

Perte de masse des étoiles évoluées via des observations avec SPHERE au VLT

N. Aymard. Badolo^{1,2}, S. Zacharie Kam¹, Eric Lagadec², Vincent Hocde², Fabrice Bado^{1,2}, Jean Kouliadiati¹

¹Observatoire d'astrophysique, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE), Université Joseph Ki-Zerbo (UJKZ), Burkina Faso,

²Laboratoire Lagrange, Parc Valrose, UMR7293, Observatoire de la Côte d'Azur, 06108, Nice, France

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le : 23 décembre 2022

Reçu en format révisé le : 11 novembre 2022

Accepté le : 21 mai 2023

Mots-Clés: Étoiles évoluées ; perte de masse ; SPHERE ; DUSTY ; polarisation

Keywords: Evolved stars ; mass-loss ; SPHERE ; DUSTY ; polarisation

RESUME

Les étoiles branche asymptotique des géantes (AGB) perdent une énorme quantité de matière d'une manière peu comprise à ce jour. Nous avons voulu mieux comprendre les mécanismes auteurs de la diminution considérable de la masse des étoiles pouvant avoisiner les trois quarts de la masse initiale de l'étoile. Nous avons étudié les spectres IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*) de trois étoiles AGB, V1943_Sgr, Psi_Phe et Ups_Cet, que nous avons modélisés grâce au code de transfert radiatif DUSTY afin de déterminer leurs propriétés. Les données polarimétriques de ces étoiles obtenues grâce à la caméra ZIMPOL nous ont permis de construire des cartes de flux polarisé pour ces étoiles. Grâce aux cartes de flux polarisé, nous avons prouvé l'existence d'enveloppe de poussière autour des trois étoiles. Nos travaux ont confirmé que V1943_Sgr, Psi_Phe et Ups_Cet sont des étoiles AGB.

ABSTRACT

The Asymptotic Giant Branch (AGB) stars lose a huge amount of matter and the mechanism of this mass loss is not yet well understood. We wanted to better understand this mechanism using data from SPHERE.

IRAS spectra of three AGB stars V1943_Sgr, Psi_Phe et Ups_Cet have been used to determine their properties. The polarimetric data of each star from ZIMPOL allowed us to make their polar maps. Thanks to these color maps, we were able to prove the existence of dust envelope around each star confirming that they are AGB stars.

I INTRODUCTION

Dans leur évolution, la plupart des étoiles de l'univers passent par une phase appelée branche asymptotique des géantes (AGB, *Asymptotic Giant Branch*). Pendant cette phase tardive de la vie de l'étoile, caractérisée par un noyau compact d'oxygène et de carbone, et une température effective de l'ordre de 2000 à 3000 K, les étoiles perdent une énorme quantité de matière sous forme de poussière et de gaz qui se condensent autour de l'étoile pour former une enveloppe circumstellaire. Cette poussière, après un certain temps donné, continue sa course dans le milieu interstellaire et la finira probablement dans de nouvelles étoiles qu'elle aura contribué à former. Il est connu que la moitié de l'hydrogène présent dans l'environnement proche de notre soleil provient d'autres étoiles qui l'ont perdu de cette façon [1]. Le phénomène de perte de masses des étoiles évoluées s'avère donc indispensable pour mieux comprendre la composition chimique de l'univers. Toute une science est consacrée à l'étude de ce phénomène avec pour but principal de comprendre le mécanisme qui est à l'origine de la dynamique de la chimie du milieu interstellaire. Toutefois, ce phénomène de perte de masse demeure encore mal compris à ce jour et les modèles peinent encore à évaluer raisonnablement le taux de perte

