

Les cocons des planètes

Les étoiles jeunes sont entourées d'un disque de gaz et de poussière dans lequel se forment les planètes. Les astrophysiciens traquent et explorent ces disques « proto-planétaires » afin de comprendre la genèse des planètes. L'observation des disques plus ténus entourant de vieilles étoiles permet de révéler indirectement la présence d'exoplanètes.



Vue d'artiste d'un disque proto-planétaire évasé.

Depuis 1995, date de la découverte de la première d'entre elles, la recherche de planètes extrasolaires a été très fructueuse. À ce jour, les astronomes en comptent plus de 350 à leur tableau de chasse. Les « exoplanètes » – comme d'ailleurs les planètes du système solaire – se sont très probablement formées dans les disques de gaz et de poussière entourant les étoiles jeunes. Ces disques jouent un double rôle dans les scénarios actuels de formation des planètes : ils apportent la matière qui les constitue, et ils influencent également leur orbite. Il est donc essentiel de bien les connaître (taille, géométrie, masse, densité...) pour en savoir plus sur la genèse des planètes.

Une géométrie inattendue

L'observation des disques n'est pas une mince affaire. La présence d'un disque autour d'une étoile a, tout d'abord, été inférée à partir de la lumière émise par le système étoile-disque. En effet, les poussières absorbent la lumière de l'astre (essentiellement de la lumière visible), chauffent et réémettent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge. À l'observation, un couple étoile-disque se signale donc par un excès d'émission infrarouge par rapport à une étoile seule. Faire une image d'un disque est beaucoup plus difficile et très peu de disques ont été résolus spatialement et cartographiés. Un des rares à l'avoir été entoure l'étoile HD97048, située dans la constellation du Caméléon (hémisphère Sud) à une distance de 600 années-lumière de la Terre. Deux fois et demie plus massive que le Soleil et quarante fois

plus lumineuse, HD97048 est encore très jeune : seulement 3 millions d'années, soit moins d'un millième de l'âge du Soleil. Elle a été observée en 2006 avec l'instrument infrarouge VISIR du VLT (*Very Large Telescope*), construit par le CEA/Irfu pour l'ESO (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90).

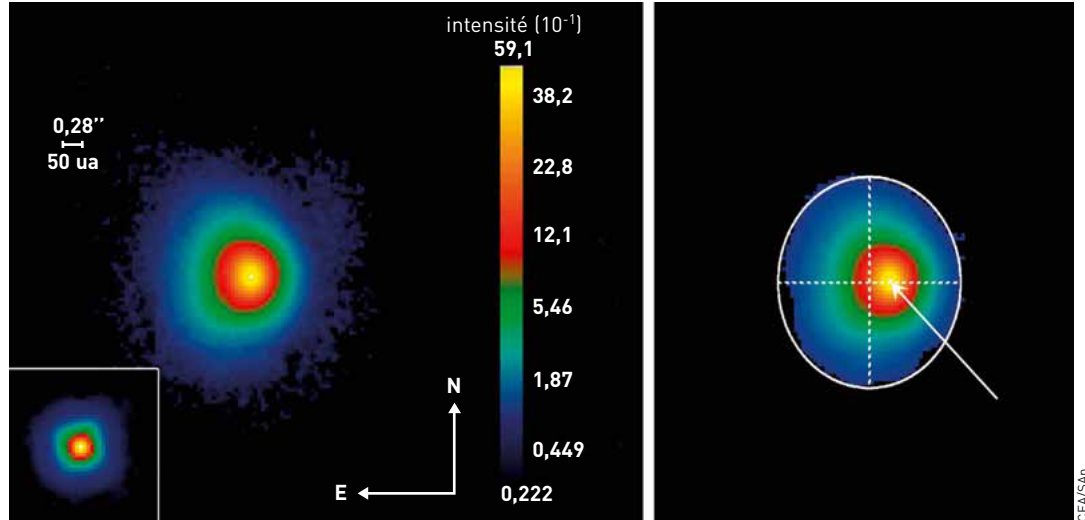
VISIR a démontré l'existence d'un disque s'étendant, à partir de l'étoile, sur plus de 370 fois la distance entre la Terre et le Soleil, soit 370 unités astronomiques (ua). Les images ont révélé une morphologie bien particulière : le disque n'est pas plat mais s'évase régulièrement vers l'extérieur (figure 1). À sa périphérie, soit à 370 ua de son étoile, il atteint une épaisseur de 360 ua. C'est la première fois qu'une telle structure, prédite par certains modèles, est directement mise en évidence autour d'une étoile aussi massive. Une telle géométrie ne peut s'expliquer que si le disque contient encore beaucoup de gaz, dont la masse a été estimée à au moins 10 fois la masse de Jupiter, soit environ $1,9 \cdot 10^{28}$ kg. La grande quantité de poussière qu'il comporte – plus de 50 fois la masse de la Terre, soit près de $3 \cdot 10^{26}$ kg – constitue un autre indice de sa jeunesse. Selon toute probabilité, les astronomes ont sous les yeux un disque similaire à la nébuleuse primordiale autour du Soleil dans laquelle sont nées les planètes de notre système, donc la Terre.

