

POLARIS, UNE CÉPHÉIDE PARTICULIÈRE AU CŒUR D'UN SYSTÈME STELLAIRE TRIPLE

Polaris, a Special Cepheid at the Heart of a Triple Star System

Daniel Bonneau

Astronome honoraire à l'observatoire de la Côte d'Azur, collaborateur bénévole du Laboratoire Lagrange.
Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, France..



Résumé

Le système triple Polaris, est constitué d'une étoile double visuelle (Polaris A, B ; STF 93 AB), dont la composante brillante est elle-même une binaire spectroscopique (Polaris Aa, Ab ; WRH 39 Aa, Ab) dont la composante primaire, une étoile variable, est la plus brillante et la plus proche des Céphéides.

Dans cet article, sont évoquées les étapes qui ont conduit, au moyen d'observations astrométriques et à haute résolution angulaire, à résoudre la binaire spectroscopique comme une binaire visuelle mais également à résoudre et imager le disque de l'étoile Céphéide (Polaris Aa).

Si ces observations ont permis une meilleure caractérisation des propriétés astrophysiques de ses composantes, il n'en demeure pas moins qu'un certain mystère règne encore autour de la compréhension du système stellaire triple Polaris et de sa composante Céphéide.

Abstract

The Polaris triple system is formed by a visual double star (Polaris A, B; STF 93 AB), whose bright component is itself a spectroscopic binary (Polaris Aa, Ab; WRH 39 Aa, Ab) whose primary component is a variable star, the brightest and closest of the Cepheids.

In this paper, we present the steps taken to resolve the spectroscopic binary as a visual binary, and to resolve and image the disk of the star Cepheid (Polaris Aa), using astrometric and high angular resolution observations.

Although this has allowed for a better characterization of the astrophysical properties of its components, some mystery remains around the understanding of the triple Polaris stellar system and its Cepheid component.

Keywords : (stars:) binaries (including multiple): - (stars:) cepheids – (stars individual): Polaris – instrumentation: high angular resolution



1 Introduction

Polaris, est une étoile brillante (α UMi, $m_v = 2,0$) connue depuis longtemps comme une étoile double visuelle écartée très contrastée ($\Delta m_v \approx 6$ mag) dont la composante brillante est elle-même une binaire spectroscopique dont la composante primaire est une étoile variable de type Céphéide.

Suite à la découverte, en 1908, de la relation Période – Luminosité des étoiles Céphéides par Henrietta Swan Leavitt, ces étoiles sont devenues des étalons pour la détermination des distances galactiques et extragalactiques. Polaris étant la plus brillante de ces étoiles, sa caractérisation est importante pour la calibration de la relation Période – Luminosité, mais également dans le cadre de l'étude de la phase d'évolution stellaire particulière des Céphéides. Une étape incontournable de cette caractérisation est la détermination de la distance et de la masse de Polaris.

Alors que le statut d'étoile binaire est accepté pour le couple visuel Polaris A, B (Partie 2), nous verrons que Polaris a maintenant acquis le statut de système triple par la détermination de l'orbite spectroscopique de la composante Polaris Aa du couple serré Polaris Aa, Ab (Partie 3).

La détermination de l'orbite astrométrique de Polaris Aa sera évoquée (Partie 4), mais ce sont surtout les observations à haute résolution angulaire par imagerie avec le Hubble Space Telescope (HST), par interférométrie optique avec le réseau CHARA puis par interférométrie des tavelures (Partie 5 et Partie

6), qui ont permis de résoudre le couple Polaris Aa, Ab ainsi que le disque stellaire de la Céphéide Polaris Aa. Ces observations ont permis la détermination de l'orbite visuelle du couple Polaris Aa, Ab (Partie 7).

La distance de Polaris A et B ayant été mesurée au moyen d'Hipparcos et Gaia, les masses stellaires de Polaris Aa et Ab ont pu être déterminées à partir des orbites spectroscopiques et visuelles et celle de la composante écartée Polaris B a été évaluée à partir des observations photométriques et spectroscopiques. L'analyse des caractéristiques astrophysiques de ces étoiles conduit à penser que Polaris est un système triple particulier autour duquel règne un certain mystère (Partie 8).

2 Polaris, étoile binaire visuelle

Durant la nuit du 17 août 1779, William Herschell découvre le compagnon visuel de Polaris (Herschell 1782, Figure 1).

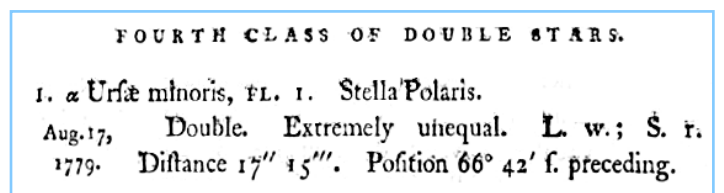


Figure 1 : Polaris résolue comme une étoile double écartée par William Herschell (1782).

Ce couple à très forte différence de magnitude (2,04 – 9,10) est repris dans le catalogue du WDS¹ (Mason B. D., et al. 2001) sous l'identification WDS 02318+8916 AB et le nom STF 93 AB. Les 65 observations faites depuis sa découverte, ne montrent qu'un faible déplacement relatif.

2.1 Les étoiles Polaris A et Polaris B forment-elles un couple physique ?

La parallaxe et le mouvement propre de Polaris A ont été mesurés par Hipparcos (van Leeuwen 2007), mais Polaris B n'a pas pu être observée en raison de sa trop grande magnitude. Par contre, Polaris A est trop brillante pour être observée par Gaia (Gaia Collaboration et al. 2023) qui a mesuré la parallaxe et le mouvement propre de Polaris B. Ces mesures, extraites de Simbad au CDS², sont données dans la Table 1.

La similitude des valeurs de ces paramètres justifie que le couple visuel Polaris A, B = STF 93 AB soit noté à mouvement propre commun dans le catalogue WDS et constitue donc très probablement un couple physique.

Il faut noter que les études les plus récentes adoptent la distance de Polaris B mesurée par Gaia comme distance de la Céphéide Polaris Aa.

Les caractéristiques de Polaris B, déduites de l'analyse de son spectre à haute résolution au moyen d'un modèle d'atmosphère stellaire (Usenko & Klochkova 2008) sont données dans la Table 6 (Partie 8).

3 Polaris, binaire spectroscopique

Dès 1852, la composante primaire de l'étoile double Polaris est notée comme étoile variable de faible amplitude puis identifiée comme une étoile de type Céphéide avec une période de pulsation de 3,9681 j et d'amplitude $\Delta m = 0,171 \pm 0,012$ mag (Hertzsprung, 1911).

William Wallace Campbell découvre en 1899 la variation de la vitesse radiale (VR) de Polaris avec une période de 3j 23h 15 mn ou 3,96875 j (Campbell 1899).

En 1927, en analysant les 700 spectrogrammes de Polaris obtenus depuis 1896 à l'Observatoire de Lick, Joseph Haines Moore confirme la présence d'une variation lente de la VR moyenne de la courbe de VR à courte période attribuée à la

¹ <http://www.astro.gsu.edu/wds/>

² <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

pulsation de l'étoile Céphéide. Il interprète cette variation comme l'effet du mouvement de la Céphéide autour du centre de masse d'un système double induit par la présence d'un compagnon. Les VR orbitales obtenues par correction des mesures de VR de l'effet de la pulsation, lui permettent de publier une première orbite de période de 29,6 ans. L'étoile Polaris A est reconnue comme binaire spectroscopique à raies simples (SB1) (Moore 1936).