masse. Ceci est un défi, qui fait de l'Astronomie observationnelle un domaine d'application tout désigné pour apporter plus de réponses et de précisions à ces questionnements et permettre ainsi d'élucider au mieux le mystère de la perte de masse des étoiles évoluées. Notre travail s'inscrit dans cette dynamique. Nous avons porté notre étude sur trois étoiles AGBs Psi_Phe, Ups_Cet et V1943_Sgr. Psi_phe est une étoile pulsante de type SR [3], de type spectral M4III [4] et de faible masse. Des observations interférométriques notamment en bande K de l'étoile ont été faites [5], et ses propriétés ont été déterminées en utilisant les données interférométriques et spectrophotométriques. Ainsi, la température effective, la masse, la luminosité et le rayon de l'étoile ont été respectivement évalués à $3415 \pm 87 K$; $0,85 \pm 0,1 M_{\odot}$; $851,6 R_{\odot}$ et $882 \pm 96 L_{\odot}$ [6]. Le taux de perte de masse de l'étoile a été estimé par Hagen (1978) à environ $8.10^{-8} M_{\odot}.an^{-1}$ [7]. De type spectral MO IIIb [8], Ups_Cet est une étoile AGB, dont la température effective est estimée à 3417 K et la luminosité à $1658,42 L_{\odot}$ [9]. V1943_Sgr, est une étoile pulsante de type Srb, de masse intermédiaire et de type spectral M7III [10]. Sa masse a été estimée à $1,3 M_{\odot}$ [11]. Utilisant, un code de transfert radiatif pour modéliser l'émission de la raie de CO de l'étoile, Danilovich et al. ont pu estimer son taux de perte de masse à $9,9 M_{\odot}.10^{-8} M_{\odot}.an^{-1}$ [12]. La température effective de l'étoile est également estimée à

2752 K. Le travail a été structuré en trois sections. Dans la section 2, nous parlons de la méthode que nous avons utilisée pour aboutir à nos résultats, lesquels résultats sont présentés et discutés dans la section 3.

II MÉTHODE

II.1 Observations

Notre étude a porté sur trois étoiles AGB : Ups_Cet, Psi_Phe et V1943Sgr. Ces étoiles ont été observées dans la nuit du 15 au 16 Octobre 2019 au Very Large Telescope (VLT) équipé de l'instrument ZIMPOL/SPHERE. L'observation a été faite avec le filtre V ($\lambda_V = 554,0nm$) à la caméra 1 et le filtre N_R ($\lambda_{NR} = 645,9nm$) à la caméra 2. Les données brutes obtenues ont été réduites par le SPHERE DATA CENTER [13] et [14]

II.2 Outils

a DUSTY

DUSTY est un code de transfert radiatif développé par trois chercheurs américains de l'université de Kentucky : Željko Ivezić, Maia Nenkova et Moshe Elitzur. Le code a été conçu (en FORTRAN 77) pour résoudre entre autres le problème de transfert de rayonnement dans les enveloppes circumstellaires et peut gérer aussi bien les géométries sphériques que planes. DUSTY calcule la distribution de température ainsi que le champ de radiation dans l'environnement circumstellaire moyennant une spécification, par l'utilisateur, des propriétés de la poussière constituée autour de l'étoile ou de la galaxie au centre. Autrement dit, DUSTY modélise le spectre d'une source afin d'évaluer ses propriétés [15]. Les calculs de DUSTY sont basés sur une équation qui prend en compte la diffusion, l'absorption et l'émission. DUSTY considère la source lumineuse comme étant un (ou plusieurs) corps noir(s) qui émet(tent) à différentes longueurs d'onde, et dont la longueur d'onde maximale peut être déterminée par la loi de Wien, et, cette émission étant plus ou moins atténuée par la poussière présente éventuellement autour. Toutefois, ce modèle a d'abord été amélioré par Engelke qui proposa empiriquement de remplacer dans la fonction de Planck (eq.1), le paramètre T par $0,738T/[1+79420/(\lambda T)]^{0.182}$ [16]

$$E = \frac{1}{\lambda^5} \times \frac{2\pi hc^2}{\left(\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1\right)} \quad (1)$$

