

Quand Claude détecte simultanément un photon dans chaque détecteur, le photon de Jean devient instantanément une copie du photon d'origine X de Claude. Nous avons vérifié expérimentalement que cette téléportation avait bien lieu en montrant que le photon de Jean avait la polarisation que nous avions imposée au photon X. Notre expérience n'était pas parfaite, mais la bonne polarisation a été détectée dans 80 pour cent des cas (s'il s'agissait de photons aléatoires, on obtiendrait 50 pour cent de bonnes polarisations). Nous avons démontré l'efficacité de la procédure pour des polarisations variées : verticales, horizontales, linéaires à 45 degrés, et même pour un type de polarisation non linéaire, la polarisation circulaire.

L'aspect le plus délicat du réglage de notre analyse d'état de Bell consiste à rendre les photons A et X impossibles à distinguer. Même le moment d'arrivée des photons pourrait servir à les identifier, et il est par conséquent important d'«effacer» les informations temporelles portées par les particules. Dans notre expérience, nous utilisons une astuce que nous a suggérée Marek Zukowski, de l'Université de Gdansk : nous faisons passer les photons au travers de filtres de longueur d'onde à très faible largeur de bande. Cette étape rend les longueurs d'onde des photons très précises et, en vertu du principe d'incertitude d'Heisenberg, cela étale l'incertitude sur les temps d'arrivée des photons.

États de superposition

Cette expérience a démontré sans équivoque la téléportation, mais avec un faible taux de succès. Du fait que nous ne pouvions identifier qu'un seul des états de Bell, nous ne pouvions téléporter le photon de Claude que dans les cas où cet état particulier se produisait, soit 25 pour cent du temps. Il n'existe pas d'analyseur d'état de Bell complet pour les photons indépendants, ou pour deux particules quantiques créées indépendamment, si bien que, pour l'instant, il n'y a aucun dispositif ayant fait ses preuves qui aurait 100 pour cent d'efficacité.

En 1994, Sandu Popescu, alors à l'Université de Cambridge, a proposé une méthode pour contourner le problème. Il a suggéré que l'état à téléporter pouvait être un état quantique «à cheval» sur le photon auxiliaire A

Le coin des sceptiques

N'est-il pas exagéré d'appeler ce phénomène «téléportation»? Après tout, il ne s'agit que de téléporter un état quantique, pas un objet réel. Cette question en soulève une autre, plus philosophique, sur le concept d'«identité». Comment savons-nous qu'un objet, par exemple la voiture que nous trouvons dans notre garage le matin, est le même que celui que nous avons vu un moment auparavant? La physique quantique confirme cette approche : des particules de même type dans le même état quantique sont impossibles à distinguer, même en principe. Si l'on pouvait soigneusement échanger tous les atomes de fer de la voiture et les remplacer par des atomes de fer venant d'un bloc de minerai, et reproduire l'état de chaque atome exactement, le résultat final serait absolument la même voiture que la voiture initiale. L'identité ne peut être définie autrement : c'est le fait d'être semblable en toutes propriétés.

Ne devrait-on pas plutôt parler de «téléfax quantique»? Le téléfax produit une copie distincte de l'original, alors qu'il est impossible de distinguer un objet téléporté, même en principe. De plus, dans la téléportation quantique, l'original est détruit.

Y a-t-il un espoir réel de téléporter des objets complexes? Il y a de nombreux obstacles sérieux. Tout d'abord, l'objet doit se trouver dans un état quantique pur, et ces états sont très fragiles. Les photons interagissent très peu avec l'air, et nos expériences ont donc pu être faites à l'air libre, mais les expériences concernant des atomes ou des objets plus gros doivent être réalisées dans le vide pour éviter les collisions avec les molécules de gaz. Par ailleurs, plus un objet est gros, plus son état quantique est facilement perturbé. Le rayonnement thermique des parois de l'appareillage suffirait à lui seul à perturber un minuscule bloc de matière. C'est pour cela que nous n'observons pas d'effets quantiques dans notre vie quotidienne.

