



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## **Lasers, lenses and light curves : adaptive optics microscopy and peculiar transiting exoplanets**

Werkhoven, T.I.M.

### **Citation**

Werkhoven, T. I. M. (2014, June 26). *Lasers, lenses and light curves : adaptive optics microscopy and peculiar transiting exoplanets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/26966>

Version: Corrected 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/1887/26966>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/26966> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Werkhoven, Tim van

**Title:** Lasers, lenses and light curves : adaptive optics microscopy and peculiar transiting exoplanets

**Issue Date:** 2014-06-26

# Samenvatting

## Afbeeldingen en verstoringen

Als je ergens naar kijkt, maken je ogen daar een afbeelding van op je netvlies. Je netvlies zet het licht om in elektrische signalen, en je hersenen interpreteren dit<sup>2</sup> zodat je je bewust wordt van waar je naar kijkt en je *ziet*. Als je ogen het licht niet goed op je netvlies concentreren is de afbeelding wazig, en zie je niet scherp. In dat geval kan een bril helpen om beter te kunnen zien.

Verstoringen komen niet alleen voor bij onze ogen, ook telescopen en microscopen hebben soms dit soort problemen. Een bekend voorbeeld is de Hubble-ruimtetelescoop, waar na de lancering bleek dat de hoofdspiegel een afwijking had waardoor de afbeeldingen wazig waren. Dit probleem is tijdens een reparatiemissie verholpen door een corrigerende ‘bril’ te installeren.

Bij de Hubble-telescoop kwam de storing door het instrument zelf, maar dit is niet altijd het geval. Wanneer je ’s nachts vanaf de Aarde naar sterren kijkt kan je ze (bij onbewolkt weer) zien fonkelen. Dit komt niet door je ogen of de ster, maar door de Aardse atmosfeer. Dit fenomeen heet *astronomisch zicht* (van het Engelse *astronomical seeing*) en verandert sterk met de tijd, zoals te zien is bij het fonkelen van sterren. Een ander voorbeeld doet zich voor in microscopie, waar niet de atmosfeer maar het te bestuderen monster het licht verstoort.

De oorzaak van deze externe verstoring is in beide gevallen een medium met variërende brekingsindex. Normaal gesproken reist licht in een rechte lijn en heeft het een vlak golffront, maar op overgangen waar de brekingsindex verandert is dit niet altijd zo. Dit effect is goed te zien bij een rietje in een glas water, het lijkt gebroken bij het wateroppervlak. Ook als je door het wateroppervlak naar de bodem van een zwembad kijkt zie je het tegeltjespatroon vervormd; hoe meer het water golft, hoe sterker de vervorming. Dit effect is te zien in Figuur 1.

Het gevolg hiervan is dat afbeeldingen door deze verstoringen minder scherp zijn, waardoor je minder details kunt zien dan je zou willen. Dit is een probleem als je kleine details wilt zien, zoals planeten die om verre sterren draaien, of organellen in cellen. Één oplossing hiervoor is om telescopen vanuit de ruimte te laten waar-

---

<sup>2</sup>Je netvlies interpreteert en comprimeert de signalen al vóór ze naar je hersenen gaan.



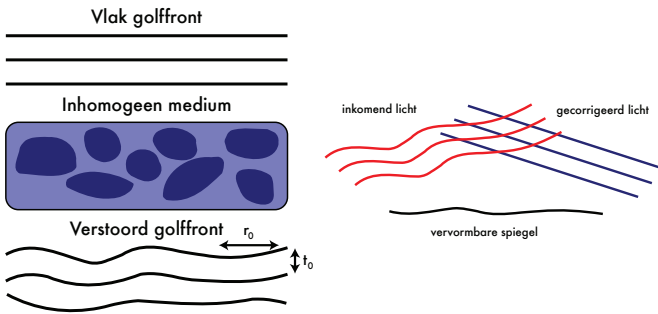
**Figuur 1:** Een forel onder water, waarbij de staart uit elkaar gerekt lijkt. Dit is echter een verstoring veroorzaakt door het golvende wateroppervlak. *Bron: Andrew Kirk.*

nemen, en er zijn inderdaad ook veel satellieten die dit doen, maar dit is niet altijd mogelijk. Een andere oplossing is om de aberraties optisch te corrigeren.

