

Différents phénomènes
gravitationnels ont conduit
les planètes à entreprendre
d'épiques
traversées
du disque
protoplanétaire

en masse, comparée à ses homologues exoplanétaires, avec des planètes rocheuses maigrichonnes au lieu de superterres et sans aucune planète plus proche du Soleil que Mercure ? Et pourquoi les orbites des planètes géantes du Soleil sont-elles si paisibles et éloignées ?

Les différents indices révélés par l'étude des exoplanètes nous ont fait comprendre que l'orbite des planètes pouvait changer drastiquement au cours du temps. Ainsi, une planète en formation pourrait dériver loin de son point d'origine, un peu comme un radeau de survie sur l'océan.

Les astronomes ont d'abord cherché quel serait le mécanisme de migration. Dès qu'une planète est devenue assez grosse, son influence gravitationnelle s'étend au disque environnant, et engendre des ondes de densité spirales. Celles-ci exercent, à leur tour, des forces gravitationnelles. Cette dynamique crée d'importantes rétroactions entre les planètes et le disque : en interagissant avec ces ondes, les jeunes grosses planètes sont freinées sur leur orbite, ce qui les conduit à se rapprocher de leur étoile.

Quand ce processus de migration planétaire est intégré au modèle, la ligne de glace au sein des disques ne joue plus un rôle prépondérant dans le façonnage et l'architecture des systèmes planétaires. Par exemple, des planètes géantes nées au-delà de la ligne de glace peuvent devenir des jupiters chauds en dérivant vers l'intérieur. Le problème est que ce processus fonctionne presque trop bien : il semble avoir eu lieu dans de très nombreux disques protoplanétaires. Comment, dans ces conditions, expliquer les orbites décrites par Jupiter et Saturne, si éloignées du Soleil ?

En 2001, à l'université Queen Mary de Londres, Frédéric Masset et Mark Snellgrove ont donné la première ébauche d'une explication convaincante. Les deux chercheurs ont modélisé l'évolution simultanée des orbites de Saturne et de Jupiter dans le disque protoplanétaire du Soleil. En raison de la masse inférieure de Saturne, le rythme de migration de cette planète vers l'intérieur est plus rapide que celui de Jupiter, et à

mesure que leur migration progresse, les deux planètes se rapprochent. Finalement, les orbites atteignent une configuration particulière, nommée résonance orbitale, dans laquelle Jupiter effectue trois révolutions autour du Soleil quand Saturne en fait deux dans le même temps.

Deux planètes liées par une résonance orbitale échangent de l'énergie mécanique, ce qui stabilise leurs orbites. L'influence gravitationnelle commune des deux planètes est amplifiée et s'exerce essentiellement l'une sur l'autre et sur leur environnement. Dans le cas de Jupiter et de Saturne, l'influence des deux corps a creusé une grande lacune – c'est-à-dire une région vide de matière – dans le disque protoplanétaire, Jupiter étant sur le bord interne de la lacune et Saturne sur son bord externe. La formation de la lacune conduit à un déséquilibre des rétroactions du disque sur ces deux planètes. Et comme Jupiter exerce une attraction gravitationnelle plus importante sur le disque interne que ne le fait Saturne sur le disque externe, les planétologues ont montré que les deux planètes ont rebroussé chemin et ont commencé à s'éloigner du Soleil. Ce mouvement vers l'intérieur puis vers l'extérieur est souvent nommé le grand tack (ou grand virement de bord), par analogie avec la trajectoire d'un voilier qui tire des bords pour remonter au vent.

Jupiter, le régime minceur de Mars

En 2011, une décennie après l'introduction du concept de grand tack, Kevin Walsh, alors à l'observatoire de la Côte-d'Azur, à Nice, et ses collègues ont montré grâce à des simulations numériques que ce modèle explique non seulement l'histoire dynamique de Jupiter et de Saturne, mais aussi la composition de la ceinture principale d'astéroïdes (qui contient des planétésimaux rocheux et glacés) ainsi que la faible masse de Mars.

