



Universiteit  
Leiden

The Netherlands

## Pushing the characterization of exoplanet atmospheres down to temperate rocky planets in the era of JWST

Zieba, S.

### Citation

Zieba, S. (2024, June 25). *Pushing the characterization of exoplanet atmospheres down to temperate rocky planets in the era of JWST*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3765836>

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/1887/3765836>

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

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

“Waar komen we vandaan? Wie zijn wij? Waar gaan we heen?” De studie van planeten binnen en buiten ons zonnestelsel is een integraal onderdeel van het beantwoorden van deze fundamentele vragen van de mensheid. De astronomie als geheel werpt licht op de diversiteit van de kosmos en onze plaats daarin. In mijn onderzoeksveld doen we dit door planeten buiten ons zonnestelsel, zogenaamde exoplaneten, te karakteriseren. Door meer te weten te komen over hun vorming, evolutie, samenstelling en bewoonbaarheid, komen we uiteindelijk meer te weten over onze oorsprong, de toekomst van onze eigen planeet en het unieke karakter ervan. De heilige graal van het exoplaneetonderzoek is uiteindelijk te bepalen of de aarde en het leven zoals wij dat kennen zeldzaam is of juist vaak voorkomt. Wetenschappers zullen erover twisten wanneer we eindelijk een “aardetweeling” zullen vinden die het leven zoals wij dat kennen zou kunnen huisvesten, maar we zijn zeker nog nooit zo dicht bij het bereiken van dit doel geweest.

Het is opmerkelijk hoeveel we in slechts een paar decennia hebben geleerd over deze verre werelden: Sinds de eerste ontdekking van exoplaneten in de jaren negentig zijn er op dit moment meer dan 5.500 planeten bekend. Telescopen en instrumenten op de grond en in de ruimte zijn gebouwd om deze planeten te ontdekken. Meestal kunnen we de exoplaneet echter niet rechtstreeks zien. Ze bevinden zich te dicht bij hun moedersterren, die ordes van grootte helderder zijn. Daarom is het nog steeds een uitdaging om planeten rond hun sterren ruimtelijk op te lossen. Vaak observeren we het gecombineerde licht van beide bronnen — de ster en de planeet — dat ons een hele reeks eigenschappen van planeten kan geven, van fundamentele zoals hun grootte en massa tot kenmerken zoals hun atmosferische samenstelling, hun warmteverdeling of hun reflectiviteit. NASA lanceerde ruimtemissies zoals de Kepler Space Telescope in 2009 en de Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) in 2018 om deze verre werelden te ontdekken en hun grootte te meten. Deze telescopen maakten gebruik van een techniek die de “transitmethode” wordt genoemd. Deze techniek is gebaseerd op de architectuur van het systeem, zodat de planeet regelmatig voor zijn moederster langsgaat en daarbij de ster verduistert — we spreken ook wel van een “overgang” of “transit”. Tijdens zo’n overgang bedekt de exoplaneet de sterschijf gezien vanaf de aarde, wat leidt tot een waargenomen afname van de flux. Deze methode is tot nu toe het meest succesvol geweest, omdat het probleem eenvoudig op te lossen is: je hoeft alleen maar een gevoelige telescoop naar de hemel te richten en de helderheid van sterren in het beeldveld in de loop van de tijd te registreren om nieuwe planeten te ontdekken. Een andere techniek, de radiële snelheidsmethode, kan ons dan de

massa's van de planeten geven. Uit de gemeten stralen en massa's leiden we de bulkdichtheid van de planeet af, die ons informatie geeft over de samenstelling: Een planeet met een grote ijzeren kern zal een hogere dichtheid hebben dan een planeet die wordt gedomineerd door silicaten met een kleine kern. De meeste rotsachtige exoplaneten hebben een samenstelling die lijkt op die van de aarde, dat wil zeggen ongeveer 30% ijzer en 70% "rotsen" of silicaten. Planeten die groter zijn dan 1,6 keer de straal van de aarde hebben naar verwachting een waterstofatmosfeer met een aanzienlijk deel van hun massa in gasvorm. Er wordt ook verwacht dat deze planeten gesmolten oppervlakken hebben, omdat de druk sterk toeneemt met afnemende hoogte. Zodra je het oppervlak bereikt, zal de temperatuur te hoog zijn om een vast, ongesmolten oppervlak te herbergen. Dit is typisch de reden waarom we deze grotere werelden niet als rotsachtig beschouwen.

