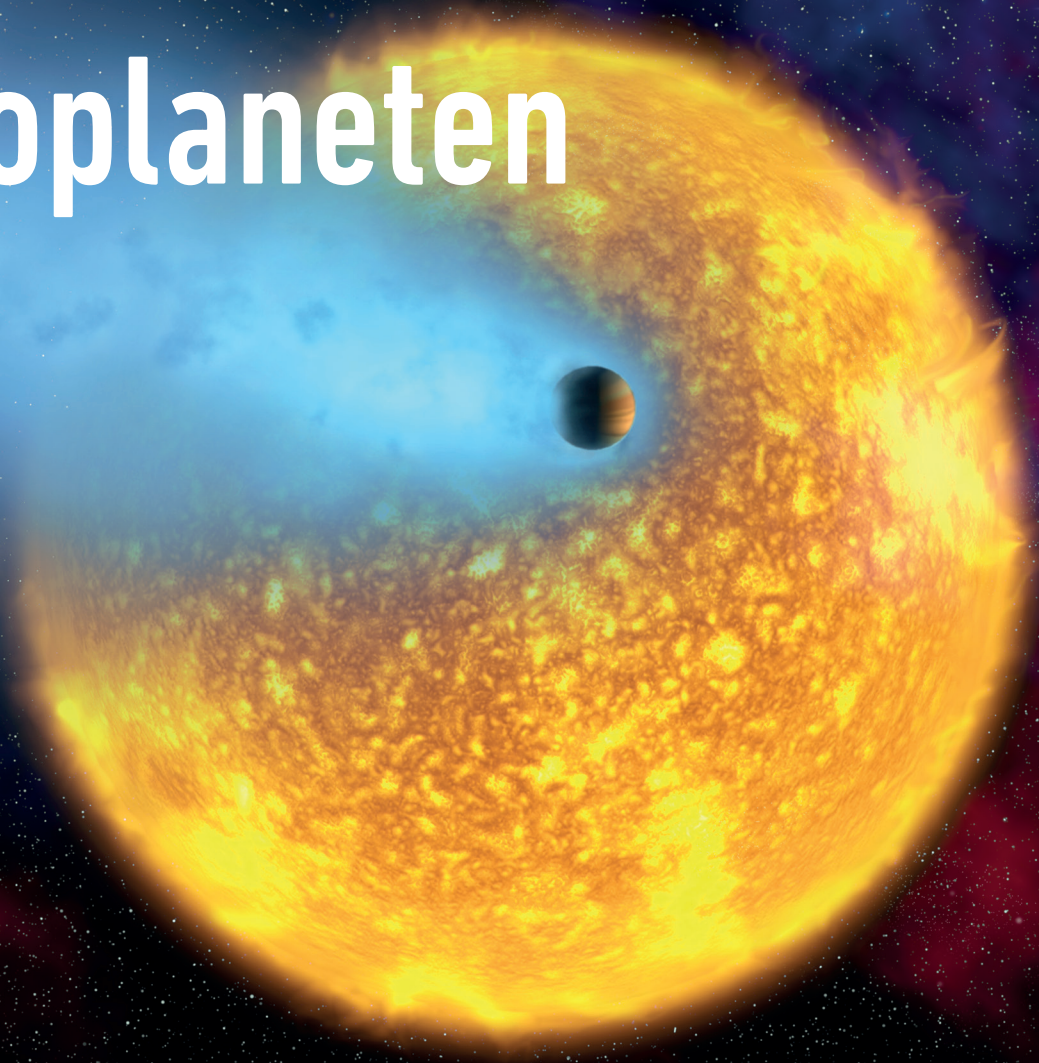


Atmosferische chemie van exoplaneten



Zo'n dertig jaar geleden werden de eerste exoplaneten ontdekt: planeten die draaien om een andere ster dan de Zon. Inmiddels zijn er meer dan vierduizend exemplaren bekend en worden exoplaneten in alle soorten en maten gevonden. Logischerwijs kunnen we ook een enorme diversiteit verwachten in de atmosferen van exoplaneten.

