

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/20830> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Karalidi, Theodora

**Title:** Broadband polarimetry of exoplanets : modelling signals of surfaces, hazes and clouds

**Issue Date:** 2013-04-23

# Nederlandse samenvatting

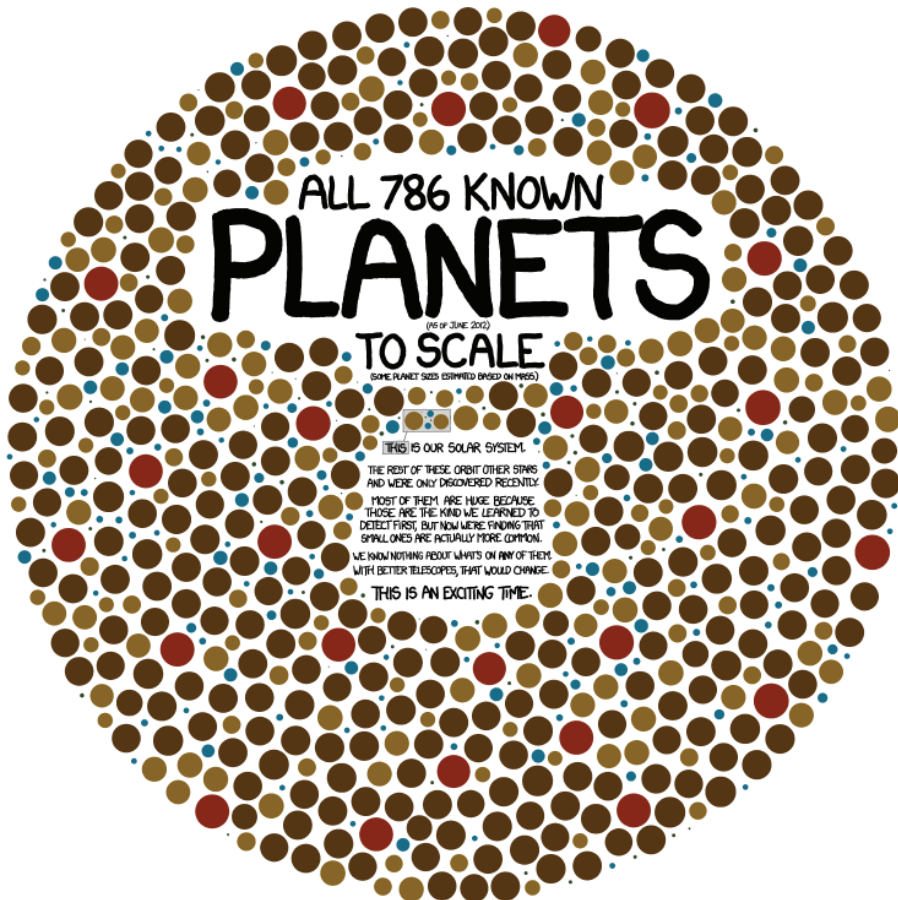
---

## 7.1 Exoplaneten, een korte geschiedenis

Dit proefschrift gaat over het modelleren en bestuderen van sterlicht dat gereflecteerd wordt door exoplaneten met verschillende micro- en macrofysische eigenschappen. Met de term “exoplaneet” bedoelen we een planeet die om een *andere* ster dan onze Zon draait. Het mogelijke bestaan van planeten buiten ons eigen zonnestelsel en de mogelijkheid van leven op zo’n planeet is een onderwerp dat de mensheid al duizenden jaren fascineert. Al rond de vierde eeuw voor het begin van onze jaartelling filosofeerden Democritus en Epicurus over het bestaan van andere planeten zoals de Aarde en de mogelijke verschillen. De mening van de invloedrijke Aristoteles dat er slechts één wereld kan bestaan (namelijk die van ons) zorgde er echter voor dat er eeuwenlang geen discussie meer plaatsvond over het onderwerp.

