

Votre vocation fait votre fierté, la nôtre est de vous assurer.



OFFRE SPÉCIALE
POUR LES MOINS DE 30 ANS

100 €
OFFERTS*
sur vos assurances
AUTO et SANTÉ
Idéal pour bien débiter !

Pour découvrir les avantages qui vous sont réservés :

- Appelez le 0 970 809 809 (numéro non surtaxé)
- Connectez-vous sur www.gmf.fr



Assurément Humain

* Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la première année à la souscription d'un contrat d'assurance auto et/ou d'un contrat de complémentaire santé. Offre non cumulable avec le tarif avant l'âge 30 et valable jusqu'au 31/12/2011. Conditions et détails des prestations dans votre agence GMF ou sur www.gmf.fr.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde, GMF Vie, Assistance Juridique et Fidélia Assistance - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Chartres 323 562 678 - Siège social : 7, avenue Marcel Proust 28932 Chartres Cedex 9 - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

Les contrats complémentaires santé sont souscrits par l'A.D.A.C.C.S. auprès de GMF Assurances et la Sauvegarde.

Vivre dans un monde quantique

Vlatko Vedral

La théorie quantique ne concerne pas seulement les électrons et les atomes. Elle s'applique aussi à plus grande échelle : aux oiseaux, aux plantes, voire aux humains.

Effet quantique, effet minuscule ? Dans les manuels de physique, la théorie quantique décrit les particules, les atomes, les molécules, bref le monde microscopique, mais céderait le pas à la physique classique à l'échelle des poires, des gens ou des planètes. Il y aurait ainsi, quelque part entre la poire et la molécule, une frontière où prend fin l'étrangeté quantique et où commence le caractère familier des comportements décrits par la physique classique. L'idée que la théorie quantique se limite au monde microscopique est d'ailleurs très répandue dans le grand public. Dans son ouvrage à succès *L'Univers élégant*, Brian Greene, de l'Université Columbia, écrit par exemple que la théorie quantique « apporte le cadre théorique nécessaire pour comprendre l'Univers aux plus petites échelles ». La physique classique – c'est-à-dire toute théorie non quantique, donc les théories de la relativité aussi – décrirait l'Univers aux plus grandes échelles.

Ce cloisonnement du monde physique est un mythe. Peu de physiciens attribuent aujourd'hui à la physique classique le même statut qu'à la physique quantique. À leurs yeux, la physique clas-

sique n'est qu'une approximation utile dans un monde qui est quantique à toutes les échelles. La discrétion des phénomènes quantiques à notre échelle ne tient pas à la taille en soi des systèmes, mais à la façon dont ils interagissent. Depuis dix ans, les physiciens multiplient les expériences où se manifestent à l'échelle macroscopique des effets quantiques, dont on s'aperçoit qu'ils sont bien plus présents qu'on ne le soupçonnait. Ils pourraient même jouer un rôle dans nos cellules !

Même les spécialistes qui consacrent leur carrière à la physique quantique doivent encore assimiler ce qu'elle dit vraiment sur la nature. Les comportements quantiques échappent au sens commun : ils nous forcent à repenser notre vision de l'Univers et à en accepter une nouvelle, peu familière.

