



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Lava worlds: characterising atmospheres of impossible nature

Zilinskas, M.

### Citation

Zilinskas, M. (2023, May 24). *Lava worlds: characterising atmospheres of impossible nature*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3618852>

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/1887/3618852>

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

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

Slechts 30 jaar geleden was ons begrip van andere werelden dan de aarde alleen verbonden aan ons zonnestelsel. Toen astronomen in de jaren tachtig naar exoplaneten begonnen te zoeken, was er grote scepsis over überhaupt het bestaan van dergelijke planeten. De vooruitzichten veranderden drastisch in 1992, toen de eerste detectie van twee planeten ter grootte van de aarde rond een overblijfsel van een ster werd gemaakt. Als dode sterren planeten kunnen hebben, moet de Melkweg er zeker mee gevuld zijn. De zoektocht naar verre werelden was vanaf dat moment begonnen en slechts drie jaar later werd de eerste planeet gevonden die rond een ster draait die volledig op de zon lijkt. Dit was niet zomaar een planeet, het was een gasreus met een omlooptijd van 4,2 dagen, wat meer dan 7 keer dichterbij zijn ster staat dan Mercurius bij de zon. Astronomen hebben een geheel nieuwe klasse van werelden ontdekt die niet in het zonnestelsel voorkomen: hete Jupiters. Hoe onlogisch dat ook klonk, het werd duidelijk dat onze kennis over planetenstelsels niet compleet is.

vanaf dit moment is het veld van de exoplaneten exponentieel toegenomen. Nieuwe instrumenten en technieken werden snel ontwikkeld, wat nu resulteert in meer dan 5000 bevestigde exoplaneten. Nieuwe schattingen tonen aan dat er minstens zoveel planeten in de Melkweg zijn als dat er sterren zijn, honderden miljarden, zo niet biljoenen. De ontdekking van een hete Jupiter was slechts het begin van de diversiteit die we zouden tegenkomen. Kort daarna zijn er ook nog ontdekkingen gedaan van super-aardes, lava werelden, warme Neptunussen, sub-Neptunussen en planeten die zo heet zijn dat ze langzaam tot stof eroderen. Het merendeel van de ontdekte planetenstelsels leek helemaal niet op ons zonnestelsel. De meeste bevatten planeten met een korte periode die groter zijn dan de aarde en meer lijken op Neptunus; sommige, zoals TRAPPIST-1, hebben 7 werelden ter grootte van de aarde, allemaal binnen een omlooptijd van 19 dagen; en sommige draaien zelfs om meerdere sterren. In 30 jaar tijd, toen we van 8 bekende planeten naar meer dan 5000 gingen, is onze waarneming uitgebreid tot een grenzeloze verscheidenheid aan werelden. Het is nu duidelijk dat ons zonnestelsel slechts één resultaat is van het ontstaan van de sterren, en dat de kosmos gevuld is met vreemdere dan vreemde werelden.

Om planeten te vinden, ontwikkelden astronomen een aantal zeer efficiënte technieken. Een van de eerste en meest succesvolle methoden was het gebruik van radiale snelheidsverschuivingen. De aanwezigheid van een planeet rond een ster zorgt ervoor dat beide objecten om een gemeenschappelijk zwaartepunt draaien. De geïnduceerde periodieke beweging van de ster heeft tot gevolg dat de waar-

genomen spectrumkenmerken naar verschillende golflengten worden verschoven. Massievere planeten veroorzaken grotere verschuivingen, en dus kan men, door radiale snelheid te gebruiken, niet alleen de aanwezigheid van een planeet bepalen, maar ook zijn massa. Met behulp van deze techniek vonden astronomen bijna duizend planeten, maar deze werd al snel overschaduwd door de fotometrische transit methode. Transit-fotometrie is afhankelijk van de baan van de planeet om een ster dat er voor zorgt dat een klein percentage van het waargenomen sterlicht geblokkeerd wordt. Dit dimmen is zelfs met ächtertuintelescopen waar te nemen. De methode was zo succesvol dat verschillende ruimtetelescopen werden gelanceerd om de hemel te onderzoeken. Met resultaat, want in slechts twee jaar aan observaties vond NASA's Kepler-telescoop meer dan tweeduizend planetaire kandidaten, waaronder de eerste aardachtige planeten die rond een zon-achtige ster draaien. Met tot op heden meer dan 2600 bevestigde planeten, is de transittechniek verantwoordelijk voor het merendeel van de ontdekkingen. In de afgelopen jaren werd het ook mogelijk om planeten ruimtelijk te scheiden van hun gastheer-ster. Deze verbazingwekkende methode staat bekend als directe beeldvorming, en hoewel het nog in de kinderschoenen staat, heeft het al geresulteerd in het fotograferen van enkele tientallen jonge systemen. Planeten ter grootte van Jupiter zijn direct te zien in een baan om verre sterren. Met de volgende generatie telescopen, zoals ELT, kan directe beeldvorming de allereerste foto's opleveren van aardachtige werelden die rond nabije sterren draaien.

