

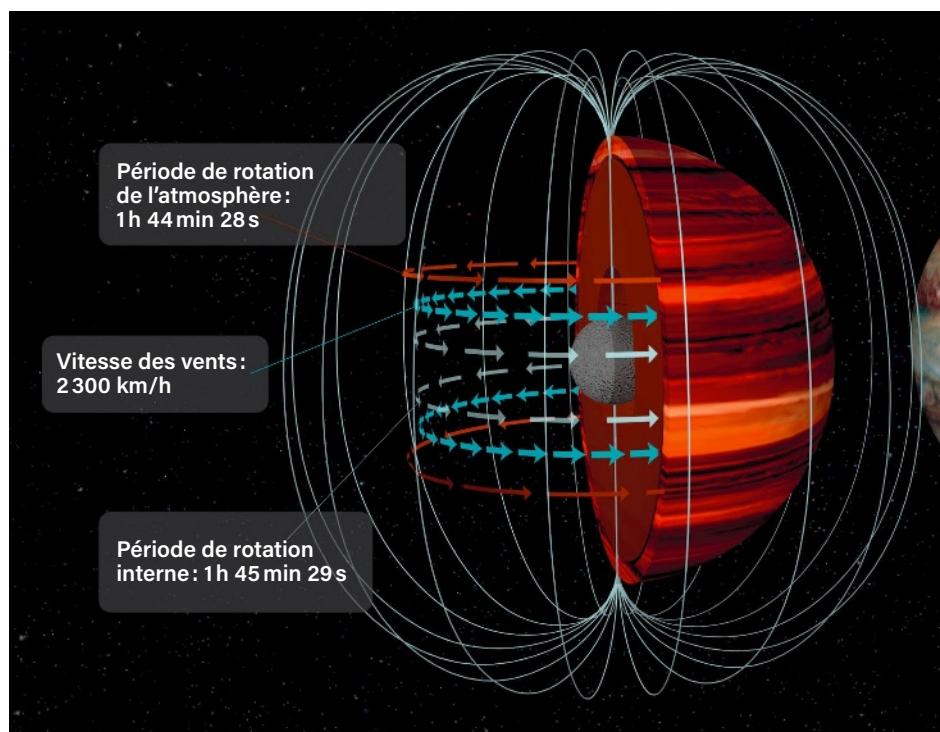
un peu étoffé sans être encore très riche. Comme mon directeur de thèse travaillait sur la formation des étoiles, j'ai décidé de chercher des naines brunes dans les régions où naissent les étoiles. J'en ai découvert certaines dont la masse les rapproche des planètes. À cette époque, nous n'avions aucune idée de la façon dont ces objets se forment. Nous ne savions pas s'il y avait une limite de masse inférieure, mais nous trouvions des naines brunes toujours plus petites.

Mon travail de thèse a conduit à la découverte d'une vingtaine de ces astres, qui ont contribué à leur compréhension. Depuis, le *2-Micron All Sky Survey* (2MASS), un programme d'observation infrarouge mené au début des années 2000, et le *Wide-Field Infrared Survey* (WISE), un télescope spatial lancé en 2009, en ont découvert bien d'autres. Le nombre actuel de naines brunes s'élève à environ 3000. Mais il en reste encore beaucoup d'autres à localiser. Les estimations suggèrent que la Voie lactée en contiendrait entre 25 milliards et 100 milliards.

NÉES COMME DES ÉTOILES OU COMME DES PLANÈTES ?

En tant que limite inférieure pour la masse nécessaire à la formation des étoiles, les naines brunes offrent aux astronomes une chance unique d'approfondir leur compréhension des étapes fondamentales de la naissance des étoiles, mais aussi de celle des planètes. Les étoiles se forment dans des nuages moléculaires, de vastes régions riches en gaz (principalement de l'hydrogène moléculaire) et en poussière. Si la masse d'un nuage moléculaire est suffisamment grande, la gravité peut y vaincre la pression du gaz soutenant le nuage et le faire s'effondrer sur lui-même. Il forme alors une ou plusieurs étoiles. Pendant l'effondrement, tout mouvement de rotation dans le nuage, même infime, est amplifié, de la même façon que les patineurs sur glace tournent plus vite quand ils rapprochent leurs bras de leur corps. Cette rotation dans le nuage conduit à la formation d'un disque circumstellaire de matière entourant l'étoile naissante. Ce disque est alors le creuset d'où émergent des planètes.