L'accumulation des mesures de VR ainsi que l'accroissement de leur précision conduiront à l'amélioration progressive de la détermination des éléments de cette orbite spectroscopique qui se traduira par la publication d'une dizaine d'orbites entre 1929 et 2021, dont trois, celles de J. H. Moore (1929), Elizabeth Roemer (1965) et Karl Walter Kamper (1996), sont retenues dans le 9^{ème} Catalogue d'Orbites de Binaires Spectroscopiques (SB9)³ dans lequel Polaris est le système n° 76.

Guillermo Torres (Torres 2023), utilisant 3727 mesures de vitesse radiale publiées entre 1892 et 2020, publie une nouvelle orbite de Polaris Aa. L'ajustement de la courbe des VRs calculées avec cette orbite sur les VRs orbitales mesurées durant 130 ans est montré dans la Figure 2 et les éléments orbitaux sont donnés dans la Table 2.

Cette orbite spectroscopique semble pouvoir être considérée comme définitive (Evans et al. 2024).

Il faut noter qu'une orbite spectroscopique SB1 ne permet pas d'obtenir directement les masses stellaires des composantes. On peut seulement calculer :

- la fonction de masse :

$$f(M) = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = 3,783 \cdot 10^{-5} PK_1^3 (\sqrt{1 - e^2})^3$$

³ <https://sb9.astro.ulb.ac.be/>

Table 1. Mouvements propres et parallaxes de Polaris A et Polaris B.

	Polaris A	Polaris B
Identifiant	HIP 11767	Gaia DR3 576402619921510144
μ_α [mas/an]	44,48 ± 0,11	41,961 ± 0,024
μ_δ [mas/an]	-11,85 ± 0,13	-13,562 ± 0,021
ϖ [mas]	7,54 ± 0,11	7,2869 ± 0,0178

Table 2. Valeurs des éléments de l'orbite spectroscopique de Polaris Aa (Torres 2023).

P [an]	T ₀ [ans]	e	ω [°]	K _{Aa} [km/s]	γ [km/s]
29,4330 ± 0,0079	2016,801 ± 0,011	0,6195 ± 0,0015	302,04 ± 0,34	3,7409 ± 0,0075	-16,084 ± 0,025

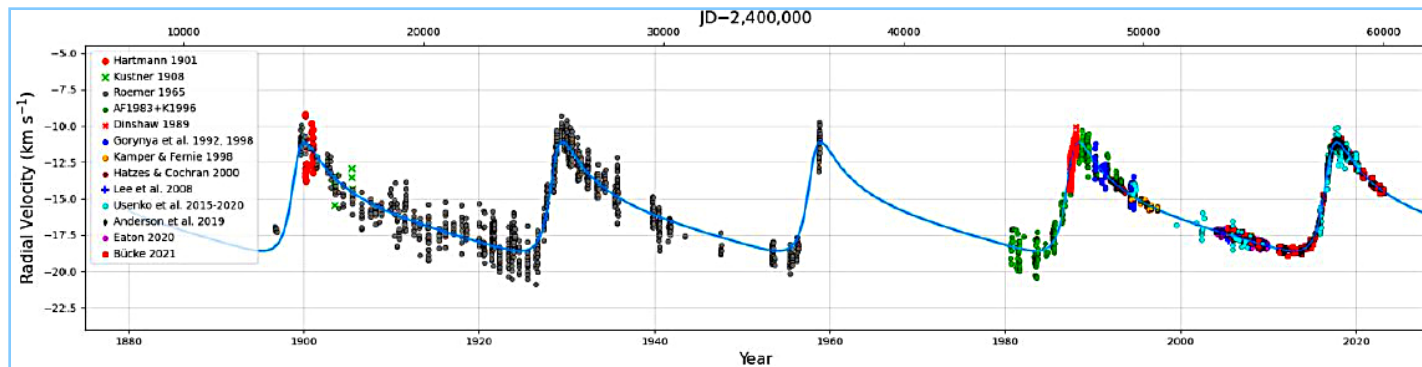


Figure 2. Ajustement sur les mesures de vitesse radiale orbitale de Polaris Aa de la courbe calculée avec la nouvelle orbite. L'accroissement au cours du temps de la précision des mesures de vitesse radiale se traduit par la diminution de la dispersion des mesures autour de la courbe. D'après la figure 2 de l'article de Torres (2023).

- la valeur du demi grand-axe de l'orbite de la composante autour du centre de masse du système binaire, en km avec K, en km/s et P en ans.

$$a_1 \sin i = 5,02255 \cdot 10^6 K_1 P \sqrt{(1 - e^2)}$$

Dans le cas de Polaris Aa, Ab, avec l'orbite de Torres (2023) on trouve :

$$a_{Aa} \sin i = 434,1 \pm 1,1 \cdot 10^6 \text{ km et } f(M) = 0,0282 \pm 0,0002 M_{\odot}.$$

Pour pouvoir obtenir les masses stellaires individuelles, il faut connaître la valeur de l'inclinaison du plan orbital qui peut être obtenue à partir de la connaissance des orbites astrométrique ou visuelle de la binaire.

4 Polaris, binaire astrométrique

La nature binaire de Polaris A doit avoir pour conséquence une perturbation périodique du mouvement propre obtenu en mesurant les positions de l'étoile en fonction du temps.

Effectivement, en 1936, Petrovich Gerasimovich détecte une oscillation de la position de Polaris A avec une période de 30 ans en analysant les mesures de position (α , δ) de Polaris à partir d'observations astrométriques faites dans les observatoires de Poulkovo (URSS), Washington (E-U) et Greenwich (G-B) (Gerasimovich 1936). De période identique à celle de l'orbite spectroscopique publiée par Moore, cette oscillation lui permet de déduire les éléments d'une orbite astrométrique préliminaire pour la composante brillante Polaris Aa autour du centre de masse du système binaire :

- **demi grand-axe, $a_{Aa}'' = 0,11''$,**
- **inclinaison $i = 63^\circ$**
- **longitude du nœud ascendant $\Omega = 147^\circ$.**

Une soixantaine d'années plus tard, le lancement de la mission d'astrométrie spatiale Hipparcos a permis la détermination d'une nouvelle orbite du photocentre de α UMi Aa, Ab autour du centre de masse du couple. (Wielen et al. 2000).

La méthode employée repose sur le fait que le mouvement propre de Polaris donné dans le catalogue FK5 (μ_{FK5}) est une moyenne sur un grand nombre de cycles orbitaux de la binaire et représente donc le mouvement propre du centre de masse du couple Polaris Aa, Ab. Par contre, le mouvement propre mesuré par Hipparcos (μ_{HIP}) peut être considéré comme une mesure instantanée, à la date $\approx 1991,3$, de la combinaison du mouvement propre du centre de masse de la paire Aa, Ab avec le mouvement orbital du photocentre autour du centre de masse. La différence des vecteurs μ_{FK5} et μ_{HIP} donne donc l'écart $\Delta\mu$ causé par le mouvement orbital du photocentre qui suit l'orbite astrométrique associée au couple Aa, Ab.