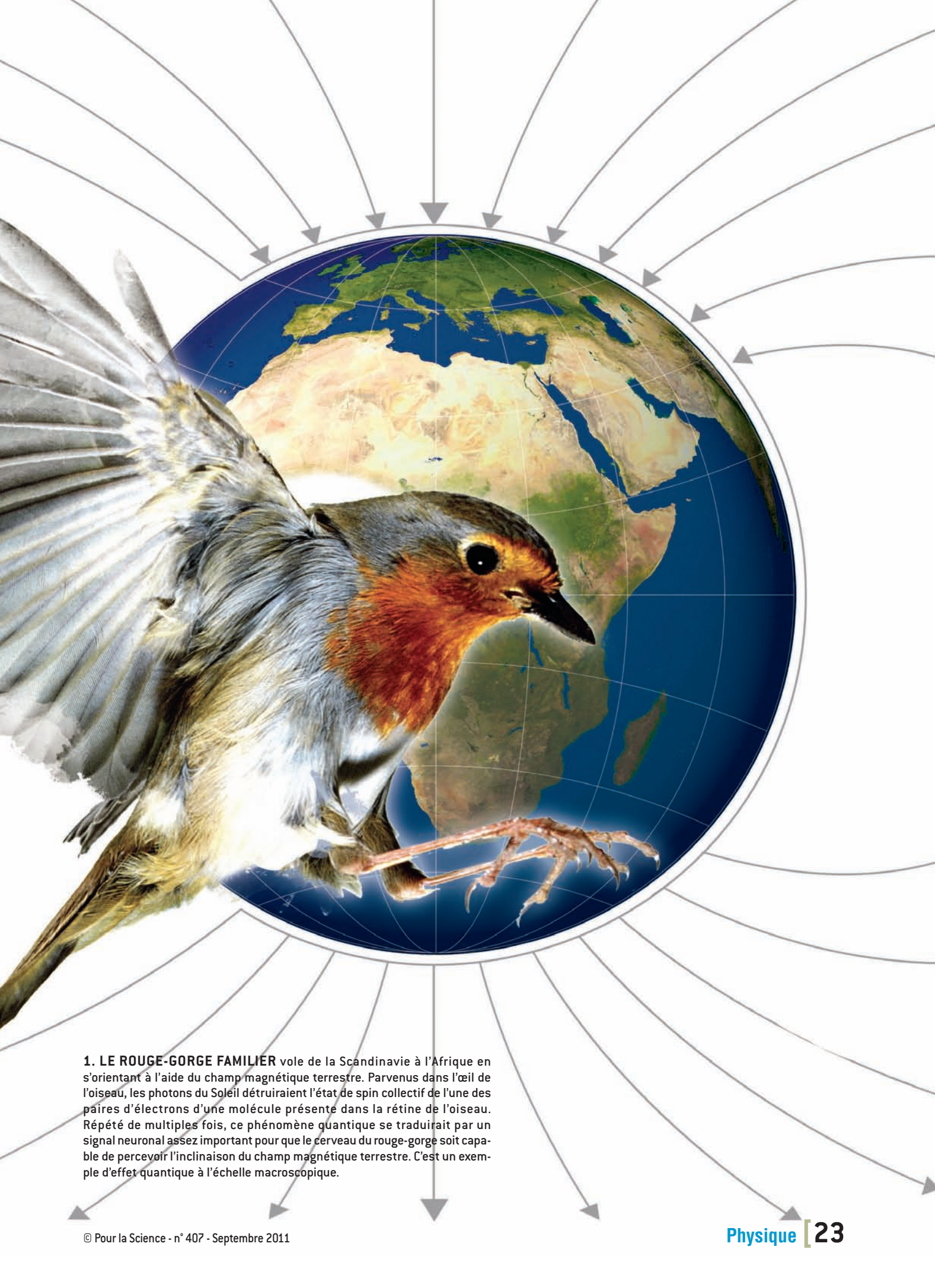
Un chat mort-vivant

Pour un expert en théorie quantique, la physique classique est la version en noir et blanc d'un monde en couleurs. Les catégories de la physique classique ne suffisent plus à saisir le monde dans sa richesse. Dans la vision propagée par les vieux manuels, la richesse des teintes se dilue à mesure qu'augmente la taille. Isolées, les

L'ESSENTIEL

- ✓ On croit souvent que la théorie quantique ne s'applique qu'aux systèmes minuscules : atomes, molécules, etc.
- ✓ Les lois quantiques s'appliquent en fait à tout et à toutes les échelles de taille, même si leurs manifestations passent parfois inaperçues.
- ✓ Les expériences des physiciens révèlent des effets quantiques dans un nombre croissant de systèmes macroscopiques.
- ✓ L'intrication est un effet quantique fondamental, qui peut être en jeu dans n'importe quels systèmes, y compris des organismes vivants.

