



Probing Exoplanetary Materials Using Sublimating Dust
R. van Lieshout

Nederlandse Samenvatting

In de afgelopen paar decenia is het duidelijk geworden dat de Zon niet de enige ster is die wordt vergezeld door planeten. Extrasolaire planeten (exoplaneten) zijn ontdekt rondom meer dan duizend sterren en het feit dat ze zo veelvoorkomend wijst erop dat de vorming van planeten meer de regel dan de uitzondering is. Verrassend genoeg zijn veel exoplanetaire systemen erg verschillend van het Zonnestelsel qua de types planeten die ze huisvesten en de afstanden tot de ster waarop die planeten ronddraaien. Deze realisaties hebben enkele spannende vragen opgeroepen:

- Waarom heeft planeetvorming zulke uiteenlopende resultaten opleveren?
- Welke processen bepalen de bouw van een planetenstelsel?
- Hoe speciaal is de Aarde als planeet en het Zonnestelsel als planetenstelsel?
- Zijn er andere plekken in het Melkwegstelsel waar level zou kunnen hebben ontstaan?

Het beantwoorden van zulke vragen is één van de doelstellingen van de moderne sterrenkunde.

Om deze vragen aan te kaarten, is het nodig om uitvoerige informatie te verkrijgen over extrasolaire systemen door middel van sterrenkundige observaties. Echter, de gigantische afstanden tussen sterren, en de kleine afmeting van een planeet ten opzichte van zijn ster, zijn fikse obstakels voor het karakteriseren van exoplaneten. Het merendeel van wat we op het moment weten over exoplaneten komt uit de effecten die planeten hebben op de sterren waar ze omheen draaien.

Maar een planetenstelsel bestaat uit meer dan alleen planeten. Verder draaien er allerlei kleine lichamen rond de ster, zoals planetoiden, kometen, en interplanetaire stofkorrels. Het bestuderen van deze materialen kan informatie opleveren die niet van de planeten zelf kan worden afgeleid. Circumstellair stof is in dit opzicht erg leerzaam. Een zwerm stofkorrels maakt misschien maar een klein percentage uit van de massa van een systeem, maar heeft een enorme collectieve doorsnede. Dit maakt het mogelijk voor moderne telescopen om direct de straling te observeren die wordt uitgezonden door een extrasolaire stofwolk, en soms zelf om de ruimtelijke structuur van de wolk te ontwaren.

Circumstellaire stofkorrels hebben normaal gesproken een relatief korte levensduur, omdat ze worden verwijderd of vernietigd door enkele mechanismes. De druk van de straling van de ster kan kleine stofkorreltjes bijvoorbeeld het systeem uit blazen. Dit betekent dat als er enig stof aanwezig is, dit continue moet worden bijgevuld van grotere lichamen die een stabielere massa-reservoir vormen, bijvoorbeeld door middel van destructieve botsingen tussen planetoïden of kometen die stof produceren als brokstukken. Omdat circumstellair stof zijn oorsprong heeft in grotere lichamen zijn de twee populaties verbonden in locatie en samenstelling en kunnen waarnemingen van stof gebruikt worden om exoplanetaire materialen te onderzoeken.

Om de stap te zetten van waarnemingen aan stof naar het achterhalen van de eigenschappen van een exoplanetair systeem, is het nodig om in detail te begrijpen hoe stofkorrels worden geproduceerd, hoe ze zich gedragen nadat ze zijn losgelaten, en hoe ze worden vernietigd of verwijderd. Het begrijpen van de fysica van circumstellaire stofkorrels is het onderwerp van dit proefschrift. Het proefschrift focust in het bijzonder op stofkorrels die zich extreem dichtbij hun ster bevinden, op afstanden van maar enkele ster-stralen. Op deze afstanden wordt het stof verwarmd tot temperaturen die zo hoog zijn dat het vaste materiaal waaruit het bestaat in gasvorm wordt omgezet, in een proces dat sublimatie heet.

Sublimatie kan enkele interessante complicaties teweeg brengen in het leven van een circumstellair stofkorreltje. Het voornaamste effect is dat stofkorrels kleiner worden naarmate ze massa verliezen door sublimatie. Over het algemeen hebben kleinere stofkorreltjes een grotere doorsnede voor hun massa. Dit heeft tot gevolg dat naarmate een stofkorreltje kleiner wordt de krachten op het korreltje van stralingsdruk belangrijker worden in vergelijking met zwaartekracht. Dit soort veranderingen beïnvloeden de beweging van het stofkorreltje. We onderzoeken twee specifieke situaties waarin stofsublimatie relevant is: heet zodiakaal stof en de stofstraarten van verdampende exoplaneten.

Heet zodiakaal stof

Hoofdstukken 2 en 3 houden zich bezig met het fenomeen heet zodiakaal stof. Dit is stof dat zich in de nabijheid van een ster bevindt en dat gedetecteerd kan worden door middel van gespecialiseerde infrarood waarnemingen. Zo'n 10% tot 30% van alle sterren lijken een dergelijke populatie stof te hebben, maar de oorsprong ervan is nog steeds onduidelijk.