Les éléments de l'orbite spectroscopique [P_{Aa} , T_{or} , e , ω , $\alpha_{Aa} \sin i$] (Kamper 1996) ainsi que la distance mesurée par Hipparcos ($d = 132,6$ pc) sont adoptés pour déterminer les valeurs des paramètres α_{ph} , i , et Ω à partir de l'analyse de la différence $\Delta\mu$. Cependant, basée sur une seule date d'observation, cette analyse ne permet pas de distinguer le sens de déplacement d'une orbite prograde ou rétrograde et les valeurs de i et Ω sont entachées d'une ambiguïté de 180° (Table 3).

Cette ambiguïté sera levée 5 ans plus tard avec la résolution du couple Polaris Aa, Ab dans les images du HST (Evans et al. 2008) qui montrent un mouvement orbital rétrograde, comme le suggère Wielen et al.

Malheureusement, Polaris étant une étoile très brillante, elle n'est pas observable par Gaia, ce qui rend difficile l'obtention de mesures astrométriques précises pour la binaire Polaris Aa, Ab.

Table 3. Eléments de l'orbite astrométrique de Polaris Aa, Ab (Wielen et al. 2000)

	Orbite prograde	Orbite rétrograde
aph [mas]	28,56 ± 2,73	28,69 ± 2,75
i [°]	50,1 ± 4,8	130,2 ± 4,8
Ω [°]	276,2 ± 9,5	167,1 ± 9,4

5 Polaris, binaire spectroscopique résolue

Résoudre comme binaire visuelle une binaire spectroscopique SB1 dont on connaît la distance permet de calculer les masses dynamiques de ses composantes.

En considérant P (ans) la période orbitale, a (mas) le demi grand-axe et la parallaxe ϖ (mas)

La masse totale du système est donnée par la 3ème loi de Kepler :

$$M_T = \frac{a^3}{P_{orb}^2 \varpi^3} = M_1 + M_2$$

Si la binaire visuelle est également une binaire spectroscopique SB1, avec une excentricité orbitale e et une amplitude de variation de la vitesse radiale de K_1 (km/s), la masse de la composante secondaire est donnée par la relation :

$$M_2 = \frac{0,03357 a^2 K_1 \sqrt{1-e^2}}{\varpi^2 P_{orb} \sin i}$$

avec une masse de la composante primaire comme :

$$M_1 = M_T - M_2.$$

1937, la première résolution de Polaris Aa, Ab ?

En 1937, Raymond Hiram Wilson Jr. annonce avoir résolu Polaris avec une séparation de $0,2''$ au voisinage du pouvoir de résolution de son instrument et une différence de magnitude estimée de 2 mag (Wilson 1937). En 1941, il publie l'ensemble de ses observations fournissant 6 mesures en 1937 et 4 mesures en 1939 (Wilson 1941). Il est noté que si la duplicité de Polaris ne fait pas de doute, ces mesures sont incertaines car parfois en dessous du pouvoir de résolution de l'instrument.

Dans le catalogue WDS ce couple est répertorié avec l'identification WDS 02318+8916 Aa,Bb et le nom WRH 39 et l'on ne dénombre que 14 mesures entre 1937 et 2014.

Pendant 60 ans, les tentatives de résoudre à nouveau Polaris Aa,Ab, ont échoué.

Il convient de noter les écarts très importants des mesures de Wilson par rapport aux positions prédites pour 1937 et 1939 par l'orbite visuelle publiée dans le *Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars*⁴, faisant planer un doute sur la réalité de ces observations, sachant que la différence de magnitude de Polaris Aa, Ab est au-delà des performances de l'interféromètre oculaire dans ce domaine.

5.1 Le Hubble Space Telescope résout Polaris Aa, Ab.

Le compagnon faible de Polaris a été détecté, avec une séparation de $0,17''$, dans les images obtenues le 2 août 2005 (Figure 3) puis le 16 août 2006 avec le canal haute résolution (échantillonnage 26 mas/pixel) de la caméra ACS (Advanced Camera for Surveys) installée au foyer du Hubble Space Telescope (HST) à la longueur d'onde $\lambda \approx 2255 \text{ \AA}$ (résolution angulaire $\lambda/D \approx 20$ mas) (Evans et al.2008).

La combinaison des deux mesures du HST avec l'orbite spectroscopique de Kamper (1996) et l'orbite astrométrique de Wielen et al. (2000) fournit une première orbite visuelle pour

Polaris Aa, Ab. Les deux observations du HST confirment le sens rétrograde du mouvement orbital de Polaris Aa, Ab suggéré par Wielen et al.

Le compagnon proche Polaris Ab paraît être une étoile de type spectral F6 V, dont la différence de magnitude dans l'UV $\Delta m_U = 5,4$ mag, donne dans le visible $\Delta m_V \approx 7,2$ mag, ce qui explique la difficulté à l'observer. Le compagnon écarté (18") de Polaris est bien visible dans les images du HST et les mesures astrométriques du HST combinées avec deux siècles de mesures archivées confirment que l'étoile Polaris B a un mouvement propre presque commun avec Polaris Aa, Ab avec laquelle il doit former un système à très longue période.

L'intensité de Polaris B dans l'UV est en accord avec celle d'une étoile de type spectral F3 V située à la même distance que Polaris

Aa, Ab.

L'orbite visuelle de Polaris Aa, Ab est améliorée grâce à de nouvelles observations faites avec le HST les 17 juillet 2007, 18 novembre 2009 et 26 juin 2014 (Evans et al. 2018).

Les images de Polaris A et Polaris B obtenues dans le proche UV ($\lambda \approx 2400 \text{ \AA}$) avec les caméras à grand champ (WFPC2 ; 46 mas/pixel et WFC3 ; 401 mas/pixel) du Hubble Space Telescope, ont permis de résoudre à nouveau la binaire Polaris Aa, Ab. Etant donné la faible séparation angulaire et la forte différence de magnitude des deux composantes, une technique de déconvolution par la fonction d'étalement de point (étoile de référence γ Cygne) a été utilisée pour obtenir la mesure astrométrique de la binaire Polaris Aa, Ab.

A partir de ces nouvelles mesures, l'orbite visuelle de période 29,59 ans a été améliorée, en adoptant les éléments P, T_0, e, ω_{Aa}