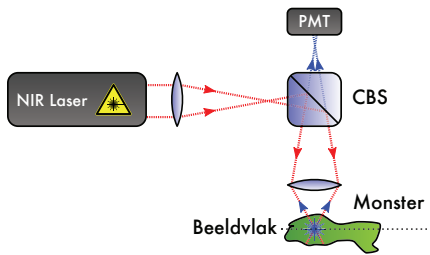
## Adaptieve optiek

Bij zowel telescopen als microscopen is er ook een inhomogeen medium dat het golffront verstoort, waardoor de afbeelding wazig wordt. In het eerste geval is dit de atmosfeer, waar lucht met verschillende temperatuur turbulent mengt waardoor er bellen ontstaan van lucht met een andere temperatuur dan de omgeving. Omdat brekingsindex afhangt van temperatuur wordt het licht hierdoor verstoord. In het tweede geval komt dit door de te bestuderen (biologische) monsters, waar de brekingsindex van verschillende delen van een cel ook varieert; de opperhuid heeft bijvoorbeeld een andere brekingsindex dan de lederhuid. In beide gevallen treedt er ongewenste verstoring van het licht op die afbeeldingen waziger maken.

In de jaren zestig werd door Babcock al gespeculeerd over een mogelijk oplossing voor dit probleem door de verstoring te meten en vervolgens de tegenovergestelde storing als correctie toe te passen. Dit kan door vervormbare spiegels te gebruiken, die bestaan uit een flexibel membraan waarop een spiegelende laag is aangebracht, zoals zilver of goud. Door aan de achterkant van dit membraan op verschillende plekken te trekken en te duwen kan de spiegel de gewenste vorm aannemen en de verstoring corrigeren. *Adaptieve optiek*, zoals deze methode wordt genoemd, wordt al ruim twintig jaar succesvol toegepast op verschillende telescopen, maar vindt het laatste decennium ook elders toepassingen, onder andere in oogheelkunde, laseretsen en ook microscopie.



**Figuur 2:** Links: aberraties veroorzaakt door een verstrend medium, bijvoorbeeld de atmosfeer. Het vlakke golffront komt van boven binnen, reist door een inhomogeen medium, en komt er vervolgens verstoord uit. De parameters  $r_0$  en  $\tau_0$  geven respectievelijk de typische lengte- en tijdschalen weer van de verstoring. Rechts: correctie van zo een golffrontverstoring met een vervormbare spiegel. Het verstoorde licht komt binnen (linksboven) en reflecteert tegen de spiegel die zodanig vervormd is dat de verstoring gecorrigeerd wordt (rechtsboven).



**Figuur 3:** Een schematisch voorbeeld van een scannende microscoop. De nabij-infrarode laser (NIR laser) vormt een brandpunt op het beeldvlak in het monster, waar het fluoresceert. Dit licht wordt gescheiden door een kleurenfilter (chromatische bundelsplitser, CBS) en vervolgens wordt het gemeten met een fotonenteller (PMT). Door het brandpunt over een raster door het monster te bewegen en synchroon de fluorescentie te meten kun je een 3-dimensionale afbeelding maken.

Het eerste deel van dit proefschrift gaat over de implementatie van adaptieve optiek in een zogenaamde scannende microscoop. Dit type microscoop werkt door middel van een laserbundel die in een monster wordt geconcentreerd. In het brandpunt van de laserbundel ontstaat fluorescentie dat informatie geeft over de bestanddelen van het te bestuderen monster. De fluorescentie wordt op basis van de golflengte gescheiden van het laserlicht en de intensiteit wordt gemeten. Vervolgens wordt de bundel op een net iets andere plek gericht en wordt er opnieuw

gemeten. Door zowel de positie van het brandpunt als de fluorescentieintensiteit te meten is het nu mogelijk om een afbeelding te maken met voor elke meting een pixel (zie Figuur 3).

## Deel I: adaptieve microscopie

### Hoofdstuk 3: golffront meting

Om een golffrontfout te corrigeren moet deze eerst gemeten worden. In hoofdstuk 3 hebben we hiervoor een methode ontwikkeld en getest. De truc is hierbij om alleen licht te selecteren wat uit een klein volume terugreflecteert uit een monster, zonder dat er ander licht op de camera valt dat meting verstoort. Om dit te bereiken interfereren we het teruggereflecteerde licht met een referentiebundel met gelijke padlengte. Omdat we een gepulste laser gebruiken, interfereert alleen het licht uit een dunne laag van enkele tientallen micrometers. Door een helling in de fase van de referentiebundel aan te brengen ontstaat er een karakteristiek interferentiepatroon op de camera. Dit specifieke patroon stelt ons in staat om tegelijkertijd het verstoorde licht te isoleren en tegelijkertijd de verstoring van dit licht te meten.

