als een van de belangrijkste voorwaarden voor biologische processen beschouwd, en het gebied rond de ster waarin de temperatuur zodanig is dat water in vloeibare vorm kan bestaan wordt aangeduid als de *leefbare zone*. De vondst van

een planeet in de leefbare zone rond de dichtstbijzijnde ster was terecht wereldnieuws.

Niet veel later, in februari 2017 werd het TRAPPIST-1 systeem ontdekt, vernoemd naar het Belgische instrument waarmee deze is via de transit methode ontdekt. Dit systeem herbergt minstens zeven planeten, waarvan er tenminste drie in de leefbare zone om hun ster draaien. Naar verwachting worden er in de nabije toekomst meerdere nieuwe instrumenten opgeleverd ten behoeve van nog gevoeliger transit en radiële snelheids surveys, en zodoende zullen er in de toekomst waarschijnlijk nog veel meer van dit soort Aard-achtige planeten worden gevonden.

SPECTROSCOPISCHE KARAKTERISATIE

Om vast te stellen of een Aard-achtige planeet daadwerkelijk leefbaar is, moeten fundamentele eigenschappen van de atmosfeer zoals de temperatuur, de chemische samenstelling en dynamica nauwkeurig worden gemeten. Dit is mogelijk door het sterlicht wat op de planeet valt (of het licht wat de planeet intrinsiek uitzendt) te analyseren met behulp van een spectrograaf: De temperatuur is af te leiden uit de verdeling van straling op korte en langere golflengtes (een koele planeet straalt relatief meer rood licht uit dan blauw). Afhankelijk van de chemische samenstelling zal het spectrum van de planeet op bepaalde golflengtes straling absorberen of uitzenden. Dit vormt een patroon van absorptie (c.q. emissie) lijnen wat uniek is voor elk atoom en molecuul. Atmosferische dynamica is in beginsel te meten m.b.v. het Doppler effect, daar het gas in de atmosfeer op verschillende plekken een andere radiële snelheid kan hebben.

Een dergelijke analyse is ook van toepassing op sterren, en wordt al ± 100 jaar succesvol toegepast. Hierdoor is het relatief eenvoudig om de eigenschappen van een ster nauwkeurig te bepalen, maar voor een exoplaneet is dit veel moeilijker omdat het licht van de planeet vele malen zwakker is dan de ster en doordat fysische processen in planeetatmosferen doorgaans minder bekend zijn dan die in sterren. Om deze reden worden er steeds grotere en geavanceerdere telescopen en instrumenten gebouwd, en worden er steeds uitgebreidere en precieze modellen ontwikkeld waarmee de atmosferen van planeten kunnen worden gesimuleerd.

HOGE RESOLUTIE SPECTROSCOPIE VANAF DE GROND

Het meten van het spectrum van een exoplaneet wordt niet alleen bemoeilijkt door het overheersende sterlicht, maar ook door instabiliteit van de instrumentatie en de effecten van de Aard-atmosfeer, welke zich tussen de telescoop op de grond en het exoplaneetsysteem bevindt. Om aan dit soort

instabiliteit te ontkomen wordt voor de spectroscopische karakterisatie van exoplaneten veelal gebruik gemaakt van ruimte telescopen, met name de Hubble en Spitzer telescopen. Het nadeel van een spectrograaf aan boord van een ruimte-telescoop is dat deze over het algemeen een relatief lage spectrale resolutie heeft. Dat wil zeggen dat het instrument niet in staat is om absorptielijnen van elkaar te onderscheiden als deze bijna dezelfde golflengte hebben. Een instrument met hoge spectrale resolutie kan individuele absorptielijnen wel van elkaar onderscheiden, maar is groter en zwaarder en daarom duurder om in de ruimte te plaatsen.

In de exoplaneet groep in Leiden is een techniek ontwikkeld die gebruik maakt van de hoge resolutie van dit soort spectrografen om de spectraallijnen van een planeet te onderscheiden van die van de ster en de Aard-atmosfeer. Door de hoge spectrale resolutie is de spectrograaf namelijk gevoelig voor het Doppler effect als gevolg van de baansnelheid van de planeet. De radiële component van de planeet verandert terwijl de planeet zijn baan aflegt, en als de baan van de planeet bekend is, is precies uit te rekenen wat de radiële snelheid van de planeet op elk tijdstip is. Deze snelheidsvariatie is uniek voor de planeet, en zorgt ervoor dat de zwakke planeetlijnen van de veel helderdere sterlijnen en de Aardse atmosfeer te onderscheiden zijn.