Dans ce cas, on a besoin de préciser l'absorption moléculaire de SiO autour de $8\mu m$, comme l'a suggéré empiriquement Marengo [17]

b) SPHERE

SPHERE est le Spectrocolorimètre à Haut contraste pour la recherche d'exoplanète (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research) [14] conçu installé par l'ESO (l'observatoire austral européen) sur son très large télescope (VLT) implanté au Chili. SPHERE tire parti de

plusieurs techniques de haute dynamique. L'instrument a été conçu pour la recherche d'exoplanètes par l'imagerie directe et dispose à cet effet d'un haut contraste et d'une grande résolution angulaire. Il comprend un système d'optique adaptative extrême et trois instruments scientifiques. Deux d'entre eux, le spectrographe à champ intégral (IFS) et l'imageur et spectrographe infrarouge à double bande (IRDIS), ont été conçus pour couvrir efficacement la gamme de l'infrarouge proche en une seule observation pour une recherche efficace des jeunes planètes. Le troisième instrument, ZIMPOL, a été conçu pour l'observation polarimétrique en vue de rechercher la lumière réfléchie des exoplanètes et la lumière diffusée par les disques de débris. Ces trois instruments scientifiques permettent l'étude des environnements circumstellaires. [2] et [14]

➤ ZIMPOL (Zurich IMaging POLarimeter)

En plus des instruments IRDIS et IFS qui fonctionnent dans l'infrarouge [2] et [14], et de son optique adaptative de dernière génération, SPHERE fonctionne également dans le visible grâce au polarimètre et imageur de Zurich (ZIMPOL, Zurich IMaging POLarimeter). ZIMPOL est un imageur à deux bras avec un séparateur de faisceau pour polarisation. Il couvre toutes les longueurs d'ondes du visible, c'est à dire allant de 500 à 900nm [19]. Cet instrument possède des modes observationnels pour l'imagerie différentielle polarimétrique (DPI), l'imagerie différentielle spectrale, et l'imagerie différentielle angulaire [2]. ZIMPOL possède deux caméras appelées 1 et 2. Chaque caméra est munie d'une roue à filtres qui permet d'utiliser plusieurs filtres couvrant la gamme des longueurs d'ondes du visible [20]. La lumière d'une étoile est généralement non polarisée. Cependant, lorsque cette étoile est entourée d'une enveloppe de poussière, la diffusion causée par celle-ci induit une lumière polarisation sur la lumière. L'instrument ZIMPOL permet de reconnaître une telle lumière polarisée venant d'une source lointaine, en l'occurrence d'une étoile, et donc de dire s'il est possible que cette étoile soit entourée d'une enveloppe de poussière [2]. Cela fait de l'instrument l'outil le plus adéquat pour les observations du type que nous avons réalisées. C'est pourquoi donc nous l'avons utilisé. Aussi, ZIMPOL a une résolution \mathfrak{R} telle que donnée par l'équation (2) :

$$R = 1.22 \times \frac{\lambda}{D} = 1.22 \times \frac{0.5 \times 10^{-6}}{8.2} \simeq 20mas \quad (2)$$

➤ Polarisation avec ZIMPOL

Il existe deux façons de caractériser la polarisation de la lumière. La première est une interprétation directe des lois de l'électromagnétisme, notamment les équations de Maxwell. Selon ces lois, la lumière naturelle monochromatique est constituée par des vibrations elliptiques, dont la forme, l'orientation et la phase changent, de façon irrégulière, plusieurs milliards de fois par seconde. Chaque vibration est une onde

électromagnétique qui se propage selon l'équation différentielle (3)

$$\Delta E(r, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\delta E(r, t)}{\delta t^2} \quad (3)$$

L'électromagnétisme considère en effet que l'onde électromagnétique est entièrement déterminée par la connaissance du vecteur champ électrique E. Si l'on fait l'approximation que l'onde est plane, l'équation (3) a deux solutions qui sont données dans les équations (4) et (5):

$$E_x(r, t) = E_{0x} \cos(kr - \omega t + \delta_x) \quad (4)$$

$$E_y(r, t) = E_{0y} \cos(kr - \omega t + \delta_y) \quad (5)$$

Où E_{0x} et E_{0y} sont les amplitudes maximales des composantes du vecteur E suivant les directions (ox) et (oy), k le module du vecteur d'onde, et δ_x et δ_y des phases arbitraires. Des valeurs particulières de ces grandeurs nous conduisent à la définition de deux types de polarisation de la lumière :

