La ceinture de Kuiper

JANE LUU • DAVID JEWITT

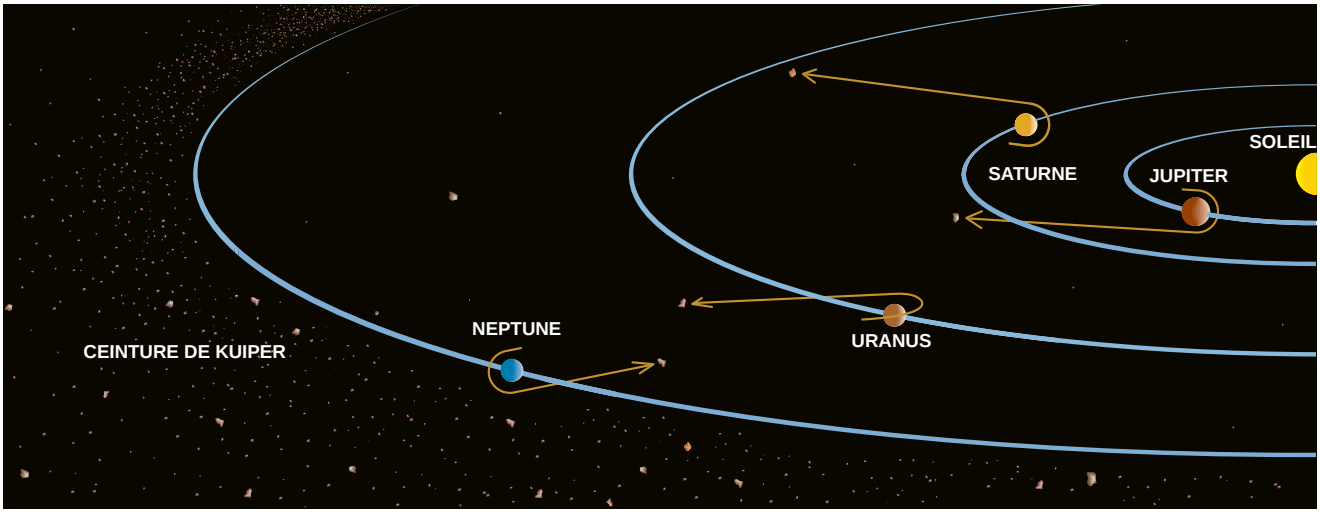
Au-delà des orbites de Pluton et de Neptune, un anneau de petits objets ceinture le Système solaire.

Après la découverte de Pluton, en 1930, les astronomes ont cherché une éventuelle dixième planète autour du Soleil. Ils pensaient que cette mystérieuse «Planète X» était trop lointaine pour être observée à l'aide de télescopes, mais les perfectionnements de l'optique astronomique, dans les décennies qui suivirent, n'ont pas permis de trouver ce corps. À la fin des années 1980, la plupart des astronomes acceptaient l'idée d'un Système solaire composé seulement des neuf planètes familières.

Cette conception changea en 1992, lorsque nous identifiâmes un corps céleste de quelques centaines de kilomètres de diamètre, plus éloigné du Soleil que toutes les planètes connues. Depuis, on a recensé une trentaine de corps analogues, en orbite au-delà de Pluton et de Neptune (comme leurs orbites se croisent, elles se disputent la palme de planète la plus éloignée du Soleil) dans le Système solaire externe. Ces objets, dont nous n'avons vraisemblablement découvert qu'une petite partie, constituent la ceinture de Kuiper, ainsi nommée en hommage à l'astronome Gerard Kuiper qui, dès 1951, en avait supposé l'existence.

