

COMMENT INTERPRÉTER LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?

La théorie quantique est constituée d'un ensemble de lois et de règles qui permettent de calculer avec succès et précision les probabilités d'obtenir différents résultats lors d'une expérience. Mais ce formalisme mathématique ne dit rien de la réalité sous-jacente. En particulier quelle est la nature, et la signification, de la fonction d'onde, l'un des ingrédients clés de la physique quantique ? Et de façon plus générale, que se passe-t-il dans

le monde quantique ? Qu'est-ce qui est réel ? Toute théorie de la gravitation de type semi-classique, qui concilierait la force gravitationnelle classique et les autres interactions fondamentales quantiques, exige de répondre à ces questions afin que l'on puisse définir une notion concrète de masse gravitationnelle. Il existe des dizaines d'interprétations de la physique quantique, plus ou moins radicales, dont je présente ici les plus abouties. **A. T.**

INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE



L'interprétation de Copenhague est l'approche historique, influencée par le physicien danois Niels Bohr et ses collaborateurs. Elle existe en de nombreuses variantes qui donnent à la fonction d'onde des statuts subtilement différents. Aujourd'hui, on identifie en général cette interprétation à celle figurant dans les manuels actuels, même si la version modernisée s'éloigne en partie des idées parfois confuses de Bohr. Dans cette interprétation dite orthodoxe, la question même du statut de la fonction d'onde n'est pas pertinente, car considérée

comme métaphysique plutôt que physique. Inspirée par la philosophie positiviste, l'approche orthodoxe considère en effet plus généralement qu'une théorie physique doit se limiter à prédire la statistique de résultats expérimentaux, toute autre discussion étant au mieux superflue, au pire hérétique. En 1989, le physicien américain David Mermin, critique de cette philosophie, a résumé l'interprétation de Copenhague en un slogan frustrant destiné aux étudiants : *shut up and calculate* (« tais-toi et calcule »).

Mais s'interdire par principe ou par modestie de poser la question de la réalité

ne la fait pas disparaître pour autant. Exaltés par le succès de leur approche minimaliste, certains fondateurs de la physique quantique ont fait l'erreur de la croire inévitable.

Le physicien allemand Werner Heisenberg, par exemple, écrivait en 1958 : « L'idée d'un monde extérieur objectif, dont les constituants élémentaires existent de la même façon que les pierres et les arbres existent, indépendamment de l'observation, est impossible. » Heureusement, les physiciens n'ont jamais prouvé une telle chose ! La question reste aujourd'hui plus que jamais ouverte.

MONDES MULTIPLES



Proposée par l'Américain Hugh Everett en 1956, l'interprétation des mondes multiples a pour objectif de donner une description du réel sans rien ajouter à la fonction d'onde ni modifier sa dynamique. La fonction d'onde décrit naïvement une réalité superposée, qui s'étend des particules microscopiques aux objets macroscopiques et même à l'Univers dans sa globalité. L'interprétation des mondes multiples décrète que les superpositions d'états sont réelles et que ces états existent simultanément : par exemple, à chaque mesure, un univers où le chat de Schrödinger est vivant se sépare d'un autre où il est mort. La théorie de la décohérence, développée par Dieter Zeh en 1970, explique que cette approche est en principe compatible avec l'impression de vivre dans un univers unique : une fois que deux univers deviennent suffisamment différents, ils n'interagissent plus entre eux, et évoluent de façon parallèle, invisibles l'un pour l'autre.

MÉCANIQUE BOHMIENNE



Introduite par le physicien américain David Bohm en 1952, mais ébauchée par le Français Louis de Broglie dès 1927, la mécanique bohmienne (ou théorie de l'onde pilote) est une reconstruction plutôt qu'une interprétation de la physique quantique. Dans cette théorie, la réalité est constituée de particules ponctuelles qui sont guidées de façon déterministe par la fonction d'onde, ou onde pilote, qui a un statut de loi fondamentale. Ce qui constitue la réalité est simple (des particules), et la subtilité quantique est tout entière dans la dynamique de l'onde pilote. En 1993, les physiciens Detlef Dürr, Sheldon Goldstein et Nino Zanghi ont établi que les prédictions empiriques de la mécanique bohmienne étaient identiques à celles de l'approche orthodoxe.

MODÈLES DE RÉDUCTION DYNAMIQUE



L'objectif des modèles de réduction dynamique est de modifier légèrement la dynamique de la fonction d'onde pour détruire les superpositions macroscopiques et ainsi forcer la réalité à choisir un unique univers, évitant ainsi l'explosion ontologique de l'interprétation des mondes multiples d'Everett. Le prix à payer est une infime modification des prédictions de la physique quantique, à ce jour non observée. Dans le modèle de Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, proposé en 1986, cette modification prend la forme d'un effondrement de la fonction d'onde, rare, aléatoire et spontané en un point de l'espace. La réduction de la fonction d'onde, qui se faisait uniquement lors de la mesure d'un observateur dans l'interprétation de Copenhague, se fait ici de façon naturelle. Dans cette approche, on peut postuler que ces instants de réduction, nommés *flashes*, où la particule se matérialise, sont la seule réalité.

