

CWISE J0146-0508 AB, UN SYSTÈME DE NAINES BRUNES

SITUÉ A 40 PARSECS DU SOLEIL

CWISE J0146-0508 AB, A brown dwarf system located at 40 parsecs from the Sun

André Debackère

Membre de la Commission des Étoiles Doubles de la Société Astronomique de France (SAF)

Membre du Faulkes Telescope Project : <http://www.faulkes-telescope.com/>

Utilisateur des télescopes robotiques du Las Cumbres Observatory network LCO : <https://lco.global/>

dbrstars@gmail.com

Site web : <https://dbrastronomie.pagesperso-orange.fr/>



Résumé

Les étoiles doubles sont très nombreuses mais les couples de naines brunes sont rares (on ne connaît qu'une cinquantaine de systèmes de naines brunes détectés à ce jour). La Commission des Étoiles Doubles s'intéresse aux systèmes binaires proches du Soleil. C'est dans ce cadre que l'auteur a observé, en novembre 2020, pour la première fois une binaire constituée de deux naines brunes (objets très froids de masses intermédiaires entre une étoile et une planète) nommée WISE J104915.57-531906.1 ou encore Luhman 16 [1] située à 2 parsecs du Soleil. L'auteur présente ici les observations de CWISE J0146-0508, un autre couple de naines brunes situé à 40 parsecs du Soleil, réalisées en février 2022 à l'aide du Faulkes Telescope North (FTN) [2] situé au sommet de l'Haleakala à Hawaï.

Abstract

Double stars are very numerous but pairs of brown dwarfs are rare (only about fifty detected brown dwarf binaries are known to date). The Double Stars Commission is interested in binary systems nearby the Sun. In this context the author started to observe, in November 2020, for the first time a binary system consisting of two brown dwarfs (very cold objects with intermediate mass between a star and a planet) named WISE J104915.57-531906.1 or Luhman 16 located at 2 parsecs from the Sun. The author presents here the observations of CWISE J0146-0508, another pair of brown dwarfs located at 40 parsecs from the Sun and made in February 2022 using the Faulkes Telescope North (FTN) located at the top of Haleakala in Hawaii.

Keywords : astronomy; binaries; brown dwarfs; infrared stars; proper motions; solar neighbourhood; astrometry; photometry



1 introduction

L'observation des naines brunes est difficile car ce sont des objets très froids. Le satellite "Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE)" [3] fut lancé en décembre 2009, sa mission dont le but était d'imager tout le ciel en infra-rouge, s'arrêta en février 2011 (Wright, E. L. et al. 2010) [4]. Les données recueillies par WISE sont répertoriées dans un catalogue nommé CatWISE Catalog (CWISE) [5]. C'est à partir de ce catalogue que des naines brunes furent découvertes via le projet de science citoyenne Backyard Worlds : Planet 9 [6]. La recherche de compagnon de naines brunes menée par Emma Softich qui a utilisé d'autres images à plus haute résolution lui permit de découvrir le couple CWISE J0146-0508 AB dont les magnitudes en bande i' centrée sur 754.5 nm données par le catalogue DES DR1 (Dark Energy Survey Data Release 1, 2018) [7] sont $m_A \sim 20$ et $m_B \sim 22$. Cette découverte a fait l'objet d'une publication récente (Softich, E, et al. 2022) [8] qui m'a été signalée par Patrick Wullaert et qui a motivé mes observations. Ce système de naines brunes est, d'après Emma Softich, très certainement une paire physique (faible séparation, mouvements propres et parallaxes des composantes du système proches). Emma Softich disposait de données astrométriques sur un intervalle de temps de 9 ans

(de 2009 à 2018), mes observations pourraient servir à allonger cette durée d'observation.

2 Campagne d'observation

2.1 Matériel

J'ai réalisé des images de CWISE J0146-0508 AB les 12, 13 et 17 février 2022 en utilisant le Faulkes Telescope North (FTN) à l'observatoire Haleakala d'Hawaï (télescope de 2,00 m de diamètre) et le système MuSCAT3 (Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets) [9], fabriqué par « Astrobiology Center » de Tokyo, qui est un imageur à 4 canaux simultanés constitué de quatre caméras de Princeton Instruments : 1 caméra Pixix 2048B pour le filtre SDSS r' , 2 caméras Pixix 2048_eX pour les filtres SDSS g' et i' , 1 caméra Sophia 2048BR pour le filtre Pan-STARRS z_s' , taille des pixels 13.5 μm , 0,27"/pix, binning x1, champ $\sim 9' \times 9'$.

2.2 Images

La table 1 présente les informations concernant les images obtenues.