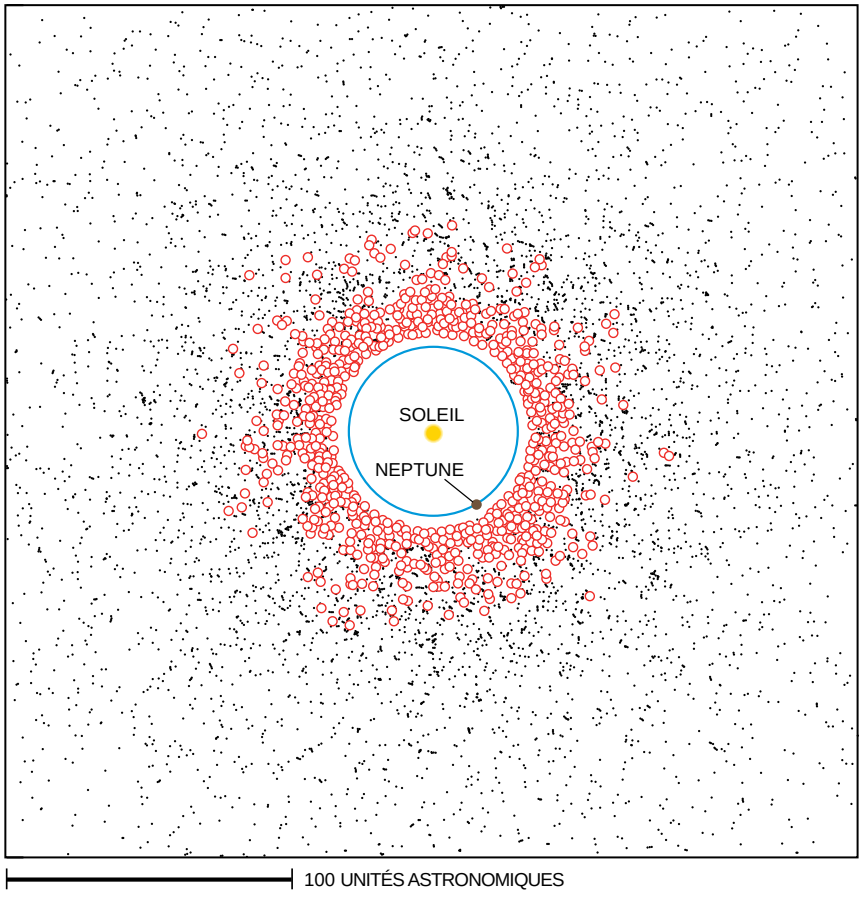
Kuiper forgea sa conviction en observant le comportement de comètes. Ces noyaux de glace et de poussière, de quelques kilomètres de diamètre, quittent régulièrement le Système solaire externe et s'approchent du Soleil. Des poussières et du gaz, arrachés à leur surface par le rayonnement solaire, forment alors des halos lumineux et des traînées lumineuses allongées.

1. LES CONFINS DU SYSTÈME SOLAIRE contiennent de la matière dans un état voisin de celui qui prévalait lorsque les planètes se sont formées. En ces temps reculés, Pluton *(avant-plan)* aurait capturé son satellite, Charon *(à droite)* et expulsé un troisième corps *(en haut, à gauche)* dans l'espace. La région aurait alors été remplie de poussières et encombrée d'objets accrétés dans de la ceinture de Kuiper en formation.



2. LA GRAVITÉ DES PLANÈTES a balayé les petits objets à l'intérieur de l'orbite de Neptune lors des premières phases du Système solaire. Certains de ces objets ont plongé vers le Soleil ; d'autres ont filé vers le lointain nuage de Oort *(non représenté)*.

Depuis longtemps, les astronomes ont compris que ces comètes actives sont de jeunes membres du Système solaire interne. La comète de Halley, qui revient tous les 76 ans, perd un dix-millième de sa masse à chaque passage près du Soleil. Elle survivra pendant 10 000 orbites environ, soit un peu plus d'un demi-million d'années. Aujourd'hui, les comètes, formées en même temps que le Système solaire, voici 4,5 milliards d'années, devraient donc avoir perdu tous leurs éléments volatils, ne laissant que des noyaux rocheux inactifs ou des nuages diffus de poussières. Pourquoi tant de comètes nous offrent-elles alors ces spectacles enchanteurs?



3. D'INNOMBRABLES OBJETS appartenant à la ceinture de Kuiper sont en orbite autour du Soleil, à grande distance de lui, mais ces objets ne sont pas tous visibles de la Terre. Les objets qui peuvent être détectés *(cercles rouges)* à l'aide du télescope de 2,2 mètres de diamètre sur le Mauna Kea, à Hawaii, se concentrent près du bord interne de l'anneau, comme le montre cette simulation numérique de la répartition de la matière lointaine.

Fil d'Ariane

Les comètes qui sont aujourd'hui actives naquirent quand le Système solaire était encore dans l'enfance. Depuis, elles sont restées «au frais» dans un «réfrigérateur céleste» nommé nuage de Oort, dans le Système solaire externe. L'astronome hollandais Jan Oort proposa en 1950 l'existence de cette sphère de matière cométaire contenant des centaines de milliards de comètes ; il pensait que son diamètre atteignait 100 000 unités astronomiques (l'unité astronomique, ou UA, est définie comme la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, soit 150 millions de kilomètres environ). Selon Oort, les perturbations gravitationnelles des étoiles qui passent à proximité du Système solaire dévient parfois certaines comètes du nuage de leurs orbites stables vers des orbites qui s'approchent du Soleil : ces comètes inactives depuis des milliards d'années s'évaporeront en quelques millions d'années dans le Système solaire interne.

