

**Université de Montréal**

**Détection de naines brunes et planètes géantes  
gazeuses à grande séparation utilisant des images  
d'archive**

par

**Marie-Eve Desrochers**

Département de physique  
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de  
Maître ès sciences (M.Sc.)  
en Astronomie et astrophysique

21 février 2019

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL  
FACULTÉ DES ÉTUDES SUPÉRIEURES

MÉMOIRE INTITULÉ :

**Détection de naines brunes et planètes géantes gazeuses à grande séparation  
utilisant des images d'archive**

PRÉSENTÉ PAR :  
Marie-Eve Desrochers

À ÉTÉ ÉVALUÉ PAR LE JURY COMPOSÉ DES PERSONNES SUIVANTES :

Paul Charbonneau,	président-rapporteur
René Doyon,	directeur de recherche
Daniel Nadeau,	membre du jury

MÉMOIRE ACCEPTÉ LE : . . . . . 11 JUILLET 2019

# RÉSUMÉ

---

Les années de collecte de données astronomiques sur de larges portions du ciel fournies par des instruments dédiés ont conduit à des banques d'images prises à différentes longueurs d'onde, résolutions, profondeurs de champ qui restent, pour la plupart, inexploitées (e.g. 2MASS, WISE, SPITZER, SDSS). Le développement de nouveaux algorithmes de traitement des données permet de revaloriser ces images prises des années plus tôt. Le but de ce travail de maîtrise était d'identifier de nouveaux compagnons de faible masse à grande séparation autour d'étoiles jeunes de faible masse (type M) en utilisant des images d'archive. Les archives utilisées pour identifier les candidates sont principalement les images en bande  $J$ ,  $H$  et  $K_s$  du catalogue 2MASS. L'emploi d'un algorithme de soustraction de fonction d'étalement du point basé sur la combinaison linéaire optimisée d'étoiles de référence, combiné à un algorithme inspiré de l'imagerie différentielle spectrale appliqué sur une sélection judicieuse de 2 812 étoiles a permis d'identifier 7 candidates. Cinq d'entre elles avaient été déjà détectées par d'autres équipes. Une s'est avérée être une M9 du champ et l'autre une L3 $\beta$  appartenant probablement à l'association jeune AB Doradus. Ce travail confirme, comme plusieurs avant lui, la faible prévalence des compagnons de masse planétaire et naines brunes sur de très longues orbites ( $\gtrsim 100$  UA) autour d'étoiles jeunes de faible masse. Cette conclusion a motivé l'étude d'une nouvelle approche pour détecter ces compagnons à faible séparation ( $< 40$  UA). Ce projet, partiellement complété, a pour but de démontrer la possibilité de détecter des objets ayant des masses planétaires orbitant des étoiles jeunes assez massives (G–F–A) indépendamment de leur séparation à l'aide de la nouvelle génération de spectrographes échelles infrarouges à haut pouvoir dispersif. Les observations synthétiques réalisées ont permis de conclure que des objets ayant une atmosphère principalement composée de molécules et un contraste allant jusqu'à  $10^{-5}$  avec leur étoile pouvaient être détectés en 1h d'observation avec un instrument comme SPIROU. L'emploi d'algorithmes utilisant la corrélation croisée et d'algorithmes de soustraction des spectres inspirés de ceux utilisés en imagerie différentielle permet d'extraire la signature spectrale de la planète.

**Mots-clés : Naines brunes, exoplanètes, étoiles jeunes, images d'archive, traitement d'image, spectroscopie IR à grande résolution**





# ABSTRACT

---

Decades of astronomical data collection provided by dedicated instruments have led to a large amount of images taken at different wavelengths, resolutions and depths of field that remain, for the most part, unexploited (eg 2MASS , WISE, SPITZER, SDSS). Developments of new data processing algorithms gives a new value to these images taken years earlier. This project aims at discovering new low-mass companions with large separations around young low-mass stars (M-type) using archive images. 2MASS  $J$ ,  $H$  and  $K_s$  band images were used to identify the candidates. Seven candidates were identified using a combination of two algorithms that were applied on a judicious selection of 2 812 stars. The method combined a point spread function subtraction algorithm based on a linear combination of reference stars and an algorithm inspired by differential imaging. Five of them had already been identified by other teams. One was probably an M9 star from the field and the other an L3 $\beta$ , potentially a member of the young association AB Doradus. This research confirms, like others before, the low occurrence rate of planetary mass and brown dwarf companions at large separations ( $\gtrsim 100$  AU) around young low mass stars. This conclusion led us to develop of an alternative detection method sensitive to companions on short orbits ( $< 40$  AU). This second project, partially completed, aims to demonstrate that it is possible to detect objects with planetary masses orbiting young sun-like stars (G–F–A) regardless of their separation. This is possible thanks to the new generation of high dispersion infrared spectrographs. Spectral processing applied on synthetic observations has confirmed that one can detect objects with an object/star brightness ratio down to  $10^{-5}$ . Only 1h exposure time with an instrument like SPIROU is enough to detect companions with an atmosphere mainly composed of molecules. The spectral processing consists of cross-correlation and spectral subtraction algorithms inspired by methods used in differential imaging.

**Keywords:** Brown dwarfs, exoplanets, young stars, archive images, image processing, high-resolution IR spectroscopy



# Table des matières

---

<b>Résumé</b> .....	i
<b>Abstract</b> .....	iii
<b>Liste des tableaux</b> .....	ix
<b>Liste des figures</b> .....	xi
<b>Liste des abréviations</b> .....	xv
<b>Dédicace</b> .....	xvii
<b>Remerciements</b> .....	xix
<b>Chapitre 1. L'étude des exoplanètes et des naines brunes</b> .....	1
1.1. Introduction.....	1
1.1.1. Contexte de l'étude des exoplanètes.....	1
1.1.2. Définition des exoplanètes et des naines brunes.....	2
1.2. Propriétés physiques des naines brunes et planètes géantes gazeuses.....	3
1.2.1. Structure interne et évolution.....	3
1.2.2. Atmosphère.....	5
1.2.3. Formation.....	7
<b>Bibliographie</b> .....	11
<b>Chapitre 2. Méthodes de détection et de caractérisation des exoplanètes</b> .....	13
2.1. Vélocimétrie.....	13
2.2. Transit.....	14
2.3. Imagerie directe.....	16
2.4. Spectroscopie de transit et spectroscopie à grande dispersion.....	19

2.5.	Imagerie directe combinée à la spectroscopie à grande dispersion .....	22
2.6.	État de la recherche des exoplanètes et des naines brunes .....	22
2.7.	Ce travail.....	25
2.7.1.	Détection de planètes géantes gazeuses et naines brunes jeunes à grande séparation par imagerie directe .....	26
2.7.2.	Détection de planètes géantes gazeuses jeunes par spectroscopie infrarouge à grande dispersion à partir du sol.....	27
2.7.3.	Déclaration de l'étudiant .....	29
<b>Bibliographie .....</b>		<b>31</b>
<b>Chapitre 3. BANYAN. X. DÉCOUVERTE D'UN COMPAGNON DE TYPE L MONTRANT DES SIGNES DE FAIBLE GRAVITÉ À GRANDE SÉPARATION D'UNE ÉTOILE À ROTATION RAPIDE DE TYPE M.....</b>		<b>35</b>
3.1.	Introduction.....	36
3.2.	Survey sample.....	37
3.3.	Identification of candidate companions.....	37
3.4.	Observations .....	40
3.4.1.	CPAPIR Imaging.....	40
3.4.2.	Spectroscopy .....	41
3.4.2.1.	ESPaDOoS at CFHT.....	41
3.4.2.2.	FIRE at Magellan/Baade.....	41
3.4.2.3.	SpeX at IRTF .....	42
3.5.	Results and analysis .....	42
3.5.1.	Host Star Spectral Properties.....	42
3.5.2.	Companion Spectral Properties .....	45
3.5.3.	Common Proper Motion .....	47
3.6.	Membership to young associations .....	49
3.7.	Discussion.....	56
3.8.	Summary and conclusions .....	58
Acknowledgments .....		58

<b>Bibliography</b> .....	61
<b>Chapitre 4. Conclusion</b> .....	71



# LISTE DES TABLEAUX

---

3. I	Sources for the young star sample .....	39
3. II	Properties of the two companions discovered in this survey. ....	54





# LISTE DES FIGURES

---

1.1	Courbes d'évolution des étoiles de faible masse (bleues), des naines brunes ( $13 M_{\text{Jup}} - 75 M_{\text{Jup}}$ ; vertes) et de planètes géantes gazeuses (rouges). Les points colorés correspondent au moment où 50% du deutérium (brun) et où 50% du lithium (magenta) ont été brûlés. Figures tirées de Burrows et al. [2001]. . . . .	4
1.2	Dépendance entre le rayon et l'âge des étoiles de faibles masses (bleues), des naines brunes (vertes) et des planètes géantes gazeuses (rouges). Figure tirée de Burrows et al. [2001]. . . . .	5
1.3	Couches de gaz et de nuages pour Jupiter ( $\sim 160$ K), des naines T (800 à 1200 K), des naines L (1200 à 2000 K) et des objets près de la transition entre le type M et L ( $\lesssim 3000$ K). Les couches de nuages et de gaz des objets chauds se retrouvent aussi dans les objets plus froids, mais en profondeur dans leur atmosphère. Figure de Lodders [2004] . . . . .	7
2.1	Distribution des exoplanètes connues en fonction de leur masse ( $M$ ou $M \sin i$ ) et de leur séparation (réelle ou projetée). Le symbole de chaque planète détermine par quelle méthode celle-ci fut découverte. Les cercles noirs <i>Transit</i> indiquent les planètes découvertes par la méthode du transit et dont la masse a été déterminée par un suivi en vitesse radiale. Les cercles jaunes <i>Transit R</i> représentent les planètes détectées par transit dont la masse a été estimée de leur rayon en assumant une certaine densité. Les planètes du système solaire sont également indiquées par la première lettre de leur nom. Bien que ce graphique date de juillet 2015, le portrait global de la distribution des exoplanètes est resté inchangé. À noter que les deux planètes représentées par les étoiles rouges à une séparation de $10^{-2}$ UA sont mal identifiées comme des planètes imagées. Ce sont plutôt des candidates du relevé Kepler. Les données sont tirées de <i>The Extrasolar Planets Encyclopaedia</i> à <a href="http://exoplanet.eu/">http://exoplanet.eu/</a> . . . . .	25

3.1	2MASS and DSS- <i>r</i> 36"×36" frames around 2M1219+0154 and 2M2250+2325. The original 2MASS frames and the resulting signal-to-noise maps from the PSF-subtracted 2MASS frames are displayed in the first two columns, and the three rows correspond to the <i>J</i> , <i>H</i> and <i>K<sub>S</sub></i> bands. The third column shows the PSF-subtracted DSS- <i>r</i> frame. The white circles outline the position of the companion in the 2MASS residual images. ....	40
3.2	Optical spectra of 2M1219+0154 A and 2M2250+2325 A (black lines) compared with known M2.5–M5 dwarfs spectra (colored lines). Colored lines correspond to the spectral types specified on the left side of the figure panels. The ESPaDOnS spectra were convolved and re-sampled to match the spectral resolution and dispersion relation of the literature spectra, and all spectra were normalized to a unit median. Both objects are best matched by the M3 dwarf 2MASS J03364896–2418011. ....	44
3.3	Full-resolution ESPaDOnS spectral flux density of 2M1219+0154 A and 2M2250+2325 A in arbitrary units. The H $\alpha$ emission lines at 6562.8 Å are clearly visible in both objects, but no lithium absorption is detected at 6708 Å.	45
3.4	Comparison of the near-infrared SpeX/IRTF spectral flux density of 2M2250+2325 B (black line) compared to field and low-gravity L3 and L4 dwarf templates from Gagné et al. (2015a; colored lines). The spectrum of 2M2250+2325 B was convolved at the resolution of the template spectra, and each band was normalized individually to its median value to facilitate a comparison of the spectral features. The grey regions display the scatter in individual spectra used to construct the comparison templates, and the vertical black lines indicate the error bars on the convolved 2M2250+2325 B spectrum. The grey text in each figure cell indicates how far the zero flux level lies below the window, in fractional units of the full figure cell vertical range. 2M2250+2325 B is best matched visually by the L3 $\beta$ template. ....	46
3.5	Separation and position angle of 2M1219+0154 A and 2M1219+0154 B at the three available epochs. A hundred random draws of the posterior probability distribution in separation and position angle temporal evolution are displayed as gray lines. These measurements are consistent with 2M1219+0154 A and B being co-moving. ....	48
3.6	Separation and position angle of 2M2250+2325 A and 2M2250+2325 B at the three available epochs. A hundred random draws of the posterior probability	

	distribution in separation and position angle temporal evolution are displayed as gray lines. These measurements are consistent with 2M1219+0154 A and B being co-moving.....	49
3.7	Color image of the 2M2250+2325 AB system built from the CPAPIR <i>J</i> (blue), <i>H</i> (green) and <i>K</i> (red) images. 2M2250+2325 B appears much redder than background stars in the field of view. ....	50
3.8	Predicted <i>XYZ</i> Galactic position and <i>UVW</i> space velocity of 2M2250+2325 A (red circles) obtained by adopting the statistical kinematic distance that maximizes the BANYAN II membership probability. Known members of ABDMG are represented with black circles, and orange thick lines show the multivariate Gaussian model of ABDMG used in BANYAN $\Sigma$ , which is an updated version of the BANYAN II model (Gagné et al., submitted to ApJS). The 2D projections show 1, 2 and $3\sigma$ contours of the model and the 1D and 3D projections show a $1\sigma$ contour only. 1D projections of the ABDMG models are also compared with histograms of the member positions in <i>XYZUVW</i> space.....	51
3.9	Near-infrared color-magnitude diagram of low-mass stars and substellar objects. Field objects are displayed as black diamonds, young objects are displayed as purple rightward triangles, and the known companions recovered in this survey are displayed as orange circles. 2M2250+2325 B is displayed as a thick red star, and falls in the locus of young L dwarfs that have redder near-infrared colors than the field sequence.....	57



# LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

2MASS	Two Micron All-Sky Survey
AU	Astronomical unit
CoRoT	COncvection, ROtation and planetary Transits
ELT	Extremely Large Telescope
HARPS	High Accuracy Radial velocity Planet Searcher
FÉP	Fonction d'étalement du point, de l'anglais <i>Point Spread Function</i>
IGRINS	Immersion GRating INfrared Spectrometer
$M_{\text{Jup}}$	Masse de Jupiter
NBs	Naines brunes
NIRPS	Near Infra-Red Planet Searcher
OA	Optique adaptative, de l'anglais <i>Adaptative Optic</i>
PLMH	Pleine largeur à mi-hauteur, de l'anglais <i>full Width at Half Maximum</i>
SPIRou	Spectro-Polarimètre Infra-Rouge
UA	Unité astronomique
UAI	Union Astronomique Internationale, de l'anglais <i>International Astronomical Union</i>



# DÉDICACE

---

L'univers est grand et vide, c'est un fait. Heureusement, l'Homme a une capacité inouïe d'aimer et seulement cet amour arrive à remplir ce grand vide. Je dédie donc ce mémoire à ceux que j'aime.





# REMERCIEMENTS

---

Je tiens d'abord et avant tout à remercier mon directeur, René. Merci René d'avoir cru en moi dès le début malgré mon statut d'"undergraduate" et de m'avoir laissé la chance de réaliser un de mes rêves de jeunesse. Je te remercie aussi de ton support, ta tolérance et ta compréhension au cours des dernières années.

À Loïc et à Étienne, mes mentors si patients, qui m'ont toujours guidée, qui m'ont presque tout appris et qui m'ont surtout écoutée. Sans vous, ce parcours universitaire n'aurait pas eu le même sens.

À Julien R., Lison, David, Jonathan G. et Marie-Eve N., merci de m'avoir partagé votre expérience et votre intelligence. Je me suis enrichie auprès de vous.

À tous mes collègues et amis de l'iREx, particulièrement Jonathan St-Antoine, Geneviève, Olivier, Anne, François-René, Frédérique, Antoine, Simon-Gabriel, Simon et Marie-Lou l'imposteure, travailler avec vous et vous côtoyer fut un réel plaisir.

Un merci tout spécial à mes collègues du BSc, Julien G., Nicolas, François et Édouard, sans qui l'obtention de mon diplôme aurait probablement été compromise.

À tous ceux qui ont contribué de près et de loin, ma famille et mes amis, merci.

Enfin, merci Francis.

– Marie-Eve

# Chapitre 1

---

## L'ÉTUDE DES EXOPLANÈTES ET DES NAINES BRUNES

### 1.1. INTRODUCTION

#### 1.1.1. Contexte de l'étude des exoplanètes

La frontière entre les questions d'ordre philosophique et scientifique évolue dans le temps. Ces questions sont distinguables par le fait qu'on puisse, oui ou non, user de la méthode scientifique pour y répondre sur la base de l'objectivité expérimentale. Il émerge du discours philosophique des questions pour lesquelles seules la rhétorique et la confrontation sont applicables. Pourquoi existons-nous ? Qu'y a-t-il après la mort ? Qu'est-ce que l'amour, la peur ou tout autre sentiment, le bien, le mal ? Qu'est-ce que la vie ? La philosophie a son importance pour amorcer et valoriser les questionnements afin qu'il y ait l'émergence de concepts et d'opinions pouvant satisfaire, ou non, le penseur. Or, la science ne peut-elle pas prendre le relais de cette démarche méditative lorsqu'elle le peut ? N'est-ce pas le cas de la neuroscience qui tente de comprendre l'implication du cerveau sur nos cognitions et nos sentiments ? La biologie et la chimie n'essaient-elles pas d'élucider le mystère de la création de la vie ? En physique, la recherche de la place de l'Homme dans l'Univers et sa compréhension du monde qui l'entoure découlent forcément d'un questionnement à la base purement philosophique. La transformation du discours philosophique en discours scientifique opère lorsque l'objectif de répondre impartialement à la question est imaginable et possible. Nous vivons actuellement cette transition grâce à la découverte des premiers objets de masse planétaire orbitant des étoiles autres que le Soleil depuis les années 1990. L'existence de planètes à l'extérieur du système solaire tranche le débat à savoir si d'autres mondes existent, mais permet aussi d'élaborer des méthodes concrètes et applicables permettant la détection de vie ailleurs dans la galaxie. Enfin, le discours philosophique aura finalement été partiellement écarté du concept d'exoplanète et de la recherche de la vie dans l'Univers, mais celui-ci retrouve sa raison d'être

lorsque l'on envisage quelles implications pourrait avoir une telle découverte sur notre vision du monde.

### 1.1.2. Définition des exoplanètes et des naines brunes

Les planètes ont subi plusieurs changements de définition à travers les âges. Elles étaient considérées depuis la nuit des temps comme des astres lumineux bougeant sur la sphère céleste. La découverte d'Uranus semblait confirmer la loi de Titius (1729-1796)-Bode (1747-1826) qui associait la position des orbites des planètes du système solaire à une suite numérique. Cette loi prédisait la présence d'une planète entre Mars et Jupiter. Ainsi débuta la première vague massive de recherche de planètes dans les années 1700. Cérés fut d'abord découvert, suivi de Pallas et de plusieurs autres corps auxquels William Herschel donna le nom d'astéroïdes. La distinction qu'il fit entre astéroïdes et planètes reposait sur le fait que ces nouveaux corps n'étaient pas dans le zodiaque, se déplaçant loin de l'écliptique, et qu'ils étaient beaucoup plus petits que Mercure.

Pluton, découvert en 1930 par l'Américain Clyde Tombaugh, considéré jusqu'en 2006 comme la dernière planète du système solaire, perdit son titre suite à l'assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale (UAI) où une définition scientifique officielle du mot *planète* fut adoptée. Selon cette définition, une planète doit être en orbite autour du Soleil, doit avoir une masse suffisante pour que sa gravité lui confère une forme sphérique et son orbite doit être dépourvue d'autres corps, ce qui n'était pas le cas de Pluton avec la découverte d'Eris et de nombreux autres objets situés au-delà de l'orbite de Neptune.

Remarquons que cette définition n'inclut pas les objets de masse substellaire découverts depuis 1991 autour d'autres étoiles. Encore aujourd'hui, aucune définition officielle n'est donnée de ces astres. Toutefois, par définition, une étoile (sur sa phase principale) est un corps autoproducteur d'énergie par la fusion nucléaire de l'hydrogène. Par des principes de thermodynamique, de mécanique quantique, statistique et nucléaire la masse limite pour qu'il y ait fusion de l'hydrogène dans le cœur de l'étoile doit être  $\sim 80 M_{\text{Jup}}$ , où  $M_{\text{Jup}}$  est la masse de Jupiter. La fusion sur une courte échelle de temps du deutérium reste quand même possible pour des corps ayant une masse  $>13 M_{\text{Jup}}$ . Ces astres possédant des masses entre 13 et  $80 M_{\text{Jup}}$  sont alors nommés *naines brunes* et ceux  $<13 M_{\text{Jup}}$  sont dénommés par le terme *exoplanètes* lorsqu'ils orbitent une étoile autre que le Soleil.

Or, la distinction de ces corps, basée uniquement sur leur masse, est incomplète. Des objets ayant une masse inférieure à la limite du brûlage du deutérium sont parfois trouvés de manière isolés, sans étoile hôte, à la manière d'une naine brune et parfois, des objets ayant des masses supérieures à cette limite sont en orbite autour d'une étoile à la manière d'une

exoplanète. Ce type de naine brune ressemble alors à une version encore plus massive des planètes géantes, elles-mêmes massives et composées principalement de gaz, en une version encore plus massive. Il est donc pertinent de se questionner sur les différences entre les naines brunes compagnons d'une étoile et les planètes massives afin de justifier l'importance d'en faire une distinction. En particulier, une meilleure compréhension des mécanismes de formation de ces deux types d'objets permettrait de mieux identifier la conséquence de leur présence respective dans les systèmes stellaires. La manière dont l'objet de masse substellaire se forme permettrait de définir si un corps est une exoplanète ou bien une naine brune d'une manière plus formelle et utile. Or, aucune méthode observationnelle ne permet d'identifier sans ambiguïté le mode de formation d'un objet en particulier selon ce qui est connu des mécanismes de formation actuellement. Le but de ce projet était d'identifier des compagnons de masse substellaire à grande séparation autour d'étoiles jeunes pour densifier l'échantillon d'objets rares qui aiderait à caractériser les processus de formation des naines brunes et des planètes géantes.

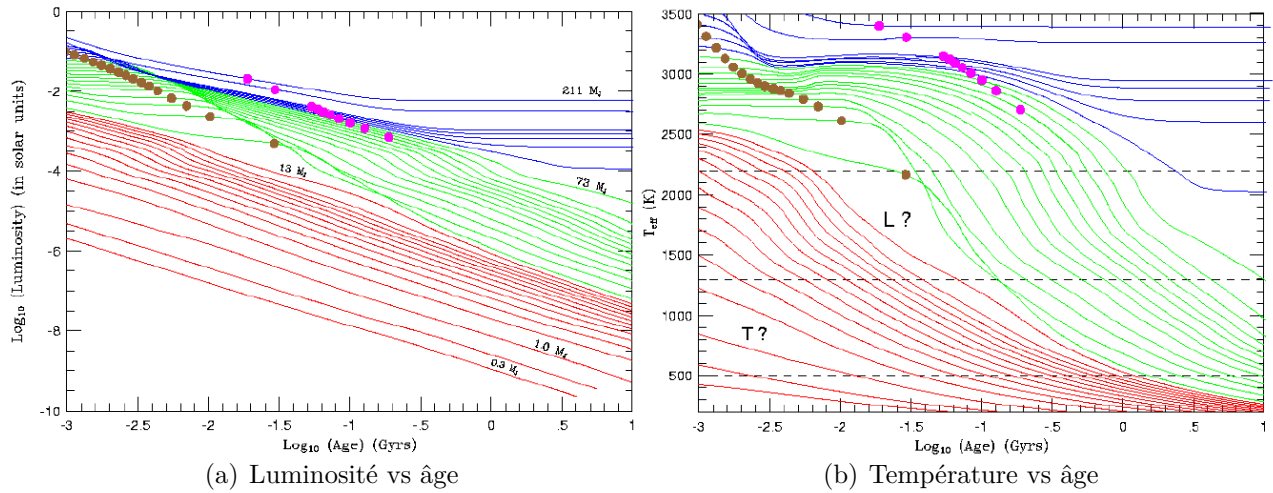
L'étude des modes de formation des planètes géantes gazeuses s'avère un pôle de recherche d'une importance particulière puisque le mécanisme par lequel la planète se forme indique quelle est sa structure interne, sa composition atmosphérique, mais surtout son évolution interne et au sein du système stellaire. Les planètes géantes de notre système solaire, Jupiter spécifiquement, semblent avoir joué un rôle dans l'établissement d'une région stable pour les planètes telluriques, c'est-à-dire les planètes rocheuses de faible masse ayant une fine couche atmosphérique. Par sa forte gravité et ses phases de migration, Jupiter aurait potentiellement généré un moment propice pour que l'eau liquide se retrouve sur certaines planètes et aurait permis d'établir une zone dite *habitable* pour la Terre où la vie a pu se développer. Ainsi, dans le cas des autres systèmes planétaires, il est raisonnable de croire que les planètes géantes gazeuses auraient un rôle tout aussi important dans l'apparition de la vie.

## 1.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES NAINES BRUNES ET PLANÈTES GÉANTES GAZEUSES

Les sous-sections qui suivent se réfèrent principalement à Perryman, Fortney and Nettelmann [2010] et Burrows et al. [2001].