DIT PROEFSCHRIFT

Met de huidige telescopen en instrumenten zijn we nog niet in staat om Aardachtige planeten spectroscopisch te karakteriseren, aangezien het signaal van deze planeten te zwak is. Deze techniek is daarom voornamelijk succesvol toegepast met infra-rood spectrografen en absorptielijnen van CO en water moleculen in de atmosferen van hete Jupiters. Hete Jupiters zijn groot en warm, waardoor deze signalen relatief sterk zijn en karakterisatie makkelijker is. Het tweede hoofdstuk van dit proefschrift beschrijft hoe deze techniek ook op visuele golflengtes kan worden toegepast, alwaar de absorptiespectra van hete Jupiters naar verwachting vele duizenden lijnen van gasvormig titanium en vanadium-oxide bevatten. Deze moleculen absorberen sterlicht efficiënt in het visuele deel van het spectrum en kunnen daarmee een belangrijke bron van energie zijn die de atmosfeer van de planeet op bepaalde plekken sterk verhit. Deze gassen kunnen daarom een belangrijke rol spelen in het klimaat van de planeet. Waarnemingen op lage spectrale resolutie suggereren dat TiO en VO daadwerkelijk in sommige hete Jupiters aanwezig zijn, maar zijn vaak niet in staat om deze moleculen eenduidig te identificeren omdat de individuele absorptielijnen niet kunnen worden opgelost. Op hogere spectrale resolutie is het wel mogelijk om het unieke absorptiepatroon van deze moleculen op te lossen, en in dit hoofdstuk tonen wij aan dat transit waarnemingen op hoge resolutie erg gevoelig zijn voor lage concentraties TiO en VO

in hete Jupiters. Echter, om de absorptielijnen te kunnen identificeren is een nauwkeurige blauwdruk nodig van de absorptiespectra van deze moleculen. Wij tonen aan dat de gangbare model spectra niet overeenkomen met TiO en VO absorptie in de atmosferen van koele sterren (welke veel TiO en VO bevatten), waardoor tot op heden niet vast te stellen is of de absorptielijnen van deze moleculen in de transit spectra van hete Jupiters voorkomen, en we concluderen dat de TiO en VO spectra nauwkeurig gemeten of berekend moeten worden voordat dit soort moleculen in de atmosferen van exoplaneten met behulp van hoge resolutie spectroscopie gevonden kunnen worden.

In hoofdstuk 3 passen we dezelfde techniek toe, maar ditmaal om het optische gereflecteerde licht van de hete Jupiter τ Boötis b te detecteren. Het licht wat direct door een planeet wordt gereflecteerd bevat waardevolle informatie over de reflectieve eigenschappen van de planeet. Zo laat het bijvoorbeeld zien of de planeet bedekt is door een reflectief wolkendek, of dat de atmosfeer helder is, in welk geval de planeet donkerder is. Deze planeet werd al in 1997 ontdekt rond de heldere ster τ Boötis. Doordat dit systeem zo helder is, zijn er in de loop der jaren meerdere pogingen gedaan om het sterlicht wat door deze planeet gereflecteerd wordt waar te nemen, maar zonder succes. In dit hoofdstuk combineren we meer dan 2100 hoge-resolutie spectra van dit systeem die tussen 1998 en 2013 met verschillende telescopen en instrumenten zijn waargenomen. Zelfs met deze hoeveelheid data blijkt het niet mogelijk om het gereflecteerde licht van de τ Boötis b waar te nemen, hetgeen betekent dat de planeet donker is, en geen reflecterend wolkendek heeft. In dit opzicht komt τ Boötis b overeen met andere hete Jupiters, welke typisch weinig reflectief zijn. Dit is echter gebaseerd op langdurige waarnemingen van de fase-veranderingen van deze planeten met behulp van ruimte-telescopen. Door ruim 2100 hoge resolutiespectra van Aardse telescopen te combineren, zijn wij in staat om soortgelijke limieten te halen.