Cette théorie explique la taille et l'orientation des orbites des comètes à longue période (celles qui tournent autour du Soleil en plus de 200 ans). Conformément à ce que l'on attend de comètes émanant d'un réservoir sphérique comme le nuage de Oort, les

astronomes observent que ces comètes pénètrent dans le Système solaire interne en provenance de toutes les directions. En revanche, la théorie de Oort n'explique pas l'origine des comètes à courte période qui parcourent des orbites plus petites, faiblement inclinées par rapport au plan de l'orbite terrestre (le plan de l'écliptique).

La plupart des astronomes pensaient que les comètes à courte période étaient initialement des comètes à longue période dont les orbites auraient été raccourcies et aplaties par les perturbations gravitationnelles des planètes – principalement Jupiter. Cependant, tous les scientifiques ne souscrivaient pas à cette idée. Dès 1949, l'autodidacte irlandais Kenneth Essex Edgeworth écrivit un article où il proposait l'existence d'une ceinture aplatie de comètes dans le Système solaire externe. Kuiper, dans son article de 1951, envisagea aussi cette ceinture de comètes, sans mentionner le travail antérieur d'Edgeworth.

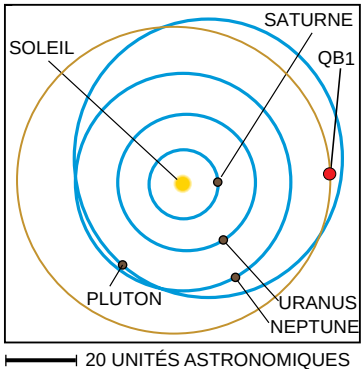
Pour Kuiper, le disque du Système solaire ne s'arrêtait pas brusquement à l'orbite de Neptune ou de Pluton. Il imaginait au contraire une ceinture au-delà de ces planètes, constituée de matière résiduelle de la formation des planètes. La densité de matière devait y être si faible que de grosses planètes n'auraient pu s'y agglomérer, mais des objets plus petits, de la taille d'astéroïdes, pouvaient exister. Éloignés du Soleil, ces vestiges de matière primordiale conserveraient des températures superficielles basses ; ils pourraient donc se composer de glace et de gaz gelés, comme les noyaux des comètes.

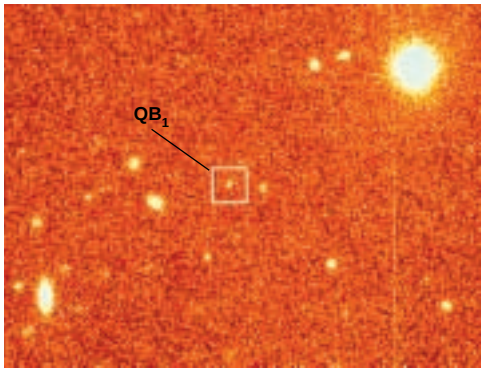
La théorie de Kuiper resta méconnue jusqu'à ce que Paul Joss, de l'Institut de technologie du Massachusetts, calcule, dans les années 1970, que la faible probabilité de capture gravitationnelle par Jupiter n'était pas compatible avec le grand nombre de comètes à courte période observées. Comme personne ne put confirmer ses calculs, le nuage de Oort demeura la source admise de toutes les comètes, qu'elles soient à période longue ou courte, mais le doute était semé. En 1988, les Canadiens Martin Duncan, Thomas Quinn et Scott Tremaine utilisèrent des simulations numériques pour étudier comment les planètes gazeuses géantes captaient des comètes. Tout comme P. Joss, ils conclurent que le mécanisme de capture était peu efficace. Leurs travaux montrèrent également que les rares comètes qui pouvaient être extraites du nuage de Oort par l'attraction gravitationnelle des planètes avaient des orbites très inclinées par rapport au plan de l'écliptique.

