

————— Samenvatting —————

Geëvolueerde sterren: een gecombineerde studie met interferometrie en spectroscopie

In dit proefschrift bestuderen we *geëvolueerde* sterren. Hieruit kunnen we in eerste instantie leren wat onze zon en ons zonnestelsel te wachten staat. Bovendien bepalen geëvolueerde sterren ook de samenstelling van de volgende generatie sterren. Die nieuwe sterren ontstaan immers uit een interstellair midden van gas en stof. Dat interstellair midden wordt verrijkt door geëvolueerde sterren die langs een sterrenwind de zware chemische elementen die ze in hun kern geproduceerd hebben, uitstoten. Daarom is een goed begrip van geëvolueerde sterren ook een noodzakelijke stap om de evolutie van ons melkwegstelsel te begrijpen.

Het mechanisme dat verantwoordelijk is voor die sterrenwind is nog onvoldoende begrepen: zowel over de *drijvende kracht* als over de *oorzaak van de exotische geometrische vormen* bestaat nog geen consensus.

We doen dit aan de hand van twee complementaire observatietechnieken. Infrarood *spectroscopie* is al langer een favoriete bron van informatie over de temperatuur, samenstelling en evolutie van geëvolueerde sterren. Directe ruimtelijke informatie zit er echter niet in. Het is daarom logisch deze spectroscopische observaties te combineren met een bron van directe ruimtelijke informatie. Door de grote afstand waarop ze staan, zijn sterren echter enkel ruimtelijk op te lossen met behulp van *interferometrie*, dit is het combineren van licht van verschillende telescopen in een interferentiepatroon.

We beginnen deze samenvatting met een inleiding over stellaire evolutie. Daarna bespreken we de observationele uitdagingen bij de studie van geëvolueerde sterren. We lichten de twee methodes gebruikt in dit proefschrift, nl. spectroscopie en interferometrie, verder toe. Daarbij presenteren we al een eerste stuk van het gevoerde onderzoek, namelijk de constructie van een kalibratienetwerk voor mid-infrarood interferometrie. Daarna onderzoeken we drie bekende geëvolueerde sterren: de rode reus Arcturus, de rode superreus Betelgeuze en de OH/IR ster OH26.5+0.6. Tot slot presenteren we de belangrijkste conclusies van dit werk, en de vooruitzichten op korte en lange termijn.

S.1 Stellaire evolutie

Sterren ontstaan wanneer grote interstellaire gaswolken onder hun eigen zwaartekracht ineen storten¹. Op een bepaald moment wordt de temperatuur in de kern van deze gasbollen zo groot dat een kernfusieproces (waterstof naar helium) op gang komt. Dit proces levert dan de nodige energie om de samentrekking te stoppen en de ster in een stabiele fase te brengen. De kleur (temperatuur) en lichtkracht worden in deze fase voornamelijk bepaald door de massa van de ster: zwaardere sterren zijn blauwer (heter) en helderder dan koele, gele sterren zoals onze zon. De zwaardere sterren behoeven een grotere energieproductie om in evenwicht te blijven, en dat wordt onvoldoende gecompenseerd door hun grotere voorraad brandstof. Daarom is de duur van de hoofdreeksfase² omgekeerd evenredig met de massa. Sterren met een gemiddelde massa, i.e. hooguit een paar zonsmassa's, brengen het grootste deel van hun leven door op de hoofdreeks.

S.1.1 De rode reuzentak

Na vele miljarden jaren is de waterstof in de kern uitgeput, waarop die begint samen te trekken. De daarmee gepaard gaande verhitting ontsteekt verbranding (fusie) van waterstof in een schil rond de kern. Daarbij expandeert de mantel van de ster tot vele malen haar oorspronkelijke afmetingen. Dit zorgt voor een enorme toename in lichtkracht (tot wel 2500 maal die van de zon), maar een veel lagere temperatuur. De ster is nu een rode reus geworden en bevindt zich in een specifiek gebied op het Hertzsprung-Russell diagramma: de rode reuzentak die van de hoofdreeks naar koel en helder oploopt. Bij deze lage temperatuur, typisch rond 4500 Kelvin³, ontstaan vele moleculen in de steratmosfeer, zoals CO, OH, TiO enz. Omdat die de ster versluieren, kan de straling moeilijk ontsnappen. Daarom bepalen zij in grote mate ook de structuur van de ster.

