



Vlatko VEDRAL, physicien, est professeur à l'Université d'Oxford, en Grande-Bretagne, et à l'Université nationale de Singapour.

particules seraient quantiques ; en grand nombre, elles deviendraient classiques. Cette vision est fautive, et les premières indications de ce fait remontent à l'une des plus célèbres expériences de pensée de la physique : celle du chat de Schrödinger.

En 1935, l'Autrichien Erwin Schrödinger imagina une situation macabre pour illustrer comment le monde microscopique et le monde macroscopique sont inextricablement couplés, et ne peuvent être séparés par une frontière nette. Dans son scénario, un chat est enfermé dans un local contenant un flacon de gaz mortel, un compteur de radioactivité et un atome radioactif. Si le compteur détecte de la radioactivité, un mécanisme casse le flacon, et le chat meurt.

Le compteur, appareil macroscopique, ne peut que mesurer l'un des deux états classiques possibles de l'atome : « désintégré » ou « non désintégré ». Or, dans le monde quantique, un atome peut fort bien se trouver dans un état combinant les états « désintégré » et « non désintégré » : ce que l'on nomme un état superposé. Ainsi, si l'atome radioactif est dans cet état superposé, l'existence du mécanisme brisant le flacon implique que le chat se trouve dans

un état combinant la possibilité d'être mort et celle d'être vivant, exactement comme l'état superposé de l'atome combine la possibilité qu'il soit désintégré ou non. Pour plausible que soit le dispositif de Schrödinger, il est avant tout théorique. Pour autant, il a l'intérêt de mettre en évidence, qu'en principe au moins, l'étrangeté quantique des systèmes microscopiques se communique aux systèmes macroscopiques. Et il pose une question de fond : pourquoi les gens ne voient-ils que des chats soit vivants, soit morts et pas de chats morts-vivants ?

Des états très fragiles

D'après la vision actuelle, si le monde semble si bien décrit par la physique classique, c'est parce que les interactions complexes d'un objet avec son environnement font très vite disparaître les particularités quantiques. L'information relative à l'état de santé d'un chat, par exemple, gagne rapidement son environnement sous la forme de photons et d'échanges de chaleur. Chaque phénomène quantique peut impliquer des états superposés du système en jeu (mort ou vivant), mais ces états tendent à disparaître. La fuite

Observer l'observateur

L'idée que la théorie quantique s'applique à tout dans l'Univers, y compris à nous, conduit à d'étranges conclusions. Prenons par exemple une variante de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, proposée par Eugene Wigner en 1961 et que David Deutsch, de l'Université d'Oxford, a précisée en 1986.

Alice, physicienne, demande à son ami Bernard d'entrer dans la pièce où se trouvent le chat de Schrödinger et un dispositif qui traduit la désintégration d'un atome radioactif en poison pour le chat. Alice sait que l'atome a été préparé dans une superposition des états « désintégré » et « non désintégré », de sorte que le chat est *a priori* à la fois mort et vivant. Comme convenu, Alice glisse un papier sous la porte, où Bernard doit lui indiquer si le chat est dans un état bien défini (mort ou vivant). Bernard répond que « oui ».

Insistons sur le fait qu'Alice ne demande pas si le chat est mort

ou vivant, parce que cela impliquerait de forcer le résultat, en d'autres termes de défaire l'état intriqué du chat. Alice se contente de vérifier que son ami voit un chat soit vivant, soit mort, sans chercher à savoir duquel des deux états il s'agit précisément.

Alice n'ayant pas défait l'état intriqué du chat, la communication avec Bernard est, en théorie quantique, une action réversible. En l'annulant, Alice annule aussi chacune des étapes franchies, de sorte que s'il était mort, le chat redevient vivant, le poison retrouve sa place et s'il était désintégré, l'atome cesse de l'être, tandis que Bernard ne se souvient plus d'avoir observé un chat soit mort, soit vivant.

Pour autant, Alice ne peut annuler l'existence du morceau de papier. Alice peut annuler l'observation, mais seulement d'une façon qui n'annule pas l'inscription se trouvant sur le papier. Ainsi, le papier

garde la preuve que Bernard a bien observé l'état du chat.

Cela conduit à une conclusion étonnante : Alice a réussi à inverser l'observation parce qu'elle a évité l'effondrement de l'état intriqué. Pour elle, Bernard est dans un état tout aussi intriqué que le chat, tandis que pour Bernard, l'état intriqué du chat s'est défait, de sorte qu'il voit un chat soit mort, soit vivant, ce dont le papier atteste... Ainsi, l'expérience met en contradiction deux observations d'un même fait : pour Alice, le chat reste mort-vivant, alors que pour Bernard, il est soit mort, soit vivant.