Het was de Nederlander Christiaan Huygens (1629–1695) die eeuwen later een filosofische discussie opschreef over het bestaan van andere planeten en de mogelijkheid voor het bestaan van leven op zo’n planeet. Inmiddels zijn we vier eeuwen verder en heeft de mensheid de mogelijkheid om de eerste exoplaneten te ontdekken. In 1992 was het Wolszczan & Frail (1992) die de eerste exoplaneet ontdekte. Deze exoplaneet draait echter om een pulsar: het zeer compacte eindproduct van een zware ster, met zo’n sterk magneetveld dat de omgeving van die planeet niet bepaald gunstig is voor leven zoals wij het kennen. Toen een paar jaar later Mayor & Queloz (1995) de eerste exoplaneet ontdekten die om een ster vergelijkbaar met onze Zon draait, begon er een nieuw tijdperk voor de sterrenkunde.

Sindsdien zijn er meer dan 770 exoplaneten ontdekt. Deze zijn schematisch weergegeven in Fig. 7.1. De meerderheid van deze planeten zijn zogenaamde gasreuzen: gasachtige planeten tot een paar keer zwaarder dan Jupiter, de zwaarste planeet in ons zonnestelsel. Ook roteren ze vaak in een erg nauwe baan rond hun ster. Gelukkig is dit slechts een “selectie-effect”: de methoden om exoplaneten te ontdekken waren in de eerste jaren veel gevoeliger om gasreuzen in een nauwe baan te ontdekken dan aardachtige planeten in een wijdere baan. Er is echter een grote kans dat astronomen de komende jaren een zusje van onze Aarde zullen vinden.



**Figuur 7.1:** We leven in een opwindende tijd waarin de ene na de andere planeet buiten ons zonnestelsel wordt ontdekt. Op dit moment, in minder dan 20 jaar tijd, zijn er meer dan 770 planeten ontdekt. De meeste van deze planeten zijn gasreuzen die een paar keer zwaarder zijn dan Jupiter. Gelukkig voor diegenen die graag een tweede Aarde willen ontdekken is dit slechts een selectie-effect, veroorzaakt door de gebruikte technieken en instrumenten die de eerste jaren zijn toegepast. Tekening van <http://www.xkcd.com>.

De meest gebruikte technieken om exoplaneten te ontdekken zijn indirect. We zien niet de exoplaneet zelf, maar de invloed op het signaal van de ster waar de planeet omheen draait. Deze invloed kan bijvoorbeeld gravitationeel zijn (de planeet beïnvloed het zwaartekrachtsveld van de ster) en dit kunnen we meten met de radieële snelheidsmethode (het meten van het "wiebelen" van een ster met behulp van een spectrum) of de microlens methode (het meten van helderheidsvariaties terwijl een zwaar object de ruimte-tijd vervormt). De exoplaneet kan ook voor of achter zijn ster langs bewegen, waarbij er kleine variaties in de helderheid van de ster optreden die we kunnen meten. Het is waarschijnlijk niet moeilijk om voor te stellen dat als een planeet zwaarder is en dichterbij zijn ster staat, zijn invloed op de ster groter is. Zo trekt de zwaartekracht van een zwaardere planeet harder aan de ster, waardoor het wiebelen van de ster makkelijker te meten is met een spectrum (via het Doppler effect). Als een planeet dichterbij zijn ster staat en dus een snellere omlooptijd heeft, treden de variaties vaker op en zijn deze dus makkelijker te zien. Een zusje van de Aarde die op dezelfde afstand van haar ster staat als de afstand tussen de Aarde en de Zon, zal echter maar een wiebel veroorzaken van 1 cm/sec en dat is op dit moment nog te weinig om te kunnen meten (de huidige grens ligt bij 1 m/sec).

