



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Lighting up dark exomoons: observational signatures of tidally induced volcanism in other worlds

Kleisioti, E.

Citation

Kleisioti, E. (2025, November 13). *Lighting up dark exomoons: observational signatures of tidally induced volcanism in other worlds*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4282613>

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/1887/4282613>

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

Nederlandstalige samenvatting

Zijn we alleen? De zoektocht naar leven elders in het heelal is een langgekoesterde vraag van de mensheid. We kunnen nu op zoek gaan naar tekenen van leven op andere objecten in ons zonnestelsel: op het oppervlak van Mars en in de verborgen, ondergrondse oceanen van manen van planeten in het zonnestelsel, zoals die van Jupiter en Saturnus.

Manen in het zonnestelsel vertonen een grote diversiteit in hun fysische en baankenmerken, en sommige vallen op door hun geologische activiteit. Io, de binnenste maan van Jupiter, is het meest vulkanisch actieve object in het zonnestelsel, met honderden hotspots over het oppervlak. Enceladus, een ijzige maan van Saturnus, bezit oppervlaktrescheuren, actieve pluimen van waterdamp en een wereldwijde ondergrondse oceaan. Een gemeenschappelijke drijvende kracht achter deze verschijnselen is getijdenverwarming: wanneer een maan in een excentrische baan rond een planeet draait, zorgen wisselende zwaartekrachtskrachten ervoor dat het lichaam buigt en interne warmte genereert. Op lange tijdschalen kan dit proces water onder een ijzige korst vloeibaar houden en vulkanisme in stand houden. Door vloeibaar water en geologische activiteit te onderhouden, kunnen dergelijke processen de ingrediënten en energiebronnen leveren die nodig zijn voor bewoonbaarheid. Terwijl ons zonnestelsel nabijegelegen proefgevallen biedt, kan de zoektocht naar leven ook worden uitgebreid naar exoplaneetstelsels rond andere sterren.

Buiten het zonnestelsel markeerden de ontdekking van planeten rond de pulsar PSR 1257+12 en, kort daarna, 51 Pegasi b, een reuzenplaneet met een omlooptijd van slechts enkele dagen, een keerpunt voor het vakgebied. Sindsdien is het aantal exoplaneetontdekkingen snel toegenomen, met tegenwoordig duizenden bekende exoplaneten. Veel daarvan lijken in niets op de planeten in ons eigen zonnestelsel: “hete Jupiters” zijn Jupiter-achtige planeten die erg dicht bij hun ster staan. “Superaardes” (planeten met een grootte tussen die van de Aarde en Neptunus) zijn veelvoorkomend, terwijl exoplaneten ter grootte van de Aarde zeldzamer zijn. Afhankelijk van hoe ver hun banen van hun sterren liggen, kunnen sommige van deze planeten zelfs lijken op de ijzige manen in ons zonnestelsel, met koude oppervlakken en mogelijke interne oceanen.

Gezien het belang van manen in ons eigen zonnestelsel is het logisch te vragen of exoplaneten ook manen hebben, en of die eveneens leven kunnen herbergen. Omdat elke gasreus in het zonnestelsel natuurlijke satellieten heeft, ligt het voor de hand te verwachten dat veel gasreus-exoplaneten die we hebben gevonden ook door manen (exomanen) worden omgeven. Toch is tot op heden geen enkele exomaan ondubbelzinnig bevestigd. Een van de belangrijkste redenen is dat de signalen van manen zwak zijn vergeleken met die van hun grotere moederplaneten. Nu exoplaneetontdekkingen een breed parametergebied beslaan, moeten we bepalen welke moederplaneten de beste kansen op detectie bieden, welke technieken het meest effectief zijn, en welke maaneigenschappen waarneembaar zijn.