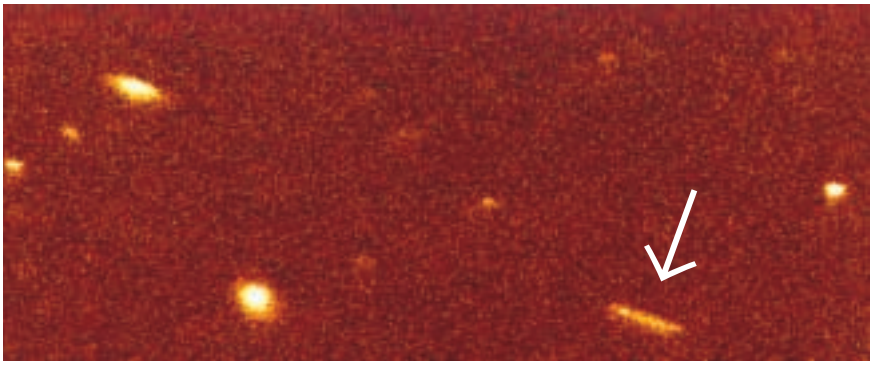
Pour ces astrophysiciens, les comètes à courte période ne provenaient pas du nuage de Oort, mais de la capture, par les planètes, d'objets présents dans un anneau situé dans le Système solaire externe ; les orbites de ces comètes à courte période étaient originellement peu inclinées par rapport à l'écliptique. Toutefois, pour que les calculs soient plus rapides, ils avaient multiplié les masses des planètes par 40. Cet artifice de calcul, qui accroissait l'attraction gravitationnelle des planètes, fut critiqué par les astrophysiciens, qui doutèrent des résultats.

La récompense de l'observation

Dès 1987, nous avons commencé une campagne d'observations pour savoir si le Système solaire était réellement vide au-delà de l'orbite de Pluton ou s'il était peuplé de petits corps froids. Pour recueillir la faible lumière réfléchie par des astres aussi lointains, nous avons abandonné les classiques plaques photographiques et avons utilisé des détecteurs électroniques à transfert de charge (CCD), plus sensibles, installés sur un grand télescope.







4. DES IMAGES successives, prises en 1992 *(au milieu et en bas)*, dévoilent, sur le fond des étoiles fixes, l'objet QB_1 qui appartient à la ceinture de Kuiper. Cette paire d'images ne couvre qu'une petite portion du champ complet *(en haut, à droite)* que les auteurs ont dû analyser avant d'identifier QB_1 *(flèches)* et de déterminer son orbite *(en haut, à gauche)*.

Nous avons effectué la majeure partie de notre étude au télescope de 2,2 mètres de diamètre d'Hawaii, au sommet du Mauna Kea. À l'aide d'un détecteur CCD couplé à ce télescope, nous avons pris des séries de quatre images d'une région du ciel. Chaque image était exposée pendant 15 minutes, et un ordinateur affichait la séquence des quatre images en une succession rapide. Les objets qui se déplacent légèrement d'une image sur l'autre par rapport aux étoiles en arrière-plan sont des membres du Système solaire.

Durant cinq ans, nous n'avons rien trouvé, mais nous avons eu tant d'occasions de perfectionner nos équipements et notre technique de clignotement que nous avons conservé notre enthousiasme initial (à défaut du financement). Mais, le 30 août 1992, alors que nous prenions la troisième image d'une séquence de quatre et que nous faisions défiler les deux premières images sur l'ordinateur, nous remarquâmes un léger déplacement de la position d'une «étoile» faible entre les deux premières images ! Le mouvement, quoique léger, semblait réel, et la comparaison des deux premières images avec la troisième nous confirma que nous avions trouvé quelque chose de peu ordinaire. Le mouvement lent à travers le ciel indiquait que l'objet découvert pouvait être au-delà de l'orbite de Pluton. Des mesures ultérieures confirmèrent que l'objet n'était pas un astéroïde qui se déplaçait parallèlement à la ligne de visée ; il s'agissait d'un corps situé au-delà de l'orbite de Pluton.

Les deux nuits suivantes, nous avons à nouveau observé cet objet étrange et obtenu des mesures précises de ses positions, de sa luminosité et de sa couleur. Ces données furent transmises à l'Union astronomique internationale, qui calcula que l'objet que nous avions découvert, nommé 1992 QB_1, tournait autour du Soleil à la distance considérable de 40 unités astronomiques. C'était à peine moins loin que ce que nous avions supposé.