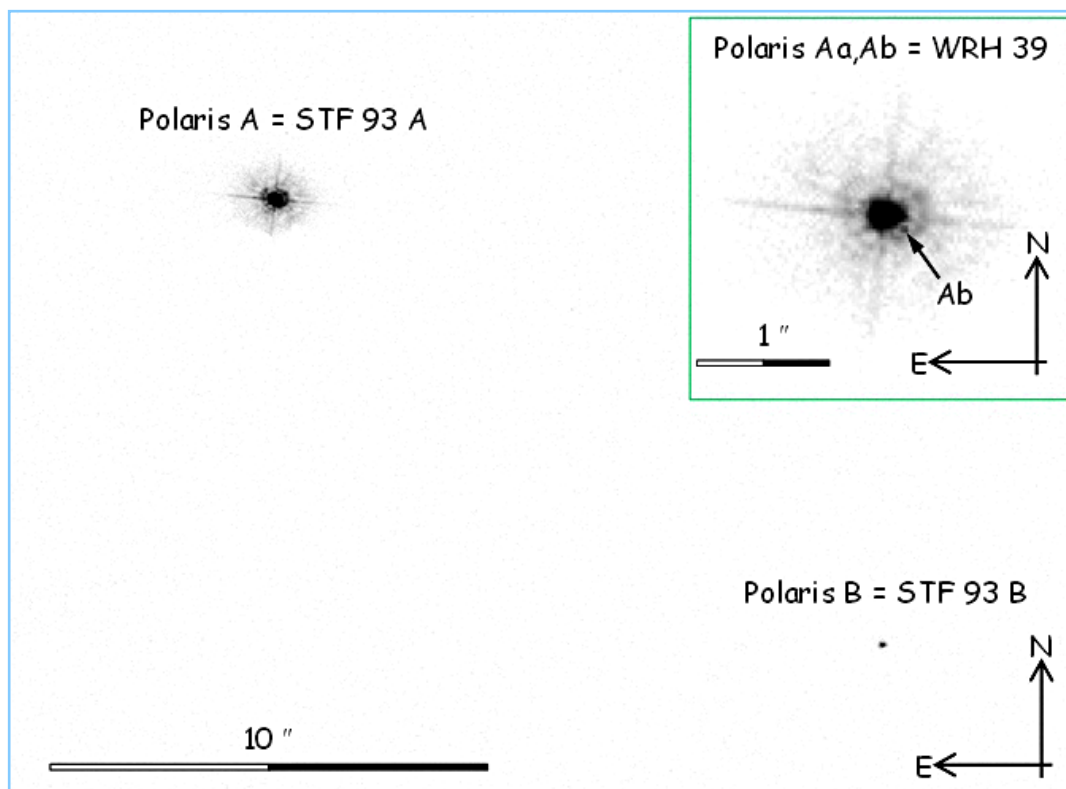


Figure 3 : Image du champ de Polaris A enregistrée le 2 août 2005 dans l'ultraviolet avec la caméra ACS du Hubble Space Telescope. Le compagnon éloigné, Polaris B, est visible et l'agrandissement de l'image de Polaris A révèle la présence du compagnon proche (Polaris Ab). D'après image originale Crédit : NASA/ESA, N. Evans (Harvard-Smithsonian CfA) et H. Bond (STScI).

de l'orbite spectroscopique de Kamper (1996).

Dans leurs conclusions, les auteurs, constatant que la résolution de Polaris Aa, Ab deviendra de plus en plus difficile dans les années à venir, annoncent que les observations seront poursuivies par interférométrie optique avec le réseau CHARA. Ces observations sont présentées dans la Partie 6.2.2.

5.2 Polaris Aa, Ab résolue par interférométrie des tavelures

L'observation de Polaris Aa, Ab a été faite durant la nuit du 19 au 20 octobre 2023 au foyer du télescope Astrophysical Research Consortium (ARC) de $D = 3,5$ m de l'observatoire d'Apache Point (APO) au Nouveau Mexique (E-U) (Evans et al. 2024).

L'instrument utilisé est le Differential Speckle Survey Instrument (DSSI) (Horch ; E.P. et al 2009) qui permet l'enregistrement simultané des images obtenues à travers deux filtres, dans le rouge ($\lambda = 692 \text{ nm}$) et le proche IR ($\lambda = 880 \text{ nm}$).

L'observation de Polaris est rendue difficile non seulement par la forte différence de magnitude des composantes mais

également par sa faible hauteur sur l'horizon ($\approx 32^\circ$) qui se traduit par une dispersion importante des tavelures produite par la dispersion atmosphérique. Cet effet est soigneusement corrigé lors du processus de déconvolution du spectre de puissance de Polaris par celui d'une étoile de référence. Cette observation a permis d'obtenir une mesure du couple Polaris Aa, Ab pour la date de 2023,7999, mais la différence de magnitude n'a pas pu être estimée en raison de la dispersion des images par la réfraction atmosphérique.

Les résultats publiés du couple Polaris Aa, Ab (angle de position θ ; séparation angulaire ρ et différence de magnitude Δm) sont présentés dans la Table 4.

6 Polaris, observée par interférométrie à grande base.

Polaris (Polaris Aa) étant à la fois la Céphéide la plus proche et la plus brillante, il n'est pas étonnant qu'elle ait été choisie comme cible pour des observations à haute résolution angulaire par interférométrie optique à grande base.

6.1 Résolution du disque stellaire et détection de l'enveloppe circumstellaire de Polaris Aa.

Polaris a été observée durant 11 nuits entre le 23 mai 2003 et le 19 mai 2005 au moyen du réseau interférométrique CHARA de l'Observatoire du Mont Wilson (Merand et al. 2006).

Le réseau CHARA⁵ est constitué de 6 télescopes ($D = 1$ m), formant un Y dont les bras sont orientés vers l'est (E1, E2), l'ouest (W1, W2) et le sud (S1, S2), avec des longueurs de base entre 34 m et 331 m (ten Brummelaar et al. 2005).

Les observations ont été faites dans la bande K' $\lambda[1,9 - 2,3]$ μm du proche IR avec l'Instrument FLUOR (Fiber Linked Unit for Optical Recombinaison), un recombinateur à deux faisceaux (Coudé du Foresto et al. 2003). Le choix des bases (S1-S2 $B = 33$ m ; E1-E2 $B = 66$ m ; W2-E2 $B = 156$ m ; W1-E2 $B = 251$ m) a été fait pour résoudre suffisamment l'étoile afin de

détecter l'assombrissement centre bord et détecter la présence éventuelle d'une enveloppe circumstellaire. La résolution angulaire atteignait $\lambda/2B \approx 0,87$ mas.

Les données interférométriques obtenues couvrent le premier et le second lobe de la fonction de visibilité $V^2(B)$. Trois modèles ont été ajustés aux observations :

- modèle stellaire hydrostatique de Claret (2000) ;
- modèle d'assombrissement en loi de puissance $I(\mu)/I(1) = \mu^\alpha$;
- modèle stellaire hydrostatique plus une 'enveloppe circumstellaire en anneau.

Le meilleur ajustement sur l'ensemble des données de V^2 est obtenu pour un disque stellaire assombri de diamètre $\theta_\star = 3,123 \pm 0,008$ mas et $\alpha = 0,16$ associé à un modèle d'enveloppe circumstellaire annulaire de rayon $R_e = 2,4 \pm 0,1 R_\star$ et un flux lumineux relatif de $F_e/F_\star = 1,5 \pm 0,4\%$ en bande K.