La migration des planètes

Bien avant la détection de la première planète extrasolaire, les théoriciens n'étaient pas sans ignorer que les planètes en formation dans les disques étaient



Figure 1. À gauche, image en fausses couleurs (variant du bleu au jaune en fonction de l'intensité) de l'émission infrarouge à la longueur d'onde de $8,6 \mu\text{m}$ de la matière entourant l'étoile HD97048. Cette émission est beaucoup plus étendue que celle d'une étoile sans disque, représentée dans l'encadré en bas à gauche. À droite, le centre de contour de l'émission infrarouge (en forme d'ellipse) est nettement décalé par rapport à la position de l'étoile (marquée par une flèche), indiquant que cette structure est un disque incliné.



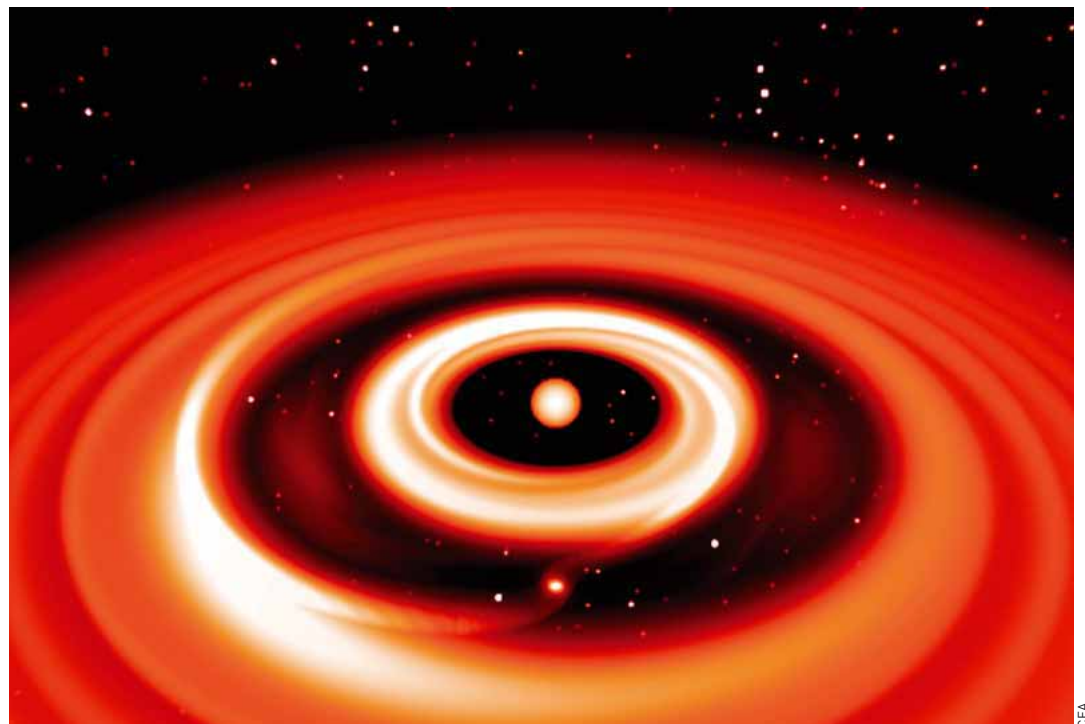
extrêmement mobiles, c'est-à-dire que leur rayon orbital pouvait varier de manière considérable, par suite des **effets de marée** avec le disque. Ils savaient également que ces effets de marée avaient tendance à amener les planètes en formation au voisinage de leur étoile centrale, leur faisant ainsi décrire une trajectoire spirale. Toutefois, ces travaux étaient restés assez confidentiels, aussi ce fut une surprise extraordinaire de constater que 51 Peg b, la première planète extrasolaire découverte, décrivait en 4,23 jours une orbite de seulement 0,052 ua de rayon autour de son étoile centrale ! À titre de comparaison, Mercure, la planète la plus proche du Soleil, décrit son orbite en 88 jours, à 0,39 ua de ce dernier. Depuis lors, les travaux des théoriciens sur les interactions de marée entre disques proto-planétaires et planètes en formation se sont retrouvés à l'avant-scène des scénarios de formation planétaire. Il n'existe en effet aucun mécanisme viable de formation *in situ* de planètes géantes aussi près de leur étoile. La commu-

