

permanente d'information vers l'environnement est le mécanisme essentiel par lequel les états quantiques de superposition se détruisent, processus nommé décohérence.

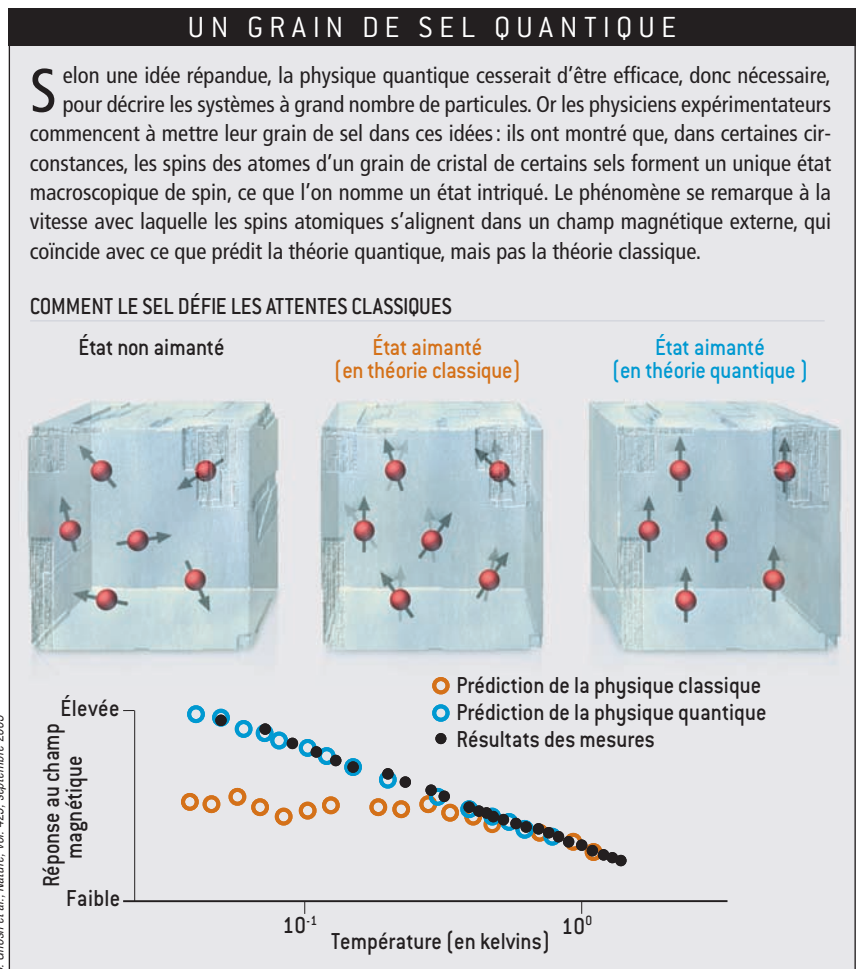
Les gros systèmes sont davantage sujets à la décohérence que les petits, tout simplement parce qu'ils laissent échapper plus d'informations. C'est pourquoi les physiciens tendent à associer la théorie quantique au monde microscopique. Dans de nombreux cas, toutefois, la perte d'information par un gros système peut être ralentie ou stoppée, ce qui met alors en évidence l'omniprésence des phénomènes quantiques.

Un phénomène quantique par excellence est l'intrication, qui transforme un ensemble de particules isolées en un tout indivisible. Son nom fut introduit en 1935 par Schrödinger dans le même article que celui où il discutait de son chat. En physique classique, les propriétés d'un système de particules peuvent toujours se ramener aux propriétés individuelles de ses composants. Ce n'est pas le cas avec un système quantique intriqué. Ainsi, un système constitué de deux particules intriquées a un comportement étonnant : même très éloignées, les particules qui le composent continuent à se comporter comme deux parties d'une entité indivisible ; c'est ce qui a conduit Einstein à parler d'« action fantomatique à distance ».

