

## FONCTION D'ONDE, SUPERPOSITION D'ÉTATS, DÉCOHÉRENCE

**E**n 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

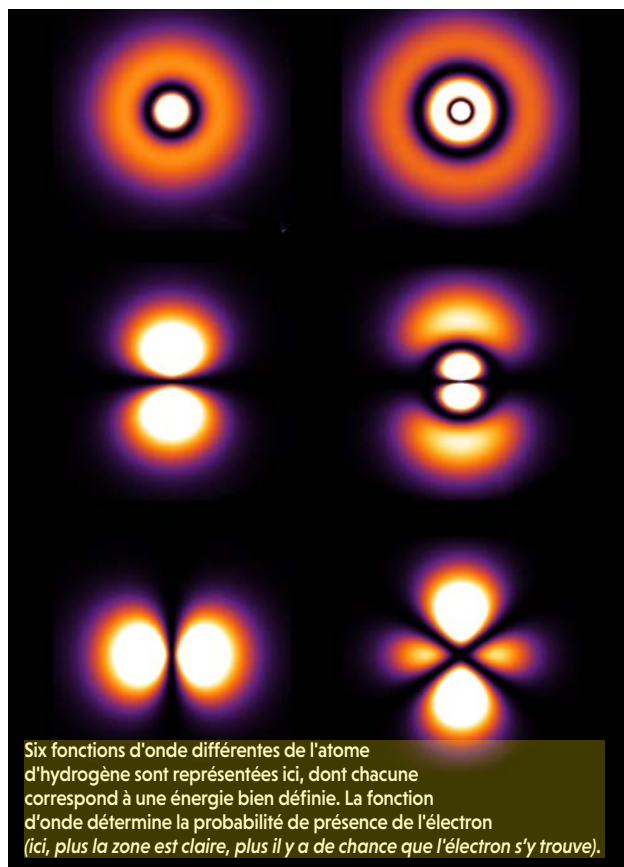
le mélange avec une proportion  $p_1$  des particules dans l'état  $|e_1\rangle$  et  $p_2$  dans l'état  $|e_2\rangle$  ; on parle dans ce cas de mélange statistique des états  $|e_1\rangle$  et  $|e_2\rangle$ . Or un tel mélange est très différent d'une superposition d'états  $a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$ , 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