

L'ESSENTIEL

> Le radiotélescope *Alma*, inauguré en 2011, a permis aux astronomes d'observer pour la première fois les détails au sein des disques de gaz et de poussière qui entourent les étoiles.

> Ces disques dits « circumstellaires » apprennent aux scientifiques comment les systèmes solaires lointains se sont formés et ont évolué,

tandis que certaines structures telles que des voilures ou la présence de grumeaux indiquent parfois la présence de planètes.

> De nouveaux télescopes en projet devraient dans les prochaines années faire progresser l'étude des disques circumstellaires en permettant de photographier directement les planètes qui y gravitent.

L'AUTRICE



MEREDITH MACGREGOR
maîtresse de conférences
à l'université
du Colorado à Boulder,
aux États-Unis

La semaine où j'entrais à l'école doctorale étaient publiés les premiers projets d'observation du tout nouveau radiotélescope millimétrique et submillimétrique à large base de l'Atacama, au Chili, nommé *Alma* (pour *Atacama large millimeter array*). Cet instrument révolutionnaire coordonne des dizaines d'antennes radio pour créer des images aussi détaillées que celles que produirait un unique télescope de 16 kilomètres de diamètre. Avec une telle résolution, *Alma* est capable d'observations plus profondes et détaillées, dans les longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques, que n'importe quel télescope antérieur.

J'ai aussitôt sauté sur l'occasion de me joindre à l'un des tout premiers projets, l'étude d'un disque de débris et de poussière autour d'une étoile proche nommée AU Mic. Avant *Alma*, aucun scientifique n'avait pu voir le disque que nous voulions observer avec autant de détail. Les débris et la poussière peuvent ne pas sembler un sujet très excitant. Ce sont pourtant les ingrédients dont sont faites les planètes, et cet observatoire nous donnait l'occasion de voir le processus de formation en action.

Il nous a fallu attendre encore un an pour recueillir les résultats. De nos jours, l'astronomie se pratique souvent à distance. On ne passe plus de longues nuits dans un observatoire au sommet d'une lointaine montagne. Tout ce que nous avions à faire était de fournir une séquence informatique expliquant au télescope ce qu'il devait observer, où et quand. Ensuite, nous avons attendu patiemment (ou plutôt impatiemment) que nos observations soient programmées dans la file d'attente puis effectuées. Je me souviens encore de la boule au ventre que j'avais en attendant le téléchargement des données, et de mon émerveillement lorsque l'image est apparue sur l'écran de mon ordinateur – une longue et fine forme lumineuse dotée de trois taches brillantes : une au centre et deux de part et d'autre, à chaque extrémité.

Ce que nous avions sous les yeux, c'était un système solaire en cours de maturation. La petite tache centrale n'était autre que l'étoile, dont nous savons aujourd'hui qu'elle est le siège d'éruptions qui expédient dans l'espace des flots de particules de haute énergie. Les deux autres petites taches marquaient les bords d'un disque de débris entourant l'étoile centrale et comparable à la ceinture de Kuiper, qui gravite autour de notre Soleil. Nous pensons que cette ceinture contient les « gravats » restés après que des planètes se sont formées autour d'AU Mic, une jeune étoile naine de type M distante d'environ 32 années-lumière.

D'autres scientifiques ont récemment découvert deux planètes dans ce système : l'une de masse comparable à celle de Jupiter et l'autre à celle de Saturne, toutes deux en orbite relativement près de leur étoile. Désormais, nous avons une occasion inédite d'étudier la façon dont le matériau du disque a évolué et interagi avec ces planètes récemment formées.

Depuis cette première image, les capacités d'*Alma* n'ont cessé de s'accroître tandis que le réseau a acquis de nouvelles antennes, une résolution plus élevée et que la gamme de longueurs d'onde auxquelles il opère s'est étendue. Dans le même temps, l'étude des disques circumstellaires et de la formation des planètes a littéralement explosé. *Alma* a obtenu des images de centaines de pouponnières planétaires. Cela nous a aidés à renouveler notre compréhension de leur formation et révélé au passage toute une flopée de nouvelles planètes extrasolaires que nous n'aurions jamais découvertes autrement.

EMBRYONS DE PLANÈTES

Les étoiles se forment à partir de vastes nébuleuses de gaz et de poussière nommées nuages moléculaires. La densité typique de l'espace vide n'est que d'environ un atome par centimètre cube, mais les zones les plus épaisses au sein des nuages moléculaires peuvent afficher

Ces disques protoplanétaires dont les images ont été réalisées par le radiotélescope *Alma* ne sont autres que de jeunes systèmes solaires. Ces disques de gaz et de poussière en rotation sont les restes de la naissance d'une étoile et constituent le matériau de base pour la formation des planètes.

> des densités 10000 à 1 million de fois supérieures à cette norme. Lorsque ces grumeaux ou «cœurs protostellaires» deviennent assez denses, ils commencent à s'effondrer sous leur propre gravité pour former des étoiles. Au cours du processus, l'effet conjugué de la rotation initiale du «cœur» en effondrement et de la conservation du moment cinétique engendre naturellement un disque, qualifié de «circumstellaire», autour de la nouvelle étoile.