Créer la même situation avec un observateur humain n'est guère réaliste, mais les physiciens peuvent tenter quelque chose d'équivalent avec un système plus simple. Anton Zeilinger et ses collègues, de l'Université de Vienne, l'ont fait en faisant rebondir un photon sur un grand miroir. Si le photon est réfléchi, le mi-

roir subit un recul, mais si le photon est transmis, le miroir reste immobile. Dans un état intriqué transmis-réfléchi, le photon joue le rôle de l'atome radioactif ; le miroir, constitué de milliards d'atomes, joue celui du chat et de Bernard. Son recul ou pas est analogue à la vie ou à la mort du chat et à son observation par Bernard. Et tout le processus peut être inversé en faisant revenir le même photon sur le miroir.

En tentant de réaliser ce genre d'expérience de pensée, Wigner et D. Deutsch, puis A. Zeilinger suivent les pas de Schrödinger, d'Einstein et de tous les physiciens qui se sont confrontés à l'étrangeté de la théorie quantique. Tant que ces expériences sont restées irréalisables, y réfléchir semblait vain, car la théorie fonctionnait en pratique. Cela change aujourd'hui, de sorte qu'il devient urgent d'essayer de comprendre enfin vraiment la physique quantique.

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

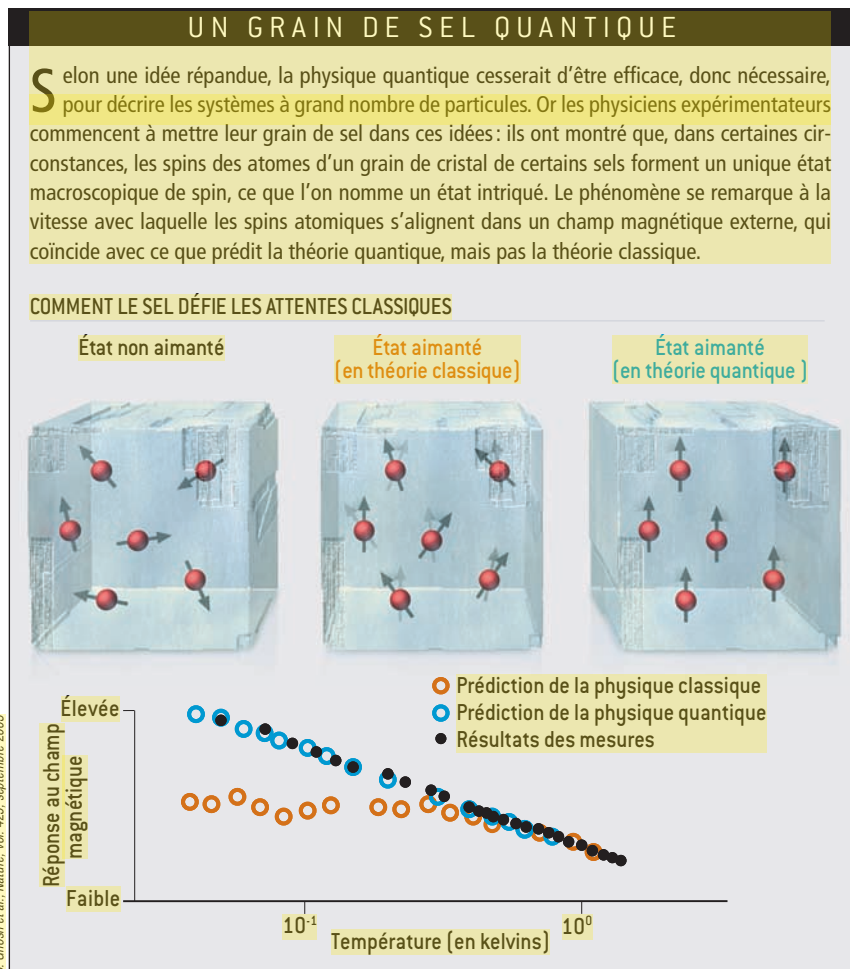
Les gros systèmes sont davantage sujets à la décohérence que les petits, tout simplement parce qu'ils laissent échapper plus d'informations. C'est pourquoi les physiciens tendent à associer la théorie quantique au monde microscopique. Dans de nombreux cas, toutefois, la perte d'information par un gros 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