

NEDERLANDSE SAMENVATTING VAN DE STARLAB PROJECT:

ACHTERGROND. Sterren met massa tussen 0,8 en 8 M_{zon} (hierna "lage en middelgrote massa sterren" - LIMS - genoemd) domineren de stellaire populatie van onze Melkweg. Tijdens hun Asymptotische Reuzentak fase (AGB) vindt er in de LIMS een rijke nucleosynthese plaats, het zogenaamde "s-process", waarin voornamelijk koolstof en elementen die zwaarder zijn dan ijzer worden geproduceerd. Door convectie worden deze elementen naar het oppervlak gebracht, waardoor de chemische samenstelling aan het steroppervlak gewijzigd wordt, en sommige van deze sterren zelfs koolstofsterren worden. Terwijl een stellaire wind de buitenste lagen van de AGB-ster doet uitdijen, worden er moleculen en stofkorrels gevormd waardoor een dik omhulsel de ster omgeeft. Naarmate dit circumstellaire omhulsel verder expandeert, verdunt het geleidelijk, en vermengen de producten van de stellaire nucleosynthese zich met het interstellaire medium, waardoor de chemische evolutie van het Melkwegstelsel beïnvloed wordt.

Sommige specifieke soorten van LIMS bestaan uitsluitend uit binaire systemen. De interactie tussen de twee componenten van een dubbelster kan een aanzienlijke invloed hebben op hun interne structuur en chemische samenstelling. Door middel van mengprocessen (veroorzaakt door bijvoorbeeld temperatuurverschillen en rotatie) en de uitwisseling van massa, verrijkt met de in de nucleosynthese geproduceerde elementen, tussen de stellaire componenten, kan hun interne structuur en chemische samenstelling veranderd worden.

Hoewel de algemene evolutie van sterren goed wordt begrepen, zijn er nog grote onzekerheden die onze kennis van enkele belangrijke fysische en chemische processen beperken. Zo blijven er grote lacunes bestaan in de beschrijving van convectie en interne mengprocessen, massaverlies, stofvorming en gasreacties in de dikke circumstellaire schillen en, in het geval van binaire systemen, de overdracht van massa en impulsmoment tussen de stellaire componenten.

DOELSTELLINGEN: Het doel van dit project is het verbeteren van ons begrip van (sommige) fysische en chemische processen die in de LIMS aan het werk zijn. Concreet hadden we van plan om:

- (i) de oppervlaktesamenstelling van specifieke LIMS te bepalen en deze te vergelijken met de voorspellingen van de modellen van nucleosynthese. Vooruitgang wordt verwacht van het feit dat we gebruik zullen maken van goed gekozen sterren met bekende afstanden (zoals post-AGB sterren in de Magellaanse Wolken en Galactische AGB sterren met exacte Gaia parallaxen), waardoor we hun plaats in het Hertzsprung-Russell diagram kunnen bepalen en vergelijken met de berekende modellen. Het bepalen van de atmosferische samenstelling van geavanceerde LIMS zorgt voor een robuuste diagnostiek van interne nucleaire verbrandings- en mengprocessen die in het inwendige van de sterplaats vinden. Wegens hun rijke nucleosynthese zijn AGB- en post-AGB-sterren uitzonderlijke laboratoria voor het testen van de robuustheid van stellaire modellen.
- (ii) het verkennen van nieuwe mogelijke paden waarlangs binaire systemen tussen de verschillende klassen van LIMS zouden kunnen evolueren (hierna LIMB genoemd). Er wordt vooruitgang verwacht door het modelleren van fysische processen die tot nu toe niet in rekening werden gebracht (bv. getijdeninteractie met een circumbinaire schijf om de excentriciteit van de baan te verhogen), en door het gebruik van het nieuw verkregen

excentriciteit-periode ($e - P$) diagram in de analyse. Dit laatste werd bepaald uit onze jarenlange metingen van de radiale snelheid en de bepaling van de orbitale elementen van zeer uiteenlopende klassen van LIMB. Na 10 jaar waarnemen met de HERMES-spectrograaf, zijn nu zelfs de langste omloopbanen beschikbaar. Uiteindelijk moet dit project het mogelijk maken om te evalueren hoe de verschillende klassen van LIMB en hun oppervlaktesamenstelling passen in een globaal schema.

