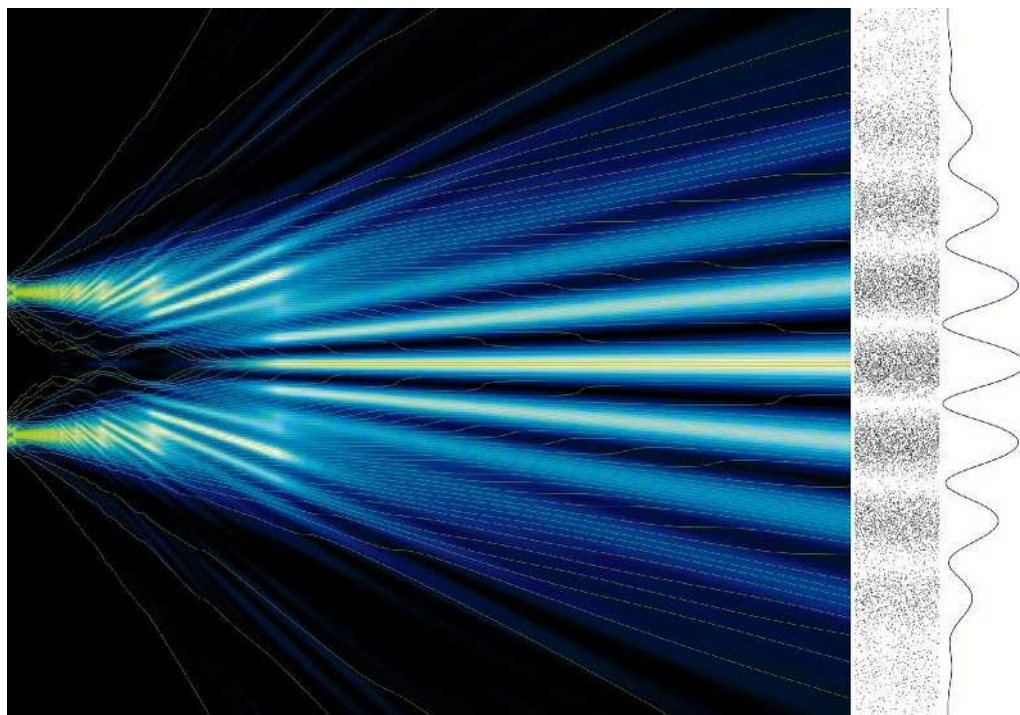


L'EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG AVEC DES ÉLECTRONS

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. Mompert (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.