- la polarisation circulaire qui est en réalité un cas particulier de la polarisation elliptique et pour laquelle $E_{0x} = E_{0y}$. L'ellipse devient alors un cercle à droite ou à gauche, selon le sens de rotation de E.
- la polarisation linéaire pour laquelle $E_{0x} = 0$ (ou $E_{0y} = 0$) et $\delta = \delta_x - \delta_y = n\pi$

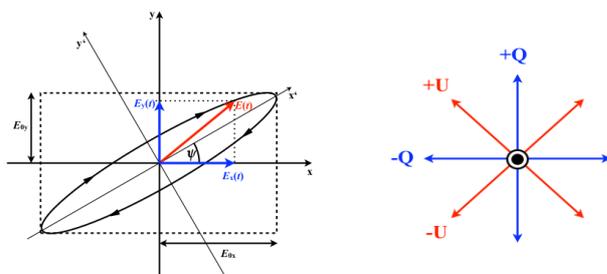


Figure 1 : à gauche l'ellipse de polarisation et à droite Orientation de Stokes (Bazzon, A., 2012)[21]

La deuxième façon de caractériser la polarisation est celle introduite par Sir George Gabriel Stokes en 1852. Dans son formalisme, Stokes redéfinit la polarisation en utilisant la notion d'intensité lumineuse. Il montre que tout faisceau peut être décomposé en une composante

non polarisée et en une composante elliptique polarisée. Ainsi, I l'intensité s'écrit :

$$I = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 = I_{np} + I_p = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \quad (6)$$

on pose $I_{0^\circ} = [+Q]$ et $I_{90^\circ} = [-Q]$, et l'on définit alors les paramètres de Stokes I, Q, U et V tels que :

$$I = [+Q] + [-Q] \quad (7)$$

$$Q = [+Q] - [-Q] \quad (8)$$

$$U = [+U] - [-U] \quad (9)$$

$$V = I_R + I_L \quad (10)$$

où L et R désignent respectivement gauche et droite, en lien avec la polarisation circulaire. En posant q et u comme dans les équations (11) et (12) :

$$q = \frac{[+Q] + [-Q]}{2I_Q} = \frac{Q}{2I_Q} \quad (11)$$

et

$$u = \frac{[+U] + [-U]}{2I_U} = \frac{U}{2I_U} \quad (12)$$

avec I_Q et I_U étant les intensités liées respectivement à Q et à U, on définit par la suite dans l'équation (13) l'intensité :

$$I = \frac{I_Q + I_U}{2} \quad (13)$$

les degrés de polarisation circulaire et linéaire sont donnés respectivement par les équations (14) et (15):

$$p_c = \frac{V}{I} \quad (14)$$

$$p_L = \sqrt{q^2 + u^2} \quad (15)$$

l'angle de polarisation est évalué par l'équation (16) :

$$\theta = \arctan\left(\frac{q}{u}\right) \quad (16)$$

I RÉSULTATS

III.1 Les résultats DUSTY

Les spectres infrarouges IRAS de nos trois étoiles nous ont permis de construire des modèles de distribution spectrales d'énergie (SED) grâce au code de transfert radiatif DUSTY, et d'estimer ainsi les valeurs de certains paramètres tels que, la température effective, la profondeur optique, et le taux de perte de masse. Les paramètres d'entrée que nous avons fournis à DUSTY et qui nous ont permis d'obtenir les modèles de SED sont consignés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Paramètres d'entrée et de sortie (en rouge et gras) de DUSTY

HIP	Nom SIMBAD	Teff(K)	Ti(K)	tau	Comp. chim	FI(W/m²)	rI(cm)	Td[Y](K)	M(M_o.an⁻¹)