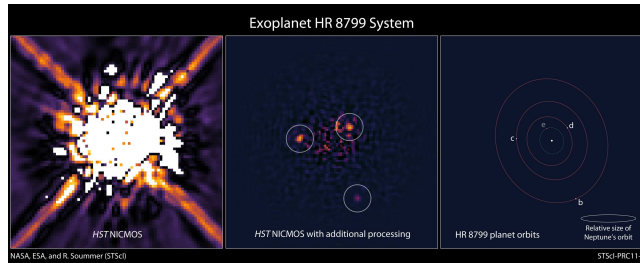
Terwijl het aantal ontdekte exoplaneten toeneemt, verschuift de interesse van de astronomen nu van het ontdekken naar het karakteriseren van exoplaneten. Het doel is nu vooral om meer te weten te komen over de omstandigheden op de reeds ontdekte exoplaneten: hebben ze een atmosfeer? Is er leven mogelijk? We weten uit onze ervaring met de planeten in ons zonnestelsel dat het bestaan van leven nauw verbonden is met het bestaan van water in de atmosfeer of aan het oppervlak van een planeet. Maar hoe ontdek je water op een planeet op vele lichtjaren afstand?

## 7.2 Het belang van polarisatie

De oplossing hiervoor is het direct waarnemen van exoplaneten en de polarisatie van het sterlicht dat zij reflecteren. Het licht van een ster zoals onze Zon is ongepolariseerd<sup>1</sup>, terwijl het licht dat een planeet reflecteert gepolariseerd is, vanwege de reflecties en verstrooiingen aan het oppervlak en/of in de atmosfeer. Dit bete-

---

<sup>1</sup>Natuurlijk licht, zoals zonlicht, bestaat uit electromagnetische golven die in alle richtingen trillen zonder een voorkeursrichting te hebben. Dit licht noemen we ongepolariseerd, of 0% gepolariseerd. Als deze golven tegen materie botsen, zoals bijvoorbeeld de moleculen in de atmosfeer van een planeet, of het oppervlak, krijgen de trillingen een voorkeursrichting. Dit noemen we (gedeeltelijk) gepolariseerd licht. In sommige gevallen, zoals bij een laser, trillen alle golven in één richting en spreken we van 100% gepolariseerd licht.

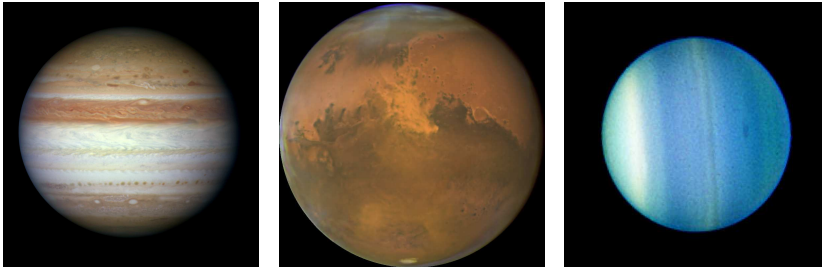


**Figuur 7.2:** Toen de Hubble Space Telescope in 1998 de linker foto nam, zagen astronomen niets opmerkelijks. Meer dan tien jaar later werden er echter drie exoplaneten zichtbaar nadat er nieuwe beeldbewerkingstechnieken werden toegepast op de oude data (middelste foto). De rechter foto laat de banen zien van vier exoplaneten die al met telescopen vanaf de grond waren ontdekt. De vierde planeet, “e” is niet te zien op de middelste foto omdat deze net aan de rand ligt van de coronograaf van de NICMOS camera. Copyright: NASA, ESA and R. Soummer (STScI).

kent dat we een exoplaneet makkelijker kunnen zien als we in gepolariseerd licht waarnemen en tegelijkertijd levert het gepolariseerde licht belangrijke informatie op die gebruikt kan worden om het oppervlak en de atmosfeer te karakteriseren. Soms hebben we het ook over de hoeveelheid *ongepolariseerd* licht. Dan spreken we in dit proefschrift over “flux”. In het ideale geval wordt de *combinatie* van flux en polarisatie gebruikt om een planeet volledig te karakteriseren.

Al meer dan een eeuw weten we hoe belangrijk het is om gepolariseerd licht te gebruiken om de atmosferen van planeten in ons zonnestelsel te bestuderen. In 1929 gebruikte de Fransman Lyot (Lyot 1929) de polarisatie van gereflecteerd licht van de atmosferen van Venus en Jupiter om hen te karakteriseren. Een paar decennia later ontdekten Hansen & Hovenier (1974) met behulp van polarisatie de chemische samenstelling en de grootte van de druppeltjes in de hoogste wolken van de atmosfeer van Venus en konden zij de hoogte van deze wolken bepalen.

