

Respire, respire. Je me répète ces mots comme un mantra. À 5 600 mètres d'altitude, au sommet du Cerro Toco, mon corps peine à trouver assez d'oxygène, et je dois me concentrer pour faire entrer assez d'air dans mes poumons. Ce stratovolcan surplombe le plateau de Chajnantor, au Chili, où est installé *Alma* (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), l'un des plus grands réseaux de radiotélescopes du monde. Entre l'atmosphère ténue et la terre rouge et dénuée de végétation de la montagne, j'ai l'impression d'être sur Mars. Mes collègues et moi avons entrepris cette ascension pour tester les conditions atmosphériques sur le Cerro Toco. L'objectif est de s'assurer que les conditions y sont assez bonnes pour y construire un télescope infrarouge et réaliser des découvertes passionnantes.

L'astronomie infrarouge offre une vision fascinante de l'Univers. C'est dans cette gamme du spectre électromagnétique, trop rouge pour que l'œil humain puisse la voir, que se cachent les naines brunes, les objets que j'étudie depuis vingt ans. Quand j'étais à l'université, au début des années 2000, les naines brunes n'avaient été découvertes que depuis peu et de nombreuses questions fascinantes se posaient sur leur origine et leurs caractéristiques. Ces étranges objets, à la frontière entre étoiles et planètes d'après leurs gammes de températures et de masses, ont fini par me captiver. En plus d'être intéressantes pour elles-mêmes, les naines brunes offrent des passerelles pour mieux comprendre certains aspects des étoiles et des planètes.

Je suis arrivée à une époque qui marque un tournant dans ce domaine. Nous commençons à avoir un peu de recul sur ces objets pour saisir les processus physiques qui y sont à l'œuvre. Et en même temps, de nouveaux outils d'observation très puissants sont à notre disposition pour enrichir notre catalogue de naines brunes, explorer leur atmosphère (par exemple pour y estimer la vitesse des vents), ou essayer de déterminer si des planètes gravitent autour de ces objets.

DES OBJETS INTERMÉDIAIRES

La plupart des étoiles sont alimentées par la fusion de l'hydrogène en hélium, un processus très stable qui permet à ces astres de brûler à température constante et à la même luminosité pendant des milliards d'années. Mais si la masse d'une étoile en devenir est inférieure à 8% de celle du Soleil (soit 80 fois la masse de Jupiter), l'astre n'atteint pas les conditions de température ou de pression assez élevées pour soutenir la fusion de l'hydrogène. On obtient alors une naine brune.

En 2017, Koraljka Mužić, de l'université de Lisbonne, et ses collègues ont indiqué que les

naines brunes sont presque aussi communes que les étoiles et qu'on les trouve à peu près dans tous les environnements. Des naines brunes ont été détectées dans des pouponnières stellaires, aux côtés de jeunes protoétoiles. Elles ont également été observées dans des systèmes binaires, appariées à des naines blanches. Ces naines brunes ont donc survécu à l'engloutissement par leur partenaire lors de la phase de géante rouge volumineuse qui a précédé le stade de naine blanche (le Soleil est une naine jaune, qui gonflera en géante rouge dans cinq milliards d'années jusqu'à environ l'orbite de la Terre, avant de devenir une petite naine blanche). Même certains des systèmes les plus proches du Soleil contiennent des naines brunes. C'est le cas du troisième système le plus proche, Luhman-16, et du quatrième, WISE 0855-0714, situés respectivement à 6,5 et 7,3 années-lumière (les deux premiers systèmes les plus proches de nous sont Alpha du Centaure et l'étoile de Barnard). Et pourtant, malgré leur omniprésence, la plupart des gens n'ont jamais entendu parler de ces objets.

Bien qu'elles ne réalisent pas la fusion de l'hydrogène, les naines brunes présentent une émission thermique due à la chaleur accumulée lors de leur formation. Après leur naissance, leur

COMMENT CLASSER LES NAINES BRUNES

Les naines brunes sont des objets avec une masse comprise entre celle des planètes et des étoiles. Pour définir cette famille intermédiaire, les astrophysiciens s'appuient sur les conditions nécessaires pour obtenir la fusion de différents éléments.