8837	Psi_Phe	2800	1500	0,9	AmC-Hn	$2,25 \times 10^5$	$1,17 \times 10^{14}$	43	$8,94 \times 10^{-7} \pm 2,68 \times 10^{-7}$
9347	Ups_Cet	3450	650	0,01	AmC-Hn	$2,43 \times 10^3$	$1,12 \times 10^{15}$	22	$3,80 \times 10^{-8} \pm 1,14 \times 10^{-8}$
99082	V1943_Sgr	2750	380	0,005	AmC-Hn (70%) et grf-DL(30%)	$1,88 \times 10^2$	$4,03 \times 10^{15}$	14	$3,331 \times 10^{-7} \pm 2,68 \times 10^{-7}$

III.2 Les résultats SPHERE

Les cartes d'intensité polarisée des trois étoiles et de HD 19887. Grâce aux données réduites de SPHERE et à l'aide d'un code python que nous avons écrit, nous avons pu obtenir la Figure 3 qui correspond aux cartes de flux polarisé que nous avons réalisé pour chacune des trois

étoiles. Sur ces cartes de flux, nous observons l'étendue de poussière formant une enveloppe autour de l'étoile centrale et qui se traduit par une atténuation du flux. La poussière est ainsi localisée grâce à la lumière polarisée

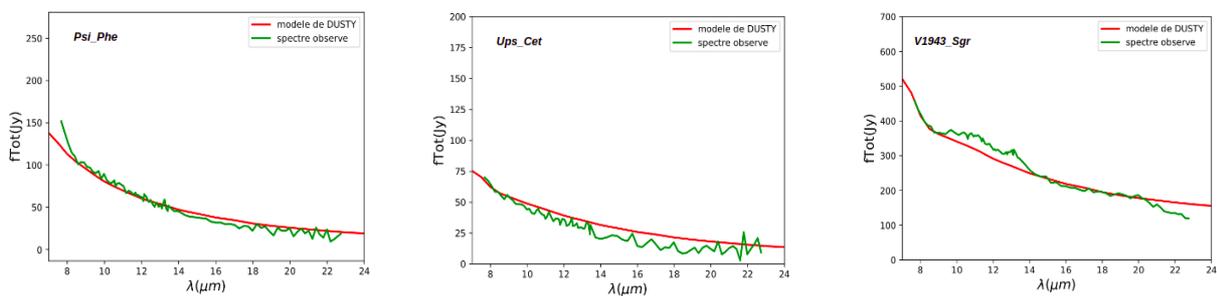


Figure 2 : La SED du spectre infrarouge de Psi_Phe à gauche de Ups_Cet au centre et de V1943_Sgr à droite

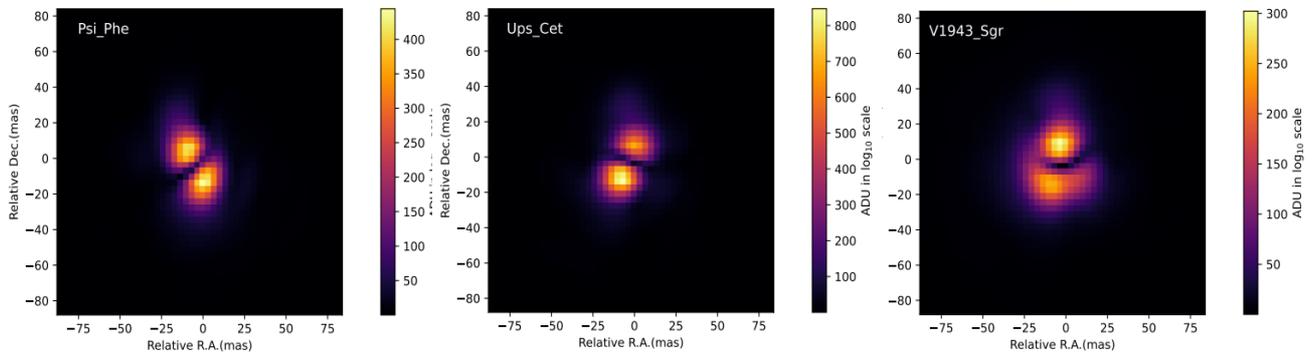


Figure 3 : Cartes d'intensités polarisées des cibles : de gauche à droite Psi_Phe, Ups_Cet et V1943_Sgr