### 1.2.1. Structure interne et évolution

L'hydrogène et l'hélium composent majoritairement les planètes géantes gazeuses et les naines brunes. En prenant Jupiter comme modèle, l'intérieur serait composé possiblement d'un petit coeur rocheux ( $5\text{--}20 M_{\oplus}$ ) à près de 30 000 K et  $\sim 3000$  GPa, de couches internes

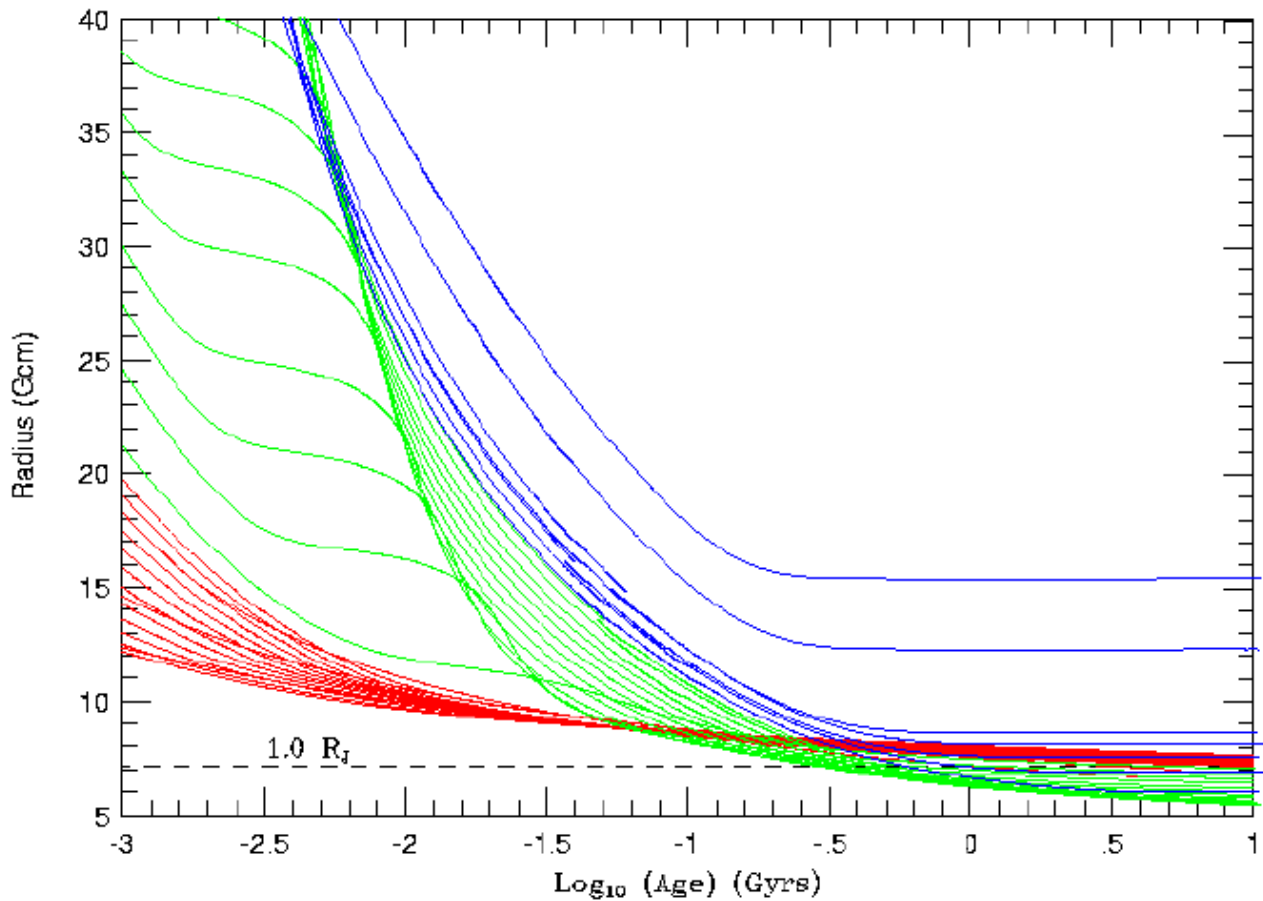


**FIGURE 1.1.** Courbes d'évolution des étoiles de faible masse (bleues), des naines brunes ( $13 M_{\text{Jup}} - 75 M_{\text{Jup}}$  ; vertes) et de planètes géantes gazeuses (rouges). Les points colorés correspondent au moment où 50% du deutérium (brun) et où 50% du lithium (magenta) ont été brûlés. Figures tirées de Burrows et al. [2001].

d'hydrogène et d'hélium métalliques et d'une atmosphère plus tempérée composée de molécules. Le coeur, s'il y en a un, se serait possiblement dilué dans les couches d'hydrogène et d'hélium le recouvrant.

Hormis la radiation reçue de leur étoile, les planètes ne possèdent pas de mécanisme de production d'énergie et se refroidissent graduellement et continuellement suite à leur formation. L'énergie contenue dans les couches intérieures est transportée par des mouvements convectifs induits par l'opacité radiative des couches supérieures. Pour leur part, les naines brunes font la fusion du deutérium et du lithium, mais sur quelques dizaines de millions d'années seulement. Elles se refroidissent ensuite à la manière des planètes géantes gazeuses. La Figure 1.1 montre l'évolution de la luminosité et la température des planètes géantes, des naines brunes et des étoiles de faible masse en fonction de leur âge.

Après environ  $1 \times 10^9$  d'années, le rayon des étoiles très peu massives, des naines brunes et des planètes géantes se stabilise autour de  $1 R_{\text{Jup}}$  avec une variation d'au maximum 30%. C'est la compétition entre les forces de Coulomb et la dégénérescence des électrons dans leurs couches internes qui détermine la relation entre leur masse et leur rayon. Par la force de Coulomb, les électrons se positionnent de façon à atteindre une densité maximale et un espacement interparticule minimal conduisant à la relation masse-rayon  $R \propto M^{1/3}$ . La dégénérescence des électrons survient lorsque les températures internes sont insuffisantes pour maintenir les particules dans leurs niveaux d'énergie supérieurs. La pression des électrons dégénérés mène à la relation connue dans le cas des naines blanches soit  $R \propto M^{-1/3}$ .



**FIGURE 1.2.** Dépendance entre le rayon et l'âge des étoiles de faibles masses (bleues), des naines brunes (vertes) et des planètes géantes gazeuses (rouges). Figure tirée de Burrows et al. [2001].

Grossièrement, la combinaison de l'effet de Coulomb et de la dégénérescence annule la dépendance de la masse sur le rayon. La Figure 1.2 illustre l'évolution du rayon pour différentes masses.

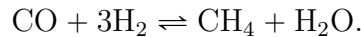
Dans le cas des naines brunes, la pression de radiation engendrée par la fusion nucléaire du deutérium s'oppose temporairement à l'effondrement gravitationnel, ce qui stabilise le rayon. Ce phénomène se constate à la Figure 1.2 où les courbes vertes présentent un ralentissement de la décroissance du rayon après quelques millions d'années.

### 1.2.2. Atmosphère

Contrairement aux étoiles sur la séquence principale, les objets de plus faible masse subissent des changements importants dans leur atmosphère à mesure qu'ils évoluent et se refroidissent. Leur composition chimique reste principalement la même, du H, He, C,

N, O et des traces de métaux, mais se présente à différentes altitudes et dans différentes compositions moléculaires selon les températures. La chimie atmosphérique des planètes géantes gazeuses est généralement la même que pour celle des naines brunes pour des températures effectives similaires. Théoriquement, la présence de composés deutérés dans l'atmosphère des planètes les distingue des naines brunes pour lesquelles le deutérium a été appauvri.

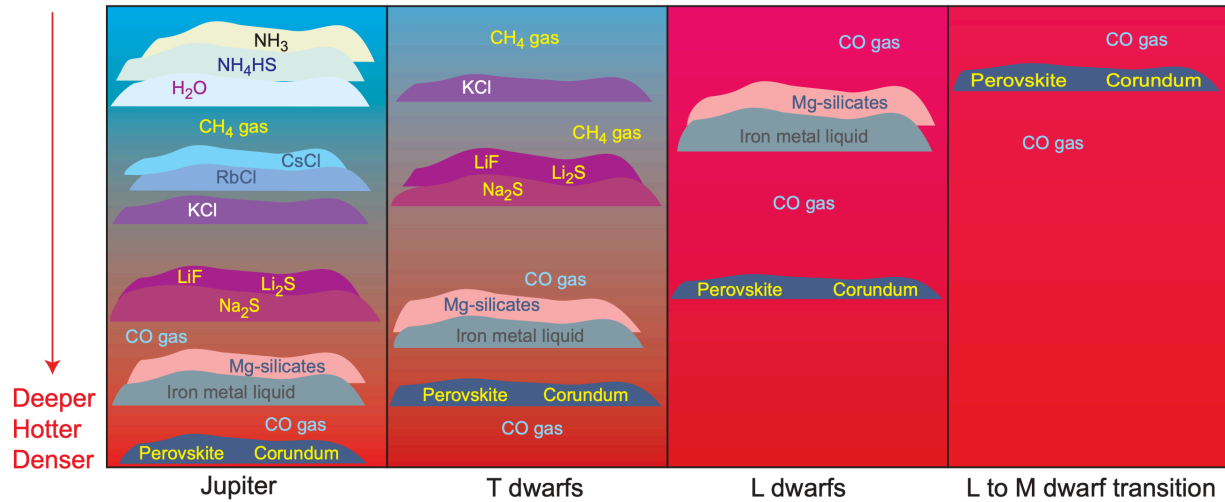
La majorité de l'hydrogène est sous forme moléculaire dans l'atmosphère. La distribution du carbone et de l'oxygène suit la relation d'équilibre



Pour des températures élevées et de faibles pressions (e.g.  $T \gtrsim 1500$  K,  $P \lesssim 1 \times 10^5$  Pa), la réaction favorise la formation du CO au détriment du CH<sub>4</sub> et du H<sub>2</sub>O et vice-versa lorsque l'équilibre chimique est atteint. L'azote est sous forme moléculaire pour des températures  $> 700$  K et sous forme de NH<sub>3</sub> autrement. L'abondance des espèces chimiques régies par l'équilibre thermodynamique est aussi affectée par la condensation des éléments en nuages. La condensation survient lorsqu'une bulle de gaz qui monte et se refroidit dans l'atmosphère de manière adiabatique atteint un point de saturation. Ce phénomène génère des nuages de ce condensat. Ce point est plus facilement atteint pour la majorité des composés condensables (composés métalliques, sels, molécule d'eau, etc) pour des atmosphères avec  $T < 1500$  K. La formation de nuages appauvrit l'atmosphère d'éléments utiles pour les réactions chimiques, mais aussi, dû à leur opacité, les nuages masquent l'absorption des gaz situés plus profondément et augmentent l'albédo en surface. Les nuages transforment de manière significative l'apparence des spectres et constituent un défi lorsque vient le temps de mesurer les abondances chimiques dans les atmosphères de naines brunes et de planètes.

Les molécules de gaz et les condensats coulent dans l'atmosphère dû à la gravité et enrichissent les régions où les pressions (et les températures) permettent leur existence. Une substance dont l'énergie de liaison est faible se retrouvera donc à des températures basses, c'est-à-dire à de hautes altitudes et vice-versa. La Figure 1.3 montre qualitativement quelles espèces chimiques sous forme gazeuse et sous forme de nuages sont présentes en fonction de la profondeur pour des objets ayant des températures variant de 160 K à 3000 K.

Les atmosphères dominées par les molécules présentent un grand degré de complexité lorsque vient le temps de comprendre leur distribution spectrale d'énergie. L'opacité, qui est généralement dominée par les atomes et leurs ions, dans le cas des étoiles, est ici dominée par les molécules qui possèdent un plus grand éventail ( $10^2 - 10^3 \times$ ) de transitions possibles. Ces très nombreuses raies moléculaires sont regroupées généralement dans l'infrarouge,



**FIGURE 1.3.** Couches de gaz et de nuages pour Jupiter ( $\sim 160$  K), des naines T (800 à 1200 K), des naines L (1200 à 2000 K) et des objets près de la transition entre le type M et L ( $\lesssim 3000$  K). Les couches de nuages et de gaz des objets chauds se retrouvent aussi dans les objets plus froids, mais en profondeur dans leur atmosphère. Figure de Lodders [2004]

dans les bandes  $J$  ( $1,25\mu\text{m}$ ) –  $H$  ( $1,65\mu\text{m}$ ) –  $K$  ( $2,2\mu\text{m}$ ) mais surtout dans l’infrarouge plus lointain. Aux résolutions instrumentales habituelles dans l’infrarouge ( $R \lesssim 18000$ ), ces raies moléculaires (e.g. H<sub>2</sub>O et H<sub>2</sub>) ne sont pas résolues et forment des bandes moléculaires relativement larges dans le spectre. Pour compenser cette absorption en infrarouge, le flux est réémis dans la section bleue du spectre d’émission. Les spectres de ces objets sont donc bleus par rapport à l’émission normale d’un corps noir. Le cas des objets jeunes ( $\lesssim 500$  Ma) et/ou chauds ( $\gtrsim 1800$  K) est différent. Ceux-ci présentent un spectre rougi par la présence de grains de poussière de silicate (des nuages) haut dans leur atmosphère.

Enfin, le type spectral de ces objets sans source interne d’énergie change à mesure qu’ils se refroidissent. Leur type spectral n’est donc pas simplement dépendant de leur masse, mais aussi de leur âge.

### 1.2.3. Formation

La structure interne et l’atmosphère des naines brunes et des planètes géantes gazeuses sont mal comprises dû à leur grande complexité, mais aussi au manque de connaissances sur la manière dont se forment ces objets.

Deux hypothèses se font concurrence concernant la formation des planètes géantes gazeuses. À la manière d’une planète tellurique, la coagulation de planétésimaux dans le disque protoplanétaire forme un coeur solide sur lequel s’accumule du gaz. Dans le cas des planètes géantes gazeuses, la masse du noyau atteint une masse critique ( $5 - 20 M_{\oplus}$ )



qui déclenche une accumulation exponentielle et ininterrompue du gaz environnant jusqu'à épuisement. En l'absence de migration importante ( $> 5$  UA), le meilleur endroit pour former des planètes géantes gazeuses par le mécanisme d'accrétion sur le coeur est entre 5 et 10 UA pour une étoile de type solaire. À ces distances, la densité de matières solides et gazeuses est suffisante pour engendrer la formation avant que le disque protoplanétaire se dissipe (5 – 10 Ma). Le disque doit aussi être de dimension suffisante pour que le noyau atteigne la masse critique. Cette dépendance sur la taille du disque est observable par la corrélation positive observée entre la prévalence des géantes gazeuses et la masse de l'étoile.

Le mécanisme de formation par instabilité gravitationnelle dans le disque permet de mieux expliquer la présence de planètes sur de longues et très longues orbites ( $> 15$  AU). Celui-ci stipule que la contraction de gaz condensé pourrait former rapidement des objets de masse planétaire. La sédimentation et la coagulation des grains de poussière ramassés durant la phase de contraction formeraient le noyau de ces planètes. Ce modèle est moins accepté que le premier puisque les mécanismes de migration des protoplanètes permet aussi d'expliquer la présence de planètes géantes sur de longues et sur de courtes orbites.

La migration des noyaux de planètes survient à cause de l'interaction gravitationnelle avec d'autres embryons ou même avec le disque lui-même. Les simulations démontrent que la migration peut s'étendre sur des dizaines d'AU.

La densité de naines brunes ( $0,1 \text{ pc}^{-3}$ ) étant comparable à celle des étoiles sur la séquence principale ( $0,14 \text{ pc}^{-3}$ ) dans le voisinage solaire, il est raisonnable de croire que le même processus est à l'origine de leur formation. Or, afin que l'effondrement gravitationnel dans les nuages moléculaires puisse se produire, la pression interne d'une parcelle de gaz doit être insuffisante par rapport à la gravité qui la maintient. L'équilibre est brisé lorsque la masse du nuage excède une masse critique, la masse de Jeans, pour une température et un rayon donné. Le problème est le suivant, la masse des naines brunes est environ deux ordres de grandeur inférieure à la masse moyenne de Jeans dans les régions de formation d'étoiles. La formation des naines brunes est possible dans les nuages moléculaires lorsque la turbulence supersonique (e.g. l'onde de choc d'une supernova dans le voisinage) crée des zones de surdensité où l'effondrement gravitationnel peut être déclenché pour des masses  $< 100 M_{\text{Jup}}$ . La fragmentation turbulente pourrait aussi expliquer, en partie, la formation des objets de masse planétaire (parfois nommés planémos) retrouvés de manière isolée dans les groupes d'étoiles jeunes. Les planémos n'auraient donc pas de coeur rocheux et/ou solide contrairement aux planètes formées dans un disque proto-planétaire. Ce processus n'exclut pas la formation de systèmes binaires de naines brunes, d'étoiles de faible masse + naines brunes, de naines brunes + "planémos" ou même d'étoile de faible masse + "planémos". Dans ces cas, les "planémos" ressembleraient à des planètes sans possibilité de les distinguer

des "vraies" planètes. Ce processus semble mieux expliquer la présence d'objets de masse sub-stellaire ou même planétaire sur des orbites  $> 100$  AU autour d'étoiles de faible masse.



# Bibliographie

---

A. Burrows, W. B. Hubbard, J. I. Lunine, and J. Liebert. The theory of brown dwarfs and extrasolar giant planets. *Reviews of Modern Physics*, 73(3) :719–765, 9 2001. ISSN 0034-6861. doi : 10.1103/RevModPhys.73.719.

J. J. Fortney and N. Nettelmann. The Interior Structure, Composition, and Evolution of Giant Planets. *Space Sci Rev*, 152 :423–447, 2010. doi : 10.1007/s11214-009-9582-x.

K. Lodders. Brown Dwarfs—Faint at Heart, Rich in Chemistry. *Science*, 303(5656) :323 LP – 324, 1 2004. doi : 10.1126/science.1092865.

M. Perryman. *The Exoplanet Handbook*. 2nd editio edition. ISBN 978-1-108-41977-2.



# Chapitre 2

---

## MÉTHODES DE DÉTECTION ET DE CARACTÉRISATION DES EXOPLANÈTES

Ce chapitre décrit trois principales méthodes de détection d'exoplanètes et deux méthodes plutôt utilisées pour les caractériser. D'autres méthodes communément mentionnées dans la littérature telles que la détection par astrométrie et par amplification par effet de lentille gravitationnelle ne seront pas discutées par souci de concision. Les méthodes présentées peuvent aussi s'appliquer à la détection et à la caractérisation des naines brunes.

### 2.1. VÉLOCIMÉTRIE

L'interaction gravitationnelle qu'exerce une étoile sur une planète engendre son mouvement orbital autour du centre de masse du système. L'étoile orbite elle aussi autour du centre de masse avec la même période puisqu'elle est soumise à la même force gravitationnelle. Or, le déplacement de l'étoile est petit à cause de sa masse substantiellement plus grande, le rendant difficilement mesurable directement<sup>1</sup>. Un mouvement se caractérise par une vitesse qui, elle, est mesurable par vélocimétrie à l'aide de la spectroscopie à grande résolution. La vitesse d'une étoile projetée sur la ligne de visée (vitesse radiale) se mesure en observant le déplacement de ses raies spectrales dû à l'effet Doppler. Le mouvement induit par la planète se traduit par une courbe de vitesse radiale oscillante, sinusoïdale dans le cas d'une orbite circulaire, passant au positif lorsque l'étoile s'approche de l'observateur et au négatif lorsqu'elle s'éloigne. La périodicité des oscillations donne une mesure directe de la période orbitale, leur forme permet de déterminer l'excentricité tandis que leur amplitude est une mesure de la masse minimale de la planète ( $M_p \sin i$ ) où  $i$  est l'inclinaison de l'orbite.

---

1. Jusqu'à présent, les relevés astrométriques du ciel (e.g. Hipparcos ; Perryman et al. [1997]) n'étaient pas suffisamment précis pour observer les mouvements projetés sur le ciel des étoiles causés par la présence d'une planète. L'astrométrie n'a donc pas été largement utilisé pour détecter de nouvelles candidates. La mission spatiale *Gaia* [Gaia Collaboration, 2016, 2018], lancée en 2013, a pour objectif de mesurer à répétition sur 5 ans et précisément (de l'ordre de  $10^{-5} - 10^{-6}$  ") la position d'un milliard d'étoiles ce qui rendra possible la détection de plusieurs milliers de planètes par astrométrie. La détection du mouvement permet également une mesure des masses dynamiques des corps.

Une inclinaison de  $0^\circ$  signifie que l'orbite est dans le plan du ciel. La planète n'induit pas de mouvements radiaux à l'étoile dans ce cas. La demie amplitude de la vitesse radiale de l'étoile ( $K$ ) est donnée par l'équation suivante

$$K = \left( \frac{2\pi G}{P_{orb}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin i}{(M_s + M_p)^{\frac{2}{3}} \sqrt{1 - e^2}} \quad (2.1)$$

où  $G$  est la constante gravitationnelle,  $P_{orb}$  est la période orbitale,  $M_p$  est la masse de la planète,  $i$  est l'inclinaison de l'orbite de la planète,  $M_s$  est la masse de l'étoile et  $e$  est l'excentricité de l'orbite.

Pour une orbite circulaire avec  $M_p \ll M_s$ , l'équation 2.1 se réécrit

$$K = 28,4 \left( \frac{P_{orb}}{1 \text{ an}} \right)^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{M_p \sin i}{M_{Jup}} \right) \left( \frac{M_s}{M_\odot} \right)^{-\frac{2}{3}} \text{ m/s} \quad (2.2)$$

où  $M_{Jup}$  est la masse de Jupiter et  $M_\odot$  est la masse du Soleil. L'équation 2.2 démontre que l'amplitude des variations est généralement de l'ordre des m/s.

Cette technique fut utilisée par Mayor and Queloz [1995] pour détecter la première exoplanète en orbite autour d'une étoile sur sa séquence principale, 51 Peg b. Cette planète géante gazeuse possède une période de quelques jours ; le nom de Jupiter chaude sera alors donné à ce genre de planète géante en orbite rapprochée de son étoile.

La méthode par vélocimétrie favorise la détection de planètes massives sur une orbite rapprochée (la force gravitationnelle diminuant en  $1/r^2$  où  $r$  est la séparation instantanée entre les 2 corps). Les planètes sur de longues orbites ( $>15$  ans) sont d'autant plus désavantagées par le manque de mesures sur le temps d'une orbite complète. La précision sur la vitesse radiale dépend également de la nature de l'étoile qui doit posséder un spectre suffisamment riche en contenu spectral pour atteindre un bon signal sur bruit sur la mesure du déplacement des raies. La précision s'améliore en fonction du nombre de raies utilisées pour la mesure. Une résolution de l'ordre de  $\lambda/\Delta\lambda \sim 100\,000$  est un bon compromis entre le nombre de raies résolues et le signal sur bruit atteint pour chacune d'entre elles, ce qui s'avère souvent une résolution requise pour les spectrographes dédiés à la recherche d'exoplanètes. La combinaison avec une grande couverture spectrale est un avantage considérable pour atteindre des précisions en vitesse allant jusqu'au m/s.

## 2.2. TRANSIT

Le phénomène d'une planète passant devant son étoile du point de vue d'un observateur est nommé *transit* ou *transit planétaire*. Un transit entraîne l'occultation d'une partie

du disque stellaire et fait diminuer temporairement la luminosité de l'étoile. Un suivi photométrique précis d'une étoile permet de révéler la présence en orbite d'un corps plus froid, e.g. une planète, si des baisses périodiques de sa brillance sont détectées. La diminution de la luminosité est égale à la fraction de l'aire du disque de l'étoile bloqué par celui de la planète. Ainsi,  $\Delta F/F = R_p^2/R_e^2$  où  $R_p$  et  $R_e$  sont respectivement le rayon de la planète et de l'étoile. Le transit offre l'opportunité unique de connaître le rayon des objets en orbite de manière observationnelle en supposant que le rayon de l'étoile est connu. Cette particularité rend la détection de planètes par la méthode du transit utile pour leur caractérisation. Or, la probabilité que la ligne de visée d'un observateur soit favorable pour détecter un transit est faible. Pour une planète comme la Terre sur une orbite circulaire à 1 UA autour d'une étoile de rayon équivalent à celui du Soleil, la probabilité qu'un observateur soit bien aligné pour voir l'occultation est de 0,5% en utilisant la définition basée sur la fraction de la sphère céleste couverte par l'ombre de la planète proposée par Borucki and Summers [1984]  $p = R_e/a$  où  $p$  est la probabilité et  $a$  est le demi-grand axe de l'orbite de la planète. Cette définition suppose que  $R_p \ll R_e$ . Ainsi, les planètes susceptibles d'être détectées par cette méthode sont celles ayant une période orbitale courte (de l'ordre de quelques heures à quelques jours) et/ou une inclinaison  $i \simeq 90^\circ$ . Ces restrictions réduisent considérablement les chances de détection. La stratégie adoptée pour détecter des planètes à l'aveugle par cette technique est donc d'observer une très grande quantité d'étoiles simultanément.

Les premières observations de transits d'exoplanètes ont été réalisées sur des systèmes préalablement découverts par vitesse radiale. Une planète sur une inclinaison  $\simeq 90^\circ$  devrait passer devant son étoile au moment où la vitesse radiale de cette dernière est nulle. C'est donc en faisant des suivis photométriques du système HD 209458, détecté préalablement par vitesse radiale, qu'en 1999 Charbonneau et al. [2000] et indépendamment Henry et al. [2000] observèrent pour la première fois un transit d'exoplanète corroborant la vélocimétrie. Le nombre de transits détectés ne cesse d'augmenter depuis, surtout grâce aux missions spatiales dédiées telles que CoRoT lancé en 2006, Kepler lancé en 2009 et TESS lancé en 2018. Les conditions dans l'espace, où il n'y a ni alternance jour et nuit ni scintillation causée par la turbulence atmosphérique, qui limite la précision à 0,1%, rendent plus efficace l'observation de milliers d'étoiles et permettent même la détection de planètes dont le rayon est inférieur à celui de la Terre. Malgré ces contraintes, certains programmes de détection de transit au sol ont découvert des systèmes planétaires de faibles masses. Le système Trappist-1, détecté en 2015 par l'équipe de Gillon et al. [2017], possédant 7 planètes rocheuses ayant des dimensions similaires à la Terre en est un bon exemple. Dans ce cas, la profondeur des transits était suffisante pour confirmer leur détection à cause de la taille réduite de l'étoile ( $0,115 R_\odot$ ).



La détection de faux-positifs est un phénomène courant dans la recherche de planètes par transit. Afin d'observer une grande quantité d'étoiles simultanément, les instruments sont équipés de détecteurs composés de pixels couvrant chacun plusieurs secondes d'arc sur le ciel (21 "/pixel pour TESS<sup>2</sup>). Il arrive parfois qu'un système d'étoiles binaires éclipsantes en arrière plan se retrouve combiné à l'étoile étudiée. Les binaires éclipsantes sont généralement deux étoiles de taille similaire et non résolues spatialement qui, une fois en éclipse, produisent une baisse considérable (jusqu'à 50%) du flux lumineux. Cette grande variation se traduit dans la courbe de lumière de l'étoile étudiée comme une faible diminution de sa propre luminosité, pouvant laisser croire au transit d'une planète. Pour confirmer la nature de l'objet ayant engendré une baisse de luminosité, il est courant d'avoir recours à l'imagerie. Une meilleure résolution spatiale, fournie par d'autres instruments, permet parfois de détecter la présence des binaires éclipsantes dans le champ de vue de l'étoile. La spectroscopie est un autre moyen pour infirmer une détection. Si aucune variation en vitesse radiale ou bien une variation de l'ordre des km/s est mesurée, la thèse d'un transit planétaire est rejetée. Un suivi spectroscopique permet également, dans certains cas, de voir des raies spectrales dédoublées ayant différentes vitesses suggérant qu'il s'agit plutôt d'un système binaire.

À partir de l'estimation de la masse, de l'inclinaison et du rayon de la planète fournis par son transit et la courbe de vitesse de l'étoile, une idée de sa composition interne peut être déduite de la densité calculée.