Lorsque les étoiles sont encore très jeunes (quelques millions d'années seulement), leur disque circumstellaire est relativement imposant. Dans la plupart des systèmes, sa masse représente typiquement 1 à 10% de celle de l'étoile centrale. Dans le cas d'une étoile comme le Soleil, cela équivaut à un disque d'une masse de l'ordre de 100 fois celle de Jupiter. Ces jeunes et massifs «frisbees» sont dits «protoplanétaires», car on pense qu'ils sont le siège d'un intense processus de formation de planètes. Les roches, les métaux et les glaces se condensent au sein du disque pour former des germes planétaires.

En entrant en collision et en se collant les uns aux autres, ces germes grossissent, jusqu'à ce que leur gravité soit suffisante pour commencer à attirer à eux le matériau environnant, un mécanisme connu sous le nom d'accrétion. Ces jeunes protoplanètes sont en orbite à l'intérieur du disque et continuent, tels des Pac-Man cosmiques, d'accumuler de la matière et de créer ainsi des espaces annulaires vides. Pratiquement toutes les étoiles âgées de moins de quelques millions d'années sont entourées de tels disques, qui hébergent très probablement toute une ménagerie de nouveaux systèmes planétaires.

La phase protoplanétaire de l'évolution des disques dure plusieurs millions d'années. Après, l'essentiel du gaz et de la poussière du disque circumstellaire initial a été évacué. La façon exacte dont ce ménage est fait et les échelles de temps nécessaires font l'objet de recherches actives, mais on pense qu'une grande partie de la poussière du disque originel peut soit migrer vers l'intérieur avant de tomber sur l'étoile centrale, soit être soufflée vers l'extérieur par d'intenses vents stellaires.

Au bout d'environ 10 millions d'années, il ne subsiste plus qu'une étoile, arrivée à maturité, entourée d'un jeune système planétaire et d'un disque de petits corps – astéroïdes et comètes. La masse totale de ce matériau, vestige de la formation des planètes, est faible: probablement de l'ordre de 10% de la masse de la Terre. Bien qu'il puisse subsister assez de matière pour former en principe de petits mondes de type terrestre ou des corps semblables à Pluton, on peut se représenter ces débris comme des fossiles, témoins abandonnés de l'époque de la formation des planètes.

La structure de ces disques est façonnée par les interactions des débris avec les planètes nouvellement formées, tandis que leur composition nous renseigne sur le matériau d'origine qui a servi à construire lesdites planètes.

Les astronomes ont observé ces disques pour la première fois après le lancement du satellite astronomique infrarouge *Iras* en 1983. Il s'agissait du premier télescope spatial conçu pour cartographier l'ensemble du ciel dans le domaine infrarouge (en l'occurrence à des longueurs d'onde comprises entre 12 et 100 micromètres). Lorsqu'*Iras* a cartographié le ciel infrarouge, les astronomes ont découvert que beaucoup d'étoiles étaient plus brillantes dans ce domaine qu'attendu. Pourquoi? Une réponse possible impliquait la présence de grandes quantités de poussière: si ces étoiles étaient entourées de disques de poussière, les grains en seraient chauffés par l'étoile et émettraient alors un rayonnement thermique dans le domaine infrarouge. Un nouveau domaine de recherche en a résulté. Pour tout dire, les quatre premiers disques de débris découverts grâce à *Iras* – Véga, Bêta Pictoris, Epsilon Eridani et Fomalhaut – sont toujours intensément étudiés aujourd'hui.

AU MOINS 20 À 25% DES ÉTOILES ONT UN DISQUE DE DÉBRIS

Jusqu'ici, l'instrumentation infrarouge utilisée pour repérer ces points chauds a permis aux astronomes de confirmer qu'au moins 20 à 25% des étoiles sont entourées d'un disque de débris. Mais étant donné ce que l'on croit savoir sur la formation des systèmes planétaires, on pourrait s'attendre à ce que ce soit en fait le cas de toutes les étoiles – après tout, l'étude statistique de l'énorme échantillon d'étoiles étudiées par la mission *Kepler* indique que toutes les étoiles de la galaxie sont probablement accompagnées d'au moins une exoplanète.

Le Système solaire lui-même a son propre agencement de ceintures de débris – la ceinture d'astéroïdes et celle de Kuiper. Pourtant, le Système solaire est très pauvre en poussière, comparé aux autres systèmes dont nous avons des images. En fait, les recensements infrarouges les plus exhaustifs n'ont pu identifier jusqu'ici que des disques dont les masses sont supérieures d'au moins un ordre de grandeur à ce que l'on observe dans le Système solaire. Cela veut-il dire que notre foyer cosmique est un endroit très particulier? Nous n'en sommes pas encore sûrs. Nous n'avons étudié jusqu'ici que les disques les plus massifs, les plus extrêmes, mais il reste à découvrir probablement bien plus de disques de faible masse qui nous aideront à mieux situer la place du Système solaire parmi ses congénères dans la galaxie.