5 <http://www.chara.gsu.edu/>

Table 4. Mesures publiées du couple Polaris Aa, Ab

Date	θ (")	ρ (mas)	Δm (mag)	λ (nm)	Instr.	Réf.
2005,5866	231,4	172	5,38	$\sim 225,5$	HST-ACS	Evans et al. 2008
2006,6172	226,4	170	5,40	$\sim 225,5$	HST-ACS	Evans et al. 2008
2007,5402	223	180		~ 240	HST-WFC3	Evans et al. 2018
2009,8813	216	150		~ 240	HST-WFC3	Evans et al. 2018
2014,4856	175	85		~ 240	HST-WFC3	Evans et al. 2018
2016,6974	71,696	33,008	7,626	~ 1600	CHARA	Evans et al. 2024
2019,6683	340,239	75,537	7,856	~ 1600	CHARA	Evans et al. 2024
2021,2509	315,90	84,507	7,396	~ 1600	CHARA	Evans et al. 2024
2021,2539	315,787	84,447	7,887	~ 1600	CHARA	Evans et al. 2024
2021,2561	315,669	84,232	8,367	~ 1600	CHARA	Evans et al. 2024
2023,7999	286,7	98,8		~ 700	IT	Evans et al. 2024

IO = interféromètre oculaire et IT = interférométrie des tavelures

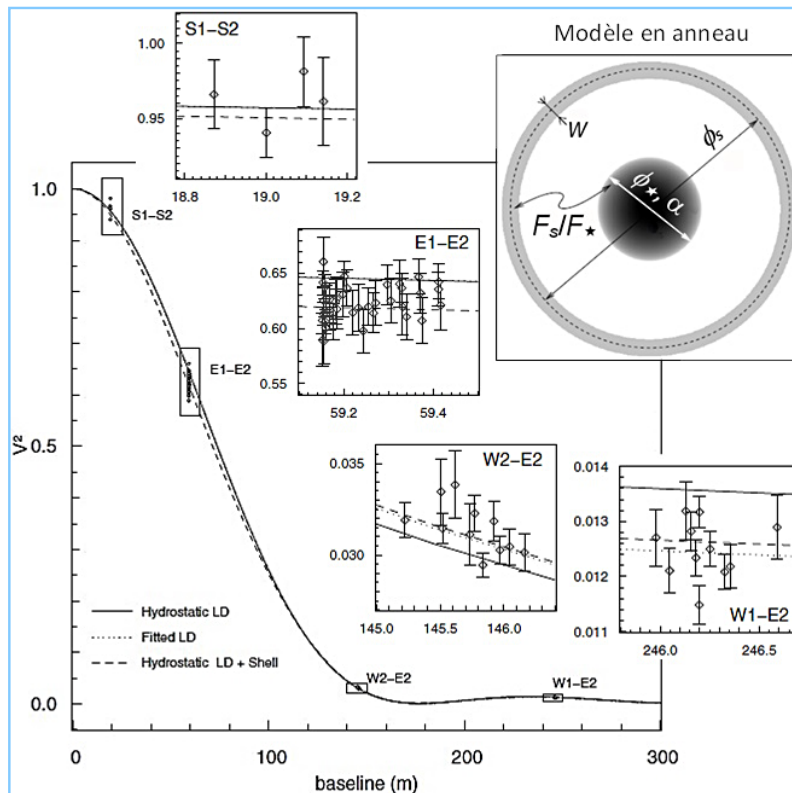


Figure 4 : Fonction de visibilité en fonction de la base $V^2(B)$ calculée avec différents modèles ajustés sur les mesures. Ligne continue : modèle hydrostatique de Claret (Claret, A. 2000, A&A, 363, 1081). Pointillée : modèle d'assombrissement centre bord en loi de puissance avec $I(\mu)/I(1) = \mu^\alpha$, avec $\alpha = 0,16$.

6.2 Image du disque de Polaris Aa et de la binaire Polaris Aa, Ab

Polaris a été observée durant 8 nuits entre le 12 septembre 2016 et le 4 avril 2021 au moyen du réseau interférométrique CHARA de l'Observatoire du Mont Wilson (Evans et al. 2024).

Les configurations de bases utilisées, W1E1E2W2, W1S2E1E2, E1W2W1E2 et E1W1S2E2, ont été choisies pour obtenir une assez bonne couverture du plan (u,v) des fréquences spatiales, propice à l'imagerie par synthèse d'ouverture optique.

Le recombineur de faisceaux MIRC et sa version améliorée MIRC-X (Michigan InfraRed Combiner-eXeter), ont été utilisés

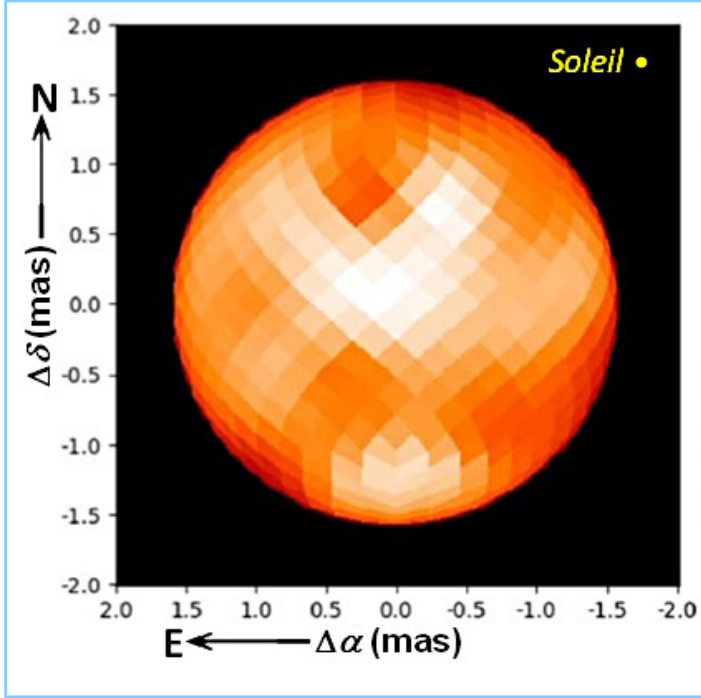


Figure 5 : Image du disque de Polaris Aa reconstruite avec SURFING à partir des observations interférométriques avec le réseau CHARA durant les nuits des 2,3 et 4 avril 2021. A la distance $d = 136,90$ pc le rayon stellaire de l'étoile Céphéide est $R_{Aa} = 46,27 \pm 0,42 R_{\odot}$. D'après la Figure 4 de Evans et al. (2024).

pour recombiner simultanément les faisceaux de 4 télescopes dans la bande H $\lambda[1,4 - 1,8]\mu\text{m}$ du proche IR, fournissant, pour chaque observation jusqu'à 6 mesures de la visibilité V^2 et 3 phases de clôture avec une résolution angulaire $\lambda/2B \approx 0,5$ mas à $\lambda = 1,6 \mu\text{m}$.

6.2.1 La première image du disque de la Céphéide Polaris Aa.

La courbe des visibilités V^2 mesurées est bien ajustée par la visibilité attendue pour un disque assombri, dont le diamètre $\theta_{LD} = 3,143 \pm 0,027$ mas est en accord avec celle obtenue par les observations interférométriques en bande K (Merand et al. 2006). A la distance mesurée par Gaia DR3 $d = 136,90 \pm 0,34$ pc le rayon stellaire moyen de l'étoile Céphéide Polaris Aa est donc $R_{Aa} = 46,27 \pm 0,42 R_{\odot}$.

Cependant, les valeurs de la phase de clôture, non nulles et différentes de 180° , suggèrent la présence d'une asymétrie sur la surface du disque de Polaris Aa. L'image du disque de Polaris a donc été reconstruite au moyen des logiciels dédiés.

En raison de la couverture limitée du plan (u,v) durant une observation (une configuration des télescopes), celle-ci est améliorée en mélangeant les observations faites avec des configurations différentes des télescopes durant trois nuits consécutives (2, 3 et 4 avril 2021), ce qui a permis d'obtenir avec

le logiciel SURFING et ROTIR, des images du disque de Polaris Aa, comme celle montrée sur la Figure 5.

