

| 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 Reisack

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. ■