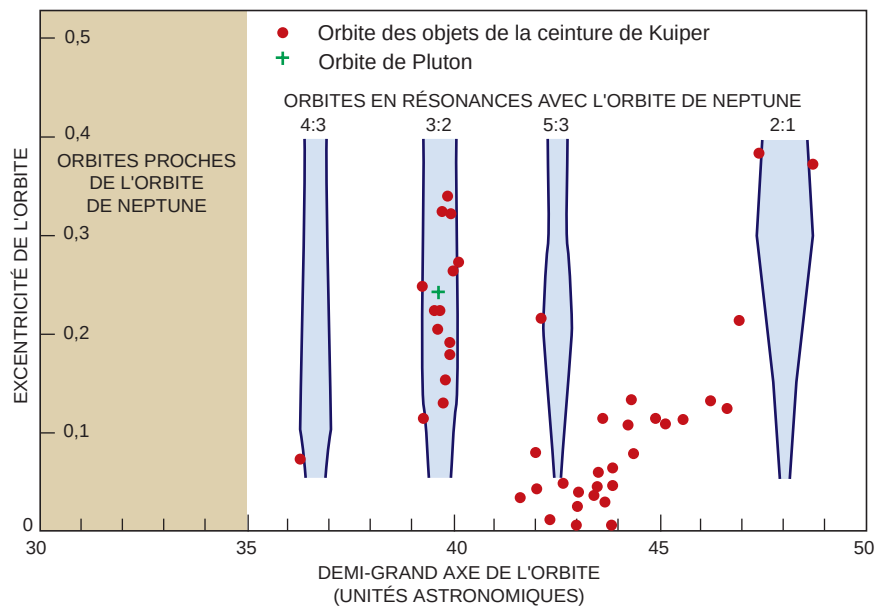
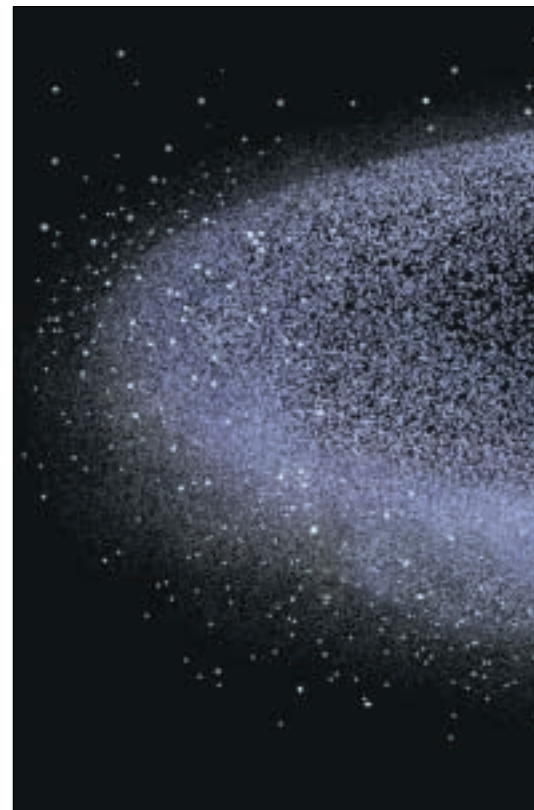




3. LA CEINTURE DE KUIPER est une région en forme de tore, au-delà de l'orbite de Neptune, peuplée de très nombreux petits corps célestes (à droite). La théorie de la migration planétaire prédit des concentrations supérieures de ces objets sur les orbites en résonance avec celle de Neptune, c'est-à-dire celles dont la période est dans un rapport rationnel simple avec la période de Neptune (régions bleutées sur le diagramme ci-dessus). Les dernières observations montrent qu'un tiers des objets de la ceinture de Kuiper dont on connaît les orbites (points rouges) sont sur des orbites résonantes 3:2, du type de celle de Pluton (croix verte). On prévoit de trouver peu d'objets sur des orbites proches de celle de Neptune (zone marron).



déplacée sur son orbite actuelle. Cette théorie abandonne l'hypothèse selon laquelle les géantes gazeuses se seraient formées à la distance du Soleil où elles se trouvent aujourd'hui. Elle introduit également le concept d'une période de migration planétaire, au tout début de l'histoire du Système solaire, dont l'orbite singulière de Pluton serait la trace.

