

qui a gagné chaque semaine depuis dix ans, même si une approche strictement fréquentiste affirmerait que les résultats des tirages précédents sont sans effet sur les résultats futurs. En pratique, personne n'ignorerait le résultat des semaines précédentes. En réalité, la stratégie de bon sens serait d'adopter le point de vue bayésien, c'est-à-dire d'actualiser nos connaissances et d'agir en tenant compte des meilleures données disponibles.

Récrire les règles quantiques

Même si le QBisme nie la réalité de la fonction d'onde, ce n'est pas une théorie nihiliste qui nie toute réalité, souligne R. Schack, l'un des trois concepteurs initiaux du QBisme. Le système quantique examiné par un observateur est en effet très réel, note-t-il. Sur le plan philosophique, dit D. Mermin, le QBisme suggère l'existence d'une séparation, d'une frontière, entre le monde où vit l'observateur et l'expérience qu'a cette personne du monde, cette expérience subjective étant décrite par une fonction d'onde.

Sur le plan mathématique, Ch. Fuchs a réalisé une découverte importante susceptible de renforcer la proposition du QBisme comme une interprétation valable de la théorie quantique et des probabilités. Ce résultat concerne la « règle de Born », formule qui indique à l'observateur comment calculer la probabilité d'un événement quantique à partir de la fonction d'onde (plus précisément, la règle de Born stipule que la probabilité que le système quantique manifeste la propriété X est égale au carré du module de l'amplitude de la composante de la fonction d'onde correspondant à X). Ch. Fuchs a démontré que l'on pouvait récrire presque entièrement la règle de Born dans le langage de la théorie des probabilités, sans se référer à une fonction d'onde. La règle de Born constituait le pont reliant les fonctions d'onde aux résultats expérimentaux ; Ch. Fuchs a désormais montré que l'on peut prédire les résultats expérimentaux en utilisant directement des probabilités, sans passer par une fonction d'onde.

Selon Ch. Fuchs, la nouvelle expression de la règle de Born est une indication supplémentaire que la fonction d'onde n'est qu'un outil permettant à l'observateur de calculer ses croyances personnelles,

ou probabilités, sur le monde quantique qui l'entoure.

La simplicité de la nouvelle équation est frappante. À un petit détail près, elle ressemble à la loi des probabilités totales, qui exige que la somme des probabilités de tous les résultats possibles d'une épreuve soit égale à 1. Le détail qui change (la seule référence à la théorie quantique dans cette prescription de la façon de calculer les probabilités) est l'intervention de d , la dimension quantique du système. Ce terme de dimension ne se rapporte pas à la longueur ou à la largeur, mais au nombre d'états qu'un système quantique peut occuper. Par exemple, un électron unique, dont l'état de spin a deux orientations possibles, aurait une dimension quantique égale à 2.

Ch. Fuchs fait remarquer que la dimension quantique est un attribut intrinsèque, irréductible, qui caractérise la « nature quantique » d'un système, de la même façon que la masse d'un objet caractérise ses propriétés gravitationnelles et inertielles. Bien que d soit implicite dans tous les calculs de physique quantique, son apparition explicite et au premier plan dans une équation fondamentale est inédite. La règle de Born étant parée de ces nouveaux habits, Ch. Fuchs espère avoir découvert la clef d'une nouvelle vision de la mécanique quantique. « Je caresse l'idée, confesse-t-il, que [la règle de Born] soit le plus important de tous les axiomes de la théorie quantique. »

Une théorie encore en construction

L'un des reproches faits au QBisme est son incapacité à expliquer des phénomènes macroscopiques complexes en fonction de phénomènes microscopiques plus primitifs, comme le fait la théorie quantique habituelle. La manière la plus directe de répondre à ce défi serait que le QBisme réussisse à fonder la théorie quantique sur des hypothèses nouvelles et convaincantes.