Contrairement à la composante A, identifiée comme naine brune dans les données du Wide-field Infrared Survey Explorer,

Objet	CWISE J0146-0508											
Coord. équat. (Gaia EDR3)	A.D.=01h46m11,2s						"DEC.=-05°08'50,3""					
Époque	J2000.0											
Date	13 février 2022				14 février 2022				17 février 2022			
Filtres	r'	g'	i'	zs'	r'	g'	i'	zs'	r'	g'	i'	zs'
Temps de pose (s)	300	300	300	300	0	0	360	360	0	0	0	360
Hauteur (°)	43,4				41,1				40,8			
Masse d'air	1,4681				1,5398				1,5476			

Table 1. Informations sur les images, la hauteur et la masse d'air concernant les images obtenues avec les différents filtres.

le compagnon B plus froid est resté inaperçu aux temps de pose utilisés dans la bande spectrale i' centrée sur 754.5 nm (Figure 1). Il est visible au même temps d'exposition en bande spectrale zs' centrée sur 870.0 nm (Figure 2). Nous retrouvons cette situation dans les données du Pan-STARRS - DR1 (Chambers et al., 2016) [10], et du DES - DR1 (Dark Energy Survey Data Release 1, 2018)

[7], voir la table 2 et la figure 3.

3 Mesures astrométriques et photométriques

3.1 Astrométrie : Coordonnées équatoriales des composantes A et B de CWISE J0146-0508 AB en février 2022

Pan-STARRS - DR1 (2016)		
Composante	CWISE J0146-0508A	CWISE J0146-0508B
mag. i	20,692 ± 0,021	non mesurée
mag. z	19,125 ± 0,019	20,476 ± 0,028
DES - DR1 (2018)		
mag. i	20,136 ± 0,011	22,089 ± 0,061
mag. z	18,588 ± 0,006	20,055 ± 0,020

Table 2. Magnitudes en bandes i et z.

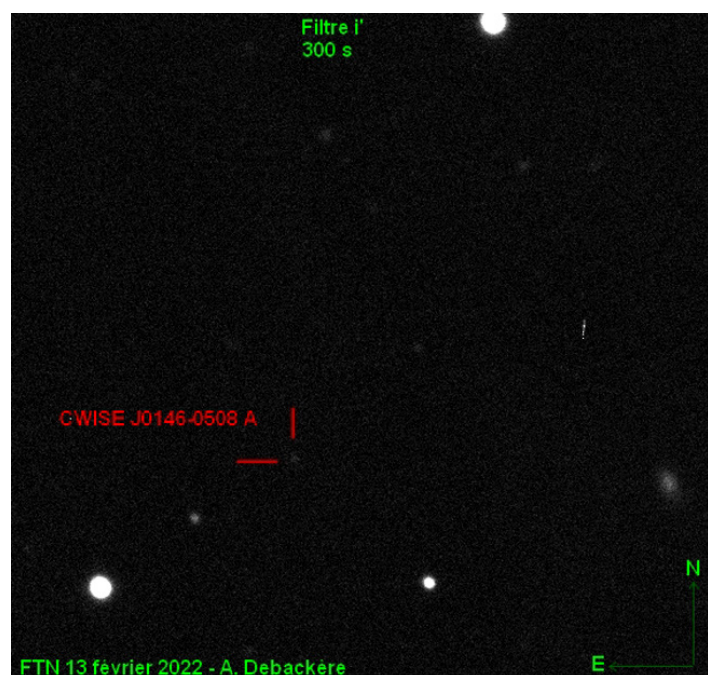


Figure 1. La composante A est visible mais la composante B n'est pas visible en bande i'.

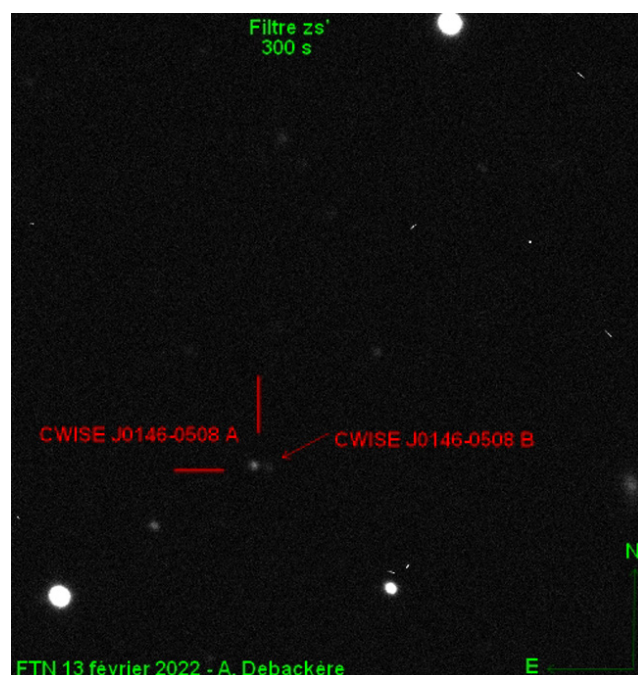


Figure 2. Les composantes A et B sont toutes deux visibles en bande zs'.

