

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 shift 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.