

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

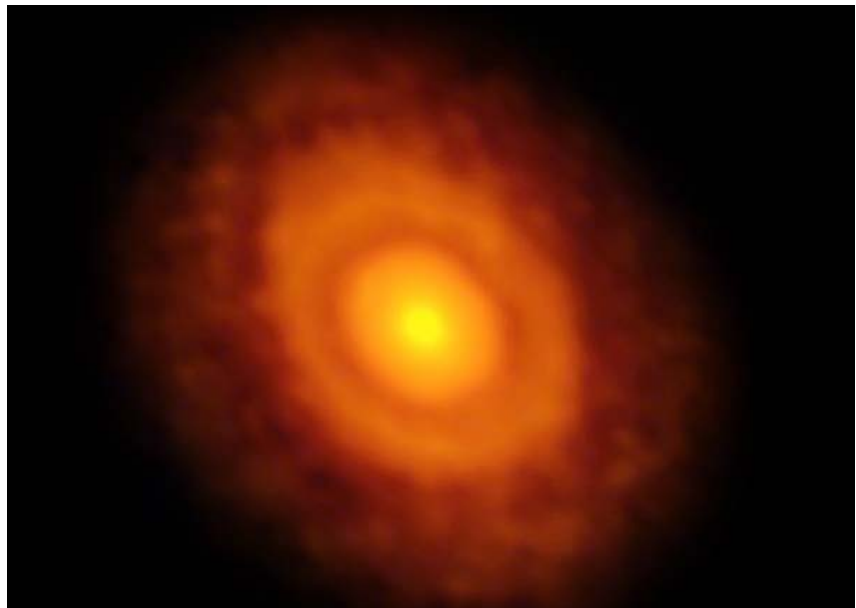
Par ailleurs, des planétésimaux se sont accumulés dans la ceinture principale d'astéroïdes du fait de résonances gravitationnelles avec Jupiter. D'après le modèle, les corps rocheux étaient déjà présents dans cette région tandis que les astéroïdes riches en glace se sont formés au-delà de l'orbite actuelle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

Quand Jupiter et Saturne ont fini par se frayer le chemin du retour après leur incursion dans le système interne, le disque environnant de gaz et de poussière était sur le déclin. La paire résonante Jupiter-Saturne a fini par rencontrer Uranus et Neptune récemment formées, ainsi peut-être qu'un autre corps de taille similaire. Les interactions avec le gaz aidant, le duo dynamique a enfermé ces géantes plus modestes dans des résonances orbitales.

Ainsi, juste au moment où l'essentiel du gaz du disque disparaissait, la région interne du Système solaire ne comportait probablement qu'un anneau de débris rocheux au voisinage de l'orbite actuelle de la Terre.

Dans la région externe, un groupe compact et résonant d'au moins quatre planètes géantes occupait des orbites presque circulaires, la plus proche se situant à peu près au niveau de l'orbite actuelle de Jupiter et la plus lointaine environ à mi-chemin de l'actuelle orbite de Neptune. Au-delà de l'orbite la plus externe, les planétésimaux glacés du disque externe s'étendaient jusqu'aux confins du Système solaire.

Puis, en plusieurs centaines de millions d'années, les planètes telluriques se sont formées, et les planètes externes jadis agitées se sont assagies, trouvant une stabilité que l'on aurait pu croire définitive. Mais le hasard en a voulu autrement : ce n'était pas encore la phase finale de l'évolution du Système solaire.

Le grand tack et la grande attaque contemporaine ont préparé le terrain à un dernier sursaut de violence interplanétaire dans l'histoire ancienne du Système solaire, une touche finale qui place le cortège planétaire dans une configuration très proche de celle d'aujourd'hui, des milliards d'années plus tard. Ce dernier sursaut est connu sous le nom de grand bombardement tardif. Durant cette période (il y a entre 4,1 et 3,8 milliards d'années), le Système solaire s'est momentanément transformé en stand de tir, théâtre d'un mitraillage permanent par des planétésimaux. Nous en voyons encore aujourd'hui les cicatrices avec les énormes cratères qui criblent la surface de la Lune.