Justin Van Genderen



1. LE ROUGE-GORGE FAMILIER vole de la Scandinavie à l'Afrique en s'orientant à l'aide du champ magnétique terrestre. Parvenus dans l'œil de l'oiseau, les photons du Soleil détruiraient l'état de spin collectif de l'une des paires d'électrons d'une molécule présente dans la rétine de l'oiseau. Répété de multiples fois, ce phénomène quantique se traduirait par un signal neuronal assez important pour que le cerveau du rouge-gorge soit capable de percevoir l'inclinaison du champ magnétique terrestre. C'est un exemple d'effet quantique à l'échelle macroscopique.



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.

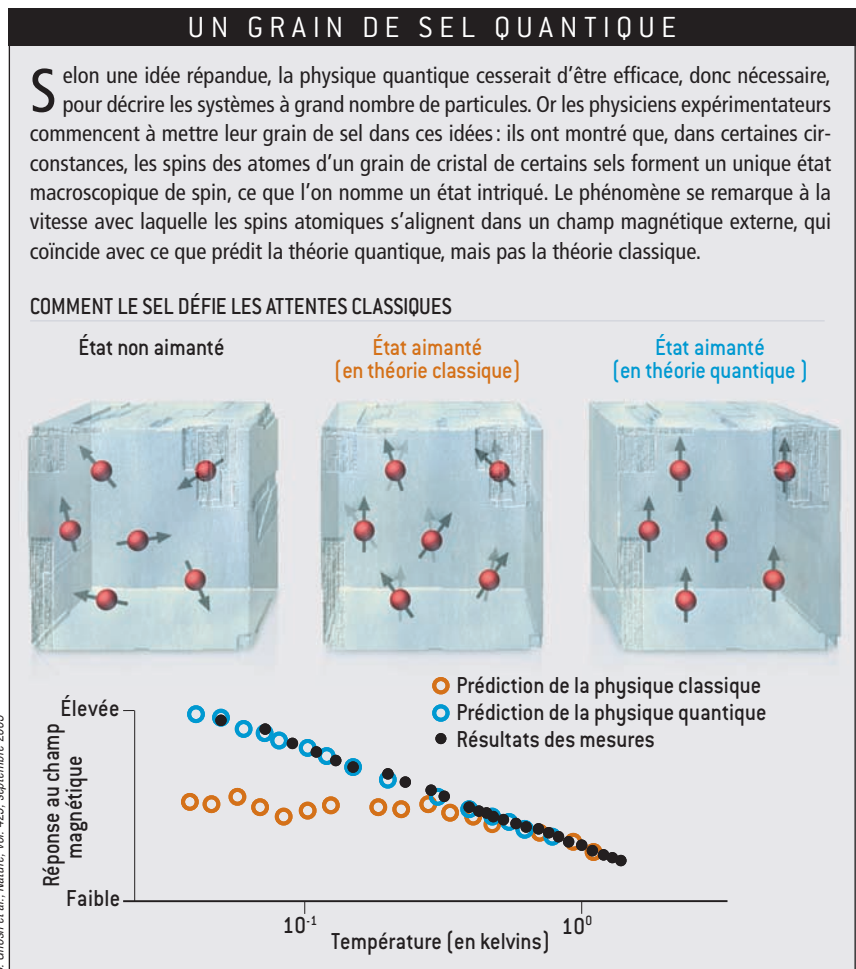
Les gros systèmes sont davantage sujets à la décohérence que les petits, tout simplement parce qu'ils laissent échapper plus d'informations. C'est pourquoi les physiciens tendent à associer la théorie quantique au monde microscopique. Dans de nombreux cas, toutefois, la perte d'information par un gros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

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).