Cet objectif affiché n'est pas encore atteint, mais le QBisme offre dès maintenant une nouvelle vision de la réalité physique. En interprétant la fonction d'onde en termes de degrés de croyance personnelle, il donne un sens mathématique précis à l'intuition de Bohr selon laquelle la physique porte sur ce que l'observateur peut dire de la nature, et pas plus. ■

■ L'AUTEUR



Hans Christian von BAEYER est physicien théoricien des particules et professeur émérite au *College of William and Mary*, en Virginie (États-Unis).

■ BIBLIOGRAPHIE

N. D. Mermin, *Quantum mechanics : Fixing the shifty split*, *Physics Today*, pp. 8-10, juillet 2012. Réactions à ce commentaire : *Physics Today*, pp. 8-15, décembre 2012.

C. A. Fuchs, *Interview with a Quantum Bayesian*, 2012 [<http://arxiv.org/abs/1207.2141>].

M. F. Pusey *et al.*, *On the reality of the quantum state*, *Nature Physics*, vol. 8, pp. 475-478, 2012.

F. Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2011.

C. A. Fuchs, *QBism, the perimeter of quantum bayesianism*, 2010 [<http://arxiv.org/abs/1003.5209>].

T. Martin, *La probabilité, un concept pluriel*, M. Cozic et I. Drouet, *Interpréter les probabilités*, *Pour la Science*, novembre 2009.

Des mondes à deux

William Welsh et Laurance Doyle

Les astronomes ont découvert, grâce au télescope spatial *Kepler*, que des systèmes d'étoiles binaires abritent des planètes.

L'ESSENTIEL

- Les étoiles binaires gravitant l'une autour de l'autre sont très répandues. De tels systèmes peuvent-ils abriter des planètes ?
- Certains astronomes pensaient que l'environnement autour des étoiles binaires était trop chaotique pour permettre la formation de planètes.
- Les observations du télescope spatial *Kepler* confirment que de telles planètes existent.
- Certaines occupent la zone « habitable » de leur système, là où la présence d'eau liquide est possible.

Ron Miller

soleils



Les couchers de soleil sur Terre sont souvent magnifiques. Alors imaginez un double coucher de soleils avec des étoiles de différentes couleurs tournant l'une autour de l'autre ! Pendant des années, nous nous sommes demandé si les paires d'étoiles, les « binaires », sont accompagnées de planètes. Se pourrait-il qu'il existe des planètes telle Tatooine, imaginée par le cinéaste George Lucas dans le film *Star Wars* où le ciel est éclairé par le rougeoiement de deux soleils ?

Certains astrophysiciens doutaient de cette possibilité. L'environnement autour d'une paire d'étoiles, expliquaient-ils, serait trop chaotique pour que des planètes se forment. Contrairement à un corps en orbite autour d'une seule étoile, une planète en orbite autour de deux étoiles serait soumise à deux champs gravitationnels. Et comme les étoiles elles-mêmes sont en orbite l'une autour de l'autre, l'intensité des forces gravitationnelles changerait en permanence. Même si une planète pouvait se former dans un tel environnement, sa stabilité à long terme ne serait pas assurée : la planète risquerait d'être éjectée hors du système stellaire ou de s'écraser sur une des étoiles. Si des observations de systèmes d'étoiles binaires montraient déjà des signes indirects de l'existence de ces planètes « circumbinaires », les preuves directes manquaient.

En 2009, la NASA a mis en orbite le télescope spatial *Kepler*, dont l'objectif est la recherche d'exoplanètes. Des milliers de « planètes candidates » ont été découvertes par la méthode des transits. Cette technique consiste à rechercher des mini-éclipses résultant du passage devant l'étoile d'une planète en orbite : la planète bloque alors une partie de la lumière émise par l'étoile, de sorte que son éclat est modifié de façon périodique. Après deux ans d'observations, aucune planète circumbinaire n'avait été détectée par le télescope. Nous commençons à croire que cette configuration était impossible.