Door de massa en straal van een planeet te bepalen, kunnen schattingen gemaakt worden van de bulk eigenschappen. Idealiter willen we de planeet echter in nog meer detail karakteriseren om de samenstelling van zijn atmosfeer, oppervlak, en interieur te achterhalen en zelfs hoe en waar het is gevormd. Momenteel is een van de enige haalbare manieren spectroscopie om de atmosfeer van een planeet te onderzoeken. Zogeheten transmissie-spectroscopie wordt al lang gebruikt bij het bestuderen van het zonnestelsel en werd snel aangepast om ook de atmosferen van exoplaneten te meten. In tegenstelling tot fotometrie, is spectroscopie gebaseerd op het observeren van de planeet op verschillende golflengten. Wanneer een planeet een ster passeert, fungeert zijn atmosfeer als een hoogte- en golflengte-afhankelijk filter. Bepaalde golflengten worden geabsorbeerd door de chemische samenstelling van de atmosfeer en lijken dus verminderd. Elk uniek atoom en molecuul heeft zijn eigen spectroscopische ondoorzichtigheid, waardoor astronomen een groot aantal soorten in exoplaneten hebben kunnen onderscheiden; nu meer dan 20 elementen van het periodiek systeem, waaronder moleculen als H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, TiO en verschillende andere. Hoewel de meeste hiervan werden gevonden op gasreuzen, is de gevoeligheid en spectrale dekking die nodig is om rotsachtige werelden te karakteriseren zojuist bereikt met de James Webb Space Telescope (JWST).

De transmissie methode heeft echter ook zijn nadelen, met als grootste probleem het onvermogen om compacte atmosferen te onderzoeken. Omdat een aanzienlijk aantal ontdekte exoplaneten sterk wordt bestraald, genoeg om detecteerbaar licht uit te zenden (of te reflecteren), werd een aanvullende methode ontwikkeld om hun atmosferen te onderzoeken: emissie spectroscopie. De planeet wordt vlak voor en tijdens de zonsverduistering door de ster waargenomen. Door het verschil tussen de spectra te nemen, krijgen we de emissie van alleen de planeet.

Omdat het signaal afkomstig is van de chemische soort die bij verschillende temperaturen uitzendt, stelt dit ons in staat om niet alleen de verticale thermische structuur van een atmosfeer te onderzoeken, maar zelfs longitudinale kaarten te maken die fase-curven worden genoemd. De allereerste fase-curve van een rotsachtige wereld buiten het zonnestelsel werd in 2016 gemaakt van een super aarde genaamd 55 Cancri e. Waarnemingen brachten een hotspot aan het licht die waarschijnlijk alleen via warmtetransport kan worden verklaard door een substantiële atmosfeer. De temperaturen op 55 Cancri e bereiken overdag meer dan 2700 K, dus het wordt beschouwd als een lavawereld, mogelijk bedekt met oceanen van gesmolten silicaten. De huidige theorie voorspelt dat lava werelden een ijle silicatrijke atmosfeer hebben die in stand wordt gehouden door de ontgassing van het onderliggende magma. Hoewel er geen eenduidige detecties van atmosferen op lavawerelden zijn gedaan, kan JWST hun aanwezigheid in de nabije toekomst bevestigen of ontkennen.

We begrijpen de atmosfeer van een planeet pas echt als we de waargenomen resultaten kunnen reproduceren met rekenmodellen. Nu ons begrip van fysieke processen verbetert, behalen we de kennis die nodig is om nauwkeurige simulaties te bouwen die waarnemingen nabootsen. Tegenwoordig is het zelfs mogelijk om volledige 3D-klimaten van sommige planeten te simuleren. De rekenkracht die nodig is om dergelijke modellen uit te voeren is, echter, duur en tijdrovend. Aangezien ons algemene begrip van exoplaneten nog in de kinderschoenen staat, is een betere benadering van het probleem het gebruik van snellere en flexiblere, één-dimensionale modellen. 1-D-modellen zijn gebaseerd op het feit dat de gemiddelde eigenschappen van een planeet goed worden weergegeven door alleen verticale variatie. Zulke modellen zijn inderdaad van onschatbare waarde gebleken bij het voorspellen en verklaren van veel waargenomen verschijnselen. In de afgelopen jaren heeft de sterrenkundige gemeenschap de focus verlegd naar statistische methoden, gebaseerd op gegevensgestuurde simulaties. Hoewel ze buitengewoon goed zijn in het afleiden van planetaire eigenschappen uit waarnemingen, zijn ze nog steeds afhankelijk van de nauwkeurigheid van volledige voorwaartse modellen.