(iii) het bestuderen van de circumstellaire schillen op verschillende schalen rond LIMS met behulp van gegevens van de infraroodsatelliet Herschel en mid-IR interferometrie. In het bijzonder zullen we voor verschillende geometrieën van de circumstellaire schil de intensiteit en de aard van het massaverlies bepalen.

STRATEGIE. Onze strategie is om de voorspellingen van de modellen te confronteren met observationele kenmerken door het ontwikkelen van een nauwe synergie tussen de projectpartners. Op het vlak van waarnemingen beschikt het team over opmerkelijke telescopen en instrumenten (Herschel/ESA, PIONIER-VLTI/ESO, HERMES/Mercator/KU Leuven). Deze instrumenten bieden uitstekende mogelijkheden voor spectroscopie (of beeldvorming) met een hoge spectrale resolutie, met een grote gevoeligheid en een breed spectraal bereik. De noodzakelijke gegevens zijn beschikbaar en worden nog lang niet volledig benut. Omgekeerd kunnen de ruime mogelijkheden die de huidige waarnemingsmethodes bieden alleen ten volle worden benut als hun interpretatie gebaseerd is op geavanceerde theoretische modellen. Het team bestaat uit deskundigen op het gebied van waarnemingsmethoden en theoretische modellering. De ambitie van dit project is om hun samenwerking te verhogen om zo belangrijke vooruitgang te genereren in ons begrip van LIMB. De teamleden zijn experts in het bepalen van de abundantie van chemische elementen met behulp van MARCS en Turbospectrum software, in het modeleren van stellaire evolutie en nucleosynthese met behulp van STAREVOL en BINSTAR codes, en in het modeleren van stralingsoverdracht met behulp van software programma's zoals RADMC-3D en DUSTY.

De impact verwacht van het project is (i) het bepalen van betere observationele limieten op nucleosynthese en mengprocessen in LIMS, (ii) het ontrafelen van de evolutionaire verbanden tussen de specifieke families van LIMS die uitsluitend onder binaire systemen voorkomen en het bepalen van de evolutionaire paden waarlangs deze families ontstaan, en (iii) het beter karakteriseren van het massaverlies van de LIMS.

RESULTATEN. Doelstelling (i). De hoeveelheid van zware elementen in S-type sterren heeft aangetoond dat de huidige modellen van stellaire evolutie het begin van de nucleosynthese van het s-proces in AGB-sterren en het transport van deze nucleosynthese producten naar het stellaire oppervlak correct voorspellen. Dit project heeft echter aangetoond dat de onderste massalimiet hiervoor niet $1,5 M_{\text{zon}}$ is, zoals eerder gedacht, maar $1 M_{\text{zon}}$. De voorspelde helderheidslimiet voor de aanvang van het s-proces en die intrinsieke en extrinsieke (d.w.z. binaire) S-sterren scheidt, is correct. Er zijn echter enkele gemengde gevallen (extrinsieke S-sterren die intrinsiek zijn geworden wanneer de secundaire component op zijn beurt de AGB-fase ingaat) ontdekt onder de bestudeerde objecten. Deze gemengde gevallen (die we "intrinsieke" S-sterren noemen) zijn geïdentificeerd als Tc- en Nb-rijke dubbelsterren. In de gebruikelijke situatie zijn intrinsieke S-sterren rijk aan Tc en arm aan Nb, terwijl extrinsieke S-sterren arm zijn aan Tc en rijk aan Nb. Een gedetailleerde vergelijking tussen de geobserveerde en de voorspelde hoeveelheid