### 2.3. IMAGERIE DIRECTE

Prendre une image d'une planète est certainement le moyen le plus sûr d'affirmer sa présence. L'accès aux photons en provenance de la planète est aussi une occasion presque unique de tirer des conclusions sur sa température et sa composition atmosphérique indépendamment des modèles théoriques. Enfin, l'imagerie directe est la seule méthode qui permet d'étudier les régions externes des systèmes planétaires puisque la sensibilité augmente avec la séparation contrairement à toutes autres méthodes. La grande limitation de l'imagerie directe réside dans la présence de l'étoile centrale dont la luminosité est des ordres de grandeur plus grande que celle de la planète. Les photons en provenance des planètes sont généralement noyés dans ceux provenant de l'étoile. Dans le cas de Jupiter, le contraste avec le Soleil est de  $10^{-9}$ . Elle nous serait invisible si nous l'observions de l'extérieur du système solaire.

L'image d'une source ponctuelle, comme une étoile, correspond à la convolution entre la fonction représentant l'objet (une distribution de Dirac pour une source ponctuelle) et

---

2. <https://archive.stsci.edu/tess/>

la fonction d'étalement du point (FÉP ou PSF) du système optique. La lumière d'une source prise en image par un système optique est diffractée puisque l'ouverture du système est finie. Un télescope ayant un miroir principal circulaire sera caractérisé par une FÉP représentée par une fonction d'Airy (tache d'Airy). Une image caractérisée seulement par un patron de diffraction est dite limitée uniquement par la diffraction, de laquelle il n'est pas possible de s'affranchir. En général, il s'ajoute à ce patron de diffraction de la diffusion due à l'atmosphère turbulente traversée par la lumière dans le cas des télescopes au sol. La qualité de l'image est alors dégradée, car l'énergie contenue dans le pic principal du patron d'interférence se redistribue dans les autres franges. Le pic central apparaît alors plus large. La pleine largeur à mi-hauteur (PLMH ou FWHM) du pic de la FÉP est une mesure de la qualité astronomique du ciel; le *seeing*. Plus l'atmosphère est turbulente et plus le seeing est élevé.

Lorsque deux objets sont près l'un de l'autre, il arrive que leurs taches se chevauchent. Il devient donc impossible de les distinguer. Lorsque l'observation est limitée par le seeing, le pouvoir de séparation (la résolution angulaire) est donc équivalent à la mesure du seeing. Dans le cas d'un système optique d'ouverture circulaire limité uniquement par la diffraction, la PLMH du pic central dépend uniquement de la longueur d'onde observée et du diamètre du télescope. Le pouvoir de résolution peut alors s'écrire comme  $\Delta\theta = \lambda/D$  où  $\Delta\theta$  est la séparation angulaire entre les objets dans le ciel,  $\lambda$  est la longueur d'onde observée et  $D$  est le diamètre du miroir. À titre d'exemple, la séparation angulaire minimale théorique entre deux objets pour les résoudre est  $\sim 0,015''$  pour une observation faite à 600nm avec un télescope de 8m de diamètre. Cela correspond donc à une séparation physique de 0,77 UA si la cible se situe à 50 pc.

La résolution spatiale théorique d'un télescope assez grand semble permettre l'imagerie de systèmes planétaires sur des orbites similaires ou plus grandes que celle de la Terre. Or, la séparation minimale théorique pour imager une planète n'est pas réaliste puisque tous les systèmes optiques ont des aberrations; la fabrication elle-même de leurs composantes est imparfaite. Ces défauts engendrent des résidus stables dans le temps dans l'image qui apparaissent comme de la granulation dans l'image. Les télescopes au sol sont aussi soumis à la présence de l'atmosphère. Plusieurs sont équipés de systèmes basés sur des détecteurs de front d'onde et de miroirs déformables et arrivent à corriger en temps réel les erreurs de phase produites par l'atmosphère. Cette technique d'*optique adaptative* (OA) permet de s'affranchir des effets atmosphériques et d'atteindre un profil de FÉP près de la limite de diffraction. Malgré tout, les petites erreurs de phase ne peuvent pas être mesurées par le détecteur de front d'onde et ne peuvent pas être corrigées par le système d'OA, celui-ci étant limitée par l'amplitude de déformation du miroir et le nombre limité de déformations possibles. Ces erreurs ont un temps caractéristique plus court que

le temps d'une exposition. Elles laissent donc un résidu qui se traduit sur l'image comme une sorte de halo de lumière diffusée centrée sur la FÉP. Une planète se situant dans ce halo est pratiquement impossible à détecter, car elle est beaucoup plus faible. Des erreurs de phases, dont le temps caractéristique est de l'ordre du temps d'exposition et qui ne sont pas corrigées par l'OA, engendrent, quant à elles, des résidus sous la forme de tavelures dans le halo. Combiné aux tavelures engendrées par l'optique elle-même, ce bruit est aussi un limitant pour la détection de planètes qui se cacheraient parmi ces tavelures.

Les stratégies adoptées pour espérer trouver des planètes par imagerie directe sont d'observer des systèmes jeunes pour lesquels les contrastes entre les planètes et leur étoile sont plus faibles et d'observer en lumière rouge ou infrarouge pour favoriser une fois de plus le contraste. À elles seules, ces stratégies permettent uniquement de détecter des naines brunes (NBs) très massives et très éloignées ( $>100$  UA) de leur étoile. À ces stratégies s'ajoutent des techniques permettant de diminuer l'intensité du halo de l'étoile et des tavelures résiduelles. L'emploi d'un coronographe consiste à positionner judicieusement un masque dans le système optique. Le masque bloque ou modifie alors la lumière provenant de l'étoile centrale, à la manière d'une éclipse de Soleil, sans affecter celle provenant de la planète. Des méthodes dites d'imagerie différentielle ont aussi pour but de diminuer l'intensité de la FÉP de l'étoile en conservant le signal de la planète. Ces techniques consistent à soustraire de l'image une FÉP la plus représentative possible de l'étoile ne contenant pas le signal de la planète. La FÉP de référence peut être celle d'une ou une combinaison de plusieurs étoiles ressemblantes (e.g. imagerie combinée localement optimisée), elle peut être la FÉP de l'étoile elle-même prise simultanément à des longueurs d'onde où la planète est moins lumineuse (e.g. imagerie différentielle spectrale simultanée, Marois et al. [2006b]) ou bien prise à différentes rotations du champ (e.g. imagerie différentielle angulaire, Marois et al. [2006a]). Le bruit granulé peut, quant à lui, être caractérisé en faisant passer la lumière dans un masque judicieusement troué reproduisant le principe d'un interféromètre. À partir de l'interférogramme obtenu, il est possible d'obtenir de l'information sur l'image n'étant pas affectée par le bruit de tavelure et ainsi révéler la présence d'une planète à des séparations allant en deçà de la limite de diffraction pour l'ouverture considérée. Or, le compagnon doit être assez lumineux étant donné que le masque réduit considérablement la quantité de lumière captée. Ainsi, jusqu'à présent, la technique a été fructueuse seulement pour la détection d'étoiles et de naines brunes binaires.

Des techniques plutôt complexes et des systèmes bien particuliers sont nécessaires pour détecter des planètes par imagerie directe. Ce n'est qu'en 2004 que Chauvin et al. [2004] a détecté le premier objet de masse planétaire, 2M1207b, en utilisant l'optique adaptative en infrarouge. Cette planète orbite à  $\sim 55$  UA une naine brune dont l'âge est estimé à

8 millions d'années. L'utilisation des méthodes d'imagerie différentielle et de réduction de bruit granulé a permis à Marois et al. [2008] d'imager le premier système multiple de planètes géantes gazeuses en 2008.

Vu les défis associés à l'imagerie directe de planète, à peine une trentaine de candidates ont été découvertes jusqu'à présent. Celles-ci sont toutes jeunes, relativement éloignées ( $>20$  UA) de leur étoile et très massives ( $> 5 M_{\text{Jup}}$ ). Plusieurs recherches de planètes à grande séparation ont conclu que leur prévalence est  $<4\%$ , Baron et al. [2018]. Afin d'espérer capter des images de planètes de taille similaire ou inférieure à celle de Jupiter sur des orbites  $<20$  UA, il faudra attendre les télescopes  $>30$  mètres tels que le *Extremely Large Telescope* (ELT) et les télescopes spatiaux dotés d'un coronographe externe.

## 2.4. SPECTROSCOPIE DE TRANSIT ET SPECTROSCOPIE À GRANDE DISPERSION

Seulement une gamme restreinte de planètes très massives arrivent à être imagées directement pour l'instant. La caractérisation de l'atmosphère d'autres types de planètes est toutefois possible pour celles qui transitent. Lors d'un transit planétaire, le disque opaque de la planète bloque une partie du disque stellaire. L'intensité photométrique à toutes les longueurs d'onde est alors réduite. Si la planète présente une atmosphère, une petite partie de la lumière de l'étoile la traversera. L'atmosphère est plus ou moins opaque en fonction de la longueur d'onde due à sa composition chimique. Le rayon de la planète apparaît ainsi plus ou moins grand selon la couleur observée. La présence d'une atmosphère autour d'une planète peut être révélée en mesurant la variation d'intensité lumineuse de l'étoile à différentes longueurs d'onde durant le transit. Les différences dans le spectre de l'étoile hors-transit et durant le transit permettent d'extraire le spectre et donc la composition chimique de l'atmosphère de la planète.

En première approximation, une atmosphère s'étend jusqu'à  $5H$  où

$$H = \frac{kT}{\mu_m g_p} \quad (2.3)$$

est la hauteur caractéristique,  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température de l'atmosphère,  $\mu_m$  est le poids moléculaire moyen de l'élément ou des éléments chimiques composant l'atmosphère et  $g_p$  est la gravité de surface. Le rapport entre l'aire de cet anneau atmosphérique et l'aire du disque stellaire s'écrit alors comme

$$\delta = \frac{\pi(R_p + 5 \times H)^2 - \pi R_p^2}{\pi R_s^2} \quad (2.4)$$

Puisque  $H \ll R_p$ , le terme à la deuxième puissance de  $(R_p + 5 \times H)^2$  est négligeable et 2.4 se réécrit sous la forme

$$\delta = \frac{10R_p H}{R_s^2} \quad (2.5)$$

En combinant les équations 2.3 et 2.5 et en remplaçant  $g_p$  par son expression  $g_p = \frac{GM_p}{R_p^2}$ ,

$$\delta = 10 \times \frac{R_p^3 k T}{GM_p \mu_m R_s^2} \quad (2.6)$$

Finalement, la dépendance sur la densité,  $\rho$  est mise en évidence en réécrivant l'équation de manière adimensionnelle de la manière suivante

$$\delta = 1,1 \text{ppm} \times \left[ \left( \frac{T}{T_\oplus} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_\oplus} \right)^{-1} \left( \frac{\mu_m}{\mu_{m\oplus}} \right)^{-1} \left( \frac{R_s}{R_\odot} \right)^{-2} \right] \quad (2.7)$$

où le symbole  $\oplus$  représente ce qui est attribuable à la Terre et  $\odot$  ce qui est relatif au Soleil. L'équation 2.7 montre que le signal atmosphérique d'une planète identique à la Terre orbitant une étoile comme le Soleil présenterait un signal atmosphérique de 1,1 ppm.

Bien que l'équation 2.6 n'inclue pas les propriétés optiques des composantes de l'atmosphère, elle permet d'estimer l'ordre de grandeur du signal atmosphérique en fonction de paramètres relativement faciles à obtenir ou à déduire. La spectroscopie de transit est particulièrement efficace pour sonder l'atmosphère des planètes de faible densité ayant une atmosphère chaude et composée principalement d'hydrogène moléculaire ( $\mu_m = 2$ ), ce qui est le cas des Jupiter chaudes.

Le défi est de taille pour observer des signaux de quelques centaines de ppm, tout au plus, surtout en présence de l'atmosphère terrestre. Les petites variations dans l'atmosphère de la Terre durant l'observation des transits génèrent un bruit qui limite la détection de l'atmosphère d'exoplanètes. L'utilisation de télescopes spatiaux est donc presque essentielle pour faire de la spectroscopie de transit. La première détection d'une atmosphère d'exoplanète fut réalisée par Charbonneau et al. [2002] en 2002. La technique utilisée consistait à observer avec le télescope spatial *Hubble* une diminution plus importante du flux stellaire lors du transit de HD 209458b pour une bande photométrique centrée sur la région du doublet de sodium à 589,9 nm. L'observation de photométrie multibande fut reproduite à quelques reprises pour d'autres Jupiter chaudes en transit en lumière visible et en infrarouge avec le télescope spatial *Spitzer*. Ces deux régimes de longueur d'onde sont complémentaires puisque les espèces atomiques (H, C, O, CA, Na, K) interagissent avec la lumière visible alors que les molécules comme H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> absorbent dans l'infrarouge.

Les abondances relatives des espèces chimiques peuvent être déduites de la profondeur et de la forme des bandes et des raies moléculaires. La spectroscopie est alors nécessaire pour une étude d'abondance. Le futur télescope spatial James Webb, doté de trois spectrographes opérant dans l'infrarouge, permettra la détection et la mesure de l'abondance d'une grande variété de composantes atmosphériques des Jupiter chaudes et tentera de détecter la présence d'atmosphère sur des planètes moins massives et plus froides telles que les planètes du système Trappist-1. La précision des mesures de spectroscopie de transit est principalement limitée par la stabilité de l'étoile et la précision des mesures de ses paramètres en l'absence d'atmosphère terrestre. Une planète qui transite une étoile ayant un grand champ magnétique et une forte activité qui modifie rapidement sa signature spectrale n'est pas une bonne candidate pour étudier son atmosphère.

L'étude des atmosphères de planètes est accessible à partir du sol par l'emploi de spectrographes infrarouges à grande dispersion ( $R > 50\,000$ ). À haute résolution, les bandes moléculaires sont résolues en raies spectrales dont la vitesse radiale peut alors être mesurée. Le spectre total observé est une combinaison du spectre de l'étoile, du spectre transmis de l'atmosphère de la planète et de celui de l'atmosphère terrestre. Or, comme l'a démontré Snellen et al. [2010], il est possible d'extraire le signal provenant de la planète en mesurant une variation cohérente du décalage Doppler de ses raies; lors de son transit, la vitesse radiale de la planète varie alors que celle de l'étoile varie très peu. L'observation se faisant du sol, la signature spectrale de l'atmosphère de la Terre est en première approximation toujours égale à 0 km/s. La difficulté vient de la faiblesse du signal du spectre transmis. La stratégie adoptée par Snellen, Birkby, Kok, Brogi et autres est alors de déterminer s'il existe une vitesse orbitale qui permette de maximiser les coefficients de la corrélation croisée du spectre d'une molécule spécifique ajustée aux vitesses radiales associées sur l'ensemble des spectres lors du transit. Cette procédure revient alors à amplifier le signal de la planète sans amplifier le signal de l'étoile et de l'atmosphère terrestre. La technique permet également de sonder l'atmosphère des planètes qui ne transitent pas si celles-ci sont suffisamment chaudes comme pour HD 179949b (contraste  $\sim 10^{-4}$ ) où Brogi et al. [2014] ont détecté du CO et du H<sub>2</sub>O dans son atmosphère utilisant le spectrographe CRIRES/VLT à 2,3  $\mu\text{m}$ . Connaissant la vitesse radiale de la planète au cours de son orbite et celle de l'étoile en réaction à ce mouvement, la masse réelle de la planète ainsi que son inclinaison peuvent être mesurées par la troisième loi de Kepler.

Les prochains spectrographes infrarouges à grande dispersion (e.g., SPIRou (2018), , CRIRES+ (2019), NIRPS (2020)) couvriront simultanément de plus grandes plages spectrales que la plupart des spectrographes infrarouges à grande résolution accessible présentement. La plus grande couverture spectrale permet d'utiliser un plus grand nombre de raies

spectrales pour retrouver la signature d'une espèce chimique et ainsi augmenter le signal sur bruit d'une détection.

## 2.5. IMAGERIE DIRECTE COMBINÉE À LA SPECTROSCOPIE À GRANDE DISPERSION

Les méthodes de correction de FÉP présentées à la section 2.3 permettent d'imager des planètes avec des contrastes allant jusqu'à  $10^{-5} - 10^{-6}$  lorsque la configuration du système est favorable. Cette limite est due à la présence de tavelures. De même, la spectroscopie à grande résolution à partir du sol permet d'extraire le spectre d'une planète qui ne transite pas si le contraste de celle-ci est  $>10^{-5}$  dans la plage spectrale couverte. Cette limitation vient du bruit de photons dû à la présence de l'étoile et du bruit induit par l'atmosphère. Snellen et al. [2015] proposent de combiner les deux approches qui, ensemble, permettent de réduire l'influence de leurs limitations respectives. Leur but est de démontrer qu'il est possible d'obtenir une *image spectrale* d'une planète rocheuse dans la zone habitable de sa planète. La méthode proposée requiert un spectrographe de champ intégral (*Integral Field Unit Spectrograph*, IFU) de  $R > 100\,000$  combiné à un système d'optique adaptative installé sur un télescope de 40m de diamètre. Un spectrographe de champ intégral a la capacité de prendre un spectre de plusieurs positions spatiales en même temps. Or, actuellement, un tel instrument avec un aussi grand pouvoir de résolution n'a jamais été construit. La grande dispersion de l'instrument aurait comme résultat de superposer les spectres dans l'image. Pour éviter ce problème, il faut disperser l'image par morceau et répartir judicieusement ces spectres sur de très nombreux détecteurs. Cela peut se faire en utilisant de multiples fibres optiques reliées au spectrographe couvrant chacune un morceau du champ de vision ou par un système optique séparant l'image en plusieurs tranches. Le spectre de la planète serait reconnaissable par rapport à celui des tavelures dans l'image puisque celles-ci sont des reproductions miniatures de la FÉP de l'étoile. La variation en vitesse radiale des tavelures est la même que celle de l'étoile et est donc négligeable face à celle d'une planète. Par un modèle réaliste, Snellen et al. [2015] en concluent qu'il serait possible d'imager une planète rocheuse tempérée dans la zone habitable de  $\alpha$  Centauri A avec un instrument de ce genre.

## 2.6. ÉTAT DE LA RECHERCHE DES EXOPLANÈTES ET DES NAINES BRUNES

En 2018, plus de 3800 exoplanètes sont confirmées. Il existe une grande diversité en masse, en taille et en configuration orbitale parmi ces planètes découvertes. La Figure 2.1 montre comment sont distribuées les exoplanètes en fonction de leur séparation orbitale, leur masse et leur méthode de détection. La méthode du transit est sans aucun doute celle ayant eu le plus de succès. Cette méthode est efficace pour détecter des planètes/naines brunes de  $10 - 20 M_{\text{Jup}}$  jusqu'à des masses semblables à celle de Mercure. Elle est toutefois

limitée à des séparations  $< 1\text{UA}$ . Cela démontre bien que la probabilité de transit diminue en fonction de la séparation.

La méthode des vitesses radiales (RV) permet de sonder des planètes ayant des séparations jusqu'à 10 UA. Cette séparation correspond à une période orbitale de 32 ans pour une étoile de type solaire. Cette limite n'est pas physique, elle est imposée par le temps écoulé ( $\sim 20$  ans) depuis le début des relevés de vitesses radiales. Effectivement, pour confirmer un signal, il faut observer une variation de la vitesse de l'étoile pouvant correspondre à une orbite. Si la planète orbite son étoile en plus de 100 ans, il est probable que la variation en vitesse observée depuis 20 ans (20% de l'orbite) ne soit pas suffisante pour conclure à une détection. La limite inférieure en masse suit approximativement une droite ayant une pente de  $\sim 1/2$ .

En remplaçant  $P_{orb}$  par l'axe semi-majeur  $a$  suivant la troisième loi de Kepler dans l'équation 2.2 et en isolant  $M_p \sin i$

$$\left( \frac{M_p \sin i}{M_{\text{Jup}}} \right) = \frac{K}{28,4} \left( \frac{M_s}{M_{\odot}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{a}{1 \text{ UA}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

où  $K$  est la demi-amplitude de la courbe de vitesse radiale en m/s et  $M_s$  la masse de l'étoile hôte. En supposant que  $M_s$  est toujours  $\sim 1 M_{\odot}$ , la dépendance entre la masse et la séparation peut s'écrire

$$\log \left( \frac{M_p \sin i}{M_{\text{Jup}}} \right) = \frac{1}{2} \log \left( \frac{a}{1 \text{ UA}} \right) + \log \left( \frac{K}{28,4} \right) \quad (2.9)$$

La hauteur de cette droite au-dessus de l'axe des  $x$  dépend de la valeur de la demi-amplitude en vitesse radiale mesurée. La droite représente donc la limite de sensibilité des instruments utilisés pour cette méthode. Dans ce cas, cette limite se situe à  $K \sim 1$  m/s qui représente effectivement la sensibilité des instruments dédiés tels que HARPS. Le manque d'exoplanètes en dessous de cette droite n'est pas physique, mais causé par un manque de sensibilité.

La majorité des planètes/NBs imagées sont situées au-delà de 10 UA et sont systématiquement plus massives que Jupiter. Cela reflète la difficulté à sonder les zones internes des systèmes stellaires par imagerie directe et détecter des planètes de faible luminosité (contraste  $< 10^{-6}$ ). Cette méthode est toutefois la seule qui permette de sonder les régions externes des systèmes. Or, le faible nombre de détections est aussi dû au fait que la prévalence des planètes géantes gazeuses sur de longues orbites, celles qui sont donc accessibles par l'imagerie directe, est très basse ( $< 1\%$ ) [Bowler, 2016].



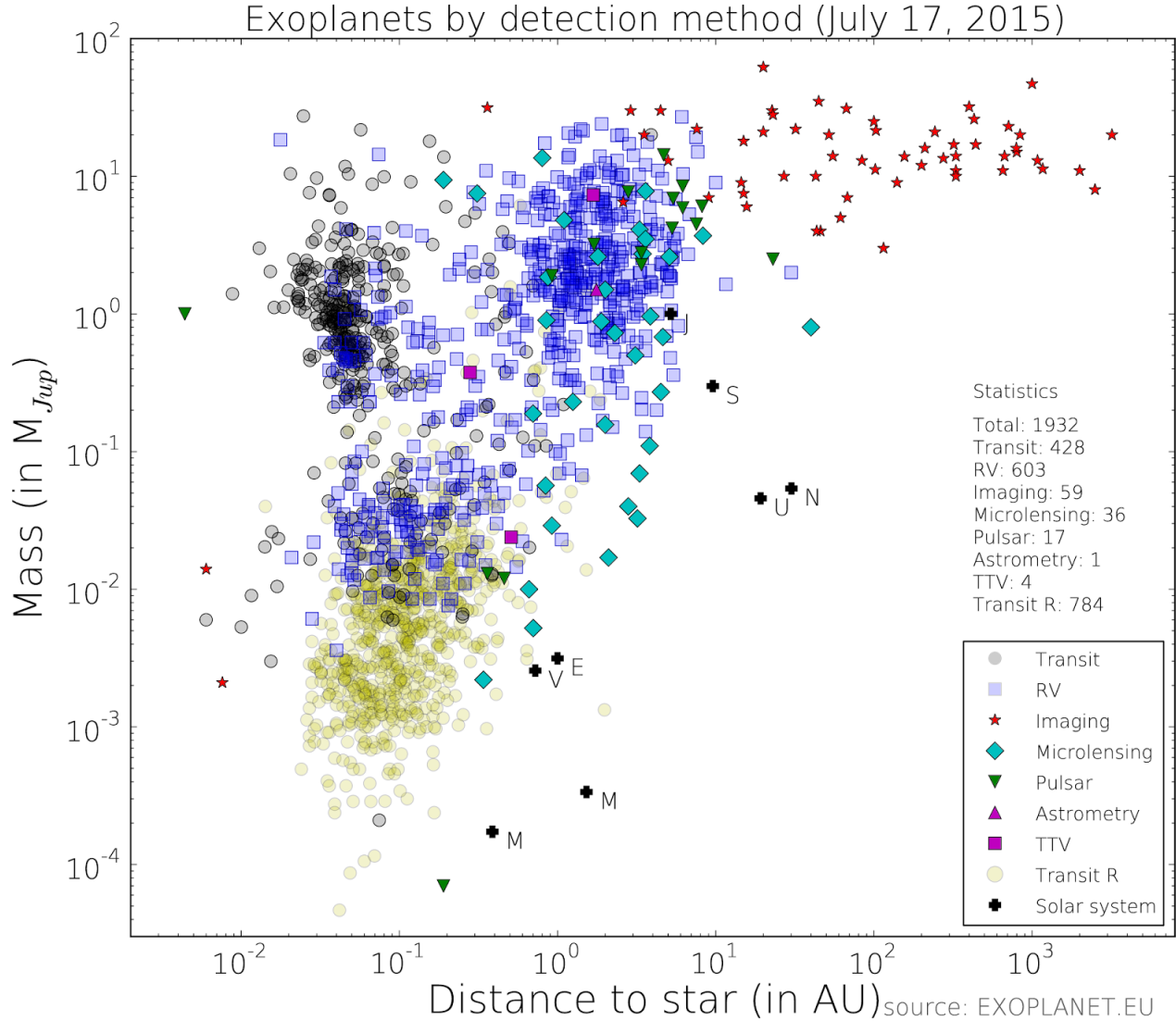
Trois regroupements de planètes sont distinguables à la Figure 2.1. Le premier groupe en haut à gauche rassemble des planètes massives ( $\sim 0,2 - 7 M_{\text{Jup}}$ ) très près de leur étoile. Ce sont les Jupiter chaudes. À droite des Jupiter chaudes, un manque de planètes pour des séparations de  $0,1 - 0,3$  UA est apparent. Celui-ci est une conséquence physique des mécanismes de migration où à ces distances les planètes massives sont instables sur leur orbite et tendent à migrer vers l'intérieur ou peut-être vers l'extérieur. À droite de ce trou, un autre regroupement de planètes est présent. Or, dans ce cas, la coupure en distance à  $3 - 4$  UA n'est pas physique. Le troisième groupe en bas à gauche est composé de planètes de masses allant de celle de Mercure à celle de Neptune. La coupure en masse autour de  $0,1 M_{\text{Jup}}$  est physique. Elle pourrait être causée par le fait que le mécanisme de formation par effondrement gravitationnel ne permet pas de former des planètes en deçà d'une certaine masse. En contrepartie, lorsque le mécanisme de formation par accréation sur corps permet de former des planètes rocheuses ayant une masse à cette limite, celle-ci commence alors à accréter une grande quantité de gaz et ainsi devenir plus massive. La coupure en séparation à droite est plutôt due aux limitations instrumentales.