La fusion de l'hydrogène est possible dans des objets d'une masse supérieure à 80 fois la masse de Jupiter. Ce seuil définit la limite entre les naines brunes et les étoiles. Les objets plus massifs, les étoiles, sont assez chauds pour produire cette réaction, et ceux en dessous de cette limite n'atteignent pas les températures nécessaires pour l'amorcer.

Au-dessus de 13 fois la masse de Jupiter, la fusion du deutérium est possible. Cette limite a été choisie pour fixer la frontière entre les planètes et les naines brunes, par symétrie avec la limite supérieure entre naines brunes et étoiles. Ainsi, par définition, toutes les naines brunes (excepté les naines brunes de masse planétaire qui remettent en question cette définition) brûlent du deutérium.

Ces deux limites ne sont pas strictes en termes de masse : un objet juste au-dessus de 13 fois la masse de Jupiter brûlera une grande part de son deutérium, mais deviendra au bout d'un certain temps trop froid pour brûler l'intégralité de ses réserves. Et un objet juste en dessous de la limite brûlera une petite partie du deutérium au début de sa vie. Par ailleurs, ce seuil et celui entre les naines brunes et les étoiles peut aussi varier avec différents facteurs, telle la métallicité de l'objet (sa composition en éléments plus lourds que l'hélium).

La limite pour la fusion du lithium, quant à elle, se situe à environ 65 fois la masse de Jupiter. Les étoiles et les naines brunes les plus massives sont capables de brûler leur lithium (typiquement en quelques centaines de millions d'années pour une naine brune juste à cette frontière), mais les naines brunes en dessous de cette masse critique conservent leurs réserves de lithium. Le fameux « test du lithium », qui repose sur la détection de cet élément pour confirmer la nature sous-stellaire de candidates naines brunes, ne fonctionne donc que pour les naines brunes de moins de 65 fois la masse de Jupiter, et au-delà d'un certain âge (car une naine brune plus massive mais encore jeune n'aura pas encore épuisé ses réserves).

CLÉMENCE FONTANIVE
Université de Berne

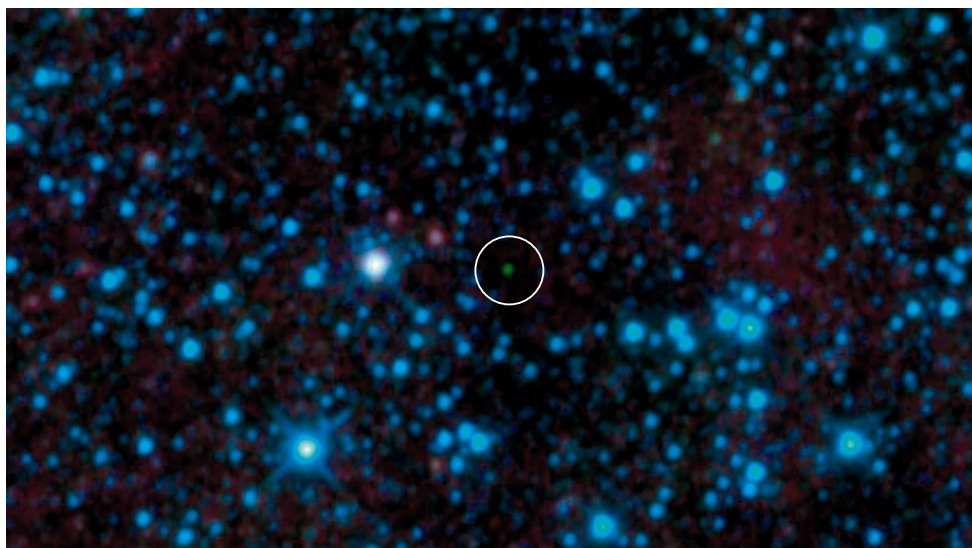
température est assez élevée, de l'ordre de 2800°C. Au cours des milliards d'années suivantes, les naines brunes se refroidissent et émettent de moins en moins de rayonnement. Elles ne meurent jamais vraiment : elles passent l'éternité à se refroidir et à s'assombrir. La naine brune la plus froide connue à ce jour présente une température inférieure au point de congélation de l'eau. Parce qu'elles sont si froides, la plupart de la lumière qu'elles émettent est dans l'infrarouge. Elles sont beaucoup trop pâles pour être vues par l'œil humain dans le ciel nocturne, mais si nous pouvions les observer de près, elles auraient probablement une couleur terne rouge orange ou magenta.