➤ Estimation des propriétés des enveloppes

Nous avons estimé le diamètre de l'enveloppe de poussière pour chaque étoile par projection sur les axes gradués d'un repère orthonormé. Puis en faisant multiplier le résultat par le *plate scale* de ZIMPOL qui vaut $6,8 \text{ mas/pixel}$ et, au moyen des relations (17) et (18),

$$\alpha(\text{arcsec}) = \frac{d(U.A)}{D(\text{parsec})} \quad (17)$$

$$\Rightarrow d(U.A) = \alpha(\text{arcsec}) \times D(\text{parsec}) \quad (18)$$

nous avons obtenu le *tableau 2*.

Tableau 2 : Tailles estimées des enveloppes de poussière

HIP	Nom SIMBAD	D(parsec)	α (arcsec)	d(U.A)
8837	Psi_Phe	$104,82 \pm$	$0,20 \pm$	$20,97 \pm$

		$1,99 \times 10^{-2}$	$1,75 \times 10^{-3}$	$6,01 \times 10^{-1}$
9347	Ups_Cet	$89,76 \pm$	$0,24 \pm$	$21,54 \pm$
		$1,62 \times 10^{-2}$	$1,75 \times 10^{-3}$	$5,06 \times 10^{-1}$
99082	V1943_Sgr	$197,24 \pm$	$0,04 \pm$	$7,89 \pm$
		$11,83 \times 10^{-2}$	$1,75 \times 10^{-3}$	$1,29$

VI. DISCUSSIONS

➤ Comparaison des résultats spectroscopiques

Le spectre de Psi_Phe ne présente aucune signature en silicate et le modèle obtenu stipule une composition circumstellaire riche en carbone. Nous pensons que l'excès du spectre observé qui ne concorde pas avec le modèle autour $8\mu\text{m}$ pourrait être dû à un

spectre finissant avec une incertitude importante, ce qui explique que les valeurs de la température et du taux de perte de masse calculées par le code ne concordent pas avec celles trouvées dans la littérature.

Pour ce qui est de Ups_Cet, le spectre de cette étoile présente un léger pic autour de $8 \mu\text{m}$, caractérisant une prédominance en carbone dans l'enveloppe circumstellaire. Cette observation est corroborée par le modèle DUSTY de l'étoile qui présente des signatures carbone. Par ailleurs, les pics au-delà de $18 \mu\text{m}$ restent à explorer. Nous n'avons pas trouvé de valeur dans la littérature faisant allusion au taux de perte de masse de l'étoile. Toutefois, la valeur de la température trouvée est assez proche de celle calculée par DUSTY.

Quant à V1943_Sgr, les résultats obtenus sont dans le même ordre de grandeur et confirment notre modèle. L'écart entre les valeurs du taux de perte de masse est acceptable car le calcul de DUSTY s'accompagne d'une erreur de 30% [15]. Les valeurs de la température sont assez concordantes.

Le tableau 3 fait la comparaison entre les valeurs du modèle DUSTY et celles rencontrées dans la littérature.

Tableau 3 : Comparaison des valeurs des paramètres

HIP	¹ Nom SIMBAD	T _{litt} (K)	T _{dusty} (K)	M _{litt} (M _☉ .an ⁻¹)	M _{dusty} (M _☉ .an ⁻¹)
8837	P si_P he	3415 ± 87^a	2800	8.10^{-8c}	$8,9410^{-7} \pm 2,68 \times 10^{-7}$
9347	U ps_Cet	3417^b	3450	0	$3,8010^{-8} \pm 1,14 \times 10^{-8}$
99082	V1943_Sgr	2752^b	2750	9.910^{-8d}	$3,3310^{-8} \pm 9,99 \times 10^{-9}$

^a[6], ^b[9], ^c[7], ^d[12]