image	composante	A.D. (hh:mm:ss,ss)	DEC. (dd:mm:ss,s)
12 février 2022	A	01:46:11,26	-05:08:51,8
	B	01:46:11,05	-05:08:52,2
13 février 2022	A	01:46:11,27	-05:08:51,9
	B	01:46:11,05	-05:08:52,4
17 février 2022	A	01:46:11,25	-05:08:51,5
	B	01:46:11,04	-05:08:52,2

Table 3. Coordonnées équatoriales de CWISE J0146-0508 AB en février 2022

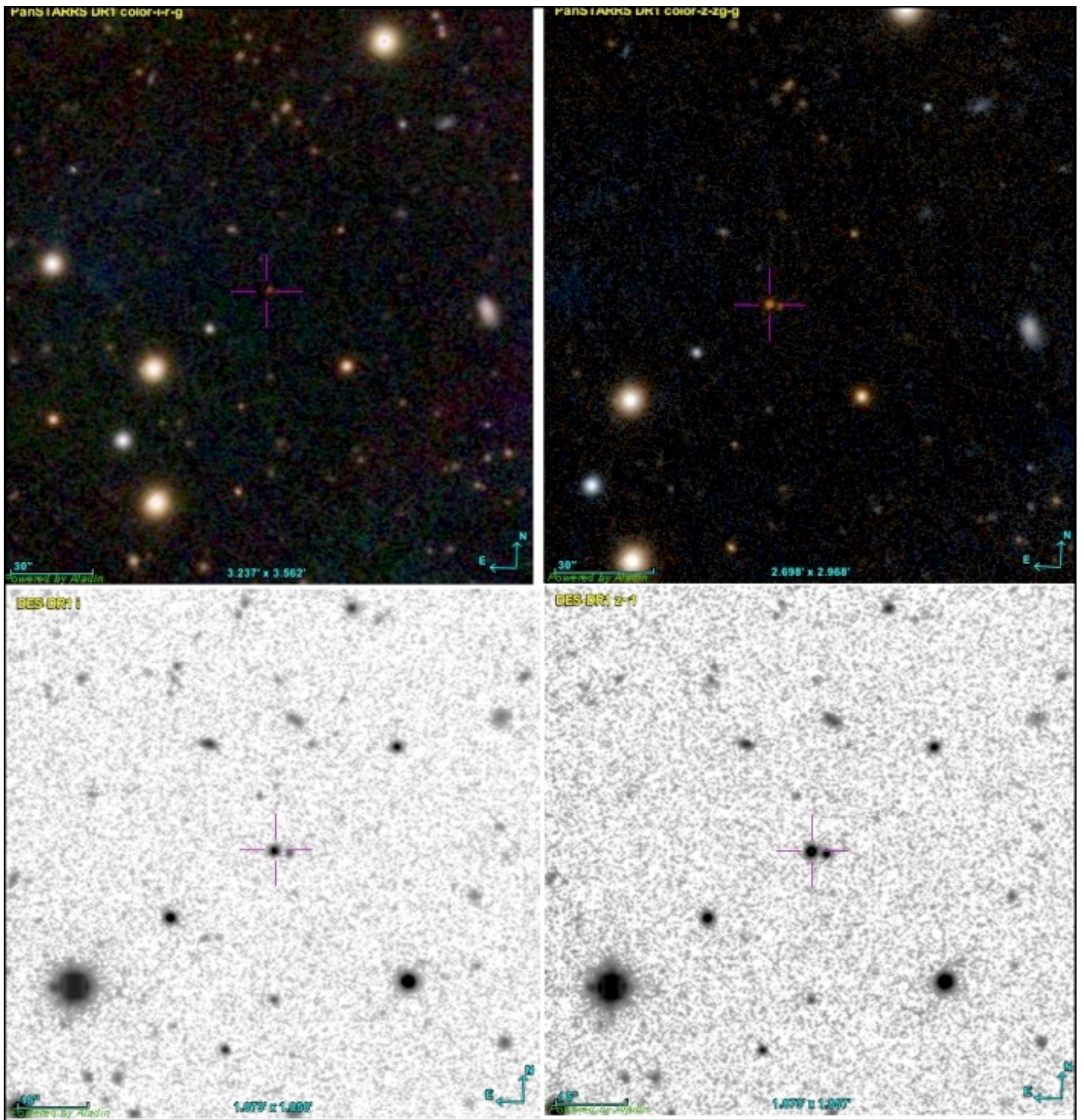


Figure 3. Le compagnon B n'est pas visible en bande i sur l'image du PanSTARRS en haut à gauche, il est bien visible en bande z sur l'image du PanSTARRS en haut à droite. Les deux composantes sont bien visibles sur les deux images en bas du DES en bandes i et z. (images obtenues avec ALADIN du CDS de Strasbourg).

