



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

**Tracing life through light: towards detecting life on
exoplanets with spectroscopy and spectropolarimetry**
Mulder, W.

Citation

Mulder, W. (2026, April 2). *Tracing life through light: towards detecting life on exoplanets with spectroscopy and spectropolarimetry*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4300414>

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/1887/4300414>

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

Nederlandse samenvatting

Hoe zijn we ontstaan? Zijn we alleen in dit universum? Al eeuwenlang prikkelen deze vragen de grenzeloze nieuwsgierigheid van de mensheid. Vandaag de dag, november 2026, biedt de ontdekking van meer dan zesduizend exoplaneten een kijkje in de ongelooflijke diversiteit van de werelden die zich buiten ons zonnestelsel bevinden. In het verlangen om deze verre werelden écht te kunnen begrijpen, is ontdekking nog maar een eerste stap. Als we willen beoordelen of er leven kan bestaan op deze planeten, is het noodzakelijk om hun basiseigenschappen te kennen, bijvoorbeeld de grootte en massa van de planeet. Door de dichtheid van de planeten te berekenen, kunnen we ze classificeren als rotsachtige (bijvoorbeeld Aarde-achtige) of gasachtige planeten (zoals Neptunus, Jupiter of zelfs een kolossale super-Jupiter). Als we de grootte van moederster en de afstand tussen de planeet ster weten, kunnen we uitzoeken of deze planeet in de zogeheten leefbare zone valt. In deze zone is de temperatuur geschikt voor het bestaan van vloeibaar water: een van de cruciale ingrediënten voor leven zoals wij dat kennen.

Verre werelden observeren: directe waarneming & spectroscopie

Hoe kunnen we de onzichtbare werelden rond verre sterren bestuderen? Sterren, of het nu onze Zon is of verre sterren in de Melkweg, zenden licht uit over het hele elektromagnetische spectrum: infraroodstraling die we kunnen voelen als warmte, zichtbaar licht dat we kunnen zien, en ultraviolette straling die zelfs zonnebrand kan veroorzaken. Planeten daarentegen zijn heel anders. Ze produceren geen zichtbaar licht van zichzelf. In plaats daarvan worden ze alleen zichtbaar doordat ze het licht van hun moederster weerkaatsen en een klein beetje infrarood uitstralen wanneer ze opwarmen door dat sterlicht. In onze eigen nachtelijke hemel kunnen we planeten zoals Mars, Venus en Jupiter zien. Met het blote oog lijken ze heldere lichtpuntjes, niet zo verschillend van nabije sterren. Overdag verdwijnen deze planeten echter volledig uit zicht. Dit komt niet omdat ze ophouden met het weerkaatsen van zonlicht, maar omdat de Zon zó fel is dat haar licht al het zwakke gereflecteerde licht van de planeten volledig overstemt.

Ditzelfde principe geldt ook voor exoplaneten, maar dan op een veel extremere schaal. Deze planeten draaien om sterren die niet alleen veel helderder zijn dan de planeet zelf, maar ook enorm ver van ons vandaan staan. Vanuit ons perspectief staat een exoplaneet pal naast zijn verblindend heldere ster, waardoor het contrast tussen beiden gigantisch wordt: het licht van de ster kan wel tienduizend tot tientallen miljarden keer sterker zijn dan het gereflecteerde licht van de planeet. Dit illustreert hoe moeilijk het is om een exoplaneet daadwerkelijk te fotograferen. Toch zijn er inmiddels planeten direct waargenomen. Om dit te doen gebruiken astronomen een techniek die **high-contrast imaging** heet. Hierbij onderdrukken telescopen het felle licht van de moederster, zodat het zwakke gereflecteerde licht van de planeet zichtbaar kan worden. Deze methode staat ook wel bekend als **directe waarneming**.

Echter, zelfs met deze directe waarneming techniek is het niet altijd mogelijk om exp-

laneten waar te nemen. Gelukkig kunnen we ook andere methodes gebruiken, zoals spectroscopie, om exoplaneten te bestuderen. Spectroscopie meet de golflengte (of 'kleur') en de intensiteit van licht. Alle exoplaneten draaien met een constante snelheid rondom hun moederster. Als de planeet in zijn ronde precies tussen zijn ster en een telescoop staat, passeert een deel van het sterlicht door de atmosfeer van de planeet. Door dit licht te analyseren, kunnen we de chemische samenstelling van de planeet achterhalen. Spectroscopie maakt het mogelijk om de unieke 'vingerafdrukken' van atomen en moleculen te detecteren, en zo de samenstelling van de atmosfeer, de temperatuur en de aanwezigheid van wolken of nevels te bepalen. **Hoge-resolutie spectroscopie** kan zelfs sporen van gassen detecteren en atmosferische bewegingen zoals wind of de rotatie van de planeet meten.

