



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## High-contrast imaging polarimetry of exoplanets and circumstellar disks

Holstein, R.G. van

### Citation

Holstein, R. G. van. (2021, October 13). *High-contrast imaging polarimetry of exoplanets and circumstellar disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3217115>

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/1887/3217115>

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

# Nederlandstalige samenvatting

## **Polarimetrische observaties van exoplaneten en circumstellaire schijven**

Het begrijpen van het ontstaan en de ontwikkeling van planetenstelsels is een van de meest fundamentele uitdagingen in de sterrenkunde. De vorming van planeten is nauw verwant aan de vorming van sterren. Sterren worden gevormd in enorme wolken van moleculair gas en stof die zich in het interstellair medium bevinden. Delen van zo een moleculaire wolk fragmenteren en storten onder invloed van hun eigen zwaartekracht ineen, wat resulteert in de vorming van dichte kernen die verder ineenstorten tot sterren. Omdat de instortende kern een netto impulsmoment heeft, vormt zich een ronddraaiende schijf van stof en gas rond de vormende ster. Deze circumstellaire schijf wordt vaak een protoplanetaire schijf genoemd omdat we denken dat planeten alsook bruine dwergen zich in deze schijf vormen. Deze planeten en bruine dwergen noemen we samen substellaire begeleiders, oftewel objecten die lichter zijn dan sterren en die in een baan rond een ster draaien. Substellaire begeleiders kunnen zich vormen door de samenklontering van het stof in de circumstellaire schijf tot kilometersgrote planetesimalen en de daaropvolgende samentrekking van planetesimalen en gas, de lokale ineenstorting van een deel van de schijf, of de directe ineenstorting van een afzonderlijke kern in de moleculaire wolk. In al deze scenario's verwachten we dat de substellaire begeleiders hun eigen schijven hebben waaruit op hun beurt manen kunnen worden gevormd. Naarmate de tijd vordert, drijft de circumstellaire schijf door verschillende processen uiteen, waarna een planetenstelsel vergelijkbaar met ons eigen zonnestelsel overblijft.

Om het ontstaan en de ontwikkeling van planetenstelsels te bestuderen, kunnen we exoplaneten (planeten rond andere sterren dan de Zon), begeleidende bruine dwergen en circumstellaire schijven direct afbeelden door het nabij-infrarode of zichtbare licht van deze objecten ruimtelijk te scheiden van het licht van de centrale ster. Dit is echter een zeer uitdagende taak omdat substellaire begeleiders en circumstellaire schijven zich over het algemeen zeer dicht bij hun ster bevinden en vele malen lichtzwakker zijn dan de ster. Om deze uitdaging het hoofd te bieden worden speciale hoogcontrast-instrumenten gebouwd. Deze instrumenten zijn geïnstalleerd op de grootste telescopen en hebben geavanceerde optische systemen die zijn ontworpen om het licht van de ster te onderdrukken en afbeeldingen te maken met een ruimtelijke resolutie die dicht bij de theoretische limiet van de telescoop ligt.

Verschillende hoogcontrast-instrumenten hebben polarimetrische modi. Met polarimetrie meten we de polarisatietoestand van het licht, oftewel de trillingsrichting (bij lineaire polarisatie) of rotatierichting (bij circulaire polarisatie) van de elektrische velden van het licht. Polarimetrie is bijzonder krachtig om de hoge contrasten te bereiken die nodig zijn om circumstellaire schijven en substellaire begeleiders direct af te beelden. Het directe licht van de centrale ster is over het algemeen ongepolariseerd: het licht is een mengsel van gelijke hoeveelheden van alle mogelijke polarisatietoestanden. Dit sterlicht wordt door stofdeeltjes in de circumstellaire schijf of de atmosfeer van de begeleider verstrooid, en raakt daarbij gedeeltelijk lineair gepolariseerd. Op deze manier wordt in afbeeldingen

van lineair gepolariseerd licht het directe sterlicht sterk onderdrukt, terwijl het gepolariseerde licht van de circumstellaire schijf of begeleider zichtbaar wordt. Polarimetrie kan ook worden gebruikt om circumstellaire schijven en begeleiders te karakteriseren omdat polarimetrische afbeeldingen informatie bevatten over de fysieke eigenschappen van de verstrooiende deeltjes. Metingen van polarisatie kunnen bijvoorbeeld worden gebruikt om de samenstelling, grootte en vorm van de stofdeeltjes in circumstellaire schijven te bepalen en om de eigenschappen van de atmosferen of oppervlakken van begeleiders vast te stellen. Het meten van polarisatie met een hoogcontrast-instrument is echter niet eenvoudig, omdat veel verschillende instrumentele effecten de gevoeligheid en nauwkeurigheid van de metingen kunnen verminderen.