Van de planeten in ons zonnestelsel kunnen we met behulp van telescopen verschillende gebieden op de planeetschijf onderscheiden. Dit is niet mogelijk voor exoplaneten. Een exoplaneet staat altijd zó ver weg dat het beeld slechts bestaat uit één pixel (zie ook Fig. 7.2). Hoe kunnen we dan toch zo’n planeet karakteriseren? Stam et al. (2004) en Stam (2008) hebben laten zien dat het gebruik van polarisatie ons helpt om meer over de samenstelling van dit “puntje” te leren.

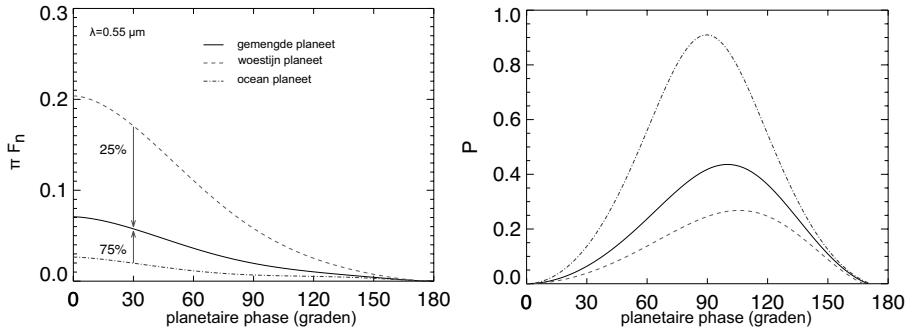


**Figuur 7.3:** Vrijwel alle planeten in ons zonnestelsel hebben inhomogene kenmerken. Jupiter (linker foto) en Neptunus (rechter foto) hebben bijvoorbeeld banden en wolken van ammonia en methaankristallen, Mars (middelste foto) heeft stofwolken, poolkappen, bergen en valleien. En we hebben natuurlijk oceanen en continenten op Aarde. Copyright (van links naar rechts): NASA, ESA, M.H. Wong (University of California, Berkeley), H.B. Hammel (Space Science Institute, Boulder, Colo.), A.A. Simon-Miller (Goddard Space Flight Center) en het Jupiter Impact Science Team; NASA, ESA, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA), J. Bell (Cornell Univ.) en M. Wolff (Space Sci Inst.); NASA, ESA, L. Sromovsky en P. Fry (University of Wisconsin), H. Hammel (Space Science Institute), en K. Rages (SETI Institute).

### 7.3 Dit proefschrift

In dit proefschrift was het doel om de computercode van Stam (2008) aan te passen om de modellering van het polarimetrische signaal mogelijk te maken (voor meerdere golflengten) van inhomogene planeten, oftewel planeten waarbij het oppervlak of de atmosfeer uit verschillende aspecten bestaat, zoals continenten, oceanen en wolken (zie Hoofdstuk 3). Het ontbreken van inhomogeniteit was tot nu toe de grootste zwakte van de code, gezien het feit dat vrijwel alle planeten in ons zonnestelsel inhomogene kenmerken hebben (wolken van water, ijs, ammonia of stof, vlekken zoals de Grote Rode Vlek op Jupiter, of oceanen en continenten zoals op Aarde).

Voordat het werk voor dit proefschrift begon, bestond de techniek om het signaal van een inhomogene planeet te modelleren uit het naar ratio bij elkaar "optellen" van homogene planeten. Om bijvoorbeeld het signaal van een planeet te modelleren waarvan het oppervlak voor 75% bestaat uit oceanen en voor 25% uit een continent van zand, werd een oceaanneet (een planeet die helemaal bedekt is met water) en een woestijneet (een planeet die helemaal bedekt is met zand) gebruikt. Het signaal van de inhomogene planeet werd dan berekend door  $\frac{75}{100}$  van het signaal van de oceaanneet op te tellen bij  $\frac{25}{100}$  van de woestijneet (zie

