

qu'il en existe vraisemblablement des dizaines de millions dans la Voie lactée.

La quête des planètes circumbinaires a commencé avant même les premières preuves de l'existence d'« exoplanètes » en dehors du Système solaire. Cependant, nous savions que les transits pour une planète circumbinaire seraient complexes à détecter. Nous nous sommes donc concentrés sur la configuration particulière des étoiles binaires à éclipses. Observées de la Terre, ces binaires à éclipses se déplacent l'une autour de l'autre dans un plan tel qu'elles passent régulièrement devant leur partenaire. Si une planète est présente dans le système, elle devrait perturber la date des éclipses des étoiles. Nous avons même commencé par étudier une configuration encore plus spécifique. Nous avons cherché des planètes situées dans le même plan que leurs étoiles, qui produiraient un transit lors du passage de la planète devant les étoiles. Nous avons envisagé ce scénario sachant qu'un système stellaire se forme à partir d'un disque aplati de gaz et de poussière. On espérait voir les étoiles et la planète évoluer dans un même plan, celui du disque.

Deux cas de figure

Un système à deux étoiles et une planète se présente sous deux configurations possibles. Si les deux étoiles d'un système binaire sont très éloignées, la période orbitale étant de quelques centaines d'années par exemple, les étoiles s'influencent peu et se comportent pratiquement comme si elles étaient isolées. Des planètes peuvent être en orbite autour d'une des deux étoiles, et seront peu influencées par la présence de l'autre. Des dizaines de ces planètes circumstellaires, dites de type S, ont été découvertes ces dix dernières années.

La configuration qui nous intéresse ici intervient quand les étoiles sont si proches qu'il ne leur faut que quelques semaines, voire quelques jours, pour parcourir leur orbite autour de l'autre astre. Une planète d'un système binaire de ce type aura une orbite stable seulement si elle est en orbite autour des deux étoiles en même temps, et non autour d'une seule. Les calculs montrent que le rayon orbital par rapport aux étoiles doit être plus grand qu'un minimum critique de l'ordre de deux à trois fois la distance qui sépare les deux étoiles. En dessous de

■ LES AUTEURS



William WELSH est astronome à l'Université d'État de San Diego, en Californie.



Laurance DOYLE est astrophysicien à l'Institut SETI de Mountain View, en Californie.

Les binaires à éclipses

Les systèmes d'étoiles binaires à éclipses sont situés dans un plan qui permet de voir une étoile passer devant l'autre lors de leurs révolutions.

Il est possible de modéliser l'atténuation de la lumière lors d'une éclipse pour en déduire la taille et la forme des étoiles. En couplant cela à d'autres mesures, on peut déterminer le rayon et la masse des étoiles.

Ces mesures sont utilisées comme références pour estimer la masse et le rayon d'étoiles binaires sans éclipses ou d'étoiles simples.

ce seuil, le système de binaires en rotation déstabiliserait l'orbite de la planète, qui serait avalée par l'une des étoiles ou éjectée dans la galaxie. Les planètes de ce type sont les planètes circumbinaires, dites de type P. Pour montrer que ces systèmes existent, une confirmation par l'observation était nécessaire.

Dans un système simple à une étoile et une planète, les transits se produisent avec la régularité d'un métronome, ce qui facilite leur détection. Mais dans un système à trois corps, cette régularité est perturbée. Dans le système simple, l'étoile est immobile, alors que dans le système binaire, les étoiles tournent rapidement l'une autour de l'autre. La planète est en orbite autour des deux astres à une vitesse plus faible. Dès lors, le transit s'effectue devant une double cible mouvante, de sorte que la planète passe devant une des étoiles soit en avance, soit en retard par rapport au cas où les trois corps sont alignés (*voir l'encadré pages 40-41*). Ces variations sont calculables (si l'on connaît les masses et les orbites des astres), mais les transits ne seront pas périodiques. De plus, la durée du transit change selon le mouvement relatif de la planète par rapport à l'étoile qu'elle croise ; si elles vont dans le même sens, le transit dure plus longtemps, mais quand l'étoile se déplace dans l'autre sens, le transit est plus court. Ces variations compliquent la détection des planètes circumbinaires, mais elles fournissent une signature irréfutable de la présence d'une exoplanète, car aucun autre phénomène astronomique ne présente une telle organisation spatiale et temporelle.

Première détection

Pendant quatre ans, le télescope *Kepler* a fixé une région particulière du ciel et cherché l'atténuation de la lumière caractéristique du passage d'une planète devant son étoile hôte. Les observations ont aussi permis de découvrir plus de 2000 nouveaux systèmes d'étoiles binaires à éclipses. Et plusieurs systèmes exotiques ont été observés, dont les premiers systèmes de trois étoiles à éclipses.

En 2011, l'un de nous (L. Doyle) et Robert Slawson, de l'Institut SETI, ont remarqué des éclipses anormales dans le système KIC 12644769. Les deux étoiles s'éclipsaient l'une l'autre tous les 41 jours, mais il y avait d'autres éclipses inexpliquées.

Les deux premières se sont produites à 230 jours d'intervalle. La suivante a eu lieu 221 jours plus tard, soit neuf jours plus tôt que prévu. C'était exactement le type de signature attendu pour une planète circumbinaire.

Ces transits apportaient la preuve qu'un troisième corps est en orbite autour des étoiles binaires. Était-ce une étoile peu brillante ou une planète ? La légère atténuation indiquait que l'objet a un faible rayon. Cela n'excluait pas les petites étoiles, telles les naines brunes, qui ont une masse supérieure à 13 fois la masse de Jupiter. Nous devons donc mesurer sa masse pour nous assurer qu'il s'agissait bien d'une planète.