Uiteindelijk is de kern warm genoeg om een nieuwe verbranding op te starten: helium naar koolstof en zuurstof. De lichtkracht daalt terug, en de ster begint een stabiele fase op de horizontale tak.

¹Hiervoor is een initiële instabiliteit nodig die het proces op gang brengt, zoals een supernova-explosie in de nabije omgeving.

²De hoofdreeksfase is bij wijze van spreken de tweede leeftijd van een ster. Deze naam komt van hun plaats in een Hertzsprung-Russell diagramma (lichtkracht als functie van kleur), namelijk op een brede band van rood en donker naar blauw en helder.

³273 K = 0° C en 0 K = -273° C

S.1.2 De asymptotische reuzentak

Uiteindelijk is ook alle helium omgezet naar koolstof en zuurstof waardoor de verbranding opnieuw stilvalt. Nu zal analoog als op de rode reuzentak opnieuw schilverbranding voor de nodige energie zorgen, maar ditmaal in 2 schillen: eentje met waterstofverbranding, en eentje met heliumverbranding dicht bij de kern. De expansie van de buitenste lagen en de bijhorende toename in lichtkracht en daling in temperatuur overtreffen die tijdens de reuzentak, vandaar de naam asymptotische reuzentak (AGB). Op sommige momenten kunnen de convectieve zones in de mantel tot tegen de kern rijken, waarbij ze de nieuw gesynthetiseerde elementen (waaronder bijvoorbeeld in grote mate koolstof) naar het oppervlak brengen. Op die manier kan de chemie van de steratmosfeer, i.e. de buitenste laag waaruit het licht dat we waarnemen ontsnapt, sterk verrijkt worden⁴.

Het is in dit stadium dat massaverlies door een sterrenwind belangrijk wordt, en de verdere evolutie van de ster zal bepalen. Hoogst waarschijnlijk is dit massaverlies een gevolg van een instabiliteit in de waterstofmantel waardoor de ster begint te pulseren. Die pulsaties kunnen erg grote amplitudes hebben (3 magnitudes, oftewel een factor 16 in visuele lichtkracht) en lange periodes (verschillende jaren). Zo'n pulserende AGB ster wordt een Mira genoemd, naar de meest bekende, Mira Stella (de *wonderbare* ster, omdat ze maar een deel van de periode zichtbaar is met het blote oog). De structuur van een AGB ster wordt nu erg ingewikkeld: rond een compacte C/O-kern met ontaard electrongas zit een convectieve mantel met verrijkte chemie. Deze mantel is instabiel en pulseert met als gevolg een levitatie van de atmosfeer. Die laatste is bijzonder rijk aan allerlei moleculen. Wanneer verschillende atmosferische lagen botsen ontstaan schokgolven waarin waarschijnlijk stofdeeltjes ontstaan⁵. De stralingsdruk op dit stof kan nu zo groot zijn dat het stof weggeblazen wordt van de ster, en door botsingen met het gas wordt ook dat meegenomen in de sterrenwind.

Op het einde van de AGB wordt het massaverlies nog een stuk sterker, in een *superwind* die zoveel stof rond de ster produceert dat die laatste niet meer zichtbaar is. Omwille van de sterke lichtkracht in het IR, en de sterke OH masers in de superwind, worden sterren in deze fase OH/IR sterren genoemd.

S.1.3 Post AGB en planetaire nevels

Een ster verlaat de AGB wanneer de superwind het grootste deel van de waterstofmantel heeft weggenomen, en de hete C/O-kern met een lichte waterstofmantel achter blijft. De ster krimpt, warmt op, en wordt weer zichtbaar temidden van de uitdijende AGB-stofenvelope. We spreken nu van een Post-AGB ster. Het stralingsveld wordt nu zo intens dat eventuele nabije overblijfselen van de AGB-sterrenwind geïoniseerd worden. De ster wordt nu zichtbaar als een planetaire nevel (Figuur S.1). De centrale ster, een "witte dwerg", heeft geen bron van energie meer en koelt af tot er slechts een donker, koud en compact restant overblijft.