## Dit proefschrift

Het doel van dit proefschrift is het verbeteren van de gevoeligheid, nauwkeurigheid en mogelijkheden van polarimetrische hoogcontrast-instrumenten om substellaire begeleiders en circumstellaire schijven te detecteren en te karakteriseren. Daarnaast presenteert dit proefschrift de eerste directe detecties van lineaire polarisatie van substellaire begeleiders. De focus van dit proefschrift ligt voornamelijk op polarimetrische hoogcontrast-instrumenten, in het bijzonder het instrument SPHERE-IRDIS op de Very Large Telescope.

In Hoofdstuk 2 karakteriseren we de instrumentele polarisatie-effecten van de nabij-infrarode polarimetrische modus van SPHERE-IRDIS met behulp van metingen met SPHERE's interne lichtbron en waarnemingen van ongepolariseerde sterren. Uit onze metingen blijkt dat de telescoop en SPHERE's eerste spiegel significante polarisatie produceren. Bovendien zien we dat de beeldderotorator (een roterend samenstel van drie spiegels dat wordt gebruikt om de afbeelding te roteren) bij sommige oriëntaties en golflengtes ernstig signaalverlies veroorzaakt omdat dit onderdeel invallend lineair gepolariseerd licht omzet in circulair gepolariseerd licht dat niet gemeten kan worden. We ontwikkelen een dataverwerkingsmethode die deze effecten corrigeert en passen deze toe op waarnemingen van een circumstellaire schijf. We hebben de correctiemethode in een geautomatiseerd dataverwerkingsprogramma genaamd IRDAP ingebouwd en dat programma openbaar beschikbaar gemaakt<sup>2</sup>. IRDAP stelt ons in staat om de gepolariseerde intensiteit en polarisatiehoek van circumstellaire schijven en substellaire begeleiders met een hoge nauwkeurigheid te meten. Als zodanig is IRDAP het primaire dataverwerkingsprogramma voor polarisatiemetingen met IRDIS en staat het aan de basis van vele wetenschappelijke publicaties.

In Hoofdstuk 3 presenteren we de voorlopige resultaten van de karakterisatie van de instrumentele polarisatie-effecten van de nabij-infrarode spectropolarimetrische modus van SCEXAO-CHARIS op de Subaru telescoop. Uit metingen met de interne lichtbron blijkt dat de beeldderotorator bij sommige golflengtes aanzienlijk signaalverlies kan veroorzaken. Met behulp van theoretische modellen berekenen we de polarisatie die de telescoop produceert. We zijn van plan om de polarisatie van de telescoop met waarnemingen van een ongepolariseerde ster te meten en een correctiemethode vergelijkbaar aan die van

---

<sup>2</sup><https://irdap.readthedocs.io>

IRDAP toe te voegen aan het bestaande CHARIS-dataverwerkingsprogramma. Omdat CHARIS een hogere spectrale resolutie heeft dan IRDIS, zullen deze kalibraties unieke kwantitatieve polarimetrische studies van circumstellaire schijven en substellaire begeleiders mogelijk maken.

In Hoofdstuk 4 introduceren we een observatietechniek die polarimetrische metingen combineert met de angulaire differentiële beeldverwerkingsmethode om de gevoeligheid te bereiken die nodig is om substellaire begeleiders op kleine hoekafstanden van hun ster te kunnen karakteriseren. We hebben deze techniek voor SPHERE-IRDIS geïmplementeerd en hebben de bijbehorende observatiestrategieën en data-analysemethodes ontwikkeld. Met behulp van de techniek hebben we de planeten van HR 8799 en de substellaire begeleider PZ Tel B waargenomen. We detecteren geen nabij-infrarode polarisatie van deze begeleiders en schatten bovenlimieten op hun polarisatiegraad. De gevoeligheid en nauwkeurigheid van de metingen laten zien dat onze techniek geschikt is om lichtzwakke substellaire begeleiders die zich dicht bij hun sterren bevinden te karakteriseren.