3.1.1 Méthode

Les images en bande zs' obtenues les 12, 13 et 17 février 2022 montrant les deux composantes A et B de la binaire CWISE J0146-0508 AB sont utilisées avec le logiciel ASTROMETRICA [10] associé au catalogue GAIA-DR2 [12] pour mesurer la position des centroïdes de chacune des composantes A et B.

3.1.2 Résultats

La table 3 présente ces mesures, d'où l'on déduit la moyenne :

CWISE J0146-0508A J2022,127

A.D. = 01h46m11,26s ± 0,01s

DEC. = -05°08'51,7" ± 0,2"

CWISE J0146-0508B J2022,127

A.D. = 01h46m11,05s ± 0,01s

DEC. = -05°08'52,3" ± 0,1"

3.2. Astrométrie : Angle de position et séparation de CWISE J0146-0508 AB en février 2022

3.2.1 Calcul à partir des coordonnées équatoriales des deux composantes A et B

L'angle de position θ et la séparation ρ de cette binaire sont calculés à partir des coordonnées équatoriales de chacune des composantes définies ci-dessus en utilisant les relations suivantes :

$$\cos \rho = \sin \text{DECA} \times \sin \text{DECB} + \cos \text{DECA} \times \cos \text{DECB} \times \cos (\text{A.D.B} - \text{A.D.A})$$

$$\tan \theta = [\cos \text{DECA} \times \cos \text{DECB} \times \sin (\text{A.D.B-A.D.A})] / [\sin \text{DEB} - \cos \rho \times \sin \text{DEA}]$$

J'obtiens :

CWISE J0146-0508AB J2022,127
 $\theta = 259,2^\circ$ et $\rho = 3,19''$.

3.2.2 Mesure à l'aide du logiciel REDUC

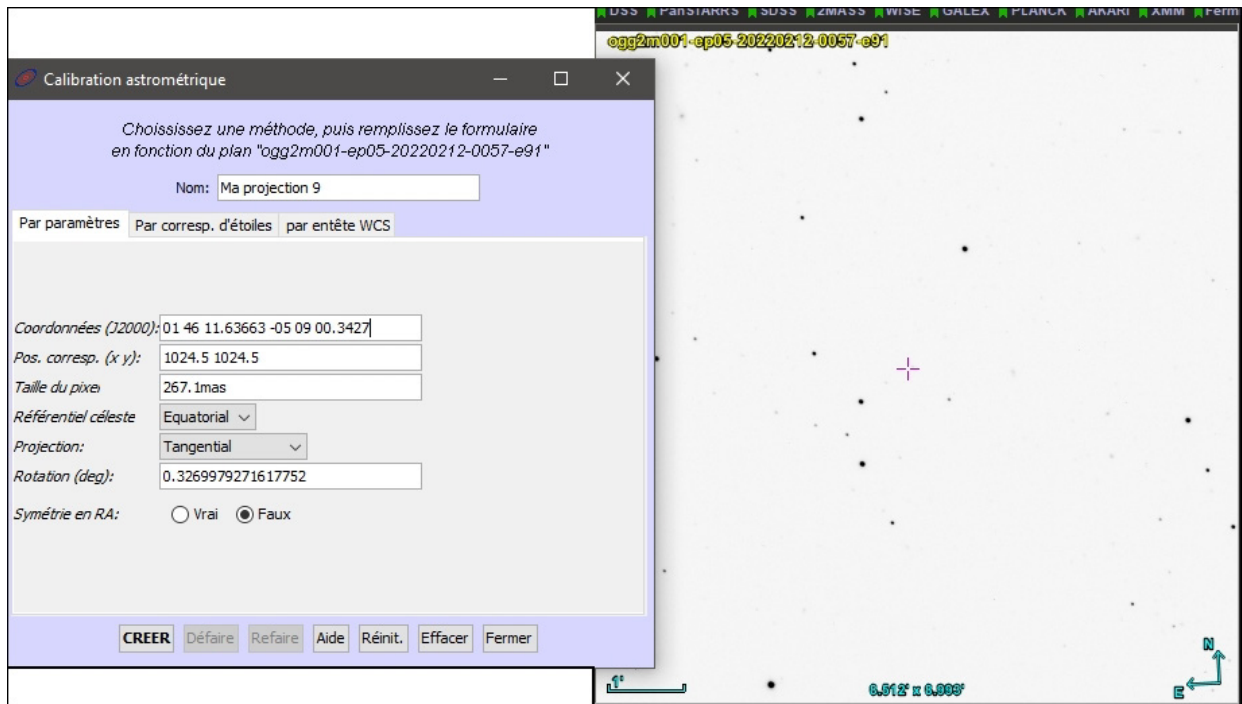


Figure 4. Calibration astrométrique de l'image du 13 février en bande zs' en utilisant le logiciel ALADIN du CDS de Strasbourg.

