

UNE THÉORIE LONGTEMPS DÉNIGRÉE

Inspiré par la suggestion d'Einstein selon laquelle la lumière ne devrait pas seulement être décrite par des ondes, mais aussi par des entités de nature corpusculaire, Louis de Broglie a, au milieu des années 1920, postulé que la matière devrait être décrite à la fois par des particules ponctuelles et des ondes, et que la vitesse d'une particule est liée à l'onde par la relation $v = \frac{h}{m\lambda}$, où m est la masse de la particule et λ la phase de l'onde (ce qui est l'équation bohmienne du mouvement, voir l'encadré page 36). Mais il n'a pas su donner d'équation régnant l'évolution de cette onde au cours du temps.

Une telle équation d'onde a été formulée par Schrödinger

en 1925, mais dans le cadre d'une théorie uniquement ondulatoire. Cela a posé la question de la prise en compte des détections localisées, comme celles de l'expérience des fentes de Young. Et c'est pour expliquer ces localisations de l'onde que l'Allemand Max Born et d'autres physiciens ont introduit la notion d'effondrement de la fonction d'onde.

De Broglie, lui, n'a pas renoncé aux particules. Peu après que Schrödinger a proposé son équation d'onde, de Broglie y a vu l'achèvement (provisoire) de son programme de description de la matière par des particules ponctuelles et des ondes, où la vitesse des particules est déterminée par la fonction d'onde, comme il l'avait proposé plus tôt. De Broglie présenta cette théorie au congrès Solvay de 1927, à Bruxelles, où les participants la discutèrent en détail. L'Autrichien Wolfgang Pauli le poussa dans ses retranchements à propos d'une expérience particulière, mais de Broglie n'y répondit pas de façon convaincante.

Cela a en partie conduit de Broglie à abandonner son



Au congrès Solvay de 1927 étaient notamment présents Louis de Broglie, Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger, Albert Einstein, Paul Dirac, Werner Heisenberg, Max Born...

programme, du moins jusqu'au début des années 1950...

jusqu'à ce que David Bohm redécouvre la théorie de De Broglie et la développe. Bohm a pu montrer l'équivalence de sa mécanique avec la mécanique quantique orthodoxe pour ce qui est des prédictions des résultats des mesures. Mais une grande partie des physiciens sont restés indifférents ou hostiles. Les déclarations de Robert Oppenheimer, l'ancien directeur de thèse de Bohm, sont assez éloquentes à cet égard : « Nous considérons qu'il s'agit de déviationnisme juvénile » et « si nous ne pouvons pas réfuter Bohm,

alors nous devons accepter de l'ignorer ».

Cette attitude consistant à ignorer les travaux de Bohm a prévalu jusqu'à une époque récente. Bien que ces travaux aient amené de Broglie à reprendre ce programme avec quelques étudiants, Bohm lui-même n'est guère revenu sur sa théorie après le début des années 1950. Ce n'est que dans les années 1980, après que des étudiants proches de Bohm ont obtenu des tracés de trajectoires relatives à l'expérience de la double fente, que l'intérêt pour la théorie dBB s'est ravivé.

W. S.

mécanique quantique n'a rien à voir avec les autres types d'ondes rencontrés en physique, les ondes électromagnétiques par exemple. Et c'est un aspect étrange de la mécanique quantique dont les physiciens eux-mêmes n'ont pas toujours conscience... Les ondes classiques se propagent dans l'espace physique, l'espace tridimensionnel qui est considéré comme l'arène où se déroulent les phénomènes. Or il n'est pas possible de considérer la fonction d'onde de la mécanique quantique comme une onde évoluant dans l'espace physique, même si l'expérience des fentes de Young pourrait en donner l'impression.

En effet, pour deux particules, il ne s'agit pas de deux ondes qui se propagent chacune dans un espace tridimensionnel, mais d'une seule fonction d'onde qui évolue dans un espace à $3 \times 2 = 6$ dimensions. Plus généralement, dans le cas de N particules, le système n'est pas décrit par N ondes, mais par une seule onde qui se propage dans un espace à $3N$ dimensions, un « espace de configuration » abstrait qui n'est pas l'espace physique. La réalité du monde n'aurait alors rien à voir avec le monde tridimensionnel qui nous est familier. La

véritable arène des phénomènes physiques serait cet espace de configuration, multidimensionnel, et les observateurs auraient juste l'illusion de vivre dans un espace tridimensionnel.

DES PARTICULES GUIDÉES PAR LEUR FONCTION D'ONDE

Venons-en à présent à la mécanique bohmienne. Comment décrit-elle le monde ? Dans cette théorie, la fonction d'onde n'est pas le seul ingrédient. Il y a aussi, comme en mécanique classique, des particules ponctuelles qui se déplacent dans l'espace physique, tridimensionnel. Mais avec une dynamique bien sûr différente : les particules se déplacent à une vitesse déterminée par la fonction d'onde (voir l'encadré page 36).

Selon cette théorie, si nous voyons des objets tels que des tables et des chaises, ou des chats vivants ou morts, c'est parce que ces entités sont constituées de parties ponctuelles et bien réelles, et non parce que l'onde du système présente telle ou telle forme. En fait, la fonction d'onde nous est cachée : elle ne se révèle que par son effet sur le mouvement des particules – tout comme, en mécanique >

- > 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.