

interpréter la physique quantique dans le sens des idées d'Einstein. En particulier, il n'y a aucun moyen de compléter la physique quantique en termes de variables cachées locales.

Ce résultat a été une grande avancée dans la compréhension de la physique quantique. Néanmoins, de nombreuses difficultés conceptuelles subsistent que des physiciens et des philosophes continuent d'explorer. Pour certains, la physique quantique, dans son interprétation par l'école de Copenhague, est moins une théorie physique qu'un ensemble efficace de « recettes » pour calculer des résultats de mesures. Mais, comme le soulignait déjà Bell, cet ensemble de recettes n'en est pas moins, lui-même, problématique. Pourquoi l'observateur joue-t-il un rôle si important ? Pourquoi l'acte de la mesure provoque-t-il l'effondrement de la fonction d'onde en l'une de ses composantes ? Ou encore, pourquoi un système macroscopique ne manifeste-t-il jamais une superposition d'états ?

Depuis plusieurs décennies, les physiciens tentent de dépasser l'interprétation de

Copenhague pour traiter ces difficultés. En explorant plusieurs pistes.

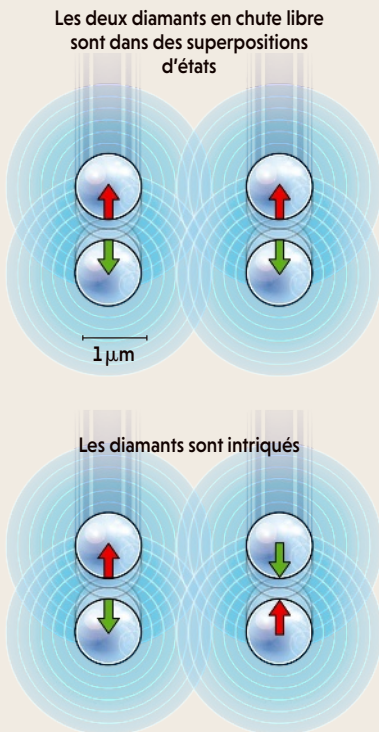
Évoquons les quatre directions principales explorées pour résoudre les difficultés conceptuelles de la physique quantique. Une première approche reprend le principe des variables cachées, c'est-à-dire l'idée que la physique quantique est incomplète et qu'il existe des variables structurellement impossibles à mesurer. Pour être cohérente avec les phénomènes d'intrication (et donc avec les expériences d'Alain Aspect), la dynamique de ces variables doit bien sûr être non locale.

ONDES PILOTES ET MULTIVERS

La meilleure des théories à variables cachées est la théorie de Broglie-Bohm, d'abord suggérée par le physicien français Louis de Broglie en 1927 sous le nom de théorie de l'onde pilote, en s'inspirant du principe de la dualité onde-corpuscule qu'il avait énoncé quelques années plus tôt. Elle a ensuite été précisée en 1952 par l'Américain David Bohm. Dans ce cadre, chaque particule est décrite par sa position dans l'espace et par une onde associée, qui est la variable cachée et qui guide le mouvement de la particule. Dans cette théorie, réaliste au sens d'Einstein, l'évolution est continue sans effondrement de la fonction d'onde. L'indéterminisme quantique est alors simplement la manifestation de notre ignorance des variables cachées.

Une deuxième voie, particulièrement osée, est l'interprétation des mondes multiples, qui repose sur des idées publiées en 1956 par le physicien américain Hugh Everett. À chaque mesure, toutes les prédictions possibles se réalisent, mais dans des mondes différents. Il n'y aurait donc jamais d'effondrement de la fonction d'onde. La réalité serait beaucoup plus vaste que celle à laquelle nous avons accès. L'indéterminisme serait la manifestation de notre ignorance sur notre localisation dans cette réalité élargie : toutes les prédictions de la théorie seraient réalisées, mais nous occuperions une certaine « branche » de la réalité, de sorte que nous ne verrions qu'un seul des résultats parmi tous ceux *a priori* possibles.

Une troisième possibilité est que la physique quantique n'est pas cohérente en soi, car elle ne serait qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale à la dynamique complexe et non linéaire que nous n'avons pas encore directement observée. Cette dynamique est réalisable de différentes façons. Par exemple, les physiciens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber ont proposé en 1986 un mécanisme, dit « de réduction dynamique », qui provoque de façon aléatoire l'effondrement de la fonction d'onde. Pour une particule individuelle, l'effondrement de la fonction d'onde serait un événement très rare, qui se manifesterait en >



UNE SECONDE EXPÉRIENCE : EN CHUTE LIBRE
Deux équipes (d'une part, Sougato Bose et ses collègues, d'autre part, Chiara Marletto et Vlatko Vedral) proposent d'essayer d'intriquer des électrons dans deux diamants en chute libre distants de 100 micromètres. Les particules n'interagiraient que par le champ gravitationnel des deux diamants. Une corrélation dans les propriétés des électrons confirmerait l'établissement de l'intrication et la nature quantique de la gravitation.