We hebben deze methode in in hardware en software geïmplementeerd en getest op biologische monsters; een specifiek type kankercel dat vaak gebruikt wordt bij onderzoek, en collageen uit de staart van een rat. In beide gevallen lukte het om een golffront fout te meten en vervolgens te corrigeren. Het prototype dat we geïmplementeerd hebben kan als leidraad dienen voor toekomstige systemen.

### Hoofdstuk 4: sensorloze correctie

In plaats van de golffront fout direct te meten, is het ook mogelijk om verschillende correcties toe te passen en analyseren welke de beste afbeelding oplevert. Door te onthouden welke correctie de beste afbeelding oplevert wordt elke iteratie beter. Voor deze methode is geen aparte golffrontsensor nodig waardoor het eenvoudiger is toe te passen, alhoewel er meer metingen nodig zijn waardoor de correctie langer duurt. Om dit te versnellen bestaan er model-gebaseerde algoritmes welke informatie gebruiken over hoe de verstoringen de beeldkwaliteit beïnvloeden. Deze algoritmes hebben typisch  $mN$  iteraties nodig voor correcties, waarbij  $N$  afhangt van de mate van correctie (het aantal vrijheidsgraden van een vervormbare spiegel, bijvoorbeeld) en  $m$  algoritmespecifiek is, en typisch ongeveer 2 tot 5 is.

In hoofdstuk 4 hebben we een model-gebaseerde methode ontwikkeld met robuuste kalibratie en die een factor twee minder iteraties nodig heeft. Door randvoorwaarden te stellen aan het model dat we aan de data fitten zorgen we ervoor dat ruis minder invloed heeft op de kalibratie. Daarnaast gebruikt deze methode meer informatie van het model zodat de aberratiecorrectie sneller is en slechts  $N + 1$  iteraties nodig heeft.

We hebben ook deze methode geïmplementeerd en getest op collageen geëxtraheerd uit een rattenstaart. De kalibratiemethode werkt robuust en levert consis-

tente resultaten op. Deze kalibratie hebben we vervolgens gebruikt om de kwaliteit van het correctie algoritme te testen, welke met een geschikt model. Daarnaast hebben het model gemeten op verschillende plekken in het monster, waaruit bleek dat het mogelijk varieert. Deze variatie is relevant voor de toepasbaarheid van modelgebaseerde algoritmes, en kan dienen als input voor toekomstige algoritmes waar optimaal gebruik wordt gemaakt van modeldata en metingen.

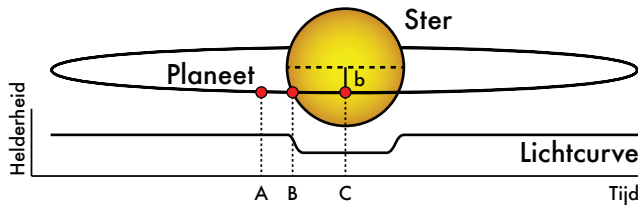
## De planeet Aarde

Totdat de andere planeten in ons zonnestelsel werden ontdekt, bezat Aarde een unieke positie. Deze ontdekking plaatste de positie van de Aarde in context, waardoor ze haar unieke plek verloor. Lange tijd waren er alleen planeten bekend binnen ons zonnestelsel, totdat ongeveer 20 jaar geleden de eerste planeet daarbuiten werd ontdekt, een zogenaamde *exoplaneet*. Opnieuw werd hierdoor de plaats van de Aarde in perspectief geplaatst.

De eerste exoplaneten zijn gedetecteerd met indirecte methoden, waarbij wordt gekeken naar (periodieke) variatie van sterreneigenschappen. Planeten trekken een beetje aan sterren terwijl ze hier omheen draaien, waardoor de ster een klein beetje beweegt. Omdat de sterren veel zwaarder zijn bewegen ze niet zo veel als de planeet, maar toch is dit te detecteren als je goed kijkt. Door deze detectiemethode op grote schaal toe te passen zijn er inmiddels meer dan duizend exoplaneten bekend, met nog duizenden meer waarvan nog niet zeker is of het planeten betreft.