Puis le découragement a laissé la place à l'enthousiasme avec la découverte de Kepler-16b, la première planète circumbinaire à transit. Quelques mois plus tard, nous ajoutons deux autres planètes (Kepler-34b et Kepler-35b). Tout en étant exotiques, ces systèmes ne sont pas si rares. Sept planètes circumbinaires ont été dévoilées par *Kepler*, d'autres devront être confirmées. Les calculs suggèrent

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 inexplicables.

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-

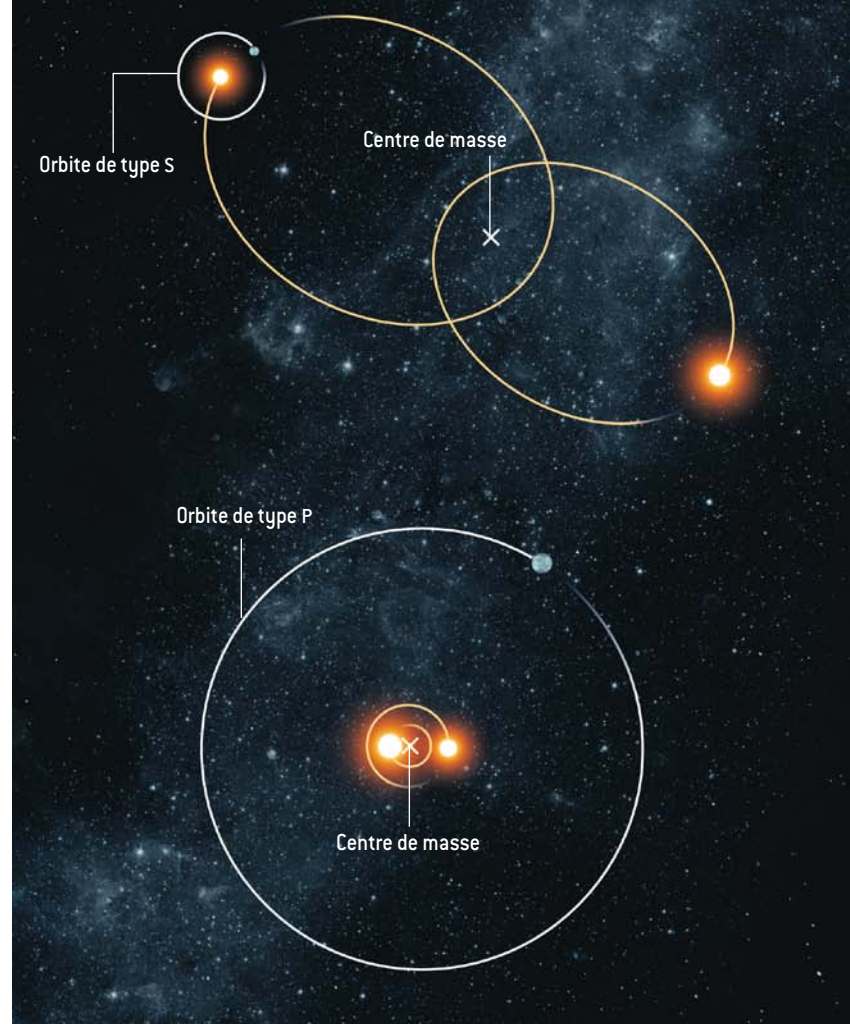
ment le mouvement des étoiles binaires et les retarde ou les fait avancer sur leur orbite. Ces perturbations changent les dates d'occurrence des éclipses. La plus petite des deux étoiles s'approchant plus du troisième corps, son orbite sera davantage perturbée.