La mission spatiale Kepler (Kepler et K2) a permis à elle seule de confirmer près de 2700 planètes en transit et détecter plus de 2400 candidates<sup>3</sup>. De cet échantillon, Mulders et al. [2018] déduisent que 42% des étoiles similaires au Soleil sont accompagnées d'au moins 7 planètes sur des orbites coplanaires et que  $36 \pm 14\%$  des étoiles ont au moins une planètes dans leur zone habitable. Enfin, ils suggèrent qu'il serait probable que 100% des étoiles possèdent au moins une planète. Basé également sur les observations de Kepler, Dressing and Charbonneau [2015] proposent que  $24_{-8}^{+18}\%$  et  $21_{-6}^{+11}\%$  des naines M possèdent respectivement au moins une planète de taille similaire à la Terre ( $1-1,5 R_{\oplus}$ ) et/ou une super-Terre ( $1,5-2 R_{\oplus}$ ) dans sa zone habitable. Par ces prévalences, ils en déduisent que la plus proche planète avec  $R < 2 R_{\oplus}$  pourrait se trouver à  $2,1 \pm 0,2$  pc et à  $8,6_{-0,7}^{+0,8}$  pc pour la plus proche qui transite.

Les super-Terres peuvent aussi être définies par leur masse comme ayant  $2-10 M_{\oplus}$ . La première (GJ 876 d,  $7,5 M_{\oplus}$ ) fut détectée par Rivera et al. [2005] utilisant le décalage Doppler. Ce genre de planète n'est pas présent dans le système solaire et pourtant celles-ci seraient les planètes les plus communes autour des étoiles dans le voisinage du Soleil (Perryman, *The Exoplanet Handbook*, 2nd edition, 2018).

---

3. <https://exoplanets.nasa.gov>



**FIGURE 2.1.** Distribution des exoplanètes connues en fonction de leur masse ( $M$  ou  $M \sin i$ ) et de leur séparation (réelle ou projetée). Le symbole de chaque planète détermine par quelle méthode celle-ci fut découverte. Les cercles noirs *Transit* indiquent les planètes découvertes par la méthode du transit et dont la masse a été déterminée par un suivi en vitesse radiale. Les cercles jaunes *Transit R* représentent les planètes détectées par transit dont la masse a été estimée de leur rayon en assumant une certaine densité. Les planètes du système solaire sont également indiquées par la première lettre de leur nom. Bien que ce graphique date de juillet 2015, le portrait global de la distribution des exoplanètes est resté inchangé. À noter que les deux planètes représentées par les étoiles rouges à une séparation de  $10^{-2}$  UA sont mal identifiées comme des planètes imagées. Ce sont plutôt des candidates du relevé Kepler. Les données sont tirées de *The Extrasolar Planets Encyclopaedia* à <http://exoplanet.eu/>.

### 2.7. CE TRAVAIL

Deux projets principaux ont été réalisés dans le cadre de cette maîtrise. Dans un premier temps, une recherche de planètes géantes gazeuses et de naines brunes fut réalisée à l'aide

d'images d'archive du relevé *Two Micron All-Sky Survey* (2MASS). L'article résultant de ce projet est présenté au chapitre 3. Dans un deuxième temps, la faisabilité de détecter des planètes géantes gazeuses grâce à la spectroscopie à grande dispersion a été réalisée dans le contexte de la construction et l'accessibilité récente ou imminente de spectrographes infrarouges de deuxième génération tels que SPIRou, NIRPS et IGRINS. Ce dernier projet ne constitue qu'une exploration préliminaire du sujet et pourrait faire l'objet d'un second projet de maîtrise ou de doctorat.

### **2.7.1. Détection de planètes géantes gazeuses et naines brunes jeunes à grande séparation par imagerie directe**

L'intérêt de détecter des compagnons de masse sub-stellaire par imagerie directe est d'avoir l'opportunité d'étudier leurs propriétés atmosphériques. Une étude d'un grand échantillon de ces objets permet de voir comment ceux-ci évoluent avec leur âge. Ces observations sont essentielles pour tester les modèles et mécanismes de formation de compagnons sub-stellaires et planétaires. Or, ces objets ont une faible prévalence. L'objectif de cette recherche de planètes/NBs à grande séparation à partir des images d'archive du relevé 2MASS était donc d'augmenter le nombre de ces objets rares. La résolution angulaire ( $2''$ ), la limitation par le seeing ( $\sim 1.25''$ ) et en magnitude ( $J < 15.8$ ) des images de 2MASS n'en font pas de bonnes images pour une recherche systématique de planètes. Elles offrent toutefois l'avantage de couvrir le ciel en entier. La stratégie adoptée fut donc d'aller sonder une grande quantité ( $>2500$ ) d'étoiles jeunes relativement faibles ( $J > 8$ ) en employant une méthode qui marie l'imagerie combinée localement optimisée et l'imagerie différentielle spectrale simultanée. Aucune nouvelle planète n'a été découverte, mais une nouvelle naine brune jeune (J2250+2325 B) a été détectée. Cette détection reste d'intérêt concernant l'étude des exoplanètes étant donné que l'atmosphère, les mécanismes de formation et l'évolution des naines brunes à grande séparation sont analogues à ceux des planètes géantes gazeuses sur de longues orbites. L'article (voir chapitre 3) présente la découverte de la naine brune dont la masse est estimée à  $35 M_{\text{Jup}}$  et qui orbite en plus de 19 000 ans autour d'une étoile dont la formation semble récente. Les observations recueillies sur l'étoile principale montrent qu'elle serait possiblement composée de deux étoiles très rapprochées. La découverte de cette lointaine compagne semble donc indiquer qu'elle aurait été partiellement éjectée du système s'étant formé quelques dizaines de millions d'années auparavant, à cause de l'interaction gravitationnelle.

### 2.7.2. Détection de planètes géantes gazeuses jeunes par spectroscopie infrarouge à grande dispersion à partir du sol

À la section 2.6, il est montré que la sensibilité de détection d'exoplanètes de chacune des méthodes est affectée par la séparation entre l'étoile et la planète<sup>4</sup>. Il existe donc une zone entre 3–15 UA où ni les méthodes de transit, de vitesse radiale ou d'imagerie directe sont efficaces pour détecter des compagnons. Pourtant, certains suggèrent que les populations de planètes géantes gazeuses, à l'instar de Jupiter ou de HR 8799 e, pourraient se trouver et/ou s'être formées à ces séparations (Cumming et al. [2008], Bryan et al. [2016]). Si l'existence de cette population de planètes manquantes est avérée, des contraintes sur leurs modes de formation et de migration pourraient être mieux établies.

À la section 2.4, l'utilisation de la spectroscopie à grande dispersion fut expliquée dans le cadre de la caractérisation d'atmosphères de planètes par transmission et par émission. L'emploi de cette technique n'est possible que si des informations sur l'orbite de la planète sont d'abord connues. Or, il est possible de reprendre l'idée d'extraire les raies moléculaires d'une planète du spectre de l'étoile en effectuant des corrélations croisées pour détecter de nouvelles candidates.

Cette idée n'est pas nouvelle. La détection d'étoiles binaires dont l'une est de faible masse a été explorée par Gullikson et al. [2016] reprenant cette idée. Le principe général de la méthode est de prendre un seul spectre d'une étoile dans l'infrarouge avec une grande résolution, sur un grand domaine et à très haut signal sur bruit et d'y appliquer des méthodes de traitement similaires à celles employées en imagerie directe. Le but de l'exercice est de réduire au maximum le signal de l'étoile et de l'atmosphère afin d'obtenir la meilleure corrélation possible entre les raies de l'objet faible et une bonne référence de celles-ci. Lorsqu'un profil de corrélation significatif est décelé, celui-ci correspond au profil moyen des raies moléculaires qui corrélerent à la vitesse radiale de l'objet. De ce profil, une estimation de la température et de la période de rotation de l'objet sont mesurables. Si plusieurs pics de corrélation à différentes vitesses sont présents, cela pourrait également signifier la présence de plusieurs objets de faible luminosité en orbite autour de l'étoile principale.

Dans le cadre de ce projet, des observations synthétiques ont été produites pour déterminer à quelles conditions et dans quelles limites il est possible de détecter des planètes géantes gazeuses. Les stratégies suivantes ont été adoptées. Premièrement, seules les étoiles

---

4. La méthode de détection par lentille gravitationnelle n'est pas affectée par la séparation. Elle permet même de détecter des objets non liés gravitationnellement. Or, cette méthode ne permet pas de faire des suivis pour caractériser les objets découverts et sert plutôt pour des études statistiques de prévalence des exoplanètes.

présentant peu de contenu spectral et une température inférieure à 10 000 K (G–F–A) sont de bonnes candidates pour ce genre de recherche. Dû aux températures relativement élevées de ces étoiles, peu de molécules arrivent à se former dans leur atmosphère. L’opacité de ces atmosphères est principalement dominée par l’absorption libre-libre du  $H^-$ , l’absorption liée-libre des atomes et l’absorption liée-liée des atomes. Puisque les atomes possèdent moins de niveaux d’énergie et moins de transitions possibles que les molécules, les spectres des étoiles plus chaudes, présentent une plus faible densité de raies spectrales. Cela a pour avantage de réduire l’impact (le bruit) de la présence de l’étoile sur le profil de corrélation entre le spectre observé et les raies moléculaires recherchées. Pour la même raison, il est avantageux de sonder des étoiles dont la vitesse de rotation est grande ( $v \sin i > 80$  km/s). Par effet Doppler, les raies spectrales sont élargies, ce qui dégrade leur résolution en réduisant leur amplitude.

Avec ces deux conditions, Gullikson et al. [2016] ont démontré que des étoiles de faibles masses (jusqu’à  $M_0$ ) autour d’étoiles chaudes peuvent être détectées. Or, pour permettre des détections dans le régime des NBs ou des exoplanètes, il est nécessaire d’ajouter la condition de la jeunesse du système pour favoriser le contraste. L’emploi d’instruments adaptés et l’application des méthodes de traitement du signal stellaire et atmosphérique permettant idéalement d’atteindre les limitations instrumentales et fondamentales de bruit de photons est aussi essentiel.

Les observations synthétiques de systèmes jeunes avec SPIRou/CFHT, IGRINS/Gemini et NIRPS/HARPS ont ensuite permis de trouver la masse limite des compagnons détectables par cette méthode en fonction de l’âge de l’étoile, de sa masse, de sa vitesse de rotation, du signal sur bruit du spectre observé et du niveau de correction de l’absorption atmosphérique et du spectre stellaire atteint. Ces limites ont ensuite permis d’estimer combien de planètes/NBs et avec quelle efficacité elles pourraient être détectées dans l’association jeune Upper Sco (âge 11–13 Ma Pecaut et al. [2012]) utilisant 50 heures d’observation à raison d’une heure par étoile avec SPIRou. Une dizaine de planètes (toutes avec  $M > 6 M_{Jup}$ ) sont détectées sur une possibilité de 30 compagnons. Or, ces résultats supposent une prévalence des géantes gazeuses au delà de 5 AU selon les résultats de Bryan et al. [2016] qui les ont déterminés pour des systèmes dont une première planète a déjà été préalablement détectée.

Évidemment, cette méthode devra être testée sur des systèmes déjà existants pour confirmer sa faisabilité avant d’entreprendre des observations à l’aveugle. Le système HIP 73990 ayant deux naines brunes ( $\Delta H \sim 6,9$  et  $6,8$  mag), le système HIP 74865 ( $\Delta H \sim 5,85$  mag) et le système HD 179949 composés d’une Jupiter chaude ( $\Delta H \sim 9,4$ ) dont l’atmosphère a déjà été détectée et caractérisée par l’équipe de Brogi et al. [2014] sont de bons candidats pour ce

but. Dans le cadre d'un projet de doctorat, un relevé spectroscopique des étoiles de type G, F et A de Upper Sco ayant les plus grandes vitesses de rotation pourrait être effectué pour vérifier la présence de cette population de planètes géantes gazeuses autour d'étoiles jeunes.

### **2.7.3. Déclaration de l'étudiant**

Cette section présente la contribution des chercheurs à l'article présenté au chapitre 3 intitulé « BANYAN. X. Découverte d'un compagnon de type L montrant des signes de faible gravité à grande séparation d'une étoile à rotation rapide de type M ». J'ai rédigé les premières ébauches de l'article qui ont ensuite été révisées et améliorées à l'aide des co-auteurs. J'ai généré les Figures 3.1, 3.2, 3.3 ainsi que l'ensemble de Tableaux. J'ai dirigé le projet d'identification des compagnons et écrit les codes informatiques à cet effet. J'ai effectué les observations des images CPAPIR et contribué à l'identification des types spectraux et des signes de jeunesse déduits des spectres ESPaDOnS. Enfin, j'ai participé aux analyses BANYAN et BANYAN II.

Étienne Artigau a produit les Figures 3.5, 3.6 et 3.7, a supervisé l'ensemble du projet, dirigé la réduction des images CPAPIR et à grandement aidé au développement et à l'écriture des codes. Jonathan Gagné a produit les Figures 3.4, 3.8 et 3.9, a mené les analyses BANYAN II et a fait les analyses de contamination. Il a obtenu et réduit les données IRTF/SpeX, a déterminé les vitesses radiales des spectres FIRE, a fait la convolution des spectres ESPaDOnS et a supervisé l'écriture de l'article. René Doyon a supervisé l'écriture de l'article. Lison Malo a obtenu et réduit les spectres ESPaDOnS, en a mesuré la vitesse radiale et le  $v \sin i$ . Elle a mené l'analyse BANYAN et apporté des aspects intéressants à la discussion. Jacqueline Faherty a obtenu et réduit les données de FIRE. David Lafrenière a participé par ses discussions au développement des codes.



# Bibliographie

---

- F. Baron, Artigau, J. Rameau, D. Lafrenière, J. Gagné, L. Malo, L. Albert, M.-E. Naud, R. Doyon, M. Janson, P. Delorme, and C. Beichman. WEIRD : Wide-orbit Exoplanet Search with InfraRed Direct Imaging. *The Astronomical Journal*, 156 :137, 2018. doi : 10.3847/1538-3881/aad599.
- W. J. Borucki and A. L. Summers. The photometric method of detecting other planetary systems. *Icarus*, 58(1) :121–134, 4 1984. ISSN 00191035. doi : 10.1016/0019-1035(84)90102-7.
- B. P. Bowler. Imaging Extrasolar Giant Planets. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128(968) :102001, 10 2016. ISSN 0004-6280. doi : 10.1088/1538-3873/128/968/102001.
- M. Brogi, R. J. De Kok, J. L. Birkby, H. Schwarz, and I. A. G. Snellen. Carbon monoxide and water vapor in the atmosphere of the non-transiting exoplanet HD 179949 b. *A&A*, 565, 2014. doi : 10.1051/0004-6361/201423537.
- M. L. Bryan, H. A. Knutson, A. W. Howard, H. Ngo, K. Batygin, J. R. Crepp, B. J. Fulton, S. Hinkley, H. Isaacson, J. A. Johnson, G. W. Marcy, and J. T. Wright. Statistics of long period gas giant planets in known planetary systems. *The Astrophysical Journal*, 821, 2016. doi : 10.3847/0004-637X/821/2/89.
- D. Charbonneau, T. M. Brown, D. W. Latham, and M. Mayor. Detection of planetary transits across a sun-like star. Technical report, 2000.
- D. Charbonneau, T. M. Brown, R. W. Noyes, and R. L. Gilliland. Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 568(1) :377–384, 3 2002. ISSN 0004-637X. doi : 10.1086/338770.
- G. Chauvin, A. M. Lagrange, C. Dumas, B. Zuckerman, D. Mouillet, I. Song, J. L. Beuzit, and P. Lovis. A Giant Planet Candidate near a Young Brown Dwarf. *Astronomy and Astrophysics*, v.425, p.L29-L32 (2004), 425 :L29–L32, 9 2004. ISSN 0004-6361. doi : 10.1051/0004-6361:200400056.
- A. Cumming, R. Paul Butler, G. W. Marcy, S. S. Vogt, J. T. Wright, and D. A. Fischer. The Keck Planet Search : Detectability and the Minimum Mass and Orbital Period Distribution of Extrasolar Planets. Technical report, 2008.
- C. D. Dressing and D. Charbonneau. The occurrence of potentially habitable planets orbiting M dwarfs estimated from the full Kepler dataset and an empirical measurement of the detection sensitivity. 2015. doi : 10.1088/0004-637X/807/1/45.
- Gaia Collaboration. Gaia Data Release 1. *Astronomy & Astrophysics*, 595 :A2, 11 2016. ISSN 0004-6361. doi : 10.1051/0004-6361/201629512.



- Gaia Collaboration. Gaia Data Release 2. *Z. Kostrzewa-Rutkowska*, 47, 2018. doi : 10.1051/0004-6361/201833051.
- M. Gillon, A. H. M. J. Triaud, B.-O. Demory, E. Jehin, E. Agol, K. M. Deck, S. M. Lederer, J. de Wit, A. Burdanov, J. G. Ingalls, E. Bolmont, J. Leconte, S. N. Raymond, F. Selsis, M. Turbet, K. Barkaoui, A. Burgasser, M. R. Burleigh, S. J. Carey, A. Chaushev, C. M. Copperwheat, L. Delrez, C. S. Fernandes, D. L. Holdsworth, E. J. Kotze, V. Van Grootel, Y. Almleaky, Z. Benkhaldoun, P. Magain, and D. Queloz. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, 542(7642) :456–460, 2 2017. ISSN 0028-0836. doi : 10.1038/nature21360.
- K. Gullikson, A. Kraus, S. Dodson-robinson, D. Jaffe, J.-e. Lee, G. N. Mace, P. Macqueen, S. Park, and A. Riddle. Direct spectral detection : an efficient method to detect and characterize binary systems. *The Astronomical Journal*, 151(1) :3, 2016. ISSN 1538-3881. doi : 10.3847/0004-6256/151/1/3.
- G. W. Henry, G. W. Marcy, R. P. Butler, and S. S. Vogt. A Transiting “51 Peg–like” Planet. *The Astrophysical Journal*, 529(1) :L41–L44, 1 2000. ISSN 0004637X. doi : 10.1086/312458.
- C. Marois, D. Lafreniere, R. Doyon, B. Macintosh, and D. Nadeau. Angular Differential Imaging : A Powerful High-Contrast Imaging Technique. *The Astrophysical Journal*, 641(1) :556–564, 4 2006a. ISSN 0004-637X. doi : 10.1086/500401.
- C. Marois, D. W. Phillion, and B. Macintosh. Exoplanet detection with simultaneous spectral differential imaging : effects of out-of-pupil-plane optical aberrations. volume 6269, page 62693M. International Society for Optics and Photonics, 6 2006b. doi : 10.1117/12.672263.
- C. Marois, B. Macintosh, T. Barman, B. Zuckerman, I. Song, J. Patience, D. Lafreniere, and R. Doyon. Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. *Science, Volume 322, Issue 5906, pp. 1348- (2008).*, 322 :1348, 11 2008. ISSN 0036-8075. doi : 10.1126/science.1166585.
- M. Mayor and D. Queloz. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555) : 355–359, 11 1995. ISSN 0028-0836. doi : 10.1038/378355a0.
- G. D. Mulders, I. Pascucci, D. Apai, and F. J. Ciesla. The Exoplanet Population Observation Simulator. I. The Inner Edges of Planetary Systems. *The Astronomical Journal*, 156(1) :24, 6 2018. ISSN 1538-3881. doi : 10.3847/1538-3881/aac5ea.
- M. J. Pecaut, E. E. Mamajek, and E. J. Bubar. A revised age for upper scorpius and the star formation history among the F-type members of the SCORPIUS – CENTAURUS OB association. 154(1989), 2012. doi : 10.1088/0004-637X/746/2/154.
- M. Perryman. *The Exoplanet Handbook*. 2nd editio edition. ISBN 978-1-108-41977-2.
- M. A. C. Perryman, L. Lindgren, J. Kovalevsky, E. Høg, U. Bastian, P. L. Bernacca, M. Cr ez e, F. Donati, M. Grenon, M. Grewing, F. Van Leeuwen, H. Van Der Marel, F. Mignard, C. A. Murray, R. S. Le Poole, H. Schrijver, C. Turon, F. Arenou, M. Froeschl e, and C. S. Petersen. Letter to the Editor The Hipparcos Catalogue. Technical report, 1997.
- E. J. Rivera, J. J. Lissauer, R. P. Butler, G. W. Marcy, S. S. Vogt, D. A. Fischer, T. M. Brown, G. Laughlin, and G. W. Henry. A  $\sim 7.5 M_{\text{Earth}}$  Planet Orbiting the Nearby Star, GJ 876. *The Astrophysical Journal*, 634(1) :625–640, 11 2005. ISSN 0004-637X. doi : 10.1086/491669.

I. Snellen, R. De Kok, J. L. Birkby, B. Brandl, M. Brogi, C. Keller, M. Kenworthy, H. Schwarz, and R. Stuik. Combining high-dispersion spectroscopy with high contrast imaging : Probing rocky planets around our nearest neighbors. *A&A*, 576, 2015. doi : 10.1051/0004-6361/201425018.

I. A. G. Snellen, R. J. de Kok, E. J. W. de Mooij, and S. Albrecht. The orbital motion, absolute mass, and high-altitude winds of exoplanet HD209458b. *Nature*, Volume 465, Issue 7301, pp. 1049-1051 (2010)., 465 :1049–1051, 6 2010. ISSN 0028-0836. doi : 10.1038/nature09111.



## Chapitre 3

---

### **BANYAN. X. DÉCOUVERTE D'UN COMPAGNON DE TYPE L MONTRANT DES SIGNES DE FAIBLE GRAVITÉ À GRANDE SÉPARATION D'UNE ÉTOILE À ROTATION RAPIDE DE TYPE M**

Publié dans : *The Astrophysical Journal*, 852 :55 (12pp), 2018 January 1

### **BANYAN. X. DISCOVERY OF A WIDE, LOW-GRAVITY L-TYPE COMPANION TO A FAST-ROTATING M3 DWARF**

Marie-Eve Desrochers<sup>1,\*</sup>, Étienne Artigau<sup>1</sup>, Jonathan Gagné<sup>2,3</sup>, René Doyon<sup>1</sup>, Lison Malo<sup>1</sup>, Jacqueline K. Faherty<sup>4</sup>, and David Lafrenière<sup>1</sup>

\*Based on observations obtained at the Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) which is operated by the National Research Council of Canada, the Institut National des Sciences de l'Univers of the Centre National de la Recherche Scientifique of France, and the University of Hawaii.

---

1. Institut de Recherche sur les Exoplanètes, Université de Montréal, Département de Physique, C.P. 6128 Succ. Centre-ville, Montréal, QC H3C 3J7, Canada

2. Carnegie Institution of Washington DTM, 5241 Broad Branch Road NW, Washington, DC 20015, USA

3. NASA Sagan Fellow

4. Department of Astrophysics, American Museum of Natural History, Central Park West at 79th St., New York, NY 10024, USA

## Abstract

We report the discovery of a substellar-mass co-moving companion to 2MASS J22501512+2325342, an M3 candidate member of the young (130–200 Myr) AB Doradus Moving Group (ABDMG). This L3 $\beta$  companion was discovered in a 2MASS search for companions at separations of 3–18'' from a list of 2812 stars suspected to be young ( $\lesssim 500$  Myr) in the literature, and was confirmed with follow-up astrometry and spectroscopy. Evolutionary models yield a companion mass of  $30^{+11}_{-4} M_{\text{Jup}}$  at the age of ABDMG. The 2MASS J22501512+2325342 AB system appears to be a spatial outlier to the bulk of ABDMG members, similarly to the young 2MASS J22362452+4751425 AB system. Future searches for young objects around these two systems would make it possible to determine whether they are part of a spatial extension of the known ABDMG distribution.

**Keywords:** stars: individual (2MASS J22501512+2325342, 2MASS J12193316+0154268) – binaries: spectroscopic – brown dwarfs – stars: late-type – stars: low-mass

## 3.1. INTRODUCTION

Direct imaging is a unique exoplanet detection method, as it makes it possible to constrain the properties of exoplanets directly from their emitted light. The large contrast ratio between Sun-like stars and self-luminous young planets however poses a significant challenge to their detection. As demonstrated by recent discoveries, this challenge can be partially alleviated by searching for distant companions (1–20'') around late-type, faint stars. This strategy provides a favorable contrast ratio, allowing for the detection of lower-mass companions. In the best-case scenarios, self-luminous planetary and substellar companions can be detected with seeing-limited observations. Almost all planetary-mass companions that were directly imaged to date are younger than 200 Myr old [Bowler, 2016] and relatively well-separated from their host star ( $> 50$  AU). Substellar companions can be found around Gyr-old stars, but probing younger systems is a good strategy to achieve lower-mass detections at a fixed contrast ratio. Some companions, such as 2MASS J02192210–3925225 B [Artigau et al., 2015] and VHS J125601.92–125723.9 b [Gauza et al., 2015], were detected in 2MASS images after subtracting the central point-spread function (PSF) of the host star. These recent detections at the brown dwarf to planetary-mass limit based on 2MASS images suggests that a more thorough search for similar objects may yield new discoveries.

Here we report the results of such a survey, in which we discovered a low-gravity brown dwarf companion to the M3 AB Doradus candidate member 2MASS J22501512+2325342 (2M2250+2325), and a likely field M9 companion to the M3 dwarf 2MASS J12193316+0154268 (2M1219+0154) that was previously identified as an

ABDMG candidate member. A description of the sample of young stars that were searched for companions is presented in Section 3.2. The method used to identify candidates is described in Section 3.3, followed in Section 3.4 by a detailed description of the follow-up observations that allowed us to verify the substellar nature of the companion candidates. The results and analysis are described in Section 3.5. In Section 3.6, the young moving group membership of 2M2250+2325 and 2M1219+0154 are discussed. The confidence and efficiency of the detection method and the fundamental properties of the newly discovered system are discussed in Section 3.7. This work is concluded in Section 3.8.

### 3.2. SURVEY SAMPLE

A list of all plausibly young ( $\lesssim 500$  Myr) stars within 100 pc of the Sun was compiled from the literature, mainly from members or candidate members of nearby young associations (e.g., see Gagné et al., submitted to ApJS). Objects with other youth indicators such as strong H $\alpha$  emission, low gravity, lithium absorption, chromospheric activity or X-ray emission were also included in the sample. The resulting sample is not complete by construction, as it relies on a multitude of surveys with differing selection criteria, and should therefore not be used for statistical population studies.

From the initial list of 4303 potentially young stars, only those outside of the Galactic plane ( $|b| > 15^\circ$ ) were selected to avoid confusion in the cross-matching of catalogs in crowded fields from blends of stars and only those fainter than  $J = 8$  were selected to limit for favorable contrast and standardizes the sample. The resulting list of 2812 stars is mostly constituted of K and M dwarfs. At a typical distance of  $\sim 40$  pc, the faintness criterion  $J > 8$  selects stars later than  $\sim$  K4 [Mikami and Heck, 1982].

The young stars in our sample that are known members or candidate members of 20 known young associations and clusters are listed in Table 1. The reference column lists literature work that is relevant to these associations and clusters. Their potential membership makes it possible to constrain their ages and their distances (based on sky position and proper motion), making them particularly valuable targets.