Image	13 février 2022	14 février 2022	17 février 2022
Taille du pixel E("/pix)	0,2671	0,2673	0,2673
Rotation Δ (°)	0,327	0,445	0,4468

Table 4. Valeurs de Δ et E des images en bande zs'

3.2.2.1 Méthode

Pour effectuer l'étalonnage du logiciel REDUC [13] il faut d'abord déterminer l'orientation du capteur de la caméra par rapport à la direction du Nord (rotation de l'image) comptée positivement vers l'Est noté Δ (°) et l'échelle des images (taille du pixel) notée E ("/pix.). Ces paramètres peuvent être déterminés en utilisant par exemple la calibration astrométrique des images du logiciel ALADIN [14] (Figure 4) via les mots clés adéquats de l'en-tête FITS (selon le standard WCS). Puis le logiciel REDUC permet alors la mesure de l'angle de position θ (°) et de la séparation ρ (") du couple que l'on désire observer.

3.2.2.2 Calibration astrométrique des images

La table 4 présente les valeurs de Δ et E obtenues

3.2.2.3 Étalonnage du logiciel REDUC et mesure des coordonnées polaires de la binaire CWISE J0146-0508 AB

La table 5 présente les résultats des mesures d'angle de position et de séparation de la binaire CWISE J0146-0508 AB avec le logiciel REDUC.

CWISE J0146-0508 AB, J2022,127
 $\theta = 260,2^\circ \pm 0,6^\circ$, $\rho = 3,11'' \pm 0,08''$

3.3 Photométrie : Mesure des magnitudes en bandes i et z des composantes A et B de la binaire CWISE J0146-0508 AB.

3.3.1 Remarque

La photométrie d'ouverture des composantes d'une étoile double ne permet pas d'appliquer strictement les règles classiques de détermination des rayons des cercles à partir de la valeur du front d'onde à mi-hauteur FWHM. Il faut adapter ces

Date	13 février 2022	14 février 2022	17 février 2022
Orientations du capteur Δ (°)	0,327	0,4450	0,4468
Echantillonnage E("/pix.)	0,2671	0,2673	0,2673
Coordonnées polaires	CWISE J0146-0508 AB		
Angle de position θ (°)	260,8	259,7	260,2
Séparation ρ (")	3,15	3,15	3,02

Table 5. Mesure de l'angle de position et de la séparation de CWISE J0146-0508 AB sur les images des 13, 14 et 17 février 2022 en bande zs' à l'aide du logiciel REDUC.