van deze elementen toont aan dat de gebruikelijke nucleosynthese van het proces de geobserveerde abundantie in intrinsieke S-sterren goed nabootst. Integendeel, sommige CEMP-sterren (genaamd "CEMP-rs sterren" waar CEMP het acroniem is van "Koolstof verrijkt en Metaal-arm") tonen kenmerken van het i-proces, waarvoor neutronendichtheden nodig zijn die tussen die van de s- en r-processen in liggen. Door extreme waarden voor de parameters die de mengprocessen in AGB-sterren beschrijven te gebruiken, zijn onze STAREVOL-modellen in staat om de i-proces abundanties die in deze CEMP-sterren worden waargenomen, te reproduceren.

Doelstelling (ii). Dankzij een uitgebreid programma voor het monitoren van radiale snelheden met behulp van de HERMES/Mercator-spectrograaf konden excentriciteit-periode (e - P) diagrammen voor verschillende LIMB-families worden verkregen: dwerg- en reuzenbarium sterren, sub-reuzen- en reuzen-CH-sterren, extrinsieke S-sterren, CEMP-sterren, post-AGB- en post-RGB-sterren, RV Tau-sterren, sdB-sterren en centrale sterren van de planetaire nevels (CSPN). De systemen met zeer korte perioden (enkele dagen), waaronder CSPN-sterren en CEMP-dwergsterren, zijn waarschijnlijk het gevolg van Rochelobe transfer en de daaropvolgende evolutie binnen het gemeenschappelijk omhulsel. Systemen met de langste periodes (~100 jaren) bepalen de grens van efficiënte massaoverdracht door de wind van de AGB-ster. De e-P diagrammen van de verschillende families van LIMB's lijken op elkaar, maar zijn niet volledig identiek. Zo zijn er bijvoorbeeld verrassende verschillen tussen post-AGB sterren en dwerg Ba-sterren (bv. er worden wel post-AGB sterren gevonden met korte periode, maar geen dwerg Ba-sterren), ondanks het feit dat verondersteld wordt dat post-AGB evolueren naar dwerg Ba-sterren. Aan de andere kant lijken RV Tau-systemen merkwaardig genoeg geen omloopbanen te hebben met perioden van minder dan 700 dagen, wat toch vaak voorkomt bij post-AGB-systemen, ondanks het feit dat RV Tau-systemen eigenlijk als post-AGB-systemen worden beschouwd. We hebben een kwantitatieve studie uitgevoerd naar het evolutionaire verband tussen dwerg Ba-sterren en reuzen Ba-sterren. We concludeerden dat getijde-effecten op de rode reuzentak de aanwezigheid van meer excentrische systemen met korte perioden (< 1000 d) onder bariumdwergsterren verklaren. De massaverdeling van de begeleiders van bariumsterren werd verkregen en bevestigt dat deze begeleider naar alle waarschijnlijkheid witte dwergsterren zijn, zoals voorspeld door het binaire evolutiescenario.

Doelstelling (iii). Een beeld van het oppervlak van de ster σ 1 Gru is verkregen met VLT/PIONIER-waarnemingen. Dit beeld onthult de aanwezigheid van vlekken, waarschijnlijk van convectieve oorsprong. Deze inhomogeniteit op het oppervlak zouden kunnen aan de basis liggen van de asymmetrische wind.

Op basis van de Herschel PACS en SPIRE spectra is een uitgebreide lijst van identificaties van moleculaire en atomaire spectrale lijnen gemaakt. Deze zullen nuttig zijn om de typische fysische kenmerken van circumstellaire schillen van AGB-sterren te bepalen.

We hebben aangetoond dat kennis van de geometrie van de circumstellaire schillen (d.w.z. spiraal, schijf of sferisch) een vereiste is om het stofgehalte nauwkeurig te kunnen afleiden (d.w.z. beter dan een factor 100 op de verhouding gasmassa/stofmassa).