Maar ondanks dat we de dichtheden van rotsachtige planeten meten en meer te weten komen over hun bulksamenstellingen, weten we nog steeds niet veel over de samenstelling van de atmosferen van kleine planeten en hoe vaak deze werelden die vasthouden. De Grote Observatoria, die tussen 1990 en 2003 door de NASA werden gelanceerd, omvatten twee ruimtetelescopen die in het afgelopen decennium uiteindelijk het werkpaard zouden worden voor de karakterisering van transiterende exoplaneten: De Hubble ruimtetelescoop werd in 1990 gelanceerd aan boord van Space Shuttle Discovery met een opening van 2,4 meter en de Spitzer ruimtetelescoop in 2003 met een spiegel van 85 cm. In de ruimte vermijden telescopen vervuiling door de thermisch-infrarode achtergrond van de aarde, waardoor nauwkeurige infraroodwaarnemingen mogelijk zijn. Hoewel beide telescopen nooit zijn ontworpen om exoplaneten te bestuderen, hebben slimme gegevensverwerkingsroutines en, in het geval van Hubble, upgrades tijdens de Hubble-onderhoudsmisies geleid tot de atmosferische karakterisering van veel exoplaneten ter grootte van Jupiter en ook kleinere exoplaneten.

Nadat de Spitzer ruimtetelescoop in januari 2020 werd uitgeschakeld, verloor de exoplaneetgemeenschap de mogelijkheid om exoplaneten in transmissie of emissie in het infrarood bij golflengten van meer dan 2 micron vanuit de ruimte waar te nemen. Dit was een groot verlies, omdat moleculen waarin we geïnteresseerd zijn in de atmosfeer van andere planeten, zoals water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) of koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ), kenmerken hebben in het infrarood. De sterke absorptie van koolstofdioxide werd opgemerkt door de astrofysicus en wetenschapscommunicator Carl Sagan, toen hij in 1985 voor het Congres getuigde over klimaatverandering. Het volgende is een citaat van Carl Sagan toen hij de leden van het Congres toesprak tijdens de hoorzitting:

"De lucht tussen ons is transparant, behalve in Los Angeles en dat soort plaatsen. In het gewone zichtbare deel van het spectrum kunnen we elkaar zien. Maar als onze ogen gevoelig zouden zijn voor bijvoorbeeld 15 micron in het infrarood, dan zouden we elkaar niet kunnen zien. De lucht tussen ons zou zwart zijn. En dat komt, in dit geval, door koolstofdioxide. Kooldioxide is zeer sterk absorberend bij 15 micron. En andere golflengten in het infrarood. Zo zijn er ook delen van het infraroodspectrum waar waterdamp absorbeert, waar we elkaar niet zouden kunnen zien als we maar zo ver uit elkaar waren als in deze

kamer.”

De zoektocht naar rotsachtige exoplaneet atmosferen met moleculen als water, kooldioxide of zuurstof vereist een nauwkeurige infraroodtelescoop. Gelukkig werd JWST na veel vertragingen gelanceerd op eerste kerstdag 2021, waardoor wetenschappers weer de mogelijkheid hebben om planeten in deze infrarode golflengten met ongekende precisie te bestuderen. De baanbrekende precisie is te danken aan vele factoren, zoals een grote spiegel van 6,5 meter en de thermische stabiliteit van de telescoop. JWST geeft ons daarom voor het eerst de mogelijkheid om te zoeken naar atmosferen met een hoog moleculair gewicht van kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ), zuurstof ( $\text{O}_2$ ) en stikstof ( $\text{N}_2$ ) op gematigde rotsachtige werelden.