In Hoofdstuk 5 gebruiken we SPHERE-IRDIS om de nabij-infrarode lineaire polarisatie van twintig bekende, direct afgebeelde exoplaneten en begeleidende bruine dwergen te meten. We presenteren de eerste directe detecties van polarisatie afkomstig van substellaire begeleiders, met een polarisatie van enkele tienden van een procent voor DH Tau B en GSC 6214-210 B. Omdat voor deze begeleiders eerder al waterstofemissielijnen en rode kleuren zijn gemeten, is de polarisatie hoogstwaarschijnlijk afkomstig van schijven rond deze begeleiders. Door middel van stralingstransportmodellen bepalen we de positiehoeken van de schijven en stellen we vast dat de schijven hoge glooiingshoeken moeten hebben. De aanwezigheid van de schijven rond DH Tau B en GSC 6214-210 B, alsook de ongelijke oriëntaties van de schijven rond DH Tau B en de centrale ster, wijzen er op dat de begeleiders op ongeveer de huidige afstand van de ster gevormd moeten zijn. Voor de achttien andere begeleiders detecteren we geen significante polarisatie en bepalen we bovenlimieten op de polarisatiegraad. Deze non-detecties kunnen wijzen op de afwezigheid van schijven rond de begeleiders, een lage rotatiesnelheid van jonge begeleiders, bovenste atmosferen met hoofdzakelijk stofdeeltjes kleiner dan een micrometer en/of beperkte inhomogeniteit van de wolken in de atmosferen van de begeleiders. Ons werk laat zien dat de polarisatie van substellaire begeleiders inderdaad kan worden gedetecteerd en dat polarimetrie kan worden gebruikt om deze objecten te karakteriseren.

In Hoofdstuk 6 ontwikkelen we de observatietechniek en data-analysemethodes om nabij-infrarode circulaire polarisatie te meten met SPHERE-IRDIS. Omdat het instrument niet is ontworpen om circulaire polarisatie te meten, gebruiken we de beeldderrotator om invallende circulaire polarisatie om te zetten in meetbare lineaire polarisatie. We hebben de techniek getest met waarnemingen van de rode hyperreus VY CMa en de omringende nevel. Om de circulaire polarisatie nauwkeurig te meten, gebruiken we de ruimtelijke variatie van de lineaire polarisatie rond VY CMa om onderscheid te maken tussen werkelijke, astrofysische circulaire polarisatie en signaal dat is geïnduceerd door het instrument. We vinden dat het licht van VY CMa circulair gepolariseerd is, in overeenstemming met de literatuur, maar we detecteren geen circulaire polarisatie in de nevel rond VY CMa. Onze observatietechniek maakt de eerste circulaire polarisatiemetingen met een hoge ruimtelijke resolutie mogelijk. De techniek is veelbelovend om het stof en de magne-

tische velden in circumstellaire schijven te karakteriseren en zou zelfs kunnen helpen om de oorsprong van de homochiraliteit van biologische moleculen te ontrafelen.

In Hoofdstuk 7 onderzoeken we op fundamenteel niveau de polarisatie-aberraties die geproduceerd worden door reflectie van platte metalen spiegels. Polarisatie-aberraties zijn polarisatie-afhankelijke variaties van het elektromagnetische veld over een lichtbundel. Deze aberraties creëren polarisatiestructuur in de uiteindelijke afbeeldingen die de gevoeligheid van de meest gevoelige hoogcontrast-instrumenten beperkt. We berekenen de polarisatie-aberraties met een numerieke code en vergelijken de resultaten met de Goos-Hänchen en Imbert-Federov verschuivingen van de lichtbundel zoals beschreven in de natuurkundige literatuur. We constateren dat deze bundelverschuivingen volledig worden gereproduceerd door onze numerieke berekeningen en bestuderen de oorsprong, grootte en richting van de verschuivingen. De effecten van de bundelverschuivingen in een optisch systeem kunnen worden beperkt door grote  $f$ -getallen en kleine invalshoeken te gebruiken, en door de coatings van de spiegels niet te ontwerpen voor maximale reflectiviteit maar voor een retardatie dicht bij  $180^\circ$ . De inzichten van ons werk kunnen worden gebruikt voor de verbetering van de prestaties van huidige en toekomstige hoogcontrast-instrumenten die als doel hebben om exoplaneten direct af te beelden in gereflecteerd, en dus gepolariseerd, zichtbaar licht.