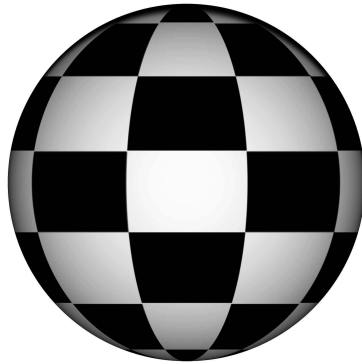


**Figuur 7.4:** Om het signaal van een inhomogene planeet te modelleren werd tot nu toe het signaal van homogene planeten gebruikt. Fracties van de homogene planeten werden bij elkaar opgeteld (links: flux, rechts: polarisatie), afhankelijk van de hoeveelheid oppervlak aanwezig op de inhomogene planeet.

Fig. 7.4).

Het gebruik van de nieuwe code heeft echter laten zien dat deze “optelmethode” alleen werkt bij planeten die bijna volledig homogeen zijn. Ook is de oude methode niet in staat om iets te zeggen over de lokatie van de inhomogeniteit. Het kan bijvoorbeeld geen onderscheid maken tussen kleine gebieden bij de evenaar of grote gebieden bij de polen. Dit komt omdat gebieden bij de evenaar groter lijken en dus een veel grotere bijdrage leveren aan het gereflecteerde signaal van een planeet dan gebieden bij de polen (denk bijvoorbeeld aan de afmetingen van de blokjes op een voetbal: die lijken naar de rand toe kleiner te worden, zie ook Fig. 7.5).

Een ander voorbeeld: veronderstel dat de planeet van Fig. 7.4 rond zijn ster draait met het continent van zand (25% van het zichtbare oppervlak) in het midden van de planeetschijf op het moment dat de planeet achter zijn ster staat (de volledige planeetschijf wordt dan verlicht, vergelijkbaar met volle maan). In deze situatie is de bijdrage van het continent groter dan de bijdrage van de oceaan en is het signaal *sterker* dan de voorspelling op basis van de optelmethode (want de optelmethode gaat uit van 75% oceaan over het gehele oppervlak en dus niet alleen langs de randen, om het continent heen). Als de planeet nu verder rond zijn ster draait kan het gebeuren dat het continent verborgen gaat aan de schaduwzijde van de planeet (denk aan het donkere, niet zichtbare deel van de maan tijdens een smalle maansikkel). Het verlichte, zichtbare deel van de planeet laat nu alleen oceaan zien, hetgeen een *zwakker* signaal oplevert dan we op basis van de optelme-



**Figuur 7.5:** Ook al zijn alle blokjes op deze bal precies hetzelfde, het lijkt alsof de blokjes in het midden groter zijn dan de blokjes aan de rand. Door ditzelfde “projectie-effect” wordt het signaal van een planeet vooral bepaald door de gebieden die dichtbij het centrum van het planeetschijf liggen (gezien vanaf de waarnemer).

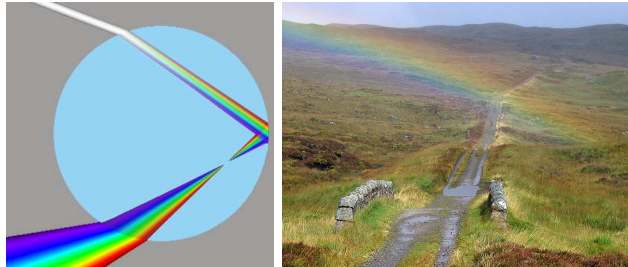
thode zouden verwachten (want deze methode gaat nog steeds uit van een bijdrage van 25% zand, ook van de zichtbare smalle sikkels met alleen oceaan). Op deze manier geeft het optellen van homogene modellen altijd een onjuiste voorspelling en zal het dus lijden tot onjuiste conclusies bij het karakteriseren van inhomogene exoplaneten.

### 7.3.1 Op zoek naar de regenboog

Zoals we eerder hebben beschreven, verschuift de interesse van astronomen zich van de waarneming van nieuwe exoplaneten naar de karakterisatie van reeds waargenomen exoplaneten en het vinden van het “tweelingzusje” van onze Aarde: een planeet die precies op de juiste afstand om zijn ster draait zodat vloeibaar water en dus leven mogelijk is.