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

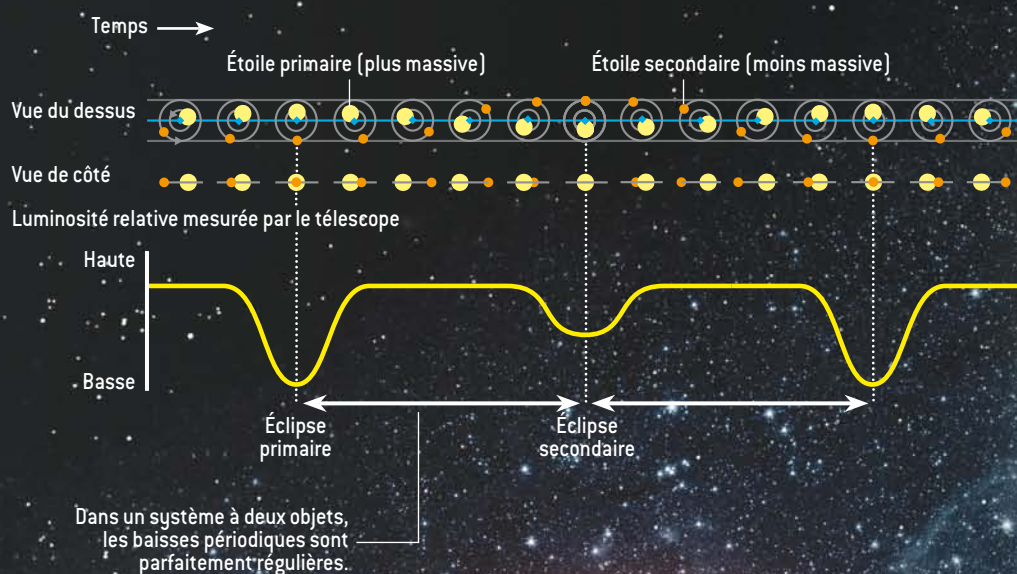
COMMENT TROUVER DES PLANÈTES AUTOUR DE SYSTÈMES À ÉTOILES MULTIPLES

Lorsque des étoiles binaires produisent des éclipses observables de la Terre, on peut en tirer d'importants renseignements sur chaque étoile en mesurant l'atténuation de la lumière. Ces éclipses servent aussi à trouver des planètes en orbite autour d'un système d'étoiles binaires. Mais il n'est pas facile de mettre en évidence ces objets, car les systèmes à trois corps ont souvent des comportements très complexes. Les illustrations qui suivent sont des versions simplifiées à l'extrême des effets que recherchent les astronomes.

(Les schémas ne sont pas à l'échelle)

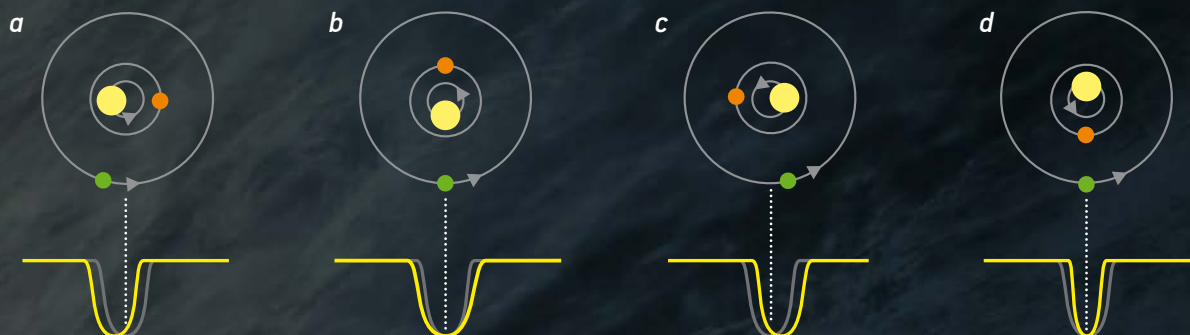
À quoi ressemblent les étoiles binaires

Dans un système d'étoiles binaires à éclipses, chaque étoile bloque brièvement la lumière de l'autre, créant des baisses périodiques de la luminosité.