In Hoofdstuk 2 onderzoeken we een mogelijk mechanisme dat het fenomeen zou kunnen verklaren. Het stof zou geproduceerd kunnen worden door botsingen in een gordel van planetoïden of kometen op een grotere afstand van de ster, en naar binnen migreren door toedoen van krachten die worden veroorzaakt door de straling van de ster en de beweging van de stofkorreltjes. Wanneer het stof heel dicht bij de ster is, begint het te sublimeren, waardoor de stofkorreltjes kleiner worden. Dit veroorzaakt veranderingen in de stralingsdruk krachten, waardoor de migratie naar binnen toe langzamer wordt en er een opeenhoping van stof teweeg wordt gebracht rondom de sublimatie afstand tot de ster. Hoewel het opeenhopings mechanisme veelbelovend lijkt om de locatie van het hete exozodiakale stof te verklaren,

blijkt uit onze nauwkeurige analyse van dit proces dat het inefficiënt is. We concluderen dat het voorgestelde mechanisme de waargenomen hoeveelheden stof niet kan verklaren.

Hoofdstuk 3 is een grondige analyse van het stof in de nabijheid van de ster Fomalhaut. Het is bekend dat deze gordels planetoïden en kometen heeft die stof produceren door middel van onderlinge botsingen. Infrarood waarnemingen laten zien dat er ook stof zich erg dicht bij de ster bevindt. In dit hoofdstuk achterhalen we de eigenschappen en de ruimtelijke verdeling van het stof in de binnenste delen van het Fomalhaut systeem vanuit de waarnemingen. Met behulp van deze informatie testen we verscheidene mogelijke mechanismes die de aanwezigheid van het stof zouden kunnen verklaren, maar we komen tot de slotsom dat er geen een voldoende stof kan leveren om de waarnemingen te verklaren. De oorsprong van het exozodiakaal stof blijft een mysterie.

Stofstraarten van verdampende exoplaneten

Hoofdstukken 4 en 5 gaan over kleine exoplaneten die zo dicht bij hun ster ronddraaien dat ze verdampen als gevolg van de hevige bestraling door de ster. Dit soort planeten spuwen grote hoeveelheden stofkorrels uit, die in een komeetachtige staart achter de planeet terecht komen. Wanneer deze objecten voor hun ster langs komen, dan zorgt de stofwolk ervoor dat de ster tijdelijk een klein beetje minder helder lijkt. Met een zeer precies afgesteld sterrenkundig instrument kan dit effect in detail worden gevolgd. Van de preciese manier waarop de ster verduistert is het dan mogelijk om de vorm van de stofwolk af te leiden. Er zijn op dit moment drie van dit soort kleine verdampende exoplaneten bekend.

We beschrijven hoe het komt dat de stofkorrels die van de planeet af komen achter de planeet raken en een staart vormen. Simpel gezegd worden de stofkorrels naar buiten geduwd door de stralingsdruk van de ster, waardoor ze op omloopbanen komen die een beetje groter zijn dan die van de planeet, en bijgevolg kost het ze iets langer om hun baan om de ster af te leggen. Hierdoor blijven de stofkorrels achter op de planeet en vormen ze een staart. Terwijl ze weg van de planeet bewegen, sublimeren de stofkorreltjes geleidelijk. Als de stofkorreltjes gemaakt zijn van een vuurvast materiaal zal het langer duren voordat ze volledig gesublimeerd zijn en dit soort stofkorrels zullen langere staarten opleveren. Vice versa, vluchtige stofsoorten verdwijnen snel en zullen korte staarten geven. Daarom kan de lengte van de staart, die kan worden afgeleid van de duur van de verduistering van de ster, worden gebruikt om iets te leren over de samenstelling van het stof.

In Hoofdstuk 4 bestuderen we dit sterrenkundig probleem met behulp van pen-en-papier technieken. Die zijn handig om een beter begrip van de situatie te krijgen en geven snelle antwoorden, maar ze vereisen het maken van veel vereenvoudigende aannames over de stofkorrels en hun gedrag, die in sommige omstandigheden niet accuraat zouden kunnen zijn. Hoofdstuk 5 introduceert een numeriek model dat gebruik maakt van meer uitvoerige computer berekeningen om de stofsamenstelling af te leiden van de verduistering van de ster. Deze techniek is langzamer en langzamer, maar gebruikt minder aannames dan de pen-en-papier methode, en levert een gedetailleerder antwoord op.

De resultaten van de twee verschillende analyse-methodes zijn consistent. We bevinden dat het stof in de staart van één van de onderzochte verdampende planeten gemaakt zou kunnen zijn van het mineraal korund, een aluminiumoxide. Dit is het materiaal waarvan ook robijnen en saffieren gemaakt zijn. De studie toont verder aan dat veel andere stofsamenstellingen, zoals ijzer, grafiet, en magnesiumrijke silikaten, een stuk minder waarschijnlijk zijn. Het belangrijkste is dat dit werk laat zien dat het mogelijk is om onderscheid te maken tussen verschillende samenstellingen voor het stof in de staarten van kleine verdampende planeten van de manier waarop hun sterren verduisteren als ze er voor langs passeren. Aangezien het stof afkomstig is van de verdampende planeet kan het gerbuikt worden om de samenstelling van dit type exoplaneten te onderzoeken.