Tout commence lorsque les planètes sont presque constituées par accréation de «planétésimaux» (de petits corps composés de roches et de glaces, dont le rayon ne dépasse pas quelques dizaines de kilomètres pour la plupart). Autour des planètes géantes gazeuses quasi formées (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) demeure une population de ces petits corps. Par la suite, l'évolution du Système solaire ralentit, se limitant à la diffusion de ces planétésimaux ou à leur accréation sur les planètes principales (voir la figure 1). Comme la diffusion gravitationnelle éjecte la majeure partie de ces planétésimaux vers des orbites distantes ou non liées, les planètes perdent de l'énergie orbitale et du moment cinétique. Toutefois, en raison de leurs masses et de leurs distances au Soleil différentes, les quatre planètes géantes sont inégalement perturbées.

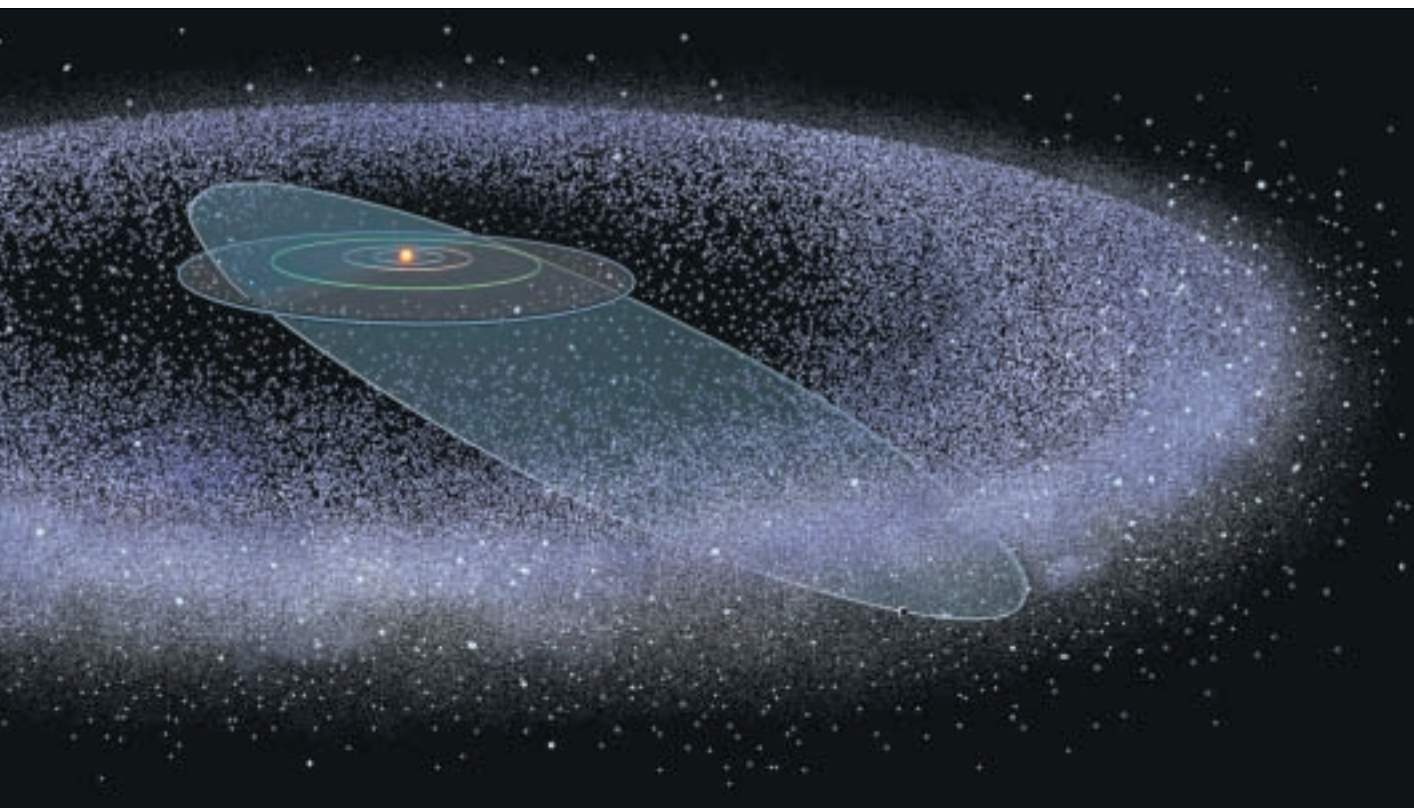
Considérons l'évolution orbitale de la planète géante la plus lointaine, Neptune, tandis qu'elle disperse la nuée de planétésimaux avoisinante. Initialement, l'énergie orbitale spécifique moyenne des planétésimaux (c'est-à-dire l'énergie orbitale par unité de masse) est égale à celle de Neptune, de sorte que les interactions gravitationnelles avec Neptune sont neutres : elles n'apportent pas d'énergie à Neptune et ne lui en prennent pas non plus. Après quelque millions d'années, le nuage de planétésimaux dans les parages de Neptune perd ses objets dont les énergies orbitales sont les plus faibles, car ils sont attirés par le champ gravitationnel des autres planètes géantes. La plupart de ces planétésimaux sont finalement éjectés hors du Système solaire par Jupiter, le poids lourd des planètes.