In ons zonnestelsel is het bestaan van leven zoals wij het kennen nauw verbonden met het bestaan van water in de atmosfeer en aan het oppervlak van de planeet. In onze zoektocht naar leven op andere planeten kan water dus een handig hulpmiddel zijn, vooral omdat het bestaan van water sporen achterlaat in het signaal van een planeet. Veel vloeibaar water aan het oppervlak, in de vorm van





**Figuur 7.6:** Links: schematische weergave van het pad dat het licht aflegt bij de vorming van een regenboog. Rechts: de regenboog die we zien als het regent terwijl de zon schijnt of als we bijvoorbeeld dicht bij een waterval staan bestaat uit de combinatie van kleine “regenbogen” die ontstaan door vele individuele, grote waterdruppels. Foto ter beschikking gesteld door Remco Scheepmaker.

een oceaan bijvoorbeeld, kan het sterlicht reflecteren als een spiegel. Terwijl de planeet rond zijn as draait zullen we bijvoorbeeld het ene moment de oceaan zien en het andere moment een continent. Dit zou de intensiteit van het ontvangen signaal zodanig kunnen veranderen dat we hiermee het bestaan van water aan het oppervlak kunnen aantonen (Williams & Gaidos 2008).

Een interessanter fenomeen dat we kunnen waarnemen bij een exoplaneet met water in de atmosfeer is de bekende regenboog. Een regenboog wordt veroorzaakt doordat zonlicht (of licht van een andere ster) door kleine waterdruppels schijnt. Als licht de druppel binnenkomt treedt er bij de overgang van lucht naar water breking van het licht op: het licht gaat onder een iets andere hoek verder, waarbij de hoek afhangt van de kleur van het licht. Hierdoor ontstaan de kleuren van de regenboog. Vervolgens reflecteert het licht aan de achterkant van de druppel en gaat het de druppel uit, waarbij er opnieuw breking optreedt (zie Fig. 7.6). Dit proces zorgt ervoor dat we de regenboog altijd zien onder een vaste hoek met de lichtbron, waarbij de exacte hoek afhangt van de brekingscoëfficiënt van het materiaal. Voor water is deze verstrooiingshoek ongeveer  $140^\circ$ <sup>2</sup> (waarbij  $0^\circ$  recht vooruit betekent). Hierdoor zien we de regenboog altijd met de Zon in onze rug.

Onder de juiste omstandigheden is er soms een tweede (*secundaire*) regenboog binnen de eerste (*primaire*) regenboog te zien. De kleuren van deze tweede regenboog zijn omgekeerd (paars aan de buitenkant en rood aan de binnenkant), omdat

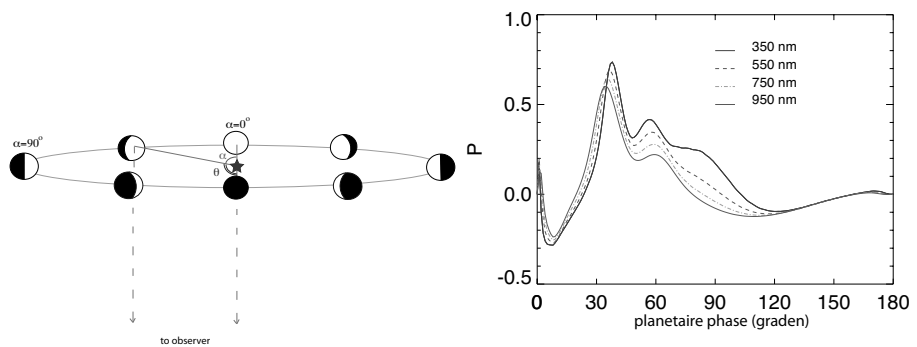
<sup>2</sup>De verstrooiingshoek ( $\theta$ ) is de supplementaire hoek van de planeetfase ( $\alpha$ ), oftewel:  $\alpha = 180^\circ - \theta$  (zie Fig. 7.7). De regenboog van een exoplaneet is daarom zichtbaar bij een planeetfase van  $40^\circ$ .

het licht nog een keer extra is gereflecteerd binnenin de waterdruppels. De reflecties kunnen zelfs nog vaker gebeuren en dan spreken van de *tertiaire* en zogenaamde *boventallige* regenbogen.