In **Hoofdstuk 2** gebruiken we hoge-resolutie spectroscopie om de atmosferen van drie **bruine dwergen** te bestuderen. Dit zijn objecten die noch planeten noch sterren zijn: ze zijn zwaarder dan reuzenplaneten, maar te licht om waterstoffusie in stand te houden en stralen daardoor geen stabiel eigen licht uit. De waarnemingen maken deel uit van de *SupJup Survey*, waarvoor het CRIRES+-instrument op de Very Large Telescope in Chili is gebruikt. Dit instrument is in staat om gedetailleerde spectra van astronomische objecten waar te nemen.

De drie spectra van de bruine dwergen die wij bestuderen laten een verhoogde koolstof-zuurstofverhouding en een hogere metalliciteit zien in vergelijking met onze zon. Dit suggereert dat een deel van de zuurstof tijdens de vorming van deze objecten mogelijk in vaste materialen is opgeslagen. We hebben ook de verhouding tussen twee isotopen van koolstof gemeten, ^{12}C en ^{13}C . Deze verhouding geeft aanwijzingen over de chemische evolutie van het gebied waar de objecten zijn ontstaan. Onze resultaten laten een iets lager gehalte aan ^{13}C zien dan doorgaans wordt aangetroffen in het diffuse interstellair gas en stof in de Melkweg. Binnen het SupJup Survey-project worden momenteel de resterende spectra geanalyseerd om een vollediger beeld te krijgen van hoe planeten en aanverwante substellair objecten ontstaan en zich ontwikkelen.

De zoektocht naar leven zoals wij dat kennen: homochiraliteit & spectropolarimetrie

Hoewel de studie van verre exoplaneten de enorme diversiteit aan werelden in ons universum laat zien, blijft één simpele waarheid bestaan: de enige planeet waarvan we weten dat er leven op is, is de Aarde. Om naar vergelijkbare levensvormen buiten ons zonnestelsel te zoeken, moeten we eerst begrijpen hoe we de essentiële tekenen van leven op Aarde kunnen herkennen. Een van de duidelijkste signalen is het fenomeen **homochiraliteit**. De bouwstenen van leven zoals wij dat kennen - chlorofyl, aminozuren, eiwitten, DNA en suikers - hebben allemaal een specifieke moleculaire 'links- of rechtshandigheid'. Deze consistente voorkeur voor één spiegelbeeldvorm wordt biologisch bepaald en vormt daardoor een unieke en ondubbelzinnige vingerafdruk van leven.

Om ons voor te bereiden op toekomstige ruimtemissies die gericht zijn op het opsporen van buitenaards leven, is het essentieel om te testen of we dit signaal op afstand kunnen detecteren, onder realistische omstandigheden buiten het laboratorium. Een van de krachtigste technieken hiervoor is **spectropolarimetrie**. In tegenstelling tot spectroscopie, waarbij we alleen de intensiteit van specifieke golflengten van binnenkomend licht meten, laat spectro-

polarimetrie zien hoe de lichtgolven zijn georiënteerd - een eigenschap die bekend staat als **polarisatie**. Licht kan lineair gepolariseerd raken wanneer het wordt verstrooid door de atmosfeer of gereflecteerd door planetaire oppervlakken zoals oceanen of zandgronden, een effect dat goed wordt begrepen. Een minder voor de hand liggende, maar intrigerende vorm is **circulaire polarisatie**, waarbij de lichtgolven in een spiraalvorm bewegen. Interessant is dat dit type polarisatie kan ontstaan wanneer licht in wisselwerking staat met biologische moleculen vanwege hun homochirale aard. Hierdoor wordt circulaire polarisatie gezien als een veelbelovende en wellicht de meest eenduidige indicator van leven op afstand.

Hoewel bestaande modellen van hoe planetaire oppervlakken en atmosferen licht reflecteren al rekening houden met verschillende verstrooiingseffecten, negeren ze vaak de bijdrage van circulaire polarisatie afkomstig van vegetatie en andere biologische materialen. Dit komt vooral door de uiterst moeilijke meetbaarheid van circulair gepolariseerd licht: de signalen bedragen meestal slechts enkele tienden tot honderdsten van een procent van het gereflecteerde licht. Daarnaast, bestaat geen perfect circulair polarisatie-analyse-instrument dat deze zwakke signalen betrouwbaar over het volledige zichtbare spectrum kan meten.

Nu we weten dat circulaire polarisatie een unieke signatuur van biologische activiteit kan zijn, richten we ons in **Hoofdstuk 3** op het verfijnen van deze modellen door de effecten van biologische materialen mee te nemen. Voor deze studie gebruiken we een **heteluchtballon** als observatieplatform. Dit biedt een aantal voordelen: een stabiele vlucht, aanzienlijk lagere kosten dan een helikopter of vliegtuig, en de mogelijkheid om tijdens observaties instrumenten in realtime aan te passen. We meten circulaire polarisatiesignalen van verschillende landschappen, zoals bossen, velden en watermassa's, om beter te begrijpen hoe levende oppervlakken op afstand kunnen worden herkend. Daarnaast evalueren we de prestaties van een polarisatiecamera en onderzoeken we het potentieel ervan voor toekomstige meetcampagnes die gericht zijn op het opsporen van leven.

