

> probablement âgé de moins de 100 000 ans. Sur cette photographie, ce que l'on imaginait auparavant être un disque continu apparaissait en réalité marqué d'une série d'anneaux séparés par des espaces vides. Étant donné l'extrême jeunesse de ce système, si ces régions évidées ont bien été creusées par des embryons de planètes, il faut en conclure que la formation planétaire démarre bien plus tôt qu'on ne le pensait.

DSHARP (sigle anglais pour «Projet d'observation des structures discales à haute résolution angulaire»), un recensement de 20 disques protoplanétaires, a permis une autre découverte notable en 2018 : chacun d'entre eux, sans exception, est marqué par des successions d'anneaux et de divisions semblables, et certains sont même dotés de structures spirales. Il semble donc que ces caractéristiques ne soient pas spécifiques à HL Tau, mais se retrouvent universellement dans tous les jeunes disques circumstellaires.

UN MOYEN DE DÉTECTION DE PLANÈTES EXTRASOLAIRES

L'étude de ces disques ne nous renseigne pas seulement sur les mécanismes de formation planétaire. Elle constitue un nouveau moyen de détecter des exoplanètes que nous serions incapables de déceler autrement.

Les télescopes spatiaux tels que *Kepler* et *Tess* (pour *Transiting exoplanet survey satellite*, «Satellite de recensement des transits planétaires») et d'autres programmes de recensement basés au sol ont détecté jusqu'ici des milliers d'exoplanètes. Cependant, la plupart de ces planètes sont plus massives et gravitent plus près de leur étoile mère que les planètes du Système solaire. Ces types de mondes ne sont cependant pas nécessairement les plus communs, ils nous sont simplement plus faciles à détecter.

Les deux méthodes principales de détection des exoplanètes sont la technique du transit, qui scrute les diminutions périodiques de la lumière stellaire lorsqu'une planète en orbite passe devant son étoile, et la méthode des vitesses radiales, qui déduit la présence de planètes par l'observation des petits changements de vitesse qu'elles infligent à leur étoile mère du fait de leur attraction gravitationnelle. Les deux méthodes favorisent la détection de planètes volumineuses (ou massives) et dont les orbites sont rapides, parce qu'il faut observer de multiples orbites successives avant de confirmer une détection.

Cela signifie que les astronomes qui utilisent ces méthodes ratent sans doute un grand nombre d'autres planètes. La période orbitale de Neptune, par exemple, est d'environ 165 ans : si vous étudiez le Système solaire depuis une étoile lointaine, il vous faudrait attendre très longtemps pour voir Neptune transiter devant le Soleil ne serait-ce qu'une seule fois. Les rares

planètes que nous connaissons et qui se trouvent à des distances de leur étoile de l'ordre de celle de Neptune ont été directement photographiées à l'aide de coronographes – c'est-à-dire en cachant la lumière de l'étoile centrale. Cette approche présente cependant ses propres biais, car elle favorise les systèmes jeunes dont les planètes conservent encore une partie significative de la chaleur résultant de leur formation et sont dès lors suffisamment brillantes dans l'infrarouge.

Pour remplacer l'architecture de notre Système solaire dans son contexte et savoir s'il est typique ou plutôt exceptionnel au sein des systèmes de la galaxie, il nous faut détecter des planètes géantes à de grandes distances de leur étoile au sein de systèmes anciens. Désormais, grâce à *Alma*, cela est réalisable en utilisant l'image résolue de la structure des disques circumstellaires. C'est là un puissant complément aux autres méthodes de détection des planètes extrasolaires.

Nous pouvons ainsi détecter des mondes comparables à Neptune, par exemple, en étudiant certains traits distincts – des grumeaux ou des asymétries particulières – de disques qui ont été sculptés par les planètes en orbite. Dans le Système solaire, la classique ceinture de Kuiper est assez étroite à cause de l'influence gravitationnelle de Neptune. On pense qu'au début de l'évolution du système, Neptune s'est initialement formée plus près du Soleil avant de migrer vers l'extérieur en repoussant les matériaux restants sur son passage, créant ainsi la ceinture de Kuiper que nous connaissons aujourd'hui. Si nous observons des structures comparables dans les disques extrasolaires de débris, il sera possible d'en déduire la présence d'analogues de Neptune quand bien même nous ne les voyons pas.

Nous pouvons également en apprendre davantage sur les planètes que nous connaissons déjà en observant les disques qu'elles habitent. Le système de l'étoile HR 8799 comprend quatre planètes géantes gazeuses que l'on a pu photographier directement et dont les orbites se trouvent entre les analogues de notre ceinture d'astéroïdes et de notre ceinture de Kuiper. L'interférométrie millimétrique nous permet de discerner la structure de la ceinture extérieure du système, son analogue de la ceinture de Kuiper, et de déterminer la position de son bord interne.

En supposant que sa planète la plus extérieure soit celle qui est responsable du creusement du disque, cette information nous donne une estimation de la masse probable de ladite planète : autour de six masses joviennes. L'exploit peut ne pas sembler impressionnant, mais c'est en fait bien plus précis que les meilleures estimations précédentes fondées sur des modèles théoriques du refroidissement et de

>

> la diminution de la luminosité, dans l'infrarouge, des planètes après leur formation. À partir de la structure du disque, nous fournissons donc une importante vérification indépendante de ces modèles.

