

d'un suivi des orbites des objets de Kuiper connus, en vue de mieux connaître leur répartition. Avec un ensemble de données restreint, le risque d'une conclusion incorrecte est élevé.

Bien qu'on ne puisse écarter d'autres explications, la répartition des objets de la ceinture de Kuiper renforce l'hypothèse de la migration des planètes. Neptune serait née à environ 3,3 milliards de kilomètres du Soleil et aurait ensuite fait un voyage d'environ 1,2 milliard de kilomètres vers la périphérie, couvrant une distance presque égale

au tiers du rayon de son orbite actuelle. Les migrations d'Uranus, de Saturne et de Jupiter auraient été plus limitées, respectivement de l'ordre de 15, 10 et 2 pour cent de leur rayon orbital actuel. Pour ces planètes, les estimations sont moins fiables, car, contrairement à Neptune, leurs migrations n'ont pas laissé de traces directes sur les objets de la ceinture de Kuiper.

L'essentiel de cette migration s'est opéré en moins de 100 millions d'années ; c'est long par rapport à la période de formation des planètes (moins de

10 millions d'années), mais c'est peu par rapport à l'âge du Système solaire (4,5 milliards d'années). Autrement dit, la migration planétaire a commencé au début du Système solaire, et elle a duré longtemps après que les planètes ont été formées. La masse totale des planétésimaux dispersés était d'environ trois fois la masse de Neptune. Des changements orbitaux encore plus spectaculaires se produisent précocement dans des systèmes planétaires, lorsque le disque primordial contient plus de matière, avec, peut-être, de

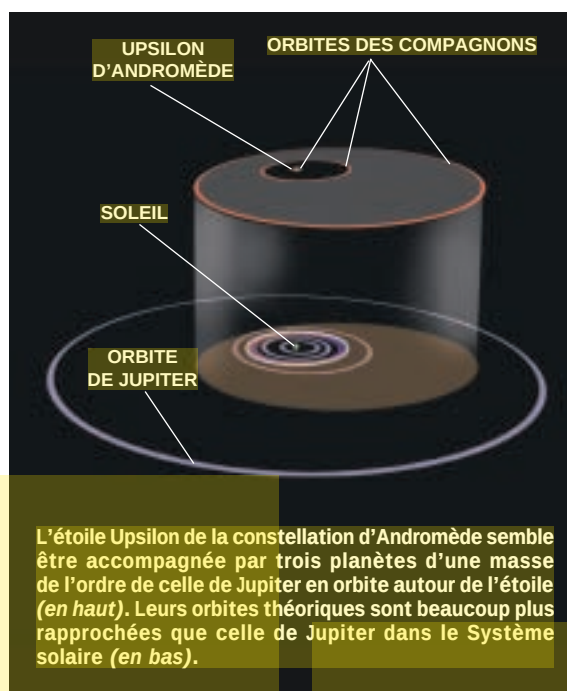
Un autre système planétaire ?

En avril 1999, Paul Butler et ses collègues de l'Observatoire anglo-australien ont annoncé la découverte de ce qui semble être le premier exemple de système planétaire comprenant plusieurs objets de masse équivalente à celle de Jupiter, en orbite autour d'une étoile de type solaire. Jusqu'alors, on ne connaissait que des systèmes à une planète. L'étoile étudiée par P. Butler, Upsilon de la constellation d'Andromède, est à 40 années-lumière du Système solaire ; elle est un peu plus massive que le Soleil et trois fois plus brillante.

Cette étoile semble posséder trois compagnons. L'objet le plus central a une masse au moins égale à 70 pour cent de la masse de Jupiter, et décrit une orbite circulaire à une distance de seulement 0,06 unité astronomique (soit environ neuf millions de kilomètres) de l'étoile. Le compagnon le plus externe est au moins quatre fois plus massif que Jupiter et se déplace sur une orbite très allongée, d'un rayon moyen de 2,5 unités astronomiques (la moitié du rayon de l'orbite de Jupiter). L'objet intermédiaire est au moins deux fois plus massif que Jupiter et parcourt une orbite moyennement excentrique, d'un rayon moyen de 0,8 unité astronomique.

Si elle est confirmée, cette découverte permettra de tester et de mettre au point de nouveaux modèles de formation et d'évolution des systèmes planétaires. Plusieurs théoriciens ont déjà déterminé que ce système est peu stable : la stabilité dynamique du système serait bien meilleure s'il n'y avait pas de planète intermédiaire. Ce résultat est intéressant, car le corps intermédiaire est celui pour lequel les données observationnelles sont le moins probantes.