De transitmethode, die tot nu toe verantwoordelijk is voor de meeste exoplaneetontdekkingen, detecteert planeten wanneer ze voor hun ster langs bewegen en een kleine, periodieke afname in de helderheid veroorzaken. De planeten zelf zijn niet direct zichtbaar, maar hun schaduwen(transits) wel. Deze techniek is gevoelig voor planeten die dicht

bij hun ster staan, omdat de kans op een uitlijning waarbij wij een transit zien dan groter is. Dat kan nadelen hebben voor de zoektocht naar exomanen: manen van planeten op nauwe banen kunnen onstabiel zijn omdat de zwaartekracht van de ster weinig ruimte laat voor stabiele omloopbanen. Bovendien vereisen exomaanzoektochten rond transiterende exoplaneten een gunstige geometrie: planeet en maan moeten precies goed uitgelijnd zijn met onze gezichtslijn zodat hun overgangen zichtbaar zijn. Ten slotte zijn lange waarnemingsreeksen nodig om meerdere transits te vangen. Dit motiveert een focus op direct waargenomen exoplaneten, waarvan de banen verder van hun sterren liggen. Op deze grotere afstanden kunnen we het sterlicht onderdrukken en het licht van de planeet zelf opvangen.

Het waarnemen van het licht van de planeet en het detecteren van zwakke satellieten zoals manen brengt eigen uitdagingen met zich mee, omdat de overweldigende helderheid van de moederster onderdrukt moet worden, en zelfs dan kan de planeet haar manen overstralen. Toch kan in infrarode golflengten, waar warmtestraling belangrijk wordt, een bijzondere klasse van objecten opvallen: getijdenverhitte exomanen (THEMs). Deze zijn analoog aan Jupiters vulkanisch actieve maan Io en bieden een unieke kans: aangedreven door getijdenkrachten kunnen deze manen hoge oppervlaktetemperaturen bereiken en in bepaalde infrarode banden even helder of zelfs helderder zijn dan hun moederplaneet. In tegenstelling tot transitwaarnemingen is directe thermische detectie niet afhankelijk van een specifieke baanfase of herhaalde gebeurtenissen. Dit opent een mogelijkheid tot het detecteren van manen rond reuzenplaneten die op grote afstanden van hun ster cirkelen, waar andere exoplaneetdetectiemethoden moeite hebben.

De hoeveelheid getijdenverwarming die een wereld ondergaat, wordt onder meer beïnvloed door zijn baan en door de manier waarop materialen in het binnenste vervormen en energie dissiperen. Omdat getijdenverwarming afhangt van de interne eigenschappen van een lichaam, is het bestuderen van THEM's niet alleen een manier om manen te detecteren, maar ook een instrument om hun interne structuur en eigenschappen te onderzoeken. Vergelijkbare benaderingen zijn in ons eigen zonnestelsel toegepast: zo heeft Io's vulkanisme lang vragen opgeroepen over de aanwezigheid van een wereldwijde magma-oceaan of een gedeeltelijk gesmolten mantel, en metingen van Io's vervorming onder getijdenkrachten zijn cruciaal geweest om deze scenario's te toetsen. Deze redenering doortrekken naar exoplaneten en hun manen betekent dat getijdenverwarming ons niet alleen helpt ze te identificeren, maar ook om hun interne eigenschappen en de mechanismen van warmte-transport in hun binnenste af te leiden. Deze processen zijn belangrijk voor de astrobiologie en maken getijdenverhitte werelden tot interessante doelwitten voor studies naar bewoonbaarheid, aangezien hun interne energiebronnen leefbare omgevingen kunnen ondersteunen, ongeacht of ze direct sterlicht ontvangen.