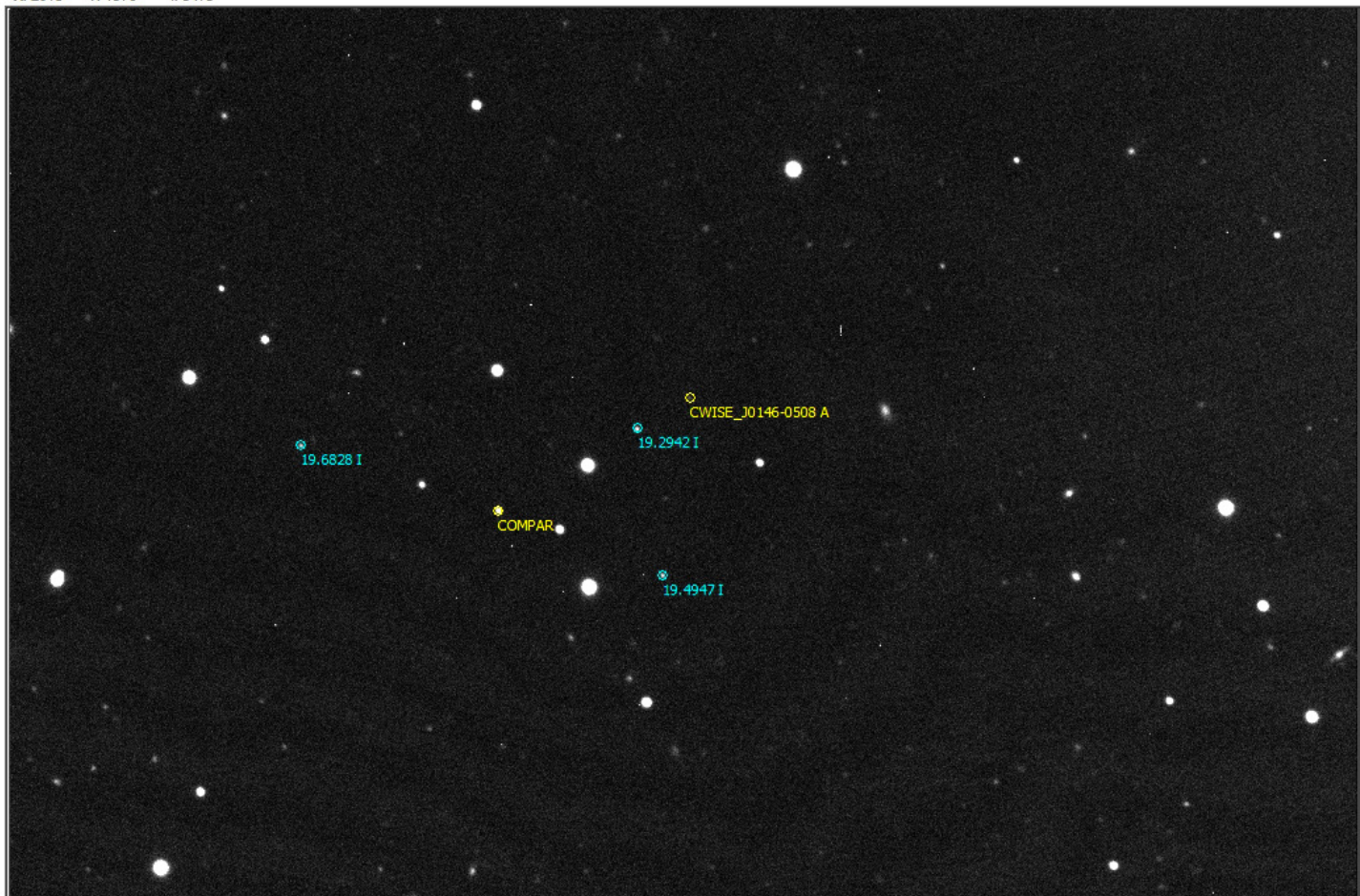


Figure 5. Extrait du champ de CWISE J0146-0508 AB au FTN montrant les étoiles de calibration et leurs magnitudes en bande I (en bleu), l'étoile de comparaison et la cible CWISE J0146-0508 A (en jaune) utilisées avec le logiciel de photométrie FotoDif.

rayons au mieux. Le premier cercle entoure le plus largement possible la composante principale sans intégrer de la lumière de la composante secondaire. La couronne circulaire délimitée par les deux premiers cercles contient la composante secondaire et éventuellement d'autres étoiles, elles ne seront pas prises en

Mesures des magnitudes en bande i de la composante A et en bande z des composantes A et B de la binaire CWISE J0146-0508 AB avec le logiciel FotoDif qui donne une photométrie absolue en utilisant les magnitudes en bande i centrée sur 754.5 nm et en bande z centrée sur 867.9 nm des 3 étoiles de calibration C1,

Catalogue	PanSTARRS DR1 (2016)			
	A.D.	DEC.	mag. i	mag. z
C1	01:46:21,858	-05:09:10,80	19,6828 ± 0,0183	19,1456 ± 0,0170
C2	01:46:11,979	-05:10:03,19	19,4947 ± 0,0097	19,0009 ± 0,0116
C3	01:46:12,674	-05:09:04,10	19,2942 ± 0,0070	19,2284 ± 0,0157
Compar.	01:46:16,465	-05:09:37,04	18,3081 ± 0,0044	17,8505 ± 0,0060

Table 6. Magnitudes en bandes i et z des étoiles de calibration et de l'étoile de comparaison.

compte pour la mesure. Enfin la couronne circulaire comprise entre le deuxième et le 3ème cercle mesure le fond du ciel, elle ne devrait pas contenir d'étoile.

3.3.2 Méthode

J'ai recherché dans le catalogue PS1 : The Pan-STARRS release 1 (PS1) Survey-DR1 (Chambers et al., 2016) [10], une étoile de comparaison (Compar) et trois étoiles de calibration que l'on peut voir sur la figure 5 et dont on trouve les caractéristiques dans la table 6. J'ai ensuite utilisé le logiciel FotoDif [15] (version 3.109) pour faire les mesures.

3.3.3 Résultats

C2 et C3 citées plus haut (table 6).

La table 7 est générée par le logiciel FotoDif.

Nomenclature de la table 7

- Col. 1, date héliocentrique
- Col. 2, magnitude en bande i (lignes 4 et 5) et en bande z (lignes 8, 9, 10 et 12, 13, 14) de l'étoile étudiée
- Col. 3, incertitude de la mesure de magnitude de l'étoile étudiée
- Col. 4, rapport signal sur bruit de l'étoile étudiée
- Col.5 : magnitude en bande i et en bande z de l'étoile de comparaison
- Col. 6, incertitude de la mesure de magnitude de l'étoile de

