



4. LES HABITATIONS, surélevées à cause des moussons, étaient constituées de bois et de couvertures en matière végétale, parfois en tuiles. Les villages étaient reliés par un réseau de routes et de canaux.

localisés sont en lien direct avec l'important sanctuaire du même nom. Ils forment un village dont le temple représente le point focal.

Les tertres sont des plates-formes quadrangulaires, orientées plus ou moins cardinalement et ajoutées au fil du temps à l'organisation d'origine centrée sur le temple. Ils ont une superficie qui varie de 1 200 mètres carrés à près de 2 000 mètres carrés, avoisinant en moyenne 1 500 mètres carrés. Le volume des bassins qui leur sont associés équivaut en général à celui de leur remblai. Ces plates-formes sont associées à des fossés drainants parfois connectés aux bassins. L'ensemble était conçu pour protéger les habitations durant les moussons.

La pérennité de ces villages est variable: le site de Trapeang Thlok a été occupé moins d'un siècle, entre la fin du X^e siècle et la première moitié du XI^e. L'agglomération de Trapeang Ropou a été habitée du X^e siècle au XIV^e siècle, et Tuol Ta Lo, entre le XII^e et le XIV^e siècles. Dans la plupart des cas, ces *tuol* ont été installés sur des terrains vierges d'occupation.

L'organisation de la surface des plates-formes est assez sommaire. On distingue en général sur le point haut du tertre un bâtiment privilégié – une maison – et parfois des bâtiments plus réduits en périphérie, dont la fonction n'est pas certaine (*voir l'encadré page ci-contre*). Les surfaces des bâtiments mesurées varient de 40 mètres carrés à plus de 50 mètres carrés. À Trapeang Thlok comme à Trapeang Ropou, la présence de tuiles suggère un système de couvertures soigné et une qualité

architecturale certaine. C'est en général la répartition du mobilier archéologique qui permet de déterminer l'emplacement et la fonction du bâtiment.

Des maisons avec cour vivrière

Tous les cas étudiés sont localisés sur des tertres fermés par des clôtures en bois formées d'alignements de piquets ou de poteaux. Ces clôtures déterminent une cour qui pourrait s'apparenter à une cour-verger plantée d'arbres fruitiers et complétée d'un potager, comme on en observe encore aujourd'hui dans les habitats traditionnels paysans. Les plantes cultivées dans ces vergers sont variées: bananiers, manguiers, sapotilliers, papayers, jacquiers, goyaviers, cocotiers, aréquiers, citronniers, pamplemoussiers, selon l'étude du géographe Jean Delvert (*Le paysan cambodgien*, 1961). Certaines des nombreuses fosses présentes à la surface des tertres pourraient être des chablis (trous de plantation).

Cette cour correspondrait à une unité familiale de production vivrière et à un espace social ouvert. On y produit et on y stocke des vivres, sans doute dans des greniers à paddy (le riz avec son enveloppe) et des jarres. Plusieurs types d'activités rurales ou domestiques apparaissent dans cet espace, identifiées par l'étude du mobilier: l'élevage, la boucherie (découpe de viande), la mouture et le broyage des graines (meules et broyeurs), la pêche (poids de filets), le tissage ou le filage, repérés

par la présence de pesons, des poids qui servaient à tendre les fils, et de fusaioles, collerettes qui, installées à la base des fuseaux, les stabilisaient.

Le vaisselier découvert renseigne sur l'équipement de la maison, mais aussi sur les échanges économiques avec des régions proches (des céramiques proviennent des Kulen) ou des centres de production lointains tels que la Chine ou la région de Buriram, dans le territoire actuel de la Thaïlande. En revanche, aucune trace d'activité artisanale en rapport avec les arts du feu, telles la métallurgie ou la céramique, n'a été repérée pour l'instant. De façon générale, les objets manufacturés semblent avoir été produits sur des sites spécialisés.

Cet espace vivrier formé par la maison angkorienne sur tertre et sa cour est sans doute l'élément le plus important pour qualifier ce type d'habitat d'unité de production et de consommation. L'environnement de la maison rurale ou périurbaine traduit une économie de subsistance, complétant une économie plus globale fondée sur la culture du riz. L'importance de cette production vivrière, quelle que soit la part réservée à l'autoconsommation ou celle réservée à l'échange, est une caractéristique des sociétés préindustrielles.

En marge des grands temples angkoriens qui concentrent l'attention des conservateurs et de l'industrie du tourisme, la cité d'Angkor reprend progressivement sa place au fil des recherches archéologiques: au cœur d'une civilisation dont les monuments religieux ne sont qu'une des composantes. ■



L'ESSENTIEL

- Les lois de la théorie quantique semblent étranges et leur interprétation soulève maintes difficultés.
- Une idée récemment développée, le bayésianisme quantique, ou QBisme, fait appel à l'interprétation subjective des probabilités pour tenter d'éliminer les paradoxes ou de leur donner une forme moins dérangeante.
- Le QBisme ne considère pas la fonction d'onde d'un système quantique comme une entité physique, mais comme un outil mathématique qui reflète les connaissances dont dispose l'observateur sur ce système.



L'étrangeté quantique, juste une impression ?

Hans Christian von Baeyer

Certains physiciens cherchent à réinterpréter la théorie quantique en considérant les probabilités comme une notion subjective. Selon ce « bayésianisme quantique », ou « QBisme », l'étrangeté du monde microscopique ne serait alors qu'apparente.

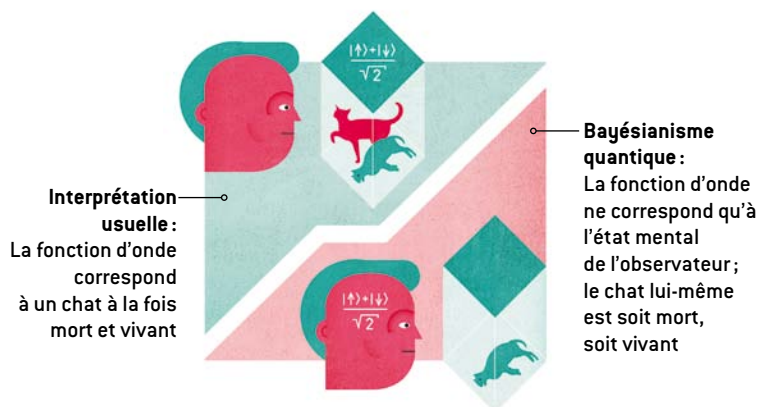
La physique quantique rend compte sans faillir du comportement de la matière à toutes les échelles, du niveau subatomique jusqu'aux immensités astronomiques. C'est la théorie la plus féconde de toutes les sciences physiques. C'est aussi la plus étrange.

Dans le monde quantique, les particules semblent se trouver en plusieurs endroits à la fois, l'information semble voyager plus vite que la lumière, et les chats semblent être à la fois morts et vivants. Cela fait neuf décennies que les physiciens sont aux prises avec les paradoxes apparents du monde quantique. Contrairement à la théorie de l'évolution ou à la mécanique céleste, dont les enseignements font partie intégrante du paysage intellectuel général, la théorie quantique est encore considérée (même par de nombreux physiciens) comme une anomalie bizarre, un puissant livre de recettes très utiles, mais quelque peu énigmatiques. La confusion qui règne autour de l'interprétation de la théorie quantique continuera à entretenir la perception selon laquelle ce qu'elle indique sur notre monde est sans rapport avec notre vie quotidienne et trop bizarre pour nous concerner.

© Cédric Chazand

LE REMÈDE À UNE ABSURDITÉ QUANTIQUE

Pour illustrer la différence entre le bayésianisme quantique et l'interprétation orthodoxe de la théorie quantique, prenons l'exemple du chat de Schrödinger. Dans la version usuelle, un chat et une fiole de poison sont enfermés dans une boîte hermétique. Un événement quantique qui se produit avec une probabilité de 50 pour cent brise (ou ne brise pas) la fiole, et tue (ou ne tue pas) le chat. Avant qu'un observateur ne regarde à l'intérieur de la boîte, la fonction d'onde décrivant le système est une superposition des états *vivant* et *mort*, comme devrait l'être le chat lui-même. L'acte d'observation projette le chat dans l'un ou l'autre état. En revanche, dans le QBisme, la fonction d'onde est simplement une description de l'état mental de l'observateur. La superposition s'applique à cet état et à rien d'autre. Le chat est soit mort, soit vivant ; l'observation révèle dans quel cas il se trouve.



© Anna-Kaisa Jormalainen

En 2001, quelques physiciens ont commencé à développer un modèle qui élimine les paradoxes quantiques ou, du moins, les présente sous une forme moins troublante. Le modèle, nommé bayésianisme quantique, ou QBisme en abrégé, réinterprète l'entité qui se trouve au cœur de l'étrangeté quantique : la fonction d'onde.

Dans la vision usuelle de la théorie quantique, un objet tel qu'un électron est représenté par sa « fonction d'onde », une fonction $\psi(x, t)$ qui assigne à chaque instant t une valeur à tout point x de l'espace et qui décrit les propriétés de l'objet. Pour prédire le comportement de l'électron, il faut calculer l'évolution de sa fonction d'onde au cours du temps. Le résultat du calcul fournira la probabilité que l'électron ait une certaine propriété (par exemple celle de se trouver à tel ou tel endroit). Mais des problèmes surgissent lorsqu'on suppose que la fonction d'onde a une réalité.

Le QBisme, qui combine la théorie quantique avec une interprétation particulière des probabilités, affirme que la fonction d'onde n'a pas de réalité objective. En fait, pour le QBisme, la fonction d'onde est une sorte de manuel de l'utilisateur, un outil mathématique dont se sert l'observa-

teur pour prendre des décisions éclairées concernant le monde qui l'entoure. Plus précisément, selon cette interprétation, l'observateur utilise la fonction d'onde pour traduire sa conviction personnelle qu'un système quantique possède telle ou telle propriété, sachant que les choix et actions propres de l'individu modifient le système d'une manière par nature incertaine.

La fonction d'onde, une abstraction

Un autre observateur, utilisant une fonction d'onde qui décrit le monde tel que cette personne le voit, peut parvenir à une conclusion totalement différente sur le même système quantique. À un système donné (un événement donné) peuvent ainsi correspondre autant de fonctions d'onde différentes qu'il y a d'observateurs. C'est lorsque les observateurs ont communiqué entre eux et modifié leurs fonctions d'onde personnelles pour rendre compte des connaissances nouvellement acquises qu'une vision du monde cohérente émerge.

Vue ainsi, la fonction d'onde « pourrait bien être l'abstraction la plus puissante que l'on ait jamais trouvée », selon David Mermin,

un physicien théoricien de l'Université Cornell récemment converti au QBisme.

L'idée selon laquelle la fonction d'onde ne serait pas une entité réelle remonte aux années 1930 et aux écrits de Niels Bohr, l'un des fondateurs de la mécanique quantique. Ce physicien danois considérait qu'elle faisait partie du formalisme « purement symbolique » de la théorie quantique : un outil de calcul, et rien de plus. Le QBisme est le premier modèle à donner un ancrage mathématique à l'affirmation de Bohr. Il fusionne la théorie quantique avec les statistiques bayésiennes, un domaine vieux de 200 ans qui considère la probabilité comme le reflet d'une croyance subjective.

Les statistiques bayésiennes fournissent également des règles mathématiques formelles sur la façon de mettre à jour ses croyances subjectives à la lumière d'informations nouvelles. En interprétant la fonction d'onde comme une croyance subjective, sujette à être révisée par les règles de la statistique bayésienne, on fait disparaître les mystérieux paradoxes de la physique quantique, affirment les partisans du QBisme.

Considérons à nouveau l'électron. Quand nous détectons un électron, nous le trouvons en un endroit particulier. Mais quand nous ne regardons pas, la fonction d'onde de l'électron peut s'étaler, ce qui représente la possibilité que l'électron soit en de nombreux endroits à la fois. À ce stade, effectuons à nouveau une mesure. On trouvera encore l'électron en un endroit particulier. Selon le discours usuel, l'acte d'observation réduit instantanément la fonction d'onde à une fonction d'onde correspondant à une seule valeur, particulière, de la position.

Comme cette réduction semble se produire partout exactement au même moment, on a une violation apparente du principe de localité (l'idée que tout changement d'un objet doit être provoqué par un autre objet de son voisinage immédiat). Cela conduit à son tour à une des énigmes qu'Albert Einstein qualifiait d'« action fantomatique à distance ».

Depuis la naissance de la théorie quantique, les physiciens ont vu la réduction de la fonction d'onde comme une caractéristique paradoxale et troublante de la théorie. Cela a poussé les physiciens à développer des versions alternatives de la mécanique quantique, avec un succès mitigé (voir l'encadré page 34).

Pour le QBisme, en revanche, il n'y a pas de paradoxe. L'effondrement de la fonction d'onde signifie juste qu'un observateur a subitement et de manière discontinue révisé les probabilités qu'il attribue au système, sur la base de nouvelles informations, de la même façon qu'un médecin modifierait le pronostic d'un malade sur la base d'une nouvelle analyse de sang. Le système quantique n'a pas subi de changement étrange et inexplicable; le changement est dans la fonction d'onde, choisie par l'observateur pour traduire ses attentes.

On peut appliquer cette façon de penser au célèbre paradoxe du chat de Schrödinger. Le physicien autrichien Erwin Schrödinger avait imaginé une enceinte close contenant un chat vivant, une fiole de poison et un atome radioactif ayant une chance sur deux de se désintégrer dans l'heure qui suit, d'après les lois quantiques. Si l'atome se désintègre, un marteau brise la fiole et libère le poison, qui tue le chat. S'il ne se désintègre pas, le chat survit.

Neutraliser les paradoxes

Faisons l'expérience, mais sans regarder à l'intérieur de l'enceinte. Au bout d'une heure, la théorie quantique usuelle stipule que la fonction d'onde de l'atome est une superposition de deux états : l'état désintégré et l'état non désintégré. Mais comme nous n'avons pas regardé à l'intérieur de la boîte, la superposition va plus loin. Le marteau est également dans une superposition d'états, tout comme la fiole de poison. Et, ce qui est plus grotesque, le formalisme usuel de la mécanique quantique implique que le chat aussi soit dans une superposition d'états : il est simultanément mort et vivant, ce qui nous paraît absurde.

En considérant la fonction d'onde comme une propriété subjective de l'observateur, et non comme une propriété objective du chat dans l'enceinte, le QBisme résout le paradoxe. La théorie affirme que, bien sûr, le chat est soit mort, soit vivant, et pas les deux à la fois. Certes, sa fonction d'onde représente une superposition de *vivant* et *mort*, mais une fonction d'onde n'est qu'une description de ce que pense l'observateur.

L'espoir est qu'en éliminant les paradoxes, le QBisme aidera les physiciens à

mieux cerner les véritables caractéristiques fondamentales de la théorie quantique – et les « empêchera de perdre leur temps à se poser des questions stupides sur des énigmes imaginaires », comme le dit D. Mermin.

Le QBisme est né dans un court article publié en janvier 2002 sous le titre « Les probabilités quantiques en tant que probabilités bayésiennes ». Ce texte était signé de Carlton Caves, de l'Université du Nouveau-Mexique, Christopher Fuchs, alors aux Laboratoires *Bell* dans le New Jersey, et Ruediger Schack, de l'Université de Londres. Tous trois sont des théoriciens de l'information quantique, et leurs affiliations respectives à un département de physique, un laboratoire industriel et un département de mathématiques illustrent la nature interdisciplinaire de leurs réflexions.

Au cours de la décennie écoulée depuis, Ch. Fuchs a rejoint le *Perimeter Institute*,

En considérant la fonction d'onde du chat comme une propriété subjective de l'observateur, et non comme une propriété objective de l'animal, le QBisme résoudrait le paradoxe du chat de Schrödinger.

dans l'Ontario (Canada), et endossa le rôle de principal porte-parole du QBisme. Ce Texan trapu, au tempérament enjoué et aux manières cordiales, a un sens de l'humour irrévérencieux et irréprensible. Ses collègues ne sont pas étonnés quand il commence un article par « Dans cet article, je vais tenter de jeter un trouble de bon aloi ».

La conviction de Ch. Fuchs semble être que la science est essentiellement une activité de communication et qu'une compréhension profonde d'un problème ne s'obtient qu'au prix d'un rude combat intellectuel. Ce physicien est à lui seul un tourbillon d'activité, transportant son ordinateur portable aux quatre coins du globe dans un vieux sac à dos, organisant des conférences, animant des débats scientifiques et donnant des cours dans les universités.

Dans cet esprit, Ch. Fuchs a créé une nouvelle forme de littérature. En 2011, l'éditeur *Cambridge University Press* a publié sa correspondance électronique avec des

scientifiques du monde entier dans un volume de 600 pages intitulé *Coming of Age with Quantum Information* (Le passage à l'information quantique). Faisant la chronique des affres de la naissance du QBisme, l'ouvrage laisse entrevoir comment la physique théorique est créée par des êtres humains bien réels. Le livre témoigne également de la conviction de Ch. Fuchs qui, contrairement à la plupart des scientifiques, estime que la philosophie est importante non seulement en raison de son influence sur la physique, mais aussi en raison des idées profondes que la physique peut lui apporter.

L'ouverture d'esprit de Ch. Fuchs aux préoccupations philosophiques devient claire quand on réfléchit à la manière dont le QBisme nous oblige à reconsidérer ce qu'on entend par une probabilité. Les probabilités, c'est comme le temps : vous savez

ce que c'est, jusqu'à ce qu'on vous demande de le définir. On comprend assez bien que la probabilité de 50 pour cent de tomber sur *face* en lançant une pièce non truquée signifie que, dans une longue série de lancers, on obtiendra *face* dans la moitié des cas. Mais comment faut-il comprendre une affirmation telle que « La probabilité qu'il pleuve ce soir est de 60 pour cent », la situation (« ce soir ») ne pouvant

être reproduite ?

Probabilités subjectives ou objectives ?

Au cours des siècles récents, deux conceptions concurrentes de la probabilité ont été développées, chacune ayant ses variantes. L'interprétation dite fréquentiste définit la probabilité d'un événement comme sa fréquence relative dans une série d'essais. Ce nombre est censé être objectif et vérifiable, ainsi que directement applicable aux expériences scientifiques. L'exemple type est le lancer d'une pièce : dans un grand nombre de lancers, environ la moitié des résultats seront des *face*, de sorte que la probabilité de tomber sur *face* est approximativement égale à $1/2$ (en considérant un nombre infini de lancers, la probabilité est exactement égale à $1/2$; mais cette notion de probabilité devient alors invérifiable et perd sa prétention à l'objectivité).

QUATRE INTERPRÉTATIONS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Que se passe-t-il réellement dans le monde quantique ? Les scientifiques ont proposé une dizaine d'interprétations différentes de ce qui est sous-jacent au formalisme mathématique. Le bayésianisme quantique est peut-être la plus radicale d'entre elles ; les quatre alternatives suivantes sont parmi les plus répandues.



L'interprétation dite de Copenhague, surtout due au Danois Niels Bohr et à l'Allemand Werner Heisenberg, est la version orthodoxe de la théorie quantique. Les propriétés mesurables d'un système tel qu'un atome sont déterminées par son « état quantique ». Ce dernier est décrit par une expression mathématique nommée fonction d'onde. Elle permet, à l'aide de la règle dite de Born, de calculer les probabilités des résultats d'une mesure. Lors d'une mesure, l'observateur provoque la réduction de l'état quantique en un nouvel état, qui correspond au résultat effectif de l'expérience. Cette réduction instantanée de la fonction d'onde soulève des difficultés conceptuelles, car elle suppose des effets se propageant plus vite que la lumière.



L'interprétation de l'onde-pilote. Plusieurs physiciens, dont Albert Einstein à un certain moment, ont privilégié une réécriture du corpus mathématique de la mécanique quantique de façon à inclure un champ de force réel, nommé onde-pilote, qui contrôle le mouvement d'une particule. Malheureusement, cette image séduisante échoue dès que plusieurs particules (disons N particules) sont impliquées. Elles ne se déplacent pas dans notre espace familier à trois dimensions, mais dans un espace abstrait à $3N$ dimensions. Plus troublant encore, l'onde-pilote exerce une action à distance, par laquelle des effets physiques sont transmis instantanément à grande distance.



L'interprétation des univers multiples. Selon cette idée radicale, l'état quantique de l'Univers est unique, évolue régulièrement et de manière prévisible. Quand on réalise une expérience pour déterminer par laquelle de deux fentes un électron est passé, par exemple, cet état ne se réduirait pas à l'état correspondant à une seule des fentes ; l'Univers se dédoublerait en deux branches indépendantes, correspondant aux deux résultats. Ainsi, au cours du temps, l'Univers se ramifierait indéfiniment comme un arbre où chacune des branches correspond à la réalisation d'un des résultats possibles. Mais cette théorie des « multivers » est incapable d'expliquer le processus responsable de la ramification et a du mal à justifier la règle de Born.



Théories de la réduction spontanée. Plutôt que d'éliminer la réduction de la fonction d'onde due à l'observateur, ces théories postulent qu'il s'agit d'un processus entièrement naturel : de tels processus ont lieu spontanément, bien que rarement, pour chaque système quantique, mais deviennent prépondérants quand le système quantique interagit avec un objet macroscopique. Ces théories doivent cependant expliquer comment est réalisée la réduction. Des expériences de laboratoire, portant sur des systèmes constitués de quelques atomes ou photons, ont été réalisées ou sont en cours afin d'analyser les mécanismes à l'œuvre et de les élucider.

On pourrait à la rigueur appliquer cette définition à la prévision du temps, en dénombrant les configurations météorologiques réelles ou simulées. Mais l'interprétation fréquentiste est inopérante pour attribuer une probabilité au succès d'une opération commando telle que l'assassinat de Ben Laden, situation manifestement non reproductible.

Le point de vue le plus ancien sur les probabilités est l'interprétation bayésienne. Il tire son nom de Thomas Bayes, pasteur anglais du XVIII^e siècle dont les idées ont été précisées et diffusées par le physicien français Pierre-Simon Laplace.

Des degrés de croyance mis à jour

À l'inverse de la probabilité fréquentiste, la probabilité bayésienne est subjective : elle mesure le degré de croyance qu'un événement se produira. Dans les cas simples tels que les lancers de pièce, les probabilités fréquentistes et bayésiennes sont en accord. Pour les prévisions météorologiques ou portant sur l'issue d'une

action militaire, la probabilité bayésienne, contrairement à la probabilité fréquentiste, a la liberté de combiner des informations statistiques quantitatives avec des estimations intuitives fondées sur l'expérience du passé.

L'interprétation bayésienne traite facilement les cas uniques, à propos desquels l'approche fréquentiste est muette, et évite les pièges de l'infini, mais sa véritable puissance est plus spécifique. Sur la base de cette interprétation, les probabilités attribuées à tel ou tel événement sont sujettes à changement, parce que les degrés de croyance ne sont pas définitifs. Un météorologue fréquentiste n'aurait pas de mal à calculer la probabilité de pluie si la région a un climat stable, prédictible depuis de nombreuses années. Mais dans le cas d'un changement soudain, telle une sécheresse, pour lequel il y a peu de données, un prévisionniste bayésien est mieux armé pour rendre compte de l'information nouvelle et de l'état du climat.

Au cœur de la théorie se trouve une formule explicite, le théorème de Bayes, qui permet de calculer l'effet d'une information

nouvelle sur l'estimation d'une probabilité. Par exemple, quand il soupçonne un cancer chez un patient, le médecin attribue une probabilité initiale, nommé probabilité *a priori*, fondée sur des données telles que l'incidence connue de la maladie dans la population générale, les antécédents médicaux de la famille du patient et d'autres facteurs pertinents. À réception des résultats des analyses du patient, le médecin peut mettre à jour cette probabilité en utilisant le théorème de Bayes. La valeur résultante n'est ni plus ni moins que le degré personnel de croyance du médecin.

La plupart des physiciens affichent leur foi dans les probabilités fréquentistes plutôt que bayésiennes, tout simplement parce qu'on leur a appris à fuir la subjectivité. Mais quand il s'agit de faire une prédiction, l'approche bayésienne prévaut, affirme Marcus Appleby, mathématicien à l'Université de Londres, convaincu par Ch. Fuchs de l'importance des probabilités bayésiennes.

M. Appleby fait remarquer qu'il nous paraîtrait insensé de participer à une loterie si l'on a appris que c'est la même personne

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