Vanwege de reflecties is het licht dat uit de waterdruppels komt gepolariseerd. Het licht van de primaire regenboog kan tot wel 96% gepolariseerd zijn en dat van de secundaire regenboog tot wel 90%. Deze grote graad van polarisatie maakt de regenboog tot een makkelijke doel bij het waarnemen van een exoplaneet.

Wat bedoelen we precies als we zeggen dat we de regenboog van een exoplaneet kunnen waarnemen? Terwijl een exoplaneet rond zijn ster draait, verandert de hoek van verstrooiing van het licht dat wij vanaf Aarde kunnen zien (zie Fig. 7.7). Als we een exoplaneet waarnemen die een planeetfase heeft van  $40^\circ$  (namelijk  $180^\circ-140^\circ$ ) en er zijn waterwolken in de atmosfeer van de planeet, zullen we dus een lokale verhoging zien in de graad van polarisatie van het gereflecteerde licht. Terwijl de planeet naar een grotere fasehoek draait neemt de graad van polarisatie weer af. Dit levert de piek op in de rechter figuur van Fig. 7.7. Als we de exoplaneet bij verschillende golflengten waarnemen, zullen we zien dat de positie van deze piek afhangt van de golflengte. We kijken dus naar de regenboog van de waterwolken op de exoplaneet. Het enige verschil met de regenboog die we allemaal kennen op Aarde, is de afmeting van de druppeltjes. De regenboog van een exoplaneet ontstaat door hele kleine druppeltjes in de wolken van de planeet, met een straal die vaak niet groter is dan  $10\mu\text{m}$  (oftewel 0.00001 meter). De regenboog op Aarde ontstaat daarentegen door veel grotere druppels.

In dit proefschrift laten we zien dat de regenboog in de meeste gevallen zichtbaar moet zijn in het signaal van de planeet. Als meer dan 10–20% (afhankelijk van de golflengte) van de planeetschijf bedekt is met wolken, kunnen wij het bestaan van deze wolken aantonen met het polarisatiesignaal van de regenboog. Als er ijswolken boven de waterwolken zweven blijft de regenboog bestaan totdat iets meer dan de helft van de waterwolken bedekt zijn met ijswolken. Dit betekent dat het zoeken naar de regenboog in het (polarisatie-)signaal van een exoplaneet één van de beste methoden is om water te vinden in de atmosfeer (en dus ook aan het oppervlak) van de planeet.



**Figuur 7.7:** Terwijl de (exo-)planeet rond zijn ster draait zien we telkens andere verstrooiingshoeken ( $\theta$ ). Als de atmosfeer van de planeet waterwolken heeft en op een positie staat met een fase van  $\alpha \sim 40^\circ$  (linker figuur), dan zien we een lokale verhoging in de graad van polarisatie van het licht dat de planeet reflecteert (rechter figuur). De precieze lokatie ( $\alpha$ ) van deze piek hangt af van de golflengte waarin wordt waargenomen. We zien dus eigenlijk de regenboog van de waterwolken op de exoplaneet.

## 7.4 Samenvatting van dit proefschrift

Dit proefschrift bevat de volgende hoofdstukken:

Hoofdstuk 1 is een introductie over exoplaneten. We geven een overzicht van de huidige stand van zaken in het vakgebied: de gebruikte waarneemmethoden, de technieken voor de karakterisatie en de daarmee verkregen eerste resultaten voor reeds waargenomen exoplaneten.

In Hoofdstuk 2 gebruiken we voor het eerst de computercode van Stam (2008) om het effect van bepaalde factoren op het regenboogsignaal van een (exo-)planeet te bestuderen. In het bijzonder kijken we naar het effect van verschillende micro- en macroscopische eigenschappen, zoals de afmetingen van de wolkendruppeltjes en de aanwezigheid van wolken die op een andere hoogte in de atmosfeer liggen.