Ces systèmes sont analogues au chat de Schrödinger. Considérons un atome ou un ion: ses électrons peuvent se trouver près du noyau ou ailleurs, ou les deux à la fois. Un tel électron se comporte donc comme l'atome radioactif contenu dans la cage du chat de Schrödinger, qui est à la fois dans l'état désintégré et dans l'état non désintégré. Indépendamment de ce que fait l'électron, l'atome peut par ailleurs bouger, par exemple vers la gauche ou vers la droite. Ce mouvement joue le rôle du chat mort ou vivant. En manipulant l'atome à l'aide de lasers, les physiciens parviennent à coupler les états de position de l'électron et de mouvement de

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-

DATE	TEMPÉRATURE	ÉQUIPES
1999	900-1 000 kelvins	Markus Arndt, Anton Zeilinger et leurs collègues de l'Université de Vienne
2009	630 kelvins	Alexandre Martins de Souza et ses collègues du Centre brésilien de recherche en physique
2010	294 kelvins	Elisabetta Collini et ses collègues des Universités de Toronto, des Nouvelles-Galles du Sud et de Padoue
2011	240-280 kelvins	Stefan Gerlich, Sandra Eibenberger et leurs collègues de l'Université de Vienne
2010	0,1 kelvin	L. DiCarlo, R. J. Schoelkopf et leurs collègues de l'Université Yale et celle de Waterloo
2010	25 millikelvins	Aaron O'Connell, Max Hofheinz et leurs collègues de l'Université de Californie à Santa Barbara
2005	0,1 millikelvin	Hartmut Häffner, Rainer Blatt et leurs collègues de l'Université d'Innsbruck
2009	0,1 millikelvin	J. Jost, D. Wineland et leurs collègues de l'Institut américain des normes et de la technologie, NIST

George Reisbeck

tuer sans difficultés et, étonnamment, sans se perdre. Comment fait-il ?

Le rouge-gorge a-t-il une sorte de boussole intérieure ? Dans les années 1970, les époux Wolfgang et Roswitha Wiltshko, de l'Université de Francfort en Allemagne, ont capturé des rouges-gorges ayant migré en Afrique et les ont placés dans un champ magnétique artificiel. Ils ont constaté que les rouges-gorges ne perçoivent pas les inversions de la direction du champ magnétique – ils ne distinguent pas le Nord du Sud –, mais qu'ils sont sensibles à l'inclinaison du champ magnétique terrestre, c'est-à-dire à l'angle que font les lignes de champ avec la surface terrestre. C'est, en fait, tout ce dont ils ont besoin pour s'orienter. Or, détail intéressant, les rouges-gorges dont on bande les yeux ne suivent plus le champ magnétique. Cela signifie que si les rouges-gorges ont une boussole interne, elle est dans leurs yeux.

En 2000, un physicien passionné par les oiseaux migrateurs, Thorsten Ritz, alors à l'Université de Floride du Sud, propose avec ses collègues une explication : l'intrication. Selon son idée, inspi-

rée des travaux de Klaus Schulten, de l'Université de l'Illinois, la rétine d'un œil d'oiseau contiendrait une molécule où deux électrons forment une paire intriquée de spin total nul.

Une rétine quantique ?

Dans le modèle théorique de T. Ritz, quand cette molécule absorbe un photon de lumière visible, les électrons reçoivent assez d'énergie pour se séparer et devenir ainsi sensibles au champ magnétique terrestre. Si le champ magnétique est incliné, il affecte différemment les deux électrons, créant un déséquilibre qui modifie la réaction chimique subie par la molécule. Des mécanismes chimiques traduisent cette différence en impulsion nerveuse, que le cerveau de l'oiseau transforme en une image du champ magnétique terrestre. L'oiseau est ainsi doté d'un dispositif d'orientation macroscopique, qui ne relève pas de la physique classique.

Bien qu'il n'y ait que des preuves indirectes de l'existence de ce mécanisme, Christopher Rogers et Kiminori Maeda, de l'Université d'Oxford, ont étudié en laboratoire des molécules semblables à celles

considérées par T. Ritz, et montré que l'intrication de leurs électrons les rend en effet sensibles aux champs magnétiques. D'après nos calculs, ces effets quantiques persistent dans un œil d'oiseau durant 100 microsecondes environ. Dans ce contexte, c'est une durée longue : le record de maintien d'un système artificiel de spins électroniques intriqués n'est que de quelque 50 microsecondes... Nous ignorons pour le moment comment un système naturel pourrait conserver aussi longtemps des effets quantiques, mais la réponse nous indiquerait comment protéger les ordinateurs quantiques de la décohérence.