Ainsi, progressivement, l'énergie orbitale spécifique des planétésimaux rencontrés par Neptune devient supérieure à celle de Neptune. En raison des interactions gravitationnelles, l'énergie orbitale de Neptune augmente, et la planète s'éloigne du Soleil. Saturne et Uranus gagnent également de l'énergie orbitale et partent en spirale vers la périphérie, tandis que, en raison de la conservation de l'énergie totale du système, Jupiter perd de

l'énergie orbitale. Toutefois, Jupiter est si massif que son orbite change peu.

Dès 1984, à l'Institut Max Planck, Julio Fernandez et Wing-Huen Ip avaient déjà supposé de tels ajustements des orbites des planètes géantes. Faute d'observations et d'hypothèses directement testables, leurs travaux restèrent une curiosité.

En 1993, j'ai montré qu'à mesure que l'orbite de Neptune dérivait, elle entraînait les orbites qui sont en résonance avec son orbite. Pluton aurait été entraîné jusqu'à son orbite actuelle à partir d'une orbite initiale quasi circulaire, de faible inclinaison, extérieure à celle de Neptune. La probabilité que de tels objets soient captés et déportés vers l'extérieur avec les orbites résonantes pendant la migration de Neptune est très élevée (de la même façon, on augmente l'amplitude d'une balançoire au moyen de petites poussées, appliquées à la fréquence naturelle de la balançoire). L'excentricité finale mesurerait ainsi l'importance de la migration de Neptune. Selon cette théorie, l'excentricité orbitale de Pluton (0,25) indique que Neptune aurait migré vers l'extérieur d'au moins cinq unités astronomiques. À l'aide de simulations numériques, on estime aujourd'hui qu'une migration de huit unités astronomiques et une durée de



migration de quelques dizaines de millions d'années rendraient compte de l'inclinaison de l'orbite de Pluton.

Si Pluton était le seul objet situé au-delà de Neptune, cette explication resterait invérifiable, mais les calculs prédisent également la répartition orbitale des corps de la ceinture de Kuiper constituée des planétésimaux situés au-delà de Neptune, qui restent du disque primordial (voir *La ceinture de Kuiper*, de Jane Luu et David Jewitt, *Pour la Science*, juillet 1996). En supposant que les plus gros des corps de la ceinture de Kuiper étaient suffisamment petits pour que leur perturbation gravitationnelle sur les autres objets de la ceinture soient négligeables, le mécanisme dynamique de balayage résonant serait applicable non seulement à Pluton, mais également à tous les objets situés au-delà de Neptune, qui subiraient une déviation semblable de leur orbite d'origine. En conséquence, les objets sur des orbites excentriques devraient être plus nombreux aux deux plus fortes résonances de Neptune, la 3:2 et la 2:1. Les orbites correspondantes sont des ellipses de demi-grand axe respectivement égales à 39,5 et 47,8 unités astronomiques (le demi-grand axe est la distance moyenne entre l'objet et le Soleil.)