Quand les naines brunes ont été découvertes, les astronomes supposaient qu'elles naissaient selon le même processus que les étoiles. Mais ils étaient perplexes quant à la manière dont la gravité d'une si petite masse était capable de surmonter la pression du gaz et initier un effondrement. Dans les années 2000, les chercheurs ont imaginé divers scénarios et conçu des projets d'observation pour distinguer ces différentes hypothèses. Certaines théories suggéraient que des perturbations empêchaient des étoiles en formation d'atteindre leur masse finale. Selon d'autres pistes, des processus physiques provoquaient



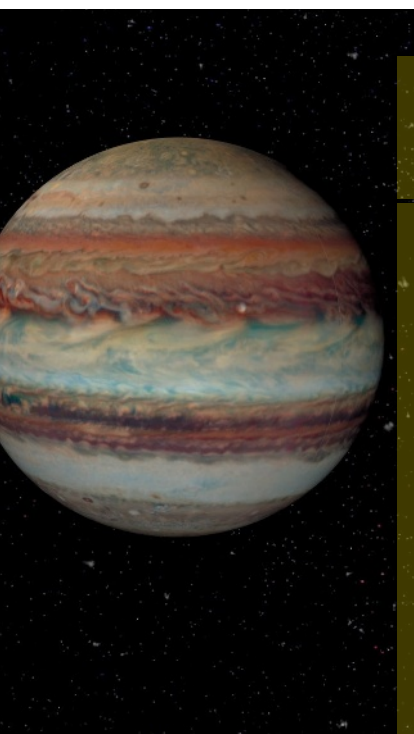
Pour mesurer la vitesse des vents à la surface de la naine brune, Katelyn Allers et ses collègues se sont inspirés d'une technique utilisée sur Jupiter, qui consiste à évaluer la période de rotation des structures se déplaçant à la surface (et poussées par les vents) et d'estimer la période de rotation de la planète à partir des émissions radio émanant des couches plus profondes de l'atmosphère. Dans le cas de la naine brune 2MASS J10475385 + 2124234, les chercheurs ont montré que la différence entre les deux périodes mesurées était de 1 minute, ce qui correspond à une vitesse des vents de 2 300 kilomètres par heure.

l'éjection de la naine brune hors de son environnement natal à un stade prématuré ou conduisaient à la dispersion du nuage de gaz, ne laissant alors qu'une étoile miniature.

Il était aussi possible d'invoquer des versions «réduites» de la formation d'étoiles ou des versions «amplifiées» de la formation de planètes. Cette question est un bon exemple de cas où différentes théories entraînent des prédictions distinctes et vérifiables. Grâce à nos recherches, nous avons recolté de nombreuses informations : nous avons constaté l'ubiquité des disques circumstellaires autour des naines brunes, mesuré la distribution de masse des étoiles et des naines brunes dans divers environnements, déterminé l'orbite de ces dernières dans des systèmes binaires, etc. Avec ces données, il semblait plus probable que la majorité des naines brunes se forment comme des mini-étoiles, à partir de réservoirs de gaz modestes.

Le fait que les naines brunes présentent des disques circumstellaires a soulevé la possibilité qu'elles abritent des planètes. Bien que nous n'en ayons pas encore la preuve définitive, il y a de grandes chances que des planètes se développent dans ces disques tout comme elles le font autour des étoiles. Les scientifiques espèrent confirmer ce scénario dans les prochaines années.

Mais la question de l'origine des naines brunes n'est pas close pour autant. Récemment, des chercheurs ont découvert des naines brunes isolées avec des masses similaires à celles des planètes géantes (moins de 13 fois la masse de Jupiter), ce qui a relancé la



question de leur formation. Certaines de ces naines brunes de masse planétaire sont-elles apparues dans les disques circumstellaires d'étoiles plus massives – en d'autres termes, se seraient-elles formées comme des planètes?