⁴Naar het einde van de AGB toe kan de chemie aan het oppervlak evolueren van zuurstofgedomineerd naar koolstofgedomineerd. Zulke sterren worden koolstofsterren genoemd. Omdat CO al de beschikbare zuurstofmoleculen in de steratmosfeer opgebruikt, bevatten de andere moleculen vooral koolstof, zoals HCN, C₂H₂, enz.

⁵Deze stofdeeltjes bestaan voornamelijk uit zand en glas in het geval van een zuurstofrijke chemie, en uit roet in het geval van een koolstofrijke chemie.



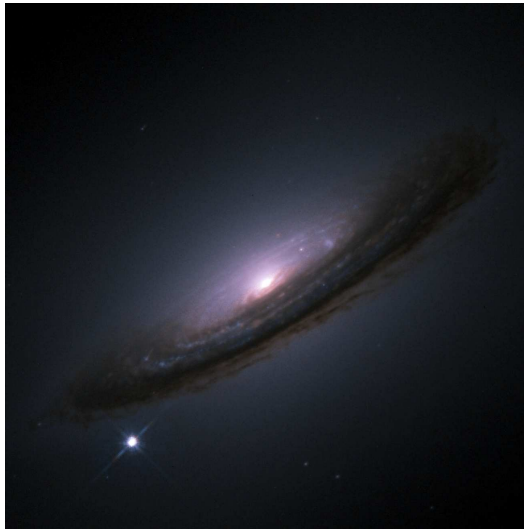
Figuur S.1 — Hubble Space Telescope beeldje van de planetaire nevel NGC 6826: de sterrenwind uit de AGB fase wordt geïoniseerd door het sterke stralingsveld van de hete C/O-kern.

S.1.4 Massieve sterren

Voor zware sterren, met een massa groter dan 8 zonsmassa's, gaat het allemaal wat sneller en heviger. Ook zij beginnen met verbranding van waterstof naar helium op de hoofdreeks, maar dit duurt slechts enkele miljoenen jaren. Daarna volgen niet alleen heliumverbranding, maar ook koolstofverbranding, en alle verdere verbrandingscycli tot en met de verbranding van silicium naar ijzer. Telkens eerst in de kern, en daarna in een schil zoals op de RGB en AGB. Ook hier gaat dit gepaard met een enorme uitzetting van de mantel. Wanneer de ijzern kern de kritische massa van 1.4 zonsmassa's (de Chandrasekhar limiet) heeft bereikt, stort die onherroepelijk ineen tot een neutronenster of zwart gat. Daarbij komt zoveel energie vrij dat de rest van de ster wordt weggeblazen in een *supernova* explosie (Figuur S.2).

S.2 De vragen

Zoals hierboven beschreven, is het massaverlies een belangrijke factor in de evolutie van sterren na de hoofdreeks. Alhoewel er stilaan een kwalitatief scenario bestaat voor het mechanisme achter deze sterrenwind, blijven heel wat puzzelstukken ontbreken. Voor de zuurstofrijke sterren is het nog niet duidelijk *welk stof zich eerst vormt*, en of dat volstaat voor een acceleratie van de wind. Ook de verdere stofcondensatie is niet duidelijk. Een ander groot vraagteken betreft *de oorzaak van de sterke asymmetrie* die de circumstellaire envelope vertoont eens die zichtbaar wordt als Planetaire Nevel (zie Figuur S.1). Deze asymmetrie moet zich wellicht naar het einde van de AGB vormen, maar de oorzaak en tijdschaal zijn niet bekend. Zowel binariteit als rotatie en magnetische velden spelen mogelijk een grote rol.



Figuur S.2— Hubble Space Telescope beeldje van de Supernova 1994D (links onderaan) in het melkwegstelsel NGC4526. Dit melkwegstelsel staat zo ver dat de vele individuele sterren slechts op een witte schijn lijken. De supernova is echter zo helder als de vele miljoenen sterren in het centrum van het melkwegstelsel tesamen.