L'interférence est plus facile à produire que l'intrication ou la téléportation. Elle a été mise en évidence pour des fullerènes, des sphères constituées de 60 atomes de carbone. Ces travaux vont s'étendre à des objets plus gros, peut-être même à de petits virus, mais ne vous attendez pas à ce que ces prouesses techniques soient reproduites avec des ballons de foot!

La mesure d'état de Bell est un autre problème. Quelle serait la signification d'une mesure d'état de Bell d'un virus constitué de 10^7 atomes, par exemple?

Une précision quantique est-elle nécessaire pour téléporter une personne? Le fait d'être dans le même état quantique ne semble pas être nécessaire pour rester la même personne. Nous changeons d'état tout le temps sans pour autant devenir d'autres personnes (c'est en tout cas l'impression que nous en avons!). Inversement, les vrais jumeaux et les clones biologiques ne sont pas les «mêmes êtres», parce que le contenu de leur mémoire est différent. Le principe d'incertitude d'Heisenberg nous empêche-t-il de répliquer une personne avec suffisamment de précision pour qu'elle pense qu'elle est toujours la même personne? Nul ne le sait. Mais il est intéressant de remarquer que le théorème de non-clonage quantique nous interdit de faire la copie conforme d'une personne.



de Claude. Le groupe de recherche de Francesco De Martini, de l'Université de Rome I «La Sapienza», a expérimenté avec succès cette méthode en 1997. La paire auxiliaire de photons était intriquée en fonction des positions des photons : le faisceau engendrant le photon A était coupé en deux par une lame séparatrice et envoyé vers deux parties différentes du dispositif de Claude, les deux alternatives étant liées par intrication à une découpe similaire du photon B de Jean. L'état à téléporter était également porté par le photon A de Claude (ici, son état de polarisation). Avec un seul photon jouant les deux rôles, la détection des quatre états de Bell possibles devient une simple mesure standard à une particule : il ne s'agit plus que de détecter le photon de Claude dans un des deux lieux possibles, avec une des deux polarisations possibles. L'inconvénient de ce dispositif tient à ce que, si l'on donnait à Claude un état X inconnu et distinct à téléporter, il faudrait qu'elle transfère cet état à la polarisation de son photon A.

La polarisation d'un photon, caractéristique qui a fait l'objet de la téléportation dans les expériences d'Innsbruck et de Rome, est une quantité discrète, en ce sens que tout état de polarisation est une superposition de seulement deux états discrets, les polarisations horizontale et verticale. Le champ électromagnétique associé à la lumière présente également des caractéristiques continues qui peuvent être décrites comme la superposition d'un nombre infini d'états élémentaires. Par exemple, un faisceau lumineux peut être «comprimé», ce qui signifie qu'on peut obtenir une très grande précision ou absence de bruit pour une de ses caractéristiques, mais au détriment de la précision d'une autre caractéristique (toujours Heisenberg). En 1998, le groupe de recherche de Jeffrey Kimble, à l'Institut de technologie de Californie, a téléporté un tel état comprimé d'un faisceau lumineux à un autre, mettant ainsi en évidence le phénomène de téléportation appliqué à une variable continue.

Ces expériences, aussi remarquables soient-elles, n'ont pas résolu le problème de la téléportation quantique de gros objets, qui se heurte à deux difficultés majeures. Tout d'abord, il faut une paire intriquée d'objets de la même sorte. Par ailleurs, l'objet à téléporter et les paires intriquées doivent être suffisamment isolées de leur environnement. En cas

de fuite d'information de l'environnement ou vers l'environnement par des interactions isolées, les états quantiques des objets se dégradent : ce processus est la décohérence. On imagine mal comment parvenir à isoler ainsi totalement un gros appareillage, et encore moins une créature vivante qui respire de l'air et qui rayonne de la chaleur. Mais qui peut prédire la rapidité des progrès scientifiques à venir?