Comment ? Quand Jupiter a migré vers l'intérieur, la planète s'est comportée comme un chasse-neige. Par son influence gravitationnelle, elle a capturé et poussé des planétésimaux devant elle sur sa trajectoire. On suppose que dans sa migration, Jupiter s'est approchée du Soleil jusqu'à l'orbite actuelle de Mars (1,5 fois la distance Soleil-Terre actuelle) avant de faire demi-tour. Elle aurait alors pu repousser l'équivalent de plusieurs masses terrestres de matériau

La « planète Neuf » dont l'existence a été récemment avancée est-elle en accord avec les dernières théories de l'origine du Système solaire ? Seule son observation et la détermination de ses propriétés permettront de le dire.

L'idée selon laquelle le Système solaire aurait subi de violents remaniements dans un passé lointain pourrait expliquer beaucoup de choses : l'existence des corps glacés de la ceinture de Kuiper et du nuage d'Oort qui nous entourent, le bombardement ancien des planètes internes par des astéroïdes il y a des milliards d'années et l'absence de superterres que les autres systèmes possèdent en abondance. Mais, désormais, les planétologues doivent compter avec un nouvel élément : une planète putative, environ dix fois plus massive que la Terre, en orbite dans les régions sombres au-delà de Pluton. Si cette planète existe, son influence gravitationnelle expliquerait pourquoi une poignée d'objets de la ceinture de Kuiper parmi les plus lointains décrivent des trajectoires étonnamment resserrées et similaires.

Mais cela pourrait aussi être un indice supplémentaire pour expliquer les changements dramatiques subis par le Système solaire dans sa jeunesse. Avec une distance minimale au Soleil de 30,5 milliards de kilomètres (cinq fois plus loin que la distance moyenne de Pluton), il est peu probable que cette planète massive ait pu se former là où elle se trouve actuellement : il n'y aurait tout simplement pas eu assez de matière pour la constituer. « Si elle existe », dit Harold Levison, théoricien de la formation planétaire au SwRI (Southwest Research Institute), « elle s'est très probablement formée dans une région comprise entre 5 et 20 fois la distance Terre-Soleil et a été expulsée par [des

interactions gravitationnelles avec] Jupiter ou Saturne. »

En effet, Jupiter, en particulier, est si massive, selon Scott Tremaine, de l'Institut d'études avancées de Princeton, qu'« elle ne se soucie pas de savoir si elle éjecte une comète ou une planète de dix masses terrestres ».

Mais une fois éjectée, une planète aurait tendance à poursuivre sa route et à finalement s'échapper dans l'espace interstellaire. La probabilité qu'elle se mette en orbite autour du Soleil est très faible. Statistiquement, explique Harold Levison, il faudrait en avoir 50 ou 100 au départ pour en avoir une à l'arrivée, ce qu'il considère comme improbable.

Si les astronomes parviennent effectivement à détecter la neuvième planète avec leurs télescopes, la question de la probabilité cessera évidemment de se poser. En revanche, les théoriciens devront alors déterminer comment quelque chose d'aussi peu probable a pu se produire. « J'ai dans l'idée », dit Scott Tremaine, « que le processus de dispersion est plus efficace que le modèle standard ne donne à penser. » Autrement dit, un pourcentage plus élevé qu'attendu d'objets expédiés vers l'extérieur parviendrait à rester dans le Système solaire.

D'après Ben Bromley, de l'université de l'Utah, cela pourrait s'expliquer si la dispersion d'une superterre s'est produite très tôt dans l'histoire du Système solaire, avant la dissipation du gaz du disque proto-planétaire qui a formé les planètes. Si la dispersion d'une

superterre s'est produite durant cette période, note Ben Bromley, « la planète aurait interagi avec le gaz et se serait installée à l'écart de tout ».

