

FONCTION D'ONDE, SUPERPOSITION D'ÉTATS, DÉCOHÉRENCE

En physique quantique, une particule est décrite par une fonction d'onde, souvent notée $|\Psi\rangle$. Cet objet mathématique permet de calculer les propriétés de la particule telles que son énergie. Si, par exemple, la particule peut avoir deux énergies possibles E_1 et E_2 , ces dernières sont associées à deux états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$ et, de façon générale, la fonction d'onde de la particule s'écrit comme une superposition de ces deux états : $|\Psi\rangle = a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$ où a_1 et a_2 sont les « amplitudes de probabilité » associées aux deux états. Lors d'une mesure de l'énergie de la particule, l'instrument affichera une seule valeur, E_1 ou E_2 . La physique quantique ne prédit pas le résultat de la mesure, mais seulement les probabilités des résultats possibles. Ainsi, d'après l'un des axiomes de la théorie quantique, les énergies E_1 et E_2 sont obtenues avec des probabilités égales à $|a_1|^2$ et $|a_2|^2$ respectivement (la somme des probabilités $|a_1|^2 + |a_2|^2$ étant égale à 1).

Mélange statistique ou superposition d'états ?
Un problème expérimental se pose quand on étudie un ensemble de particules. Il est possible de préparer

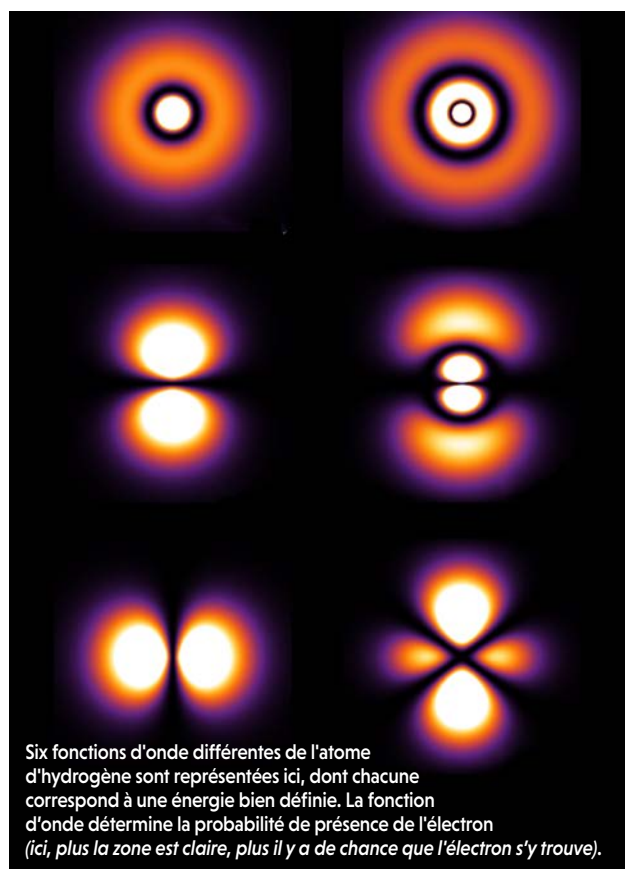
le mélange avec une proportion p_1 des particules dans l'état $|e_1\rangle$ et p_2 dans l'état $|e_2\rangle$; on parle dans ce cas de mélange statistique des états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$. Or un tel mélange est très différent d'une superposition d'états $a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$, même si la simple mesure des énergies donne les mêmes résultats quand $p_1 = |a_1|^2$ et $p_2 = |a_2|^2$. On peut distinguer les deux situations à l'aide d'opérations appropriées qui mélangent les états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$, par exemple en appliquant un champ électrique au système, et en mesurant ensuite l'énergie. Les probabilités des résultats avec un mélange statistique seront alors différentes de celles avec une superposition d'états.