➤

CONCLUSION

Ce travail qui a constitué en l'étude de la perte de masse des étoiles évoluées, a été réalisé en utilisant les observations obtenues récemment au moyen de l'instrument ZIMPOL de SPHERE, et celles d'anciennes observations réalisées par le satellite IRAS au début des années quatre-vingt, sur les trois étoiles que sont Psi_Phe, Ups_Cet et V1943_Sgr. Les valeurs $8,94 \times 10^{-7} \pm 2,68 \times 10^{-7} M_{\odot} .an^{-1}$; $3,80 \times 10^{-8} \pm 1,14 \times 10^{-8} M_{\odot} .an^{-1}$ et $3,33 \times 10^{-8} \pm 9,99 \times 10^{-9} M_{\odot} .an^{-1}$ du taux de perte de masse calculées pour respectivement Psi_Phe, Ups_Cet et V1943_Sgr, restent dans la fourchette de $10^{-8} M_{\odot} .an^{-1}$ à $10^{-4} M_{\odot} .an^{-1}$ connue de taux de perte masse des étoiles de la branche asymptotique des géantes. De même, les températures $2800 K$, $3450 K$ et $2750 K$ de DUSTY respectivement trouvées pour les trois étoiles sont comprises entre $2000K$ et $3000K$, gamme de

➤ Discussion des résultats photométriques

Sur les cartes de flux polarisé, on peut voir l'extension de la poussière autour de l'étoile centrale. Cette étendue de la poussière qui est caractérisée par une lumière polarisée autour de l'étoile s'explique par la propriété qu'ont les grains de poussière de se comporter en polariseur et de contraindre la lumière qui tombe sur eux à suivre une direction donnée : c'est la polarisation par la poussière, de la lumière de l'étoile qui, au moment de l'émission, n'était pas polarisée. Grâce au polarimètre ZIMPOL, il est donc mis en évidence autour de nos étoiles une étendue de poussière constituant leur enveloppe circumstellaire.

Les valeurs consignées dans le tableau 2 qui correspondent aux propriétés de ces enveloppes circumstellaires, n'ont pas de correspondance dans la littérature, car n'ayant pas auparavant été déterminées. Elles nous donnent toutefois d'assez bonnes estimations des propriétés physiques des enveloppes des étoiles étudiées. Nous retenons que les cartes de flux nous permettent de voir la poussière autour de nos étoiles, confirmant ainsi leur nature d'étoiles AGB.

température des étoiles AGB. La polarimétrie réalisée grâce à ZIMPOL nous a permis de construire les cartes de flux polarisé des trois étoiles, qui ont confirmé la présence de poussière autour d'elles. L'existence de poussière autour des étoiles corrobore également la perte de leur masse. Toutefois, à cause de la dispersion significative observée sur les valeurs de taux de perte de masse calculée par DUSTY, et que nous imputons à la qualité du spectre extrait du catalogue IRAS, le moyen de détermination de ce taux de perte de masse n'a pas pu être amélioré dans cette étude.

Bibliographie

- [1] A. Maeder, « Stellar yields as a function of initial metallicity and mass limit for black hole formation », *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 264, no. 1, p. 105-120., 1992.

