

> prononce comme «de Breuil»), avec ses travaux précurseurs de 1924-1927, et de David Bohm, le physicien américain qui l'a développée dans les années 1950 (voir l'encadré page ci-contre). Appelée aussi théorie de l'onde pilote, ou mécanique bohmienne, la théorie dBB revient à l'actualité et fait l'objet d'actives recherches, à la faveur du renouveau des réflexions sur l'interprétation de la mécanique quantique.

UNE EXPÉRIENCE QUI RÉSUME L'ÉTRANGÉTÉ QUANTIQUE

Avant d'y venir, expliquons quelles difficultés d'interprétation la mécanique quantique soulève. On peut commencer par considérer une expérience simple et exemplaire, celle dite des fentes de Young. Elle consiste à diriger des particules, par exemple des électrons, vers un écran opaque percé de deux fentes parallèles et proches. Après avoir traversé les fentes, les particules sont détectées sur un deuxième écran. On peut envoyer les particules une par une et les détecter une par une, ce qui se traduit par l'accumulation, avec le temps, de points d'impact sur l'écran de détection.

Si, au lieu d'électrons, on envoie sur les fentes des objets plus gros, de petites billes par exemple, ces objets suivront approximativement des lignes droites et formeront donc, en s'accumulant sur l'écran de détection, deux petites taches situées dans le prolongement des deux lignes droites reliant la source d'électrons aux fentes. Or ce n'est pas du tout ce que l'on observe avec des électrons ou d'autres particules très microscopiques : sur l'écran de détection, on voit se former des franges, c'est-à-dire une alternance de régions à densité d'impacts faible et élevée (voir la figure page 38).

Un tel motif est une figure d'interférence, caractéristique des phénomènes ondulatoires. Par exemple, des vaguelettes se propageant à la surface de l'eau produisent une figure d'interférence similaire – des régions où l'amplitude des vagues est alternativement petite et grande – lorsqu'elles traversent une barrière comportant deux ouvertures proches.

Comment la mécanique quantique rend-elle compte de l'expérience de la double fente ? Elle décrit l'électron comme une onde, représentée mathématiquement par une «fonction d'onde». Comme pour une onde classique, l'onde de l'électron arrive sur les deux fentes, dont chacune devient alors la source d'une onde secondaire, et ce sont les deux ondes secondaires ainsi produites qui interfèrent.

Mais l'analogie avec une onde classique s'arrête là. Alors que l'onde de l'électron qui atteint l'écran de détection s'étale sur une assez grande région, comme avec les vaguelettes à la surface de l'eau, l'électron ne laisse qu'une trace ponctuelle sur l'écran : à ce stade,



Louis de Broglie (1892-1987), physicien français, a émis entre 1924 et 1927 les premières idées selon lesquelles le comportement quantique des particules peut s'expliquer en supposant l'existence d'une onde qui les guide.



L'Américain David Bohm (1917-1992) a développé dans les années 1950 les idées de Louis de Broglie, ce qui a donné la mécanique bohmienne, ou théorie dBB.

il n'est plus du tout étalé. Afin de rendre compte de cette détection très localisée, la mécanique quantique postule que la fonction d'onde subit un effondrement instantané. Autrement dit, quand l'onde de l'électron atteint l'écran de détection, elle se réduit instantanément à quelque chose de très localisé. Cette réduction est censée se produire lors de la mesure et la probabilité d'observer l'impact en un point de l'écran est déterminée par l'amplitude de l'onde en ce point. Plus cette amplitude est élevée au point considéré, plus il est probable que l'onde s'y réduise.

La mécanique quantique explique ainsi la figure d'interférence qui se construit au fil du temps, avec l'accumulation des impacts d'électrons. Il y a toutefois un problème. On a supposé que l'effondrement de l'onde se produit une fois l'écran de détection atteint. Mais est-ce vraiment le cas ? Il se peut aussi que l'effondrement se fasse à un moment ultérieur, par exemple lorsque quelqu'un regarde l'écran. Dans la version orthodoxe de la mécanique quantique, l'effondrement est supposé se produire lors de la mesure. Mais quels processus physiques faut-il exactement pour qu'on puisse parler de «mesure» ? Faut-il que l'appareil de mesure soit d'un type particulier ? Une mesure implique-t-elle nécessairement un observateur humain ? Et cet observateur doit-il être suffisamment qualifié, par exemple titulaire d'un doctorat en physique ? Tant qu'on ne précise pas en quoi consiste exactement une mesure, on ne sait pas exactement quand l'effondrement se produit et les prévisions sont alors ambiguës.

LA MESURE, UN PROBLÈME ÉPINEUX

En 1935, le physicien autrichien Erwin Schrödinger a mis en exergue le problème de la mesure en imaginant un scénario impliquant un chat. Cette expérience de pensée aujourd'hui célèbre consiste à placer un chat bien vivant dans une boîte contenant un atome radioactif et un dispositif qui, si l'atome se désintègre, libère un poison mortel. Le couplage entre l'état du félin et celui de l'atome fait que la fonction d'onde du système atome-chat ne correspond pas à un état bien défini de l'animal, mais à une somme (une superposition, voir l'article d'Hervé Zwirn dans ce numéro) de l'état «chat vivant» et de l'état «chat mort». Mais alors, avant l'effondrement de la fonction d'onde du chat vers l'état vivant ou vers l'état mort, que peut ressentir cet animal ? Et quand l'effondrement se produit-il ? L'effondrement se produit-il juste au moment où un observateur humain ouvre la boîte et regarde à l'intérieur ?

Le problème de la mesure n'est pas le seul obstacle à la compréhension de la nature du monde quantique. Un autre exemple de difficulté est que le type d'onde introduit en

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 >