

Les théories d'ondes pilotes en mécanique quantique

Les expériences avec les « marcheurs » réalisent à échelle macroscopique le guidage d'une particule par une onde. Cette situation est proche de celle qui a été imaginée dans les modèles dits d'onde pilote de la mécanique quantique. Il convient donc de rappeler brièvement l'histoire de ces modèles dits de « de Broglie-Bohm ». Bien que toujours étudiés, ces derniers sont aujourd'hui souvent considérés comme superflus par les spécialistes de la mécanique quantique. L'évolution historique de ces modèles est complexe, mais son examen montre qu'il convient de distinguer les modèles respectivement proposés par Louis de Broglie et par l'Américain David Bohm.

Le modèle de Bohm, proposé en 1952, est actuellement le plus connu. L'onde qui est solution de

l'équation de Schrödinger y joue le rôle de l'onde pilote. On peut, par une transformation mathématique, séparer cette équation en deux parties : une équation qui énonce la continuité des densités de probabilité, et une équation de mouvement qui détermine des trajectoires dans l'espace physique. Toutefois, le point de départ de cette approche étant l'équation de Schrödinger, on obtient seulement un autre aspect des ondes de probabilité. Cette approche associe des trajectoires de particules fictives à des flux de densités de probabilité. Ces particules sont ainsi soumises à un nouveau potentiel, dit potentiel quantique, qui a pour origine la fonction d'onde solution de l'équation de Schrödinger.

Le modèle de Bohm diffère profondément de ce qu'avait envisagé

de Broglie, qui souhaitait à la fois décrire le mouvement de particules individuelles dans l'espace physique et pouvoir en déduire les propriétés statistiques.

Dans des travaux de 1927 repris en 1953, de Broglie propose un modèle de double solution où coexistent deux champs d'onde. Le premier décrit le mouvement de l'objet individuel dans l'espace physique ; c'est un paquet d'ondes ayant en son centre une zone singulière caractérisée par une très grande amplitude et qui équivaut à une particule ponctuelle. Cette singularité est guidée par son paquet d'ondes, qui constitue une onde dite pilote. Cela confère à la dynamique de la singularité des propriétés ondulatoires qui induisent une non-localité spatiale. Ainsi,

dans ce modèle, les singularités (ou particules) peuvent être par exemple déviées et donner (statistiquement) une figure de diffraction ou d'interférence. La deuxième onde considérée par de Broglie est la fonction d'onde décrite par l'équation de Schrödinger. Cette onde, qui n'est pas physique au sens classique, traduit le comportement statistique des objets individuels conformément à l'interprétation usuelle de la mécanique quantique. Elle est associée à un comportement moyen et permet de prédire les propriétés statistiques observées.

Ces idées de de Broglie, comme celles de Bohm, sont toutefois restées marginales, l'approche usuelle paraissant suffire à l'interprétation des données expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

A. Eddi et al., Information stored in Faraday waves : the origin of a path memory, *J. Fluid Mech.*, vol. 674, pp. 433-463, 2011.

E. Fort et al., Path memory induced quantization of classical orbits, *PNAS*, vol. 107, pp. 17515-17520, 2010.

Y. Couder et E. Fort, Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, 154101, 2006.

S. Protière et al., Particle wave association on a fluid interface, *J. Fluid Mech.*, vol. 554, pp. 85-108, 2006.

Y. Couder et al., Walking and orbiting droplets, *Nature*, vol. 437, p. 208, 2005.

L. de Broglie, L'interprétation de la mécanique ondulatoire, *J. de Phys. et le radium*, tome 20, pp. 963-979, 1959.

L. de Broglie, La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement, *J. de Phys. et le radium*, série 6, tome 8, pp. 225-241, 1927.

Nos résultats expérimentaux suggèrent qu'un modèle de « double solution » du type proposé initialement par de Broglie (*voir l'encadré ci-dessus*) peut constituer la face cachée des comportements statistiques quantiques. Dans nos expériences, chaque marcheur individuel est guidé par une onde pilote. Les distributions statistiques obtenues lors de mesures intrusives font émerger des densités de présence possédant un caractère ondulatoire. Néanmoins, à l'échelle de l'expérience avec un marcheur unique, cette onde de densité, qui est l'analogue de l'onde solution de l'équation de Schrödinger, n'est jamais visible directement.