Effondrement de la fonction d'onde

Lors d'une mesure de l'énergie, une seule valeur est obtenue parmi les cas possibles, par exemple E_1 . Juste après la mesure, la fonction d'onde se réduit instantanément à $|\Psi\rangle = |e_1\rangle$. On parle alors d'effondrement de la fonction d'onde, qui passe brutalement de l'état $a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$ (par exemple) à l'état $|e_1\rangle$. Ce phénomène discontinu et instantané est difficile à comprendre.

Décohérence macroscopique

Autre problème avec les superpositions d'états : on ne les observe pas dans le monde macroscopique. Erwin Schrödinger a illustré cette difficulté avec sa fameuse expérience du chat dans une boîte, où un mécanisme reposant sur un processus microscopique aléatoire tue



Six fonctions d'onde différentes de l'atome d'hydrogène sont représentées ici, dont chacune correspond à une énergie bien définie. La fonction d'onde détermine la probabilité de présence de l'électron (ici, plus la zone est claire, plus il y a de chance que l'électron s'y trouve).

le chat s'il est déclenché. Tant qu'on n'a pas ouvert la boîte pour voir l'état du chat, le mécanisme serait dans une superposition d'états « déclenché » et « non déclenché ». Cette superposition impliquerait que le chat serait dans une superposition des états « mort » et « vivant », situation qui paraît impossible, en tout cas inobservée. En 1970, le théoricien allemand Dieter Zeh a proposé d'expliquer

l'absence de superpositions d'états pour des systèmes macroscopiques par un processus de « décohérence quantique » dû aux interactions du système avec son environnement. Ces interactions détruiraient une superposition d'états d'autant plus vite que le système est grand. En 1996, des expériences de l'équipe de Serge Haroche, à Paris, ont confirmé pour la première fois ce scénario de passage du quantique au classique.

> leurs vitesse et position dans des rapports pré-établis. Plus précisément, les deux électrons partent dans des directions opposées à la même vitesse. En mesurant la vitesse de la particule 1, on en déduit la vitesse de la particule 2 au même instant *sans altérer son état* ; en vertu du critère de réalité, la vitesse de la particule 2 est donc un élément de réalité. En procédant de même avec la position, on arrive à la conclusion que la position de la particule 2 est également un élément de réalité. Or, mises ensemble, ces deux assertions contredisent le principe d'indétermination de Heisenberg, selon lequel la position et la vitesse d'une particule ne peuvent pas être déterminées simultanément.

Cette contradiction amena les trois chercheurs à conclure que la physique quantique n'est pas en mesure de rendre compte de ces éléments de réalité (ici la position et la vitesse). Il faut donc considérer la théorie comme incomplète : des variables qui n'apparaissent pas dans son formalisme mathématique porteraient ces informations, ces éléments de réalité. Ou alors, il faudrait imaginer que la position et la vitesse ne sont pas des éléments de réalité ; et que la mesure opérée sur la particule 1 déterminerait, à distance, instantanément et comme par miracle (par « télépathie » dira plus tard Einstein), les grandeurs relatives à la particule 2. Cette solution était

impossible aux yeux des trois physiciens, car elle violait l'hypothèse de localité et les lois de la relativité restreinte. La physique quantique serait alors une théorie dite non locale.

Pour mieux comprendre le problème, choisissons une illustration plus proche de l'expérience commune. Supposons que nous disposions de deux cartes, l'une bleue, l'autre rouge, et que nous les placions chacune dans une enveloppe scellée. Mélangeons les deux enveloppes à l'abri de tout regard, puis donnons-en une à Paul et l'autre à Julie. Lorsque Paul ouvre son enveloppe, il découvre la couleur de sa carte. Le résultat qu'il obtient est évidemment corrélé avec celui qu'obtiendra Julie: si la carte de Paul est bleue, celle de Julie sera rouge, et inversement. Comment interpréter cela? Tout simplement en considérant que les couleurs respectives des cartes de Paul et Julie étaient déjà fixées avant l'ouverture de l'enveloppe: cette action n'a fait que révéler une situation qui n'était pas encore connue de Paul, mais qui était déjà parfaitement déterminée.