Ou peut-être, avance Nathan Kaib, théoricien à l'université de l'Oklahoma, la planète, si elle existe, ne provient-elle pas de notre Système solaire. Le Soleil s'est formé non pas dans l'isolement total, mais dans un amas contenant probablement des milliers d'étoiles, chacune (vraisemblablement) avec son propre système planétaire. Certains de ces systèmes auraient subi leurs propres remaniements violents, éjectant des objets de la même façon que le Soleil l'a sans doute fait.

Ces objets, explique Nathan Kaib, peuvent être capturés par notre propre Soleil.

La meilleure explication dépendra des caractéristiques de l'orbite de la neuvième planète ; ses partisans n'ont calculé qu'une plage de possibilités. Si la planète existe, les scientifiques devraient être capables de calculer comment elle est arrivée à sa place actuelle.

La neuvième planète est-elle en accord avec ce que nous savons actuellement des débuts du Système solaire ? La réponse de Scott Tremaine entretient le suspens : « Peut-être. »

– Michael Lemonick
Scientific American



© Ron Miller

de construction planétaire glacé vers la région occupée aujourd'hui par la Terre, l'enseménçant en eau et autres éléments volatils. Ce processus aurait alors privé l'embryon planétaire voisin, la future Mars, de matériau pour poursuivre sa croissance.

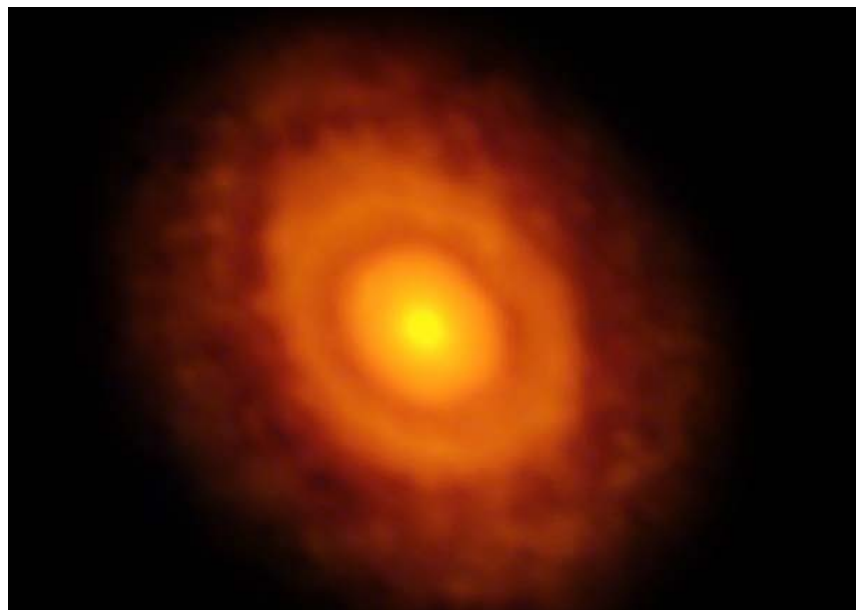
Par ailleurs, des planétésimaux se sont accumulés dans la ceinture principale d'astéroïdes du fait de résonances gravitationnelles avec Jupiter. D'après le modèle, les corps rocheux étaient déjà présents dans cette région tandis que les astéroïdes riches en glace se sont formés au-delà de l'orbite actuelle de Jupiter et se sont implantés dans la ceinture lors de la migration de la planète gazeuse vers l'extérieur.

Le scénario du grand tack semble convaincant. Pourtant, nous ne parvenons pas à faire le lien avec l'autre grand mystère restant du Système solaire, à savoir l'absence totale de planètes en deçà de l'orbite de Mercure. Au regard des autres systèmes, qui ont des superterres sur des orbites serrées, le nôtre donnerait presque l'impression d'avoir été évié. Pourquoi ? Il semble étrange que le Système solaire n'ait pas connu le mode de formation planétaire le plus couramment observé ailleurs dans le cosmos.

