



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Tuning in to star-planet interactions at radio wavelengths

Kavanagh, R.D.

Citation

Kavanagh, R. D. (2022, November 15). *Tuning in to star-planet interactions at radio wavelengths*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3485841>

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/1887/3485841>

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

Samenvatting (Dutch summary)

Lichte hoofdreekssterren zoals onze Zon, zijn bronnen van continue uitstromend heet gemagnetiseerd plasma. In het geval van de Zon staat dit bekend als de zonnewind, terwijl het voor andere sterren *sterrenwinden* worden genoemd. Dit soort sterren omvat 93% van alle sterren in onze Melkweg, en herbergt ook het grootste deel van de exoplaneten die tot nu toe zijn ontdekt. Daarom is het cruciaal om inzicht te krijgen in hun sterrenwind en hoe ze omgaan met de planeten die ze huisvesten om de langetermijnevolutie van planetaire atmosferen te beoordelen, wat op zijn beurt hun potentieel bepaalt om leven zoals wij dat kennen te ondersteunen. De interacties tussen stellaire winden en planeten kunnen ook signalen produceren die kunnen worden gedetecteerd met telescopen van de huidige generatie.

De huidige metingen van de wind van lichte hoofdreekssterren zijn beperkt en zijn slechts in een handvol gevallen succesvol geweest. Echter, door moderne magnetohydrodynamische (MHD) modellen van sterrenwinden te koppelen aan observatiebeperkingen, kunnen driedimensionale snapshots van de windomgevingen rond sterren met planeten worden verkregen. In dit proefschrift gebruik ik dergelijke modellen om de winden van deze sterren te onderzoeken en de potentieel waarneembare kenmerken te voorspellen die kunnen ontstaan door hun interacties met hun planeten.

Exoplaneten vinden met radiotelescopie

Analoog aan wat wordt waargenomen voor de gemagnetiseerde planeten in het zonnestelsel, wordt verwacht dat planeten die rond andere sterren draaien, poollichtstraling vertonen aan hun magnetische polen, vooral bij radiogolflengten. Men denkt dat dergelijke emissie wordt gegenereerd via de interactie tussen het eigen magnetische veld van de planeet en de wind van zijn moederster. Indien detecteerbaar, zou de emissie afkomstig van de magnetische polen van de planeet een nieuw venster kunnen bieden voor het ontdekken van exoplaneten.

De winden van lichte hoofdreekssterren bestaan voornamelijk uit heet gemagnetiseerd waterstof, die de laagfrequente radio-emissie die exoplaneten zouden uitzenden sterk kan absorberen. Als gevolg hiervan, als de wind van de gastster erg dicht is, kan radio-emissie van de planeet moeilijk te detecteren zijn. Daarom is het van cruciaal belang om de stellaire windomgeving van planeet herbergende sterren te

begrijpen om te bepalen of radio-emissie van planeten vanaf de Aarde kan worden gedetecteerd.

Op basis van ons begrip van de poollichtemissie van de planeten binnen ons zonnestelsel, wordt verwacht dat de radio-emissie sterker zal zijn voor exoplaneten met grotere diameters en kleinere banen. Toevallig domineren dergelijke planeten de huidige populatie van bekende exoplaneten. Omdat hun aanwezigheid sterkere kenmerken van hun moedersterren produceert, zijn ze gunstiger voor detectie via traditionele methoden. Deze planeten staan bekend als ‘hete Jupiters’, die ongeveer zo groot zijn als Jupiter en heel dicht om hun moedersterren draaien.

HD189733b is een bekende hete Jupiter, die om zijn moederster draait op ongeveer 3 procent van de afstand tussen de Aarde en de Zon. De gastster is ook erg actief en drijft waarschijnlijk een wind aan die heel sterk is in vergelijking met de zonnewind. Als gevolg hiervan is HD189733b van bijzonder belang geweest in de context van exoplanetaire radio-emissie. Met behulp van een moderne 3-dimensionale magnetohydrodynamische code, simuleer ik in Hoofdstuk 2 de stellaire wind van de moederster van HD189733b. Dit model is gebaseerd op van waarnemingen afgeleide magnetische veldkaarten voor de ster, die een belangrijke input vormen voor deze modellen. Vervolgens gebruik ik de resultaten van het stellaire windmodel om de frequentie en sterkte van de radio-emissie van de planeet te schatten.

De wind van de gastster is naar verwachting behoorlijk dicht, dus het zal een groot deel van de radio-emissie van HD189733b absorberen. In Hoofdstuk 2 laat ik zien dat dit effect het minst uitgesproken is wanneer de planeet zich in de buurt van de conjunctie van de moederster bevindt, het punt in zijn baan waar hij zich het dichtst bij de waarnemer bevindt. De geometrie van een planeet in conjunctie wordt getoond in Figuur I. Dit resultaat illustreert dat detectie van radio-emissie van een exoplaneet het gunstigst is wanneer deze nabij conjunctie is, wat kan worden gebruikt als leidraad voor toekomstige waarnemingen op zoek naar dergelijke emissie. Buiten de conjunctie zou de exoplaneet ‘verduisterd’ worden door de wind van zijn moederster op radiogolflengten en ondetecteerbaar worden, dit wordt ook wel een eclips genoemd.