De l'analyse critique des 4 images obtenues à partir des 8 nuits observations, il ressort que les taches observées sont probablement des motifs réels de la surface stellaire, dont la nature exacte reste à déterminer.

6.2.2 La binaire Polaris Aa, Ab est résolue.

Toutes les données d'une nuit (visibilités V^2 et phases de clôture) sont utilisées pour reconstruire une image de Polaris avec le logiciel SQUEEZE puis le compagnon est recherché en utilisant le logiciel IDL Binary Grid Search Procedure.

Le compagnon Polaris Ab est détecté durant 5 nuits (12 sept. 2016 ; 2 sept. 2019 ; 2, 3, 4 avril 2021), les autres nuits la non détection étant due à une mauvaise qualité des données (18 nov. 2018) ou à la présence du compagnon en dehors du champ interférométrique (27 août 2018 ; 9 avril 2019).

Il en a résulté la détermination des positions astrométriques relatives (ρ , θ) et ($\Delta\alpha$, $\Delta\delta$) et du rapport des flux f_{Ab}/f_{Aa} pour chacune des dates d'observation.

Avec une différence de magnitude moyenne de $\Delta H = 7,8 \pm 0,4$ mag, la détection de Polaris Ab constitue un exploit, confirmé au moyen du logiciel CANDID d'analyse et non-détection d'un compagnon dans les données interférométriques.

7 Une nouvelle orbite pour Polaris Aa, Ab

Suite à la résolution de Polaris par interférométrie optique à longue base, une nouvelle orbite est obtenue pour Polaris Aa, Ab en combinant les données spectroscopiques (mesures de vitesse radiale) et astrométriques (positions relatives) disponibles (Evans et al. 2024).

Les données spectroscopiques consistent en 3675 mesures de vitesse radiale orbitale (la vitesse radiale de pulsation a été enlevée aux mesures brutes utilisées), couvrant entre 1900 et 2023 plus de quatre cycles orbitaux de 30 ans de Polaris Aa, Ab.

Les données astrométriques donnent 11 positions de la composante Polaris Ab autour de Polaris Aa, réparties sur 18 ans, soit à peine plus de la moitié d'un cycle orbital : 5 positions mesurées à partir des images du HST entre 2005 et 2014, 5 positions déduites des observations interférométriques à longue base entre 2016 et 2021 et 1 mesure de 2023 obtenue par interférométrie des tavelures.

Une solution orbitale, à partir de l'analyse simultanée des données spectroscopiques et astrométriques, a été recherchée après le choix d'un formalisme analytique adapté en raison de la forte excentricité orbitale et le test de trois méthodes de pondération des données dont les détails sont donnés dans l'article (Evans et al. 2024). Les trois méthodes de pondération donnent des résultats similaires, mais les auteurs préfèrent adopter la solution donnant un poids plus grand aux mesures astrométriques et dont les valeurs des paramètres sont données

Table 5. Valeurs des paramètres de l'orbite de Polaris Aa, Ab d'après la table 5 de Evans et al. (2024).

P_{orb} [an]	$29,416 \pm 0,028$
T_0 [année julienne]	$2016,831 \pm 0,044$
e	$0,6354 \pm 0,0066$
ω_{Aa} [°]	$304,54 \pm 0,84$
K_{Aa} [km/s]	$3,762 \pm 0,025$
γ [km/s]	$-16,1024 \pm 0,0084$
Ω [°]	$201,28 \pm 1,18$
i [°]	$127,57 \pm 1,21$
a [mas]	$129,55 \pm 2,05$

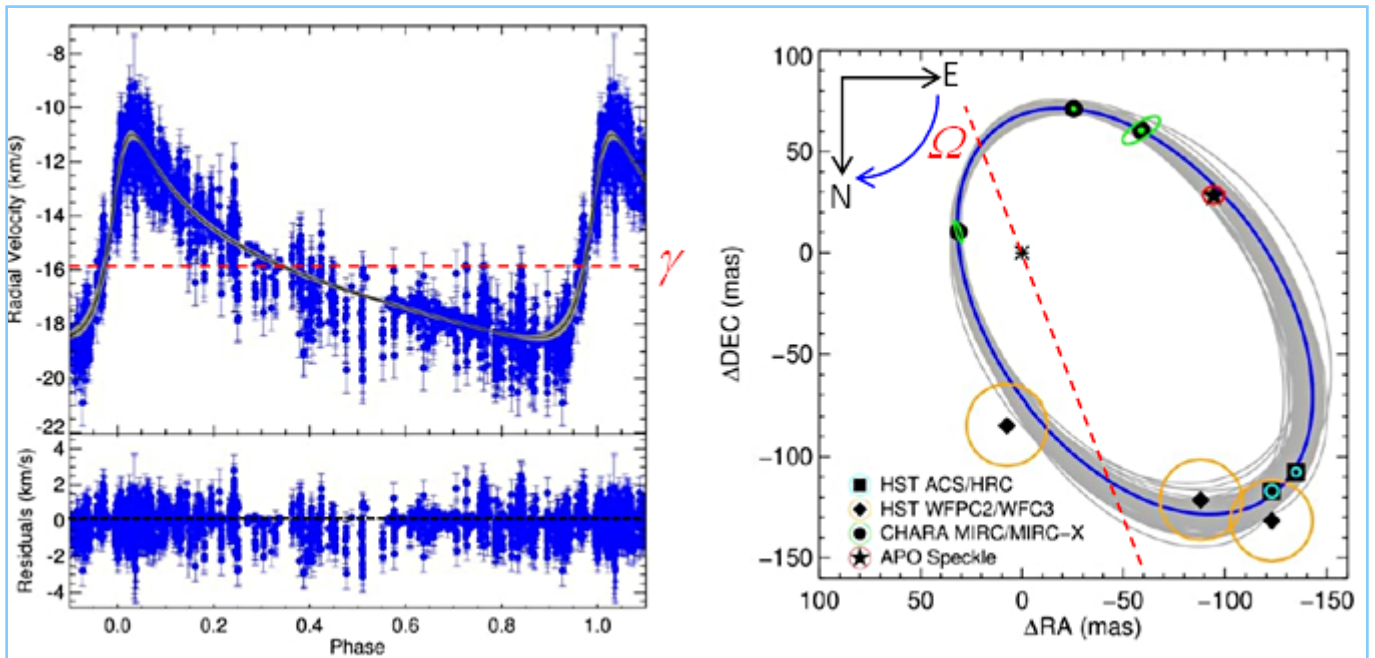


Figure 6 : Orbites spectroscopiques (à gauche) et visuelles (à droite) de Polaris Aa, Ab. Sur l'orbite visuelle sont représentées les positions des observations astrométriques effectuées avec le HST (caméras ACS, WFC2 et WFC3), par interférométrie avec le réseau CHARA, et par interférométrie des tavelures à l'APO. Au tracé de la meilleure orbite (en bleu) est superposé (en gris) un échantillon éleveatoire de 1000 orbites sélectionnées lors de l'estimation des incertitudes. D'après la Figure 6 de Evans et al. (2024).

dans la Table 5. Les tracés des orbites spectroscopiques SB1 et visuelles de Polaris Aa, Ab sont montrés dans la Figure 6.