Les expériences d'Alain Aspect sur l'intrication quantique ont connu de nombreuses améliorations et variantes, dont certaines sont réalisées depuis l'espace. En 2017, un satellite chinois, Micius, a servi de source pour des particules intriquées émises vers deux observatoires distants de 1200 kilomètres.

➤ moyenne une fois tous les milliards d'années. Mais sur un objet macroscopique contenant de l'ordre de 10^{23} particules, on aurait souvent des effondrements, de sorte qu'un état non superposé se dessinerait.

La quatrième possibilité, enfin, est la plus chère à l'un d'entre nous (Carlo Rovelli), qui l'a proposée en 1994. L'idée est de prendre la physique quantique comme elle est, c'est-à-dire sans y ajouter de variables cachées et sans faire appel à des mondes multiples ou à une dynamique non observée. Les aspects apparemment paradoxaux de la théorie seraient engendrés par le fait qu'on oublie de tenir compte du caractère relatif de toutes les grandeurs physiques qui décrivent un système. Elles sont toujours définies relativement à un autre système physique (de la même façon que la vitesse d'un objet est définie seulement par rapport à un autre objet). Cette interprétation de la physique quantique, nommée «interprétation relationnelle», s'inspire de la relativité restreinte. Ainsi, si pour un observateur, un système est dans un seul état suite à l'effondrement de la fonction d'onde, il pourrait être encore dans une superposition d'états pour un autre observateur. Les états ne décrivent pas le système observé lui-même, mais une relation entre le système et l'observateur.

Ces quatre pistes pour mieux comprendre la physique quantique ont néanmoins toutes un coût conceptuel élevé: chacune exige de renoncer à quelque chose qui n'est pas facile à abandonner. La théorie de Broglie-Bohm se heurte à certaines difficultés quand on veut l'associer à la théorie de la relativité restreinte et demande d'accepter qu'une partie de la réalité soit en principe inobservable. L'interprétation des

mondes multiples demande d'imaginer qu'il y aurait une infinité inaccessible de couches de réalité, sans compter qu'il n'est pas aisé de relier ces mondes multiples à notre expérience. Les théories de réduction dynamique impliquent un phénomène d'effondrement spontané de la fonction d'onde que l'on n'a pas observé dans les expériences. L'interprétation relationnelle nous empêche de décrire le monde physique dans sa globalité: on peut seulement décrire une partie du monde par rapport à une autre.

L'ÉPREUVE DE LA GRAVITÉ QUANTIQUE

Les discussions entre les théoriciens qui défendent l'une ou l'autre de ces pistes (ou d'autres encore) sont souvent très animées. Cela dit, comme le conseillait le physicien américain Richard Feynman: «Les lois plus générales de la physique admettent souvent des formulations et des interprétations très différentes; mais un bon théoricien doit savoir les utiliser toutes, car nul ne sait laquelle se révélera la plus efficace.» Cette attitude est peut-être la plus recommandable vis-à-vis des difficultés conceptuelles de la physique quantique. Seule la suite de l'histoire pourra nous dire quelle est en définitive l'interprétation qui se montrera la plus efficace et utile. D'autant qu'il est un domaine d'étude qui permettrait de mettre à l'épreuve les différentes interprétations de la physique quantique. C'est celui qui vise à construire une théorie quantique de la gravitation.

Au xx^e siècle, les chercheurs se sont rapidement aperçus que les deux grandes avancées de la physique, la physique quantique et la relativité générale, sont difficiles à concilier. Si, dans la plupart des cas, il est effectivement possible de ne considérer qu'une seule de ces théories, l'absence d'une théorie quantique de la gravitation nous empêche de comprendre certains phénomènes réels, comme ce qui se passe au cœur des trous noirs ou au début de l'Univers.

Les deux pistes les plus prometteuses pour élaborer une théorie de «gravité quantique» sont la théorie des cordes et celle de la gravitation quantique à boucles. Si la première suggère que les particules ne sont pas ponctuelles, mais de minuscules cordes vibrantes, la seconde postule que l'espace-temps lui-même est sujet à tous les phénomènes typiques de la physique quantique, avec la conséquence, en particulier, que l'espace ne serait pas continu, mais discrétisé: aires et volumes deviennent des grandeurs quantifiées, qui ne peuvent être arbitrairement petites.

Ces théories ont connu d'importants développements s'étendant parfois au-delà de la seule question de la gravité quantique, avec des retombées, par exemple, en mathématiques ou en physique de la matière condensée.