En 2015, deux d'entre nous (Konstantin Batygin et Gregory Laughlin) ont étudié quelles seraient les conséquences du grand tack sur un hypothétique cortège de superterres en orbite tout près du Soleil. Notre conclusion est qu'elles n'auraient pas survécu.

En effet, avec son effet chasse-neige alors qu'elle dérivait vers la partie interne du Système solaire, Jupiter aurait perturbé les orbites circulaires et ordonnées des planétésimaux rencontrés en chemin. Elle les aurait expédiés, telle une nuée désordonnée, sur des trajectoires entrecroisées. Certains des planétésimaux seraient entrés violemment en collision et auraient ainsi produit de nombreux débris, entraînant une cascade de nouvelles collisions et fragmentations. La migration de Jupiter vers l'intérieur a vraisemblablement érodé la population de planétésimaux, les réduisant essentiellement à l'état de rochers, cailloux et sable.

Sous l'effet du broyage collisionnel et des frottements avec le gaz du disque protoplanétaire interne, les planétésimaux qui s'érodaient et se fragmentaient ont freiné et se sont donc rapprochés en spirale du Soleil. En tombant, ils auraient été facilement capturés dans des résonances gravitationnelles, s'accumulant dangereusement près



© ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/L. Cieza

LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE de l'étoile V883 Orionis, observé par le radiotélescope ALMA, met en évidence, pour la première fois, la ligne de glace (l'anneau sombre le plus proche du centre) qui sépare la région interne, pauvre en eau, de celle à l'extérieur, où les conditions de température et de pression permettent la formation de glace d'eau.

des trajectoires d'éventuelles superterres primordiales en orbite proche du Soleil.

Cela aurait été une mauvaise nouvelle pour ces planètes, qui auraient été brutalement assaillies par des essaims parasites de débris et auraient perdu progressivement de l'énergie. L'effet net est que les planètes auraient ralenti et changé d'orbite pour amorcer des spirales de chute dans le Soleil. Nos simulations suggèrent qu'aucune de ces planètes hypothétiques n'aurait survécu plus de quelques centaines de milliers d'années après le début de la cascade de collisions.

Une « grande attaque » de Jupiter

Ainsi, il est possible que le grand tack de Jupiter et Saturne ait lancé une véritable « grande attaque » sur une population de planètes primordiales proches du Soleil. Et en disparaissant dans l'étoile, ces anciennes superterres auraient laissé derrière elles une région vide dans la nébuleuse solaire, dans la zone qui s'étend à peu près jusqu'à l'orbite actuelle de Mercure. Par conséquent, l'incursion de Jupiter dans le Système solaire primordial aurait produit un anneau relativement étroit de débris rocheux, à partir duquel les quatre planètes telluriques se sont formées quelques centaines de millions d'années plus tard. L'enchaînement des événements aléatoires nécessaire pour produire une chorégraphie aussi subtile suggère que les petites planètes rocheuses de type tellurique (et peut-être la vie elle-même) seraient assez rares dans le cosmos.

■ BIBLIOGRAPHIE

K. Batygin et M. Brown, *Evidence for a distant giant planet in the solar system*, *Astronomical Journal*, vol. 151, n° 2, 2016.

M. Lemonick, *La longue traque de la planète X*, *Pour la Science*, n° 461, mars 2016.

K. Batygin et G. Laughlin, *Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution*, *PNAS*, vol. 112 [14], pp. 4214-4217, 2015.

A. Morbidelli, *Dynamical evolution of planetary systems*, dans T. D. Oswalt *et al.* (éd.), *Planets, Stars and Stellar Systems*, vol. 3, pp. 63-109, Springer, 2013.

K. J. Walsh *et al.*, *A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration*, *Nature*, vol. 475, pp. 206-209, 2011.