8 Polaris un système triple particulier

La connaissance de l'orbite et de la distance de Polaris Aa, Ab sont les clés pour aborder l'étude astrophysique des étoiles constituant le système multiple Polaris et notamment de la Céphéide Polaris Aa.

La Table 6 résume les paramètres astrophysiques adoptés pour les composantes du système constitué par la binaire de Polaris Aa, Ab et la composante éloignée Polaris B.

Il est important de noter que la précision de la valeur des masses stellaires déduites de l'orbite de Polaris Aa, Ab est essentiellement limitée par les erreurs sur les mesures astrométriques et l'incertitude sur les paramètres de l'inclinaison i et du demi grand-axe a qui dépendent du degré de couverture de l'orbite par les observations astrométriques.

8.1 Polaris Aa, une Céphéide étrange

Polaris est une étoile Céphéide de courte période ($P \approx 4$ j) et de faible amplitude ($\Delta m < 0,05$ mag) présentant des caractéristiques inhabituelles (voir notamment Torres 2023, Evans et al. 2024).

- Elle pulse sur le mode de la première harmonique contrairement à la majorité des Céphéides qui pulsent sur le mode fondamental⁶.
- Les observations photométriques et spectroscopiques font apparaître le changement de sa période (Figure 7) marquée par une croissance régulière de 1845 ($P \approx 3,964$ j) à 2010 ($P \approx 3,972$ j) marquée par une chute soudaine accompagnée d'un saut de phase vers 1965, puis une tendance à la baisse depuis 2010 (Figure 6).

Les courbes de lumière et de vitesse radiale indiquent également un changement de l'amplitude de pulsation, paraissant quasi constante entre 1845 et 1960, décroissante entre 1960 et 1990 puis en croissance jusqu'en 2015 (Figure 7).

Il apparaît sur la Figure 7 que certains évènements pourraient sembler corrélés avec les passages au périastre de la binaire Polaris Aa, Ab, cependant l'interprétation de ces variations est encore discutée (Torres 2023).

8.2 Le statut évolutif du système triple Polaris

Le statut évolutif des composantes de Polaris peut être estimé en ajustant sur les valeurs adoptées des paramètres stellaires (Température ; Luminosité ; Masse ; Rayon) les trajets évolutifs calculés au moyen de modèles de physique stellaire. La Table 7 donne les valeurs de la masse et de l'âge de chaque étoile pour un trajet évolutif modélisé qui s'ajuste le mieux aux observations trouvées dans les publications.

Si les résultats semblent cohérents avec les paramètres estimés des compagnons de Polaris qui sont sur la séquence principale, il n'en va pas de même pour la Céphéide Polaris Aa. À son sujet, les auteurs de différentes études en arrivent à des conclusions analogues :

- les luminosités prédites par les modèles sont plus faibles que la luminosité observée ;
- la masse mesurée pour Polaris Aa est plus petite que la masse prédite par le meilleur trajet évolutif.

Polaris Aa paraît être une étoile beaucoup plus jeune que ses compagnons.

Table 6. Valeurs des paramètres astrophysiques pour les composantes du système triple Polaris.

	Polaris Aa	Polaris Ab	Polaris B
Type Spectral	F8 Ib	F6 V	F3 V
Masse	$5,13 \pm 0,28 M_{\odot}$ [1]	$1,316 \pm 0,028 M_{\odot}$ [1]	$1,38 \pm 0,61 M_{\odot}$ [3]
Rayon	$46,3 \pm 0,42 R_{\odot}$ [1]	$1,04 R_{\odot}$ [2]	$\approx 1,38 R_{\odot}$ [3]
Luminosité	$1260 L_{\odot}$ [4]	$5,5 \pm 0,1 L_{\odot}$ [6]	$\approx 3,87 L_{\odot}$ [3]
Gravité (log g)	2,2 [5]		$\approx 4,3$ [3]
Température T_{eff}	6015 K [3]	6900 ± 150 K [6]	≈ 6900 K [3]

1 Evans et al. (2024) ; 2 Evans et al. (2008) ; 3 Usenko & Klochkova (2008)

4 Fadeyev (2015) ; 5 Usenko, I. A. et al. (2005) ; [6] Neilson & Blinn (2021)

6 http://physique.unice.fr/sem6/2014-2015/PagesWeb/PT/Etoile/mecanismes_pulsation.php

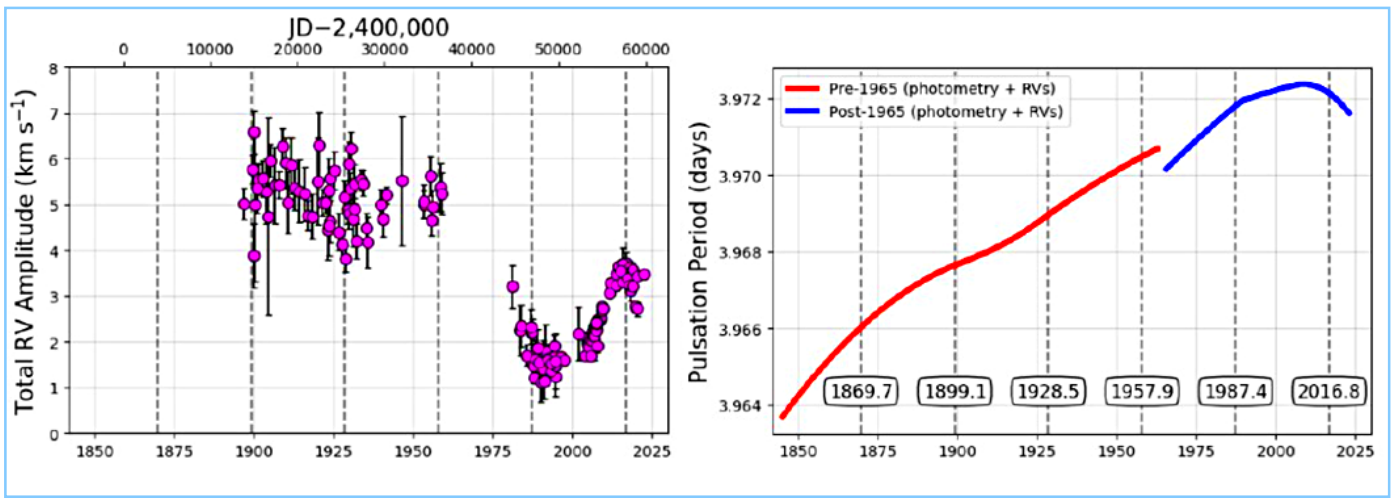


Figure 7 : Amplitude de la vitesse radiale de pulsation (à gauche) et période de pulsation instantanée (à droite) de la Céphéide Polaris Aa en fonction du temps. Les dates des passages au périastre de la binaire Polaris Aa, Ab sont indiquées par leurs date. D'après la Figure 10 de Torres (2023).

Table 7. Valeurs des masses et des âges estimés pour les composantes du système Polaris obtenues par ajustement de modèles d'évolution stellaire sur les données mesurées.

