

> 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

Nos recherches ont aussi soulevé une nouvelle énigme. On pensait traditionnellement que les disques de débris étaient pauvres en gaz parce que le gaz originel devait être soufflé en à peine quelques millions d'années. Or *Alma* a montré que bien des disques de débris contiennent du dioxyde de carbone gazeux. On peut interpréter cela comme le résultat de collisions de comètes au sein du disque qui, à mesure qu'elles sont broyées en débris de plus en plus petits, libèrent de la glace carbonique, sublimée par la suite en gaz. Quelques systèmes défient cependant cette explication, parce qu'ils contiennent de telles quantités de gaz qu'il faudrait des taux de collisions cométaires invraisemblables pour les produire.

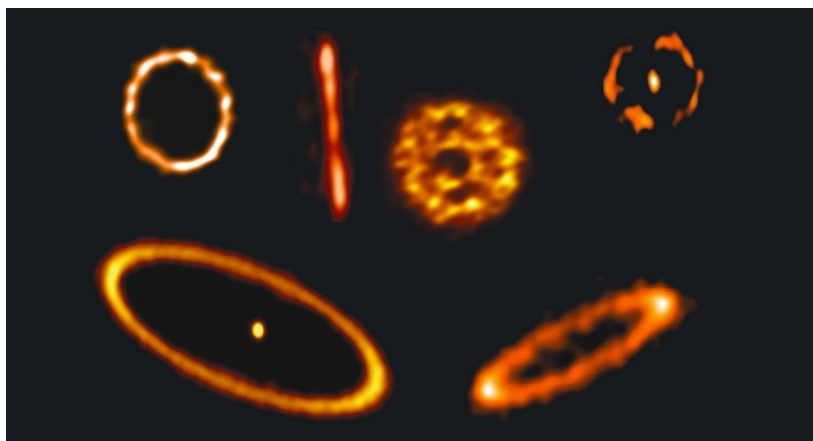
Cette découverte pose une question: est-il possible qu'une partie du gaz originel se maintienne au sein de ces disques non pas pendant quelques millions d'années mais pendant des dizaines de millions d'années? Pour le moment, nous n'avons pas de réponse.

FUTURS ÉCLAIRAGES À D'AUTRES LONGUEURS D'ONDE

J'ai démarré ma thèse au moment où *Alma* ouvrait les yeux pour la première fois sur le ciel; et je prends aujourd'hui mon premier poste universitaire alors qu'on assiste à une fascinante transition vers l'astronomie multi-longueurs d'onde. *Alma* a contribué à bouleverser notre compréhension des disques circumstellaires en révélant des complexités de structure et de composition chimique que l'on ne pouvait que deviner il y a quelques décennies. Mais *Alma* ne peut répondre à toutes les questions que nous nous posons.

Tous les disques de débris que j'ai mentionnés ici sont comparables à notre ceinture de Kuiper: de froids anneaux de poussière dans la banlieue extérieure de leurs systèmes solaires. Jusqu'ici, les astronomes ont bataillé en vain pour réaliser des images de ceintures comparables cette fois à notre ceinture d'astéroïdes: nous les décelons seulement sous la forme d'un excès d'infrarouges près de l'étoile mère, exactement comme aux jours anciens du satellite *Iras*.

Pour obtenir des images des régions internes des systèmes extrasolaires, il nous faut accéder à des longueurs d'onde plus courtes, correspondant à des grains de poussière plus chauds. Le télescope spatial *James-Webb* (*JWST*) devrait être lancé en 2021 et nous espérons qu'il prendra les premières photos de ces analogues de notre ceinture d'astéroïdes. De surcroît, le *JWST* fonctionnera à des longueurs d'onde qui correspondent aux émissions des silicates (des minéraux comme l'olivine ou les pyroxènes, que l'on retrouve également sur Terre), ce qui devrait nous renseigner directement sur la composition des grains des disques.



Plus loin dans le futur, les très grands télescopes de la prochaine génération, actuellement en construction, devraient recueillir leurs premières lumières entre le milieu et la fin des années 2020. Ces télescopes auront des diamètres supérieurs à 24 mètres, soit une surface collectrice plus de cinq fois supérieure à celle des plus grands télescopes au sol actuels, et ils pourront peut-être photographier directement les planètes dont nous ne pouvons pour le moment que déduire la présence à partir de l'observation des disques.

L'enquête décennale sur l'astronomie et l'astrophysique – une étude impliquant toute la discipline destinée à guider les futurs investissements aux États-Unis – est en cours. Quatre missions phares de la Nasa sont à l'étude dans ce cadre, dont les retombées pour les sciences planétaires pourraient être considérables dans les années 2030 et au-delà.

Le télescope spatial *Origins*, un observatoire infrarouge cryogénique, devrait déceler la façon dont l'eau contenue dans les nébuleuses où se forment les étoiles est finalement transférée au sein des disques circumstellaires, fournir un échantillon statistiquement significatif de la population de disques de faible masse (indiquant ainsi si notre système est particulier ou au contraire banal), et bien d'autres choses. D'autres candidats comme *Luvoir* (*Grand recenseur ultraviolet/optique/infrarouge*) et *Habex* (*Observatoire des exoplanètes habitables*) sont des missions destinées à produire des images directes susceptibles de caractériser de nombreuses exoplanètes, parmi lesquelles certaines pourraient être semblables à la Terre.

Quelle que soit celle de ces missions qui sera finalement choisie, il y a une chose dont je suis sûr: notre compréhension du Système solaire, de sa formation et de sa place au sein d'un univers peuplé de systèmes planétaires change tous les jours. Quant à la boule au ventre que l'on ressent à chaque fois que l'on attend de découvrir à quoi ressemblent les dernières observations, cette impression ne disparaît jamais. ■

Les disques de débris, ici photographiés par *Alma*, constituent un stade plus tardif de l'évolution des disques protoplanétaires, une fois que l'étoile et ses planètes se sont formées. Ces ceintures brillantes de débris sont comparables à la ceinture de Kuiper du Système solaire.

BIBLIOGRAPHIE

R. Miranda et R. R. Rafikov, **On the planetary interpretation of multiple gaps and rings in protoplanetary disks seen by ALMA**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 878(1), article L9, 2019.

ALMA Partnership et al., **The 2014 ALMA long baseline campaign : First results from high angular resolution observations toward the HL Tau region**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 808(1), article L3, 2015.

M. A. MacGregor et al., **Millimeter emission structure in the first ALMA image of the AU Mic debris disk**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 762(2), article L21, 2013.