De eerste atmosferische detectie werd gedaan in 2002 voor exoplaneet HD 209458 b, met de vondst van het element natrium. Sindsdien zijn zowel het aantal als de variëteit van gedetecteerde atomen en moleculen in de atmosferen van exoplaneten sterk toegenomen. Voor mijn masteronderzoek aan de Rijksuniversiteit Groningen analyseerde ik onder begeleiding van Floris van der Tak de atmosferen van zeventien exoplaneten. Het doel was te kijken naar de invloed van verschillende processen op de atmosferische samenstelling.

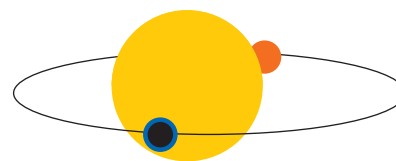
Observeren van atmosferen

Er zijn verschillende methodes om een exoplanetaire atmosfeer te observeren, vooralsnog is het maken van een transmissiespectrum de geschiktste. In deze geometrie beweegt de planeet (zwart en blauw) voor de moederster langs, zoals te zien is in figuur 1. Zo'n transit zorgt voor een kleine dip in de hoeveelheid licht die we van de ster ontvangen. Een transit treedt vaker op voor planeten die dicht bij hun moederster staan en de dip is sterker voor grotere planeten. Hierdoor is het eenvoudiger om grote gasplaneten op korte afstand van de moederster te detecteren: de zogenoemde hete Jupiters. De sterkte van de dip hangt daarnaast af van de golflengte waarop de observatie gemaakt wordt. Deze afhankelijkheid is een consequentie van de

interactie tussen elektromagnetische straling en de verschillende chemische stoffen die zich in een atmosfeer bevinden. Bepaalde atomen en moleculen absorberen namelijk elektromagnetische straling op specifieke golflengtes. Dit gebeurt ook op onze planeet, waar de ozonlaag ons bijvoorbeeld beschermt door de absorptie van schadelijke uv-straling. Het observeren van de dip als een functie van de golflengte kan ons dus informatie verschaffen over de componenten van de atmosfeer. Deze informatie wordt geïnterpreteerd door een transmissiespectrum te vergelijken met de absorptie die we kunnen verwachten door de aanwezigheid van bepaalde chemische stoffen, als een functie van de druk en temperatuur. Dit kan ons het een en ander vertellen over bijvoorbeeld chemische abundanties, temperatuur en de straal van de exoplaneet. Bovendien leidt de aanwezigheid van aerosols tot de verstrooiing van licht. Aerosols zijn deeltjes die in een atmosfeer hangen en zijn componenten van bijvoorbeeld wolken en mist. De resulterende verstrooiing van licht is sterker voor kortere golflengtes, wat er onder andere ook voor zorgt dat wij op Aarde de lucht als blauw waarnemen. Aerosols zorgen op kortere golflengtes dus voor een sterkere dip van het sterlicht en zo kunnen we iets leren over de aanwezigheid van aerosols in atmosferen.