nauté des astrophysiciens s'accorde donc à penser que ces objets se créent beaucoup plus loin de l'astre central, dans les régions du disque suffisamment froides pour permettre la condensation des glaces d'eau, puis sont amenés au voisinage de leur étoile par effet de marée. Ce processus s'appelle la *migration planétaire*. C'est un mécanisme essentiel pour la formation des systèmes planétaires : sa compréhension en profondeur est donc cruciale.

Des itinéraires variés

Depuis 1995, les théories de migration planétaire ont énormément progressé. Initialement cantonnées aux études analytiques, elles ont beaucoup bénéficié de l'avènement de calculateurs suffisamment puissants pour prédire finement la réponse du disque au cours des nombreuses orbites que décrit une proto-planète. À l'heure actuelle, il existe différents modes de migration d'une planète dans un disque. La *migration de type I* correspond à la

Figure 2. Résultat d'une **simulation** de l'interaction d'une proto-planète géante (d'une masse de Jupiter) et d'un disque proto-planétaire. Un sillon (l'anneau sombre, au travers duquel on voit les étoiles d'arrière-plan) a été évidé dans le disque par la planète. Celle-ci excite également dans le disque un sillage spiral, par effet de marée. C'est la force exercée par ce sillage qui fait migrer la planète.



dérive rapide, vers le centre, des planètes de petite masse – typiquement la masse terrestre. Les planètes géantes, en revanche, évalent leur orbite où elles creusent un sillon par effet de marée (figure 2). Il en résulte une *migration de type II*, beaucoup plus lente. Les disques proto-planétaires **turbulents** engendrent des migrations fort différentes : les fluctuations de densité résultant de la turbulence tendent à induire une marche au hasard du demi-grand axe⁽¹⁾ des planètes de petite masse. C'est la *migration « stochastique »* ou « *diffusive* ». Son étude est particulièrement importante car les astrophysiciens s'attendent à ce que les disques proto-planétaires soient turbulents sur une grande part de leur rayon. Il existe également des modes de migration plus exotiques, comme la *migration « emballée »* (ou de *type III*) des planètes « sous-géantes », ou la *migration « de concert »*, vers l'extérieur, de planètes géantes en résonance⁽²⁾. Le Service d'astrophysique du CEA/Irfu, très impliqué dans l'étude de la migration planétaire, a effectué plusieurs découvertes de premier plan. Reste toutefois une question essentielle : qu'est-ce qui arrête la migration planétaire ? À quoi on peut en ajouter une autre : pourquoi les planètes de notre système solaire semblent-elles n'avoir pas migré ?

Des débris bien utiles

Le disque autour des étoiles jeunes a tendance à disparaître sur une échelle de temps d'environ dix millions d'années. En effet, une partie de la matière se retrouve dans les planètes, une autre est « soufflée » au loin par la pression de la lumière émise par l'étoile, une troisième tombe en spirale jusqu'à l'astre central. Si bien que les étoiles d'âge mûr devraient être dépourvues de disque, et seule la lumière émise par l'étoile devrait être observée. Et pourtant, lorsqu'en 1984 le premier satellite infrarouge américain IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) a observé des étoiles comme Vega ou β -Pictoris à des fins de calibration, il a détecté un excès de lumière infrarouge. Comment expliquer un tel phénomène ? Y aurait-il encore des poussières autour de ces étoiles ? Eh bien oui, comme l'ont très vite confirmé des observations dans le visible de l'étoile β -Pictoris, qui ont révélé la présence d'un disque résolu autour de l'étoile⁽³⁾.