Dit proefschrift richt zich op de detecteerbaarheid van THEM's via verschillende methoden en onderzoekt tegelijk de interne en orbitale eigenschappen die ze waarneembaar maken. Het zet stappen richting het vinden van zulke manen en verkent wanneer getijden hen voldoende kunnen verhitten om in het infrarood te gloeien, en of hun helderheid of de variatie daarin met huidige en komende telescopen kan worden gemeten. Door mogelijke waarnemingen te combineren met modellen van getijdenverwarming, verkent het proefschrift verder welke eigenschappen van het binnenste van planeten en manen kunnen worden afgeleid. Modellen van getijdenverwarming worden ten slotte gebruikt om

de inwendige opbouw te bestuderen van ijzige exoplaneten die vermoedelijk lijken op de ijzige manen van ons zonnestelsel. Hier ligt de focus op Trappist-1 f, g en h: kan interne warmte ondergrondse oceanen in stand houden, en zijn tekenen van vulkanische activiteit detecteerbaar? Gezamenlijk benadrukken deze studies de rol van getijdenverwarming als zowel een detectieroute als een venster op interne processen van extrasolaire werelden.

Hoofdstuk 2. De detecteerbaarheid en eigenschappen van THEMs rond de exoplaneet Eridani b

In dit hoofdstuk onderzoeken we of getijdenverhitte exomanen (THEMs) in infrarood-golflengten helder genoeg kunnen zijn om met de James Webb-ruimtetelescoop te worden gedetecteerd rond nabije reuzenplaneten. We gebruiken de planeet Eridani b als testgeval. We zetten modellen in die de baan en fysische eigenschappen van een maan koppelen aan de getijdenwarmte die binnenin wordt opgewekt en aan hoe die warmte door haar lagen wordt getransporteerd, totdat er een evenwicht ontstaat tussen geproduceerde en afgevoerde warmte. We testen vele mogelijke maanscenario's, waarbij we hun grootte en baan variëren en onzekerheden in materiaaleigenschappen meenemen. Onze resultaten laten zien dat een maan van ongeveer tweemaal de grootte van Io, die de nabije planeet Eridani b omcirkelt, detecteerbaar kan zijn als zij haar planeet op afstanden en met baanexcentriciteiten omloopt die vergelijkbaar zijn met die van manen in het zonnestelsel. Cruciaal laten we zien dat, als de grootte en baanafstand van een maan al bekend zijn uit een andere methode, zoals de transitmethode, haar infraroodhelderheid kan worden gebruikt om grenzen te stellen aan haar baanexcentriciteit en interne eigenschappen—bijvoorbeeld of zij lagen van gesmolten gesteente bevat. Dit betekent dat een succesvolle detectie van een getijdenverhitte exomaan (THEM) directe informatie over haar binnenste kan opleveren, waardoor THEMs krachtige proefobjecten zijn om te begrijpen hoe interieurs en banen op elkaar inwerken.

Hoofdstuk 3. Spectro-astrometrie: een veelbelovende methode om exomanen te vinden

Hoewel het vorige hoofdstuk laat zien dat THEMs in principe detecteerbaar kunnen zijn, zijn de huidige methoden nog niet gevoelig genoeg om manen te vinden zoals we die in het zonnestelsel kennen. De objecten die momenteel de detectielimieten benaderen, zijn ofwel groter, heter, of beide. Om dit probleem van “te groot of te heet” te omzeilen, hebben we een methode onderzocht die spectro-astrometrie heet. Deze techniek speurt naar minuscule verschuivingen in de schijnbare positie van het licht van een planeet bij verschillende kleuren (golflengten), veroorzaakt wanneer een onzichtbare maan bijdraagt aan het signaal van het systeem. We ontwikkelden een wiskundige beschrijving van het spectro-astrometrische signaal dat door een maan in een baan wordt opgewekt en schatten verschillende ruisbronnen die zo'n signaal kunnen beïnvloeden, waaronder onnauwkeurigheid in het richten van de telescoop, achtergrondruis en beperkingen van de detector. Vervolgens pasten we dit raamwerk toe op nabije reuzenplaneten, met ϵ Indi Ab als voorbeeld, om te bepalen welke typen manen detecteerbaar zijn. Onze resultaten laten zien dat detectie mogelijk is met telescopen van de volgende generatie, zoals

de Extremely Large Telescope, voor manen die qua grootte vergelijkbaar zijn met die in ons zonnestelsel. In het bijzonder vinden we dat manen zoals in ons eigen zonnestelsel met gematigde oppervlaktetemperaturen detecteerbaar zijn, waardoor de detectielimieten—vergeleken met het vorige hoofdstuk—dichter in de buurt komen van de manen die we kennen. We laten ook zien dat grote, ijzige manen, ter grootte van Mars of groter, zelfs in de dichtstbijzijnde planetenstelsels waarneembaar zouden kunnen zijn.