Aux autres résonances, telle la résonance 5:3, on trouverait également

des concentrations d'objets, mais moins denses. La région située entre Neptune et l'orbite 3:2 devrait être peu peuplée, en raison d'un important entraînement par résonance dans cette zone et parce que les perturbations engendrées par Neptune déstabiliseraient les orbites des éventuels objets restants. En revanche, les planétésimaux qui se sont formés à plus de 50 unités astronomiques du Soleil auraient été peu perturbés et auraient encore leur répartition initiale.

La découverte de nombreux objets dans la ceinture de Kuiper nous permet aujourd'hui de tester la théorie. Plus de 174 objets y ont déjà été découverts. La plupart d'entre eux ont des périodes de plus de 250 ans, et aucune orbite n'a été suivie sur plus de un pour cent de sa totalité. Néanmoins, on a déterminé avec une fiabilité raisonnable les paramètres orbitaux de 45 de ces objets (voir la figure 3). Ils ne sont pas répartis uniformément sur des orbites quasi circulaires et de faible inclinaison, comme cela serait le cas pour une population primordiale non perturbée de planétésimaux. Au contraire, on détecte des vides et des accumulations dans leur répartition. Une grande partie de ces objets de la ceinture de Kuiper se déplacent sur des orbites allongées de résonance 3:2, sem-

blables à celle de Pluton, et l'on ne compte presque aucun corps sur des orbites intérieures à l'orbite 3:2, ce qui est prédit par la théorie de l'entraînement par résonance.

Plusieurs questions demeurent néanmoins posées : le nombre d'objets en résonance 2:1 est-il du même ordre que celui des objets en résonance 3:2, conformément à la théorie de la migration planétaire ? Quelle est la répartition des orbites à plus grande distance du Soleil ? Le recensement de la population de la ceinture de Kuiper est encore trop incomplet pour que l'on réponde précisément à ces questions. En décembre 1998, une équipe du Centre pour les petites planètes, dans le Massachusetts, a annoncé l'identification du premier objet en résonance 2:1 avec Neptune. Deux jours plus tard, la même équipe révélait qu'un deuxième objet de Kuiper avait été découvert sur une orbite résonante 2:1. Ces objets sont tous deux sur des orbites très excentriques. Ils font peut-être partie d'une importante population d'objets situés sur des orbites de même type. On avait initialement cru que ces objets étaient respectivement sur des orbites 3:2 et 5:3, mais de nouvelles observations montrent que les identifications initiales étaient incorrectes. Cette révision souligne l'importance

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 ?

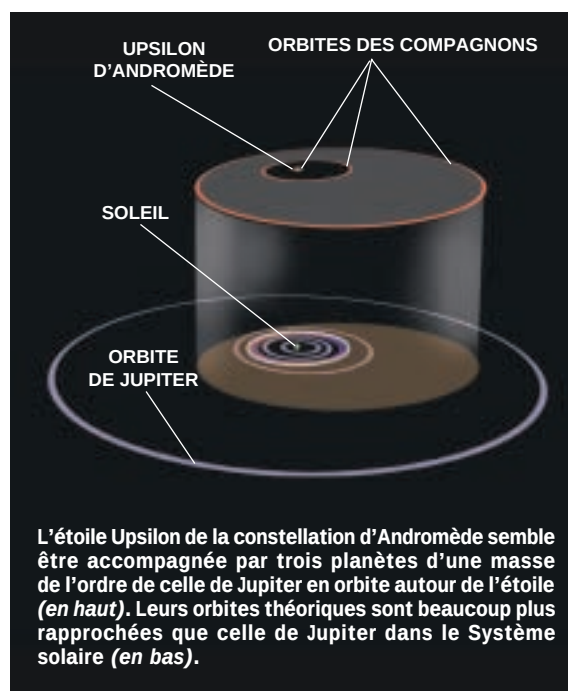
En avril 1999, Paul Butler et ses collègues de l'Observatoire anglo-australien ont annoncé la découverte de ce qui semble être le premier exemple de système planétaire comprenant plusieurs objets de masse équivalente à celle de Jupiter, en orbite autour d'une étoile de type solaire. Jusqu'alors, on ne 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.