QB_1 réfléchit une lumière plus rouge que la lumière qu'il reçoit du Soleil. Un seul autre objet du Système solaire possède une couleur semblable : c'est l'astéroïde 5145 Pholus, dont la couleur rouge provient probablement de matière sombre, riche en carbone. Nous avons été très intéressés, au cours des jours qui suivirent notre découverte, d'observer la similitude de 5145 Pholus et de QB_1. Ce dernier était-il seulement enveloppé d'une matière rouge, riche en composés organiques ? Quelle était sa taille ? Nos premières mesures indiquaient un diamètre de 200 à 250 kilomètres, soit environ 15 fois la dimension du noyau de la comète de Halley.

Même après la découverte de QB_1, quelques astronomes continuèrent à douter de l'existence d'objets dans le Système solaire externe, mais, en mars 1993, nous découvrîmes un deuxième objet, aussi éloigné du Soleil que QB_1. Ce nouveau corps se trouve à l'extrémité opposée du Système solaire. Au cours des trois dernières années, d'autres groupes d'astronomes ont participé à la quête et, à ce jour, la famille des objets transneptuniens de la ceinture de Kuiper compte 32 membres.

Les membres connus de la ceinture de Kuiper ont plusieurs caractéristiques communes. Par exemple, tous se situent au-delà de l'orbite de Neptune : le bord interne de la ceinture serait défini par cette planète. Tous ces nouveaux corps

La dynamique des petits corps

Aujourd'hui, en France, deux groupes de recherche sont particulièrement actifs dans l'étude de la ceinture de Kuiper : l'un au Bureau des longitudes à Paris et l'autre à l'Observatoire de la Côte-d'Azur.

Au Bureau des longitudes, François Colas, Pierre Drossart, Laurent Jorda et Jean Lecacheux envisagent plusieurs méthodes de détection de nouveaux objets. La première consiste à utiliser le télescope de 55 centimètres du pic du Midi, équipé de capteurs CCD. Ce télescope aura ainsi un champ de un degré carré et une magnitude limite de 23 (à titre de comparaison, les étoiles les plus faibles visibles à l'œil nu ont une magnitude de 5 ou 6). Bien que la magnitude limite soit modeste (le téléscope spatial à une magnitude limite de 29 : il peut détecter des objets un million de fois plus faible), le champ de recherche couvert sera très grand et le temps d'observation alloué important. On peut donc espérer découvrir des classes d'objets intermédiaires entre Pluton et les corps de la ceinture de Kuiper actuellement connus. Cette équipe explore l'ensemble de la voûte céleste, sans se restreindre à l'écliptique, comme le font les autres observateurs. Le deuxième projet de recherche envisage d'utiliser l'équipement de la mission EROS 2 (à l'Observatoire européen austral du Chili) conçue pour la recherche des lentilles gravitationnelles en direction du centre galactique, pendant les deux à quatre semaines par an où le centre galactique n'est pas observable. Un troisième projet utilisera le téléscope de 3,60 mètres de diamètre d'Hawaï, ce qui permettrait d'atteindre, pour un champ de un degré carré, une magnitude limite de 25 à 26. On détectera alors des objets 100 à 1 000 fois moins lumineux que ceux qui sont visibles dans le téléscope du pic du Midi. Ce projet ambitieux devrait trouver de nombreux objets de la ceinture de Kuiper.

À l'Observatoire de la Côte-d'Azur, Fabrice Thomas, Michelle Moons et moi étudions mathématiquement l'évolution orbitale des objets de la ceinture de Kuiper. Nos premiers résultats donnent la structure dynamique de la ceinture ; dans la partie interne (moins de 42 unités astronomiques), les résonances avec Neptune sont les seules régions stables, alors que dans la partie externe, presque toutes les orbites sont stables, du moins à excentricité et inclinaison faibles. Ce résultat est en accord avec le fait que tous les objets découverts au-delà de Neptune et de demi-grand axe inférieur à 42 unités astronomiques se répartissent sans exception dans les résonances 4/3, 3/2 ou 5/4. Par ailleurs, tous les objets découverts au-delà de 42 unités astronomiques semblent ne pas être associés à une résonance spécifique. Aujourd'hui, nous étudions les régions de la ceinture de Kuiper d'où les objets peuvent s'échapper seulement au bout de quatre à cinq milliards d'années, réservoir probable des comètes à courte période : celles-ci ont dû s'échapper récemment de la ceinture de Kuiper (dans les derniers millions d'années écoulés) après s'y être formés quelques milliards d'années auparavant.