Hoofdstuk 4. Hotspots toevoegen: een nieuwe manier om THEMs te vinden

In dit hoofdstuk onderzoeken we of vulkanische exomanen, met hete oppervlakkige hotspots, kunnen worden ontdekt door te volgen hoe hun helderheid verandert terwijl ze rond hun planeet bewegen. Het idee is dat een THEM actieve vulkanen of verspreide hotspots over het oppervlak kan hebben, zoals bij Io. Deze zorgen ervoor dat de infrarode helderheid verandert wanneer verschillende gebieden in en uit zicht roteren. Om dit te testen simuleren we manen van verschillende groottes die een geïsoleerde planeet omcirkelen en onderzoeken we hoe zij de infrarode helderheid van het systeem beïnvloeden. Vervolgens bekijken we of deze zich herhalende veranderingen in de gegevens als duidelijke signalen te onderscheiden zijn. We vinden dat vulkanische manen met hotspottemperaturen zoals gemeten op Io een detecteerbare signatuur kunnen achterlaten bij kortere infrarode golflengten. Bij langere infrarode golflengten verzwakt het signaal, maar door waarnemingen op twee verschillende golflengten te vergelijken, kunnen we de bijdrage van een maan scheiden van die van haar planeet. Onze resultaten wijzen erop dat deze methode vulkanische manen met de grootte van Mars binnen ongeveer 10 parsec kan vinden, en manen die net zo groot zijn als de Aarde zelfs op grotere afstanden. Deze aanpak vergroot de mogelijkheden om naar exomanen te zoeken, vooral rond direct waargenomen of geïsoleerde planeten, omdat zij ook manen kan detecteren wanneer hun banen niet met onze gezichtslijn zijn uitgelijnd en dus geen transits laten zien.

Hoofdstuk 5. Modelleren van de inwendige structuren en cryovulkanische activiteit van de exoplaneten Trappist-1 f, g en h

In dit hoofdstuk verkennen we de inwendige opbouw van drie exoplaneten in het Trappist-1-stelsel—de planeten f, g en h—waarvan de oppervlaktetemperaturen en dichtheden suggereren dat ze op de ijzige manen van ons zonnestelsel kunnen lijken. Ons doel is te bepalen onder welke omstandigheden interne verwarming ondergrondse oceanen in stand kan houden en zelfs ijsvulkanen (cryovulkanen) kan aandrijven. We modelleren hoe warmte in deze planeten wordt opgewekt uit twee hoofdbronnen: getijdenverwarming en radiogene verwarming, afkomstig van het verval van radioactieve elementen. Door deze warmtebronnen te koppelen aan de dikte van ijskorsten en oceanen bepalen we welke interne structuren warmteproductie en -verlies in balans kunnen houden. Onze resultaten laten zien dat voor Trappist-1f en -1g thermisch evenwicht alleen mogelijk is als hun buitenste ijskorsten relatief dun zijn—ongeveer 4 tot 10 kilometer—met daaronder oceanen van circa 90 tot 120 kilometer dik. Trappist-1h daarentegen zou een dikkere ijskorst nodig hebben om in evenwicht te blijven. We hebben ook onderzocht of vulkanische uitgassing van water met de James Webb-ruimtetelescoop detecteerbaar is. Zelfs onder de

meest optimistische aannames zou detectie een campagne van meer dan een decennium vergen. Dat maakt detectie met de huidige instrumenten zeer onwaarschijnlijk. Toekomstige pogingen maken meer kans door zich te richten op exoplaneten met excentrischere banen, waar sterkere getijdenverwarming de wateruitgassing tot detecteerbare niveaus kan opkrikken.