En d'autres termes, ce n'est pas le fait que Paul prenne connaissance de la couleur de sa carte qui a fixé cette couleur, ni qui aurait ensuite déterminé la couleur de la carte de Julie par l'envoi de quelque information transmise de la première enveloppe vers la seconde. Les deux cartes se trouvent avoir la couleur qu'elles ont en vertu de la cause commune qui les a fixées lorsqu'elles ont été glissées dans les enveloppes.



Pour Einstein, Podolsky et Rosen, la théorie quantique souffrait d'incomplétude



C'est ce type d'arguments que l'hypothèse de réalité d'Einstein condense: il y a un «élément de réalité physique» associé à la couleur de la carte de Julie puisque, sans ouvrir l'enveloppe qu'elle a entre les mains, elle est capable de la connaître. Il lui suffit de demander à Paul le résultat qu'il a obtenu et d'en tirer la conclusion.

Le cas des cartes de Paul et Julie est évidemment un problème de nature classique, où la part probabiliste (la carte de Julie est-elle rouge

ou bleue?) prend sa source dans le «mélange statistique» initial des cartes. Dans le cas d'un système quantique de deux électrons intriqués, c'est la superposition des états qui entre en jeu. Mais ce qu'Einstein et ses deux collègues démontrent, c'est que l'application du critère de réalité à la théorie quantique conduit au «paradoxe EPR» (d'après les initiales des trois signataires). Plus précisément, pour garantir le réalisme et éviter des conflits de cohérence internes à la théorie, il doit exister des variables additionnelles qui ne sont pas contenues dans la physique quantique. Ce formalisme est ainsi pris en flagrant délit d'incomplétude. Il doit donc exister, selon Einstein et ses collègues, un niveau de description plus fin de la réalité que celui proposé par la physique quantique.

DÉBAT EINSTEIN-BOHR: UNE ISSUE GRÂCE À JOHN BELL

Dès la publication de cet article, Bohr décida de défendre la physique quantique telle qu'elle est. Mais il comprit vite que le raisonnement d'Einstein était extrêmement subtil et que sa réfutation serait délicate. Bien sûr, la réponse qu'il apportait à la question posée (la physique quantique est-elle complète?) était un oui sans équivoque, mais son argumentation semblait plutôt confuse. Incapable d'identifier la moindre erreur dans l'argumentation EPR, Bohr fut réduit à affirmer que les preuves fournies par Einstein n'étaient pas assez solides et sa critique porta essentiellement sur le critère de réalité de son interlocuteur.

À vrai dire, ces débats n'intéressaient guère les physiciens, car ils n'avaient pas d'incidence sur leur façon d'utiliser le formalisme de la physique quantique, c'est-à-dire de faire des calculs et des prédictions qui étaient toujours en accord avec les mesures. La fécondité de la théorie quantique était même si spectaculaire et si vaste qu'il n'apparaissait ni nécessaire ni utile de mieux la comprendre.

Mais en 1964, au Cern, près de Genève, un physicien nord-irlandais du nom de John Bell, très soucieux, lui, de clarté conceptuelle, vint modifier radicalement la situation et transforma le débat, initialement philosophique, en un problème de physique.

Bell était au départ un physicien «réaliste» comme Einstein, c'est-à-dire qu'il partageait *a priori* son point de vue selon lequel les événements surviennent indépendamment du contexte expérimental de leur manifestation. Mais il avait remarqué quelque chose de curieux: toutes les théories qui avaient été bâties jusqu'alors dans le but de compléter le formalisme de la physique quantique par l'introduction de paramètres supplémentaires ne parvenaient à satisfaire aux hypothèses de validité de la physique quantique et de réalité qu'en violant l'hypothèse >