Alessandro MORBIDELLI,
Observatoire de la Côte-d'Azur

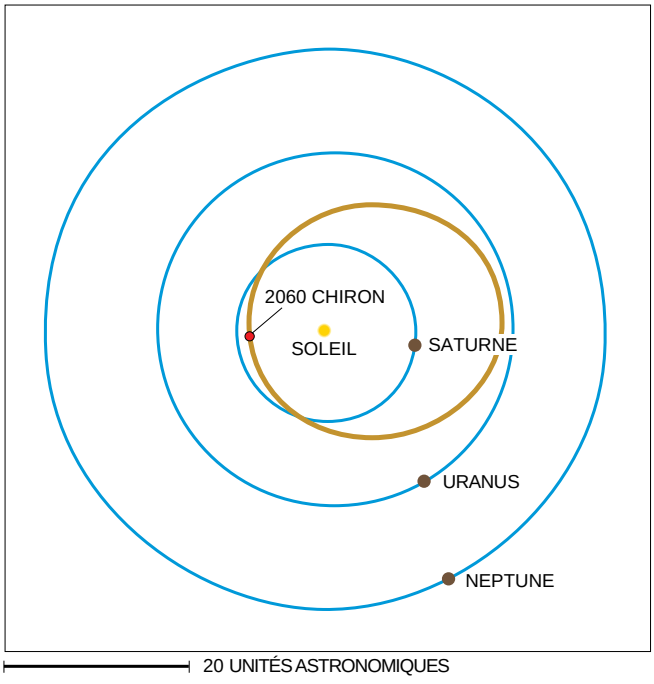
célestes parcourent des orbites peu inclinées par rapport à l'écliptique, observation qui corrobore l'hypothèse de l'existence d'un anneau aplati de comètes. Avec des diamètres compris entre 100 et 400 kilomètres, ces 32 objets sont beaucoup plus petits que Pluton (2 300 kilomètres de diamètre) et que son satellite Charon (1 100 kilomètres de diamètre).

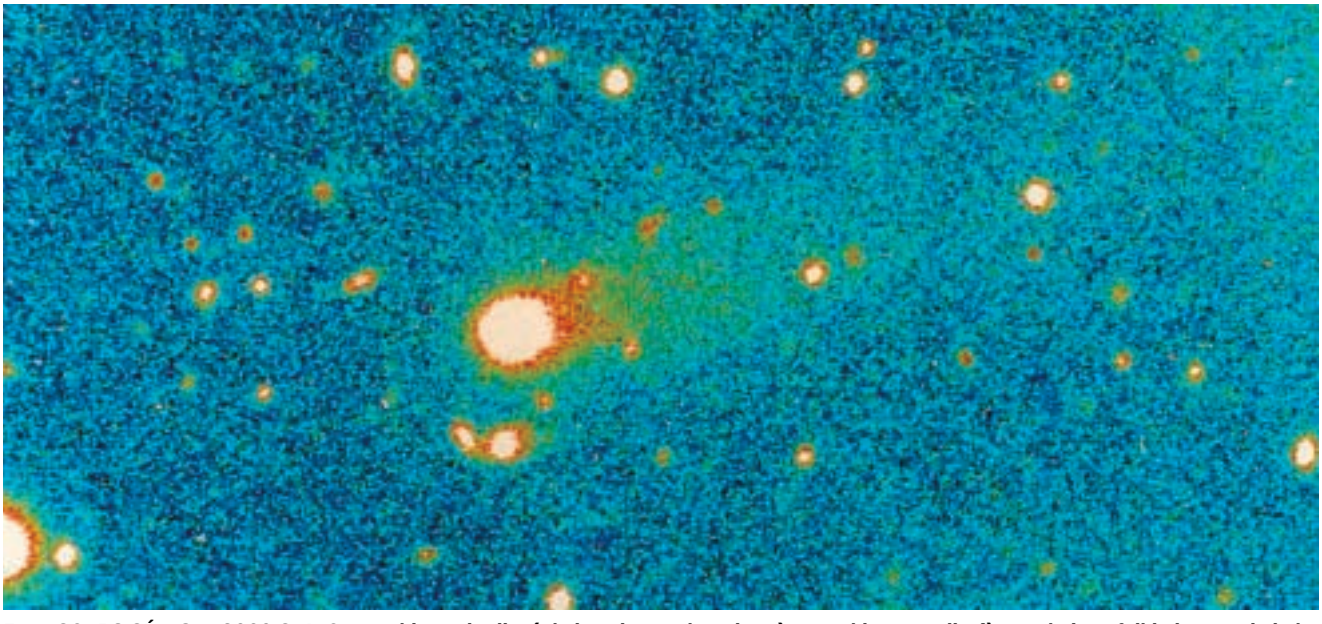
L'échantillon actuel est encore assez petit, mais le nombre de nouveaux corps découverts suffit à établir l'existence de la ceinture de Kuiper. Nous estimons qu'elle contient au moins 35 000 objets d'un diamètre supérieur à 100 kilomètres. Sa masse totale atteint donc probablement plusieurs centaines de fois celle de la ceinture d'astéroïdes située entre les orbites de Mars et de Jupiter.