Filtre i												
HELIO J DATE	MAG A	+/-	NSR	MAG	+/-	NSR	AIRMS	TRANS	FWHM"	BAKGR	N	NUM
2459623,7195	20,935	0,046	23	18,352	0,014	76	1,475	1	1,78	18,28	1	0001
12459624,72481	20,919	0,042	26	18,36	0,013	83	1,548	1	1,85	18,62	1	0002
Filtre z												
HELIO J DATE	MAG A	+/-	NSR	MAG	+/-	NSR	AIRMS	TRANS	FWHM"	BAKGR	N	NUM
2459623,7195	19,117	0,023	47	17,886	0,013	83	1,476	1	1,73	18,08	1	0001
2459624,72481	19,151	0,021	52	17,861	0,012	94	1,548	1	1,92	18,22	1	0002
2459627,71717	19,184	0,02	53	17,908	0,011	96	1,556	1	1,39	17,34	1	0003
HELIO J DATE	MAG B	+/-	NSR	MAG	+/-	NSR	AIRMS	TRANS	FWHM"	BAKGR	N	NUM
2459623,7195	20,4	0,041	26	17,886	0,013	83	1,476	1	1,73	18,08	1	0001
2459624,72481	20,621	0,04	27	17,879	0,012	94	1,548	1	1,92	18,22	1	0002
2459627,71717	20,421	0,035	30	17,908	0,011	96	1,556	1	1,39	17,34	1	0003

Table 7. Mesures de la magnitude des composantes de CWISE J0146-0508 AB en bandes i et z

- comparaison
- Col. 7, rapport signal sur bruit de l'étoile de comparaison
 - Col. 8, masse d'air
 - Col. 9, transparence
 - Col. 10, front d'onde à mi-hauteur en secondes de degré
 - Col. 11, intensité du fond de ciel
 - Col. 12, nombre de mesures
 - Col. 13, numéro de l'image

Il paraît plus prudent, compte tenu des incertitudes sur les étoiles de calibration, sur l'étoile de comparaison et sur les mesures, de l'ignorance des coefficients de transformation des télescopes du réseau LCO et de l'extinction interstellaire, de retenir l'arrondi des magnitudes obtenues au dixième près.

4.2 Informations dans les publications

Elles sont données dans la table 8.

*CWISE J0146-0508B apparaît plus bleue que le type spectral classique L8, il lui a donc été attribué la désignation L8 (bleue)

4 Caractéristiques de la binaire CWISE J0146-0508 AB

4.1 Moyennes des mesures astrométriques et photométriques et incertitudes

Les moyennes des mesures astrométriques et photométriques de CWISE J0146-0509 AB en février 2022 sont présentées dans la table 8:

5 Conclusion

Ce travail apporte une nouvelle détection en bande z' de la

CWISE J0146-0508 AB	Composante A	Composante B
Epoque	J2022,127	
A.D. (hh:mm:ss,ss)	01:46:11,26 ± 0,01s	01:46:11,05 ± 0,01s
DEC. (dd:mm:ss,s)	-05:08:51,7 ± 0,2"	-05:08:52,3 ± 0,1"
Angle de position θ (°)	260,2° ± 0,6°	
Séparation ρ (")	3,11"" ± 0,08"	
magnitude en bande i	20,927 ± 0,068 20,9	Non visible
magnitude en bande z	19,151 ± 0,050 19,2	20,481 ± 0,075 20,5
Δm (z)	1,3	

Table 8. Récapitulatif des mesures

Paramètres	Primaire	Secondaire	Référence
Spectre	L4 ± 0,5	L8 ± 0,5 (bleue)*	Burgasser et al.(2006) [16] Kirkpatrick et al. (2010) [17]
Masse/Jupiter	72 ± 6	66 ± 10	Masses estimées à l'aide des modèles évolutifs Phillips et al. (2020) [18]
Teff (K)	1720 ± 150	1340 ± 140	Softich et al. (2022) [6] Kirkpatrick et al. (2021) [7]
$\mu\alpha$ (mas an.-1)	79,14 ± 1,10	83,94 ± 3,43	Nidever et al. (2021) [19]
$\mu\delta$ (mas an.-1)	-214,40 ± 1,03	-210,33 ± 3,35	
Distance (UA) entre comp.	149 (+104 -41")		Dupuy & Liu (2011) [20]
Distance (pc) au soleil	41 ± 5"		Kirkpatrick et al. (2021) [21]

Table 9. Extrait de l'article de Softich, E. et al. (2022)

composante B de la binaire récemment découverte CWISE J0146-0508 AB, une mesure de l'angle de position et de la séparation du couple ainsi que des mesures de magnitudes en bande i pour la composante A et en bande z pour les composantes A et B. Les deux composantes sont très froides, la composante B étant la plus froide puisqu'elle n'est visible qu'en bande spectrale z. Les images obtenues au cours des trois nuits d'observation en février 2022 allongent la période d'observation de cet objet et ont été transmises à Emma Softich à sa demande.