Er zijn over het algemeen twee technieken om de atmosferen van transiterende exoplaneten te bestuderen. De eerste vindt plaats tijdens een overgang en wordt daarom transmissiespectroscopie genoemd: wanneer een planeet vanuit ons gezichtspunt als waarnemer voor de star langs trekt, reist een deel van het sterlicht door de atmosfeer van de planeet, als die er is. Bepaalde golflengten worden geabsorbeerd door de bestanddelen van de atmosfeer. Deze ontbrekende golflengten worden dan door ons waargenomen en we kunnen daaruit afleiden uit welke elementen en moleculen de gasschil rond de planeet bestaat. De andere methode om de atmosferen van exoplaneten te karakteriseren vindt ongeveer een halve baan na de overgang plaats, wanneer de planeet achter zijn moederster verdwijnt; we noemen dat een “eclips”. Tijdens de eclips zelf observeren we alleen het stellare licht. Alle flux die de planeet uitzendt, wordt verduisterd door de ster. Vlak voor en nadat de planeet zich achter zijn ster verbergt, nemen we echter de emissie waar die van de dagzijde van de planeet komt. Van dit kiekeboe-spel met de planeet meten we een emissiespectrum — de methode wordt daarom emissiespectroscopie genoemd — en kunnen we elementen of moleculen in de atmosfeer van de planeet detecteren of direct het oppervlak bestuderen. Als we de emissie bestuderen die niet alleen van de dagzijde van de planeet komt, maar ook van de andere zijden van de planeet tijdens de baan van de planeet rond zijn moederster, nemen we een zogenaamde fasekromme waar. Dit soort waarnemingen kan ons dan informeren over globale processen zoals warmtetransport door winden in de atmosfeer van de planeet.

*K2- en Spitzer-fasekrommen van de rotsachtige ultrakorte-periodeplaneet K2-141 b wijzen op een ijle rotsdampatmosfeer.*

In hoofdstuk 2 hebben we met Spitzer zo’n fasekromme waargenomen voor een lava-exoplaneet genaamd K2-141 b. Deze lavaplaneten worden gekenmerkt door hun zeer korte omlooptijden en zeer hete dagzijden. Met een omlooptijd van slechts 7 uur wordt de planeet zo sterk verhit door zijn ster dat de gemiddelde dagkanttemperatuur boven de 2000 Kelvin ligt. Dat is genoeg om de rotsen op het oppervlak van de planeet te smelten, wat leidt tot een magma-oceaan op de dagzijde en mogelijk tot een dunne atmosfeer van rotsdamp door de verdamping van rotsen. Vooral dat laatste is interessant, omdat de studie van de verdampte atmosfeer ons uiteindelijk meer zou kunnen vertellen over de samenstelling van het oppervlak van de planeet. In mijn werk heb ik eerdere Kepler-waarnemingen van K2-141 b gecombineerd met nieuwe Spitzer-gegevens. De Spitzer ruimtete-

lescoop heeft ongeveer 70 uur naar de ster gekeken, waardoor 10 ononderbroken banen van de planeet zijn waargenomen. Door de optische gegevens van Kepler te combineren met de infraroodwaarnemingen van Spitzer, kunnen we de diepe eclips die Kepler heeft waargenomen voorzichtig toeschrijven aan een dergelijke rotsdampatmosfeer. Maar alleen vervolgwaaarnemingen kunnen de ware aard van de planeet onthullen. Gelukkig zijn er al JWST-waarnemingen van de planeet gedaan en wordt er momenteel gewerkt aan de interpretatie ervan. Dankzij zijn golflengtebereik en precisie zal JWST ons begrip van de atmosferen van lavaplaneten verbeteren.