Le système planétaire ne s'explique par aucun des mécanismes théoriques qui stipulent que les planètes géantes naissent sur des orbites distantes, avant de se rapprocher de l'étoile : si les interactions entre le disque et la protoplanète rétrécissaient les orbites, les planètes les plus massives, en principe les plus anciennes, devraient s'être le plus rapprochées de l'étoile, contrairement à ce



L'étoile Upsilon de la constellation d'Andromède semble être accompagnée par trois planètes d'une masse de l'ordre de celle de Jupiter en orbite autour de l'étoile (en haut). Leurs orbites théoriques sont beaucoup plus rapprochées que celle de Jupiter dans le Système solaire (en bas).

qui est observé dans le système Upsilon d'Andromède. Si seuls le corps le plus proche et le corps le plus éloigné de l'étoile existent vraiment, ce système corroborerait la théorie de diffusion planète-planète, où deux planètes massives migrent vers des orbites proches, puis s'éloignent en raison d'une diffusion mutuelle, avec pour résultat une planète sur une orbite rapprochée quasi circulaire, et l'autre sur une orbite lointaine et allongée. Cependant ce scénario n'explique pas tout : on s'attendrait à trouver le compagnon le plus massif sur l'orbite la plus proche de l'étoile, et le compagnon le moins massif sur l'orbite la plus lointaine, ce qui est l'inverse des caractéristiques du système Upsilon d'Andromède.

Les deux mécanismes auraient-ils agi simultanément ? Un rétrécissement orbital par des interactions

disque-protoplanète pour l'objet le plus central aurait-il été suivi d'une diffusion gravitationnelle mutuelle des deux autres corps ? Il se peut également que des mécanismes de formation et d'évolution entièrement différents soient à l'œuvre, comme la fragmentation du nuage de gaz protostellaire, à laquelle on attribue la production de systèmes à étoiles multiples et les compagnons de naines brunes.

Si seuls le corps le plus rapproché et le corps le plus éloigné existent vraiment, le système aurait une architecture semblable à celle des systèmes stellaires triples classiques, constitués d'un système binaire serré et d'une étoile distante sur une orbite allongée. Davantage d'observations seront nécessaires pour confirmer le nombre de compagnons, leur masse et leurs paramètres orbitaux.

Les techniques utilisées jusqu'à présent ne permettent pas de détecter des systèmes planétaires semblables au nôtre, car les oscillations stellaires dues à des planètes de la taille de la Terre, en orbite rapprochée (ou à des planètes de la taille de Jupiter, en orbite plus lointaine), sont inférieures au seuil d'observation. Nous commençons seulement à découvrir des planètes autour d'étoiles de ce type. L'astronomie devra encore progresser beaucoup avant d'expliquer la formation de notre Système solaire.

nombreuses protoplanètes sur des orbites proches, en compétition dans le mécanisme d'accrétion.

D'autres systèmes planétaires ?

Au début des années 1980, à l'Institut de technologie de Californie, Peter Goldreich et Scott Tremaine calculèrent que les forces gravitationnelles entre une protoplanète et le disque de gaz environnant, ainsi que les pertes d'énergie engendrées par les forces de frottement visqueux dans le milieu gazeux, conduiraient à d'importants échanges d'énergie et de moment cinétique entre la protoplanète et le disque. Si les forces exercées sur la protoplanète par le disque de matière contenu dans l'orbite, d'une part, et par la matière se trouvant juste à l'extérieur, d'autre part, étaient légèrement déséquilibrées, l'orbite de la planète serait rapidement modifiée de manière draconienne. À l'époque, cette possibilité théorique avait peu retenu l'attention. N'ayant d'autre exemple que notre Système solaire, les théoriciens de la formation des planètes supposaient toujours que les planètes s'étaient formées sur leurs orbites actuelles.