Outre l'observation des variations dans le transit de la planète, deux autres manifestations permettent d'identifier la présence d'une planète circumbinaire. Elles sont liées au temps de trajet de la lumière émise par les étoiles et à des perturbations dans les dates des éclipses des étoiles.

Reprenons un système binaire à éclipses accompagné d'une planète relativement grosse. Le centre de masse de la paire tourne autour du centre de masse du système à trois corps (voir l'encadré pages 40-41). Il en résulte que, parfois, les étoiles binaires sont un peu plus proches de la Terre ; à d'autres moments, elles sont un peu plus éloignées. Dans ce cas, la lumière stellaire met plus longtemps à nous parvenir, et les éclipses semblent légèrement retardées. Quand les étoiles sont plus proches de nous, les éclipses sont en avance. Ainsi, cet effet cyclique lié au temps de trajet de la lumière nous permet de déduire la présence d'un corps invisible et d'en estimer la masse. En outre, plus le troisième corps est massif et loin de la binaire, plus l'effet est prononcé, parce que la distance entre le centre de masse de la binaire et celui de l'ensemble augmente ; mais plus il est loin, plus le cycle est long. Dans le cas qui nous intéresse, il n'y avait pas de changement cyclique détectable pendant la mesure des éclipses sur une période d'environ 230 jours, ce qui impliquait que le corps caché était de faible masse. Mais encore ?

Le troisième corps influe aussi sur le système binaire par l'interaction gravitationnelle directe, nommé l'effet dynamique. Celui-ci l'emporte sur l'effet du temps de trajet de la lumière pour les objets proches. Le compagnon invisible modifie légère-

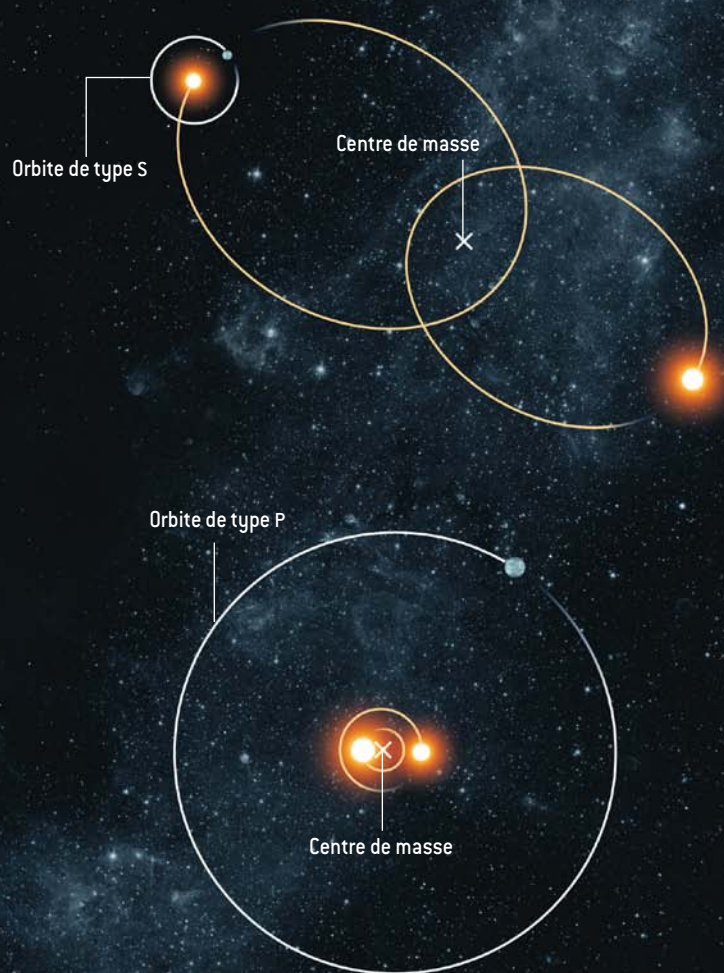
ment le mouvement des étoiles binaires et les retarde ou les fait avancer sur leur orbite. Ces perturbations changent les dates d'occurrence des éclipses. La plus petite des deux étoiles s'approchant plus du troisième corps, son orbite sera davantage perturbée.

Pour étudier un système circumbinaire, il faut prendre en compte les deux effets en même temps. Un de nos collègues de l'équipe scientifique de *Kepler*, Daniel Fabrycky, maintenant à l'Université de

Chicago, a noté qu'un objet de masse stellaire modifierait notablement les dates des éclipses, alors qu'une planète produirait une signature beaucoup plus faible, mais néanmoins mesurable. Et, pour ce système, les effets dynamiques devraient être beaucoup plus forts que l'effet du temps de trajet de la lumière. Nous avons mesuré les variations de dates des éclipses et montré que l'attraction exercée sur les étoiles correspondait à celle exercée par une planète.

EN ORBITE AUTOUR D'UNE OU DEUX ÉTOILES

Les systèmes binaires se présentent sous deux formes. Certaines étoiles binaires décrivent d'immenses orbites tournant autour de leur centre de masse commun et mettent des centaines d'années à boucler une orbite. Ces étoiles ont tendance à se comporter presque comme si elles étaient isolées ; une planète, dite de « type S », peut être en orbite autour d'une seule de ces étoiles sans être gênée par l'autre. À l'inverse, les étoiles rapprochées tournent l'une autour de l'autre en quelques semaines, voire quelques jours. Pendant des années, les astronomes se sont demandé si des planètes, dites de « type P », pouvaient survivre à un environnement gravitationnel chaotique et tourner autour de la paire d'étoiles. Aujourd'hui, on sait que oui.



Ron Miller, Jan Christensen