En collaboration avec plusieurs collègues de l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice, en 2005, l'un d'entre nous (Alessandro Morbidelli) a conçu le modèle dit de Nice pour expliquer comment les interactions des planètes géantes ont pu produire le grand bombardement tardif. Là où le grand tack prend fin, le modèle de Nice prend la relève.

À la fin du grand tack, les planètes géantes étaient en résonance les unes avec les autres sur des orbites proches et ressentaient aussi les tiraillements gravitationnels des planétésimaux glacés au-delà de leurs orbites. Malgré les résonances, elles étaient en fait en équilibre précaire, au bord de l'instabilité. En cumulant leurs effets sur des millions d'orbites et des centaines de millions d'années, les tiraillements insignifiants des planétésimaux externes ont peu à peu décalé le mouvement des géantes, grignotant lentement le délicat équilibre des résonances qui les liaient. Le point de

Le grand tack de Jupiter et Saturne aurait déclenché la grande attaque, à laquelle d'éventuelles superterres n'auraient pas survécu

basculer correspond au moment où l'une des géantes est sortie de la configuration de résonance avec une autre, détricotant l'équilibre et déclenchant une série chaotique de perturbations qui a légèrement poussé Jupiter vers l'intérieur tout en éparpillant les autres plus à l'extérieur.

Dans un bref intervalle cosmique de quelques millions d'années, le Système solaire externe a ainsi subi une inconfortable transition, passant d'un état ramassé et quasi circulaire à une vaste configuration désordonnée, caractérisée par des planètes qui suivent d'immenses orbites de forte excentricité. Les interactions des planètes géantes étaient si violentes qu'une ou plusieurs d'entre elles ont pu être dispersées, éjectées vers l'espace interstellaire.

Si l'évolution dynamique s'était arrêtée là, l'architecture du Système solaire externe aurait bien reproduit les tendances observées avec les exoplanètes géantes, dont beaucoup décrivent des orbites excentriques autour de leur étoile. Mais le disque de planétésimaux glacés qui était à l'origine du désordre a aussi contribué à le supprimer par ses interactions ultérieures avec les orbites excentriques des planètes géantes. Un à un, la plupart des planétésimaux en orbite proche ont été éjectés par Jupiter et les autres planètes géantes, ce qui a progressivement ponctionné de l'énergie orbitale des planètes et rendu à nouveau circulaires leurs orbites. Une partie des planétésimaux

ont donné lieu au grand bombardement tardif, d'autres ont été éjectés au-delà de la portée gravitationnelle du Soleil et une petite fraction d'entre eux se sont maintenus sur des orbites liées, formant l'anneau de débris glacés situé aujourd'hui au-delà de l'orbite de Neptune, la ceinture de Kuiper.

Des travaux d'observation patients nous révèlent petit à petit la structure complète de la ceinture de Kuiper, et des caractéristiques inattendues se dévoilent peu à peu. En particulier, les astronomes ont repéré un motif particulier parmi les objets les plus lointains de la ceinture de Kuiper. Malgré des distances au Soleil variées, les orbites de ces objets sont regroupées dans une certaine région, comme s'ils étaient tous soumis à une même perturbation de grande ampleur.

Des simulations numériques effectuées par Konstantin Batygin et Michael Brown, de l'Institut de technologie de Californie, ont montré que cette situation se produit naturellement s'il existe une neuvième planète, une dizaine de fois plus massive que la Terre et évoluant sur une orbite très excentrique autour du Soleil, avec une période d'environ 20000 ans. Une telle planète a peu de chances de s'être formée si loin, mais on peut en rendre compte si l'on suppose qu'il s'agit d'une exilée, éjectée d'une orbite plus rapprochée dans l'enfance du Système solaire (voir l'encadré pages 25-27).

À la recherche de la neuvième planète

Si l'existence de cette planète autour du Soleil était confirmée, cela resserrerait fortement les contraintes de notre vision du Système solaire. En ce moment même, les astronomes se préparent à mettre à contribution certains des plus grands télescopes afin de rechercher activement cette hypothétique planète.

L'histoire du Système solaire qui s'esquisse ainsi, avec les restructurations parfois brutales du grand tack, de la grande attaque et du modèle de Nice, et l'existence soupçonnée d'une planète supplémentaire, promet de devenir l'une des plus belles réussites de la science moderne, et sans contester l'une des plus belles histoires qui puissent jamais être contées. ■