Cependant, depuis cinq ans, la recherche de planètes extrasolaires a apporté quelques exemples possibles de migration planétaire. En mesurant les oscillations révélatrices des étoiles proches (situées à moins de 50 années-lumière du Système solaire), les astronomes ont découvert des preuves de la présence de compagnons de la taille de Jupiter autour d'étoiles analogues au Soleil. Le premier exemple, une planète en orbite autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase, a été découvert en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève. Aujourd'hui, une vingtaine de planètes extrasolaires ont été décelées. La technique utilisée pour ces recherches (la mesure du décalage Doppler des rayonnements des étoiles, pour déterminer les variations périodiques des vitesses stellaires orbitales) ne fournit qu'une limite inférieure pour la masse des compagnons des étoiles. La plupart des objets trouvés ont des masses supérieures à la masse de Jupiter et des rayons orbitaux inférieurs à 0,5 unité astronomique.

Que révèlent ces objets sur la constitution du Système solaire ? Selon le modèle classique de formation plané-

taire, les planètes géantes du Système solaire se sont formées en deux étapes. Au cours de la première étape, des planétésimaux solides se sont agglutinés et ont formé un noyau protoplanétaire. Lors de la seconde étape, ce noyau s'est entouré d'une enveloppe gazeuse massive, constituée d'éléments de la nébuleuse environnante attirés par la force gravitationnelle du noyau. La durée de vie des disques protoplanétaires autour des étoiles de type solaire montre que cette formation se termine moins de dix millions d'années après la formation de la nébuleuse solaire elle-même.

À moins de 0,5 unité astronomique d'une étoile, la masse du disque primordial est trop faible pour que des noyaux protoplanétaires solides se condensent. De surcroît, il est douteux qu'une protoplanète en orbite proche puisse attirer suffisamment de gaz pour se constituer une enveloppe aussi massive que celle de Jupiter. L'une des raisons en est géométrique : un objet en orbite rapprochée traverse un volume inférieur à celui d'un objet qui se déplace sur une orbite plus éloignée. En outre, le disque gazeux, plus chaud près de l'étoile, est moins susceptible de se condenser en un noyau protoplanétaire froid. Au total, la formation de planètes géantes sur des orbites très proches est peu plausible.

Plusieurs théoriciens ont donc supposé que les planètes géantes extrasolaires se seraient formées à plusieurs unités astronomiques de leur étoile et auraient ensuite migré vers l'intérieur. Trois mécanismes de migration orbitale planétaire sont à l'étude. Deux font intervenir des interactions disque-protoplanète par lesquelles les planètes migreraient loin de leur lieu de formation tant que subsiste un disque massif.

Selon la théorie de P. Goldreich et S. Tremaine, le mouvement de la planète serait couplé à celui du gaz qui vient s'ajouter à la protoétoile : la planète pourrait soit plonger dans l'étoile, soit se désolidariser du gaz au moment où il devient très proche de l'étoile. L'autre hypothèse envisagée est l'interaction avec un disque de planétésimaux plutôt qu'avec un disque gazeux : une planète géante initialement placée dans un disque très massif de planétésimaux échangerait de l'énergie et du moment cinétique par diffusion gravitationnelle et par des interactions résonantes ; son orbite se rétrécirait alors jusqu'à ce qu'elle

Des petits corps mal connus

Depuis 1992, les découvertes se succèdent à un rythme effréné : environ 200 objets transneptuniens ont déjà été observés depuis 1992. Cette moisson résulte de l'utilisation de caméras à capteurs CCD montées sur les grands télescopes internationaux. Cependant, la plupart de ces corps n'ont été observés qu'une fois et ils ne seront probablement jamais observés à nouveau. La détermination de leur orbite est compromise, car elle nécessiterait plusieurs années d'observation. En trois ans, de tels objets parcourent environ un centième d'orbite, soit le strict minimum pour la détermination d'une orbite approximative. De surcroît, il faut que l'objet soit observé chaque année lors de son passage à l'opposition (lorsque l'objet et le Soleil sont opposés dans le ciel), ce qui nécessite une coopération entre tous les groupes d'observateurs.

Brett Gladman, de l'Observatoire de la Côte d'Azur collabore avec des astronomes de l'Université de Toronto dans un programme de recherche et de suivi d'objets transneptuniens. De nouvelles techniques d'observation et de traitement des données leur ont permis de découvrir l'objet le plus lointain (62 unités astronomiques lors de son observation) et l'objet le plus petit (15 kilomètres de dimension).