S.3 Observatieve uitdagingen

Geëvolueerde sterren met sterk massaverlies zijn erg *koel*, en daarenboven ook *verduisterd* door het vele circumstellaire stof. Dat maakt dat ze de grootste fractie van hun lichtkracht in het *infrarood* uitstralen. Infraroodwaarnemingen zijn echter verre van evident omwille van de beperkte transparantie van de aardse atmosfeer bij die golflengten en de sterke thermische straling van zowel atmosfeer als instrumenten. De sterstraling is bij IR waarnemingen vanop aarde vaak verwaarloosbaar tegen de enorme voorgrondstraling.

Een tweede probleem ligt bij de enorme afstanden tussen de waarnemer en de studieobjecten. Ook al zijn geëvolueerde sterren vaak zo groot als een zonnestelsel, toch zien we ze slechts als *een puntje aan de hemel*, zonder enig detail. Ook de grootste telescopen (10 meter diameter) kunnen slechts de meest nabije geëvolueerde sterren ruimtelijk oplossen. De oplossing bestaat erin het licht van verschillende telescopen op grote onderlinge afstand te combineren. Uit het *interferentiepatroon* is dan wel informatie op een grotere ruimtelijke resolutie af te leiden.

S.3.1 IR Spectroscopie

Bij spectroscopie wordt het sterlicht gesplitst in verschillende kleuren zoals waterdruppeltjes dat doen met zonlicht om een regenboog te vormen. In de praktijk gebeurt dat niet met waterdruppeltjes, maar met een prisma of een *grating* (een soort plank met oneffenheden die verschillende kleuren in verschillende richtingen reflecteert). Op een detector wordt dan

de flux (hoeveelheid licht) bij elke golflengte (kleur) gemeten. In het infrarood zien we in de spectra van reuzen en superreuzen sterke absorptiebanden veroorzaakt door moleculen in de steratmosfeer. Ook zien we vaak extra emissie door stofdeeltjes (zand, roet, etc.) wat wijst op een sterrenwind. Dankzij die absorptie- en emissiebanden kunnen we heel wat leren over de steratmosfeer en het massaverlies, zoals de samenstelling en de temperatuurs- en dichtheidsverdeling.

S.3.2 IR Interferometrie

Toch blijft het vaak onmogelijk om uit een spectrum af te leiden wat nu eigenlijk de structuur van de steratmosfeer en sterrenwind is. De exacte locatie van de moleculen of stofdeeltjes is nauwelijks te achterhalen. Daarom zouden we die sterren graag ruimtelijk oplossen⁶ op verschillende golflengten: de grootte van de ster in zo'n absorptie- of emissieband in vergelijking met de grootte naast die band leert ons iets over de locatie van het molecuul of stofdeeltje verantwoordelijk voor de geobserveerde absorptie/emissie.

Zoals eerder gezegd volstaat zelfs een telescoop met een spiegeldiameter van 10 meter niet om een nabije reus in het infrarood op te lossen. Hooguit de sterrenwind kan voor enkele zeldzame nabije objecten opgelost worden. Typisch is een diameter van 100 meter nodig om de bekende geëvolueerde sterren ruimtelijk te kunnen bestuderen. Aangezien deze objecten alle erg helder zijn, is er echter geen behoefte aan het enorme licht-vergarend oppervlak van zo'n 100 meter telescoop.

De oplossing heet interferometrie en is een onrechtstreeks gevolg van Thomas Young's experiment om het golfkarakter van licht aan te tonen. Begin vorige eeuw kwam A. Michelson op het idee om het licht van 2 verschillende telescopen te interfereren. Hij vond immers dat het contrast van de resulterende *franjes* een maat is voor de grootte van het object aan de hemel: een puntbron geeft maximaal contrast, een uitgebreid object een lager contrast. Dit principe en de vele mogelijke toepassingen worden ingeleid in **Hoofdstuk 2**. In de praktijk geeft zelfs een puntbron geen maximaal contrast omwille van allerlei instrumentele en atmosferische aberraties. Een meting moet dus gekalibreerd worden a.d.h.v. een schatting van de *interferometrisch efficiëntie*. Dat laatste gebeurt meestal door de observatie van een puntbron.