Ontwerp van een snapshot Full-Stokes spectropolarimeter

Hoewel spectropolarimetrie veelbelovend is voor het detecteren van leven op afstand, blijft er één grote uitdaging: we hebben uiterst gevoelige instrumenten nodig om deze subtiele signalen precies en betrouwbaar te meten. Voortbouwend op onze observaties vanuit de luchtballon, is de volgende stap het ontwerpen van een instrument dat polarisatiesignalen kan meten, zowel circulaire als de veelbelovende lineaire component, vanuit een uitkijkpunt waar de aarde kan worden waargenomen alsof het een exoplaneet is. Een dergelijk perspectief kan alleen vanuit de ruimte worden bereikt, bijvoorbeeld vanaf het internationale ruimtestation ISS of vanaf de maan. Vanaf deze kijkpunten kunnen we het volledige polarisatiesignaal van onze planeet vastleggen. Voor instrumenten in de ruimte is het wenselijk om alle componenten van polarisatie in één enkele momentopname te detecteren, zonder bewegende onderdelen of actieve optische elementen te gebruiken. Het ontwikkelen van een dergelijke volledige Stokes-spectropolarimeter is geen eenvoudige taak, en de laatste twee hoofdstukken van dit proefschrift richten zich op de mogelijkheden en uitdagingen die gepaard gaan met het ontwerpen en realiseren van zo'n instrument.

In **Hoofdstuk 4** introduceren we **LSDPol** (Life Signature Detection Polarimeter), een prototype-instrument dat is ontworpen om tekenen van homochiraliteit te detecteren met be-

hulp van polarimetrie in zichtbaar licht. Het belangrijkste doel van LSDPol is het meten van uiterst kleine polarisatiesignalen - met name de minuscule fracties circulair gepolariseerd licht die door biologische materialen worden gegenereerd. Daarbij moet het instrument deze kleine circulaire signalen kunnen onderscheiden van de veel grotere lineaire polarisatiesignalen, die tot tientallen procenten van het gereflecteerde licht kunnen bedragen, zelfs als dat ten koste gaat van spectrale of spatiële resolutie. Een van de grootste uitdagingen is het optreden van ongewenste, vals-positieve polarisatiesignalen, die veroorzaakt worden door de manier waarop licht buigt en zich verspreidt nadat het door een polarisatiemodulator beweegt.

Om te begrijpen waar deze signalen vandaan komen, voeren we gedetailleerde computer-simulaties uit, gevolgd door laboratoriumexperimenten. De resultaten tonen aan dat lichtbuiging (ook wel Fresnel-diffractie genoemd) onverwachte patronen in de metingen veroorzaakt: kleine golvende kenmerken verschijnen in delen van de gegevens waar die niet zouden moeten voorkomen, en er worden verschuivingen waargenomen, zelfs bij het meten van ongepolariseerd licht. We hebben ook ontdekt dat de afstand tussen de modulator en de daaropvolgende optische componenten een cruciale rol speelt. Voor de meest nauwkeurige resultaten is daarom een uiterst zorgvuldige kalibratie vereist. Om de prestaties van LSDPol verder te verbeteren en voor te bereiden op toekomstige ruimtevaarttoepassingen, raden we aan een uitgebreid wiskundig model te ontwikkelen dat rekening houdt met golflengte-afhankelijk lichtgedrag.

Ten slotte wordt in **Hoofdstuk 5** het gebruik van **spatiële polarisatiemodulatoren** onderzocht. Deze geavanceerde optische elementen, gebaseerd op vloeibare-kristaltechnologie, maken het mogelijk om alle polarisatiecomponenten van het invallende licht in één enkele momentopname te meten. Een belangrijke uitdaging bij deze modulatoren is het ontstaan van ongewenste zelfbeelden. Dit gebeurt doordat de modulator en een lineair polarisatiefilter samen functioneren ze als een soort virtueel tralie, waardoor het Talbot-effect optreedt. Het patroon van dit tralie herhaalt zich op specifieke afstanden, de zogenaamde Talbot-afstanden. Tussen deze Talbot-afstanden veranderen de patronen: het oorspronkelijke patroon kan verdubbeld verschijnen of verschoven worden ten opzichte van het originele traliegroter. Deze subtiele intensiteitsmodulaties kunnen interfereren met de meting van de echte polarisatietoestand. Daarom is het essentieel om deze effecten zorgvuldig te begrijpen en te corrigeren om betrouwbare spectropolarimetrische metingen te garanderen.

Dankzij deze technologische vooruitgang komen we steeds dichterbij het bouwen van instrumenten die nauwkeurig de onmiskenbare tekenen van leven kunnen detecteren op planeten die rondom verre sterren, buiten ons zonnestelsel, draaien.