### 3.3. IDENTIFICATION OF CANDIDATE COMPANIONS

The search strategy was designed to recover known red companions similar to 2MASS J02192210–3925225 B [Artigau et al., 2015] and VHS J125601.92–125723.9 b [Gauza et al., 2015]. In each band of the original 2MASS Atlas images ( $J$ ,  $H$  and  $K_S$ ), the PSF of each young star in the final sample was correlated with those of all other stars in the initial 2812-stars sample to select the 20 most similar PSFs over a  $36''$ -wide square box, and those

were median-combined to create a reference PSF. These reference PSFs were subtracted from the 2MASS frames of each young sample star, and point sources at separations of 3–18'' from the young star were compiled. The lower limit of 3'' was chosen based on the 2MASS spatial resolution ( $\sim 2.5\text{--}3''$ ) which is a consequence of pixel sampling ( $\sim 2''$ ) and atmospheric seeing ( $\sim 1\text{--}1.5''$ ). The upper limit of 18'' was chosen to minimize the number of contaminating background sources, and corresponds to physical separations of 100–800 AU at distances of  $\sim 5\text{--}45$  pc, which is typical for nearby binaries and high-mass ratio stellar-substellar systems [Bowler, 2016].

The compiled point sources were defined as candidates only if they: (1) were detected above  $2\sigma$  in  $J$  band, and above  $3\sigma$  in both  $H$  and  $K_S$  bands; (2) had  $J - K_S$  in the range 1–3; and (3) were not detected in the DSS2-red survey. The constraint on the  $J$ -band detection is relaxed to ensure detection of red  $J - K_S$  objects that are typical of late spectral type ( $\geq L0$ ). The DSS2-red survey is limited to magnitudes of  $r < 20.5$  mag [Djorgovski et al., 2013], and the optical non-detection constraint thus translates to  $r > 17$  mag at  $\approx 50$  pc, which corresponds to masses of  $\lesssim 60 M_{\text{Jup}}$  at  $\sim 150$  Myr, or  $\lesssim 20 M_{\text{Jup}}$  at 20 Myr<sup>5</sup> [Allard et al., 2012].

The 30 candidates that resulted from these selection criteria were visually inspected to eliminate PSF subtraction residuals, instrumental optical ghosts or elongated sources. When near-infrared coverage deeper than 2MASS such as UKIDSS [Lawrence et al., 2007], SDSS  $i$ - or  $z$ -band [Alam et al., 2015], or the SIMP survey [Robert et al., 2016] was available, candidates not detected in the corresponding band of the deeper survey were eliminated, and those detected were required to be located at the same separation and position angle.

Of the seven candidates selected by these additional criteria, five are already listed as substellar companions in the literature ; 2MASS J0219–3925 B [Artigau et al., 2015], LP 261–75 B (Kirkpatrick et al. 2000 ; Reid and Walkowicz 2006; Vrba et al. 2004), G 196–3 B (Rebolo et al. 1998; Cruz et al. 2009; Gagné et al. 2014; Zapatero Osorio et al. 2014; Zapatero Osorio et al. 2014), 2MASS J1256–1257 b [Gauza et al., 2015], and 2MASS J2322–6151 B (Reid et al. 2008, Faherty et al. 2016, Gagné et al. 2015a). All known companions with 3–18'' separations that respect the selection criteria described above were recovered in our survey. Companions such as 2MASS J12073346-3932539 b (0.78''; Chauvin et al. 2004) were not recovered due to their small angular separation, and others such as 2MASS J22362452+4751425 b ( $J \sim 15.8$ ; Bowler et al. 2017) were not recovered due to their faintness.

---

5. See BT-Settl SDSS-band isochrones at [https://phoenix.ens-lyon.fr/Grids/BT-Settl/CIFIST2011\\_2015/](https://phoenix.ens-lyon.fr/Grids/BT-Settl/CIFIST2011_2015/)

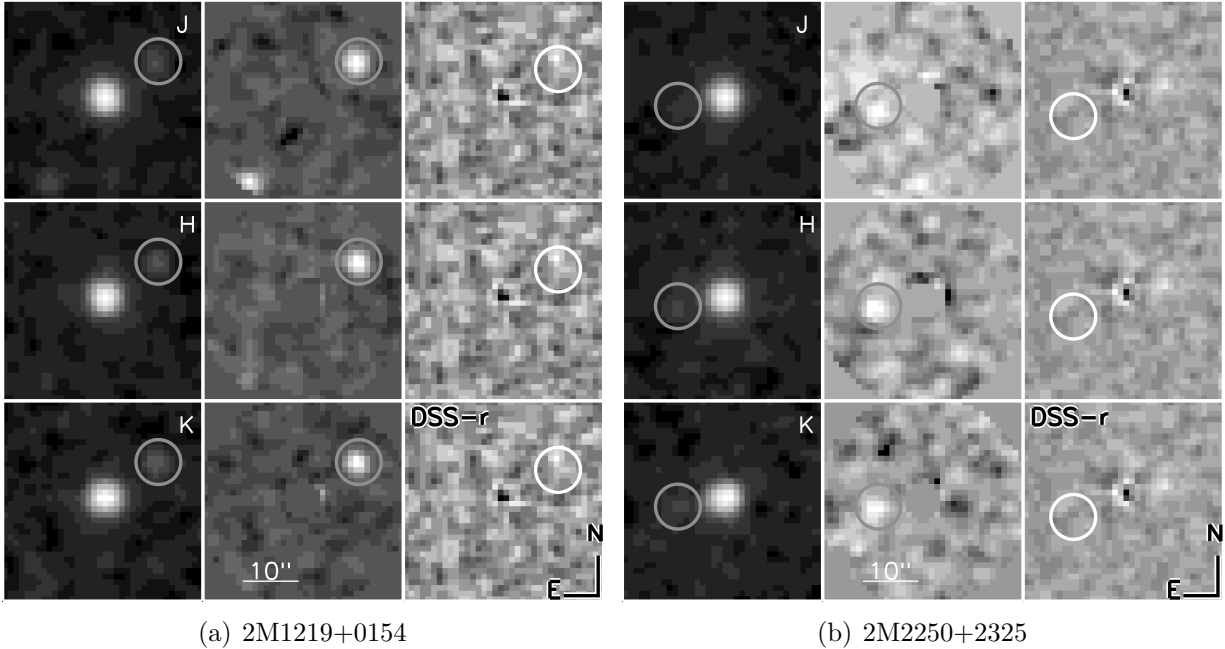
Table 3. I. Sources for the young star sample

Association	Num. Stars		Ref.
TW Hya	107	5–15	1,2
$\beta$ Pictoris	141	20–26	1,3,4
Tucana-Horologium (THA)	295	20–40	1,5
Columba	127	20–40	1,6
Carina (CAR)	50	20–40	1,6
Argus/IC 2391	80	30–50	7
AB Doradus	230	110–130 <sup>a</sup>	1,8,9
Carina-Near	1	~ 200	10
$\epsilon$ Cha	4	~ 10	11
Ursa Major	14	~ 500	11,12
Hercules-Lyrae	10	~ 250 or Stream	13,14
$\eta$ Cha	12	~ 8	1,11
Octans	50	30–40	5,15
Octans-Near	1	30–100	16
Hyades Cluster	424	625-650	11
Upper Scorpius	99	12–14	17
Chamaeleon I	5	1–2	18
$\sigma$ Orionis	4	~ 3	19
Taurus	9	1-2	20
Pleiades	7	~ 100	21
Field/Ambiguous	1142	20-500	21–26

References. — (1) Bell et al. 2015, (2) Weinberger et al. 2013, (3) Malo et al. 2014b, (4) Binks and Jeffries 2014, (5) Kraus et al. 2014, (6) Torres et al. 2008, (7) De Silva et al. 2013, (8) Luhman et al. 2005, (9) Barenfeld et al. 2013, (10) Zuckerman et al. 2006, (11) Zuckerman and Song 2004, (12) King et al. 2003, (13) Eisenbeiss et al. 2013, (14) Brandt et al. 2014, (15) Murphy and Lawson 2015, (16) Zuckerman et al. 2013, (17) Pecaute et al. 2012, (18) Kraus and Hillenbrand 2007, (19) Hernández et al. 2007, (20) Kraus and Hillenbrand 2008, (21) Famaey et al. 2008, (22) Mamajek et al. 2013, (23) Vican 2012, (24) Shkolnik et al. 2009, (25) Famaey et al. 2005, (26) Eggen 1995

The two remaining candidates, 2MASS J12193316+0154268 B and 2MASS J22501512+2325342 B (hereafter: 2M1219+0154 B and 2M2250+2325 B), are new discoveries. The 2MASS and DSS-*r* detection images of both new candidates are presented in Figure ??.





**Figure 3.1.** 2MASS and DSS- $r$   $36'' \times 36''$  frames around 2M1219+0154 and 2M2250+2325. The original 2MASS frames and the resulting signal-to-noise maps from the PSF-subtracted 2MASS frames are displayed in the first two columns, and the three rows correspond to the  $J$ ,  $H$  and  $K_S$  bands. The third column shows the PSF-subtracted DSS- $r$  frame. The white circles outline the position of the companion in the 2MASS residual images.

### 3.4. OBSERVATIONS

Additional near-infrared imaging was obtained to better constrain the colors of the companions and confirm their common proper motion with the primary stars, and spectroscopic observations of both primaries and companions were obtained to constrain their physical properties.

#### 3.4.1. CPAPIR Imaging

$J$ ,  $H$  and  $K$ -band images were obtained with the CPAPIR infrared camera [Artigau, 2006] at the Mont-Mégantic Observatory on 2015 May 26 (2M1219+0154 and 2M2250+2325) and 2016 May 20 (2M2250+2325; see Figure 3.7). CPAPIR has a  $30' \times 30'$  field of view which makes it possible to use numerous field stars as photometric calibrators. Observations were obtained under a  $2''$  seeing and photometric conditions on both nights. A random 2 dither pattern of 30 images was used for a total of 600s of integration per bandpass. The sky subtraction was performed using a median sky frame constructed from the dataset itself. Flat-fielding of images was done with calibration frames obtained at the end of the night by observing an illuminated flat screen in the dome.

The astrometric calibration of frames was performed by anchoring the solution to the GAIA DR1 [Gaia Collaboration, 2016] on individual frames prior to combination. The photometry measurements were performed through aperture photometry. The zero points were defined by using all 2MASS stars in the Point Source Catalog within 8 of the targets and their uncertainties were determined from the dispersion of the differences to the median divided by the square root of the number of calibrators.

### 3.4.2. Spectroscopy

#### 3.4.2.1. *ESPaDOnS at CFHT*

High-resolution optical spectra were obtained with the ‘star+sky’ mode of ESPaDOnS at the Canada France Hawaii Telescope for 2M1219+0154 A and 2M2250+2325 A on 2015 July 5 and 2015 July 1, respectively through program number 15AC24. These data are useful to measure the radial velocities and verify moving group membership, and they also allow to measure projected rotational velocities and lithium absorption, both of which are useful indications of youth.

The observations yielded a resolution of  $\lambda/\Delta\lambda \sim 68\,000$  across 370–1050 nm. Total exposure times of 1200 s were obtained for each star, resulting in a signal-to-noise ratio of  $\sim 70$  at 809 nm. Two slowly rotating radial velocity standards were observed  $\sim 30$  and  $\sim 15$  min before 2M1219+0154 A to ensure a stable wavelength calibration. The data were reduced by the CFHT pipeline UPENA (Version 2.12; 2006 Apr. 20), based on the Libre-ESPRIT software [Donati et al., 1997]<sup>6</sup>.

#### 3.4.2.2. *FIRE at Magellan/Baade*

Near-infrared spectra were obtained for 2M1219+0154 A and 2M1219+0154 B on 2015 May 31 with the Folded-port InfraRed Echellette (FIRE; Simcoe et al., 2008, 2013) at the Magellan/Baade telescope to measure their radial velocities and verify their moving group membership. Obtaining a radial velocity for both components is also useful to strengthen their co-moving nature, and medium-resolution spectroscopy is also useful to investigate for youth using gravity-sensitive spectral indices. The 0.6” slit was used, yielding a resolving power of  $R \sim 6\,000$  across 0.8–2.5  $\mu\text{m}$ . Six 90 s exposures were obtained for 2M1219+0154 A, and four 900 s exposures were obtained for 2M1219+0154 B in repeated ABBA patterns along the slit, resulting in respective signal-to-noise ratios of  $\sim 500$  and  $\sim 140$  per pixel at  $\sim 1.6 \mu\text{m}$ .

Ten 1 s and ten 3 s internal flat field exposures were obtained at the beginning of the night to properly illuminate all red and blue orders, and were used to correct pixel response

---

6. A description of the pipeline is available at <http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Upena/>.

of the detector. Ten 1 s dome flat exposures were also obtained at the beginning of the night to obtain the slit illumination function. The A0-type star HD 105782 was observed 80 min after the science targets at an airmass difference of 0.14, using six 90 s exposures to achieve telluric and instrument response corrections. One 10 s internal Th–Ar lamp exposure was obtained immediately after both the science and telluric sequences to obtain a wavelength solution at each telescope pointing position. The data were reduced using the Interactive Data Language (IDL) Firehose v2.0 package (Bochanski et al., 2009, Gagné et al., 2015b<sup>7</sup>; see Gagné et al., 2015a for more details on this reduction package).

### 3.4.2.3. *SpeX at IRTF*

A low-resolution near-infrared spectrum was obtained for 2M2250+2325 B with SpeX [Rayner et al., 2003] at the InfraRed Telescope Facility (IRTF) on 2015 August 21 to verify its substellar nature and measure gravity-sensitive features. The 0.8" slit was used with the prism mode, yielding a resolving power of  $R \sim 75$  in the 0.8–2.5  $\mu\text{m}$  range. Twenty one exposures of 150 s each were obtained in repeated ABBA patterns along the slit, yielding a signal-to-noise ratio per pixel of  $\sim 60$  at  $\sim 1.6 \mu\text{m}$ . A standard calibration sequence consisting of five 0.5 s internal flat field exposures and one 0.5 s internal Ar lamp exposure were obtained in between the science and telluric sequences, to correct for relative pixel response variations and achieve wavelength calibration, respectively. The A0-type standard HD 215690 was observed immediately after the science target (using twenty one 0.5 s exposures) and at a similar airmass to correct for telluric absorption and instrumental response. The data were reduced with the spextool v4.0 beta IDL package [Cushing et al., 2004], and telluric corrections were achieved using the xtellcor IDL routine [Vacca et al., 2003].

## 3.5. RESULTS AND ANALYSIS

This section reports on the spectral and kinematic properties of each component of the two new co-moving systems discovered here. All measurements are compiled in Table 3. II.

### 3.5.1. Host Star Spectral Properties

The spectral types of the two primary stars were inferred from the TiO5 index defined by Reid et al. [1995]. We obtain  $\text{TiO5} = 0.494$  ( $\text{M}2.9 \pm 0.5$ ) for 2M1219+0154 and 0.467 ( $\text{M}3.2 \pm 0.5$ ) for 2M2250+2325. The optical spectra of 2M1219+0154 A and 2M2250+2325 A are compared with those of known M2.5–M5 stars [Cruz et al., 2003, 2007] in Figure 3.2. Both spectra are visually best matched by the M3 star 2MASS J03364896–2418011, consistently with the TiO5 indices. We therefore adopt a spectral type of  $\text{M}3 \pm 0.5$  for both primaries.

---

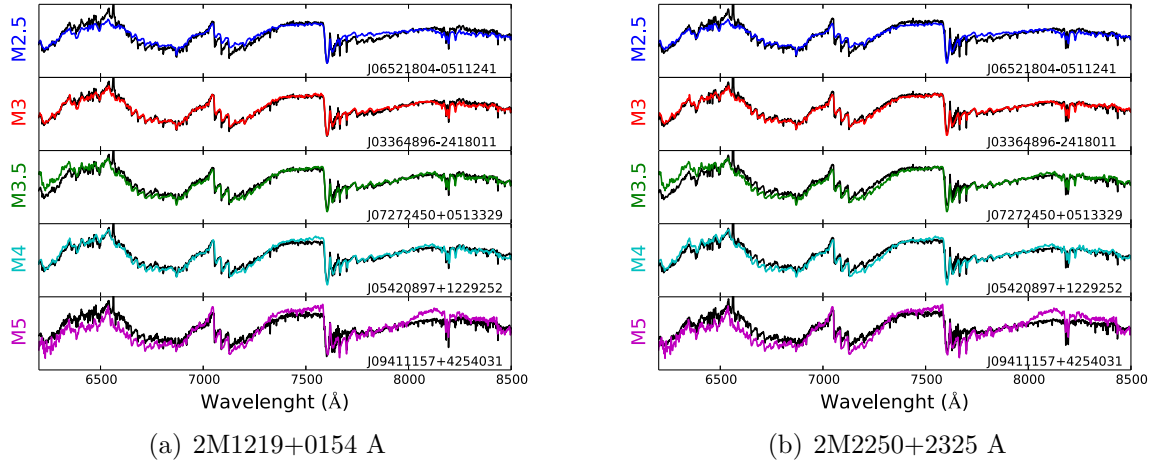
7. Available at [https://github.com/jgagneastro/FireHose\\_v2/tree/v2.0](https://github.com/jgagneastro/FireHose_v2/tree/v2.0)

The radial velocities of both primaries were measured by cross-correlating their ESPaDOnS spectra with artificially Doppler-shifted slow-rotator radial velocity standards, as described by Malo et al. (2014a; see Section 4.1). This yielded heliocentric radial velocities of  $5 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}$  and  $-16 \pm 1 \text{ km s}^{-1}$  for 2M1219+0154 A and for 2M2250+2325 A, respectively.

Radial velocities were also measured individually for 2M1219+0154 A and 2M1219+0154 B from their FIRE *H*-band spectra with a method similar to that of Gagné et al. [2017, 2015]. The observed spectra were compared with zero-velocity CIFIST 2011 BT-Settl spectra [Allard et al., 2012, Baraffe et al., 2015] with a custom IDL routine based on the amoeba Nelder-Mead downhill simplex algorithm [Nelder and Mead, 1965]. A forward model was built by convolving the BT-Settl models with a one-parameter Gaussian instrumental profile, applying a Doppler shift and a two-parameters multiplicative linear slope correction to account for instrumental systematics. No telluric model was used as the observed spectra were already corrected for telluric absorption, and the Firehose pipeline already corrected the spectra for barycentric velocity variations and generated a vacuum wavelength solution. The Nelder-Mead method was used to locate the four best-fitting parameters that minimize the reduced  $\chi^2$  in fifteen  $0.02 \mu\text{m}$  sections regularly distributed in the range  $1.5100\text{--}1.5535 \mu\text{m}$  to account for systematics and bad pixels, using models in the range  $\log g = 3.0\text{--}5.5$  and  $T_{\text{eff}} = 1000\text{--}4000 \text{ K}$ . The median and standard deviation of the fifteen parameter measurements were adopted as the measurement and error of each individual parameter.

This method yielded heliocentric radial velocities of  $-20.1 \pm 3.9 \text{ km s}^{-1}$  for 2M1219+0154 A and  $-17.3 \pm 3.5 \text{ km s}^{-1}$  for 2M1219+0154 B. The FIRE radial velocity of 2M1219+0154 A is significantly different from the  $5 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}$  ESPaDOnS measurement. These differing RV values could indicate that 2M1219+0154 A is a tight binary star. No duplicated spectral lines could however be resolved in the ESPaDOnS spectrum, excluding the double-line binary (SB2) hypothesis and suggesting that it is a likely single-line binary (SB1) with a secondary significantly fainter than 2M1219+0154 A. The equal-luminosity unresolved binary case would be detected through the spectroscopic measurement since the RV amplitude is much higher ( $> 25 \text{ km s}^{-1}$ ) than the  $v \sin i$  ( $< 2 \text{ km s}^{-1}$ ) measurement.

The ESPaDOnS spectra were compared to a slow-rotating standard convolved by a rotational profile using the procedure described by Malo et al. 2014a to measure the projected radial velocity of both primary stars. This yielded  $v \sin i \sim 30 \text{ km s}^{-1}$  and  $v \sin i < 2 \text{ km s}^{-1}$  for 2M2250+2325 A and 2M1219+0154 A, respectively. Both ESPaDOnS spectra are displayed in Figures 3(a) and 3(b), where in both cases  $\text{H}\alpha$  emission is prominent, but no

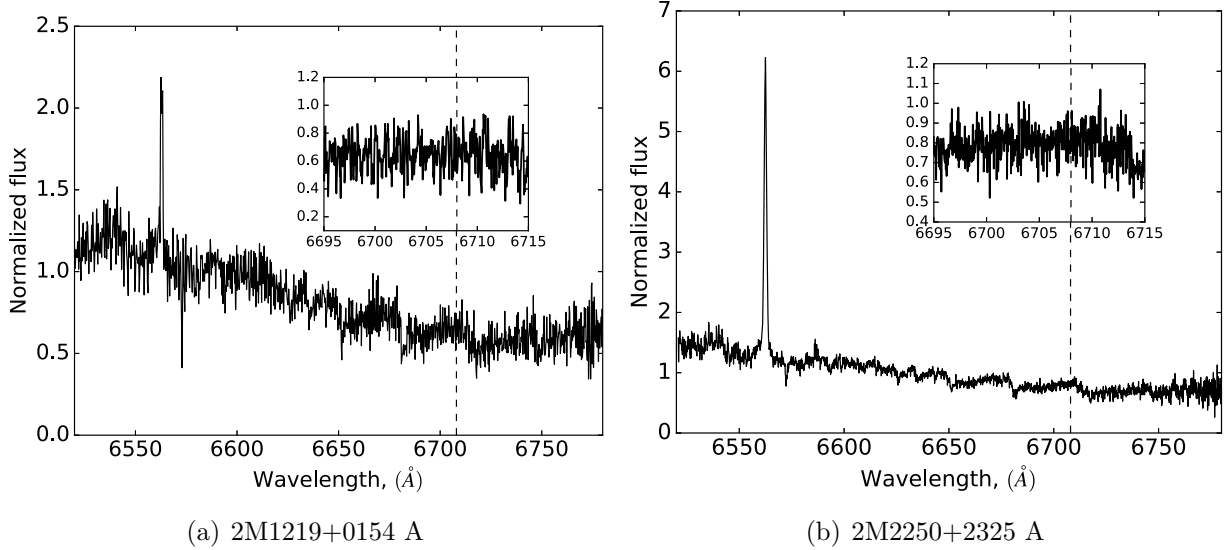


**Figure 3.2.** Optical spectra of 2M1219+0154 A and 2M2250+2325 A (black lines) compared with known M2.5–M5 dwarfs spectra (colored lines). Colored lines correspond to the spectral types specified on the left side of the figure panels. The ESPaDOnS spectra were convolved and re-sampled to match the spectral resolution and dispersion relation of the literature spectra, and all spectra were normalized to a unit median. Both objects are best matched by the M3 dwarf 2MASS J03364896–2418011.

lithium is detected at  $6707.8 \text{ \AA}$  with a  $3\sigma$  upper limit of  $EW_{Li} \leq 32 \text{ m\AA}$  for 2M2250+2325 A and  $\leq 54 \text{ m\AA}$  for 2M1219+0154 A.

The rotation rate of a fully convective star ( $< 0.4 M_{\odot}$ ) gradually increases as the star ages, until it reaches a maximum at  $\sim 100 \text{ Myr}$  and then slows down again [Sills et al., 2000]. The slow projected rotation of 2M1219+0154 A is therefore either indicative of a very low inclination or an old age. The lack of  $6707.8 \text{ \AA}$  lithium absorption in the ESPaDOnS spectra of 2M2250+2325 A and 2M1219+0154 A is indicative of an age older than  $\sim 20 \text{ Myr}$  for their M3 spectral type [Burrows et al., 2001].

Observations by Mentuch et al. [2008] show that members of the AB Doradus moving group (ABDMG;  $150^{+50}_{-20} \text{ Myr}$ ; Zuckerman et al. 2004, Bell et al. 2015) later than  $\sim K7$  stop displaying lithium that would be detectable at our precision. The younger Tucana-Horologium association [Torres et al., 2000, Zuckerman et al., 2001b] and  $\beta$  Pictoris moving group [Zuckerman et al., 2001a], with respective ages of  $45 \pm 4 \text{ Myr}$  and  $24 \pm 3 \text{ Myr}$  [Bell et al., 2015], stop displaying lithium at spectral types  $\sim M2$  and later, which is consistent with the 20 Myr lower age limit estimated above. The relatively fast rotation rate ( $v \sin i \sim 30 \text{ km s}^{-1}$ ) of 2M2250+2325 A however suggests that it may be young ( $\sim 100 \text{ Myr}$ ; e.g. see Figure 5 of Malo et al., 2014a).



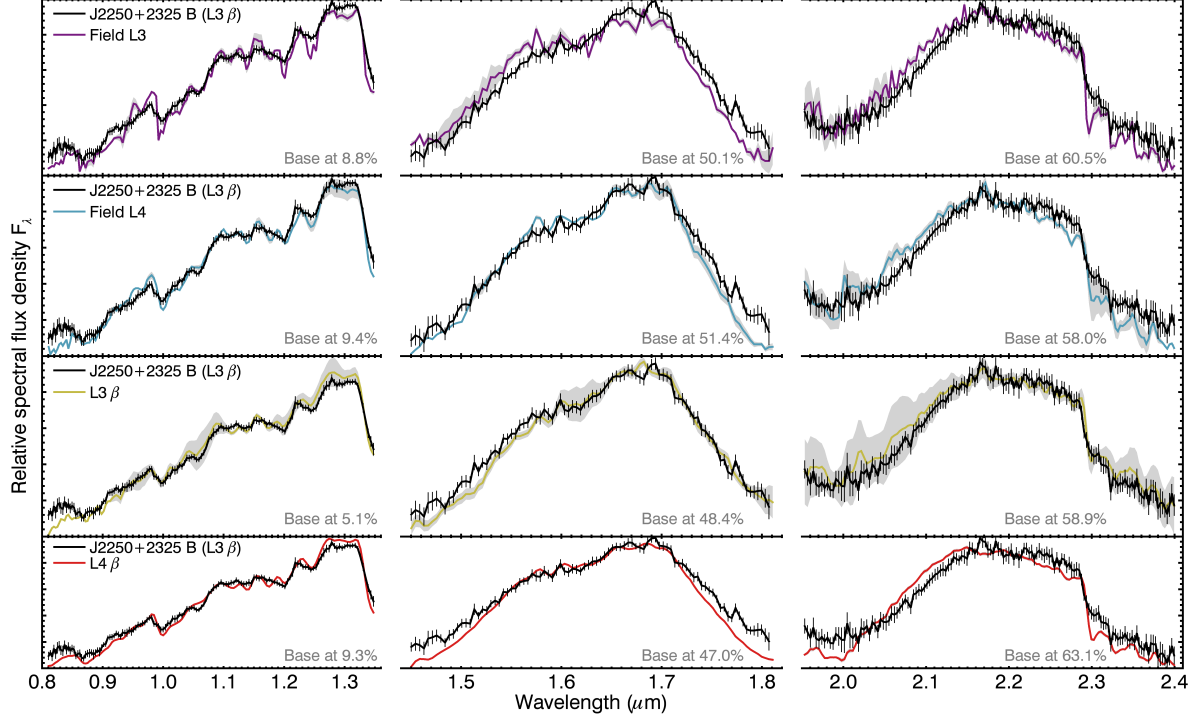
**Figure 3.3.** Full-resolution ESPaDOnS spectral flux density of 2M1219+0154 A and 2M2250+2325 A in arbitrary units. The  $H\alpha$  emission lines at 6562.8 Å are clearly visible in both objects, but no lithium absorption is detected at 6708 Å.