Nous avons aujourd'hui une bonne idée de leurs caractéristiques principales. Comme le Soleil, les naines brunes sont essentiellement composées d'hydrogène. Mais la température dans leur atmosphère supérieure est assez basse pour que diverses molécules s'y forment sans être aussitôt détruites. Par exemple, des traces de vapeur d'eau ont été observées dans presque toutes les naines brunes.

Quand ces astres se refroidissent davantage, leur chimie atmosphérique change. Différentes molécules et nuages deviennent prédominants. L'évolution d'une naine brune dépend de sa masse et de son âge. Pendant ses 100 premiers millions d'années, une naine brune 40 fois plus massive que Jupiter, par exemple, aura une composition atmosphérique similaire à celle d'une naine rouge (une classe d'étoiles de masse inférieure au Soleil), avec de l'oxyde de titane et du monoxyde de carbone. Ensuite, entre 100 millions et 500 millions d'années, des nuages de poussière riches en silicates (enstatite, quartz, etc.) se forment. Environ 1 milliard d'années après cela, les nuages se disloquent et s'enfoncent dans les profondeurs de la naine brune. Le méthane devient l'espèce moléculaire dominante dans la haute atmosphère. La naine brune la plus froide connue montre des signes de la présence de nuages de glace d'eau, ainsi que de vapeur d'eau et de méthane. Nous nous attendons à ce que son atmosphère contienne des quantités importantes d'ammoniac, comme observé sur Jupiter.

Au-delà de ces grandes lignes, de nombreux aspects des naines brunes restent encore mal compris. Le caractère mystérieux de ces objets a inspiré des hypothèses étonnantes. Par exemple, les naines brunes ont été proposées comme candidates à la matière noire (cette composante de l'Univers cinq fois plus abondante que la matière ordinaire, mais de nature inconnue). Une idée vite abandonnée quand il est devenu clair que la contribution des naines brunes à la masse totale de la Voie lactée est bien trop faible.

Les scientifiques ont prédit l'existence des naines brunes dans les années 1960 en se fondant sur leurs connaissances de la formation



des étoiles et des planètes. Mais à l'époque, cette catégorie intermédiaire échappait à toute détection. Les techniques d'observation dans l'infrarouge, balbutiantes, n'étaient pas encore assez sensibles. Puis, en 1995, la première naine brune, Teide 1, a finalement été identifiée dans le célèbre amas d'étoiles des Pléiades. Les astronomes Rafael Rebolo López, María Rosa Zapatero-Osorio et Eduardo Martín l'ont repérée sur des images dans le visible du télescope de 80 centimètres de l'observatoire de Teide, aux Canaries. L'objet était jeune et brillait encore assez fort grâce à la chaleur accumulée lors de sa formation. L'équipe a détecté la signature de plusieurs éléments dans son atmosphère, dont le lithium. Or la température dans le cœur des étoiles est assez élevée pour détruire le lithium présent. Cette étonnante découverte prouvait que la fusion nucléaire du lithium ne se produisait pas dans Teide 1.

Les naines brunes se refroidissent progressivement. Sur cette image du télescope spatial WISE en fausses couleurs (le spectre infrarouge est décalé vers les couleurs du visible), la naine brune WISE 1828+2650 apparaît en vert (dans le cercle) car sa température est exceptionnellement basse, entre - 20 °C et 120 °C.

LES PREMIÈRES NAINES BRUNES

Deux mois plus tard, grâce à des observations dans l'infrarouge à l'observatoire du mont Palomar, Tadamasa Nakajima, de Caltech (l'institut de technologie de Californie), et ses collègues ont annoncé la détection d'une deuxième naine brune, Gliese 229B, la partenaire d'une étoile. En analysant leurs données, ils ont immédiatement compris que cet objet était étrange. Il avait une couleur inhabituelle et semblait contenir du méthane dans son atmosphère. Cette molécule très réactive se transforme en monoxyde de carbone si la température est élevée. L'objet devait donc être froid. Des observations complémentaires ont révélé que Gliese 229B est de la même taille environ que Jupiter, avec un diamètre de près de 129 000 kilomètres, mais beaucoup plus dense : elle est en effet environ 70 fois plus massive.

En 2000, quand j'ai commencé mes études supérieures, le catalogue de naines brunes s'était