Un réfrigérateur de comètes

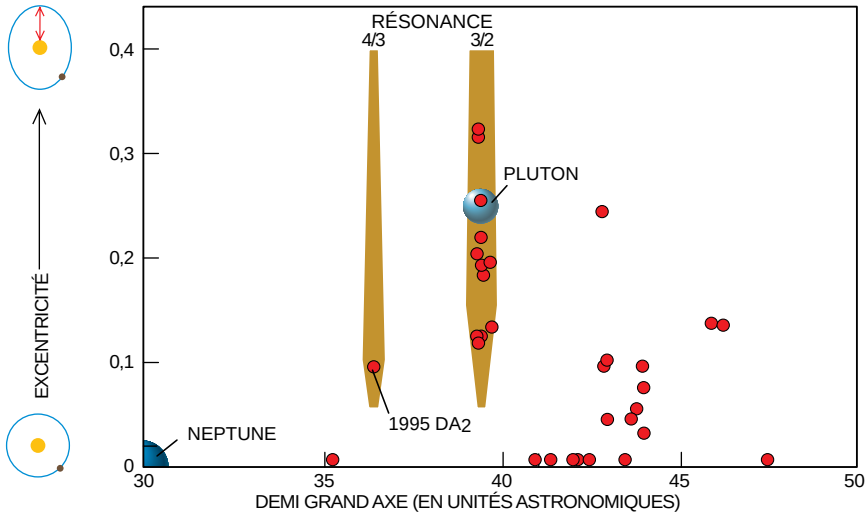
La ceinture de Kuiper est-elle vraiment à l'origine des comètes à courte période? À l'aide de simulations numériques, Matthew Holman et Jack Wisdom, de l'Institut de technologie du Massachusetts, montrèrent qu'en 100 000 ans les perturbations gravitationnelles des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) éjectent des comètes présentes dans leur voisinage, aux confins du Système solaire. Cependant, même après 4,5 milliards d'années, une grande partie des comètes transneptuniennes demeurent dans la ceinture. Ainsi, les objets de la ceinture de Kuiper situés à plus de 40 unités astronomiques du Soleil sont probablement sur des orbites stables depuis la formation du Système solaire.

Comme la ceinture de Kuiper est suffisamment massive, elle constitue





5. LE CORPS CÉLESTE 2060 CHIRON semble avoir glissé de la ceinture de Kuiper à son orbite actuelle *(à gauche)*. La faible lueur qui nimbe cet astre *(à droite)* apparente cet objet à d'autres corps «actifs», comme la comète Peltier *(ci-dessus)*.



6. DE NOMBREUX OBJETS DE LA CEINTURE DE KUIPER ont des orbites «résonantes». Les orbites sont décrites par l'excentricité (l'écart par rapport à la circularité) et le demi-grand axe *(flèche rouge, en haut, à gauche)*. Comme Pluton, près de la moitié des corps connus de la ceinture de Kuiper *(points rouges)* tournent deux fois autour du Soleil pendant que Neptune effectue trois révolutions : c'est une résonance 3/2. L'objet 1995 DA_2 occupe une orbite caractérisée par une autre résonance. Ce phénomène refléterait l'évolution primordiale du Système solaire, quand de nombreux petits corps furent éjectés et que les planètes principales s'éloignèrent du Soleil. Lors de ces mouvements d'éloignement, Neptune pourrait avoir verrouillé Pluton et une variété d'objets plus petits sur les orbites résonantes que l'on observe aujourd'hui.

un bon réservoir de comètes. Le mécanisme de transfert hors de ce réservoir est maintenant bien compris : les forces gravitationnelles exercées par Neptune érodent lentement le bord interne de la ceinture de Kuiper, expédiant des objets de cette zone vers le Système solaire interne. Beaucoup de ces corps se consument en comètes. Certains, telle la comète Shoemaker-Levy 9, qui percuta Jupiter en juillet 1994, terminent leur existence par une collision avec une planète ou avec le Soleil. D'autres sont pris dans une fronde gravitationnelle qui les projette dans l'espace interstellaire.