La photosynthèse – le mécanisme complexe par lequel les plantes convertissent l'énergie solaire en énergie chimique – est un autre processus biologique où l'intrication est peut-être en jeu. Dans les cellules végétales, la lumière incidente éjecte des électrons, qui s'acheminent tous vers un centre de réaction où ils déposent leur énergie et déclenchent les réactions chimiques nécessaires aux cellules des plantes. Or la physique classique n'explique pas l'efficacité presque parfaite de ce mécanisme.

Des expériences réalisées par plusieurs équipes, dont celle de Graham Fleming et Mohan Samovar, de l'Université de Californie à Berkeley, ou celle de Gregory Scholes, de l'Université de Toronto, soutiennent l'idée que le rendement élevé de la photosynthèse s'expliquerait par des propriétés quantiques.

Dans un monde quantique, une particule prend tous les chemins à la fois, chacun étant affecté d'une certaine probabilité. Les champs électromagnétiques existant au sein des cellules végétales peuvent entraîner l'annulation mutuelle de certaines de ces trajectoires et le renforcement d'autres, réduisant les chances que l'électron fasse un détour peu économique et augmentant celles qu'il soit aiguillé directement vers le centre de réaction. L'intrication des états de position (chemins) possibles ne durerait qu'une fraction de seconde et ferait intervenir des molécules ne renfermant pas plus de 100 000 atomes. Existe-t-il des exemples d'intrication plus vaste et plus persistante dans la nature ? Nous l'ignorons, mais la question est assez passionnante pour susciter l'émergence d'une nouvelle discipline : la biologie quantique.

Pour Schrödinger, un chat à la fois mort et vivant était une absurdité ; toute théorie faisant pareille prédiction ne pouvait



2. AU TENNIS, L'INTRICATION de plusieurs états de position serait un avantage énorme, mais qui reste irréaliste pour un système de la taille de... Roger Federer. Toutefois, Aaron O'Connell et Max Hofheinz, de l'Université de Californie à Santa Barbara, ont réussi à placer une microplaque vibrante de 40 micromètres de long (*en bas, à gauche*) en plusieurs endroits à la fois, ou plus exactement, dans un état quantique où se superposent plusieurs modes vibratoires.

✓ BIBLIOGRAPHIE

V. Vedral, *Decoding Reality: The Universe as Quantum Information*, Oxford University Press, 2010.

A. Ourjoumtsev, *Vers le quantique macroscopique*, *Dossier Pour la Science*, « Le monde quantique », n° 68, juillet-septembre 2010.

A. O'Connell, *Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator*, *Nature*, vol. 464, pp. 697-703, 2010.

L. Amico *et al.*, *Entanglement in many-body systems*, *Reviews of Modern Physics*, vol. 80, n° 2, pp. 517-576, 2008.

S. Ghosh *et al.*, *Entangled quantum state of magnetic dipoles*, *Nature*, vol. 425, pp. 48-51, 2003.

M. Tegmark et J. A. Wheeler, *100 ans de mystères quantiques*, *Pour la Science*, n° 262, avril 2001.

qu'être défectueuse. Des générations de physiciens ont partagé ce malaise, pensant que la théorie quantique cessait de s'appliquer à grande échelle. Dans les années 1980, Roger Penrose, de l'Université d'Oxford, par exemple, a suggéré que la gravité était responsable d'une transition de la physique quantique à la physique classique pour des objets de plus de 20 microgrammes. Giancarlo Ghirardi et Tomaso Weber, de l'Université de Trieste, avec Alberto Rimini, de l'Université de Pavie, étaient d'avis, eux, que les particules en grand nombre adoptent spontanément un comportement classique.

Une frontière effaçable

Mais les expériences suggèrent plutôt que la frontière entre le monde classique et le monde quantique n'est pas fondamentale, assez d'ingéniosité expérimentale suffisant à l'effacer. Peu de physiciens pensent aujourd'hui que la physique classique s'impose vraiment à quelque échelle que ce soit. Au contraire, le sentiment général est que si une théorie plus efficace remplace un jour la physique quantique, elle montrera que le monde est encore plus contraire à l'intuition que tout ce que nous avons vu jusqu'à présent.