De reden dat het honderden jaren duurde voor de ontdekking van planeten buiten ons zonnestelsel is dat het technisch erg ingewikkeld is om deze objecten waar te nemen. Het contrast in helderheid tussen exoplaneten en de ster waar ze omheen draaien is ongeveer 9 tot 10 ordes van grootte in het geval van Jupiter en de Aarde. Omdat planeten verder vaak dicht bij hun ster staan, is het extra lastig om zulke zwakke objecten naast hun heldere sterren te onderscheiden. Om deze reden zijn de eerste exoplaneten via indirecte methoden ontdekt, zoals de bovengenoemde eerste twee kandidaten.

## Planetovergangen



**Figuur 4:** Een illustratie van een planeetovergang (boven) met bijbehorende schematische lichtcurve (onder), waarbij verschillende relevante gebeurtenissen zijn gemarkeerd. A geeft de situatie weer waar de planeet de ster nog niet afdekt, hier is de helderheid maximaal. B geeft de intrede van de overgang aan, waar de planeet voor het eerst sterlicht blokkeert, en waar de helderheid het sterkst afneemt. C geeft de maximale sterlichtvermindering aan in het midden van de overgang. De impactparameter is aangegeven met  $b$ , en de kleurgradient geeft de randverduistering van de ster weer.

Een andere indirecte detectiemethode dan hierboven beschreven is door op zoek te gaan naar planeten die een overgang over hun ster maken. Als de planeetbaan precies op onze gezichtslijn ligt, passeert de planeet elke rotatie een keer tussen ons en de ster door, waardoor de helderheid van de ster een beetje af lijkt te nemen. Vanaf de Aarde ziet dat er uit als een puntbron die periodiek een beetje afneemt in helderheid. Ondanks dat de kans op zulke planeetbanen niet zo groot is<sup>3</sup>, kun je dit compenseren door heel veel sterren tegelijkertijd waar te nemen. Daarnaast hebben dat planeten die dicht bij hun ster staan en een korte omlooptijd hebben een grotere kans hebben om waargenomen te worden, en veel van de op deze manier ontdekte exoplaneten hebben inderdaad ook een korte omlooptijd.

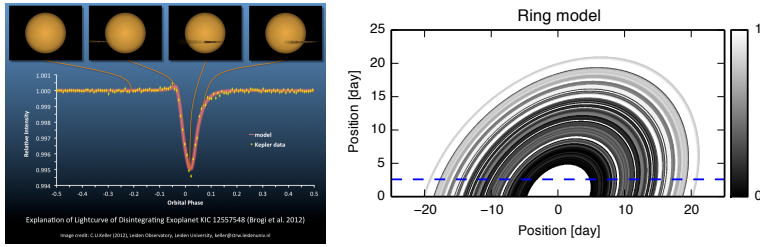
Figuur 4 geeft een schematische afbeelding van een planeetovergang. In deze figuur zijn verschillende details aangegeven, A geeft de situatie aan waar nog geen afname in helderheid van de ster te zien is, B geeft de intrede aan wanneer de planeet voor het eerste de ster begint af te dekken en de helderheid afneemt, en C geeft het midden van de overgang aan waar de helderheid het laagst is. Verder geeft B in dit figuur de impactparameter aan, dat wil zeggen hoe ver van het midden de planeet over de ster lijkt te gaan. De hoeveelheid licht die wordt geblokkeerd door de planeet hangt af van de grootte van de planeet relatief ten opzichte van de ster; hoe meer steroppervlak wordt afgedekt hoe meer de helderheid afneemt. Al deze parameters beïnvloeden hoe de helderheid als functie van tijd – de lichtcurve – er uit ziet. Het omgekeerde is voor wetenschappers relevant: de specifieke vorm van de lichtcurve geeft informatie over de planeet(baan).

Zoals uitgelegd is het belangrijk om veel sterren waar te nemen om exoplanetovergangen te detecteren. Twee instrumenten die dit doen zijn de *Kepler* satelliet en het grond-gebaseerde waarnemstation *SuperWASP*. Beiden meten continu de helderheid van honderdduizenden sterren. Omdat de satelliet *Kepler* in de ruimte zweeft heeft deze als voordeel dat hij sterren dag en nacht kan waarnemen, terwijl *SuperWASP* dat enkel 's nachts kan als het weer dat toestaat. Hierdoor zijn de *SuperWASP* data niet compleet, er wordt nooit overdag of bij bewolking waargenomen. Het voordeel van *SuperWASP* is daarentegen dat deze goedkoper is, hij hoeft immers niet de ruimte in.

