



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 ➤

LA CHASSE AUX PLANÈTES

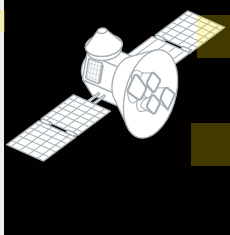
D'après les astronomes, pratiquement toutes les étoiles de la galaxie sont accompagnées de planètes, même si beaucoup, et même la plupart, restent indétectables. Chacune des stratégies utilisées pour déceler ces exoplanètes présente ses propres forces et faiblesses et souffre d'un biais favorisant la détection d'un type particulier de mondes. Les petites planètes comparables à la Terre qui parcourent de longues orbites autour de leur soleil sont particulièrement difficiles à détecter de loin, ce qui explique pourquoi très peu d'exoplanètes connues appartiennent à cette catégorie.

TRANSITS

Cette méthode de recherche des exoplanètes consiste à suivre l'évolution de la luminosité des étoiles. Chaque fois qu'une planète passe devant son soleil, on observe une brusque diminution de la luminosité de celui-ci, à condition que le plan de l'orbite soit correctement orienté, c'est-à-dire qu'il soit vu de « profil » depuis la Terre. Ces éclipses périodiques nous informent non seulement sur la présence d'une planète, mais aussi sur son diamètre et sur la taille de son orbite.

Exemple de télescope

TESS

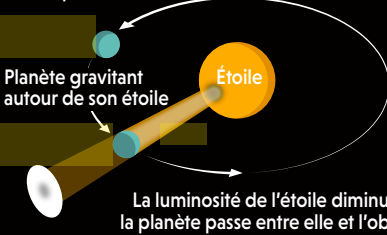


Comment ça marche

Cherche l'ombre d'une planète

Planète gravitant autour de son étoile

La luminosité de l'étoile diminue lorsque la planète passe entre elle et l'observateur



Avantage

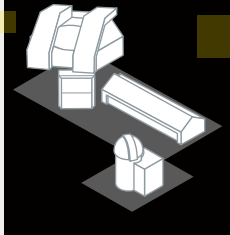
Efficace pour détecter des planètes aux périodes orbitales courtes (plus de 3 155 à ce jour)



VITESSES RADIALES

Dans cette technique, on scrute les mouvements d'une étoile dus à l'attraction gravitationnelle exercée par une éventuelle planète gravitant autour d'elle. On mesure ces mouvements à l'aide de l'effet Doppler : les fréquences de la lumière émise par l'étoile augmentent lorsque l'astre se rapproche de l'observateur (« décalage vers le bleu »), diminuent lorsqu'il s'éloigne (« décalage vers le rouge »).

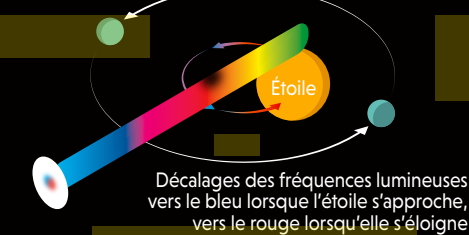
WIYN



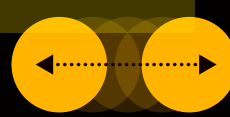
Examen des oscillations d'une étoile

Étoile

Décalages des fréquences lumineuses vers le bleu lorsque l'étoile s'approche, vers le rouge lorsqu'elle s'éloigne



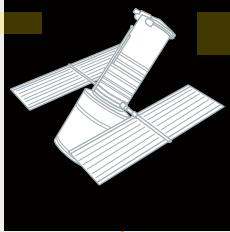
Efficace pour détecter des planètes massives aux périodes orbitales courtes (796 à ce jour)



IMAGERIE DIRECTE

Si la planète est assez lumineuse et si elle gravite loin de son étoile, nos télescopes peuvent la repérer directement. Ce n'est en général possible qu'en occultant la lumière directe de l'étoile mère – technique appelée coronagraphie – afin de révéler la lumière bien plus faible réfléchiée par la planète. Cependant, presque toutes les exoplanètes sont impossibles à photographier avec les instruments actuels.

HUBBLE



Masquage de l'étoile et prise de vue

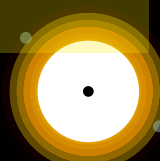
Étoile

Planète

Un cache solaire au foyer du télescope occulte l'essentiel de la lumière émise par l'étoile, ce qui permet de rendre visible la planète, bien moins lumineuse



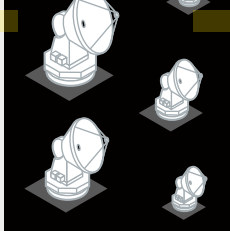
Efficace pour détecter des planètes jeunes et brillantes dont les orbites sont grandes (50 à ce jour)



DISQUES CIRCUMSTELLAIRES

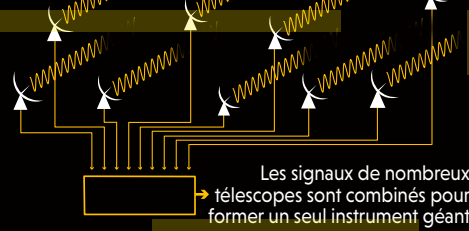
Des espaces évidés, des torsions ou des grumeaux au sein des disques de gaz et de poussière qui entourent les étoiles révèlent parfois la présence de planètes par ailleurs indétectables. Les disques apparaissent dans les grandes longueurs d'onde, ce qui implique l'usage de très grands télescopes. En pratique, les astronomes combinent les signaux de plusieurs petits télescopes répartis sur une grande distance pour former un instrument virtuel équivalent à un seul télescope de diamètre comparable à leur séparation.

ALMA



On combine les ondes captées (interférométrie)

Les signaux de nombreux télescopes sont combinés pour former un seul instrument géant



Efficace pour détecter des planètes dont les orbites sont grandes



> 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

>