S.3.3 Een kalibratienetwerk voor MIDI

In **Hoofdstuk 3** bespreken we een nieuw netwerk van 404 sterren die geschikt zijn voor de kalibratie van interferometrische waarnemingen in de N-band (8–13 micron) vanop het zuidelijk halfrond. Deze sterren werden geselecteerd uit de IRAS en MSX puntbron-catalogi op basis van hun helderheid in de N-band. Verdere restricties zijn de afwezigheid van circumstellair stof of een nauwe begeleider. Ook werd gecontroleerd op uitzonderlijke spectrale types en op sterke variabiliteit. Idealiter is een interferometrische kalibratiester een puntbron zodat het gemeten franjecontrast een maat is voor de interferometrische efficiëntie. Aangezien de meeste objecten koele K en M reuzen zijn, is de kans echter groot dat ook deze

⁶In eerste instantie wil dit gewoon zeggen de schijnbare diameter bepalen. Oppervlakedetails ruimtelijk oplossen is momenteel enkel voor de (schijnbaar) allergrootste sterren mogelijk.

kalibratiebron enigszins wordt opgelost. Dan is een nauwkeurige a priori diameterschatting essentieel om de eigenlijke interferometrische efficiëntie te kunnen kwantificeren. Daartoe werd voor alle sterren nieuwe nabij-infrarood fotometrie bekomen in het SAAO⁷ systeem. Voor 90 % van de catalogoog kon ook optische Geneve fotometrie gemaakt worden. Daarmee hebben we dan de temperatuur, oppervlaktegraviteit, interstellare extinctie en angulaire diameter geschat a.d.h.v. synthetische SEDs. Die synthetische SEDs werden speciaal voor dit werk berekend a.d.h.v de MARCS modelatmosfeer code. Voor een klein deel van de catalogoog bestaan reeds directe interferometrische diameter bepalingen, of andere indirecte schattingen. De diameters bepaald in dit proefschrift zijn met beide in overeenstemming. Dankzij de hoge kwaliteit en kwantiteit van de beschikbare fotometrie en modellen, kan met bijna alle sterren uit onze catalogoog een kalibratie op het 1 %-niveau (in franjecontrast) gebeuren.

S.4 Toepassingen

Het hoofddoel van de proefschrift is een pilootstudie van de mogelijkheden die de combinatie van interferometrie met spectroscopie in het infrarood kan bieden binnen het onderzoek van laat-type, geëvolueerde sterren. Zoals hierboven reeds besproken, gaat het dan vooral om vragen over het mechanisme dat het massaverlies drijft, en over de oorzaak van asymmetrie op grote schaal in de circumstellare omgeving. We beginnen bij een ster die waarschijnlijk nog maar net de hoofdreeks heeft verlaten: Arcturus. Daarna bekijken we een rode superreus met een relatief zwakke sterrenwind. Tot slot bestuderen we een AGB ster in de superwind fase: OH26.5+0.6.

S.4.1 Arcturus: een binair systeem?

Arcturus vormt het studie-object van **Hoofdstuk 4**. Deze ster, ook gekend als α Bootis, is een K reus op kleine afstand (11 parsec, of ongeveer 40 lichtjaar). Deze ster wordt vaak gebruikt voor allerlei kalibratiedoeleinden, zoals bijvoorbeeld voor IR spectroscopie of radiële snelheden. Het spectrum kan vrij goed gereproduceerd worden met de laatste generatie atmosfermodellen en er is geen spoor van massaverlies. Dit leek ons een geschikte bron voor een ruimtelijke studie van de atmosfeer bij een temperatuur die toch al molecuulvorming toelaat (4500 Kelvin). Daartoe hebben we α Bootis geobserveerd met het FLUOR instrument op de IOTA interferometer (Mt. Hopkins, Arizona). Deze combinatie geeft erg nauwkeurige franjecontrasten voor 4 verschillende golflengten tussen 2 en 2.5 micrometer.