Comment réconcilier cette observation avec les théories qui prédisaient l'absence de poussière ? Les quantités de poussière en jeu sont très faibles, bien plus faibles que celles contenues dans les disques proto-planétaires. Ce ne sont d'ailleurs pas des poussières primaires : elles ont été « stockées » dans des corps célestes comme des **comètes** ou des

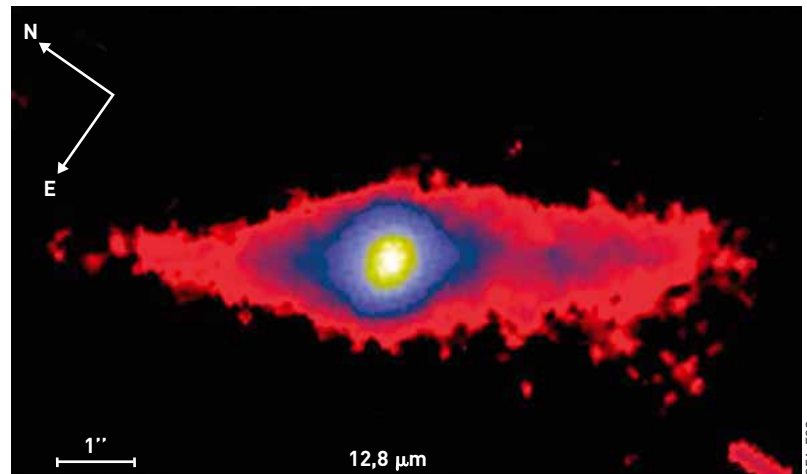


Figure 3. Image du disque de débris autour de l'étoile β -Pictoris, observée avec l'instrument VISIR du VLT. On peut notamment remarquer la dissymétrie du disque.

astéroïdes, puis régénérées lors de l'évaporation de ces comètes passant auprès de leur étoile, ou lors de collisions entre astéroïdes. De tels phénomènes existent d'ailleurs dans le système solaire, et les poussières ainsi créées engendrent la lumière « zodiacale »⁽⁴⁾.

Ces disques de « débris » intéressent les astronomes car une planète peut y « sculpter » des sillons, nettement plus faciles à observer que la planète elle-même. En 1994, le Service d'astrophysique a obtenu les premières images des régions centrales du disque autour de l'étoile β -Pictoris. Celles-ci ont révélé une morphologie laissant supposer la présence d'une planète dans le système (figure 3). Récemment, une équipe du **Laboratoire d'astrophysique de l'Observatoire des sciences de l'Université de Grenoble** a montré qu'il y a au moins une planète dans ce disque. S'ils ne sont pas le cocon où se forment les exoplanètes, les disques de « débris » constituent donc au moins une aide précieuse pour les repérer.

L'étude des disques, structures relativement ténues, repose sur le pouvoir de résolution du télescope, c'est-à-dire la finesse des détails qui peuvent être observés. Or, cette résolution dépend directement du diamètre du miroir. En effet, étant donné le phénomène de diffraction de la lumière, l'image d'un objet ponctuel à travers un télescope n'est pas un point, mais une tache : la tache de diffraction. Plus grand est le diamètre du télescope, plus petite sera cette tache. L'image d'une étoile à travers l'E-ELT (*European-Extremely Large Telescope* ; voir *ELT/METIS, un géant de 42 mètres*, p. 110), télescope européen de 42 mètres de diamètre qui entrera en service en 2018, aura ainsi une surface 25 fois moindre que celle des images produites par le VLT. Ce sera donc un instrument extraordinaire pour l'étude des disques !

> **Pierre-Olivier Lagage, Frédéric Masset et Éric Pantin**

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Université (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

(1) Demi-grand axe : segment (imaginaire) qui joint le centre d'une ellipse au bord en passant par un des foyers.

(2) Une résonance a lieu lorsque deux objets orbitant autour d'un troisième ont des périodes de révolution dont le rapport forme une fraction entière simple (par exemple 2/3 pour Neptune et Pluton autour du Soleil).

(3) Cette lumière visible provient de l'étoile et est simplement diffusée par les poussières, contrairement à la lumière infrarouge qui est émise par ces poussières elles-mêmes.

(4) Lumière zodiacale : faible lueur visible dans le ciel nocturne, s'étendant le long du plan de l'écliptique à partir des environs du Soleil, peu après le coucher ou avant le lever de celui-ci.