Si la ceinture de Kuiper est la source des comètes à courte période, peut-on trouver des comètes qui proviendraient spécifiquement de cette ceinture? Les Centaures, un groupe d'objets comprenant 5145 Pholus, seraient de telles comètes. Les Centaures parcourent de vastes orbites instables, qui croisent celles des planètes. Ils subsistent parmi les planètes géantes quelques millions d'années seulement avant que les interactions gravitationnelles ne les éjectent du Système solaire ou ne les transfèrent sur des orbites plus petites.

Les Centaures ne peuvent s'être formés là où ils se trouvent aujourd'hui, car leurs temps de vie avant éjection du Système solaire sont bien inférieurs à l'âge de celui-ci. Toutefois, la nature de leurs orbites ne permet pas de connaître leur origine avec certitude. Le réservoir le plus proche (et le plus probable) est la ceinture de Kuiper. Les Centaures constitueraient donc des «comètes de transition», des objets qui appartenaient à la ceinture de Kuiper, en route pour une vie courte, mais spectaculaire dans le Système solaire interne. Un Centaure particulier, 2060 Chiron, fournit l'indice le plus convaincant en faveur de cette hypothèse : ses découvreurs l'avaient considéré comme un astéroïde inhabituel, mais on sait aujourd'hui que 2060 Chiron est une comète active, nimbée d'un halo faible, mais persistant.

La ceinture de Kuiper pourrait-elle fournir autre chose que des comètes? Est-ce une coïncidence si Pluton, son satellite Charon et le satellite neptunien Triton, objets analogues, se trouvent à proximité de la ceinture de Kuiper?

Un étrange trio

Les densités de Pluton et de Triton, par exemple, sont bien supérieures à celles des planètes gazeuses géantes du Système solaire externe. Les orbites de ces corps sont également assez étranges. Triton tourne autour de Neptune dans le sens rétrograde, c'est-à-dire inverse de celui du mouvement orbital de toutes les planètes et de la majorité des satellites. L'orbite de Pluton, très inclinée par rapport à l'écliptique, est si allongée qu'elle coupe celle de Neptune. Pluton échappe cependant à toute collision avec Neptune, en raison d'une relation orbitale particulière nommée résonance 3/2 : lorsque Neptune effectue trois révolutions autour du Soleil, Pluton en accomplit deux.

On comprend le mystère céleste si l'on admet que Pluton, Charon et Triton sont les survivants d'un ensemble, jadis plus vaste, d'objets de tailles similaires. Neptune aurait extrait ces trois corps de la ceinture de Kuiper, capturant Triton et verrouillant Pluton – peut-être avec Charon dans son sillage – dans sa résonance orbitale actuelle.

Les objets découverts dans la ceinture de Kuiper ont des résonances orbitales particulières : la moitié d'entre eux ont la même résonance 3/2 que Pluton et, comme la planète, ils parcourent leur orbite pendant des milliards d'années sans avoir de rencontres proches avec Neptune. Nous avons surnommé Plutinos («petits Plutons») les objets de ce type, dans la ceinture de Kuiper. Compte tenu de la faible portion de ciel examinée, nous estimons que plusieurs milliers de Plutinos ont un diamètre de taille supérieure à 100 kilomètres.

Les découvertes récentes d'objets dans l'anneau de Kuiper donnent une nouvelle compréhension du Système solaire externe. Pluton ne semble aujourd'hui particulier que parce qu'il est plus grand que tous les autres membres de la ceinture de Kuiper. On peut même se demander si Pluton mérite le statut de planète à part entière? Paradoxalement, une étude qui commença par la recherche d'une dixième planète pourrait ramener à huit le nombre des planètes de notre Système solaire.

Jane LUU est astronome à l'Université Harvard et David JEWITT est astronome à l'Université d'Hawaii.

M. DUNCAN, T. QUINN et S. TREMAINE, *The Origin of Short Period Comets*, in *Astrophysical Journal*, vol. 328, pp. L69-L73, 15 mai 1988.

J. LUU, *The Kuiper Belt Objects*, in *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, sous la direction de A. Milani, M. Di Martino et A. Cellino, Kluwer Academic Publishers, 1993.

D. JEWITT et J. LUU, *The Solar System beyond Neptune*, in *Astronomical Journal*, vol. 109, n° 4, pp. 1867-1876, avril 1995.

R. MALHOTRA, *The Origin of Pluto's Orbit: Implications for the Solar System beyond Neptune*, in *Astronomical Journal*, vol. 110, pp. 420-429, juillet 1995.