Bevindingen in chemische samenstellingen: detecties en abundanties

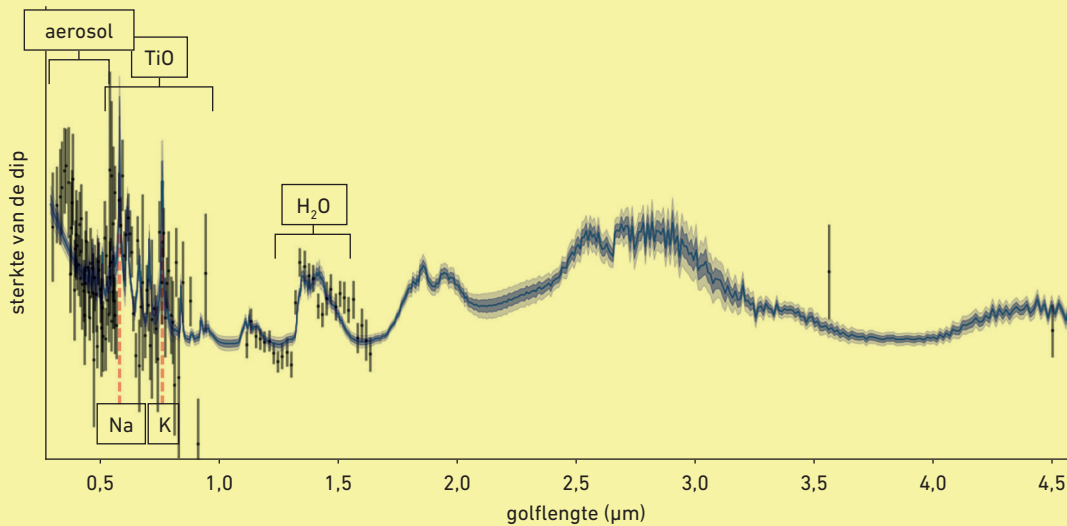
Transmissiespectra worden veelal geobserveerd met ruimtetelescopen: zo kunnen we de Hubble Space Telescope gebruiken, aangevuld met observaties met de Spitzer Space Telescope. Een voorbeeld van observaties met Hubble en Spitzer is te zien in figuur 2: de zwarte foutbalken tonen het gemeten transmissiespectrum van planeet HD 209458 b. De metingen op 3,6 en 4,5 μm zijn gemaakt met Spitzer, de resterende metingen met Hubble. Het spectrum laat inderdaad zien dat de sterkte van de dip varieert als functie van de golflengte, wat correspondeert met de absorptie van sterlicht door de



Figuur 1. Illustratie van de transit of overgang van een planeet. Aangepast uit [1].

atmosfeer. De software *TauREX II* [2] kan gebruikt worden om het spectrum te vergelijken met modellen die de absorptie (en dus de dip) berekenen als gevolg van de aanwezigheid van verschillende chemische stoffen. De blauwe lijn in figuur 2 is het model dat door ons werd gevonden als de beste beschrijving van het spectrum van HD 209458 b, een van de planeten in onze studie.

De meerderheid van de chemische detecties in exoplanetaire atmosferen betreft tot op heden het watermolecuul (H_2O). Dit is bijzonder, omdat we nog weinig weten over hoeveel water de gasreuzen van het Zonnestelsel bevatten. Pas dit jaar is er een nauwkeurige meting gedaan op Jupiter. Een verklaring hiervoor is het verschil in temperatuur tussen Jupiter en deze exoplaneten. Aangezien hete Jupiters vele malen warmer zijn, komt water overal in de atmosfeer in gasvorm voor. Daarnaast kunnen we in figuur 2 zien dat water een specifieke absorptie (oftewel een sterkere dip in het sterlicht) veroorzaakt rondom een golflengte van 1,4 μm , waar we met Hubble gewoonlijk observaties van goede kwaliteit hebben. Ook de elementen natrium (Na) en kalium (K) worden frequent gedetecteerd in de transmissiespectra van exoplaneten en zorgen voor een piek in de absorptie rondom golflengtes van 0,59 en 0,77 μm , zoals aangegeven met de rode gestreepte lijnen in figuur 2. Tevens worden er moleculen met een hoog kookpunt gedetecteerd, bijvoorbeeld aluminiummonoxide (AlO) en titaniummonoxide (TiO). Titaniummonoxide in de atmosfeer van HD 209458 b is verantwoordelijk voor de absorptiesignalen die zichtbaar zijn tussen 0,5 en 1 μm in het spectrum in figuur 2. De aanwezigheid van dit