De ervaringen met de computercode van Stam (2008) gebruiken we in Hoofdstuk 3 om de code zó aan te passen dat we ook inhomogene planeten kunnen modeleren. We testen of deze nieuwe code werkt, om er daarna de geldigheid van de “optelmethode” mee te testen. We vinden dat de optelmethode niet in staat is om het signaal van een exoplaneet juist te simuleren, tenzij de planeet bijna volledig homogeen is. Bij de karakterisatie van een exoplaneet zal het gebruik van de optelmethode in het algemeen dus tot onjuiste conclusies leiden.

In Hoofdstuk 4 gaan we met onze nieuwe code op zoek naar de regenboog in het gemodelleerde signaal van inhomogene exoplaneten. Eerst gebruiken we waterwolken die verschillende percentages van het oppervlak bedekken. We vinden dat bij een bedekking van minstens 10–20% (afhankelijk van de golflengte) het signaal van de planeet genoeg informatie bevat om het bestaan van de wolken aan te kunnen tonen. In die gevallen kunnen we dus de regenboog zien. Daarna gebruiken we meerdere lagen wolken, van vloeibaar water of van ijs, die in verschillende verhoudingen elkaar en het oppervlak bedekken. Onze resultaten laten zien dat zelfs als 52% van de waterwolken bedekt is met ijswolken de regenboog nog zichtbaar is in het polarisatiesignaal van de exoplaneet. Tot slot gebruiken we data van de MODIS satelliet om te onderzoeken of een buitenaards wezen dat naar onze Aarde kijkt het bestaan van wolken in de atmosfeer zou kunnen aantonen. Voor ons model van de Aarde gaan we uit van een bedekking van 66% met waterwolken en 36% met ijswolken, waarbij de ijswolken 45% van de waterwolken bedekken. Terwijl het flux (lichtsterkte) signaal geen tekenen laat zien van het bestaan van waterwolken, is de regenboog in het polarisatiesignaal duidelijk te zien. Hiermee zou een buitenaards wezen het bestaan van water in de aardse atmosfeer dus kunnen aantonen.

In Hoofdstuk 5 passen we onze code een klein beetje aan om ook gasachtige reuzenplaneten te kunnen modelleren. We onderzoeken de invloed van wolkenbanden, zones en vlekken, zoals ook te zien op Jupiter, de grootste gasachtige

planeet van ons eigen zonnestelsel. Onze resultaten laten zien dat deze structuren wel degelijk invloed hebben op het ontvangen signaal van een exoplaneet, al is niet altijd duidelijk onderscheid te maken tussen de verschillende structuren. Ook laten onze resultaten zien dat een buitenaards wezen op een verre planeet onder de juiste omstandigheden de Grote Rode Vlek op Jupiter zou kunnen aantonen.

Tot slot presenteren we in Hoofdstuk 6 LOUPE (Lunar Observatory for Unresolved Polarimetry of Earth). LOUPE is een idee voor een klein, licht instrument dat gebruikt kan worden om het signaal van de Aarde als een exoplaneet te bestuderen vanaf de Maan. Ons voorstel is om LOUPE mee te nemen naar de Maan met de toekomstige Lunar Lander missie van de Europese Ruimtevaartorganisatie ESA. Dankzij de unieke positie van de Maan ten opzichte van de Aarde kan LOUPE de veranderingen bestuderen in het zonlicht dat wordt gereflecteerd door de Aarde. De Aarde draait om haar as terwijl tegelijkertijd de Maan om de Aarde draait. Hierdoor komen verschillende structuren in beeld, terwijl ook de fase van de Aarde (zeg de schijngestalte) verandert. Als de missie meerdere maanden duurt, wordt het zelfs mogelijk om de invloed van seizoenen te zien op het signaal (in flux en polarisatie) van de Aarde als exoplaneet. Een instrument zoals LOUPE levert unieke gegevens op die gebruikt kunnen worden om onze modellen te controleren. Daarnaast kunnen deze gegevens gebruikt worden voor de toekomstige karakterisatie van aardachtige exoplaneten en de zoektocht naar water en leven op andere planeten.