Les transits planétaires devant des étoiles binaires

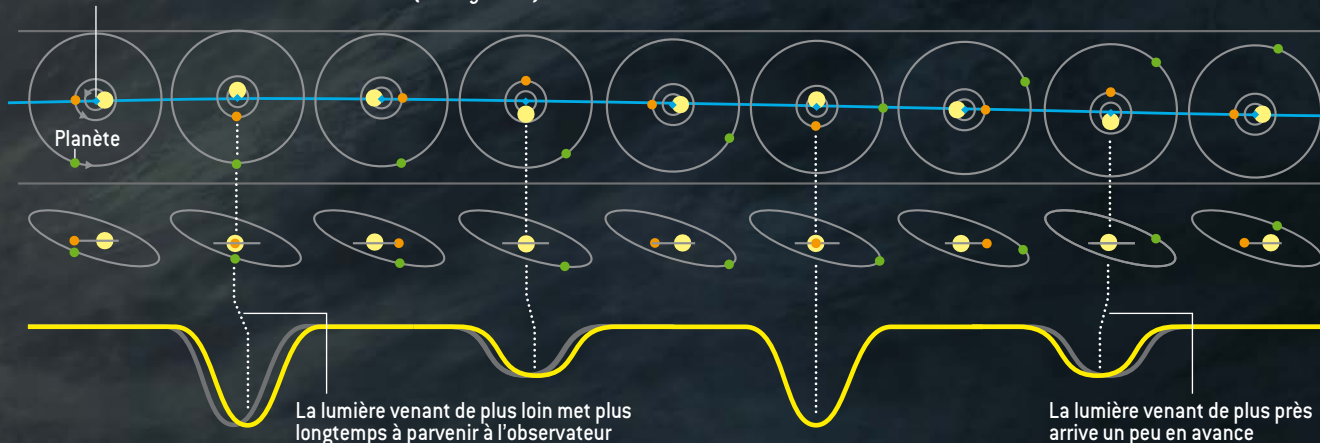
Si une planète passe devant une étoile, elle bloque une partie de la lumière de l'étoile. Dans un système circumbinaire, les deux étoiles bougent. Par conséquent, la planète passe devant l'étoile parfois un peu en avance (*a, courbe jaune*) et parfois un peu en retard (*c, courbe jaune*) par rapport au système où les trois astres sont alignés (*courbe grise*). De plus, si la planète et l'étoile vont dans la même direction, le transit est plus long (*b, pic plus large*) ; dans la direction opposée, le transit est plus court (*d, pic plus étroit*).



L'effet du temps de trajet de la lumière

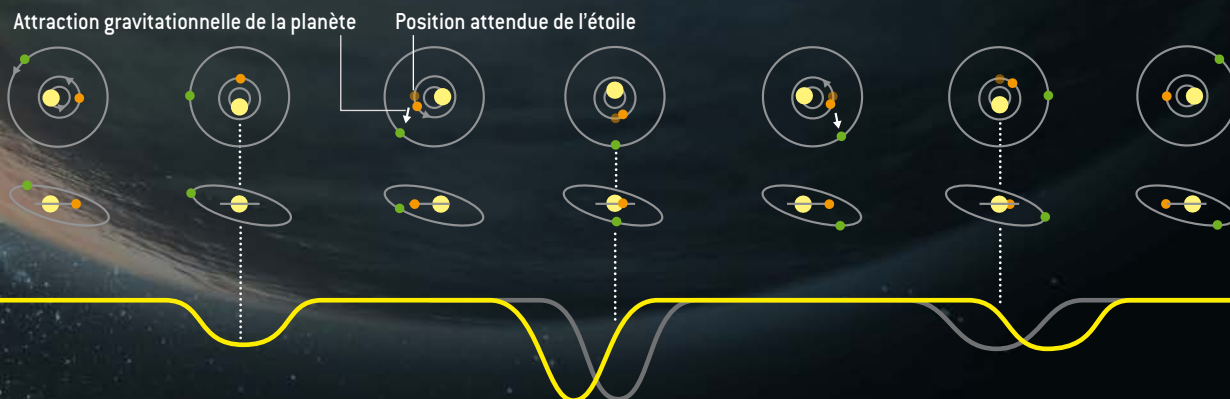
Dans un système à trois corps, le centre de masse des deux étoiles binaires tourne autour du centre de masse du système. Par conséquent, par moments, les étoiles sont plus éloignées de la Terre et, à d'autres moments, plus proches de l'observateur. Un plus grand éloignement signifie que la lumière de l'éclipse binaire met plus longtemps à atteindre les télescopes, ce qui retarde légèrement l'éclipse. L'écart est de l'ordre de une seconde dans le cas de Kepler-16b.