Afin de tester les scénarios de formation de tels objets, mes collègues et moi avons utilisé le télescope spatial *Hubble* pour étudier des systèmes binaires particuliers constitués de paires de naines brunes de masse planétaires. Les caractéristiques de ces systèmes nous permettent de dire comment ces derniers se sont constitués. En 2020, nous avons découvert un système dont les caractéristiques s'expliquent mieux si l'on suppose que les deux naines brunes se sont formées comme des étoiles alors même que leurs masses sont très faibles. Le système, Oph 98 AB, est très jeune à l'échelle de l'histoire cosmique. Il est né il y a à peine 3 millions d'années, et ses deux naines brunes ont une masse de 15 et 8 fois celle de Jupiter, respectivement. Ces objets de masse extrêmement faible sont séparés par 200 fois la distance entre la Terre et le Soleil. Parce que les deux naines brunes sont si légères et si éloignées l'une de l'autre, Oph 98 AB est, à ce jour, le système binaire doté de la plus faible énergie de liaison gravitationnelle. En d'autres termes, ces deux corps n'auraient jamais réussi à se lier s'ils s'étaient croisés en étant nés dans des régions différentes. La meilleure explication est qu'ils sont nés dans le même nuage de gaz et se sont donc formés comme des étoiles. Et la jeunesse du système suggère en outre que l'effondrement du gaz est aussi rapide pour des objets de masse planétaire que pour les étoiles.

DES ASTRES GLACÉS

Ces dernières années, notre compréhension des naines brunes et les techniques d'observation ont assez progressé pour nous permettre de nous attaquer à des questions plus difficiles et des mesures plus précises sur ces objets encore mystérieux. Récemment, les astronomes ont découvert une population de naines brunes très froides, connues sous le nom de naines Y. Ces objets ont des températures allant de 180 °C jusqu'à - 20 °C (voir la photo page 49), qui rivalisent avec celle Jupiter (qui est à environ - 150 °C). Les

naines Y sont difficiles à observer car elles sont à la fois froides et très sombres. La lumière qu'elles émettent se situe principalement dans l'infrarouge (à des longueurs d'onde de 3 à 5 micromètres). L'atmosphère terrestre absorbe une grande partie de ce rayonnement.

Néanmoins, mes collègues et moi avons publié les spectres de plusieurs naines Y. Et, à partir de modèles, nous avons déduit la présence de nuages de glace d'eau, ainsi que des mouvements de mélange verticaux importants dans l'atmosphère de ces objets. Or, dans la même gamme de longueurs d'onde, Jupiter émet sa propre lumière (au lieu de simplement refléter la lumière du Soleil) et est également animé d'un mélange vertical significatif. Nous espérons qu'en étudiant les naines Y, nous réussirons à distinguer, d'une part, les propriétés de Jupiter spécifiques à sa nature planétaire – en d'autres termes, le fait qu'elle se soit formée dans le disque circumstellaire du Soleil et qu'elle soit constamment illuminée par la lumière de l'étoile – et, d'autre part, les propriétés qui sont communes à tous les objets gazeux froids, que ce soient des planètes ou des naines brunes. Jusqu'à présent, nos études montrent que les atmosphères hautement dynamiques ont tendance à être la norme.

L'observation de l'atmosphère des naines brunes a par ailleurs donné naissance à un nouveau sous-domaine de recherche: l'exométéorologie. Les naines brunes sont trop lointaines pour que nous puissions examiner visuellement leurs caractéristiques atmosphériques. Mais, à travers les variations de luminosité, nous pouvons en déduire les grandes lignes. Quand un nuage ou un autre phénomène sur la naine brune passe dans notre champ de vision, il modifie la quantité de lumière provenant de l'astre. En 2014, Ian Crossfield, alors à l'institut Max-Planck d'astronomie, à Heidelberg, en Allemagne, et ses collègues ont analysé les variations durant plusieurs périodes de rotation de certaines naines brunes et ont ainsi établi les cartes des nuages sur Luhman-16. On y observe des taches, et dans d'autres cas des bandes, qui ressemblent de façon remarquable à celles des planètes géantes du Système solaire. Certaines naines brunes voyaient leur luminosité diminuer ou augmenter de 25% en l'espace d'une seule rotation. Nous avons découvert que les naines brunes dont la température conduit à la dislocation des nuages présentent les plus grandes variations de luminosité et que les objets jeunes sont caractérisés par une variabilité plus importante de leur brillance.

En 2017, Melodie Kao, de l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont également constaté d'autres similitudes entre les naines brunes et les géantes gazeuses. Par exemple, ces deux familles d'astres ont tendance



Les naines Y ont des températures allant de 180 °C jusqu'à - 20 °C