The spectrophotometric distances of 2M2250+2325 A and 2M1219+0154 A were estimated from their  $J$ -band magnitude and the spectral type–absolute magnitude relations of Zhang et al. (2013; see their Table 3). We obtain an absolute  $J$ -band magnitude of  $7.54 \pm 0.52$  mag for both and a spectrophotometric distance of  $43.0 \pm 10.3$  pc and  $39.9 \pm 9.6$  pc respectively. The uncertainty on the spectral type (0.5 subtypes) dominates the errors on both of these measurements.

### 3.5.2. Companion Spectral Properties

The spectral templates of Gagné et al. [2015a] were used to visually determine the spectral type and gravity class [Kirkpatrick, 2005] of 2M2250+2325 B, as shown in Figure 3.4. The templates are built from a median combination of several objects within a same spectral subtype and gravity class, done independently in each band ( $z$ ,  $J$ ,  $H$  and  $K$ ; see also K. L. Cruz et al., submitted to AJ<sup>8</sup>). The best-matching template was found to be  $L3\beta$ , indicating subtle signs of low gravity, which is typically consistent with an age of  $\sim 100$  Myr [Cruz et al., 2009]. This age estimate is consistent with that of 2M2250+2325 A based on its projected rotational velocity. The index-based classification scheme of Allers and Liu [2013] yields a spectral type of  $L2.5 \pm 0.6$  with a gravity class INT-G and gravity score ‘1011’ (see Allers and Liu, 2013 for more detail), which is consistent with  $L3\beta$ .

8. Soft release available at [https://github.com/kelle/NIRTemplates\\_Manuscript/releases/tag/v1](https://github.com/kelle/NIRTemplates_Manuscript/releases/tag/v1)



**Figure 3.4.** Comparison of the near-infrared SpeX/IRTF spectral flux density of 2M2250+2325 B (black line) compared to field and low-gravity L3 and L4 dwarf templates from Gagné et al. (2015a; colored lines). The spectrum of 2M2250+2325 B was convolved at the resolution of the template spectra, and each band was normalized individually to its median value to facilitate a comparison of the spectral features. The grey regions display the scatter in individual spectra used to construct the comparison templates, and the vertical black lines indicate the error bars on the convolved 2M2250+2325 B spectrum. The grey text in each figure cell indicates how far the zero flux level lies below the window, in fractional units of the full figure cell vertical range. 2M2250+2325 B is best matched visually by the L3  $\beta$  template.

The FIRE spectrum of 2M1219+0154 B was also visually compared with the spectral templates of Gagné et al. [2015a], and was found to be a best match with the field M9 spectral type, with no visible peculiarity or signs of low gravity. The index-based spectral classification of Allers and Liu [2013] yields a consistent M9 FLD-G classification, with a gravity score ‘0n10’. Such a lack of low-gravity spectral signatures indicates that the 2M1219+0154 AB system is likely older than  $\sim 200$  Myr Allers and Liu [2013], which is consistent with the low projected rotational velocity of 2M1219+0154 A.

The spectrophotometric distance of 2M2250+2325 B was estimated with the spectral type–absolute magnitude relation of Filippazzo et al. (2015; see their Table 10). This yielded an absolute  $J$ -band magnitude of  $12.874 \pm 0.402$  mag, which was compared with our MKO  $J$ -band measurement converted to the 2MASS system ( $16.845 \pm 0.02$  mag) with the relations

of Leggett et al. 2006, resulting in a distance estimate of  $62.3 \pm 11.4$  pc. The estimated spectrophotometric distance of 2M1219+0154 B is  $52.2 \pm 9.7$  pc using the same procedure. The uncertainty on spectral type (0.5 subtype) dominates the measurement error.

### 3.5.3. Common Proper Motion

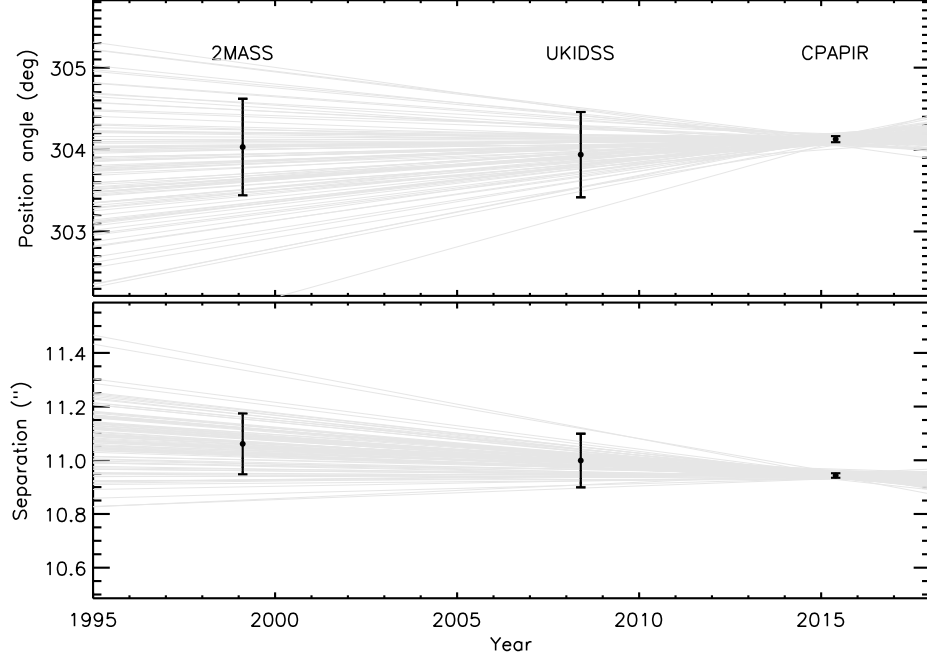
This section describes a verification that both new candidate companions discovered in this survey are co-moving with their respective host star.

The proper motion of 2M1219+0154 A was reported by Schlieder et al. [2012] and is listed in Table 3. II. The proper motion of 2M1219+0154 B was measured from its detections in UKIDSS [Lawrence et al., 2007], 2MASS *J*-band, and 2015 CPAPIR *J*-band, using a 100-element Monte Carlo method where a linear slope is adjusted through three synthetic astrometric measurements drawn from the posterior probability distribution of the astrometry at each epoch. The position angle of the companion is  $304.13 \pm 0.04^\circ$  with a variation of  $0.01 \pm 0.01^\circ \text{yr}^{-1}$ , and its separation is  $10.943 \pm 0.008''$  with a variation of  $-7.3 \pm 3.0 \text{ mas yr}^{-1}$ , as shown in Figure 3.5. If 2M1219+0154 B was a fixed background star, its separation from the primary star would have increased by  $1.185 \pm 0.060''$  across the 12 yr separating the 2MASS and CPAPIR astrometric measurements, and would have a position angle of  $310.29 \pm 0.35^\circ$  at the CPAPIR epoch, which is inconsistent with our measurement.

The common proper motion and the small separation of 2M1219+0154 A and 2M1219+0154 B strongly suggest that the system is gravitationally bound. The fact that the FIRE radial velocities of 2M1219+0154 A and 2M1219+0154 B are similar is expected if they are co-moving, however it is not necessarily expected given that we identified 2M1219+0154 A as a potential radial velocity variable itself from the different FIRE and ESPaDOnS radial velocity measurements with 30 days delay. Determining whether the discrepant measurements are caused by instrumental systematics or by the primary star being a binary will require additional measurements. However, if 2M1219+0154 A is an unresolved binary with the secondary 6 times ( $\sim 2$  mag) fainter than the primary, our spectrophotometric distance estimate becomes  $43 \pm 10$  pc, which is consistent with that obtained for 2M1219+0154 B ( $52.2 \pm 9.7$ ).

Qi et al. [2015] report a proper motion for 2M2250+2325 A, which is listed in Table 3. II. A similar method to that described above was used to measure the motion of 2M2250+2325 B relative to the primary, using 2MASS *J*, 2005 and 2009 SDSS *z*, and 2015 CPAPIR *J*-band detections. Both the separation and position angle were found to remain constant at  $8.90 \pm 0.06''$  and  $102.9 \pm 0.4^\circ$ , with upper limits of  $5 \text{ mas yr}^{-1}$  and  $0.033^\circ \text{yr}^{-1}$  on their variation as shown in Figure 3.6. If 2M2250+2325 B was a fixed background star, its separation





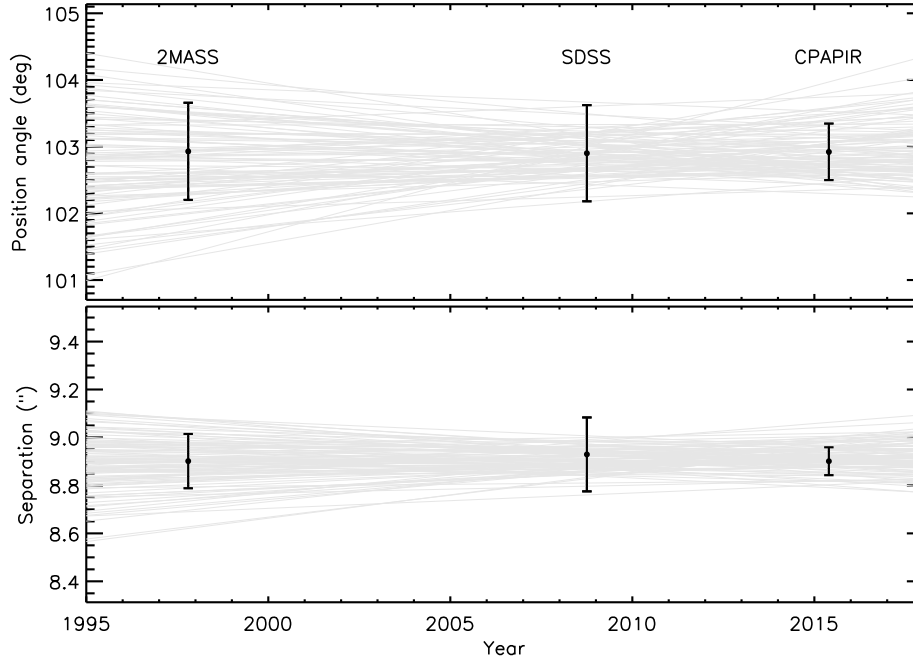
**Figure 3.5.** Separation and position angle of 2M1219+0154 A and 2M1219+0154 B at the three available epochs. A hundred random draws of the posterior probability distribution in separation and position angle temporal evolution are displayed as gray lines. These measurements are consistent with 2M1219+0154 A and B being co-moving.

would have varied by  $1.0843 \pm 0.0015''$  during the 12 yr separating its 2MASS and CPAPIR detections. The expected position angle at the CPAPIR epoch would also be at  $279.3 \pm 0.5^\circ$ .

Although we do not have a radial velocity measurement for the companion, the close proximity and the common proper motion of 2M2250+2325 A and 2M2250+2325 B suggest that they are gravitationally bound.

Using the proper motion measurements of 265 nearby ultracool dwarfs from Dupuy and Liu [2012], we infer a median tangential velocity of  $31.8 \text{ km s}^{-1}$  for their population. Assuming a normal isotropic distribution of substellar-mass objects, we find that there is only a  $\sim 1\%$  probability that a  $L3\beta$  dwarf randomly falls this close to a random field star with a common proper motion consistent at  $< 2\sigma$  with our measurements.

Figure 3.7 shows the combined  $J$ ,  $H$  and  $K$ -band of 2016 CPAPIR images of the 2M2250+2325 AB system, and demonstrates that the companion is significantly redder than other stars in the field. The angular separation and position angle of the companion appear very similar to the 2MASS images (see Figure 3.1) obtained 13 years earlier.



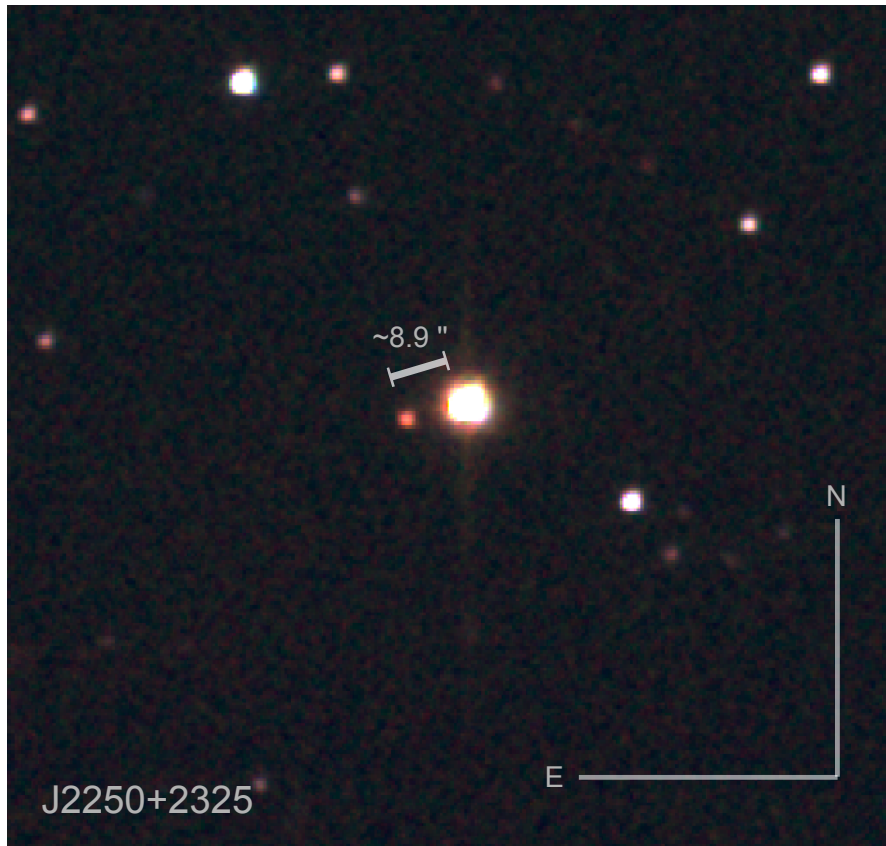
**Figure 3.6.** Separation and position angle of 2M2250+2325 A and 2M2250+2325 B at the three available epochs. A hundred random draws of the posterior probability distribution in separation and position angle temporal evolution are displayed as gray lines. These measurements are consistent with 2M1219+0154 A and B being co-moving.

### 3.6. MEMBERSHIP TO YOUNG ASSOCIATIONS

2M2250+2325 A was included in our sample of suspected young stars because it was listed as a candidate member of ABDMG by Schlieder et al. [2012], in a survey based on proper motion, X-ray and UV activity indicators.

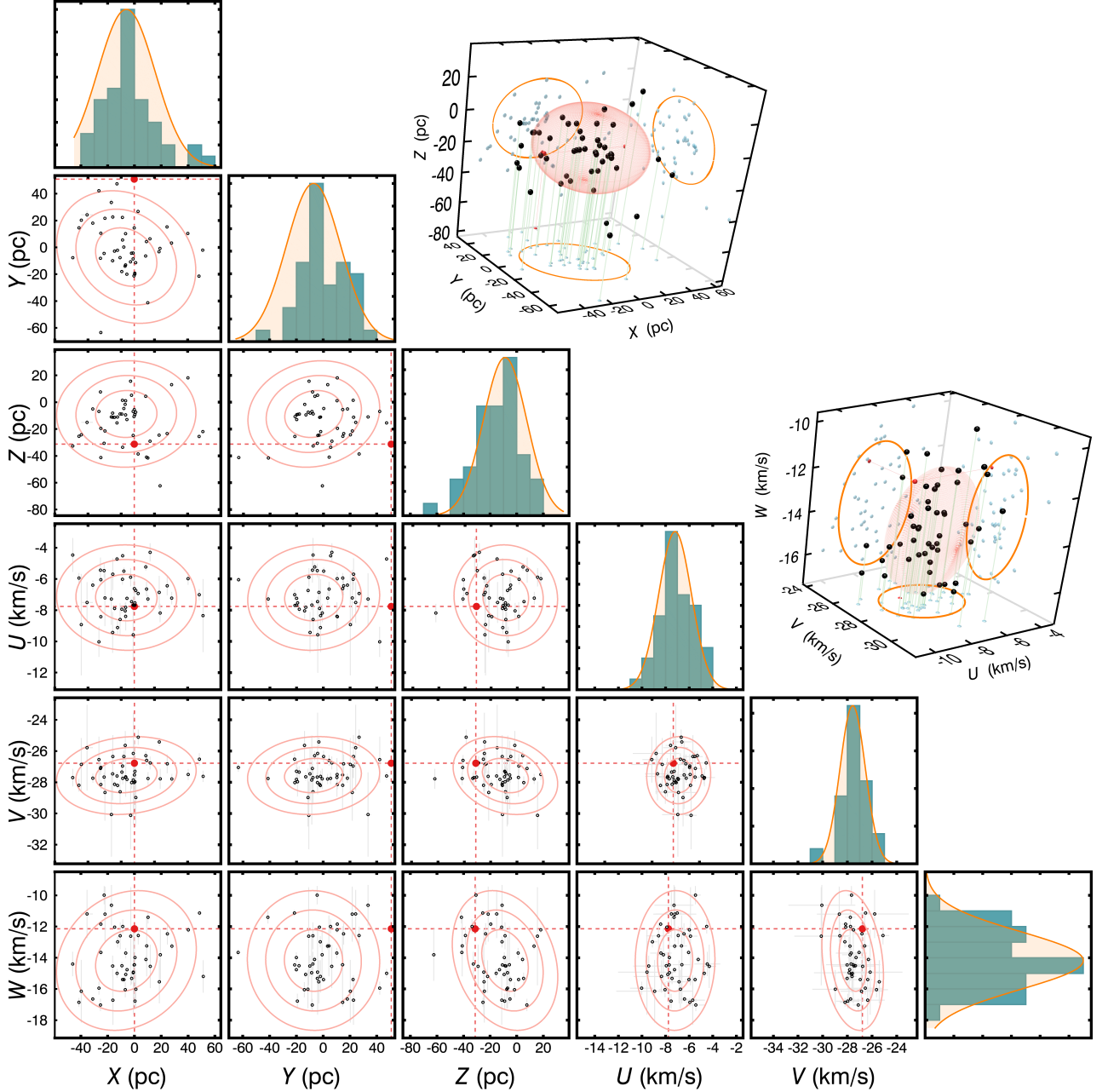
An age of  $\sim 50$  Myr was initially estimated for ABDMG [Zuckerman and Song, 2004] based on the  $H\alpha$  emission and the color-magnitude position of its M-type members. Barenfeld et al. [2013] subsequently found an inconsistent lower limit of 110 Myr based on the pre-main sequence contraction times for K-type members and the fact that they appeared to have reached the main sequence in ABDMG. Later studies such as Malo et al. [2014b] demonstrated that the strong magnetic activity of early M dwarfs made them appear younger in a color-magnitude diagram when compared to non-magnetic models, which explains why early estimates of moving group ages were too low. More recently, Bell et al. [2015] derived an isochronal age of  $150^{+50}_{-20}$  Myr for ABDMG.

We used the BANYAN II tool [Gagné et al., 2014, Malo et al., 2013] to assess the possibility that 2M2250+2325 A is a member of a nearby young moving group. We used the ‘young’ mode of BANYAN II where the star is assumed to be younger than 1 Gyr, and included the proper motion and radial velocity measurements listed in Table 3. II. We



**Figure 3.7.** Color image of the 2M2250+2325 AB system built from the CPAPIR *J* (blue), *H* (green) and *K* (red) images. 2M2250+2325 B appears much redder than background stars in the field of view.

obtained a 5.57% Bayesian probability that the system is a member of ABDMG, with a statistical distance of  $58.2 \pm 4.2$  pc (assuming membership). Figure 3.8 shows the projected position of 2M2250+2325 A in *XYZ* Galactic position and *UVW* space velocities compared to other members of ABDMG and the BANYAN II Gaussian model of ABDMG.



**Figure 3.8.** Predicted  $XYZ$  Galactic position and  $UVW$  space velocity of 2M2250+2325 A (red circles) obtained by adopting the statistical kinematic distance that maximizes the BANYAN II membership probability. Known members of ABDMG are represented with black circles, and orange thick lines show the multivariate Gaussian model of ABDMG used in BANYAN  $\Sigma$ , which is an updated version of the BANYAN II model (Gagné et al., submitted to ApJS). The 2D projections show 1, 2 and  $3\sigma$  contours of the model and the 1D and 3D projections show a  $1\sigma$  contour only. 1D projections of the ABDMG models are also compared with histograms of the member positions in  $XYZUVW$  space.

The low Bayesian probability for the ABDMG membership can be assigned to the fact that the  $Y$  position of 2M2250+2325 A is more than  $3\sigma$  away from the locus of ABDMG members.

Bowler et al. 2017 recently identified 2MASS J22362452+4751425 AB, a young system similar to 2M2250+2325 AB that lies in a similar  $Y$  region away from ABDMG, and they hypothesize that the true spatial distribution of ABDMG members may be larger than currently known. The discovery of most known ABDMG members was based on the Hipparcos survey [Perryman et al., 1997], which would not have been able to identify members at the position where 2M2250+2325 AB and 2MASS J22362452+4751425 AB are located.

We investigated the probability that a random young system such as 2M2250+2325 AB falls this close to ABDMG members in  $XZ$  and  $UVW$  while ignoring the  $Y$  dimension, without being related to the ABDMG moving group.  $10^7$  synthetic objects were drawn from the distribution of young stars ( $< 250$  Myr) within 58 pc of the Besançon Galactic Model [Robin et al., 1996, 2003, 2012, 2016]. The Besançon model indicates that the fraction of stars younger than 250 Myr in the Solar neighborhood is  $\sim 1.98\%$ , from which we adjusted the spatial density of low-mass stars measured by Chabrier [2003], yielding a density of  $9.5 \times 10^{-3} pc^{-3}$ . The  $N\sigma$  distance from the BANYAN II ABDMG model was calculated for all synthetic objects (ignoring  $Y$ ), and for 2M2250+2325 A. We find that a total of  $0.97 \pm 0.04$  young M dwarfs are expected to be found within the  $N\sigma$  distance (1.4) of 2M2250+2325 A. This indicates that there is a 62% probability that 2M2250+2325 A is a random interloper to the ABDMG distribution.

Including the fact that 2MASS J22362452+4751425 AB is also detected near the ABDMG distribution in this simulation, we obtain a probability of 38% that both objects are kinematic interlopers unrelated to ABDMG. It is therefore not possible at this stage to determine with confidence whether these systems are part of a yet unknown spatial extension of ABDMG. Trigonometric distance measurements of both primary stars will help strengthen the case for their ABDMG membership, as well as additional searches for new members in this region of the Solar neighborhood.

Using BANYAN from Malo et al. [2013] with consideration of the 2MASS  $J$ -band and APASS  $i'$ -band (12.815 mag) photometric data [Henden et al., 2016] and radial velocity, the membership's probability to ABDMG goes up to 99.91% ; 19.60% as a single star and 80.31% as a binary star at a statistical distance of  $60 \pm 3.8$  pc. 2M2250+2325 A is  $\sim 0.75$  mag too bright on the  $M_J$  vs  $I_c - J$  color-magnitude diagram assuming a distance of 60 pc to match the single ABDMG members track (see Figure 3 of Malo et al. 2013) and the

presence of an SB1 could explain this excess. The spectrophotometric distance deduced in Section 3.5 is also an indication of a binary star. Assuming that 2M2250+2325 A is actually 2 stars of equal brightness, the spectrophotometric distance should be increased by  $\sqrt{2}$ , resulting in  $60.8 \pm 14.6$  pc. This distance is exactly what is expected for the system considering its membership to ABDMG. This distance is also more consistent with that deduced for 2M2250+2325 B ( $62.3 \pm 11.4$  pc). A radial velocity or adaptive-optic follow-up on 2M2250+2325 A should provide a strong constraint on the nature of that star. These membership probabilities are high in comparison with those from BANYAN II because groups are modeled with different 3D Gaussian ellipsoids in XYZ coordinates.

2M1219+0154 A was similarly reported as a candidate member of ABDMG by Schlieder et al. [2012]. Using BANYAN II tool with the proper motion listed in Table 3. II, we find a Bayesian probability of 0.1% for ABDMG membership, and 81.9% for TW Hya membership ( $10 \pm 3$  Myr; de la Reza et al., 1989, Kastner et al., 1997, Bell et al., 2015) when the ‘young’ mode is used. If no age is assumed for the system, the respective ABDMG and TW Hya probabilities fall to 0% and 0.01%. The low projected rotational velocity and absence of lithium in the ESPaDOnS spectrum of 2M1219+0154 A, and the lack of low-gravity features in the SpeX spectrum of 2M1219+0154 B provide strong indications that it is most likely not a member of a young association. Whether the radial velocities from ESPaDOnS and FIRE are included or not, both BANYAN I and II yield a 0% membership probability to any young moving group for 2M1219+0154.

Table 3. II. Properties of the two companions discovered in this survey.