Un débat ancien qui n'est pas clos

Les observations suggèrent l'origine des propriétés statistiques des marcheurs. La dynamique due à l'existence de la mémoire de chemin tend à devenir chaotique dans tout environnement confiné, car cela induit une prolifération des sources secondaires. Le champ d'onde résultant est corrélé à la géométrie locale, dont il tend à exciter les modes propres de vibration. Des résultats préliminaires concernant les densités de probabilité de présence des marcheurs dans des cavités vont d'ailleurs dans ce sens. Ainsi, l'onde pilote peut être à l'origine d'un champ moyen reflé-

tant la géométrie de l'environnement et commun à toutes les réalisations.

La théorie standard de la mécanique quantique, développée par l'école de Copenhague, fournit un formalisme qui permet de prédire avec précision les résultats des mesures dans une très grande variété de situations. La dualité onde-particule y joue un rôle central.

En dépit de son efficacité, cette approche probabiliste de la mécanique quantique garde un caractère singulier. À l'opposé de tous les autres phénomènes de physique statistique et de façon surprenante, elle suppose qu'aucun mécanisme sous-jacent, même complexe, ne peut intervenir au niveau d'une particule individuelle et être responsable de ces comportements probabilistes. C'est précisément ce point d'achoppement qui faisait penser à de Broglie ou Einstein que la théorie quantique était fondamentalement incomplète.

Or il semble qu'aucune approche de la mécanique quantique n'ait envisagé un effet de mémoire. Comme nous l'avons vu, celui-ci induit dans le cas de nos marcheurs une non-localité spatio-temporelle qui est à l'origine d'un principe d'incertitude et d'une quantification. C'est pourquoi nous pensons que le débat ancien sur le caractère incomplet de la mécanique quantique dans son interprétation actuelle n'est pas clos. ■

Des ondes de matière pour tester les lois de l'Univers

Remi Geiger, Vincent Ménoret et Philippe Bouyer

Les atomes se comportent parfois comme des ondes, que l'on peut faire interférer. Cette propriété offre de nouveaux outils plus précis pour mesurer la gravité, se repérer en vol ou éprouver la théorie... d'Einstein.

La matière est une onde et les ondes sont composées de particules (photons pour la lumière, phonons pour le son) : c'est un des principes clefs de la mécanique quantique. Il prédit qu'à toute particule on peut associer une onde, et réciproquement. Ainsi, de même qu'on peut faire interférer des photons, mettant ainsi en évidence leur caractère ondulatoire, il est possible de réaliser des interféromètres avec des particules de matière.

Les physiciens américains Clinton Davisson et Lester Germer en ont fait la première démonstration en 1927 en reproduisant avec des électrons l'expérience des fentes de Young : un faisceau d'électrons est dirigé vers deux fentes très fines et très rapprochées. Derrière les fentes, un détecteur enregistre les points d'impact des électrons. Dans le cas de corpuscules, on s'attendrait à observer l'image des deux fentes sur l'écran, c'est-à-dire deux lignes. Or on obtient un tout autre résultat. Les impacts se répartissent selon un motif périodique – un interférogramme –, qui ne peut s'expliquer que par un phénomène d'interférences, et donc un comportement ondulatoire des électrons (voir la figure 1). Depuis cette preuve de principe, des interférences ont été observées avec des neutrons, des atomes et, récemment, des molécules organiques comportant plusieurs centaines d'atomes, confirmant que la mécanique quantique est encore valable à l'échelle macroscopique.

1. COMME UNE ONDE LUMINEUSE, un faisceau d'atomes traversant deux fentes étroites ne produit pas que deux lignes d'impacts sur un écran de détection placé derrière – projections des fentes sur l'écran –, mais plusieurs. Cette expérience fait ressortir le caractère ondulatoire des atomes. Chaque atome du faisceau a 50 pour cent de chances de passer par une fente, et 50 pour cent de chances de passer par l'autre, si bien que l'on ignore par quelle fente il passe. Il ne se comporte plus comme une particule, mais comme une onde qui se propage à travers les deux fentes et interfère en sortie. Les ondes de matière représentent les amplitudes de probabilité de présence des atomes.