In hoofdstuk 4 verschuiven we onze aandacht naar de Aarde. De Aarde is voor zover bekend de enige leefbare, en levende planeet. Daarom is de zoektocht naar leefbare exoplaneten gericht op planeten die "Aard-achtig" zijn. Maar om vast te stellen of een planeet daadwerkelijk op de Aarde lijkt is het allereerst noodzakelijk om te weten hoe de Aarde er uit zou zien als het een exoplaneet was geweest. Hiertoe zijn Aard-observaties vanuit de ruimte nodig. In de context van klimaatwetenschap en meteorologie wordt de Aarde continu door satellieten van buitenaf geobserveerd, maar deze satellieten staan relatief dicht bij de Aarde en nemen de Aarde in detail waar. Het is lastig om hieruit de globale eigenschappen van de Aarde af te leiden, en daarom zijn observaties vanaf grotere afstand noodzakelijk. Hoofdstuk 4 presenteert daarom een prototype voor LOUPE, wat staat voor *Lunar Observatory for Unresolved Polarimetry of Earth* (Onopgeloste, d.w.z. globale polarimetrische Aard-observaties vanaf het oppervlak van de Maan). Dit apparaat meet zowel de lichtintensiteit als de polarisatie als functie van golflengte, en

karakteriseert zodoende het polarisatiespectrum van de Aarde. Polarisatiemetingen van exoplaneten zijn op dit moment nog niet mogelijk, maar zullen in de toekomst belangrijk zijn om de oppervlakte eigenschappen van exoplaneten vast te stellen. Zo heeft verstrooiing van zonlicht door waterdruppeltjes unieke polarisatie-eigenschappen, waardoor polarisatiespectra van exoplaneten in de toekomst van groot belang zullen zijn in de zoektocht naar leefbare planeten. In dit hoofdstuk tonen we aan dat LOUPE zodanig klein en licht kan zijn dat het mogelijk is om aan bestaande maanmissies toe te voegen, zonder een grote impact op het budget of de complexiteit van een dergelijke missie.

In hoofdstuk 5 combineren we de spectroscopische methoden uit hoofdstukken 2 en 3 met hoge-contrast waarnemingen van β Pictoris b, genomen met behulp van de SINFONI spectrograaf. β Pictoris b staat, evenals sommige andere exoplaneten namelijk zo ver van zijn ster af dat hij direct waarneembaar is in ruimtelijke afbeeldingen van het systeem, vlak naast de veel helderdere moederster. Omdat dit soort planeten ver van hun ster verwijderd zijn ontvangen ze weinig sterlicht en bevinden ze zich in een zeer koude omgeving. Deze planeten zijn echter zichtbaar omdat ze relatief kort geleden gevormd zijn. Een planeet verzamelt tijdens zijn vorming gas en stof uit de protoplanetaire schijf die om de jonge ster heen draait, en kan hierbij temperaturen van meer dan 1000 graden Celcius bereiken. Wanneer de ster volgroeid is en de schijf van gas en stof is verdwenen, gloeit een jonge planeet nog gedurende miljoenen jaren na. Dit schijnsel zorgt ervoor dat jonge planeten direct waarneembaar zijn ondanks dat ze ver van hun ster verwijderd zijn. β Pictoris b is zo'n jonge planeet, met een geschatte leeftijd van 24 miljoen jaar. Naast β Pictoris b zijn er maar enkele soortgelijke jonge exoplaneten bekend, en om ook planeten dichterbij de ster te kunnen waarnemen moeten instrumenten in staat zijn om diepere contrasten te bereiken. De SINFONI spectrograaf is in staat om tegelijkertijd ruimtelijke en spectrale informatie waar te nemen. Op deze spectrale dimensie kunnen de technieken uit hoofdstukken 2 en 3 worden toegepast, om zo het contrast tussen de ster en de planeet te verhogen. Hierdoor zijn we in staat om water en CO waar te nemen in de atmosfeer van deze planeet en stellen we vast dat toekomstige instrumenten die evenals SINFONI zowel ruimtelijke als spectrale informatie waarnemen en op dit moment in ontwikkeling zijn, uitermate goed in staat zijn om middels deze methoden jonge gasplaneten te vinden en de karakteriseren.