Het bouwen van een consistent 1-D atmosferisch model vereist slechts twee componenten, een klimaatmodel voor stralingsoverdracht en een chemisch of een fotochemisch model. Het basisprincipe van een klimaatmodel is om de stellaire flux in de atmosfeer op te lossen en een temperatuur-drukprofiel en het spectrum van de planeet te verkrijgen. Met behulp van verschillende benaderingen kan de structuur parallel aan het oppervlak worden opgelost, waarbij alleen rekening wordt gehouden met de verticale as. De verspreiding van de flux in de atmosfeer wordt bepaald door chemische deeltjes die bepaalde frequenties van licht absorberen en uitstralen. Voor een nauwkeurig model worden maar liefst vijftig of zelfs meer soorten inbegrepen, waarvan vele miljarden unieke spectraallijnen bevatten. Hoewel dit op volledige schaal een computationele nachtmerrie is, zijn er methoden ontwikkeld om spectraallijnen in compactere tabellen te benaderen, dit alles zonder al te veel nauwkeurigheid te verliezen en 1-D-modellen snel en efficiënt te maken.

Het oplossen van de chemie kan op twee manieren gedaan worden, met behulp van thermochemisch evenwicht of fotochemische reacties met verticale transport

van deeltjes inbegrepen (kinetiek). De eerste methode is vrij eenvoudig en omvat het minimaliseren van de Gibbs-vrije energie van het systeem. Thermochemisch evenwicht houdt gewoonlijk rekening met duizenden verschillende moleculen, aangezien de enige input die nodig is experimenteel of computationeel afgeleide thermodynamische eigenschappen van elke individuele soort zijn. Vanwege de snelle evenwichtsberekeningen is de methode aangepast aan de meeste waarnemingen van exoplaneten. Dit geldt met name voor statistische modellen, waarvoor miljoenen individuele gevallen moeten worden berekend. Voor een meer gedetailleerde analyse is echter een fotochemische benadering noodzakelijk. In tegenstelling tot evenwichtschemie, die ervan uitgaat dat chemische tijdschalen veel korter zijn dan dynamische, houden fotochemische codes rekening met reactiesnelheden. In werkelijkheid vinden chemische reacties plaats in zeer verschillende tijdsintervallen, en niet spontaan zoals de evenwichtschemie aanneemt. Daarbij komt dat de chemie sterk wordt beïnvloed door de dynamiek van de atmosfeer, evenals door stellare straling. Hoewel fotochemische modellen veel nauwkeuriger zijn, hebben ze de nadelen dat ze rekenkundig traag zijn en reactiesnelheidscoëfficiënten vereisen, die vooral ontbreken bij hoge temperaturen en over het algemeen moeilijk experimenteel te bepalen zijn. Omdat de betrokken chemie in de meeste gevallen ongelooflijk complex is, maakt dat het een grote bron van onzekerheden. Al met al, zowel evenwichts- als fotochemische modellen zijn beide van onschatbare waarde voor exoplaneetstudies. Zelfs wanneer ze in 1-D worden benaderd, voorspellen en verklaren deze nauwkeurig veel van de waarnemingen.

Het werk in dit proefschrift is sterk gericht op het gebruik van 1-D chemie en stralingsoverdrachtcodes om atmosferen te simuleren die sterk bestraalde super aardes kunnen omringen. Het belangrijkste doel is om waarnemers naar potentieel detecteerbare molecuul en/of atoom soorten te leiden, wat ons zou helpen inzicht te krijgen in veel van de genomen aannames, waardoor we betere en consistentere modellen kunnen bouwen. De meeste van de hier gepresenteerde resultaten zijn van toepassing op infrarood spectroscopie met lage resolutie, vooral geschikt voor waarnemingen met JWST.