Le nombre d'objets lointains bien connus étant très restreint, les conclusions sur le Système solaire externe restent spéculatives. Ainsi, plusieurs équipes travaillent sur des scénarios différents de celui présenté dans l'article de R. Malhotra. Sous l'impulsion d'Alessandro Morbidelli, le groupe de mécanique céleste de l'Observatoire de la Côte d'Azur a imaginé que de gros planétésimaux (certains d'une taille au moins équivalente à celle de Mars) se forment en même temps que les planètes géantes. À la fin de la formation des planètes géantes, le gaz qui était dans le Système solaire commence à se dissiper. La dynamique gravitationnelle n'est alors plus amortie par le gaz environnant et l'orbite des gros planétésimaux

est très perturbée par les planètes géantes : en quelques millions ou dizaines de millions d'années, ils auraient été éjectés du Système solaire. Au cours de cette éjection, les gros planétésimaux traversent les ceintures de petits corps et les perturbent. De nombreux petits corps sont éjectés du Système solaire ; les survivants sont sur des orbites excentriques et inclinées.

Un tel modèle explique d'une façon unifiée les caractéristiques dynamiques et physiques connues, pour la ceinture des astéroïdes, et supposées, pour la ceinture de Kuiper. Contrairement à celui de R. Malhotra, ce modèle prévoit que tous les petits corps au-delà de Neptune sont entraînés sur des orbites excentriques et inclinées, pas seulement ceux qui sont sur des orbites résonantes.

Le grand nombre d'objets sur des orbites résonantes, point clef du modèle de R. Malhotra, pourrait n'être qu'un effet de sélection des observations, qui sont le plus souvent effectuées dans des directions où les corps en résonances dominent ; de plus, les responsables du Centre pour les petites planètes de Cambridge, chargés de la détermination des orbites, ont la fâcheuse manie d'attribuer une orbite résonante à tout corps pour lequel les données orbitales manquent...

Le mécanisme de capture des orbites résonantes fonctionne uniquement lorsqu'il n'y a plus de gros planétésimaux dans le Système solaire. Aussi, l'évolution du Système solaire s'est probablement déroulée en deux phases : une perturbation des petits corps, due pour l'essentiel à la présence de planétésimaux massifs, puis, lorsque ces planétésimaux ont été éjectés, une période de migration de Neptune qui a capturé certains corps en résonance, enrichissant les orbites résonantes. Toutefois, comme les orbites initiales des objets transneptuniens n'étaient vraisemblablement par circulaires, leur excentricité actuelle ne permet pas de déduire la distance de migration.

Jean-Marc PETIT, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

atteigne le bord interne du disque, à quelques rayons stellaires seulement de l'étoile. Enfin, le troisième mécanisme est la diffusion des planètes, qui se seraient formées sur des orbites trop proches les unes des autres pour assurer une stabilité à long terme ou qui auraient migré vers de telles orbites. Si l'issue de ce scénario reste imprévisible, il devrait néanmoins conduire à des orbites très excentriques. Le hasard pourrait, dans certains cas, placer une des planètes dispersées sur une orbite excentrique, dont le point le plus proche de l'étoile serait si proche de cette dernière que les effets de marées finiraient par circulariser l'orbite ; l'autre planète serait déplacée vers une orbite excentrique éloignée. Chacun de ces mécanismes peut rendre compte de toute une variété de rayons orbitaux et d'excentricités orbitales pour les planètes survivantes.

Ces idées ne sont pas un simple ajustement de la théorie classique de formation des planètes. Elles remettent en cause l'opinion répandue qui voudrait que les disques protoplanétaires entourant des étoiles de type solaire évoluent en des systèmes planétaires semblables au nôtre. En réalité, la plupart des planètes pourraient naître dans des configurations instables, de sorte qu'une migration planétaire ultérieure donnerait des résultats très variés, selon les propriétés initiales du disque. Seules de nouvelles observations et des avancées théoriques permettront d'élucider la relation entre les planètes extrasolaires nouvellement découvertes et les planètes de notre Système solaire. Néanmoins, les astronomes sont maintenant convaincus que les planètes peuvent changer d'orbite de façon radicale.

Renu MALHOTRA travaille au Laboratoire Lunaire et planétaire de l'Université de l'Arizona.

Ivars PETERSON, *Le chaos dans le Système solaire*, Collection Sciences d'avenir, Pour la Science, 1995.

Geoffrey W. MARCY et R. Paul BUTLER, *Detection of Extrasolar Giant Planets*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 36, pp. 57-98, 1998.

Renu MALHOTRA et al., *Dynamics of the Kuiper Belt*, in *Protostars and Planets IV*, sous la direction de V. Mannings et al., University of Arizona Press (à paraître).
