

Les planètes extrasolaires



par **Michel Mayor**¹

La pluralité des mondes, déjà hypothèse des philosophes grecs, est devenue un domaine vigoureux de l'astronomie d'aujourd'hui. Au cours des huit dernières années, quelques 120 planètes ont été découvertes en orbite autour d'étoiles analogues de notre Soleil. Bien que ces découvertes aient considérablement stimulé la communauté des astronomes et le grand public, il faut remarquer que la détection de planètes extrasolaires était attendue, celles-ci étant un sous-produit supposé de la formation stellaire. L'effondrement gravitationnel des nuages de matière interstellaire implique une augmentation de plus de 10^{20} de la densité du gaz pour atteindre la densité moyenne d'une étoile. Fragmentation du nuage et turbulence sont les ingrédients de la forte rotation propre des étoiles jeunes mais aussi de la formation de structures à même d'absorber l'excès considérable de moment cinétique du gaz en contraction. On sait, par exemple, que plus de 60 % des étoiles de masse voisine de celle de notre Soleil sont dans des systèmes stellaires multiples (étoiles binaires pour la plupart).

Les étoiles jeunes sont aussi connues pour être entourées dans leur immense majorité de disques de matière en rotation (gaz et poussières). Ces disques

¹ Associé étranger de l'Académie des sciences, directeur de l'Observatoire de Genève.

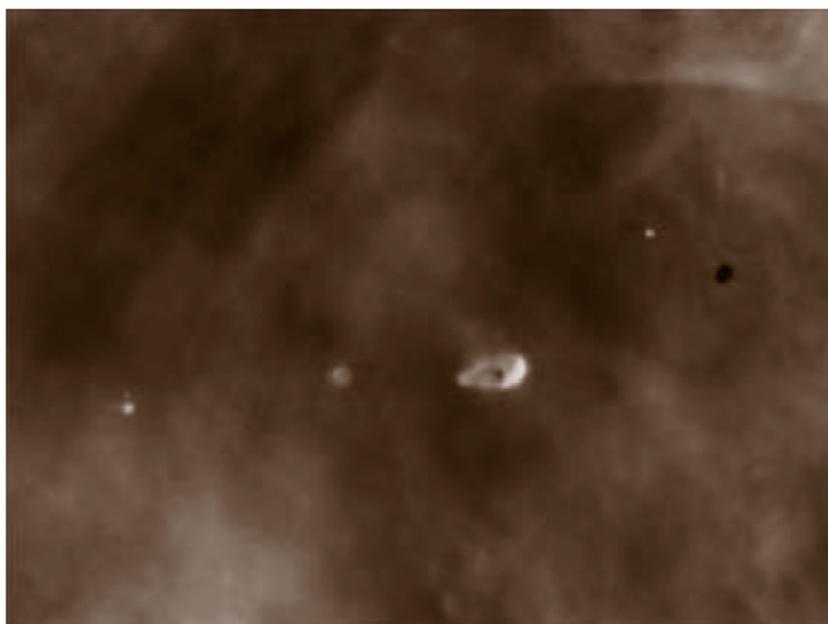


Fig. 1 : Disques de matière, appelés proplyds, observé par le Hubble Space Telescope dans le nuage interstellaire d'Orion. Les disques sont orientés au hasard dans l'espace et donc vus sous des angles différents.

(fig. 1) ont été, par exemple, détectés autour des étoiles nouvellement formées dans la nébuleuse d'Orion, site d'intense formation stellaire. Ces disques d'accrétion de gaz et poussières disparaîtront en quelques millions d'années, une échelle de temps courte comparée par exemple aux quelques 4 600 millions d'années du Soleil.

Proposé dans les années 1950 par le physicien russe Safronov, le scénario standard de la formation planétaire est celui de l'agglomération graduelle de particules de poussières ou de grains de glace ; agglomération qui formera graduellement des planétésimaux de tailles croissantes puis des planètes. La formation des planètes géantes gazeuses, dans un tel scénario, implique une formation rapide, pendant la durée de vie du disque

d'accrétion. Si l'agglomération de particules de glace à 5 unités astronomiques, ou au-delà, est capable de fournir un noyau de quelques 10 masses terrestres alors l'attraction gravitationnelle devient suffisante pour capturer une enveloppe gazeuse au dépend du disque d'accrétion et, par là, atteindre rapidement des masses planétaires analogues à celle de Jupiter, soit $\sim 10^{-3}$ masse du Soleil ou ~ 300 masses terrestres. Le scénario d'agglomération décrit ci-dessus n'est pas le seul qui ait été proposé pour la formation planétaire. Certains chercheurs actuels explorent la possibilité de la formation planétaire par instabilités gravitationnelles du disque d'accrétion lui-même. Dans les deux cas, les planètes apparaissent comme des sous-produits, probablement fréquents, de la formation stellaire.