¹ Base de données (de base) astronomiques

- [2] J.-L. Beuzit *et al.*, « SPHERE: the exoplanet imager for the Very Large Telescope », *Astron. Astrophys.*, vol. 631, p. A155, nov. 2019, doi: 10.1051/0004-6361/201935251.
- [3] C. Yeşilyaprak et Z. Aslan, « Period-luminosity relation for M-type semiregular variables from *Hipparcos* parallaxes », *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 355, n° 2, p. 601-607, déc. 2004, doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08344.x.
- [4] P. C. Keenan et R. C. McNeil, « The Perkins catalog of revised MK types for the cooler stars », *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, vol. 71, p. 245, oct. 1989, doi: 10.1086/191373.
- [5] H. C. Woodruff *et al.*, « Interferometric observations of the Mira star o Ceti with the VLT/VINCI instrument in the near-infrared », USA, oct. 2004, p. 1707. doi: 10.1117/12.551245.
- [6] H. R. Neilson et J. B. Lester, « Determining parameters of cool giant stars by modeling spectrophotometric and interferometric observations using the SATLAS program », *Astron. Astrophys.*, vol. 490, n° 2, p. 807-810, nov. 2008, doi: 10.1051/0004-6361:200810627.
- [7] W. Hagen, « Circumstellar gas and dust shells of M giants and supergiants », *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, vol. 38, p. 1, sept. 1978, doi: 10.1086/190542.
- [8] C. B. Stephenson, « A study of visual binaries having primaries above the main sequence. », *Astron. J.*, vol. 65, p. 60, mars 1960, doi: 10.1086/108191.
- [9] I. McDonald, A. A. Zijlstra, et R. A. Watson, « Fundamental parameters and infrared excesses of Tycho–Gaia stars », *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 471, n° 1, p. 770-791, oct. 2017, doi: 10.1093/mnras/stx1433.
- [10] H. Olofsson, D. González Delgado, F. Kerschbaum, et F. L. Schöier, « Mass loss rates of a sample of irregular and semiregular M-type AGB-variables », *Astron. Astrophys.*, vol. 391, n° 3, p. 1053-1067, sept. 2002, doi: 10.1051/0004-6361:20020841.
- [11] A. M. Heras et S. Hony, « Oxygen-rich AGB stars with optically thin dustenvelopes », *Astron. Astrophys.*, vol. 439, n° 1, p. 171-182, août 2005, doi: 10.1051/0004-6361:20042296.
- [12] T. Danilovich *et al.*, « New observations and models of circumstellar CO line emission of AGB stars in the *Herschel* SUCCESS programme », *Astron. Astrophys.*, vol. 581, p. A60, sept. 2015, doi: 10.1051/0004-6361/201526705.
- [13] A.-L. Maire *et al.*, « VLT/SPHERE astrometric confirmation and orbital analysis of the brown dwarf companion HR 2562 B », *Astron. Astrophys.*, vol. 615, p. A177, juill. 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201732476.
- [14] P. Delorme *et al.*, « The SPHERE data center: a reference for high contrast imaging processing », *ArXiv171206948 Astro-Ph*, déc. 2017, Consulté le: déc. 03, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/1712.06948>
- [15] Z. Ivezić, M. Nenkova, et M. Elitzur, « User Manual for DUSTY », *ArXivastro-Ph9910475*, oct. 1999, Consulté le: déc. 09, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9910475>
- [16] C. W. Engelke, « Analytic approximations to the 2-60 microns infrared continua for standard calibration stars - With application to the calibration of spectroscopy and photometry, and the determination of effective temperature and angular size from IR measurements », *Astron. J.*, vol. 104, p. 1248, sept. 1992, doi: 10.1086/116314.
- [17] M. Marengo, M. Busso, G. Silvestro, P. Persi, et P. O. Lagage, « Mid-infrared colors as a diagnostic tool of circumstellar envelopes in AGB stars? », *Astron. Astrophys.* 348, 501–511 (1999), 1999.
- [18] M. Nicolle, « Ground layer correction for very large telescopes: performance of multi-object wave-front sensing concepts. », *SF2A-2005: Semaine de l'Astrophysique Française, meeting held in Strasbourg, France, June 27 - July 1, 2005, Edited by F. Casoli, T. Contini, J.M. Hameury and L. Pagani. Published by EdP-Sciences, Conference Series, 2005, p. 235, 2005.*
- [19] H. M. Schmid *et al.*, « SPHERE / ZIMPOL high resolution polarimetric imager. I. System overview, PSF parameters, coronagraphy, and polarimetry », *Astron. Astrophys.*, vol. 619, p. A9, nov. 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201833620.
- [20] P. Kervella, M. Montargès, et E. Lagadec, « The nearby AGB star L2 Puppis: the birth of a planetary nebula ? », *EAS Publ. Ser.*, vol. 71-72, p. 211-216, 2015, doi: 10.1051/eas/1571048.
- [21] A. Bazzon, « Polarimetry of Planets in the solar system and beyond », ETH Zurich, 2013. doi: 10.3929/ETHZ-A-010087118.