*PACMAN: een pijplijn voor het verkleinen en analyseren van Hubble Wide Field Camera 3 IR Grism-gegevens*

In hoofdstuk 3 presenteer ik een algemeen beschikbaar hulpmiddel waarmee astronomen exoplaneetwaarnemingen van een van de instrumenten van de Hubble ruimtetelescoop kunnen bekijken en verwerken. De oorspronkelijke code is de afgelopen tien jaar in veel publicaties gebruikt en is nu voor iedereen beschikbaar onder de naam PACMAN. Het Wide Field Camera 3-instrument (WFC3) van de Hubble-ruimtetelescoop werd in 2009 tijdens een onderhoudsmisssie geïnstalleerd. Het spectrale bereik van WFC3 pikt met name moleculaire infraroodabsorptie van water op, waardoor met succes water in de atmosferen van meer dan een dozijn exoplaneten kon worden gedetecteerd. Het analyseren van Hubble-gegevens brengt echter uitdagingen met zich mee, waarbij verschillende pijplijnen in het verleden in de literatuur tegenstrijdige resultaten hebben opgeleverd. Om ervoor te zorgen dat het onderzoek reproduceerbaar is, is het een goede wetenschappelijke gewoonte dat de software die wordt gebruikt voor gegevensreductie en -analyse open-source is. Deze aanpak maakt het gemakkelijker om verschillende pijplijnen te vergelijken en verlaagt de drempel voor nieuwkomers op het gebied van exoplaneetatmosferen. De broncode van PACMAN en voorbeelden van hoe je de code kunt gebruiken om een transmissie- of emissiespectrum van een exoplaneet te verkrijgen, zijn daarom online te vinden.

*Geen dikke kooldioxideatmosfeer op de rotsachtige exoplaneet TRAPPIST-1 c*

In hoofdstuk 4 hebben we een van de eerste resultaten van JWST gepubliceerd, die licht werpt op een rotsachtige exoplaneet en inzicht geeft in de samenstelling van zijn atmosfeer. In de afgelopen decennia is ons begrip van exoplaneten aanzienlijk toegenomen en is duidelijk geworden dat kleine planeten veel voorkomen in de Melkweg. Geschat wordt dat ongeveer 20 tot 50% van de sterren een planeet herbergt die qua grootte vergelijkbaar is met de aarde. Door de dichtheid van deze exoplaneten te meten, leiden we af dat ze meestal een rotsachtige samenstelling hebben die vergelijkbaar is met die van onze eigen planeet. Onze kennis over de samenstelling van de atmosfeer van deze aardse planeten blijft echter beperkt en we weten nog steeds niet zeker hoe vaak rotsachtige planeten hun atmosfeer vasthouden. Dankzij de mogelijkheden van JWST hebben we nu de mogelijkheid om te zoeken naar meer aardachtige atmosferen die bestaan uit moleculen zoals kooldioxide, zuurstof en stikstof. Bijzonder interessant voor astronomen is een systeem dat TRAPPIST-1 heet. Deze nabije, kleine ster herbergt zeven transiterende