Centre de masse des deux étoiles binaires (losange bleu)



L'effet dynamique

Les planètes peuvent aussi modifier la dynamique d'un système à deux étoiles. Si la planète a un rayon orbital relativement petit, elle perturbe l'une des étoiles (ou les deux) dans sa (ou leur) révolution. De plus, si l'une des étoiles est moins massive que l'autre, son orbite s'approche davantage de la planète, amplifiant cet effet. Les passages rapprochés modifient de diverses façons les orbites à deux corps. Dans l'exemple ci-dessous, l'attraction exercée par la planète sur l'étoile secondaire la fait arriver en avance pour l'éclipse primaire et en retard pour l'éclipse secondaire. L'effet se compte en minutes ou en heures (environ une minute pour Kepler-16b).





LE SATELLITE KEPLER a découvert de nombreuses exoplanètes durant son programme prévu initialement. Ce succès a incité la NASA à prolonger la mission, mais cette extension a été écourtée par la défaillance de deux roues de réactions sur les quatre installées. Celles-ci assurent la stabilité du télescope, nécessaire pour observer des transits planétaires. Des études sont en cours pour tenter de corriger le problème. Par ailleurs, le télescope pourrait aussi servir à d'autres types d'observations astronomiques.

Cette conclusion a été confirmée par Joshua Carter, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, qui a créé un modèle numérique du système. Il a reproduit parfaitement l'ensemble des données pour une planète de masse équivalente à celle de Saturne. Cette excellente correspondance entre les observations et la modélisation prouvait l'existence de la planète et livrait des valeurs d'une grande précision pour les rayons, les masses et les caractéristiques orbitales du système.

La planète nommée Kepler-16b était donc la première planète circumbinaire à transit découverte. Depuis la surface de la planète, les étoiles binaires devraient avoir la même taille que le Soleil observé de la Terre. Kepler-16b a alors été surnommée « Tatooine », en référence à la planète fictive de *Star Wars* et à son ciel emblématique à deux soleils couchants. Cette spéculation tirée de la science-fiction était devenue un fait scientifique.

Une nouvelle classe de planètes

Kepler-16b semblait être un cas atypique. Cette planète tourne près de ses étoiles hôtes seulement neuf pour cent au-delà de l'orbite minimale de stabilité (en deçà, elle serait éjectée ou s'écraserait sur l'étoile). Et parce que Kepler-16b était la première planète circumbinaire à transit découverte, nous nous demandions si elle faisait figure d'exception.

En août 2012, l'un d'entre nous (W. Welsh) a remarqué des transits dans l'un des systèmes de binaires. En quelques heures, D. Fabrycky élaborait un modèle informatique qui reproduisait les périodes et durées variables des transits, confirmant que l'objet en transit était une planète. Nous avions découvert Kepler-34b. Dès le lendemain, Jerome Orosz, de l'Université d'État de San Diego, trouvait des transits dans un autre système d'étoiles binaires à éclipses qui, lui aussi, abritait une planète : Kepler-35b.