2MASS Designation	12193316+0154268		22501512+2325342		Ref.
Component	A	B	A	B	
R.A. (hh:mm:ss)	12:19:33.157	12:19:32.541	22:50:15.12	22:50:15.766	1
Decl. (dd:mm:ss)	01:54:26.77	01:54:32.69	23:25:34.2	23:25:32.64	1
Association	Field				1
Age	> 1 Gyr				1
Kin. distance <sup>a</sup> (pc)	...				1
Spec. distance (pc)	39.9 ± 9.6	52.2 ± 9.7	43.0 ± 10.3	62.3 ± 11.4	1
Spec. distance if binary (pc)	43 ± 10	...	60.8 ± 14.6	...	1
Angular separation (")	10.943 ± 0.008				1
Proj. Phys. separation (AU)	571 ± 106 <sup>b</sup>				1
Position angle (°)	304.13 ± 0.04				1
$\mu_\alpha \cos \delta$ (mas yr <sup>-1</sup> )	-73.40 ± 4.7				1,2,3
$\mu_\delta$ (mas yr <sup>-1</sup> )	-66.10 ± 5.4				1,2,3
Heliocentric Radial velocity (km s <sup>-1</sup> )					
2015 May 31 (UTC)	-20.1 ± 3.9	-17.3 ± 3.5	...	...	1
2015 Jul 1 (UTC)	...	...	-16 ± 1	...	1
2015 Jul 5 (UTC)	5 ± 0.5	...	...	...	1
$v \sin i$ (km s <sup>-1</sup> )	< 2				1
Spectral type	M3	M9	M3	L3 $\beta$	1
SDSS $u'$	18.25 ± 0.02	22.4 ± 0.5	17.88 ± 0.02	24 ± 3	4
SDSS $g'$	15.465 ± 0.003	23.6 ± 0.4	15.599 ± 0.003	23.9 ± 0.7	4

Table 3. II (cont'd)

2MASS Designation	12193316+0154268	22501512+2325342	Ref.
SDSS $r'$	$14.074 \pm 0.004$	$14.150 \pm 0.002$	$23.3 \pm 0.7$ 4
SDSS $i'$	$15.44 \pm 0.01$	$13.069 \pm 0.005$	$24 \pm 2$ 4
SDSS $z'$	$11.962 \pm 0.003$	$12.159 \pm 0.003$	$19.5 \pm 0.1$ 4
DENIS $I$	$11.97 \pm 0.03$	...	...
2MASS $J$	$10.54 \pm 0.02$	$10.71 \pm 0.02$	...
2MASS $H$	$9.96 \pm 0.02$	$10.08 \pm 0.02$	...
2MASS $K_s$	$9.66 \pm 0.01$	$9.83 \pm 0.02$	...
CPAPIR MKO $J$	...	...	$16.71 \pm 0.03$ 1
CPAPIR MKO $H$	...	...	$15.71 \pm 0.05$ 1
CPAPIR MKO $K$	...	...	$14.89 \pm 0.04$ 1
UKIDSS $J$	$10.652 \pm 0.001$	$14.977 \pm 0.004$	...
UKIDSS $H$	$11.151 \pm 0.001$	$14.312 \pm 0.005$	...
UKIDSS $K$	$10.716 \pm 0.001$	$13.787 \pm 0.005$	...
AllWISE W1	$9.54 \pm 0.02$	$9.72 \pm 0.02$	...
AllWISE W2	$9.40 \pm 0.02$	$9.58 \pm 0.02$	...
AllWISE W3	$9.27 \pm 0.04$	$9.44 \pm 0.04$	...

References. — (1) This paper, (2) Schlieder et al. 2012, (3) Qi et al. 2015, (4) Alam et al. 2015, (5) Epchtein et al. 1997, (6) Skrutskie et al. 2006, (7) Lawrence et al. 2007, (8) Kirkpatrick et al. 2014.

<sup>a</sup>Kinematic distance based on moving group membership.

<sup>b</sup>Using the companion's spectrophotometric distance.



### 3.7. DISCUSSION

We estimate the  $1\sigma$  lower limit of the recovery efficiency of our survey to  $0.341^{1/5} = 80.6\%$  based on the fact that the 5 known companions within our selection criteria were recovered. Even if the input sample used for this survey is probably highly incomplete, we can estimate a lower limit for the occurrence of 3–18'' substellar companions to young M dwarfs at  $6/2812 \approx 0.21\%$ . This lower limit is consistent with the results of Bowler (2016; see their Table 3), where the frequency of 5–13  $M_{\text{Jup}}$  planetary-mass objects on wide orbits (100–1000 AU) around M-type stars is estimated at  $< 7.3\%$ , based on a compilation of multiple direct-imaging surveys. For comparison, the occurrence rate of all substellar-mass companions (2–80  $M_{\text{Jup}}$ ) on 8–400 AU orbits was estimated at  $4.4^{+3.2}_{-1.3}\%$  [Lannier et al., 2016], based on a Bayesian analysis of direct-imaging observations of 54 stars.

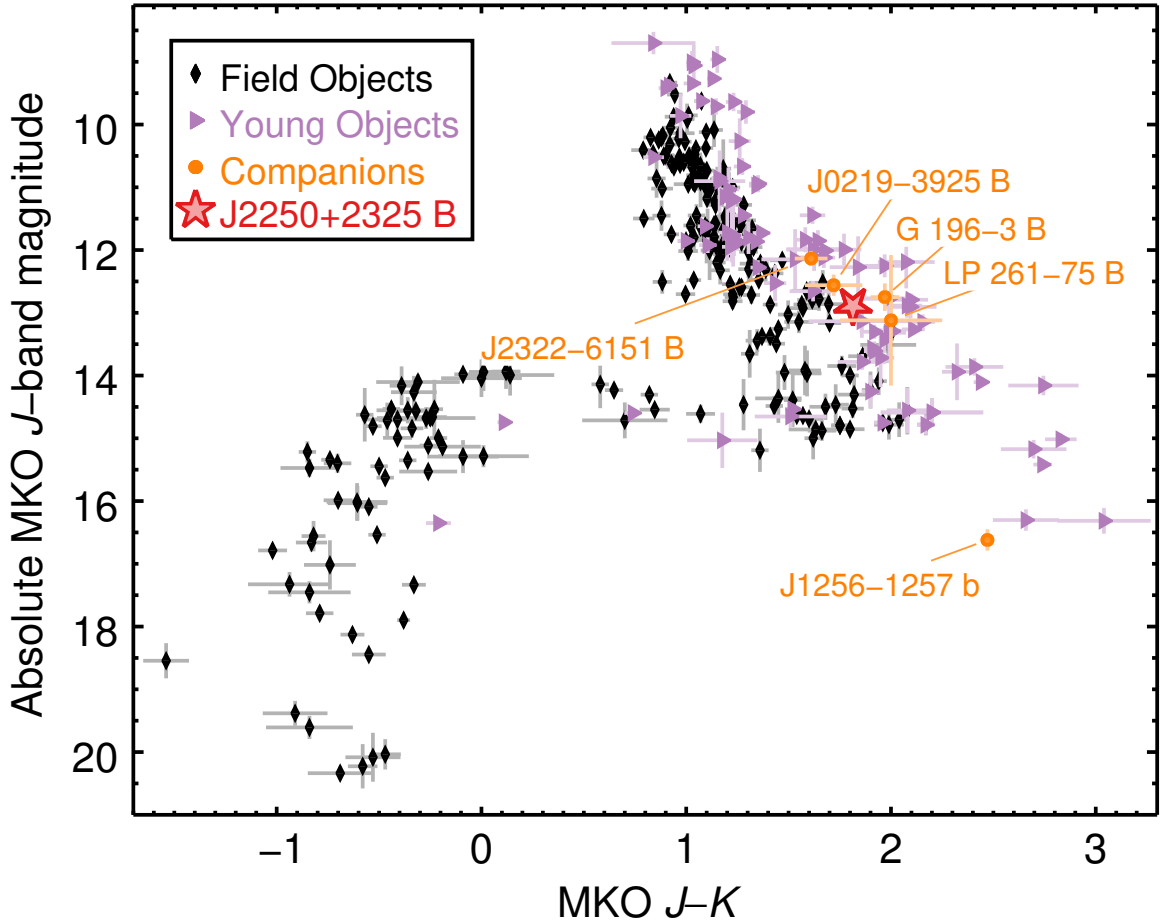
The fsd= 2 cloudy models of Saumon et al. [2012] were used to estimate a mass of  $30^{+11}_{-4} M_{\text{Jup}}$  for 2M2250+2325 B, assuming the age of ABDMG and a temperature of  $1600 \pm 200$  K (see Table 19 of Faherty et al. 2016). The age of the system dominates the error bars reported here, but the poorly constrained systematics of models at these young ages and low masses are likely to be at least as large.

We estimate a large mass ratio of  $q \sim 0.08$  for the 2M2250+2325 AB system, similar to other systems found by direct imaging (e.g., 2MASS 12073346–3932539 Ab at  $q \sim 0.15$ ; Chauvin et al. 2004). Such high mass ratios are most likely associated with systems in which both components are formed through turbulent core fragmentation. Assuming a circular orbit and a face-on orientation, we estimate a total period of  $\sim 19200$  yr for the system. The orbital motion would therefore induce an orbital motion of  $3 \text{ mas yr}^{-1}$ . The sensitivity of *Gaia* will be of the order of  $130 \mu\text{as}$  for late-type, faint objects ( $V=20 \text{ mag}$ )<sup>9</sup>, making it likely possible to measure the orbital motion of 2M2250+2325 B in the near future. This observation would help to constrain the mass ratio of the system independently from evolutionary models. With a precise mass estimate, evolutionary models could provide a better constraint on the age of the system, which will be useful to assess its possible membership to ABDMG.

We suggest that 2M2250+2325 A could be a binary star due to its brightness excess compared to singles members of ABDMG. It would not be the only low-mass binary system with a companion on a relatively wide orbit (e.g. 2MASS J01033563–5515561ABb [Delorme et al., 2013], Ross 458ABc [Goldman et al., 2010], 2MASS J1256–1257 [Stone et al., 2016]) and suggests, again, that the energy exchange in a three-body system is most likely to

---

9. Science performance from In-Orbit Commissioning Review (July 2014) available at <http://www.cosmos.esa.int/web/gaia/science-performance>



**Figure 3.9.** Near-infrared color-magnitude diagram of low-mass stars and substellar objects. Field objects are displayed as black diamonds, young objects are displayed as purple rightward triangles, and the known companions recovered in this survey are displayed as orange circles. 2M2250+2325 B is displayed as a thick red star, and falls in the locus of young L dwarfs that have redder near-infrared colors than the field sequence.

produce a tight binary system with the ejection of the third and less massive component resulting in a distant orbiting companion or an escape as mentioned by Reipurth and Mikkola [2015] for binary BD. We could also mention Gu PscAb [Naud et al., 2014] as a potential binary system hosting a planetary-mass object on a very wide orbit. Gu Psc A was found to be a member of ABDMG through youth signature, activity and high Bayesian analysis probability (using BANYAN). However, GU Psc A appeared  $\sim 0.78$  mag brighter than the absolute magnitude predicted for a single ABDMG member with its color [Malo et al., 2013] in a very similar way as 2M2250+2325 A. Since the multi-epoch radial velocity measurements remain constant, they could not conclude that GU Psc A is a binary system and suggest that the excess could be a consequence of chromospheric activity. However, the

binary nature of GU Psc A remains a possibility if the system is in a near pole-on geometry.

The near-infrared color-magnitude positions of the six co-moving pairs recovered in this survey is displayed in Figure 3.9. It can be noted that 2M2250+2325 B and the other previously known young companions fall in the locus of young L-type objects which are redder than the sequence of field low-mass stars and brown dwarfs.

### 3.8. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The discovery of a red ( $J - K = 1.814$ ) L3  $\beta$  co-moving companion to the M3-type potential ABDMG member 2MASS J22501512+2325342, and of the new field co-moving M3+M9 pair 2MASS J12193316+0154268 AB, are reported. Both primary stars were suggested to be binaries and future observations should be done to confirm it. 2M2250+2325 B is separated by  $8.9 \pm 0.05''$  from its host star, corresponding to a projected physical separation of  $\sim 500$  AU at the kinematic distance that best matches ABDMG, and has a model-dependent mass of  $\sim 30 M_{\text{Jup}}$  assuming the age of ABDMG. The system has kinematics similar to those of ABDMG members and the companion displays features consistent with a low gravity and therefore a young age, but the  $Y$  position of 2MASS J22501512+2325342 AB is an outlier compared to ABDMG members, similarly to the 2MASS J22362452+4751425 AB system discovered by Bowler et al. [2017]. We determine that there is however a relatively high probability (38%) that two young M dwarf unrelated to ABDMG fall this close to the ABDMG locus in  $XZ$  and  $UVW$  coordinates, therefore their discovery alone does not provide a strong indication that ABDMG is more extended than previously known—although this possibility should warrant further study..

The discovery of 2M2250+2325 B from 2MASS data illustrates that decade-old surveys can lead to useful discoveries of peculiar objects. A similar study could be led using other data sets such as UKIDSS, Spitzer archival data, or future projects like the Large Synoptic Survey Telescope (LSST) survey [Ivezic et al., 2008]. Similar studies will also become more efficient as more young association members are compiled and new moving groups are uncovered.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported in part by grants from the Fonds de Recherche Québécois–Nature et Technologie (FRQNT), 2015 and 2016 Trottier Excellence Grants for Summer Interns iREx (Institute for research on exoplanets). This paper includes data gathered with the 6.5 meter Magellan Telescopes located at Las Campanas Observatory, Chile (CNTAC program CN2013A-135). Based on observations obtained as part of the VISTA Hemisphere

Survey, ESO Program, 179.A-2010 (PI: McMahon). This publication uses observations obtained at Infrared Telescope Facility, which is operated by the University of Hawaii under contract NNH14CK55B with the National Aeronautics and Space Administration through program number 2015B027 (PI Gagné). The authors recognize and acknowledge the very significant cultural role and reverence that the summit of Mauna Kea has always had within the indigenous Hawaiian community. We are most fortunate to have the opportunity to conduct observations from this mountain. This research has made use of the SIMBAD database, operated at CDS, Strasbourg, France and of the Vizier catalog access tool, CDS, Strasbourg, France. This publication makes use of data products from the Two Micron All Sky Survey, which is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation. This publication makes use of the AAVSO Photometric All-Sky Survey (APASS), funded by the Robert Martin Ayers Sciences Fund. This research has benefited from the Ultracool RIZZO Spectral Library (<http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.11313>), maintained by Jonathan Gagné and Kelle Cruz. The authors would also like to thank our referee for excellent suggestions that improved the quality of this paper.

*MED* wrote most of the manuscript, generated Figures 3.1, 3.2, 3.3 and all Tables, obtained the CPAPIR data, led the companion identification analysis and wrote most of the computer codes. *EA* generated Figures 3.5, 3.6 and 3.7, led the CPAPIR data reduction, supervised the majority of the work and participated in the development of computer codes. *JG* generated Figures 3.4, 3.8 and 3.9, led the BANYAN II analysis and the contamination analysis, obtained and reduced the IRTF/SpeX data, measured the FIRE radial velocities, convolved the ESPaDOnS spectra for template comparison and supervised the writing. *RD* supervised the writing. *LM* acquired and reduced the ESPaDOnS spectra and measured the ESPaDOnS radial velocities and  $v \sin i$  and led the BANYAN analysis. *JKF* acquired and reduced the FIRE spectra. *DL* provided useful discussion on the development of the computer codes.

Magellan:Baade (FIRE); IRTF (SpeX); CFHT (ESPaDOnS); OMM (CPAPIR)

BANYAN [Malo et al., 2013], BANYAN II [Gagné et al., 2014], BANYAN  $\Sigma$  (Gagné et al., submitted to ApJS), UPENA (Version 2.12)<sup>10</sup> based on Libre-ESpRIT [Donati et al., 1997], Firehose (Version 2.0) [Bochanski et al., 2009, Gagné et al., 2015b], spextool v4.0 beta IDL package [Cushing et al., 2004], xtellcor IDL routine [Vacca et al., 2003], Overleaf<sup>11</sup>

---

10. <http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Upena/>

11. <https://www.overleaf.com/>



# BIBLIOGRAPHY

---

- S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, F. Anders, S. F. Anderson, T. Anderton, B. H. Andrews, E. Armengaud, É. Aubourg, S. Bailey, and et al. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III. , 219:12, July 2015. doi: 10.1088/0067-0049/219/1/12.
- F. Allard, D. Homeier, and B. Freytag. Models of very-low-mass stars, brown dwarfs and exoplanets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 370:2765–2777, June 2012. doi: 10.1098/rsta.2011.0269.
- K. N. Allers and M. C. Liu. A Near-infrared Spectroscopic Study of Young Field Ultracool Dwarfs. , 772:79, Aug. 2013. doi: 10.1088/0004-637X/772/2/79.
- E. Artigau. *Variabilite temporelle des naines T et construction d'une camera infrarouge a grand champ*. PhD thesis, Universite de Montreal, Canada, 2006.
- É. Artigau, J. Gagné, J. Faherty, L. Malo, M.-E. Naud, R. Doyon, D. Lafrenière, and Y. Beletsky. BANYAN. VI. Discovery of a Companion at the Brown Dwarf/Planet-Mass Limit to a Tucana-Horologium M Dwarf. , 806:254, June 2015. doi: 10.1088/0004-637X/806/2/254.
- I. Baraffe, D. Homeier, F. Allard, and G. Chabrier. New evolutionary models for pre-main sequence and main sequence low-mass stars down to the hydrogen-burning limit. , 577:A42, May 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201425481.
- S. A. Barenfeld, E. J. Bubar, E. E. Mamajek, and P. A. Young. A Kine-chemical Investigation of the AB Dor Moving Group “Stream”. , 766:6, Mar. 2013. doi: 10.1088/0004-637X/766/1/6.
- C. P. M. Bell, E. E. Mamajek, and T. Naylor. A self-consistent, absolute isochronal age scale for young moving groups in the solar neighbourhood. , 454:593–614, Nov. 2015. doi: 10.1093/mnras/stv1981.
- A. S. Binks and R. D. Jeffries. A lithium depletion boundary age of 21 Myr for the Beta Pictoris moving group. , 438:L11–L15, Feb. 2014. doi: 10.1093/mnras/slt141.
- J. J. Bochanski, J. F. Hennawi, R. A. Simcoe, J. X. Prochaska, A. A. West, A. J. Burgasser, S. M. Burles, R. A. Bernstein, C. L. Williams, and M. T. Murphy. MASE: A New Data-Reduction Pipeline for the Magellan Echellette Spectrograph. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(886):1409–1418, Dec. 2009. doi: 10.1086/648597. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2009PASP..121.1409B&link\\_type=EJOURNAL](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2009PASP..121.1409B&link_type=EJOURNAL).

- B. P. Bowler. Imaging Extrasolar Giant Planets. , 128(10):102001, Oct. 2016. doi: 10.1088/1538-3873/128/968/102001.
- B. P. Bowler, M. C. Liu, D. Mawet, H. Ngo, L. Malo, G. N. Mace, J. N. McLane, J. R. Lu, I. I. Tristan, S. Hinkley, L. A. Hillenbrand, E. L. Shkolnik, B. Benneke, and W. M. J. Best. Planets around Low-mass Stars (PALMS). VI. Discovery of a Remarkably Red Planetary-mass Companion to the AB Dor Moving Group Candidate 2MASS J22362452+4751425\*. , 153:18, Jan. 2017. doi: 10.3847/1538-3881/153/1/18.
- T. D. Brandt, M. Kuzuhara, M. W. McElwain, J. E. Schlieder, J. P. Wisniewski, E. L. Turner, J. Carson, T. Matsuo, B. Biller, M. Bonnefoy, C. Dressing, M. Janson, G. R. Knapp, A. Moro-Martín, C. Thalmann, T. Kudo, N. Kusakabe, J. Hashimoto, L. Abe, W. Brandner, T. Currie, S. Egner, M. Feldt, T. Golota, M. Goto, C. A. Grady, O. Guyon, Y. Hayano, M. Hayashi, S. Hayashi, T. Henning, K. W. Hodapp, M. Ishii, M. Iye, R. Kandori, J. Kwon, K. Mede, S. Miyama, J.-I. Morino, T. Nishimura, T.-S. Pyo, E. Serabyn, T. Suenaga, H. Suto, R. Suzuki, M. Takami, Y. Takahashi, N. Takato, H. Terada, D. Tomono, M. Watanabe, T. Yamada, H. Takami, T. Usuda, and M. Tamura. The Moving Group Targets of the SEEDS High-contrast Imaging Survey of Exoplanets and Disks: Results and Observations from the First Three Years. , 786:1, May 2014. doi: 10.1088/0004-637X/786/1/1.
- A. Burrows, W. B. Hubbard, J. I. Lunine, and J. Liebert. The theory of brown dwarfs and extrasolar giant planets. *Reviews of Modern Physics*, 73:719–765, July 2001. doi: 10.1103/RevModPhys.73.719.
- G. Chabrier. Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. , 115:763–795, July 2003. doi: 10.1086/376392.
- G. Chauvin, A.-M. Lagrange, C. Dumas, B. Zuckerman, D. Mouillet, I. Song, J.-L. Beuzit, and P. Lowrance. A giant planet candidate near a young brown dwarf. Direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing. , 425:L29–L32, Oct. 2004. doi: 10.1051/0004-6361:200400056.
- K. L. Cruz, I. N. Reid, J. Liebert, J. D. Kirkpatrick, and P. J. Lowrance. Meeting the Cool Neighbors. V. A 2MASS-Selected Sample of Ultracool Dwarfs. , 126:2421–2448, Nov. 2003. doi: 10.1086/378607.
- K. L. Cruz, I. N. Reid, J. D. Kirkpatrick, A. J. Burgasser, J. Liebert, A. R. Solomon, S. J. Schmidt, P. R. Allen, S. L. Hawley, and K. R. Covey. Meeting the Cool Neighbors. IX. The Luminosity Function of M7-L8 Ultracool Dwarfs in the Field. , 133:439–467, Feb. 2007. doi: 10.1086/510132.
- K. L. Cruz, J. D. Kirkpatrick, and A. J. Burgasser. Young l dwarfs identified in the field: A preliminary low-gravity, optical spectral sequence from l0 to l5. *The Astronomical Journal*, 137(2): 3345, 2009. URL <http://stacks.iop.org/1538-3881/137/i=2/a=3345>.
- K. L. Cruz, J. D. Kirkpatrick, and A. J. Burgasser. Young L Dwarfs Identified in the Field: A Preliminary Low-Gravity, Optical Spectral Sequence from L0 to L5. , 137:3345–3357, Feb. 2009. doi: 10.1088/0004-6256/137/2/3345.
- M. C. Cushing, W. D. Vacca, and J. T. Rayner. Spextool: A Spectral Extraction Package for SpeX, a 0.8-5.5 Micron Cross-Dispersed Spectrograph. *The Publications of the Astronomical Society of*

- the Pacific*, 116(8):362–376, Apr. 2004. doi: 10.1086/382907. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2004PASP..116..362C&link\\_type=EJOURNAL](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2004PASP..116..362C&link_type=EJOURNAL).
- R. de la Reza, C. A. O. Torres, G. Quast, B. V. Castilho, and G. L. Vieira. Discovery of new isolated T Tauri stars. , 343:L61–L64, Aug. 1989. doi: 10.1086/185511.
- G. M. De Silva, V. D’Orazi, C. Melo, C. A. O. Torres, M. Gieles, G. R. Quast, and M. Sterzik. Search for associations containing young stars: chemical tagging IC 2391 and the Argus association. , 431:1005–1018, May 2013. doi: 10.1093/mnras/stt153.
- P. Delorme, J. Gagné, J. H. Girard, A. M. Lagrange, G. Chauvin, M.-E. Naud, D. Lafrenière, R. Doyon, A. Riedel, M. Bonnefoy, and L. Malo. Direct-imaging discovery of a 12-14 Jupiter-mass object orbiting a young binary system of very low-mass stars. , 553:L5, May 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201321169.
- S. G. Djorgovski, A. Mahabal, A. Drake, M. Graham, and C. Donalek. Sky surveys. In *Planets, Stars and Stellar Systems*, pages 223–281. Springer, 2013.
- J.-F. Donati, M. Semel, B. D. Carter, D. E. Rees, and A. Collier Cameron. Spectropolarimetric observations of active stars. , 291:658, Nov. 1997. doi: 10.1093/mnras/291.4.658.
- T. J. Dupuy and M. C. Liu. The Hawaii Infrared Parallax Program. I. Ultracool Binaries and the L/T Transition. , 201:19, Aug. 2012. doi: 10.1088/0067-0049/201/2/19.
- O. J. Eggen. Reality Tests of Superclusters in the Young Disk Population. , 110:2862, Dec. 1995. doi: 10.1086/117734.
- T. Eisenbeiss, M. Ammler-von Eiff, T. Roell, M. Mugrauer, C. Adam, R. Neuhäuser, T. O. B. Schmidt, and A. Bedalov. The Hercules-Lyra association revisited. New age estimation and multiplicity study. , 556:A53, Aug. 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201118362.
- N. Epchtein, B. de Batz, L. Capoani, L. Chevallier, E. Copet, P. Fouqué, P. Lacombe, T. Le Bertre, S. Pau, D. Rouan, S. Ruphy, G. Simon, D. Tiphène, W. B. Burton, E. Bertin, E. Deul, H. Habing, J. Borsenberger, M. Dennefeld, F. Guglielmo, C. Loup, G. Mamon, Y. Ng, A. Omont, L. Provost, J.-C. Renault, F. Tanguy, S. Kimeswenger, C. Kienel, F. Garzon, P. Persi, M. Ferrari-Toniolo, A. Robin, G. Paturel, I. Vauglin, T. Forveille, X. Delfosse, J. Hron, M. Schultheis, I. Appenzeller, S. Wagner, L. Balazs, A. Holl, J. Lépine, P. Boscolo, E. Picazzio, P.-A. Duc, and M.-O. Mennessier. The deep near-infrared southern sky survey (DENIS). *The Messenger*, 87:27–34, Mar. 1997.
- J. K. Faherty, A. R. Riedel, K. L. Cruz, J. Gagne, J. C. Filippazzo, E. Lambrides, H. Fica, A. Weinberger, J. R. Thorstensen, C. G. Tinney, V. Baldassare, E. Lemonier, and E. L. Rice. Population Properties of Brown Dwarf Analogs to Exoplanets. , 225:10, July 2016. doi: 10.3847/0067-0049/225/1/10.
- B. Famaey, A. Jorissen, X. Luri, M. Mayor, S. Udry, H. Dejonghe, and C. Turon. Local kinematics of K and M giants from CORAVEL/Hipparcos/Tycho-2 data. Revisiting the concept of superclusters. , 430:165–186, Jan. 2005. doi: 10.1051/0004-6361:20041272.
- B. Famaey, A. Siebert, and A. Jorissen. On the age heterogeneity of the Pleiades, Hyades, and Sirius moving groups. , 483:453–459, May 2008. doi: 10.1051/0004-6361:20078979.