In het tweede deel van dit proefschrift hebben we twee exoplaneten onderzocht welke zijn waargenomen via deze overgangsmethode. Een van deze exoplaneten is waargenomen met *Kepler*, de andere met *SuperWASP*. Beide exoplaneten zijn op hun eigen manier apart; het eerste betreft een planeet die onder invloed van haar ster uiteenvalt terwijl het tweede een geraffineerd ringstelsel heeft dat doet denken aan Saturnus.

---

<sup>3</sup>Ter illustratie: de kans dat je vanaf een willekeurige oriëntatie de Aarde over de Zon ziet gaan is ongeveer 0.3 procent. De kans dat je dit bij Jupiter ziet is slechts 0.1 procent.



**Figuur 5:** *Links:* Lichtcurve van de uiteenvallende planeet. *Rechts:* Een potentiële oplossing van het ringsysteem.

## Deel II: intrigerende exoplaneten

### Hoofdstuk 5: een uiteenvallende planeet

De ster KIC 12557548 (hierna: KIC 1255), waargenomen met de *Kepler* satelliet, laat elke 15,7 uur een afname van de helderheid zien typisch voor (onder andere) exoplaneetovergangen. Wat echter uniek is aan dit object is dat de helderheidsafname sterk varieert. Zoals hiervoor beschreven wordt de afname in helderheid bepaald door de relatieve grootte van de planeet, een sterke variatie hierin impliceert dus een significante verandering van de grootte van de planeet of ster. Beide scenario's zijn erg onwaarschijnlijk, en in het geval van KIC 1255 bleek er ook iets anders aan de hand te zijn. Door het intense sterlicht verdampt deze planeet langzaam, waardoor er gas- en stofwolken ontstaan. Dit proces is dynamisch waardoor er soms grotere en soms kleinere stofwolken ontstaan wat de karakteristieke lichtcurve van deze ster verklaart.

In hoofdstuk 5 onderzoeken we het gedrag van deze stofwolk en de processen die daaraan ten grondslag liggen. Door gebruik te maken van bijna vier jaar aan *Kepler* data kunnen we beter dan eerder de verandering van deze stofwolk bestuderen. Door verschillende aspecten van de lichtcurve te kwantificeren en met elkaar te vergelijken kunnen we zien dat de wolk binnen één rotatie helemaal anders is, wat betekent dat het proces dat ten grondslag ligt aan het verdampen op tijdschalen korter dan 16 uur werkt. Verder hebben we door middel van het fitten van een model aanwijzingen gevonden dat de wolk uit twee delen bestaat: een coma-achtige schil om de planeet heen, en een ijle staart.

### Hoofdstuk 6: Saturnus' grote broer

Het tweede object betreft J140747.93–394542.6 (kortweg: J1407), een ster waargenomen met de *SuperWASP* telescoop. J1407 werd ontdekt tijdens routinematig onderzoek van een groep sterren, en bleek een merkwaardige lichtcurve te hebben. In 2007 is een verzwakking van het sterlicht waargenomen welke meer dan 50 dagen

duurde. De maximale verzwakking op 29 april 2007 is meer dan 95 procent, en gedurende de dagen hiervoor en hierna is veel fijnstructuur te zien in de lichtcurve, het signaal veranderde op schalen van uren met tientallen procenten. Deze structuur is bovendien min of meer symmetrisch rond het diepste punt. De combinatie van deze eigenschappen lijkt erop te wijzen dat dit alleen door een overgang van een object met een ringstelsel gevormd kan worden.

In hoofdstuk 6 hebben we de *SuperWASP* lichtcurve van dit object handmatig gereduceerd om een hogere nauwkeurigheid te bereiken dan de automatische methode. Vervolgens hebben we een simpel model gemaakt dat de lichtcurve modelleert van een planeet met ringstelsel dat tussen ons en een ster passeert. Via dit model kunnen we verschillende eigenschappen over de planeet bepalen uit de helling van de lichtcurve, zoals de snelheid van de planeet, de bijbehorende planeetbaan, en hoe groot het ringstelsel moet zijn. Vervolgens hebben we een ander model gemaakt om uit te zoeken hoe het ringstelsel er uit zou moeten zien. We hebben dit aan de lichtcurve gefit en een ringsysteem gevonden die de data verklaart.