Tot onze grote verrassing wordt wel de golflengte-afhankelijkheid van het franjecontrast goed voorspeld door een atmosfermodel, maar niet de afhankelijkheid van franjecontrast met telescoopseparatie. Die laatste suggereert extra emissie op een schaal minstens enkele malen groter dan Arcturus zelf. Er is al eerder sprake geweest van een begeider rond Arcturus, namelijk na een potentiële detectie door de Hipparcos satelliet, maar die is nadien afgedaan als een onbegrepen instrumenteel probleem. Opvallend is echter dat onze nieuwe interferometrische data erg gelijkaardige parameters voor het binair systeem suggereren, voor namelijk wat betreft de separatie (0.2 boogseconden). Langs de andere kant zijn een non-

⁷SAAO = South African Astronomical Observatory

detectie van de begeleider met Adaptive Optics en de erg lage franjecontrasten gemeten bij een andere interferometrische studie⁸ (in het optische golflengtedomein) moeilijk te verzoenen met de gesuggereerde begeleider. Bij een studie van de positie aan de hemel zijn echter wel niet-lineaire componenten gevonden die erop kunnen wijzen dat Arcturus wel degelijk in een baan beweegt.

Door gebruik te maken van het verschil in lichtkracht bij visuele golflengten (Hipparcos) en dat bij IR golflengten (onze FLUOR data) komen we tot de conclusie dat de potentiële begeleider een subreus moet zijn met een iets hogere temperatuur en ongeveer 10 maal kleiner dan Arcturus. Indien beide sterren even oud zijn, wijst dit op erg gelijkaardige massa's.

Aangezien er geen grote variaties in radiale snelheden gemeten zijn over de laatste 100 jaar, moet de baan of heel erg groot zijn, met een periode veel groter dan een eeuw, of loodrecht staan op de gezichtslijn.

Om uitsluitel te bieden over de aanwezigheid van een begeleider stellen we nieuwe observaties met een recent Adaptive Optics systeem voor. Ook een nieuwe interferometrische studie met 3 i.p.v. 2 telescopen kan de mogelijke begeleider detecteren. Daarenboven moeten andere K reuzen een soortgelijke studie ondergaan om na te gaan in welke mate het hier gedecteerde effect typisch is voor zulke sterren. Indien dit een vaak voorkomend fenomeen is, wijst dat op grote tekortkomingen in ons begrip van deze rode reuzen.

S.4.2 Betelgeuze: korrels alumina vlak boven de atmosfeer?

Vervolgens onderzoeken we in **Hoofdstuk 5** de uitgebreide atmosfeer van de rode superreus Betelgeuze (α Orionis). Deze ster is wat koeler dan Arcturus, en een stuk zwaarder. Daarenboven heeft ze wel een duidelijke sterrenwind langs dewelke ongeveer een miljoenste van een zonsmassa per jaar wordt uitgestoten. Het circumstellaire materiaal is echter optisch dun, wat wil zeggen dat we er goed kunnen doorheen kijken. Daarenboven vertoont Betelgeuze geen sterke variaties in lichtkracht. Daarom is deze ster uitermate geschikt voor een studie van het mechanisme verantwoordelijk voor de sterrenwind, zonder de complicaties bij Mira (AGB) sterren. Die laatste zijn immers zo variabel dat alle observaties simultaan moeten gebeuren en de dikke lagen moleculen en stof laten nauwelijks sterlicht door.

Het silicaatstof (zand) dat in de sterrenwind van Betelgeuze gevormd wordt, is duidelijk zichtbaar in het spectrum door een sterk emissiekenmerk rond $10\ \mu\text{m}$. Spectroscopie door een smalle opening op die golflengten heeft aangetoond dat dat silicaatstof zich vrij ver van de centrale ster bevindt, waarschijnlijk op ongeveer 20 sterstralen. Ook vertoont het spectrum aanwijzingen voor een dunne laag water omheen de fotosfeer.

Aan de hand van het nabij-IR deel van het spectrum en nabij IR interferometrische data vinden we dat die waterlaag op ongeveer een halve sterstraal boven de fotosfeer zit en 1750 K warm is. Ze is echter zo dun dat de voorspelde waargenomen afmeting nauwelijks groter is dan de centrale ster en dat wordt bevestigd door de nabij-IR interferometrische waarnemingen.

⁸Bij die studie werd het franjecontrast gemeten met een telescoopseparatie waarbij Arcturus nauwelijks franjes vertoont. De veel kleinere begeleider zou bij diezelfde telescoopseparatie wel nog sterke franjes moeten vertonen, maar die zijn dus niet gezien.

Metingen bij langere golflengten (rond $10\ \mu\text{m}$) tonen echter wel een object dat anderhalve keer zo groot is als de fotosfeer. Bovendien vinden we ook in een spectrum door smalle opening extra straling dicht bij de ster. De spectrale vorm van die extra straling is noch moleculair noch chromosferisch⁹.