6 Remerciements

L'auteur remercie tout particulièrement Patrick Wullaert pour l'avoir alerté de cette découverte ainsi que Paul Roche, professeur à l'Université de Cardiff et directeur du Faulkes Telescope project, qui fournit les temps d'accès aux télescopes du réseau LCO. Il remercie chaleureusement Daniel Bonneau pour la relecture, les conseils et corrections apportés à la rédaction de cet article. Il remercie également David Chiron, Florent Losse, Herbert Raab et Julio Castellano respectivement concepteurs des logiciels WDS TOOL, REDUC, ASTROMETRICA et FotoDif.

Ce travail a utilisé :

- des observations réalisées avec l'instrument MuSCAT3, développé par "Astrobiology Center" avec les soutiens financiers de "JSPS KAKENHI (JP18H05439)" et "JST PRESTO (JPMJPR1775)", et le Faulkes Telescope North situé sur l'île de Maui à Hawaï, exploité par le "Las Cumbres Observatory".
- ALADIN du CDS (Centre de Données Stellaires) de Strasbourg et de Vizier, outil d'accès aux catalogues astronomiques dont les catalogues GAIA et PS1.

7 Références

- [1] Debackère, A. ; Coliac, J. F. ; Soulie, E. ; Durand, P. ; Wullaert, P. ; Bonneau, D. Etoiles doubles, vol.2, p. 15-26, June 2021 "Luhman 16 : une binaire constituée de deux naines brunes et située à 2 pc du soleil"
<https://etoiledoubles.org/revue/ED-2021-02/ED-2021-02-DEBACKERE-LUH16.pdf>
- [2] Faulkes Telescope project : <http://www.faulkes-telescope.com/>
- [3] Wide-field Infrared Survey Explorer : <https://explorers.gsfc.nasa.gov/midex.html#wise>
- [4] Wright, E. L. et al. 2010 The Astronomical Journal, Volume 140, Number 6, November 2010. "The wide-field infrared survey explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance"
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/140/6/1868/pdf>
- [5] Marocco, F. et al. 2021 The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 253, Number 1, 2021 February "The CatWISE2020 Catalog"
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/abd805>
- [6] The Backyard Worlds: Planet 9 : <https://www.zooniverse.org/projects/marckuchner/backyard-worlds-planet-9>
- [7] Abbott, T. M. C. et al. The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 239, Number 2, 2018 November 26. "The Dark Energy Survey: Data Release 1 "
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/aae9f0>
- [8] Softich, E. et al. 2022 ApJL 926 L12 The Astrophysical Journal Letters, Volume 926, Number 2. "CWISE J014611.20-050850.0AB: The Widest Known Brown Dwarf Binary in the Field"
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac51d8>
- [9] MuSCAT3 : <https://lco.global/observatory/instruments/muscat3/>
- [10] Chambers, K. C. et al. "The Pan-STARRS1 Surveys"
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016arXiv161205560C/abstract>
- [11] ASTROMETRICA : <http://www.astrometrica.at/>
- [12] Gaia Collaboration ; A. G. A. Brown et al. Astronomy & Astrophysics, Volume 616, August 2018. "Gaia Data Release 2."
<https://www.aanda.org/component/article?access=doi&doi=10.1051/0004-6361/201833051>
- [13] REDUC : <http://www.astrosurf.com/hfosaf/>
- [14] ALADIN : <https://aladin.u-strasbg.fr/>
- [15] FotoDif : <http://www.astrosurf.com/orodeno/fotodif/>
- [16] Burgasser, A. J. et al. The Astrophysical Journal, Volume 637, Number 2, 1067-1093, 2006 February 1. "A unified near-infrared spectral classification scheme for t dwarfs"
<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/498563>
- [17] Kirkpatrick, J. D. et al. 2010 The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 190, Number 1, 100-146, 2010 September. "Discoveries from a near-infrared proper motion survey using multi-epoch two micron all-sky survey data"
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0067-0049/190/1/100>
- [18] Phillips, M. W. et al. Astronomy & Astrophysics, Volume 637, May 2020. "A new set of atmosphere and evolution models for cool T-Y brown dwarfs and giant exoplanets"
https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2020/05/aa37381-19/aa37381-19.html
- [19] Nidever, D. L. et al. 2021 The Astronomical Journal, Volume 161, Number 4, 192(16pp), 2021 April. "Second Data Release of the All-sky NOIRLab Source Catalog"
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/abd6e1>
- [20] Dupuy, T. J. and Liu, M. C. The Astrophysical Journal, Volume 733, Number 2, 122 (14pp), 2011 June 1. "On the distribution of orbital eccentricities for very low-mass binaries"
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/733/2/122>
- [21] Kirkpatrick, J. D. et al. 2021 The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 253, Number 1, 7 (85pp), 2021 March "The Field Substellar Mass Function Based on the Full-sky 20 pc Census of 525 L, T, and Y Dwarfs"
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/abd107>