La faiblesse relative de l'éclat d'une planète comparé à celui d'une étoile (10^{-9} si on compare Jupiter au Soleil), combiné à leur proximité angulaire sur le ciel rend la détection directe très difficile. Une démarche directe qui, pour l'instant, n'a pas donné de résultat. La recherche des exoplanètes s'est donc orientée vers des démarches indirectes, en premier lieu les méthodes visant à mettre en évidence le mouvement de l'étoile autour du centre de gravité du système étoile-planète.

La recherche de l'oscillation de la position de l'étoile sur la voûte céleste, tentée depuis le sol dès le milieu du 20^{ème} siècle n'a pas donné de résultat. Par contre, la variation de la vitesse stellaire, mesurée via l'effet Doppler, a permis la découverte de quelques 120 planètes (ou systèmes planétaires).

Le développement de spectrographes et de méthodes spécifiques a permis la mesure des variations des vitesses stellaires avec une précision de l'ordre d'un mètre par seconde, soit donc un décalage relatif des raies spectrales stellaires de quelques 10^{-9} . En 1995, la découverte à l'Observatoire de Haute-Provence, d'une planète de masse jovienne en orbite autour d'une étoile similaire à notre Soleil, l'étoile 51 Pégase, a été tout d'abord la confirmation de l'existence de planètes extrasolaires mais elle a été surtout à l'origine d'une rediscussion des mécanismes de formation planétaire. En effet, la période de révolution de cette planète de 4,23 jours semblait en contradiction avec la formation attendue des planètes géantes gazeuses au-delà de 5 UA (la limite de sublimation des grains de glace dans le disque d'accrétion).

Ce fut l'occasion de redécouvrir les travaux théoriques qui prédisaient une forte interaction gravitationnelle entre la planète nouvellement formée et le disque d'accrétion. Cette interaction gravita-

tionnelle a une échelle de temps nettement plus courte que la vie du disque d'accrétion. Elle produit une migration orbitale et une évolution de l'excentricité de l'orbite. Si les grandes lignes de ce phénomène sont admises, ce sujet reste encore ouvert sur de nombreuses questions. En particulier on observe une accumulation de planètes (dites "Jupiter chauds") sur des orbites ayant des périodes comprises entre 3 et 5 jours. Quelle est la nature du ou des mécanismes susceptibles de stopper la migration ?

Si l'on devait résumer en une phrase l'impact de ces premières découvertes, il faudrait mentionner la diversité des systèmes exoplanétaires. Avant 1995, on ne disposait que d'un modèle de système planétaire, notre propre système solaire avec ses planètes géantes gazeuses au-delà de 5 UA et ayant des orbites quasi circulaires. Les systèmes exoplanétaires nous révèlent une tout autre réalité avec des planètes géantes gazeuses ayant des orbites comprises entre 2,5 jours et plusieurs années, des excentricités orbitales parfois très élevées et des masses aussi fortes que 10 à peut-être 20 fois la masse de Jupiter.

L'analyse des propriétés statistiques des exoplanètes, distribution des éléments orbitaux et distribution des compositions chimiques des étoiles hôtes, sont autant de contraintes pour l'élaboration et les tests des scénarii de formation planétaire. Parmi ces propriétés mentionnons par exemple la très forte corrélation entre la composition chimique des étoiles de type solaire et la probabilité qu'elles aient une planète géante. La netteté de la relation observée (presque un effet de seuil) est surprenante. Il semble que l'existence de cette relation liant la présence de planète géante à la composition chimique de l'étoile ne puisse s'expliquer par un mécanisme d'accrétion de matière enrichie en éléments chimiques lourds dans l'atmosphère stellaire mais résulte de la composition primordiale du nuage interstellaire. Il est évident que la formation planétaire via un scénario d'agglomération de poussières et/ou grains de glace est d'autant plus efficace que les éléments chimiques constitutifs de ces grains sont abondants. Par contre, une telle observation semble difficilement compatible avec le scénario de formation planétaire par instabilité gravitationnelle du disque d'accrétion.

Parmi les systèmes planétaires découverts, une dizaine abritent deux voire trois planètes géantes. Si certains systèmes sont fortement hiérarchisés avec un grand rapport de périodes, d'autres sont constitués de planètes avec des orbites résonnantes. Un exemple de tel système est illustré sur la (fig. 2) Les fluctuations