Zowel de interferometrische als de spectroscopische data kunnen goed gereproduceerd worden door op de plaats van de waterlaag ook amorf aluminiumoxide (alumina, Figuur S.3) toe te voegen. Dit is een stofdeeltje waarvan vermoed wordt dat het als eerste condenseert. Het heeft namelijk een hoge condensatietemperatuur die overeenkomt met de temperatuur van de gevonden waterlaag, namelijk 1750 K.



Figuur S.3— Alumina (amorf Al_2O_3) is de ruwe vorm waarin aluminium hier op aarde voorkomt. Splitsing in aluminium en koolstofdioxide gebeurt door elektrolyse en toevoeging van koolstof.

Onze vondst van alumina zo dicht tegen de fotosfeer is in overeenstemming met de huidige hypothesen over de stofcondensatiereeks. Daarin fungeert alumina als condensatiekern voor de verdere stofvorming. Het silicaatstof dat zo'n duidelijke spectrale signatuur geeft, kan pas vormen bij temperaturen onder 1000 K, i.e. veel verder in de sterrenwind. Waarom het gebied tussen de centrale ster met water- en aluminalaag en de sterrenwind met silicaatstof leeg lijkt, kan het gevolg zijn van de transparantie van alumina en de daaruit volgende lage temperatuur. Pas wanneer er silicaten op kondenseren kunnen de stofdeeltjes efficiënt sterlicht absorberen. Daardoor worden ze een stuk warmer en wordt de emissie zichtbaar.

S.4.3 OH26.5+0.6: een schijf in de superwind?

Op het einde van de AGB ondergaan sterren met gemiddelde massa een versterkt massaverlies in een zogenaamde *superwind*. De ster verliest nu bijna een duizendste van een zonsmassa per

⁹We weten dat Betelgeuze een chromosfeer heeft, maar die straalt voornamelijk op nog langere golflengten en in het UV.

jaar en wordt door de vele stofvorming volledig aan het zicht onttrokken. In het infrarood zien we een erg helder object door de sterke thermische straling van de stofschil. Ook zien we in vele gevallen sterke masers van OH, SiO en water. Deze ontstaan in de sterrenwind en kunnen gebruikt worden om de geometrie van de buitenste regionen van de wind te bestuderen. Bij aanwezigheid van de OH maser in zo'n sterk verduisterde ster spreken we van een OH/IR ster. OH26.5+0.6 is een welgekend en vaak bestudeerd object uit deze categorie.

In **Hoofdstuk 6** analyseren we het ISO-SWS spectrum van OH26.5+0.6 tezamen met nieuwe mid-IR interferometrische data. De superwind van deze ster kan ruimtelijk opgelost worden met één enkele 10-meter telescoop. Zo'n beeldje van OH26.5+0.6 toont dat de superwind niet sferisch symmetrisch is, maar eerder een ellipsoïde waarvan de korte geprojecteerde as maar 3/4 van de lange as beslaat. Interessant is dat deze *asymmetrie* sterk overeenkomt met die gezien op een veel grotere schaal in de OH maser. Terwijl die laatste eerder verklaard werd als een gevolg van een anisotroop interstellair stralingsveld, lijkt het nu meer waarschijnlijk een ongelijke belichting door de centrale ster te zijn. Daartoe zou er dan een optisch erg dik object in de superwind moeten zitten, zoals een schijf.

Deze hypothese wordt bevestigd door *de afwezigheid van franjes* in het interferometrisch signaal: een sferisch model, gebaseerd op het ISO-SWS spectrum, voorspelt dat er bij 8 μm toch nog voldoende licht van de centrale ster doorheen de envelope straalt om detecteerbare franjes te genereren. Onze non-detectie suggereert dus een veel dikker object dicht rond de centrale ster.