Spins intriqués

D'ordinaire, les physiciens parlent de l'intrication de paires de particules élémentaires, tels les électrons. L'une des propriétés des électrons est leur moment cinétique (ou angulaire) intrinsèque, dénommé spin (mot anglais qui signifie tourner). En simplifiant, on peut se représenter les électrons comme de minuscules toupies qui tournent soit dans le sens des aiguilles d'une montre, soit dans le sens inverse, autour d'un axe susceptible de pointer dans n'importe quelle direction : horizontalement, verticalement, à 45 degrés, etc. Pour mesurer le spin d'un électron, il faut d'abord choisir une direction, puis déterminer le sens du spin par rapport à l'axe choisi.

Supposons que deux électrons se comportent comme le prescrit la physique classique. Faisons alors en sorte que l'un des électrons tourne dans le sens horaire autour d'un axe horizontal, et l'autre tourne dans le sens inverse autour du même axe ; de cette façon, le spin total, c'est-à-dire la somme des



spins des deux électrons, est nul. Les axes de rotation des électrons restant fixes dans l'espace, le résultat d'une mesure va dépendre de l'angle entre la direction de mesure et l'axe de rotation des électrons. Si l'on mesure les deux spins selon un axe horizontal, on verra qu'ils tournent dans des directions opposées ; en revanche, une mesure dans la direction verticale ne détectera de rotation pour aucune des particules.

Pour des électrons réels, donc quantiques, les choses sont très différentes. Tout d'abord, il est possible de préparer le système des deux électrons dans un état de spin total nul, même sans avoir spécifié l'état individuel de chacune des particules. Quand on mesure le spin d'un des électrons, on trouve, au hasard, soit que l'électron tourne dans le sens horaire, soit qu'il tourne dans le sens inverse. C'est comme si l'électron décidait par lui-même dans quel sens tourner. Néanmoins, quelle que soit la direction de mesure choisie (la même pour les deux électrons), on constate que les deux spins mesurés sont toujours opposés. Tout se passe comme si une mesure d'un des spins, opé-

rée le long d'un axe, obligeait l'autre spin à prendre la valeur opposée. Comment les deux spins se « concertent-ils » ? Cela reste mystérieux. En outre, la mesure du spin de l'une des particules dans la direction horizontale n'empêche plus d'obtenir aussi un résultat dans la direction verticale, ce qui suggère que les particules n'ont pas d'axes de rotation déterminés. En un mot, les résultats des mesures effectuées sur les deux électrons sont corrélés d'une façon que la physique classique n'explique pas.

La plupart des mises en évidence expérimentales de l'intrication n'impliquent que quelques particules. Un système composé de nombreuses particules est en effet difficile à isoler de l'environnement. Ses constituants ont une probabilité bien plus grande de s'intriquer avec des particules non contrôlées de l'environnement, ce qui détruit leurs interconnexions originelles. Autrement dit, dans les termes servant à décrire la décohérence, trop d'informations s'échappent du système dans l'environnement, ce qui confère au système un comportement classique, non quantique. On comprend donc

que pour tous ceux qui cherchent à exploiter l'intrication, par exemple pour construire des ordinateurs quantiques, le principal défi est la difficulté de préserver l'intrication.

En 2003, une expérience a prouvé que des systèmes de plus grande taille peuvent rester intriqués quand on peut limiter ou contrecarrer la fuite d'information. Gabriel Aeppli, de l'*University College* de Londres, et ses collègues ont placé un morceau de fluorure de lithium dans un champ magnétique. Dans ce champ, les spins des atomes de ce sel se comportent comme de petites aiguilles aimantées susceptibles de pivoter pour s'aligner le long des lignes de champ, une réaction nommée susceptibilité magnétique. En outre, les interactions des atomes produisent une sorte de pression collective qui pousse chacun des spins à s'aligner plus rapidement. En faisant varier l'intensité du champ magnétique, les expérimentateurs ont mesuré à quelle vitesse les atomes s'alignent. Ils ont constaté que les spins s'alignent bien plus vite que ne le laissait prévoir l'intensité de leurs interactions mutuelles. Selon les auteurs de la recherche, la seule explication possible est qu'un état intriqué macroscopique s'est formé à partir des états individuels de spins des quelque 10^{20} atomes formant le morceau de sel...