Composante	Aa		Ab	B	
M/M_{\odot}	5,5	6 - 7	1,4 - 1,5	1,4	1,5
Âge	0,1 109	50 - 70 106	0,5 109	2,5 109	1,5 109
Référence	Evans et al. 2018	Neilsen & Blinn 2021	Neilsen & Blinn 2021	Evans et al. 2018	Neilsen & Blinn 2021

Si l'on admet que les modèles stellaires sont corrects, les anomalies peuvent être la conséquence d'une mauvaise détermination des paramètres physiques (Masse, Température, Luminosité) et de la distance.

On peut aussi envisager que la modélisation de Polaris Aa n'est pas correcte et faire l'hypothèse que cette étoile paraît jeune parce qu'elle résulte de la fusion de deux étoiles (Evans et al. 2018 ; Neilson & Blinn 2021).

9 Conclusion

L'étude du système Polaris illustre bien l'importance de l'apport des observations à haute résolution angulaire (par imagerie ou interférométrie) à l'étude et la caractérisation des étoiles composant ce système en complément des données spectroscopiques et photométriques.

Depuis une vingtaine d'années, notre connaissance des caractéristiques du système Polaris a bien progressé, mais le mystère persiste, en particulier autour de la Céphéide, composante primaire du système triple, surtout en ce qui concerne la compréhension de son stade d'évolution.

Remerciements

Je remercie particulièrement les services Simbad et VizieR exploités par le Centre des Données Stellaires (Strasbourg, France), les services bibliographiques du système de données astrophysiques de la NASA ainsi que le Washington Double Star Catalog de l'USNO ont été utilisés durant la préparation de cet article.

Références

Campbell, W. W. 1899, PASP 11, 195; On the variable velocity of Polaris in the line of sight : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1899PASP...11..195C>

Coudé du Foresto, V., Bordé, P. J., Mérand, A., et al. 2003, in Interferometry for Optical Astronomy II, ed. W. A. Traub, Proc. SPIE, 4838, 280; FLUOR fibered beam combiner at the CHARA array : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003SPIE.4838..280C/>

abstract

Evans, N. R. 2008, AJ 136, 1137; Direct Detection of the Close Companion of Polaris with the Hubble Space Telescope : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/136/3/1137/pdf>

Evans, N. R., Karovska, M., Bond, H. E. et al. 2018, ApJ 863, 187; The Orbit of the Close Companion of Polaris: Hubble Space Telescope Imaging, 2007 to 2014 : <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aad410/pdf>

Evans, N. R., Schaefer, G. H., Gallenne, A. et al. 2024, The ApJ 971, 190; The Orbit and Dynamical Mass of Polaris: Observations with the CHARA Array : <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad5e7a/pdf>

Fadeyev, Yu. A. 2015, MNRAS 449, 1011; Evolutionary status of Polaris : <https://arxiv.org/pdf/1502.06463>

Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., et al. 2023, A&A, 674, A1; Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties : <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2023/06/aa43940-22.pdf>

Gerasimovic, B. P. 1936, ApJ 84, 2229; The System of Polaris : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1936ApJ...84..2229G>

Herschel, W. Phil. Trans. R. Soc. 72, 112, 1782 ; XII. Catalogue of double stars : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1782.0014>

Hertzsprung, E. 1911, A.N., 189, 89; Nachweis der Veränderlichkeit von α Ursae minoris : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1911AN....189...89H>

Horch, E. P., Veillette, D. R., Gallé, R., et al. 2009, AJ, 137, 5057; Observations of Binary Stars with the Differential Speckle Survey Instrument. I. Instrument Description and First Results : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/137/6/5057/pdf>

Kamper, K. W. 1996, JRASC, 90, 140; Polaris Today
<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1996JRASC..90..140K>

Mason, B.D., Wycoff, G.L., Hartkopf, W. I., et al. 2001, AJ 122, 3466M; The 2001 US Naval Observatory Double Star CD-ROM. I. The Washington Double Star Catalog : <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/323920/pdf>

Mérand, A., Kervella, P., Coudé du Foresto, V. et al. 2006, A&A 453, 155 ; Extended envelopes around Galactic Cepheids. II. Polaris and δ Cephei from near-infrared interferometry with CHARA/FLUOR : <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2006/25/aa4466-05.pdf>

Moore, J. H. 1936, Pub. LicOB 18, 1; Fourth Catalogue of Spectroscopic Binary Stars : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1936LicOB..18....1M>

Neilson, H. R. & Blinn, H. 2021, ASPC 529, 72; The Curious Case of the North Star: the Continuing Tension Between Evolution Models and Measurements of Polaris : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2021ASPC..529...72N>

Roemer, E. 1965, ApJ. 141, 1415R; Orbital Motion of Alpha Ursae Minoris from Radial Velocities : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1965ApJ...141.1415R>

ten Brummelaar, T. A., McAlister, H., Ridgway, S. T., et al. 2005, ApJ, 628, 453; First Results from the CHARA Array. II. A Description of the Instrument : <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/430729/pdf>

Torres, G. 2023, MNRAS 536, 2510; The spectroscopic orbit of Polaris and its pulsation properties : <https://arxiv.org/pdf/2309.03257>

Usenko, I. A. & Klochkova, V. G. 2008, MNRAS 387, L1; Polaris B, an optical companion of the Polaris (α UMi) system: atmospheric parameters, chemical composition, distance and mass : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2008MNRAS.387L...1U>

Usenko, I. A. Miroshnichenko, A. S., Klochkova, V. G., et Yushkin, M. V. 2005, MNRAS 362, 1219; Polaris, the nearest Cepheid in the Galaxy: atmosphere parameters, reddening and chemical composition : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2005MNRAS.362.1219U>

van Leeuwen, F. 2007, A&A 474, 653; Validation of the new Hipparcos reduction : <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2007/41/aa8357-07.pdf>

Wielen, R., JahreiB, H., Dettbarn, C. et al. 2000, A&A 360, 399; Polaris: astrometric orbit, position, and proper motion : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2000A%26A...360..399W>

Wilson, R. H. Jr. 1937, PASP 49,202; 82 Geminorum and Polaris Observed Double with the Interferometer : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1937PASP..49..202W>

Wilson R. H. Jr. 1941, PF&CO 6, 1; Construction and use of an interferometer for measurement of close double stars with the eighteen-inch refractor. Continuation of the use of the interferometer for close double star measurements at Flower Observatory : <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1941PF&CO...6b...1W>



Daniel Bonneau

Une thèse de troisième cycle en Astrophysique effectuée à l'observatoire de Meudon sous la direction d'Antoine Labeyrie, m'a amené à découvrir le monde étoiles doubles et à participer à l'aventure de la renaissance des observations à haute résolution angulaire. Entre 1972 et 1991, je me suis surtout consacré à la détermination des paramètres stellaires fondamentaux (masses et températures) et au sondage de la structure de l'atmosphère étendue d'étoiles géantes froides par interférométrie des tavelures. Ensuite, mes recherches ont eu essentiellement pour thème l'étude des phénomènes de perte et de transfert de masse dans les systèmes binaires massifs (type Be binaires, beta Lyrae, Wolf-Rayet) et la détermination des paramètres stellaires au moyen d'observations par interférométrie optique à grande base. Depuis 2011, je suis astronome honoraire à l'Observatoire de la Côte d'Azur, collaborateur scientifique bénévole du laboratoire Lagrange.