Les astronomes ont donc commencé à soupçonner la présence de disques de poussière dès les premières observations



À haute altitude dans le désert chilien de l'Atacama, l'observatoire *Alma* coordonne les signaux de plusieurs dizaines d'antennes pour, entre autres, enregistrer des images de systèmes planétaires lointains.

infrarouges, dans les années 1980, mais ils ont longtemps ignoré à quoi ils ressemblaient. Avant les progrès de l'instrumentation réalisés dans les années 1990 et 2000, un seul système stellaire avait pu être «résolu»: Bêta Pictoris. Le télescope spatial *Hubble*, notamment, utilisait un coronographe, technique consistant à occulter la lumière de l'étoile centrale de façon à observer les objets environnants moins lumineux, pour photographier la lumière diffusée par les grains de poussière dans les disques circumstellaires. Beaucoup de ces premières images étaient indistinctes, mais, déjà, suggéraient que les disques circumstellaires avaient des structures variées et complexes. Dans le cas du disque de débris de Bêta Pictoris, les premières images de *Hubble* révélaient une voilure de la région centrale du disque; les astronomes ont supposé qu'elle serait due à une planète. Des images directes l'ont plus tard confirmé.

UN RADIOTÉLESCOPE QUI EN COMBINE PLUSIEURS DIZAINES

La longueur d'onde de la lumière que nous recevons après sa réflexion sur un nuage de poussière correspond grossièrement à la taille des grains: la lumière visible ou de l'infrarouge proche provient donc de grains minuscules d'une taille de quelques micromètres au plus, tandis que l'infrarouge lointain ou les ondes millimétriques proviennent de grains comparables à ceux du sable. On pense que ces grains plus gros reflètent mieux la structure sous-jacente des disques circumstellaires.

En effet, au sein des disques se produisent continuellement des collisions à la chaîne. De grosses comètes ou des astéroïdes se percutent et sont moulus en débris de plus en plus fins. En dehors des planètes proprement dites, les objets les plus massifs au sein du disque de débris sont appelés «planétésimaux» et leurs positions résultent de leurs interactions avec les planètes

du système. Lorsque nous parvenons à localiser les planétésimaux, il est possible d'utiliser cette information pour en déduire la présence de planètes, même si nous ne pouvons pas observer ces mondes directement.

Les grains de poussière les plus minuscules sont facilement dispersés par les frottements du gaz interstellaire ou sont tout simplement soufflés par les vents de matière ou le rayonnement émis par l'étoile. Les grains plus gros, comparables au sable, sont moins touchés et offrent de meilleures chances d'observer la structure sous-jacente du disque et la présence de planètes, grâce à leur influence gravitationnelle.

En conséquence, pour étudier la structure des disques et y rechercher la signature de planètes cachées, il nous faut les observer à de grandes longueurs d'onde. Cela semble assez évident, mais il y a un piège. Le pouvoir de résolution d'un télescope est proportionnel à la longueur d'onde utilisée divisée par le diamètre de l'instrument. Ainsi, en augmentant la longueur d'onde du domaine optique vers le domaine millimétrique, il faut considérablement augmenter la taille du télescope pour conserver le même pouvoir de résolution. Le télescope *Hubble* a un diamètre de 2,4 mètres et donne une résolution de 0,13 seconde d'angle lors d'observations dans l'infrarouge proche, autour de 1 micromètre de longueur d'onde. Pour obtenir la même résolution à des longueurs d'onde de l'ordre de 1 millimètre, il faudrait augmenter le diamètre de l'instrument d'un facteur 1000, ce qui ferait plus de 2 kilomètres!

Comme il est impossible de construire des télescopes aussi énormes, on recourt à une technique appelée «interférométrie». Pour l'essentiel, au lieu d'utiliser un seul télescope de 2 kilomètres de diamètre, un interféromètre est formé d'une multitude de télescopes plus petits sur plus de 2 kilomètres de distance et combine leurs signaux pour atteindre une résolution équivalente.

Alma, qui a enregistré ses premières images dès 2011, est encore aujourd'hui l'interféromètre le plus puissant du monde. Situé à environ 5000 mètres d'altitude dans le désert chilien de l'Atacama, *Alma* est constitué de 66 antennes que l'on peut déplacer sur leurs lignes de base avec des écarts variables allant de 150 mètres à 16 kilomètres, ce qui offre la possibilité de varier les configurations, compactes ou étendues, selon la sensibilité et le zoom souhaités. Ces progrès aussi bien dans le domaine de la sensibilité que de la résolution autorisent la réalisation d'images inédites d'objets très peu lumineux. C'est ainsi qu'*Alma* a contribué à bouleverser notre compréhension des disques circumstellaires.

L'une des premières images d'*Alma* à faire le tour du monde a été prise en 2014. Il s'agissait de HL Tau, un jeune système stellaire ➤