QBISME



En 2001, Carlton Caves, Christopher Fuchs et Rüdiger Schack ont proposé le « QBisme » (ou bayésianisme quantique) : la fonction d'onde est un outil mathématique qui encode les croyances réévaluables de l'observateur sur le système quantique étudié. Une telle vision purement statistique de la fonction d'onde, bien que séduisante, est incompatible avec la non-localité quantique. Le prix à payer pour éviter la contradiction est de renoncer à la notion de réalité objective, même pour les résultats de mesures, qui deviennent eux aussi subjectifs, dépendants de l'observateur. Pour Christopher Fuchs, la réalité est participative : créée par et pour l'observateur. Anticipé par David Mermin, le QBisme demande d'accepter que « la Lune n'est démontrablement pas là quand on ne la regarde pas ».

> nécessaire? Et si oui, la gravité quantique est-elle la seule façon d'y parvenir? Des physiciens dont je fais partie explorent une autre piste qui consiste à concilier relativité générale et physique quantique sans pour autant imposer une formulation quantique de la gravitation.

Pour y parvenir, ils sont amenés à repenser les fondements de la physique quantique. Cette théorie a été développée à partir des années 1920 et 1930 sous l'impulsion de Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac et d'autres. Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, elle a conduit au développement de la théorie quantique des champs, qui intègre dans un ensemble cohérent le «modèle standard de la physique des particules», trois des quatre interactions fondamentales. Celles-ci sont l'électromagnétisme, qui agit entre photons et particules dotées d'une charge électrique, l'interaction forte, qui assure la cohésion des protons et des neutrons (les composants du noyau atomique), et l'interaction faible, qui se manifeste notamment dans la radioactivité bêta.

La quatrième interaction fondamentale, la gravitation, est décrite par une théorie très différente de la physique quantique: la relativité générale, introduite en 1915 par Albert Einstein. Dans cette théorie, la matière et l'espace-temps interagissent pour donner ce

dans les expériences menées dans les accélérateurs de particules.

DES THÉORIES INCOMPATIBLES

Ainsi, à son niveau le plus fondamental, l'Univers semble régi par deux mécaniques distinctes, deux ensembles de lois *a priori* incompatibles tant les notions et objets de ces théories sont différents. Dans leurs domaines d'application respectifs, ces deux théories sont d'une efficacité redoutable. Mais relativité générale et physique quantique ne semblent pas pouvoir être utilisées simultanément, en tout cas pas sans modification. Que se passe-t-il, par exemple, dans une situation où les effets dus à la physique quantique sont importants, mais où la force gravitationnelle domine? La réponse simple est que l'on ne sait pas. Le problème n'est pas que l'on ne sait pas effectuer les calculs, mais que l'on n'a même pas de cadre théorique approprié.

Les situations où il faudrait utiliser à la fois la physique quantique et la relativité générale sont rares dans la nature. Nous n'avons donc pas de résultats expérimentaux pour nous indiquer ce qui s'y passe. Cette situation est due au fait que la gravitation est une force extrêmement faible, qui ne domine les trois autres que pour les objets massifs et étendus. Or les effets quantiques tendent, eux, à se brouiller lorsque la taille des objets considérés augmente.

Néanmoins, au moins deux situations motivent la recherche d'une théorie quantique de la gravitation. Sans une telle théorie, il semble impossible de savoir ce qui s'est passé au début de l'Univers, au moment du Big Bang, ou au centre des trous noirs, ces objets d'une extrême densité qui déforment l'espace-temps au point que même la lumière ne peut s'en échapper. Dans ces deux cas, où la gravitation est très forte, la relativité générale prédit l'existence de singularités, c'est-à-dire des grandeurs physiques infinies. C'est là un signal clair que cette théorie est insuffisante, à elle seule, pour décrire ces situations: les effets de la physique quantique y sont importants et doivent être pris en compte.

Dès lors, comment construire une théorie globale combinant physique quantique et relativité générale? Une première piste naturelle est la «quantification canonique». Cette technique formelle permet de produire une version quantique d'une théorie physique dont on ne connaît qu'une formulation «classique». En 1927, le physicien anglais Paul Dirac a introduit et appliqué avec succès cette méthode à l'électromagnétisme. Avec ses raffinements successifs, cette approche a conduit à l'intégration des trois interactions non gravitationnelles au sein du modèle standard.

En 1967, les Américains John Wheeler et Bryce DeWitt ont tenté d'obtenir une formulation quantique de la gravitation en utilisant la quantification canonique. Mais cette approche >

A priori, sans une théorie quantique de la gravité, il semble impossible de savoir ce qui s'est passé au début de l'Univers

que l'on perçoit comme la force gravitationnelle: la matière (et l'énergie) courbe l'espace-temps et son mouvement est, en retour, déterminé par le «relief» de l'espace-temps.

La relativité générale est utile dans les situations où la gravitation domine, c'est-à-dire principalement en astrophysique et en cosmologie. La physique quantique, plus précisément le modèle standard, s'applique plutôt dans des situations où la gravitation est négligeable en comparaison des autres forces, ce qui est le cas