Enkel bij 8 μm hebben we een 2-D beeldje dat toelaat asymmetrie te ontdekken, maar onze observaties bevatten ook een ruimtelijk opgelost (in 1-D langsheen de grote as uit het 2-D beeldje) spectrum van 8 tot 13 μm . Daarin zien we dat OH26.5+0.6 er op 10 μm veel groter uitziet dan op 8 en 13 μm . Dat is kwalitatief in overeenstemming met een sferisch model voor de stofenvelope: het silicaatstof is op 10 μm het minst transparant en daardoor lijkt het object bij die golflengte veel groter. De waargenomen variatie in grootte tussen 8 en 13 μm is echter een stuk kleiner dan die voorspeld door het model. Dat komt voornamelijk door een sterke *onderschatting van de grootte rond 8 en 13 μm* , daar waar het silicaat vrij transparant is. We tonen echter dat dit niet het gevolg kan zijn van een andere stofsoort in sferische geometrie. Er zijn 2 mogelijke verklaringen voor deze observationele vaststelling: ofwel ligt de binnenstraal van de stofenvelope veel verder naar buiten dan traditioneel aangenomen, ofwel bevindt er zich een erg dik object in de sferische wind. Gegeven de eerder besproken vaststellingen is deze laatste hypothese de meest waarschijnlijke.

We concluderen dat een schijf die we op haar kant zien met de lange as volgens de ruimtelijke richting van het mid-IR spectrum het geheel van onze nieuwe observaties kan verklaren. Dit resultaat sterkt de hypothese dat de sterke asymmetrie die vaak gezien wordt in verder geëvolueerde objecten (Post-AGB sterren, Planetaire Nevels) eigenlijk reeds op het einde van de AGB, in de superwindfase, ontstaat. Gegeven de schijfgeometrie lijkt het erg plausibel dat binariteit een belangrijke rol speelt. Voor OH26.5+0.6 is nog geen begeleider gevonden, maar dat is logisch gezien de dikke stofenveloppe die de centrale ster(ren) aan het zicht onttrekt.

Nieuwe observaties met Adaptive Optics in het nabij-IR (mei 2005) zullen die schijf, indien aanwezig, oplossen met een veel betere ruimtelijke resolutie.

S.5 Conclusies en vooruitzichten

In dit proefschrift hebben we de nabije circumstellaire omgeving van geëvolueerde sterren bestudeerd met behulp van infrarood spectroscopie en interferometrie.

In eerste instantie hebben we een praktische bijdrage geleverd in de vorm van een nieuw netwerk van sterren geschikt voor de kalibratie van mid-IR interferometrische observaties. Daarna bestudeerden we een K reus, Arcturus, en vonden sterke aanwijzingen voor een begeleider. De rode superreus Betelgeuze blijkt stofvorming te hebben erg dicht tegen de steratmosfeer. Het gaat dan niet om silicaten maar om alumina. Waarschijnlijk hebben we hier voor het eerst het begin van stofvorming ruimtelijk opgelost en de belangrijke rol van alumina bevestigd. Tot slot vonden we asymmetrie in de superwind van OH26.5+0.6. Dit lijkt een gevolg te zijn van een schijf ingebed in de sferische sterrenwind.

In de nabije toekomst zullen we werken aan een gelijkaardige studie van enkele representatieve *zuurstof- en koolstofrijke pulserende AGB sterren*. Daarna willen we 3 grote projecten opstarten. Deze passen binnen de grote hoeveelheid gegarandeerde tijd toegewezen aan België op de VLTI-subarray. Een eerste luik bevat een studie van een *steekproef rode superreuzen*, geselecteerd op basis van hun ISO-SWS spectrum. Deze moeten toelaten de resultaten gevonden voor Betelgeuze te veralgemenen. Een tweede luik bevat een steekproef OH/IR sterren, van erg verduisterde tot vroege Post-AGB objecten. De nadruk ligt hier op een studie van de asymmetrie. Het laatste luik beslaat tijdreeksen van pulserende AGB sterren. Voor deze sterren wordt immers aangenomen dat de pulsaties een belangrijke rol spelen in het massaverlies. Door de nabije circumstellaire omgeving ruimtelijk op te lossen doorheen een pulsatiecyclus kunnen we variaties in temperatuurs- en dichtheidsverdeling uit elkaar halen, terwijl dat laatste een ontaard probleem is wanneer enkel spectroscopie beschikbaar is. Uiteindelijk moet dit het complexe spel tussen pulsaties, schokgolven, molecuul- en stofvorming ontrafelen.