Afin d'éviter les effets décohérents de l'agitation thermique, l'équipe de G. Aeppli a réalisé ses expériences à très basse température – quelques millikelvins

IL MIGRE CHAQUE ANNÉE JUSQU'EN AFRIQUE ÉQUATORIALE, puis revient au printemps, un périple de 13 000 kilomètres qu'il effectue sans se perdre. Le rouge-gorge aurait une sorte de boussole interne et... quantique.

seulement. Depuis, Alexandre Martins de Souza, du Centre brésilien de recherche en physique de Rio de Janeiro, et ses collègues ont mis en évidence au sein de matériaux tels que le carboxylate de cuivre la possibilité d'obtenir une intrication macroscopique à température ambiante, voire supérieure. Dans les systèmes qu'ils étudient, l'interaction entre spins est assez forte pour contrecarrer l'agitation thermique. Dans d'autres cas, il est possible d'obtenir une intrication macroscopique au moyen d'une force extérieure qui annule les effets de l'agitation thermique. Les physiciens ont ainsi créé de l'intrication au sein de systèmes toujours plus grands et

EXPÉRIENCES D'INTRICATION : ÇA CHAUFFE

Les effets quantiques ne se limitent pas aux particules subatomiques. Ils apparaissent également dans des expériences sur des systèmes plus grands et plus chauds. Ci-dessous, quelques exemples sont proposés.

Observation d'une figure d'interférences entre fullerènes, montrant pour la première fois que les molécules, comme les particules subatomiques, se comportent comme des ondes.

Observation d'une susceptibilité magnétique très élevée au sein de carboxylates métalliques à une température de 290 kelvins, qui ne peut s'expliquer que par l'intrication de milliards d'atomes de ces sels.

Observation d'effets quantiques qui augmentent l'efficacité de la photosynthèse dans deux espèces d'algues marines.

Observation d'effets quantiques au sein de molécules géantes, dont une en forme de pieuvre contenant 430 atomes.

Intrication de trois bits quantiques au sein d'un circuit supraconducteur. La procédure utilisée pourrait servir à obtenir des systèmes quantiques de toute taille.

Mise en vibration d'une microplaque de 40 micromètres de long (presque visible à l'œil nu) à deux fréquences en même temps.

Intrication de chaînes de huit ions de calcium maintenus dans un piège à ions. Aujourd'hui, les chercheurs sont capables de le faire sur des chaînes de 14 ions de calcium.

Intrication des mouvements vibratoires (plutôt que du spin ou d'autres propriétés internes) d'ions de béryllium et de magnésium.

à des températures de plus en plus élevées; cela va d'ions piégés par des champs électromagnétiques jusqu'à des atomes ultrafroids disposés en réseau, en passant par des bits quantiques supraconducteurs (voir l'encadré ci-dessus).

l'atome. Par exemple, on peut faire en sorte que si l'électron est proche du noyau, l'atome se déplace à gauche, et que si l'électron est plus loin du noyau, l'atome se déplace à droite. Ainsi, l'état électronique se trouve intriqué avec l'état de mouvement de l'atome, de la même façon que la désintégration radioactive est intriquée avec l'état du chat. On peut ainsi avoir un état intriqué avec des superpositions, où le félin à la fois vivant et mort est remplacé par un atome se déplaçant à la fois vers la gauche et vers la droite.

D'autres expériences transposent à plus grande échelle cette idée de base, de façon qu'un immense nombre d'atomes se retrouvent dans un état intriqué, impossible en physique classique. Or, si l'on peut conférer un état intriqué à des solides même lorsqu'ils sont grands et chauds, il n'y a qu'un pas à faire pour se demander si l'intrication pourrait aussi être présente dans les êtres vivants.

Un tel « organisme quantique » pourrait être *Erithacus rubecula*, un étonnant petit oiseau, qui migre chaque année entre la Scandinavie et l'Afrique équatoriale. Ce périple de 13 000 kilomètres, le rouge-gorge familier (son nom français) semble l'effec-