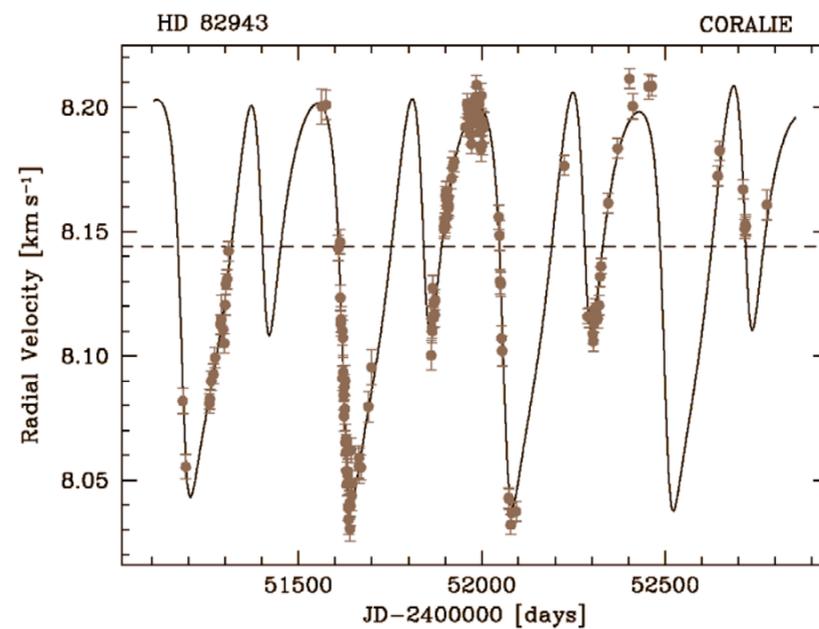


Fig. 2 : Variation, jour après jour, de la vitesse radiale (en km/s), par rapport à la Terre, de l'étoile HD82943: ces oscillations sont dues à la présence de deux planètes de périodes orbitales différentes, dont la courbe permet de fixer les masses.

de la vitesse de l'étoile HD82943 indiquent la présence de deux planètes telles que leurs périodes sont dans un rapport très proche de deux. La constitution de systèmes exoplanétaires résonnants se fait lors de la migration orbitale induite par l'interaction avec le disque d'accrétion.

Lors de la découverte de la planète en orbite autour de 51 Pégase, s'est posée la question de la nature physique de cet étrange objet ayant une masse jovienne mais une période de seulement 4,2 jours. Pour ces systèmes à très courtes périodes, donc ayant des demi-grands axes de l'ordre d'une dizaine de rayons stellaires, la probabilité de transits planétaires est de l'ordre de 10 %.

Le 9 septembre 1999, le premier transit exoplanétaire était observé apportant par là même la preuve que ces "Jupiters chauds" étaient bien des planètes géantes gazeuses. En effet, l'analyse de la courbe de l'éclat de l'étoile révèle une dépression de l'ordre du pour cent qui nous donne immédiatement accès au rayon planétaire et, par là, à la densité moyenne de la planète.

Ce transit planétaire a été l'occasion de nombreuses mesures complémentaires. Des mesures qui ont, par exemple, permis l'estimation de la teneur en sodium dans l'atmosphère de la planète et du taux d'évaporation de cette atmosphère.

Peut-on évaluer les étapes prochaines des découvertes dans le domaine des systèmes planétaires ? Il suffit tout d'abord de remarquer que toutes les planètes détectées à ce jour ont des masses supérieures à environ 30 fois la masse de la Terre (~0,1 masse de Jupiter). Si nous commençons à entrevoir les propriétés et les fréquences d'occurrence des planètes géantes gazeuses, par contre, tout est à découvrir pour ce qui est des planètes telluriques, ces planètes rocheuses analogues de la Terre. La spectroscopie Doppler n'est pas à même de détecter de telles petites planètes (la limite n'est pas instrumentale mais provient des instabilités et anisotropies des surfaces planétaires qui limitent la précision accessible). La méthode la plus prometteuse pour la détection des planètes telluriques est celle des transits planétaires. Un Jupiter passant devant le disque d'une étoile de type solaire induit une baisse de 1 % de son éclat. Le transit de l'analogue d'une Terre ne fera baisser la luminosité stellaire que de 10⁻⁴. Une telle baisse infime de la luminosité n'est pas mesurable au travers de l'atmosphère terrestre mais peut l'être depuis l'espace. Une première opportunité de telles découvertes se présentera avec la mission spatiale COROT que lancera le CNES en 2005. Des missions spatiales similaires mais plus ambitieuses telles la mission KEPLER (NASA) ou la mission EDDINGTON (ESA) seront lancées en 2007 et 2008 respectivement. La durée (plusieurs années), le nombre d'étoiles mesurées (plus de 10⁵) et la sensibilité de ces instruments sont autant d'atouts pour la détection de milliers de planètes dont, on l'espère, plusieurs dizaines de planètes telluriques dans la zone habitable, c'est-à-dire des planètes telles que la température à leur surface soit adéquate pour le développement éventuel de la chimie de la Vie.

En parallèle à ces missions spatiales visant la détection des analogues de la Terre, d'importants développements d'instruments visent à réaliser des images (et donc des spectres) d'exoplanètes. L'interféromètre du Mont Paranal, développé par l'ESO, contribuera d'ici quelques années à cette recherche mais il est certain que l'espace sera à même d'offrir de plus amples possibilités. L'imagerie des exoplanètes sera un thème central des observations du successeur du Hubble Space Telescope et des interféromètres spatiaux en cours d'étude, tel celui de la mission DARWIN de l'ESA. Cette mission vise non seulement l'imagerie des exoplanètes mais encore à analyser leur spectre atmosphérique et par là à chercher des signatures chimiques du développement de la Vie. Un enjeu enthousiasmant pour une question qui déborde du cadre de l'astronomie : sommes-nous seuls dans l'Univers ? ■