aardse planeten, wat mogelijkheden biedt voor het bestuderen van kleine planeten met een heel scala aan temperaturen. Van deze planeten draaien er drie in het gebied rond de ster waar de temperatuur geschikt zou kunnen zijn voor vloeibaar water op het oppervlak van de planeet, de zogenaamde bewoonbare zone. Vanwege de nabijheid van de ster, de kleine omvang en de relatief lage temperatuur zijn de planeten ideale kandidaten voor atmosferische follow-up karakterisering. Dit biedt ons een unieke kans om te zoeken naar atmosferen op kleine planeten buiten het zonnestelsel. Het is noemenswaardig dat kleine sterren zoals TRAPPIST-1 het meest voorkomende type sterren in de Melkweg zijn. Daarom is het momenteel een van de belangrijkste open vragen op het gebied van exoplaneten om uit te vinden of planeten rond kleine sterren hun atmosfeer kunnen behouden. Als we erachter komen dat planeten rond deze sterren inderdaad gedurende hun hele bestaan een substantiële atmosfeer hebben behouden, dan zou dit hoopvolle aanwijzingen bieden voor de mogelijke bewoonbaarheid van de vele rotsachtige planeten rond kleine sterren. Maar als we ontdekken dat planeten rond kleine sterren geen atmosfeer hebben, zou dat erop kunnen wijzen dat sterren die op de zon lijken een gunstiger omgeving bieden voor het ontstaan van leven. Om een stap voorwaarts te zetten in het oplossen van deze open vragen, hebben we vier verduisteringen van de exoplaneet TRAPPIST-1 c geobserveerd met het Mid-Infrarood Instrument (MIRI) aan boord van JWST. In onze waarnemingen hebben we gebruik gemaakt van de sterke absorptie van CO<sub>2</sub> bij 15 micron (zoals vermeld in het citaat van Carl Sagan hierboven) om te zoeken naar een atmosfeer op TRAPPIST-1 c. We zien geen sterke absorptie van CO<sub>2</sub> bij 15 micron. We detecteren geen sterke absorptie veroorzaakt door CO<sub>2</sub>, waardoor we bepaalde atmosferische scenario's uitsluiten, met name scenario's die worden gedomineerd door CO<sub>2</sub>. In plaats daarvan komen onze bevindingen meer overeen met dunnere atmosferen of kale rotsoppervlakken. We kunnen bijvoorbeeld met zekerheid een atmosfeer op TRAPPIST-1 c uitsluiten die lijkt op die van een slecht geventileerde kamer, dat wil zeggen CO<sub>2</sub>-concentraties van 1000 ppm op zeeniveau. Het is interessant dat TRAPPIST-1 c, dat buiten de bewoonbare zone van de ster ligt, qua grootte, massa en straling vergelijkbaar is met Venus. Een van de belangrijkste wetenschappelijke ontdekkingen van dit hoofdstuk is dat de planeet, in tegenstelling tot Venus, geen hogedruk-atmosfeer heeft die voornamelijk uit kooldioxide bestaat. Dit is de eerste studie die een exoplaneet karakteriseert die op Venus lijkt of redelijk vergelijkbaar is met de aarde. De bevindingen zullen bijdragen aan een beter begrip van het ontstaan en de evolutie van rotsachtige planeten die rond kleine sterren draaien en zo richting geven aan toekomstige studies van deze systemen.

*Een Hubble WFC3-infraroodblik op het transmissiespectrum van de hete, opgeblazen sub-Saturn KELT-11 b*

In hoofdstuk 5 gebruiken we de open-source pijplijn PACMAN uit hoofdstuk 3 om Hubble-waarnemingen van de hete Jupiter-exoplaneet KELT-11 b te analyseren en meer te weten te komen over zijn atmosferische eigenschappen. Dankzij de korte omlooptijd van de planeet en de hoge evenwichtstemperatuur is het een geweldig doelwit voor atmosferisch onderzoek. We keken naar het stellaire licht toen de planeet voor zijn ster langsging en analyseerden hoe het veranderde als functie van de

golflengte en de tijd. We ontdekten dat een veelgebruikte methode om de spectra van transiterende exoplaneten te analyseren, die door Hubble is gemaakt, niet altijd nauwkeurig is. Het door ons waargenomen transmissiespectrum van de planeten wees ook op mogelijke vervuiling door de ster zelf. Oppervlakte-eigenschappen van de ster, zoals stellaire vlekken, kunnen het spectrum beïnvloeden — een verschijnsel dat vaak wordt waargenomen bij kleinere, koelere sterren, maar minder wordt verwacht bij grotere sterren zoals onze zon. Onze studie onderstreept het belang van robuuste datareductie en een grondige interpretatie van het planetaire transmissiespectrum, zelfs voor doelen met een hoog signaal-ruisverhouding zoals hete Jupiters. Als er geen rekening wordt gehouden met vervuiling door de moederster, kan dit leiden tot verkeerde interpretaties, waarbij atmosferische kenmerken aan de planeet worden toegeschreven die eigenlijk afkomstig zijn van moleculen in de stellaire atmosfeer.