Exoplaneten als sondes van stellaire winden

(i) Radioeclipsen van exoplaneten

Met het concept van radioeclipsen van exoplaneten vastgesteld, was de volgende vraag die ik mezelf tijdens dit proefschrift stelde: hoe beïnvloeden de eigenschappen van de stellaire wind en de geometrie van de planetaire baan de duur en ernst van de eclips? Als we dit kunnen bepalen, kunnen we in theorie waarnemingen van exoplanetaire radiostraling terugleiden om de winden van sterren die planeten herbergen te bestuderen.

De driedimensionale numerieke modellen die in Hoofdstuk 2 worden gebruikt, zijn rekenkundig duur en tijdrovend, en daarom is hun gebruik over het algemeen beperkt tot specifieke gevallen. Als gevolg hiervan zijn ze niet erg geschikt

voor parametrische studies zoals hierboven beschreven. Hiervoor kunnen echter eenvoudiger modellen worden ingezet die de belangrijkste fysieke processen behouden. Met dit in gedachten ontwikkel ik in Hoofdstuk 3 een 1-dimensionaal stellair windmodel, dat ik vervolgens koppel aan een ander fysiek model dat de voortplanting en absorptie van laagfrequente radio-emissie door stellaire winden beschrijft. Dit model is erg snel en flexibel en levert het percentage exoplanetaire radiostraling dat ontsnapt door de wind van de gastster als functie van de tijd, voor elke set van stellaire wind- en baaneigenschappen.

Met behulp van dit model illustreer ik in Hoofdstuk 3 eerst de effecten van de snelheid van massaverlies en de temperatuur van de stellaire wind op de duur van de radioverduistering. Ik vind dat sterren met hete winden een lage snelheid van massaverlies gunstigere omstandigheden bieden voor het detecteren van radio-emissie van hun planeten. In termen van de baan van de planeet zelf ervaren transiterende exoplaneten de grootste modulatie van hun radio-emissie, en zijn ze het meest zichtbaar tijdens de overgang van de stellaire schijf. Bovendien worden planeten die verder van hun moedersterren draaien gemakkelijker gedetecteerd. Vervolgens pas ik het model toe op de hete Jupiter-gastheer τ Boo, wat aantoont dat de eigenschappen van de stellaire wind van sterren die planeten herbergen kunnen worden beperkt door de morfologie van de radio eclips. Met name de tijdsduur waarin een specifieke fractie van de exoplanetaire radio-emissie aan het systeem ontsnapt, kan direct worden gekoppeld aan een combinatie van stellaire windtemperatuur en de snelheid van massaverlies. Dit biedt een potentieel nieuwe methode voor het schatten van de eigenschappen van de winden van sterren die planeten herbergen, die tot nu toe slechts in een handvol gevallen succesvol zijn geweest.

(ii) Magnetische ster-planeet interacties

Exoplanetaire radio-emissie is niet de enige manier om de winden van sterren met een lage massa te bestuderen, en het is ook niet het enige type radio-emissie waarvan wordt aangenomen dat het optreedt als gevolg van de aanwezigheid van planeten. Een ander mechanisme waarvan wordt gedacht dat het heldere radio-emissie genereert in exoplanetaire systemen, is via de verstoring van het eigen magnetische veld van de ster als gevolg van de beweging van de planeet, in het algemeen magnetische ster-planeet interacties genoemd (zie voor details Paragraaf 1.5). Een belangrijk onderscheid tussen deze en exoplanetaire radio-emissie is dat de emissie dichtbij/op de ster zelf plaatsvindt, in tegenstelling tot op de planeet. Iets anders wat opvalt, is dat men denkt dat de emissie plaatsvindt bij hogere frequenties in vergelijking met de frequenties die worden verwacht voor exoplaneten, aangezien deze sterren magnetische velden aan het oppervlak kunnen bevatten die drie orden van grootte sterker zijn dan wat op de Zon wordt waargenomen. Dit is een voorgestelde verklaring voor het ontbreken van sluitende detecties van exoplanetaire radio-emissie, in die zin dat het een te lage frequentie heeft om de atmosfeer van de Aarde binnen te dringen.