Nous pourrions certainement utiliser les technologies existantes pour téléporter des états élémentaires, comme ceux des photons dans nos expériences, sur des distances de quelques kilomètres, peut-être même jusqu'à des satellites. La technologie de téléportation d'états d'atomes individuels est aujourd'hui accessible : le groupe de recherche de Serge Haroche, à l'École normale supérieure de Paris, a mis en évidence l'intrication d'atomes. On peut raisonnablement s'attendre à observer l'intrication de molécules et à réaliser leur téléportation d'ici une dizaine d'années.

Il est probable que la téléportation sera d'abord utilisée dans le domaine de l'informatique quantique, où la notion ordinaire d'élément binaire (les 0 et les 1) est généralisée à des bits quantiques (ou *qubits*), qui sont des superpositions et des intrications de 0 et de 1. La téléportation pourrait servir à transférer de l'information quantique entre des processeurs quantiques. Les téléporteurs quantiques pourraient servir d'éléments de base à la construction d'un ordinateur quantique. La bande dessinée de la page 41 illustre une situation intéressante où la combinaison de la téléportation et de l'informatique quantique présente un avantage : tout se passe pratiquement comme si on avait reçu l'information téléportée instantanément, sans avoir à attendre qu'elle arrive par les voies normales.

Le débat Bohr-Einstein

La mécanique quantique est certainement l'une des théories physiques les plus élaborées et les plus surprenantes. Les problèmes qu'elle pose à notre intuition du monde lui a valu d'être sévèrement critiquée par Einstein. Ce dernier soutenait que la physique devait essayer de décrire la réalité indépendamment de son observation, mais il réalisait néanmoins que nous sommes confrontés à des problèmes inextricables dès que nous essayons de coller une telle réalité phy-

sique aux membres d'une paire intriquée. Son illustre collègue, le physicien danois Niels Bohr, insistait sur la nécessité de prendre en compte le système entier (dans le cas d'une paire intriquée, l'ensemble formé par les deux particules). Ce que préconisait Einstein, à savoir la description de l'état réel indépendant de chaque particule, est dépourvu de sens dans le cas d'un système quantique intriqué.

La téléportation quantique descend directement des expériences de pensée débattues par Einstein et Bohr. Quand nous analysons l'expérience, nous nous heurterions à toutes sortes de problèmes si nous commençons à nous interroger sur la nature et sur les propriétés des particules individuelles intriquées. Nous devons analyser avec prudence la signification du terme «avoir» une polarisation. Nous sommes nécessairement amenés à conclure que les seules choses que nous pouvons examiner sont des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de mesures. Dans notre mesure de polarisation, le signal du détecteur nous permet de construire une image mentale où le photon «avait» effectivement une polarisation donnée à l'instant de la mesure. Mais nous ne devons pas perdre de vue que cela est une vue de l'esprit. Elle n'est valable que si nous parlons de cette expérience en particulier, et il ne faut pas la transposer à la légère à une autre situation.

En reprenant la pensée de Bohr, je dirais que nous comprenons la mécanique quantique si nous réalisons que la science ne décrit pas la nature telle qu'elle est, mais exprime plutôt ce que nous pouvons en dire. Aujourd'hui, la principale utilité des expériences de physique fondamentale telles que la téléportation est de nous aider à mieux comprendre notre monde quantique.

Anton ZEILINGER travaille à l'Institut de physique expérimentale de Vienne.

Charles H. BENNETT, *Quantum Information and Computation*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 10, pp. 24-31, octobre 1995.

D. BOUWMEESTER, J.W. PAN, K. MATTLE, M. EIBL, H. WEINFURTER et A. ZEILINGER, *Experimental Quantum Teleportation*, in *Nature*, vol. 390, pp. 575-579, 11 décembre 1997.

Quantum Information, numéro spécial de *Physics World*, vol. 11, n° 3, mars 1998.

A.J. LEGGETT, *Quantum Theory : Weird and Wonderful*, in *Physics World*, vol. 12, n° 12, pp. 73-77, décembre 1999.