Figuur 2. Transmissiespectrum van planeet HD 209458b, gemeten met de Hubble Space Telescope en Spitzer Space Telescope. De zwarte foutbalken zijn de metingen en de blauwe lijn is gebaseerd op het atmosferische model dat het best overeenkomt met de metingen. Verder zijn verschillende componenten van de atmosfeer aangegeven op de golflengtes waarop ze absorptie van licht veroorzaken.

soort moleculen in atmosferen is een gevolg van de hoge temperaturen van hete Jupiters. Ten slotte vertoont het spectrum van HD 209458 b verstrooiing van licht op kortere golflengtes, wat wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van aerosols.

Het bepalen van de atmosferische composities kan ons veel vertellen over de processen die de atmosfeer beïnvloeden. We kunnen voorspellingen doen over de hoeveelheid (of abundantie) van een chemische stof voor een bepaalde temperatuur, druk en elementaire compositie: het chemisch evenwicht. Als gemeten abundanties afwijken van dit chemisch evenwicht, moeten er processen zijn die dit evenwicht verstoren. Voorbeelden hiervan zijn fotochemie onder invloed van de moederster, atmosferische circulatie (horizontale winden of verticaal mengen van chemisch materiaal) en het ontstaan van wolken. Zo bestaan er theorieën voor wolken die zijn opgevoerd uit aluminium of titanium en zijn er indicaties gevonden voor het proces van verticaal mengen in hete Jupiters. Verder is een chemische samenstelling gerelateerd aan de locatie waar een planeet gevormd is. Het bepalen van atmosferische samenstellingen kan ons dus helpen

om de formatie van planeten beter te begrijpen en zo het Zonnestelsel in een breder perspectief te plaatsen.

De toekomst

Het samenspel tussen deze processen en hun invloed op het spectrum is gecompliceerd en het isoleren van informatie over specifieke processen is een enorme uitdaging. Niettemin kunnen we een rijkdom aan informatie vergaren via atmosferische composities en er is dan ook enorm veel wetenschappelijke belangstelling voor. Met de geplande lanceringen van de James Webb Space Telescope in 2021 en ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) in 2028 is de nabije toekomst veelbelovend. Beide telescopen kunnen exoplaneten observeren met een bredere dekking van golflengtes, waardoor we nog meer chemische stoffen in kaart kunnen brengen. Deze missies zullen zich vooral nog gaan richten op het begrijpen van de relatief grote planeten. Op de langere termijn zijn missies zoals LUVOIR en HabEx voorgesteld om de volgende stap te zetten in de richting van het karakteriseren van kleinere planeten, met als doel het vinden van een aardachtige planeet. Uiteindelijk hopen we hiermee een

antwoord te kunnen geven op de vraag die astronomen al eeuwenlang bezighoudt: 'zijn we alleen in het Universum?' Bepaalde atmosferische samenstellingen zouden ons daar meer over kunnen vertellen. De mogelijke aanwezigheid van leven op een planeet kan namelijk een andere oorzaak zijn van een verstoring van chemisch evenwicht. Zo is bijvoorbeeld zuurstof op Aarde een gas dat vooral wordt gecreëerd door processen gerelateerd aan leven, ook wel bekend als een biosignatuur. Daarnaast zijn onder andere ozon, lachgas en de combinatie van methaan met andere gassen voorgesteld als potentiële biosignalen. Het ontdekken van biosignalen, indien onomstotelijk bewezen, zal leiden tot een beter begrip van onze plaats in het heelal en ons perspectief revolutioneren. De verwachting dat we sporen hiervan kunnen zien in atmosferische composities, in combinatie met de verrassende ontdekkingen die gedaan worden, maakt het bestuderen van de atmosferen van exoplaneten een fascinerend onderzoeksgebied.

REFERENTIES

- 1 S. Seager en D. Deming, *Exoplanet atmospheres*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **48** (2010).
- 2 <https://exoai.github.io/software/taurex>.