Rond alle gemagnetiseerde sterren bestaat een gebied dat bekend staat als het Alfvén-opppervlak, waarbinnen magnetische krachten domineren over thermische

krachten in het zonnewindplasma. Binnen het Alfvén-opervlak kan radio-emissie worden gegenereerd in de buurt van de ster via de verstoring van het magnetische veld van de ster door een in een baan om de ster draaiende planeet. M dwergsterren zijn in dit opzicht van bijzonder belang, omdat ze zeer sterke magnetische velden aan het oppervlak vertonen, wat waarschijnlijk zal resulteren in grote Alfvén-opervlakken die een breed scala aan planetaire banen kunnen omsluiten. Bovendien hebben sterren met lage een lage snelheid van massaverlies grote Alfvén-opervlakken. Voor een illustratieve schets, zie Figuur II.

De twee nabijgelegen M dwergen Proxima Centauri (Prox Cen) en AU Microscopii (AU Mic) bieden potentieel geschikte omstandigheden voor het optreden van magnetische ster-planeet interacties. Beide sterren vertonen sterke magnetische velden aan hun oppervlak en zijn gastheren van meerdere bevestigde planeten. In het geval van Prox Cen kunnen recente radiowaarnemingen erop wijzen dat dergelijke interacties plaatsvinden. Om de levensvatbaarheid van magnetische ster-planeet interacties op deze sterren te beoordelen, is het essentieel om de locatie van hun Alfvén-opervlakken ten opzichte van de planetaire banen te kennen.

Om de locatie van de Alfvén-opervlakken van Prox Cen en AU Mic te bepalen, gebruik ik in Hoofdstuk 4 magnetohydrodynamische modellen die vergelijkbaar zijn met die gebruikt in Hoofdstuk 2 om 3-dimensionale snapshots van hun stellaire windomgevingen te verkrijgen. Deze modellen werden beperkt met behulp van waarnemingsgegevens en de daaruit verkregen windeigenschappen maken het mogelijk om de locatie van het Alfvén-opervlak te bepalen. In het geval van Prox Cen, dat een geschatte bovengrens heeft voor zijn snelheid van massaverlies, laat ik zien dat magnetische ster-planeet interacties onwaarschijnlijk zijn. Voor AU Mic is de snelheid van massaverlies echter relatief onbekend. Door de snelheid van massaverlies te variëren, illustreer ik dat er een bepaalde waarde is die beide bekende planeten binnen het Alfvén-opervlak plaatst. Daarom, als handtekeningen van magnetische ster-planeet interacties worden gedetecteerd van AU Mic, kan er een bovengrens worden gesteld aan de snelheid van massaverlies. Dit illustreert dat de winden van sterren kunnen worden bestudeerd aan de hand van de detectie van magnetische ster-planeet interacties, als aanvulling op de resultaten van Hoofdstuk 3.

Nieuwe methoden voor het identificeren van potentiële sterren op de planeet

Het is duidelijk dat bekende exoplanetaire systemen kunnen worden bestudeerd met behulp van geavanceerde magnetohydrodynamische modellen om te beoordelen of verschillende soorten ster-planeet interacties kunnen optreden. In het geval dat een signatuur van dergelijke interacties wordt gedetecteerd van een ster zonder bekende exoplaneten, hoe bepalen we dan of deze van een planetaire oorsprong is? Dit is een uitdaging voor zeer actieve sterren. Vooral in het geval van kleinere planeten worden de soorten signalen die ze op de ster induceren en die traditioneel worden gebruikt om exoplaneten te vinden, overstemd door de stellaire activiteit. Om deze reden zijn er nieuwe theoretische modellen nodig om dergelijke

handtekeningen te interpreteren, vooral bij radiogolflengten.

Recente radio onderzoeken met een breed gezichtsveld zijn begonnen met het detecteren van mogelijke hints van magnetische ster-planeet interacties van M dwergen aan de noordelijke hemel. Tot nu toe is van geen van deze sterren bevestigd dat ze planeten herbergen. Voor WX UMa, een ster in de steekproef van M dwergen die op radiogolflengten is gedetecteerd, is echter eerder het magnetische veld aan het oppervlak in kaart gebracht. Daarom kan een realistische stellaire windomgeving voor de ster worden geconstrueerd, wat ons op zijn beurt in staat stelt de grootte van zijn Alfvén-oppervlak te bepalen.

In Hoofdstuk 5 presenteer ik eerst een stellair windmodel dat voor WX UMa is verkregen op basis van zijn eerder gepubliceerde magnetische veldkaart. Vervolgens ontwikkel ik een model, het eerste in zijn soort, dat de morfologie voorspelt van de radio-emissie die door de ster wordt gegenereerd via magnetische interacties met een planeet. Door het model toe te passen op WX UMa, illustreer ik met dit model dat de waargenomen emissie het best wordt gereproduceerd door een planeet ter grootte van Neptunus die elke 7 dagen rond de ster draait. Hoewel alternatieve emissiemechanismen momenteel niet kunnen worden uitgesloten voor WX UMa, toont de toepassing ervan zijn veelbelovende potentieel voor het identificeren van kandidaat moedersterren van planeten aan de hand van komende radiowaarnemingen.