Dans les mois suivants, J. Orosz allait découvrir Kepler-38b, montrant qu'il existe aussi de petites planètes circumbinaires de la masse de Neptune, puis le système planétaire Kepler-47 comportant au moins deux planètes, ce qui montre que les étoiles binaires peuvent abriter plusieurs planètes. La dernière planète circumbinaire découverte, Kepler-64b (aussi connue sous le nom de « PH1 »), a été découverte simultanément et indépendamment par Veselin Kostov, de l'Université Johns Hopkins, et par des astronomes amateurs travaillant dans le cadre du projet *Planet Hunters* (Chasseurs de planètes). Elle fait partie d'un système stellaire quadruple, ce qui accroît la diversité des lieux où peuvent se former des planètes.

Des systèmes sans transits

Avec J. Orosz, nous avons étendu nos recherches à des planètes circumbinaires qui ne transitent pas devant leurs étoiles. En effet, la configuration à transit que nous avions cherchée jusqu'à présent nécessitait un alignement parfait. Cette contrainte était très restrictive. Nous l'avons assouplie en supposant que la planète peut s'écarter légèrement du plan des binaires de quelques degrés. Nous ne verrions plus de transits, mais ce cas devrait être beaucoup plus répandu que celui des planètes à transit. Pourrait-on les détecter grâce aux petites variations dans les périodes des éclipses des étoiles ?

Les sept planètes circumbinaires détectées jusqu'à présent nous indiquent que ces objets ne sont pas rarissimes et que nous avons mis au jour une nouvelle classe de systèmes planétaires. Pour chaque système binaire à éclipse présentant un transit de planète, cinq à dix systèmes équivalents ne présentent pas de transit, car l'alignement de la planète n'est pas parfait. Étant donné que sept planètes ont été trouvées parmi le millier de binaires à éclipses étudiées, nous

■ BIBLIOGRAPHIE

W. F. Welsh *et al.*, *Transiting circumbinary planets Kepler-34b and Kepler-35b*, *Nature*, vol. 481, pp. 475-479, 2012.

J. A. Orosz *et al.*, *Kepler-47 : a transiting circumbinary multiplanet system*, *Science*, vol. 337, pp. 1511-1514, 2012.

L. R. Doyle *et al.*, *Kepler-16b : a transiting circumbinary planet*, *Science*, vol. 333, pp. 1602-1606, 2011.

pouvons estimer que la galaxie abrite des dizaines de millions de ces systèmes planétaires circumbinaires. En outre, toutes les planètes circumbinaires découvertes à ce jour sont des géantes gazeuses. La recherche de planètes rocheuses plus petites et légères se poursuit, mais des planètes circumbinaires de la taille de la Terre sont extrêmement difficiles à détecter.

Les positions des orbites des planètes soulèvent de nombreuses questions. Elles ont tendance à être très proches des étoiles. Si elles l'étaient davantage, les orbites des planètes seraient instables. En cherchant pourquoi les planètes circumbinaires tournent si près de leur rayon critique d'instabilité, nous améliorerons les théories décrivant la formation de ces planètes et l'évolution de leur orbite dans le temps.

Même si nous ignorons pourquoi ces planètes circulent sur des orbites aussi instables, cet état de fait suggère que des planètes peuvent se former et perdurer dans un environnement chaotique.

La tendance des planètes circumbinaires de *Kepler* à se trouver près du rayon critique de stabilité a une conséquence intéressante. Pour ces étoiles, le rayon critique est souvent proche de la zone habitable, c'est-à-dire la région où l'énergie produite par les étoiles rend la température de la planète juste assez

CES PLANÈTES CIRCULENT sur des orbites instables, ce qui suggère que des planètes peuvent se former et perdurer dans un environnement chaotique.

chaude pour que de l'eau se maintienne à l'état liquide. Trop près de l'étoile, l'eau de la planète s'évapore ; trop loin, l'eau gèle. Et l'eau liquide est une condition indispensable à la vie telle que nous la connaissons.