Il y a encore une dizaine d'années, les scientifiques pensaient que les phénomènes de gravitation quantique étaient hors de portée des expériences, de sorte qu'il était impossible d'obtenir le moindre indice empirique permettant d'en savoir plus sur la nature réelle de la gravité quantique. Or cette impression était en partie fautive, comme l'ont montré plusieurs expériences et observations récentes.

Au LHC (le Grand collisionneur de hadrons), au Cern, les physiciens accélèrent des protons à des vitesses proches de celle de la lumière pour les faire se percuter frontalement et ainsi produire des collisions à haute énergie d'où émergent des particules massives de très courte durée de vie. C'est ainsi qu'ils ont confirmé l'existence du boson de Higgs, en 2012, pièce jusque-là manquante du modèle standard de la physique des particules. Ce modèle, développé à partir des années 1960, décrit les particules fondamentales et leurs interactions, mais il ne tient pas compte de la gravitation et laisse ouvertes certaines questions théoriques.

CORDES ET SUPERSYMETRIE

Une grande partie de la communauté scientifique était convaincue, à partir d'arguments théoriques, qu'il était possible d'étendre de façon très simple et naturelle le modèle standard grâce à la supersymétrie (une symétrie hypothétique entre particules de spin entier et particules de spin demi-entier). Cette extension du modèle standard implique l'existence de nouvelles particules que l'on pensait être en mesure de produire et d'observer au LHC. En outre, la théorie des cordes repose sur la supersymétrie et une détection de la supersymétrie au LHC aurait été une indication intéressante en faveur de cette théorie. Or une telle détection n'a pas eu lieu. Mais déjà, les scénarios supersymétriques les plus naturels ont été exclus. Dès lors, l'absence de supersymétrie au LHC n'est pas une bonne nouvelle expérimentale pour la théorie des cordes.

La théorie des cordes et la gravitation quantique à boucles ne sont pas les seules pistes pour une gravité quantique. D'autres ont été explorées et ont parfois été mises en grande difficulté par l'expérience. Par exemple, en 2009, Petr Hořava, de l'université de Californie à Berkeley, a proposé un modèle de gravité quantique qui brise l'invariance de Lorentz, la symétrie mathématique par laquelle se traduit l'absence de référentiel privilégié en relativité restreinte.

Motivés par ces spéculations, les astronomes ont cherché les signes d'une brisure de l'invariance de Lorentz dans l'Univers, par

exemple dans la mesure de la vitesse de rayons cosmiques. Les résultats ont été nets : non seulement on n'a trouvé aucune indication d'une brisure de cette invariance, mais celle-ci a été confirmée jusqu'à des échelles d'énergie supérieures à celles qui sont caractéristiques de la gravitation quantique. La gravité de Hořava et toute la classe de modèles prédisant une brisure de l'invariance de Lorentz sont ainsi mises en difficulté.

Depuis 2015, une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers s'est ouverte. La détection par les collaborations *Ligo* et *Virgo* d'ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, ont été une confirmation éclatante de la relativité générale. Mais elle a fait davantage. En 2017, une détection simultanée des ondes gravitationnelles et électromagnétiques produites par la coalescence de deux étoiles à neutrons a montré que ces deux types d'ondes se propagent à la même vitesse (avec une très petite marge d'erreur). Ce résultat a mis en difficulté de nombreuses théories de gravité modifiée, concurrentes de la relativité générale.

Celles-ci avaient été proposées pour expliquer certaines observations comme l'expansion accélérée de l'Univers ou la matière noire, mais elles prévoient souvent que la vitesse des deux types d'ondes doit être différente. Encore une fois, la nature nous indique que certaines directions de recherche n'étaient pas les bonnes. Ce qui n'empêche pas que, pour le savoir, il fallait tout de même les explorer.

UNE VISION QUI SE PRÉCISE

Enfin, un résultat empirique important pour la gravité quantique vient de la cosmologie : la mesure de l'expansion accélérée de l'Univers. Cette dynamique est bien décrite par les équations de la relativité générale quand elles incluent une constante, la « constante cosmologique », qui prend dans ce cas une valeur positive. Mais dans la théorie des cordes, cette constante est naturellement négative, en contradiction avec les observations. Des tentatives d'adapter la théorie des cordes à une constante cosmologique positive existent, mais restent très controversées. Les expériences qui tranchent de façon définitive sont rares en science : en général, les hypothèses gagnent ou perdent en crédibilité en fonction de l'accumulation d'indices vérifiés ou non. Le fait que la constante cosmologique soit de signe contraire à ce que la théorie des cordes avait indiqué affaiblit la confiance que l'on peut avoir en cette piste.

Ces différents exemples de résultats observationnels et expérimentaux nous ont fait progresser sur ce que peut être la gravité quantique. ➤

L'INTRICATION EST UNE CONNEXION ÉTRANGE, SANS ÉQUIVALENT DANS LE MONDE ORDINAIRE