Ainsi, le fait que la théorie quantique s'applique à toutes les échelles nous oblige à nous confronter aux questions posées par son interprétation. Nous ne pouvons

plus les réduire à des détails n'intervenant qu'aux petites échelles. Par exemple, l'espace et le temps sont en physique deux des concepts les plus fondamentaux, mais qui ne jouent qu'un rôle secondaire en physique quantique. L'intrication est le phénomène quantique essentiel. Elle lie entre eux des systèmes sans référence à l'espace ou au temps. S'il y avait véritablement une frontière à tracer entre les mondes quantique et classique, nous pourrions nous reposer sur le cadre spatio-temporel classique pour doter la théorie quantique d'un cadre similaire. Sans cette démarcation – en fait surtout parce que le monde classique n'existe pas –, nous n'avons plus besoin de ce cadre. Il nous faut plutôt chercher à expliquer l'espace et le temps comme des phénomènes émergeant d'une façon ou d'une autre d'une physique fondamentale dénuée de cadre spatio-temporel.

Cette idée pourrait nous aider ensuite à réconcilier la physique quantique avec cet autre pilier de la physique qu'est la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui décrit la gravitation en termes de géométrie de l'espace-temps. La relativité générale suppose que les objets ont des positions bien définies et ne sont jamais à plus d'un endroit à la fois, ce qui est en contradiction avec la physique quantique. De nombreux physiciens, comme Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, pensent que la théorie de la relativité doit céder la place à une théorie plus profonde dans laquelle l'espace et le temps n'existent pas. L'espace-temps classique émergerait de l'intrication quantique par le processus de décohérence.

Une autre possibilité, plus intéressante encore, serait que la gravitation ne soit pas une force en elle-même, mais le bruit résiduel de l'action des autres forces de l'Univers engendré par le caractère flou des phénomènes quantiques. Cette idée de « gravitation induite » remonte aux années 1960 et au physicien et dissident soviétique Andreï Sakharov. Si elle devait se révéler pertinente, alors non seulement la gravitation y perdrait son statut de force fondamentale, mais aussi tous les efforts accomplis pour la « quantifier » seraient vains. Au niveau quantique, la gravitation ne pourrait même pas exister.

Les implications du fait que des objets macroscopiques soient dans les limbes quantiques sont si hallucinantes qu'elles placent les physiciens dans un état intriqué de confusion et d'émerveillement. ■

L'ESPCI ParisTech

Inventeurs d'avenirs

Transdisciplinarité physique-chimie-biologie
Comprendre va plus loin que connaître
Allier savoir et savoir-faire
Aller de la découverte à l'invention



Stellios, chargé de recherche au laboratoire de Chimie organique

L'institution

- un campus de 20 000 m² au cœur de Paris
- 17 laboratoires
- 7 Prix Nobel décernés à 6 lauréats en 1903, 1911, 1935, 1991 et 1992
- tous les directeurs successifs ont été élus à l'Académie des sciences
- 3 Chaires de mécénat et de partenariat (Saint-Gobain, Michelin, Total)
- membre fondateur de ParisTech (1991) et de Paris Sciences et Lettres (2010)

Enseignement

- 1^{re} école d'ingénieurs dans le classement de Shanghai (2008, 2009, 2010)
- 8 filières de recrutement dont le concours commun avec l'École polytechnique et les Écoles normales supérieures
- 750 heures de travaux de laboratoire pendant les 2 premières années du cursus
- 80 ingénieurs diplômés par promotion
- 35 % de femmes
- 35 % de boursiers
- 400 000 € investis sur chaque promotion à travers le système de bourses
- 60 % des diplômés font un doctorat
- 85 % des diplômés rejoignent l'industrie

Recherche

- 1 publication scientifique par jour
- 150 doctorants sur le campus
- 250 enseignants-chercheurs et chercheurs permanents
- 1 000 citations par mois dans le monde

Innovation

- 1 brevet par semaine
- 1 start-up de haute technologie créée chaque année, avec création d'emplois très qualifiés et ambition de développement mondial