*De  $\beta$  Pictoris b Hill Sphere Transit Campagne - II. Zoeken naar de signaturen van de  $\beta$  Pictoris exoplaneten door tijdsvertraginganalyse van de  $\delta$  Scuti pulsaties*

Tot slot bestuderen we in hoofdstuk 6 een nabijgelegen planetenstelsel genaamd  $\beta$  Pictoris. Het systeem valt op als het dichtstbijzijnde stersysteem waar we direct gasreuzenplaneten hebben waargenomen, samen met een schijf die we van opzij zien en tekenen van transiterende exokometen. We hebben de stertrillingen van de ster onderzocht om de signaturen van de bekende planeten,  $\beta$  Pictoris b en c, te zien en ook om te zoeken naar nog onbekende begeleiders. Een ster en zijn planeten draaien altijd rond een gemeenschappelijk massamiddelpunt, wat leidt tot een kleine periodieke verandering in de afstand tussen ons en de ster. Door de aankomsttijd van de stellaire pulsaties te meten, zouden we periodieke vroege of late aankomsten kunnen detecteren, wat wijst op begeleiders die de lichtreistijd van de signalen veranderen. We analyseerden fotometrische gegevens van verschillende observatoria op de grond en in de ruimte om de stabiliteit van de pulsaties te bestuderen. We hebben de signalen van de planeten niet kunnen detecteren vanwege de hoge ruis in de gegevens. Onze analyse suggereert ook dat de pulsaties van de ster zelf in de loop van de tijd veranderen, waardoor het voor sterren als  $\beta$  Pictoris een uitdaging is om exoplaneten te detecteren aan de hand van pulsatie-timing. Hoewel we met deze methode de signaturen van de planeten niet konden zien, werpt onze studie licht op de beperkingen en mogelijkheden van pulsatie-timing bij het detecteren van exoplaneten.

Eerdere waarnemingen van rotsachtige exoplaneten met de Hubble-ruimtetelescoop of de Spitzer-ruimtetelescoop waren voornamelijk in staat om door waterstof gedomineerde atmosferische samenstellingen uit te sluiten. Dankzij de opmerkelijke mogelijkheden van JWST hebben we nu echter de mogelijkheid om meer realistische, aardachtige atmosferen op gematigde rotsachtige werelden te onderzoeken. Het is nog onzeker hoe vaak en onder welke omstandigheden deze kleine werelden hun atmosferen behouden. Als we ontdekken dat planeten rond kleine sterren geen atmosfeer hebben, kan dat erop wijzen dat zonachtige sterren een gunstigere omgeving bieden voor het ontstaan van leven. In elk geval zullen de komende ontdekkingen met JWST een cruciale mijlpaal zijn in ons begrip van de

atmosferen, oppervlakken en mogelijke bewoonbaarheid van rotsachtige planeten. Hoewel het detecteren van biosignaturen op waarneembare exoplaneten met JWST heel wat geluk en observatietijd kan vergen, zien de vooruitzichten er veelbelovend uit in de komende decennia met de komst van de ELT's en mogelijke toekomstige missies zoals het Habitable Worlds Observatory (HWO) en ESA's Large Interferometer For Exoplanets (LIFE) missie. Uiteindelijk is de meest robuuste methode om te bepalen of een aardse exoplaneet een atmosfeer heeft, het bestuderen van de thermische emissie, het gereflecteerde licht of het transmissiespectrum. Dus laten we onze observatoria richten op rotsachtige planeten en beginnen aan deze ontdekkingsreis!