Par ailleurs, l'observation par *Alma* de disques protoplanétaires plus jeunes révèle des trésors de structures très détaillées. Les anneaux et les divisions qui les séparent semblent présents dans pratiquement tous les systèmes. Si tous ces espaces évidés sont creusés par des planètes, on doit conclure à l'existence d'une vaste population de planètes de glaces géantes qui nous avait échappé jusqu'ici. Cependant, relier directement la structure des jeunes systèmes à la présence de planètes n'est pas chose aisée, parce que d'autres phénomènes compliquent les efforts de modélisation.

Les systèmes plus vieux et plus évolués sont plus faciles à interpréter, bien que jusqu'ici très peu de ces disques de débris plus anciens aient exhibé de tels anneaux multiples. Récemment, dans le disque de débris de l'étoile HD 15115, nous avons découvert un nouvel espace vide situé approximativement au niveau de l'orbite de Pluton dans notre système. Les modèles dynamiques suggèrent que cette

division est le fait d'une planète de glace géante de masse légèrement inférieure à celle de Saturne. Je soupçonne qu'à mesure que s'accumuleront les images en haute résolution de ces systèmes matures, nous verrons apparaître un nombre croissant de ces structures induites par la présence de planètes.

LA COMPOSITION CHIMIQUE DES DISQUES SE DÉVOILE

Au-delà de la structure des disques circumstellaires, nous pouvons également étudier leur composition. Puisque ces disques sont à la fois les réservoirs à partir desquels se forment les planètes et les registres fossiles de ce processus, leur composition est intimement reliée à celle des planètes de ces systèmes et à l'histoire de leur formation. Beaucoup de molécules rencontrées communément dans la nature émettent un rayonnement de longueur d'onde millimétrique dû aux oscillations de leurs liaisons chimiques. Les scientifiques ont détecté des dizaines de molécules organiques (monoxyde de carbone, formaldéhyde, méthanol et ammoniac, parmi bien d'autres) dans les grands réservoirs de gaz présents au sein des disques protoplanétaires.

UNE BATTERIE D'INSTRUMENTS VARIÉS

L'Observatoire européen austral (l'ESO), qui participe aussi à *Alma*, possède d'autres instruments dédiés à l'étude des disques circumstellaires et à l'imagerie directe des jeunes exoplanètes. Les quatre grands instruments de 8 mètres de diamètre du *VLT* (*Very Large Telescope*), installé au sommet du Cerro Paranal, au Chili, peuvent eux aussi être combinés pour fonctionner comme un interféromètre ; mais, surtout, certains sont dotés d'un système d'optique adaptative (un réseau de petits vérins hydrauliques qui déforment les miroirs en temps réel pour compenser les distorsions dues à la turbulence atmosphérique), ce qui leur confère une résolution

proche de celle qu'ils auraient s'ils opéraient dans le vide de l'espace.

L'instrument Naco, installé dès 2001 sur le télescope numéro 4 du *VLT*, est responsable de la photographie directe de la planète Bêta Pictoris b, en orbite autour de son étoile à la même distance que Saturne du Soleil, planète qui a ensuite été abondamment étudiée par l'instrument *Sphere*, installé sur le télescope numéro 3 à partir de 2014. Signalons aussi qu'une autre planète a été détectée en 2019 plus près de cette étoile par la méthode des vitesses radiales.

Ces instruments sont des coronographes – ils masquent l'étoile centrale pour mieux rendre visible son environnement. Ils peuvent aussi exploiter le fait que la lumière directe de l'étoile est essentiellement non polarisée, tandis que la lumière réfléchie l'est partiellement, afin d'augmenter le contraste des disques circumstellaires et d'éventuelles exoplanètes.

Naco et *Sphere*, tout comme leurs cousins principalement américains les Gemini Planet Finder (GPI),

installés sur le Cerro Pachón, au Chili, ainsi qu'à Hawaii, opèrent à des longueurs d'onde plus courtes qu'*Alma*, dans le domaine optique ou du très proche infrarouge. Ces courtes longueurs d'onde donnent difficilement accès aux gros grains millimétriques étudiés ici par Meredith MacGregor. (Signalons toutefois qu'*Alma* a aussi détecté une planète dans le disque de HD 163 296, non par l'étude de ces poussières, mais par celles des mouvements du gaz.) Cependant, alliées à une optique adaptative de très haute performance, ces courtes longueurs d'onde confèrent à *Sphere*, par exemple, une résolution de l'ordre de 0,02 seconde d'arc, six fois supérieure à celle de *Hubble* et à la limite du mieux que puisse faire *Alma* dans sa configuration la plus étendue. Ces instruments sont aussi susceptibles de fournir des spectres des objets étudiés, donnant ainsi accès à leur composition.

GPI a obtenu l'image directe des quatre planètes (elles aussi évoquées ici par Meredith MacGregor) autour

de l'étoile HR 8799. Quant à *Sphere*, outre l'étude de Bêta Pictoris b, on lui doit la découverte par imagerie directe des planètes géantes autour de l'étoile HIP 65426 (en 2017), PDS 70 (en 2018) ainsi que TYC 8998-760-1 (en 2020). Des dizaines de disques circumstellaires ont également été résolus par *Sphere* et, dans le cas du système PDS 70, le *VLT* observe actuellement une seconde planète à l'aide de l'instrument *Muse* (*Multi unit spectroscopic explorer*, ou « explorateur spectroscopique multiple »). *Sphere* vient également de découvrir de spectaculaires arches se déplaçant dans le système AU Mic et dont l'origine reste mal comprise.

Ainsi, l'étude de la formation et de l'évolution des systèmes planétaires repose sur l'exploitation d'une gamme très polyvalente d'instruments variés.

ANNE-MARIE LAGRANGE
Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble