

nullement obligatoire qu'ils aient tous les deux perçu le même résultat. Cela peut paraître étrange, mais c'est l'un des points essentiels du solipsisme convivial, qui amène à renoncer à l'idée que nous pouvons « nous mettre à la place de quelqu'un d'autre pour parler de ses perceptions ». Expliquons-nous.

Alice échangeant avec Bernard, c'est-à-dire mesurant Bernard – qui, du point de vue d'Alice, reste dans un état superposé quel que soit le résultat qu'il a trouvé tant qu'elle n'a pas « mesuré » Bernard – entendra toujours celui-ci lui donner un résultat conforme à ce qu'elle a vu elle-même. Cet état de fait, qui justifie l'adjectif « convivial », provient du fait que, selon le mécanisme d'accrochage, un observateur ne peut obtenir comme résultat possible d'une mesure que ceux qui sont liés à la branche à laquelle il est accroché. Alice ne peut donc obtenir, quand elle parle avec Bernard, qu'un résultat correspondant à « la partie de Bernard » corrélée au même résultat de mesure sur le système que celui qu'elle a déjà obtenu.

Les choses sont même plus strictes que cela, car, compte tenu de la relativité de toute description dans ce cadre, une phrase doit toujours être rapportée à celui qui l'énonce. Il est donc illégitime de parler à la fois de ce qu'Alice et Bernard ont perçu : cela demanderait de se placer du point de vue d'un observateur ayant accès simultanément à leurs deux perceptions, et un tel observateur n'existe pas. L'étrangeté de la phrase selon laquelle Alice et Bernard ne peuvent jamais être en désaccord même s'ils n'ont pas perçu la même chose, est donc due à l'illégitimité, dans ce cadre, de faire référence simultanément à la perception d'Alice et à celle de Bernard. Seule la phrase « Alice a vu ceci et a entendu Bernard lui dire qu'il a vu ceci » est légitime. En revanche, la phrase « Alice a vu ceci alors que Bernard a vu cela » est interdite, car elle n'a pas de sens dans le monde du solipsisme convivial.

DES DIFFICULTÉS APLANIES

Quelle que soit l'étrangeté de cette situation, il est possible de donner un sens mathématique précis à ces idées et de montrer comment elles permettent de résoudre de nombreuses énigmes.

Le formalisme mathématique du solipsisme convivial permet de résoudre le problème de la mesure. Il évite aussi tous les paradoxes liés à la mesure de deux systèmes intriqués, comme la question de savoir laquelle des deux mesures détermine la valeur de l'autre lorsqu'elles sont séparées par un « intervalle du genre espace » (deux mesures séparées dans l'espace et dans le temps de telle façon qu'aucun signal physique, dont la vitesse de propagation est au maximum celle de la lumière, ne puisse relier les deux événements) – un intervalle tel que, selon la théorie



Selon le « solipsisme convivial » développé par l'auteur, l'observateur qui mesure un système ne modifie *a priori* pas l'état quantique de celui-ci. Mais quand cet état quantique est une superposition, l'observateur ne peut percevoir qu'un résultat correspondant à l'un des états de base entrant dans la superposition. Une analogie est donnée par des images telles que celle-ci, qui peut être « lue » de deux façons différentes : soit la danseuse semble nous tourner le dos, soit elle semble nous faire face ; dans une séquence animée, elle semble tourner soit dans un sens, soit dans l'autre.

de la relativité, aucune des deux mesures ne peut être considérée d'une manière absolue comme antérieure à l'autre. Le solipsisme convivial permet aussi de rétablir la localité (l'idée que les influences physiques se font de proche en proche, et non à distance de façon instantanée) en mécanique quantique, alors qu'il est fréquemment admis que cette théorie doit nécessairement être non locale.

Le prix à payer n'est cependant pas négligeable, et c'est principalement cela que beaucoup de physiciens ne sont pas prêts à accepter. Il faut renoncer à penser que le monde est directement conforme à ce que nous percevons et que nous le percevons tous de la même façon. Le monde du solipsisme convivial est étrange : nous n'en avons chacun qu'une perception réduite à une projection ou une coupe et nous ne voyons pas forcément tous la même projection. En ce sens, c'est une sorte de solipsisme, car chacun vit dans un monde de perceptions qui lui sont propres. Mais il est convivial dans la mesure où, contrairement au solipsisme classique, il laisse la place à d'autres esprits et à un monde extérieur, et il est tel que, malgré des perceptions pouvant être différentes, deux observateurs ne pourront jamais constater de désaccord entre eux.

Pour des physiciens attachés à une description plus strictement conforme à nos intuitions habituelles, ce renoncement peut paraître trop important. Pour d'autres, tirant la leçon du constat que la science n'a pas cessé de nous forcer progressivement à renoncer à nos intuitions les plus fortement ancrées, surtout depuis l'avènement de la mécanique quantique, cette nouvelle vision est un moyen de résoudre des énigmes qui résistent depuis longtemps. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Zwrn, **Nonlocality versus modified realism**, *Foundations of Physics*, vol. 50, pp. 1-26, 2020.

H. Zwrn, **Delayed choice, complementarity, entanglement and measurement**, *Physics Essays*, vol. 30(3), pp. 281-293, 2017 (<http://arxiv.org/abs/1607.02364>).

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2^e édition, 2017.

H. Zwrn, **The measurement problem : Decoherence and convivial solipsism**, *Foundations of Physics*, vol. 46, pp. 635-667, 2016.

B. d'Espagnat et H. Zwrn (dir.), **Le Monde quantique**, Éd. Matériologiques, 2014.

H. Zwrn, **Les Limites de la connaissance**, Odile Jacob, 2000.

B. d'Espagnat, **Le Réel voilé**, Fayard, 1994.

L'ESSENTIEL

> La mécanique quantique prédit avec grand succès la statistique des résultats expérimentaux. Mais il n'y a pas de consensus sur la réalité qui la sous-tend.

> Selon la mécanique bohmienne, ou théorie dBB, les particules ont des positions toujours bien définies, mais sont guidées par une onde qui obéit à l'équation

de Schrödinger de la mécanique quantique.

> Cette théorie, qui suppose une réalité univoque et déterministe, donc de type classique, conduit aux mêmes prédictions que la mécanique quantique.

> Les recherches se poursuivent pour la rendre compatible avec la théorie de la relativité et la théorie quantique des champs.

L'AUTEUR



WARD STRUYVE
chercheur postdoctorant
à l'Institut de physique théorique
et au Centre de logique et de
philosophie des sciences de la
KU Leuven (Katholieke Universiteit
Leuven), à Louvain, en Belgique

Une réalité classique derrière l'étrangeté quantique?

Les lois de la mécanique quantique défient l'intuition et l'idée que nous avons de la réalité physique. Mais la théorie de De Broglie-Bohm, proposée il y a plusieurs décennies et revenue dans l'actualité, a l'ambition de les réconcilier.

La mécanique quantique représente l'un des plus grands succès de la physique moderne. Elle a permis d'expliquer et de prévoir avec précision une multitude de phénomènes. Et pourtant, l'interprétation de cette théorie reste toujours débattue: ce qu'elle nous dit sur la nature du monde physique, sur son ontologie en d'autres termes, n'est pas très clair.

On dit parfois que ce n'est pas le rôle de la théorie, qu'elle ne sert qu'à rendre compte des résultats expérimentaux et qu'il est vain de lui demander plus. Mais une telle vision manque

cruellement d'ambition. En effet, nous, scientifiques, cherchons à découvrir à quoi ressemble le monde; nous devrions donc considérer les expériences comme des guides et des tests de nos théories, et non comme leur raison d'être.

Or quand on essaye de comprendre la nature du monde sous-jacent à la mécanique quantique, de grandes difficultés surgissent. Pour les surmonter, l'une des voies les plus prometteuses, et probablement la plus simple, est la théorie de De Broglie-Bohm (ou dBB en abrégé). Cette approche tire son nom du physicien français Louis de Broglie (qui se



Des expériences, dont les premières ont été réalisées en 2004 par l'équipe d'Yves Couder et Emmanuel Fort, à l'université Paris-Diderot, ont montré qu'une goutte rebondissant sur un liquide dont la surface est parcourue par une onde se comporte de façon analogue à une particule dans la théorie de De Broglie-Bohm : l'onde pilote la goutte et lui confère un comportement semblable à celui d'une particule obéissant aux lois de la mécanique quantique. De telles expériences illustrent, sur un système de nature classique, des comportements quantiques.

> prononce comme «de Breuil»), avec ses travaux précurseurs de 1924-1927, et de David Bohm, le physicien américain qui l'a développée dans les années 1950 (voir l'encadré page ci-contre). Appelée aussi théorie de l'onde pilote, ou mécanique bohmienne, la théorie dBB revient à l'actualité et fait l'objet d'actives recherches, à la faveur du renouveau des réflexions sur l'interprétation de la mécanique quantique.

UNE EXPÉRIENCE QUI RÉSUME L'ÉTRANGÉTÉ QUANTIQUE

Avant d'y venir, expliquons quelles difficultés d'interprétation la mécanique quantique soulève. On peut commencer par considérer une expérience simple et exemplaire, celle dite des fentes de Young. Elle consiste à diriger des particules, par exemple des électrons, vers un écran opaque percé de deux fentes parallèles et proches. Après avoir traversé les fentes, les particules sont détectées sur un deuxième écran. On peut envoyer les particules une par une et les détecter une par une, ce qui se traduit par l'accumulation, avec le temps, de points d'impact sur l'écran de détection.

Si, au lieu d'électrons, on envoie sur les fentes des objets plus gros, de petites billes par exemple, ces objets suivront approximativement des lignes droites et formeront donc, en s'accumulant sur l'écran de détection, deux petites taches situées dans le prolongement des deux lignes droites reliant la source d'électrons aux fentes. Or ce n'est pas du tout ce que l'on observe avec des électrons ou d'autres particules très microscopiques : sur l'écran de détection, on voit se former des franges, c'est-à-dire une alternance de régions à densité d'impacts faible et élevée (voir la figure page 38).

Un tel motif est une figure d'interférence, caractéristique des phénomènes ondulatoires. Par exemple, des vaguelettes se propageant à la surface de l'eau produisent une figure d'interférence similaire – des régions où l'amplitude des vagues est alternativement petite et grande – lorsqu'elles traversent une barrière comportant deux ouvertures proches.

Comment la mécanique quantique rend-elle compte de l'expérience de la double fente ? Elle décrit l'électron comme une onde, représentée mathématiquement par une «fonction d'onde». Comme pour une onde classique, l'onde de l'électron arrive sur les deux fentes, dont chacune devient alors la source d'une onde secondaire, et ce sont les deux ondes secondaires ainsi produites qui interfèrent.

Mais l'analogie avec une onde classique s'arrête là. Alors que l'onde de l'électron qui atteint l'écran de détection s'étale sur une assez grande région, comme avec les vaguelettes à la surface de l'eau, l'électron ne laisse qu'une trace ponctuelle sur l'écran : à ce stade,



Louis de Broglie (1892-1987), physicien français, a émis entre 1924 et 1927 les premières idées selon lesquelles le comportement quantique des particules peut s'expliquer en supposant l'existence d'une onde qui les guide.



L'Américain David Bohm (1917-1992) a développé dans les années 1950 les idées de Louis de Broglie, ce qui a donné la mécanique bohmienne, ou théorie dBB.

il n'est plus du tout étalé. Afin de rendre compte de cette détection très localisée, la mécanique quantique postule que la fonction d'onde subit un effondrement instantané. Autrement dit, quand l'onde de l'électron atteint l'écran de détection, elle se réduit instantanément à quelque chose de très localisé. Cette réduction est censée se produire lors de la mesure et la probabilité d'observer l'impact en un point de l'écran est déterminée par l'amplitude de l'onde en ce point. Plus cette amplitude est élevée au point considéré, plus il est probable que l'onde s'y réduise.

La mécanique quantique explique ainsi la figure d'interférence qui se construit au fil du temps, avec l'accumulation des impacts d'électrons. Il y a toutefois un problème. On a supposé que l'effondrement de l'onde se produit une fois l'écran de détection atteint. Mais est-ce vraiment le cas ? Il se peut aussi que l'effondrement se fasse à un moment ultérieur, par exemple lorsque quelqu'un regarde l'écran. Dans la version orthodoxe de la mécanique quantique, l'effondrement est supposé se produire lors de la mesure. Mais quels processus physiques faut-il exactement pour qu'on puisse parler de «mesure» ? Faut-il que l'appareil de mesure soit d'un type particulier ? Une mesure implique-t-elle nécessairement un observateur humain ? Et cet observateur doit-il être suffisamment qualifié, par exemple titulaire d'un doctorat en physique ? Tant qu'on ne précise pas en quoi consiste exactement une mesure, on ne sait pas exactement quand l'effondrement se produit et les prévisions sont alors ambiguës.

LA MESURE, UN PROBLÈME ÉPINEUX

En 1935, le physicien autrichien Erwin Schrödinger a mis en exergue le problème de la mesure en imaginant un scénario impliquant un chat. Cette expérience de pensée aujourd'hui célèbre consiste à placer un chat bien vivant dans une boîte contenant un atome radioactif et un dispositif qui, si l'atome se désintègre, libère un poison mortel. Le couplage entre l'état du félin et celui de l'atome fait que la fonction d'onde du système atome-chat ne correspond pas à un état bien défini de l'animal, mais à une somme (une superposition, voir l'article d'Hervé Zwirn dans ce numéro) de l'état «chat vivant» et de l'état «chat mort». Mais alors, avant l'effondrement de la fonction d'onde du chat vers l'état vivant ou vers l'état mort, que peut ressentir cet animal ? Et quand l'effondrement se produit-il ? L'effondrement se produit-il juste au moment où un observateur humain ouvre la boîte et regarde à l'intérieur ?

Le problème de la mesure n'est pas le seul obstacle à la compréhension de la nature du monde quantique. Un autre exemple de difficulté est que le type d'onde introduit en

UNE THÉORIE LONGTEMPS DÉNIGRÉE

Inspiré par la suggestion d'Einstein selon laquelle la lumière ne devrait pas seulement être décrite par des ondes, mais aussi par des entités de nature corpusculaire, Louis de Broglie a, au milieu des années 1920, postulé que la matière devrait être décrite à la fois par des particules ponctuelles et des ondes, et que la vitesse d'une particule est liée à l'onde par la relation $v = \frac{h}{m\lambda}$, où m est la masse de la particule et λ la phase de l'onde (ce qui est l'équation bohmienne du mouvement, voir l'encadré page 36). Mais il n'a pas su donner d'équation régnant l'évolution de cette onde au cours du temps.

Une telle équation d'onde a été formulée par Schrödinger

en 1925, mais dans le cadre d'une théorie uniquement ondulatoire. Cela a posé la question de la prise en compte des détections localisées, comme celles de l'expérience des fentes de Young. Et c'est pour expliquer ces localisations de l'onde que l'Allemand Max Born et d'autres physiciens ont introduit la notion d'effondrement de la fonction d'onde.

De Broglie, lui, n'a pas renoncé aux particules. Peu après que Schrödinger a proposé son équation d'onde, de Broglie y a vu l'achèvement (provisoire) de son programme de description de la matière par des particules ponctuelles et des ondes, où la vitesse des particules est déterminée par la fonction d'onde, comme il l'avait proposé plus tôt. De Broglie présenta cette théorie au congrès Solvay de 1927, à Bruxelles, où les participants la discutèrent en détail. L'Autrichien Wolfgang Pauli le poussa dans ses retranchements à propos d'une expérience particulière, mais de Broglie n'y répondit pas de façon convaincante.

Cela a en partie conduit de Broglie à abandonner son



Au congrès Solvay de 1927 étaient notamment présents Louis de Broglie, Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger, Albert Einstein, Paul Dirac, Werner Heisenberg, Max Born...

programme, du moins jusqu'au début des années 1950...

jusqu'à ce que David Bohm redécouvre la théorie de De Broglie et la développe. Bohm a pu montrer l'équivalence de sa mécanique avec la mécanique quantique orthodoxe pour ce qui est des prédictions des résultats des mesures. Mais une grande partie des physiciens sont restés indifférents ou hostiles. Les déclarations de Robert Oppenheimer, l'ancien directeur de thèse de Bohm, sont assez éloquentes à cet égard : « Nous considérons qu'il s'agit de déviationnisme juvénile » et « si nous ne pouvons pas réfuter Bohm,

alors nous devons accepter de l'ignorer ».

Cette attitude consistant à ignorer les travaux de Bohm a prévalu jusqu'à une époque récente. Bien que ces travaux aient amené de Broglie à reprendre ce programme avec quelques étudiants, Bohm lui-même n'est guère revenu sur sa théorie après le début des années 1950. Ce n'est que dans les années 1980, après que des étudiants proches de Bohm ont obtenu des tracés de trajectoires relatives à l'expérience de la double fente, que l'intérêt pour la théorie dBB s'est ravivé.

W. S.

mécanique quantique n'a rien à voir avec les autres types d'ondes rencontrés en physique, les ondes électromagnétiques par exemple. Et c'est un aspect étrange de la mécanique quantique dont les physiciens eux-mêmes n'ont pas toujours conscience... Les ondes classiques se propagent dans l'espace physique, l'espace tridimensionnel qui est considéré comme l'arène où se déroulent les phénomènes. Or il n'est pas possible de considérer la fonction d'onde de la mécanique quantique comme une onde évoluant dans l'espace physique, même si l'expérience des fentes de Young pourrait en donner l'impression.

En effet, pour deux particules, il ne s'agit pas de deux ondes qui se propagent chacune dans un espace tridimensionnel, mais d'une seule fonction d'onde qui évolue dans un espace à $3 \times 2 = 6$ dimensions. Plus généralement, dans le cas de N particules, le système n'est pas décrit par N ondes, mais par une seule onde qui se propage dans un espace à $3N$ dimensions, un « espace de configuration » abstrait qui n'est pas l'espace physique. La réalité du monde n'aurait alors rien à voir avec le monde tridimensionnel qui nous est familier. La

véritable arène des phénomènes physiques serait cet espace de configuration, multidimensionnel, et les observateurs auraient juste l'illusion de vivre dans un espace tridimensionnel.

DES PARTICULES GUIDÉES PAR LEUR FONCTION D'ONDE

Venons-en à présent à la mécanique bohmienne. Comment décrit-elle le monde? Dans cette théorie, la fonction d'onde n'est pas le seul ingrédient. Il y a aussi, comme en mécanique classique, des particules ponctuelles qui se déplacent dans l'espace physique, tridimensionnel. Mais avec une dynamique bien sûr différente: les particules se déplacent à une vitesse déterminée par la fonction d'onde (voir l'encadré page 36).

Selon cette théorie, si nous voyons des objets tels que des tables et des chaises, ou des chats vivants ou morts, c'est parce que ces entités sont constituées de parties ponctuelles et bien réelles, et non parce que l'onde du système présente telle ou telle forme. En fait, la fonction d'onde nous est cachée: elle ne se révèle que par son effet sur le mouvement des particules – tout comme, en mécanique >

- > classique, nous ne voyons pas les forces qui agissent sur les masses, mais seulement leur effet sur ces masses.

Dans l'expérience de la double fente, la fonction d'onde est la même pour chacune des particules incidentes (c'est-à-dire pour chaque réalisation de l'expérience), mais leurs positions initiales peuvent différer. Ce que l'on détecte est la position finale des particules. Dans la théorie dBB, leur fonction d'onde ne se localise pas soudainement, mais continue d'évoluer selon l'équation de Schrödinger, la même qu'en mécanique quantique orthodoxe. Il n'y a pas d'effondrement de la fonction d'onde et aucun problème de mesure n'apparaît. La théorie est déterministe, et les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat découlent simplement de notre ignorance des conditions initiales.

Les probabilités quantiques habituelles qui rendent compte de la figure d'interférence sont obtenues lorsque les positions initiales des particules réelles suivent une certaine distribution statistique, la « distribution d'équilibre ». La distribution réelle des particules correspond « typiquement » à cette distribution d'équilibre (un peu comme les particules classiques d'un gaz sans interactions sont, « typiquement », distribuées uniformément dans le volume de leur enceinte). La mécanique bohmienne reproduit donc les prédictions de la mécanique quantique habituelle (dans la mesure où ces dernières sont sans ambiguïté). En ce sens, la théorie dBB est empiriquement équivalente à la théorie quantique orthodoxe. Et grâce à cette équivalence, nous n'avons en général pas besoin de nous préoccuper des trajectoires réelles des particules, la répartition statistique de leurs positions pouvant être déterminée par le formalisme quantique habituel.

DES PRÉDICTIONS IDENTIQUES À CELLES DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Quel est l'état actuel de la mécanique bohmienne ? Dans sa version non relativiste, cette théorie est pleinement développée et bien comprise. De nombreux chercheurs y ont contribué, notamment des collaborateurs de Bohm comme Chris Dewdney, Basil Hiley et Peter Holland. Depuis les années 1990, les équipes dirigées par Detlef Dürr, à l'université de Munich, Sheldon Goldstein, à l'université Rutgers, et Nino Zanghì, à l'université de Gênes, ont également joué un rôle majeur. D'importants travaux ont ainsi porté sur la façon dont les probabilités des résultats observés et le formalisme habituel de la mécanique quantique émergent de la théorie dBB, sur la limite classique (le passage d'un comportement quantique à un comportement classique) de celle-ci, sur les propriétés d'un ensemble de particules identiques...

UNE ONDE PILOTE

La mécanique bohmienne suppose que les particules ponctuelles, dont la position est bien définie à tout instant comme en mécanique classique, sont guidées par une onde dite « pilote », dont l'évolution obéit à l'équation de Schrödinger comme en mécanique quantique usuelle. Plus précisément, la mécanique bohmienne stipule que le vecteur vitesse v d'une particule donnée est déterminé par la fonction d'onde via l'équation $v = \text{grad } S/m$, où m est la masse de la particule et S est la phase de la fonction d'onde qui, de façon générale, s'écrit $\psi = A e^{iS}$, où A et S sont des fonctions à valeurs réelles des coordonnées d'espace et de temps. Le symbole grad désigne le gradient : $\text{grad } S$ est, dans l'espace, le vecteur ayant pour composantes $\partial S/\partial x$, $\partial S/\partial y$, et $\partial S/\partial z$, les dérivées de S par rapport aux coordonnées spatiales x , y et z de la particule considérée ; ce vecteur pointe dans la direction orthogonale aux fronts d'onde, les surfaces constituées des points où la phase S a la même valeur.

W. S.

Comme je l'ai indiqué plus haut, la mécanique bohmienne reproduit les prédictions habituelles de la mécanique quantique. L'un des reproches souvent entendus est qu'elle ne fournit pas de nouvelles prédictions. Mais les prédictions de la mécanique quantique sont parfaitement vérifiées par l'expérience, et c'est déjà très bien que la mécanique bohmienne les reproduise. De plus, contrairement au cas de la mécanique quantique habituelle, elle fournit une image claire et sans ambiguïté du monde, et la mesure n'y soulève aucun problème conceptuel.

Par ailleurs, pour les calculs pratiques, les détails des trajectoires bohmiennes n'ont généralement pas d'importance. Dans l'expérience de la double fente, par exemple, il n'est pas nécessaire de calculer les trajectoires réelles des particules pour calculer la figure d'interférence : la mécanique quantique habituelle est tout à fait appropriée.

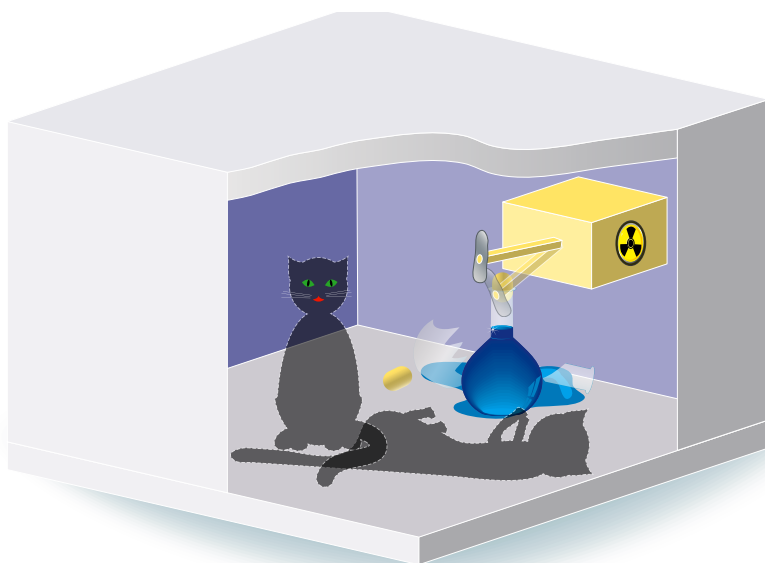
Mais d'autres questions, comme la limite classique, c'est-à-dire le passage d'un comportement quantique à un comportement classique, exigent de la clarté conceptuelle. En mécanique bohmienne, cette question est bien posée, et la limite classique correspond tout simplement à la situation où les trajectoires des particules (ou des degrés de liberté collectifs pertinents, tels que le centre de masse) sont très proches de celles prédites par la mécanique classique.

Un autre exemple de questions pour lesquelles la mécanique quantique orthodoxe paraît mal adaptée est la mesure du temps requis pour sortir d'un domaine ou pour franchir un obstacle (en raison de l'absence dans son formalisme d'un « opérateur temps », alors qu'il existe, par exemple, un « opérateur position ») ; or de telles questions peuvent être posées et abordées directement en mécanique bohmienne.

Il est fréquent que des versions différentes d'une même théorie conduisent à différents outils permettant de résoudre des problèmes concrets. C'est le cas avec la version bohmienne et la version orthodoxe de la mécanique quantique. Des applications concrètes de la théorie dBB ont ainsi vu le jour au cours des vingt dernières années.

DES APPLICATIONS À DIVERS PROBLÈMES DE PHYSIQUE

C'est le cas notamment en chimie quantique, où l'on étudie souvent des systèmes à grand nombre de particules (les électrons d'un atome ou d'une molécule), des systèmes trop complexes pour être décrits de façon mathématiquement exacte et pour lesquels il faut généralement utiliser des techniques numériques. Or la mécanique bohmienne en a inspiré dans ce domaine de nouvelles, plus efficaces que celles fondées sur la mécanique quantique orthodoxe.



LE CHAT DE SCHRÖDINGER

La célèbre expérience de pensée du physicien autrichien Erwin Schrödinger, imaginée en 1935, met en exergue le caractère problématique de certains concepts de la physique quantique. Un chat est enfermé dans une pièce contenant un dispositif où un atome a deux états quantiques de base possibles, E_1 et E_2 . On suppose que s'il est dans l'état E_2 , le dispositif déclenche la libération d'un poison mortel. Il est possible de placer cet atome dans une superposition $E_1 + E_2$ de ses deux états de base ; dans ce cas, les lois quantiques indiquent que l'état du chat devrait être une superposition de son état vivant et de son état mort. Or une telle superposition semble impossible ou dépourvue de sens pour un système macroscopique tel que le chat – lequel pourrait d'ailleurs être remplacé (toujours par la pensée !) par un expérimentateur humain.

Une autre application est la modélisation des interactions d'un système quantique avec un système classique, par exemple la diffusion de particules (quantiques) sur la surface d'un solide. En principe, il faudrait utiliser la mécanique quantique pour décrire la surface, mais c'est irréalisable en pratique. On se contente donc d'une représentation classique de cette surface. Au début des années 2000, des travaux de divers chercheurs (notamment Oleg Prezhdo et Craig Brooksby, à l'université de Washington, Étienne Gindensperger, Christoph Meier et Alberto Beswick, à l'université Paul-Sabatier de Toulouse) ont montré qu'une modélisation où l'on couple le système classique à des particules décrites par la mécanique bohmienne produit des résultats plus précis qu'avec des couplages similaires fondés sur la mécanique quantique habituelle.

Comme je l'ai indiqué, la mécanique bohmienne est une théorie non relativiste. Il faudrait donc la généraliser pour tenir compte des lois de la relativité restreinte d'Einstein. Avec la mécanique quantique ordinaire, cette tâche difficile a été entreprise il y a longtemps. Son résultat a été la théorie quantique des champs, qui est aujourd'hui le cadre général permettant de décrire le monde des particules subatomiques et de leurs interactions.

L'une des principales différences avec la mécanique quantique est qu'en théorie quantique des champs, le nombre de particules n'est

pas fixe : il peut y avoir création ou annihilation de particules. Afin de rendre compte de ces processus de création et d'annihilation, la dynamique bohmienne doit être modifiée. Pour les particules de la classe des fermions (particules dont le spin, dans les unités atomiques, est demi-entier : électron, proton, quarks...), essentiellement deux procédures différentes ont été proposées, la première en 2004 par Detlef Dürr, Sheldon Goldstein, Roderich Tumulka et Nino Zanghì, la seconde en 2007 par Samuel Colin et moi.

Pour les bosons (particules dont le spin est un nombre entier, comme le photon ou la particule de Higgs), en revanche, on n'a pas trouvé de moyen naturel d'introduire des particules ponctuelles. Comme l'avait déjà montré Bohm, il semble qu'il faille décrire fondamentalement les bosons non pas par des particules, mais par des champs dont l'interaction avec les fermions donnerait lieu, en apparence, à la création et à l'annihilation de particules bosoniques.

Mais une théorie plus profonde pourrait mettre en jeu une autre réalité. Par exemple, dans le cas de la théorie des cordes, la formulation bohmienne naturelle ne fait pas intervenir des particules ou des champs, mais de minuscules cordes unidimensionnelles.

Un autre aspect important de la théorie quantique des champs est que celle-ci intègre les symétries imposées par la relativité restreinte (symétries qui traduisent l'invariance de la vitesse de la lumière et des expressions des lois physiques quand on passe d'un référentiel à un autre, en mouvement rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre). Or l'une des conséquences de la relativité restreinte est qu'il



Une théorie bohmienne compatible avec la relativité d'Einstein est à élaborer

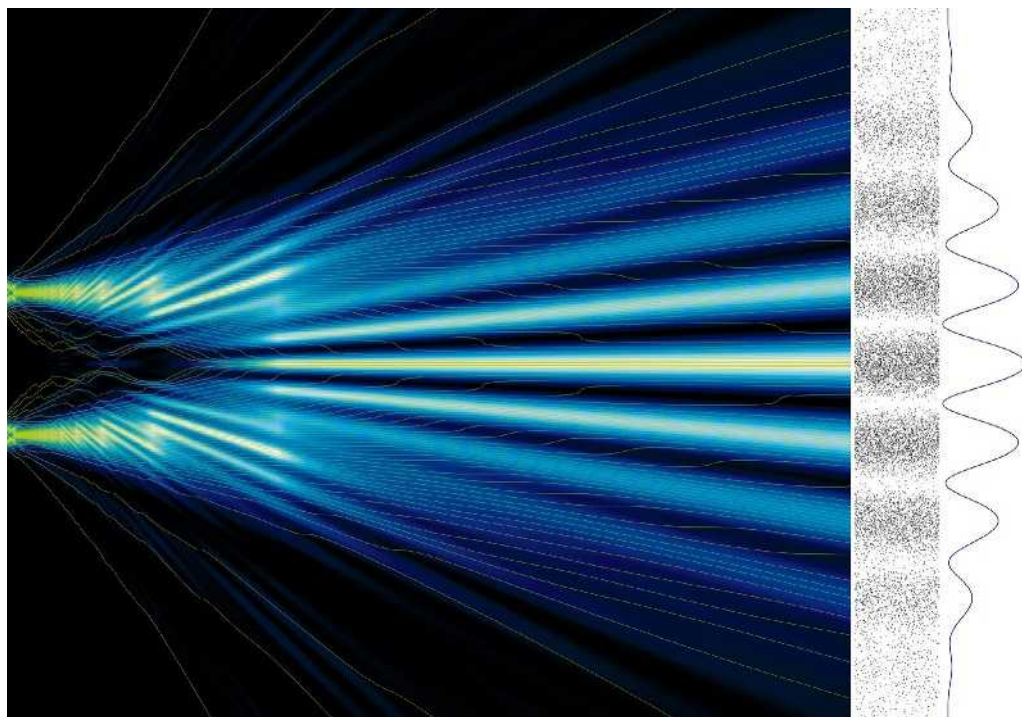


n'existe pas de notion absolue de simultanéité : deux événements qui sont simultanés pour un observateur ne le seront pas pour un observateur en mouvement par rapport au premier.

Mais comment accorder cette relativité de la simultanéité à la non-localité, une caractéristique qui semble indésirable, mais inhérente à la physique quantique (voir l'encadré page 39) ? ➤

L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG AVEC DES ÉLECTRONS

Cette figure indique la densité de probabilité de présence (élevée en clair, faible en sombre) d'électrons traversant de gauche à droite un écran percé de deux fentes voisines (tout à gauche de l'image). Les trajectoires de quelques électrons, telles qu'on les calcule par la mécanique bohmienne, sont tracées en jaune. Dans la partie droite de la figure, chaque point correspond à l'impact d'un électron sur l'écran de détection; la courbe indique la densité des impacts. La densité de probabilité calculée par la mécanique bohmienne est exactement la même que celle calculée par la mécanique quantique usuelle et reproduit très bien les observations.



➤ La non-localité correspond à une influence instantanée d'un endroit à un autre; mais alors, dans quel référentiel cette influence est-elle instantanée? Existe-t-il un tel référentiel privilégié, auquel cas les symétries relativistes seraient violées? Ces questions difficiles ont été beaucoup étudiées, mais n'ont pas encore de réponse satisfaisante. De toute évidence, la non-localité ne fait pas bon ménage avec la relativité. Et il faut bien voir que ce problème se pose dans n'importe quelle version de la théorie quantique des champs, qu'il s'agisse de la version orthodoxe ou d'une autre, telle que la théorie bohmienne.

GRAVITATION QUANTIQUE À LA BOHM

Un autre domaine d'application de la théorie dBB, qui fait l'objet de mes recherches actuelles, est celui de la gravitation quantique et de ses conséquences en cosmologie. La quête d'une théorie quantique de la gravitation est l'un des principaux problèmes ouverts en physique théorique. Selon la théorie de la relativité générale d'Einstein, la gravitation correspond à une courbure de l'espace-temps. Mais cette théorie décrit comment l'espace-temps interagit avec la matière représentée de façon classique, et non quantique. Que change le fait que la matière doive obéir aux lois quantiques? L'espace-temps lui-même (donc la gravitation) doit-il obéir à des lois quantiques? Et si oui, lesquelles?

Les physiciens ont fait plusieurs propositions d'une théorie quantique de la gravitation. Citons la gravitation quantique dite canonique,

la gravitation quantique à boucles et la théorie des cordes. La gravitation quantique canonique est construite en appliquant à la relativité générale d'Einstein les techniques habituelles utilisées pour passer d'un champ classique (tel que le champ électromagnétique) à sa version quantique. Mais la théorie ainsi obtenue, où l'équation d'onde résultante est l'équation dite de Wheeler-DeWitt, présente des défauts de

Une version bohmienne de la gravitation quantique serait d'un grand intérêt

nature mathématique qui semblent insurmontables. On est alors conduit à construire, à partir de versions à symétrie réduite de la relativité générale, des modèles simplifiés, dans l'espoir que ces derniers permettent de saisir certaines des propriétés de la théorie complète.

La gravitation quantique à boucles résulte également de la quantification de la théorie d'Einstein, mais en procédant sur des variables

différentes. Elle donne aussi naissance à une sorte d'équation de Wheeler-DeWitt. Avec une différence importante par rapport à la gravitation quantique canonique: l'espace-temps y apparaît discrétisé, et non continu. Quant à la théorie des cordes, où les entités élémentaires ne sont pas des particules ponctuelles mais des cordes unidimensionnelles, elle ne découle pas de la quantification de la théorie d'Einstein, mais plutôt de la tentative d'unifier toutes les interactions fondamentales connues.

Il n'existe pas à ce jour d'indices expérimentaux ou observationnels permettant de départager ces théories. De plus, il n'est pas facile de déterminer ce que des théories comme la gravitation quantique canonique ou la gravitation quantique à boucles prévoient. Tout d'abord, elles héritent du problème de la mesure déjà posé en mécanique quantique non relativiste, ce qui se révèle particulièrement gênant quand on cherche à appliquer la gravitation quantique à la cosmologie. Dans ce cas, en effet, le système d'intérêt est l'Univers entier, et il n'existe alors pas d'observateurs extérieurs effectuant des mesures. De plus, il n'y a qu'un seul Univers, et non un ensemble d'entre eux pour lequel les probabilités des différents résultats pourraient être une notion pertinente.

DES PRÉDICTIONS DIFFÉRENTES EN COSMOLOGIE

Et au problème de la mesure s'ajoute le problème du temps. D'après l'équation de Wheeler-DeWitt, la fonction d'onde de l'Univers n'évolue pas dans le temps. Dès lors, comment l'évolution cosmologique constatée découle-t-elle de cette équation? Comment dire, à partir de cette équation, si l'Univers est en expansion ou en contraction?

Depuis les années 1990, Jeroen Vink, aux Pays-Bas, Nelson Pinto-Neto, au Brésil, et plusieurs autres chercheurs ont développé et étudié une version bohmienne de la gravitation quantique canonique. Et j'ai moi-même élaboré vers 2017 une version bohmienne de la gravitation quantique à boucles. Dans ces versions, on a aussi une géométrie de l'espace-temps, mais la déformation et l'évolution de l'espace-temps sont déterminées par la fonction d'onde. Et cela d'une telle façon que même si cette fonction d'onde est statique, l'espace-temps se déforme au cours du temps.

Généralement, la dynamique bohmienne de l'espace-temps diffère de celle prescrite par la relativité générale. Il est apparu par exemple que, contrairement à ce qui se passe dans cette dernière, il est possible d'éviter les singularités d'espace-temps comme celles du début du Big Bang ou de la fin du Big Crunch (l'inverse du Big Bang). Par ailleurs, plusieurs chercheurs

ont envisagé la possibilité que l'«énergie sombre», une énergie de nature inconnue qui expliquerait l'accélération de l'expansion de l'Univers, n'existe pas et que l'expansion accélérée résulte simplement de la dynamique quantique du cosmos. Dans le développement le plus récent de ce programme, Thibaut Demaerel, Christian Maes et moi, à la KU Leuven, avons montré que l'on peut obtenir, sans introduire d'énergie sombre, une telle expansion de l'Univers dans un modèle simplifié de gravitation quantique canonique intégrant une dynamique bohmienne.

Il s'agit là de pistes intéressantes et prometteuses, tant pour la cosmologie que pour la théorie quantique. Alors que la formulation quantique habituelle ne fournit pas aux cosmologistes d'indications claires, une version bohmienne de la gravitation quantique conduira peut-être à de nouvelles prédictions, par exemple sur les fluctuations de température du fond diffus cosmologique, ce rayonnement micro-onde qui baigne l'Univers et qui est un vestige de ses débuts.

Confrontées aux observations, ces prédictions pourraient nous renseigner à la fois sur l'évolution de l'Univers et sur la validité de la théorie quantique utilisée. Ce qui serait d'un grand intérêt puisque, dans les autres domaines, les prédictions de la théorie bohmienne sont les mêmes que celles de la théorie quantique habituelle. ■

NON-LOCALITÉ

Le physicien nord-irlandais John Bell, qui s'intéressait beaucoup aux fondements de la mécanique quantique, était un fervent partisan de la théorie dBB. Mais le fait que la théorie soit manifestement non locale le gênait. Autrement dit, le mouvement d'une particule peut dépendre du mouvement des autres particules, quelle que soit la distance entre elles. Or cela semblait être une caractéristique indésirable, car on pensait généralement que la nature devait être locale, les interactions ne pouvant pas se propager plus rapidement que la lumière.

Bell a tenté, sans succès, de modifier la théorie pour la rendre locale. Qui plus est, il a pu montrer qu'on ne pouvait pas le faire. Il a même prouvé, en 1964, que si certaines prédictions de la mécanique quantique usuelle sont justes, alors il est impossible de conserver la localité. Dans la nature, les systèmes distants peuvent présenter des corrélations que toute théorie locale est incapable d'expliquer.

Malheureusement, et à la frustration de Bell, ce résultat est souvent mal compris. Par exemple, on trouve facilement des affirmations selon lesquelles, d'après les théorèmes de Bell, une description plus riche (en introduisant des variables «cachées») que celle de la mécanique quantique ordinaire impliquerait la non-localité. Ces affirmations sont fausses. La mécanique quantique orthodoxe est non locale, tout comme l'est la mécanique bohmienne, et les travaux de Bell montrent en fait que toute théorie visant à décrire avec succès la nature est condamnée à être non locale.

W. S.

BIBLIOGRAPHIE

X. Oriols et J. Mompart (éd.), **Applied Bohmian Mechanics**, Jenny Stanford Publishing (2^e édition), 2019.

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences (2^e édition), 2017.

T. Norsen, **Foundations of Quantum Mechanics : An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory**, Springer, 2017.

J. Bricmont, **Quantum Sens and Nonsense**, Springer, 2017, traduction française à paraître chez Odile Jacob, 2020.

W. Struyve, **Pilot-wave approaches to quantum field theory**, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 306, article 012047, 2011.

D. Dürr et S. Teufel, **Bohmian Mechanics**, Springer, 2009.

L'ESSENTIEL

> La chlordécone a été utilisée comme insecticide dans les bananeraies de la Guadeloupe et de la Martinique jusqu'en 1993. Elle a notamment contaminé des sols et la population elle-même.

> Cette molécule est reconnue pour sa toxicité depuis les années 1970. Sa stabilité laissait à penser qu'elle persisterait dans les sols antillais pendant des siècles.

> Des études récentes montrent que la dégradation de la chlordécone, probablement induite par des bactéries, se produit déjà aux Antilles.

> Cette dégradation engendre une variété de produits dont la toxicité et le devenir dans l'environnement restent à étudier.

LES AUTEURS



ORIANE DELLA-NEGRA ET PIERRE-LOÏC SAAÏDI
doctorante et maître de conférences
à l'UMR Génomique métabolique
(CNRS, CEA/IBFJ/Genoscope,
université d'Évry-Val-d'Essonne
– université Paris-Saclay)

La chlordécone, un polluant en transformation

On considérait comme indestructible la chlordécone, un insecticide toxique utilisé pendant plus de vingt ans dans les bananeraies des Antilles françaises. On vient de découvrir qu'en fait une dégradation naturelle est à l'œuvre. Reste à étudier les produits de transformation mis en évidence.

Le 2 décembre 2019, la commission d'enquête parlementaire a rendu public son rapport sur l'impact économique, sanitaire et environnemental de l'utilisation de la chlordécone aux Antilles françaises. Ses conclusions aboutissent à la mise en cause de l'État français dans ce « désastre sanitaire et environnemental ». Interdite aux États-Unis dès 1978, la chlordécone, un pesticide organochloré, a été utilisée dans les bananeraies de Guadeloupe et de Martinique jusqu'en 1993.

Ce perturbateur endocrinien persiste aux Antilles et contamine toute la chaîne alimentaire, plus de vingt-cinq ans après son interdiction. L'exposition chronique de la population antillaise à la chlordécone a été reliée à une surincidence de plusieurs pathologies (cancer de la prostate, prématurité et troubles de développement cognitif et moteur chez les nourrissons). La commission souligne d'ailleurs une prise de conscience trop tardive de l'État et la mise en place d'actions publiques trop lentes qui ne répondent pas aux problématiques de cette crise,

où s'invitent des aspects socioéconomiques et politiques liés à l'insularité de ces territoires et à leur passé colonial. L'enjeu est aujourd'hui de trouver des pistes pour faire face à cette pollution persistante. Or nos travaux ont récemment montré qu'une dégradation naturelle de la chlordécone est à l'œuvre aux Antilles, processus qu'il est intéressant d'explorer et qui apporte une note d'espoir.

L'histoire de la chlordécone démarre en 1958, quand la société Allied Chemical lance sur le marché américain le Kepone, constitué à 94,5% de chlordécone. En 1972, après plusieurs refus, l'usage d'une formulation commerciale contenant 5% de chlordécone est finalement accordé de manière provisoire aux Antilles pour lutter contre le charançon du bananier.

Or en 1975, l'usine de Hopewell, aux États-Unis, où le Kepone est produit, subit une grave pollution, un des plus importants et coûteux désastres environnementaux pour l'époque. Des troubles neurologiques sont constatés parmi les ouvriers de l'usine, dont les analyses de sang ont révélé un taux élevé de chlordécone. Des prélèvements ont alors montré une contamination >

Pour lutter contre les charançons, les exploitants des bananeraies de Guadeloupe et de la Martinique ont utilisé jusqu'en 1993 de la chlordécone, un pesticide persistant et reconnu comme toxique, cancérigène probable d'après le Circ, et dangereux pour l'environnement.