



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



à avoir de forts champs magnétiques et des aurores, comme le révèlent les observations radio qui portent la signature de particules chargées se déplaçant selon des trajectoires en spirale, piégées dans les champs magnétiques. L'intensité de ces champs pour les naines brunes est 1000 et 10000 fois plus forte que pour Jupiter et la Terre, respectivement. Les aurores boréales sur Terre sont déjà un spectacle éblouissant, imaginez le ciel nocturne sur une de ces naines brunes!

L'enseignement est une part importante de mon travail. Je donne des cours d'introduction à l'astronomie. Quand je présente les caractéristiques des planètes du Système solaire, je n'hésite pas à glisser quelques informations sur les naines brunes. Lors d'une de ces séances, la question d'un étudiant a inspiré tout un programme de recherche sur la comparaison de la dynamique de l'atmosphère des naines brunes et des planètes. J'étais en train d'expliquer que l'estimation de la durée d'un jour sur Jupiter dépend de la méthode de mesure utilisée. Si vous appuyez sur le mouvement des éléments visibles dans la région équatoriale de Jupiter, vous obtenez une période de rotation qui est plus courte de cinq minutes que celle mesurée à partir du signal radio, qui sonde la planète plus en profondeur. Lorsque l'étudiant m'a demandé les raisons de cette différence dans la période de rotation, j'ai répondu que les structures équatoriales de Jupiter sont poussées par de forts vents zonaux et se déplacent donc plus vite. Sur Terre, les vents sont alimentés par la redistribution de l'énergie solaire dans l'atmosphère, mais nous ne savons pas dans quelle mesure ce mécanisme s'applique aux vents de Jupiter.

DES VENTS DÉCOIFFANTS

Après cette intervention de l'étudiant, j'ai commencé à réfléchir à ce problème et à la façon dont les naines brunes pouvaient apporter un élément de réponse. Les astronomes mesurent l'émission radio de certaines naines brunes, dont l'origine est probablement similaire à celle de Jupiter. Ils peuvent donc mesurer la période de rotation interne de ces objets. Et notre méthode de surveillance des changements de luminosité nous permet d'estimer la période de rotation de l'atmosphère. J'ai ainsi proposé de calculer la vitesse du vent sur une naine brune en comparant les deux mesures. Le meilleur candidat que nous avons pour essayer la technique était une naine brune riche en méthane avec une émission radio confirmée. Pour évaluer la vitesse du vent, nous avons besoin de déterminer les deux périodes avec une précision inférieure à 30 secondes. Mes collègues et moi avons soumis une proposition d'observation sur le télescope spatial *Spitzer* pour évaluer les variations de luminosité de la naine brune et une demande pour utiliser le *Karl-G. Jansky Very*



Les aurores boréales sur Terre sont déjà un spectacle éblouissant, imaginez sur une naine brune au champ magnétique beaucoup plus intense!



Large Array, au Nouveau-Mexique, pour déterminer la période radio. La comparaison des résultats a révélé une différence d'un peu plus de 1 minute, ce qui équivaut à des vents soufflant à près de 2300 kilomètres par heure (voir la figure page 52). Il est donc possible d'avoir des vents intenses sur une naine brune isolée sans l'apport énergétique d'une étoile proche. Dans le cas de Jupiter, la question de l'influence du Soleil reste ouverte.

Grâce à des relevés d'imagerie profonds du ciel entier, comme *2MASS*, *WISE* et *PanSTARRS* (le *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*), les astronomes continuent d'enrichir leur catalogue de naines brunes. Des programmes de science participative impliquant des citoyens passionnés ont été mis en place. Par exemple, *Backyard Worlds* permet à tout un chacun d'examiner les données de *WISE* pour y trouver entre autres des signes de naines brunes. Dans les prochaines années, les futurs grands relevés effectués avec l'observatoire *Vera-C.-Rubin* (qui commencera à observer début 2022) et le télescope spatial *Nancy-Grace-Roman* (avec un lancement prévu en 2025) compléteront notre recensement des naines brunes.

Malheureusement, nous n'avons pas obtenu de financement pour le télescope de Cerro Toco, et il ne sera jamais construit. Mais avec les débuts du télescope spatial *James-Webb* en 2022, les astronomes auront un regard sans précédent sur les naines brunes dans l'infrarouge, sans interférences avec l'atmosphère de la Terre. Parmi les premiers programmes d'observation prévus, nous étudierons la chimie atmosphérique des naines Y et la composition des nuages des naines brunes poussiéreuses. Nous lancerons même une recherche de planètes autour des naines brunes. Il est à parier que des découvertes palpitantes attendent ceux qui explorent ces objets parmi les plus méconnus du cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. N. Allers *et al.*, **A measurement of the wind speed on a brown dwarf**, *Science*, vol. 368, pp. 169-172, 2020.

C. Fontanive *et al.*, **A Wide Planetary-mass Companion to a Young Low-mass Brown Dwarf in Ophiuchus**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 905(2), L14, 2020.

G. Basri, **La découverte des naines brunes**, *Pour la Science*, n° 272, juin 2000.