- J. C. Filippazzo, E. L. Rice, J. Faherty, K. L. Cruz, M. M. Van Gordon, and D. L.Looper. Fundamental Parameters and Spectral Energy Distributions of Young and Field Age Objects with Masses Spanning the Stellar to Planetary Regime. , 810:158, Sept. 2015. doi: 10.1088/0004-637X/810/2/158.
- J. Gagné, D. Lafrenière, R. Doyon, L. Malo, and É. Artigau. BANYAN. II. Very Low Mass and Substellar Candidate Members to Nearby, Young Kinematic Groups with Previously Known Signs of Youth. , 783:121, Mar. 2014. doi: 10.1088/0004-637X/783/2/121.
- J. Gagné, A. J. Burgasser, J. K. Faherty, D. Lafrenière, R. Doyon, J. C. Filippazzo, E. Bowsher, and C. P. Nicholls. SDSS J111010.01+011613.1: A New Planetary-mass T Dwarf Member of the AB Doradus Moving Group. , 808:L20, July 2015. doi: 10.1088/2041-8205/808/1/L20.
- J. Gagné, J. K. Faherty, K. L. Cruz, D. Lafrenière, R. Doyon, L. Malo, A. J. Burgasser, M.-È. Naud, É. Artigau, S. Bouchard, J. E. Gizis, and L. Albert. BANYAN. VII. A New Population of Young Substellar Candidate Members of Nearby Moving Groups from the BASS Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 219(2):33, Aug. 2015a. doi: 10.1088/0067-0049/219/2/33. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2015ApJS..219...33G&link\\_type=EJOURNAL](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2015ApJS..219...33G&link_type=EJOURNAL).
- J. Gagné, E. Lambrides, J. K. Faherty, and R. Simcoe. Firehose v2.0, Zenodo. Technical report, 2015b. URL <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.18775>.
- J. Gagné, J. K. Faherty, E. E. Mamajek, L. Malo, R. Doyon, J. C. Filippazzo, A. J. Weinberger, J. K. Donaldson, S. Lépine, D. Lafrenière, É. Artigau, A. J. Burgasser, D. Looper, A. Boucher, Y. Beletsky, S. Camnasio, C. Brunette, and G. Arboit. BANYAN. IX. The Initial Mass Function and Planetary-mass Object Space Density of the TW HYA Association. , 228:18, Feb. 2017. doi: 10.3847/1538-4365/228/2/18.
- Gaia Collaboration. VizieR Online Data Catalog: Gaia DR1 (Gaia Collaboration, 2016). *VizieR Online Data Catalog*, 1337, 2016.
- B. Gauza, V. J. S. Béjar, A. Pérez-Garrido, M. Rosa Zapatero Osorio, N. Lodieu, R. Rebolo, E. Pallé, and G. Nowak. Discovery of a Young Planetary Mass Companion to the Nearby M Dwarf VHS J125601.92-125723.9. , 804:96, May 2015. doi: 10.1088/0004-637X/804/2/96.
- B. Goldman, S. Marsat, T. Henning, C. Clemens, and J. Greiner. A new benchmark T8-9 brown dwarf and a couple of new mid-T dwarfs from the UKIDSS DR5+ LAS. , 405:1140–1152, June 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16524.x.
- A. A. Henden, M. Templeton, D. Terrell, T. C. Smith, S. Levine, and D. Welch. VizieR Online Data Catalog: AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (Henden+, 2016). *VizieR Online Data Catalog*, 2336, Jan. 2016.
- J. Hernández, L. Hartmann, T. Megeath, R. Gutermuth, J. Muzerolle, N. Calvet, A. K. Vivas, C. Briceño, L. Allen, J. Stauffer, E. Young, and G. Fazio. A Spitzer Space Telescope Study of Disks in the Young  $\sigma$  Orionis Cluster. , 662:1067–1081, June 2007. doi: 10.1086/513735.
- Z. Ivezić, J. A. Tyson, B. Abel, E. Acosta, R. Allsman, Y. AlSayyad, S. F. Anderson, J. Andrew, R. Angel, G. Angeli, R. Ansari, P. Antilogus, K. T. Arndt, P. Astier, E. Aubourg, T. Axelrod, D. J.

Bard, J. D. Barr, A. Barrau, J. G. Bartlett, B. J. Bauman, S. Beaumont, A. C. Becker, J. Becla, C. Beldica, S. Bellavia, G. Blanc, R. D. Blandford, J. S. Bloom, J. Bogart, K. Borne, J. F. Bosch, D. Boutigny, W. N. Brandt, M. E. Brown, J. S. Bullock, P. Burchat, D. L. Burke, G. Cagnoli, D. Calabrese, S. Chandrasekharan, S. Chesley, E. C. Cheu, J. Chiang, C. F. Claver, A. J. Connolly, K. H. Cook, A. Cooray, K. R. Covey, C. Cribbs, W. Cui, R. Cutri, G. Daubard, G. Daues, F. Delgado, S. Digel, P. Doherty, R. Dubois, G. P. Dubois-Felsmann, J. Durech, M. Eracleous, H. Ferguson, J. Frank, M. Freemon, E. Gangler, E. Gawiser, J. C. Geary, P. Gee, M. Geha, R. R. Gibson, D. K. Gilmore, T. Glanzman, I. Goodenow, W. J. Gressler, P. Gris, A. Guyonnet, P. A. Hascall, J. Haupt, F. Hernandez, C. Hogan, D. Huang, M. E. Huffer, W. R. Innes, S. H. Jacoby, B. Jain, J. Jee, J. G. Jernigan, D. Jevremovic, K. Johns, R. L. Jones, C. Juramy-Gilles, M. Juric, S. M. Kahn, J. S. Kalirai, N. Kallivayalil, B. Kalmbach, J. P. Kantor, M. M. Kasliwal, R. Kessler, D. Kirkby, L. Knox, I. Kotov, V. L. Krabbendam, S. Krughoff, P. Kubanek, J. Kuczewski, S. Kulkarni, R. Lambert, L. Le Guillou, D. Levine, M. Liang, K. Lim, C. Lintott, R. H. Lupton, A. Mahabal, P. Marshall, S. Marshall, M. May, R. McKercher, M. Migliore, M. Miller, D. J. Mills, D. G. Monet, M. Moniez, D. R. Neill, J. Nief, A. Nomerotski, M. Nordby, P. O'Connor, J. Oliver, S. S. Olivier, K. Olsen, S. Ortiz, R. E. Owen, R. Pain, J. R. Peterson, C. E. Petry, F. Pierfederici, S. Pietrowicz, R. Pike, P. A. Pinto, R. Plante, S. Plate, P. A. Price, M. Prouza, V. Radeka, J. Rajagopal, A. Rasmussen, N. Regnault, S. T. Ridgway, S. Ritz, W. Rosing, C. Roucelle, M. R. Rumore, S. Russo, A. Saha, B. Sassolas, T. L. Schalk, R. H. Schindler, D. P. Schneider, G. Schumacher, J. Sebag, G. H. Sembroski, L. G. Seppala, I. Shipsey, N. Silvestri, J. A. Smith, R. C. Smith, M. A. Strauss, C. W. Stubbs, D. Sweeney, A. Szalay, P. Takacs, J. J. Thaler, R. Van Berg, D. Vanden Berk, K. Vetter, F. Virieux, B. Xin, L. Walkowicz, C. W. Walter, D. L. Wang, M. Warner, B. Willman, D. Wittman, S. C. Wolff, W. M. Wood-Vasey, P. Yoachim, H. Zhan, and for the LSST Collaboration. LSST: from Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products. *ArXiv e-prints*, May 2008.

J. H. Kastner, B. Zuckerman, D. A. Weintraub, and T. Forveille. X-ray and molecular emission from the nearest region of recent star formation. *Science*, 277:67–71, 1997. doi: 10.1126/science.277.5322.67.

J. R. King, A. R. Villarreal, D. R. Soderblom, A. F. Gulliver, and S. J. Adelman. Stellar Kinematic Groups. II. A Reexamination of the Membership, Activity, and Age of the Ursa Major Group. , 125:1980–2017, Apr. 2003. doi: 10.1086/368241.

J. D. Kirkpatrick. New Spectral Types L and T. , 43:195–245, Sept. 2005. doi: 10.1146/annurev.astro.42.053102.134017.

J. D. Kirkpatrick, I. N. Reid, J. Liebert, J. E. Gizis, A. J. Burgasser, D. G. Monet, C. C. Dahn, B. Nelson, and R. J. Williams. 67 Additional L Dwarfs Discovered by the Two Micron All Sky Survey. , 120:447–472, July 2000. doi: 10.1086/301427.

J. D. Kirkpatrick, A. Schneider, S. Fajardo-Acosta, C. R. Gelino, G. N. Mace, E. L. Wright, S. E. Logsdon, I. S. McLean, M. C. Cushing, M. F. Skrutskie, P. R. Eisenhardt, D. Stern, M. Baloković, A. J. Burgasser, J. K. Faherty, G. B. Lansbury, J. A. Rich, N. Skrzypek, J. W. Fowler, R. M. Cutri, F. J. Masci, T. Conrow, C. J. Grillmair, H. L. McCallon, C. A. Beichman, and K. A.

- Marsh. The AllWISE Motion Survey and the Quest for Cold Subdwarfs. , 783:122, Mar. 2014. doi: 10.1088/0004-637X/783/2/122.
- A. L. Kraus and L. A. Hillenbrand. The Role of Mass and Environment in Multiple-Star Formation: A 2MASS Survey of Wide Multiplicity in Three Young Associations. , 662:413–430, June 2007. doi: 10.1086/516835.
- A. L. Kraus and L. A. Hillenbrand. Spatial Distributions of Young Stars. , 686:L111, Oct. 2008. doi: 10.1086/593012.
- A. L. Kraus, E. L. Shkolnik, K. N. Allers, and M. C. Liu. A Stellar Census of the Tucana-Horologium Moving Group. , 147:146, June 2014. doi: 10.1088/0004-6256/147/6/146.
- J. Lannier, P. Delorme, A. M. Lagrange, S. Borgniet, J. Rameau, J. E. Schlieder, J. Gagné, M. A. Bonavita, L. Malo, G. Chauvin, M. Bonnefoy, and J. H. Girard. MASSIVE: A Bayesian analysis of giant planet populations around low-mass stars. , 596:A83, Dec. 2016. doi: 10.1051/0004-6361/201628237.
- A. Lawrence, S. J. Warren, O. Almaini, A. C. Edge, N. C. Hambly, R. F. Jameson, P. Lucas, M. Casali, A. Adamson, S. Dye, J. P. Emerson, S. Foucaud, P. Hewett, P. Hirst, S. T. Hodgkin, M. J. Irwin, N. Lodieu, R. G. McMahon, C. Simpson, I. Smail, D. Mortlock, and M. Folger. The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS). , 379:1599–1617, Aug. 2007. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.12040.x.
- S. K. Leggett, M. J. Currie, W. P. Varricatt, T. G. Hawarden, A. J. Adamson, J. Buckle, T. Carroll, J. K. Davies, C. J. Davis, T. H. Kerr, O. P. Kuhn, M. S. Seigar, and T. Wold. Jhk observations of faint standard stars in the mauna kea observatories near-infrared photometric system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373(2):781–792, 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.11069.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.11069.x>.
- K. L. Luhman, J. R. Stauffer, and E. E. Mamajek. The Age of AB Doradus. , 628:L69–L72, July 2005. doi: 10.1086/432617.
- L. Malo, R. Doyon, D. Lafrenière, É. Artigau, J. Gagné, F. Baron, and A. Riedel. Bayesian Analysis to Identify New Star Candidates in Nearby Young Stellar Kinematic Groups. , 762:88, Jan. 2013. doi: 10.1088/0004-637X/762/2/88.
- L. Malo, É. Artigau, R. Doyon, D. Lafrenière, L. Albert, and J. Gagné. BANYAN. III. Radial Velocity, Rotation, and X-Ray Emission of Low-mass Star Candidates in Nearby Young Kinematic Groups. , 788:81, June 2014a. doi: 10.1088/0004-637X/788/1/81.
- L. Malo, R. Doyon, G. A. Feiden, L. Albert, D. Lafrenière, É. Artigau, J. Gagné, and A. Riedel. BANYAN. IV. Fundamental Parameters of Low-mass Star Candidates in Nearby Young Stellar Kinematic Groups Isochronal Age Determination using Magnetic Evolutionary Models. , 792:37, Sept. 2014b. doi: 10.1088/0004-637X/792/1/37.
- E. E. Mamajek, J. L. Bartlett, A. Seifahrt, T. J. Henry, S. B. Dieterich, J. C. Lurie, M. A. Kenworthy, W.-C. Jao, A. R. Riedel, J. P. Subasavage, J. G. Winters, C. T. Finch, P. A. Ianna, and J. Bean. The Solar Neighborhood. XXX. Fomalhaut C. , 146:154, Dec. 2013. doi: 10.1088/0004-6256/146/6/154.

- E. Mentuch, A. Brandeker, M. H. van Kerkwijk, R. Jayawardhana, and P. H. Hauschildt. Lithium Depletion of Nearby Young Stellar Associations. , 689:1127-1140, Dec. 2008. doi: 10.1086/592764.
- T. Mikami and A. Heck. Absolute magnitudes of F-, G-, K-, and M-type stars from maximum-likelihood statistical parallaxes. , 34:529, 1982.
- S. J. Murphy and W. A. Lawson. New low-mass members of the Octans stellar association and an updated 30-40 Myr lithium age. , 447:1267–1281, Feb. 2015. doi: 10.1093/mnras/stu2450.
- M.-E. Naud, É. Artigau, L. Malo, L. Albert, R. Doyon, D. Lafrenière, J. Gagné, D. Saumon, C. V. Morley, F. Allard, D. Homeier, C. A. Beichman, C. R. Gelino, and A. Boucher. Discovery of a Wide Planetary-mass Companion to the Young M3 Star GU Psc. , 787:5, May 2014. doi: 10.1088/0004-637X/787/1/5.
- J. A. Nelder and R. Mead. . *The Computer Journal*, 7:308, 1965.
- M. J. Pecaut, E. E. Mamajek, and E. J. Bubar. A Revised Age for Upper Scorpius and the Star Formation History among the F-type Members of the Scorpius-Centaurus OB Association. , 746:154, Feb. 2012. doi: 10.1088/0004-637X/746/2/154.
- M. A. C. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, E. Hoeg, U. Bastian, P. L. Bernacca, M. Crézé, F. Donati, M. Grenon, M. Grewing, F. van Leeuwen, H. van der Marel, F. Mignard, C. A. Murray, R. S. Le Poole, H. Schrijver, C. Turon, F. Arenou, M. Froeschlé, and C. S. Petersen. The HIPPARCOS Catalogue. , 323:L49–L52, July 1997.
- Z. Qi, Y. Yu, B. Bucciarelli, M. G. Lattanzi, R. L. Smart, A. Spagna, B. J. McLean, Z. Tang, H. R. A. Jones, R. Morbidelli, L. Nicastrò, and A. Vecchiato. Absolute Proper Motions Outside the Plane (APOPM)—A Step Toward the GSC2.4. , 150:137, Oct. 2015. doi: 10.1088/0004-6256/150/4/137.
- J. T. Rayner, D. W. Toomey, P. M. Onaka, A. J. Denault, W. E. Stahlberger, W. D. Vacca, M. C. Cushing, and S. Wang. SpeX: A Medium-Resolution 0.8-5.5 Micron Spectrograph and Imager for the NASA Infrared Telescope Facility. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115(8):362–382, Mar. 2003. doi: 10.1086/367745. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2003PASP...115..362R&link\\_type=EJOURNAL](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2003PASP...115..362R&link_type=EJOURNAL).
- R. Rebolo, M. R. Zapatero Osorio, S. Madruga, V. J. S. Bejar, S. Arribas, and J. Licandro. Discovery of a Low-Mass Brown Dwarf Companion of the Young Nearby Star G 196-3. *Science*, 282:1309, Nov. 1998. doi: 10.1126/science.282.5392.1309.
- I. N. Reid and L. M. Walkowicz. LP 261-75/2MASSW J09510549+3558021: A Young, Wide M4.5/L6 Binary. , 118:671–677, May 2006. doi: 10.1086/503446.
- I. N. Reid, S. L. Hawley, and J. E. Gizis. The Palomar/MSU Nearby-Star Spectroscopic Survey. I. The Northern M Dwarfs -Bandstrengths and Kinematics. , 110:1838, Oct. 1995. doi: 10.1086/117655.
- I. N. Reid, K. L. Cruz, J. D. Kirkpatrick, P. R. Allen, F. Mungall, J. Liebert, P. Lowrance, and A. Sweet. Meeting the Cool Neighbors. X. Ultracool Dwarfs from the 2MASS All-Sky Data Release. , 136:1290–1311, Sept. 2008. doi: 10.1088/0004-6256/136/3/1290.

- B. Reipurth and S. Mikkola. Brown Dwarf Binaries from Disintegrating Triple Systems. , 149:145, Apr. 2015. doi: 10.1088/0004-6256/149/4/145.
- J. Robert, J. Gagné, É. Artigau, D. Lafrenière, D. Nadeau, R. Doyon, L. Malo, L. Albert, C. Simard, D. C. Bardalez Gagliuffi, and A. J. Burgasser. A Brown Dwarf Census from the SIMP Survey. , 830:144, Oct. 2016. doi: 10.3847/0004-637X/830/2/144.
- A. C. Robin, M. Haywood, M. Creze, D. K. Ojha, and O. Bienayme. The thick disc of the Galaxy: sequel of a merging event. , 305:125, Jan. 1996.
- A. C. Robin, C. Reylé, S. Derrière, and S. Picaud. A synthetic view on structure and evolution of the Milky Way. , 409:523–540, Oct. 2003. doi: 10.1051/0004-6361:20031117.
- A. C. Robin, D. J. Marshall, M. Schultheis, and C. Reylé. Stellar populations in the Milky Way bulge region: towards solving the Galactic bulge and bar shapes using 2MASS data. , 538:A106, Feb. 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201116512.
- A. C. Robin, C. Reylé, O. Bienaymé, J. G. Fernandez-Trincado, and E. B. Amôres. Clues on the Milky Way disc formation from population synthesis simulations. *Astronomische Nachrichten*, 337: 884, Sept. 2016. doi: 10.1002/asna.201612391.
- D. Saumon, M. S. Marley, M. Abel, L. Frommhold, and R. S. Freedman. New H<sub>2</sub> Collision-induced Absorption and NH<sub>3</sub> Opacity and the Spectra of the Coolest Brown Dwarfs. , 750:74, May 2012. doi: 10.1088/0004-637X/750/1/74.
- J. E. Schlieder, S. Lépine, and M. Simon. Cool Young Stars in the Northern Hemisphere:  $\beta$  Pictoris and AB Doradus Moving Group Candidates. , 143:80, Apr. 2012. doi: 10.1088/0004-6256/143/4/80.
- E. Shkolnik, M. C. Liu, and I. N. Reid. Identifying the Young Low-mass Stars within 25 pc. I. Spectroscopic Observations. , 699:649–666, July 2009. doi: 10.1088/0004-637X/699/1/649.
- A. Sills, M. H. Pinsonneault, and D. M. Terndrup. The Angular Momentum Evolution of Very Low Mass Stars. , 534:335–347, May 2000. doi: 10.1086/308739.
- R. A. Simcoe, A. J. Burgasser, R. A. Bernstein, B. C. Bigelow, J. Fishner, W. J. Forrest, C. McMurtry, J. L. Pipher, P. L. Schechter, and M. Smith. FIRE: a near-infrared cross-dispersed echellette spectrometer for the Magellan telescopes. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II. Edited by McLean*, 7014:70140U–70140U–10, July 2008. doi: 10.1117/12.790414. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2008SPIE.7014E..0US&link\\_type=EJOURNAL](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2008SPIE.7014E..0US&link_type=EJOURNAL).
- R. A. Simcoe, A. J. Burgasser, P. L. Schechter, J. Fishner, R. A. Bernstein, B. C. Bigelow, J. L. Pipher, W. Forrest, C. McMurtry, M. J. Smith, and J. J. Bochanski. FIRE: A Facility Class Near-Infrared Echelle Spectrometer for the Magellan Telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925):270–286, Mar. 2013. doi: 10.1086/670241. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2013PASP..125..270S&link\\_type=EJOURNAL](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2013PASP..125..270S&link_type=EJOURNAL).
- M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer,

- R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk, and S. Wheelock. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). , 131:1163–1183, Feb. 2006. doi: 10.1086/498708.
- J. M. Stone, A. J. Skemer, K. M. Kratter, T. J. Dupuy, L. M. Close, J. A. Eisner, J. J. Fortney, P. M. Hinz, J. R. Males, C. V. Morley, K. M. Morzinski, and K. Ward-Duong. Adaptive Optics imaging of VHS 1256-1257: A Low Mass Companion to a Brown Dwarf Binary System. , 818:L12, Feb. 2016. doi: 10.3847/2041-8205/818/1/L12.
- C. A. O. Torres, L. da Silva, G. R. Quast, R. de la Reza, and E. Jilinski. A New Association of Post-T Tauri Stars near the Sun. , 120:1410–1425, Sept. 2000. doi: 10.1086/301539.
- C. A. O. Torres, G. R. Quast, C. H. F. Melo, and M. F. Sterzik. *Young Nearby Loose Associations*, page 757. Dec. 2008.
- W. D. Vacca, M. C. Cushing, and J. T. Rayner. A Method of Correcting Near-Infrared Spectra for Telluric Absorption. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115(8):389–409, Mar. 2003. doi: 10.1086/346193. URL [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=2003PASP..115..389V&link\\_type=EJOURNAL](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=2003PASP..115..389V&link_type=EJOURNAL).
- L. Vican. Age Determination for 346 Nearby Stars in the Herschel DEBRIS Survey. , 143:135, June 2012. doi: 10.1088/0004-6256/143/6/135.
- F. J. Vrba, A. A. Henden, C. B. Luginbuhl, H. H. Guetter, J. A. Munn, B. Canzian, A. J. Burgasser, J. D. Kirkpatrick, X. Fan, T. R. Geballe, D. A. Golimowski, G. R. Knapp, S. K. Leggett, D. P. Schneider, and J. Brinkmann. Preliminary Parallaxes of 40 L and T Dwarfs from the US Naval Observatory Infrared Astrometry Program. , 127:2948–2968, May 2004. doi: 10.1086/383554.
- A. J. Weinberger, G. Anglada-Escudé, and A. P. Boss. Distance and Kinematics of the TW Hydrae Association from Parallaxes. , 762:118, Jan. 2013. doi: 10.1088/0004-637X/762/2/118.
- M. R. Zapatero Osorio, V. J. S. Béjar, E. L. Martín, M. C. Gálvez Ortiz, R. Rebolo, G. Bihain, T. Henning, S. Boudreault, B. Goldman, R. Mundt, J. A. Caballero, and P. A. Miles-Páez. Spectroscopic follow-up of L- and T-type proper-motion member candidates in the Pleiades. , 572:A67, Dec. 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201424634.
- Z. H. Zhang, D. J. Pinfield, B. Burningham, H. R. A. Jones, M. C. Gálvez-Ortiz, S. Catalán, R. L. Smart, S. Lépine, J. R. A. Clarke, Y. V. Pavlenko, D. N. Murray, M. K. Kuznetsov, A. C. Day-Jones, J. Gomes, F. Marocco, and B. Sipócz. A spectroscopic and proper motion search of Sloan Digital Sky Survey: red subdwarfs in binary systems. , 434:1005–1027, Sept. 2013. doi: 10.1093/mnras/stt1030.
- B. Zuckerman and I. Song. Young Stars Near the Sun. , 42:685–721, Sept. 2004. doi: 10.1146/annurev.astro.42.053102.134111.
- B. Zuckerman, I. Song, M. S. Bessell, and R. A. Webb. The  $\beta$  Pictoris Moving Group. , 562:L87–L90, Nov. 2001a. doi: 10.1086/337968.
- B. Zuckerman, I. Song, and R. A. Webb. Tucana Association. , 559:388–394, Sept. 2001b. doi: 10.1086/322305.
- B. Zuckerman, I. Song, and M. S. Bessell. The AB Doradus Moving Group. , 613:L65–L68, Sept. 2004. doi: 10.1086/425036.

B. Zuckerman, M. S. Bessell, I. Song, and S. Kim. The Carina-Near Moving Group. , 649:L115–L118, Oct. 2006. doi: 10.1086/508060.

B. Zuckerman, L. Vican, I. Song, and A. Schneider. Young Stars near Earth: The Octans-Near Association and Castor Moving Group. , 778:5, Nov. 2013. doi: 10.1088/0004-637X/778/1/5.

# Chapitre 4

---

## CONCLUSION

En résumé, ce projet de maîtrise concernait la recherche, la détection et la caractérisation de compagnons jeunes de faible masse. Le but principal du travail fut d'augmenter l'échantillon assez restreint d'objets de masse substellaire en orbite éloignée autour d'étoiles jeunes en appliquant des algorithmes rappelant l'imagerie différentielle sur des images d'archive judicieusement choisies. Les objets de faible masse ne sont pas assez massifs pour soutenir un processus de fusion nucléaire leur permettant de maintenir une température stable. L'absence de production interne d'énergie et la quasi situation d'isolement à laquelle ils sont soumis font que ces objets irradient leur énergie résiduelle de leur formation de sorte qu'ils se refroidissent continuellement au fil du temps. Leurs caractéristiques spectrales se modifient alors suivant une courbe d'évolution dictée par leur masse qui influence leur taux de refroidissement et la composition chimique de leur atmosphère. Leur éloignement par rapport à l'étoile offre l'opportunité d'analyser leur spectre en ayant recours à des instruments et des méthodes accessibles. Ainsi, un grand échantillon d'objets de ce type permet de tester les modèles de courbes d'évolution. Ces modèles évolutifs complexes font intervenir différentes hypothèses de formation et de composition chimique qui peuvent alors elles-mêmes être vérifiées.

L'analyse de 2 812 images du relevé 2MASS a permis la détection d'une nouvelle naine brune en orbite à plus de 500 AU d'une étoile de type M3 probablement membre de l'association jeune AB Doradus, âgée d'environ 150 Ma. Statistiquement, l'étoile hôte doit être binaire afin de mieux expliquer son appartenance à l'association. De plus, cette hypothèse permet d'expliquer les différences calculées entre la distance spectrale de l'étoile et celle de la naine brune. L'interaction gravitationnelle de ce système à 3 corps aurait possiblement mené à l'éjection rapide et partielle de l'objet le moins massif du système et le rapprochement des binaires. Les signes de jeunesse de la naine brune et de l'étoile corroborent l'appartenance à une association jeune. La position du système dans le ciel rend l'appartenance à AB reste incertaine, quoique ce ne serait toutefois



pas le seul dont la position ne correspond pas exactement à ce qui est attendu pour ce groupe.

Il a été démontré à de nombreuses reprises que la prévalence des planètes géantes gazeuses et des naines brunes de faible masse est petite sur des orbites éloignées. La deuxième partie de cette maîtrise fut d'élaborer et de vérifier une stratégie basée sur la corrélation croisée de raies spectrales moléculaires pour détecter des compagnons géants gazeux de masses planétaires sur des orbites inférieures à 40 AU en utilisant les spécificités des spectrographes infrarouges à grande résolution et grande couverture spectrale nouvellement accessibles. Ce projet est toujours en cours. Entre autres, des spectres de 3 systèmes déjà connus, provenant de l'instrument visiteur IGRINS (un spectrographe à dispersion croisée qui couvre entièrement les bandes  $H$  et  $K$  en une seule exposition avec une résolution  $R = \lambda/\Delta\lambda \sim 45\,000$ ) au télescope Gemini-Sud au Chili, ont été obtenus en mai 2018 afin de démontrer la faisabilité de détecter des objets de masse substellaire indépendamment de leur séparation. L'intérêt de ce projet, à plus long terme, est d'effectuer un relevé de planètes géantes gazeuses autour des étoiles similaires au Soleil qui sont soumises à de grandes vitesses de rotation et qui sont membres d'une association jeune. La détection d'une population de planètes à ces séparations par l'imagerie directe nécessite énormément de ressources. La détection d'une partie de cette population par la méthode spectroscopique explorée dans le cadre de cette maîtrise apparaît plus accessible à court terme.