Pour une étoile unique, la zone habitable est une région en forme de coquille sphérique autour de l'étoile. Dans un système binaire, chaque étoile a sa propre

zone habitable, et ces zones fusionnent en un sphéroïde déformé si les étoiles sont suffisamment proches. La zone habitable combinée se déplace en suivant la rotation des étoiles binaires. Ainsi, contrairement à la Terre qui décrit une orbite quasi circulaire autour du Soleil, la distance d'une planète circumbinaire à chacun de ses hôtes peut changer de façon importante au cours de l'année orbitale de la planète. Par conséquent, les saisons planétaires pourraient durer quelques semaines seulement, au gré des ballets des étoiles l'une autour de l'autre.

Deux des sept planètes circumbinaires à transits sont dans la zone habitable de leur système, une proportion très élevée. Toutefois, être dans la zone habitable ne garantit pas des conditions favorables à la vie. Par exemple, toutes les planètes découvertes sont gazeuses. Et avec des variations de saisons rapides et marquées, à quoi pourrait bien ressembler la vie dans un monde circumbinaire ? ■

POUR LA

COLLECTION SCIENCE LES PETITS THEMATIQUES

Des feuilleteables numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique

Accédez facilement à l'essentiel sur un thème marquant de l'actualité scientifique grâce à :

- une sélection d'articles de référence parus dans *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho*
- compilée dans un feuilleteable numérique de 35 pages environ
- téléchargeable en format PDF au prix de 3,99€ (compatible avec ordinateur et tablette).

Des dizaines de sujets à découvrir sur www.pourlascience.fr/petits-thematiques

Enterrer le carbone en déterrant du méthane ?

Du dioxyde de carbone pourrait être massivement stocké dans certains aquifères salins profonds, notamment dans le golfe du Mexique. L'exploitation du méthane contenu dans ces saumures et de leur chaleur assurerait la rentabilité de cette méthode.

Steven Bryant

Mark Twain, dit-on, observait que tout le monde se plaint du temps qu'il fait, mais que personne ne fait rien à son sujet. On pourrait transposer sa remarque au changement climatique, contre lequel les mesures sérieuses manquent. L'aspect économique l'explique en grande partie. Réduire l'accumulation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère – le moteur principal, d'origine humaine, du changement climatique – est coûteux. Cela nécessite soit un changement de politique énergétique, avec la fin de la prépondérance du charbon et du pétrole, soit une technologie complexe pour capturer le CO₂ émis et le confiner pendant des siècles (on parle de séquestration).

Et si nous pouvions à la fois produire de grandes quantités d'énergie et enterrer

les gaz à effet de serre grâce à une méthode rentable et compatible avec l'infrastructure industrielle existante ? Ce scénario pourrait devenir réalité en plusieurs endroits du monde, notamment le long de la côte du golfe, au Sud-Est des États-Unis. Grâce à la configuration géologique particulière de cette région, une énorme quantité de CO₂ pourrait être stockée à plusieurs kilomètres de profondeur. Le gaz serait injecté dans des saumures, des fluides chauds et salés que l'on remonterait à la surface avant de les renvoyer dans le sous-sol. Au passage, on y prélèverait du méthane (le principal composant du gaz naturel) et de la chaleur. Les techniques employées seraient dérivées de celles utilisées pour l'extraction du pétrole et du gaz. Pris isolément, ni le stockage ni la production de méthane ou

d'énergie géothermique ne sont économiquement viables, mais ils le deviennent quand on les combine.

Les énormes quantités de CO₂ émises par les activités humaines ne peuvent être stockées dans un réservoir classique et l'unique endroit assez grand est le sous-sol. Dans la couche supérieure de la croûte terrestre, sur une épaisseur de quelques kilomètres, les pores des roches sédimentaires pourraient contenir des siècles d'émissions. Pour réduire de 15 pour cent la quantité de CO₂ envoyée dans l'atmosphère par les États-Unis, il faudrait en séquestrer jusqu'à une gigatonne chaque année. Environ quatre gigatonnes de pétrole brut et deux gigatonnes de gaz naturel sont extraites par an dans le monde. Ces ordres de grandeur suggèrent que la séquestration