In Hoofdstuk 2 simuleren we vluchtige atmosferische composities rond een super aarde 55 Cancri e. We nemen de atmosfeer van Titan als uitgangspunt en gebruiken chemische kinetiek met analytische temperatuurprofielen om een breed scala aan mogelijke samenstellingen te modelleren. Om de waarneembaarheid te beoordelen, genereren we bovendien emissie- en transmissie spectra die van toepassing zijn op het JWST-golflengtebereik. De resultaten geven aan dat soorten zoals HCN, CN of CO kunnen worden waargenomen en waarschijnlijk wijzen op een atmosfeer die is verrijkt met koolstof.

Hoofdstuk 3 gaat verder in op volatiele atmosferen, maar voegt daar ook modellen voor stralingsoverdracht aan toe die de temperatuurstructuur berekenen. Het werk is meer gericht op het vermogen van korte golf absorptie om temperatuur-inversies te veroorzaken die het waargenomen spectrum zouden beïnvloeden. We vinden dat de aanwezigheid van CN kan resulteren in diepe inversies in atmosferen met temperaturen  $> 2000$  K. Vooral koolstofrijke of waterstofarme atmosferen rond superaarde met een korte periode kunnen hier gevoelig voor zijn.

In hoofdstuk 4 verlaten we volatiele samenstellingen en verkennen we silicaat-

rijke atmosferen, uitgestoten door magma-oceanen die zich op superaarde bevinden. Naast stralingsoverdracht en atmosferische chemische modellen, maken we gebruik van een ontgassingscode die het chemicaliënbudget bepaalt in de atmosfeer. De thermische structuur, inclusief de temperatuur van het oppervlak, wordt zelfconsistent opgelost met de chemie voor alle momenteel bekende lava planeten. Net als bij eerdere onderzoeken, simuleren we daarbij ook nog emissie spectra. De resultaten laten zien dat SiO en SiO<sub>2</sub> waarschijnlijk het gemakkelijkst te karakteriseren zijn in silicaatatmosferen. We suggereren dat deze voor een aantal planeten kunnen worden gedetecteerd met behulp van het MIRI-instrument van JWST. In deze studie vinden we ook andere soorten, zoals TiO, die sterk verband kunnen houden met de samenstelling van de lava compositie en de oppervlakte-interieurdynamiek.

Ten slotte combineren we in hoofdstuk 5 alle voorgaande onderzoeken om de waarneembaarheid te modelleren van vluchtige atmosferen rond super aardes en sub-Neptunussen die mogelijk vervuild zijn door de ontgassing van een onderliggende lava oppervlakte. Het werk is sterk gebaseerd op voorspellingen dat magma-oceanen grote reservoirs van volatiele materiaal kunnen opslaan die de atmosfeer bufferen tegen stellaire erosie. De modellen richten zich op atmosferen bestaande uit H, C en N atomen, die zijn verrijkt met silicaten. De resultaten geven aan dat de aanwezigheid van silicaten kan worden gedetecteerd met JWST door de aanwezigheid van de 5 en 9  $\mu\text{m}$  SiO-kenmerken. Deze zullen, echter, naar verwachting sterk worden verminderd door de aanwezigheid van de volatiele stoffen. We ontdekken ook dat ontgassing diepe thermische inversies kan veroorzaken, zelfs in dichte vluchtige atmosferen, wat de waarneembaarheid van alle soorten beïnvloedt. Het detecteren van SiO in een volatiele atmosfeer zou erop kunnen wijzen dat de planeet een onderliggende lava-oppervlakte heeft die de atmosfeer efficiënt van silicaten voorziet.

In dit stuk concluderen we dat, hoewel het veld van exoplaneten in slechts 30 jaar een verbazingwekkende diversiteit aan werelden heeft onthuld, dit echt slechts het begin is van wat de toekomst in petto heeft. Spectroscopie is een krachtig hulpmiddel waarmee astronomen maar een klein deel hebben waargenomen van de atmosferen van verre planeten. Tot nu toe zijn er geen ondubbelzinnige bewijzen dat super aardes of lava werelden atmosferen bezitten. JWST zal echter binnenkort verschillende bestraalde rotsachtige werelden observeren in de hoop chemische kenmerken te vinden. De volgende generatie telescopen en rekenmodellen zal ons waarschijnlijk in staat stellen om meer kennis op te doen over exoplaneten dan over veel planeten in ons zonnestelsel. Het is niet onhaalbaar dat we binnenkort continenten en oceanen van verre aardes in kaart zullen brengen en misschien zelfs tekenen van biologische aanwezigheid zullen ontdekken. We hopen dat het werk dat in dit proefschrift is gedaan enige leidraad zal bieden voor toekomstige observaties en modellerings inspanningen.

