

- > 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.

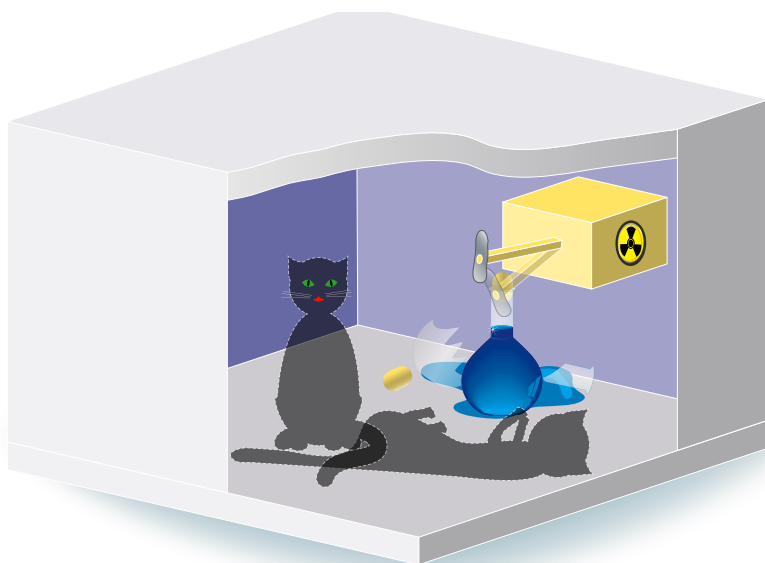
Mais d'autres questions, comme la limite classique, c'est-à-dire le passage d'un comportement quantique à un comportement classique, exigent de la clarté conceptuelle. En mécanique bohmienne, cette question est bien posée, et la limite classique correspond tout simplement à la situation où les trajectoires 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) ? ➤