

Un dispositif efficace (voir la figure 3) pour produire des paires de photons intriqués est un oscillateur paramétrique optique : en traversant un cristal spécifique, un photon unique engendre deux photons qui sont intriqués (ici, dont les polarisations sont perpendiculaires).

Il est beaucoup plus difficile d'intriquer deux photons indépendants déjà existants, comme il est nécessaire de le faire dans un analyseur d'état de Bell, car cela implique que les deux photons (A et X) perdent leurs caractéristiques propres. En 1997, notre groupe de recherche (Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl et Harald Weinfurter), travaillant à l'Université d'Innsbruck, a résolu ce problème dans le cadre de notre expérience de téléportation (voir la figure 4). Dans notre expérience, une brève impulsion de lumière ultraviolette produite par un laser traverse un cristal et crée les photons intriqués A et B. Le premier se propage vers Claude, et le second vers Jean. Un miroir renvoie l'impulsion ultraviolette à travers le cristal, où elle crée une autre paire de photons, C et D (ceux-ci sont également intriqués, mais nous

n'utilisons pas leur intrication). Le photon C atteint un détecteur, qui nous avertit que son partenaire D est prêt à être téléporté. Le photon D passe à travers un polariseur, que nous pouvons orienter de toutes les manières imaginables. Le photon polarisé obtenu est notre photon X, celui que nous voulons téléporter, et il est envoyé vers Claude. Après avoir traversé le polariseur, X est un photon indépendant, il n'est plus intriqué. Et même si nous savons quelle est sa polarisation, puisque nous avons réglé le polariseur, Claude, elle, ne la connaît pas. Nous réutilisons la même impulsion ultraviolette pour nous assurer que Claude a les photons A et X en même temps.

Nous devons alors mesurer des états de Bell : pour cela, Claude combine ses deux photons (A et X) en utilisant un miroir semi-réfléchissant, c'est-à-dire un dispositif ayant une couche très mince et translucide d'argenture, de telle sorte qu'un photon qui la frappe a 50 pour cent de chances de la traverser et 50 pour cent de chances d'être réfléchi. En termes quantiques, le photon est une superposition de ces deux possibilités (voir la figure 5).

Supposons maintenant que les deux photons qui arrivent sur le miroir viennent de directions opposées, leurs trajectoires étant alignées de façon que le rayon réfléchi de l'un corresponde au rayon transmis de l'autre, et *vice versa*. Un détecteur attend au bout de chaque rayon. D'ordinaire, les deux photons sont réfléchis indépendamment, et ils ont une chance sur deux d'arriver dans des détecteurs différents. Cependant, si les photons sont impossibles à distinguer et atteignent le miroir au même instant, ils interfèrent quantiquement : certaines configurations s'annulent et ne se réalisent pas, tandis que d'autres se renforcent et sont plus fréquentes. Quand les photons interfèrent, leur probabilité de finir dans des détecteurs différents n'est plus que de 25 pour cent. De plus, ce cas de figure correspond à un état de Bell des deux photons bien particulier parmi les quatre possibles : c'est celui que Claude obtenait précédemment quand elle avait «de la chance». Le reste du temps (75 pour cent des cas), les deux photons arrivent au même détecteur, ce qui correspond aux trois autres états de Bell, sans toutefois permettre de déterminer auquel on a affaire.

Les ordinateurs quantiques

L'application la plus concrète de la téléportation quantique en dehors de la recherche en physique fondamentale est sans doute l'informatique quantique. Un ordinateur classique fonctionne avec des éléments binaires, qui prennent une valeur définie, soit 0, soit 1 ; un ordinateur quantique utilise des bits quantiques, ou *qubit*. Les *qubits* peuvent être dans des superpositions quantiques de 0 et de 1, comme un photon peut être dans une superposition de polarisations horizontale et verticale. En envoyant un seul photon, le téléporteur quantique de base transmet un unique *qubit*.

L'idée d'une superposition de nombres peut sembler étrange, mais, comme le disait Rolf Landauer, d'IBM, «quand nous étions petits et que nous apprenions à compter sur nos doigts classiques et très collants, nous étions bien loin de la mécanique quantique et de la superposition. Nos doigts bien distincts nous donnaient une mauvaise intuition. Nous pensions que nous pouvions lever trois doigts, puis quatre. Nous ne comprenions pas qu'il était possible d'avoir une superposition des deux possibilités».

Un ordinateur quantique travaille simultanément sur de nombreuses entrées différentes. Par exemple, il pourrait faire tourner un algorithme simultanément sur un million d'entrées, en utilisant un nombre limité de qubits, équivalant au nombre d'éléments binaires qu'un ordinateur classique utiliserait pour faire tourner cet algorithme une fois sur une seule entrée. Les théoriciens ont prouvé que les algorithmes tournant sur des ordinateurs quantiques peuvent résoudre certains problèmes plus vite (c'est-à-dire en moins d'itérations) que tous les algorithmes connus tournant sur un ordinateur classique. Parmi ces problèmes, citons la recherche d'éléments dans une base de données, et la factorisation des grands nombres utile pour le codage et le décodage.

Pour l'instant, seuls les composants les plus rudimentaires des futurs ordinateurs quantiques ont été fabriqués : des portes logiques pouvant traiter un ou deux qubits. La mise au point d'un ordinateur quantique, même de faible capacité, est encore éloignée. L'un des problèmes clefs est le transfert fiable des données entre différentes portes logiques ou processeurs, au sein d'un ordinateur quantique isolé ou sur un réseau quantique. La téléportation quantique constitue une solution.

En outre, Daniel Gottesman de Microsoft et Isaac Chuang d'IBM ont récemment démontré qu'on pouvait construire un ordinateur généraliste à partir de trois composants de base : des particules intriquées, des téléporteurs quantiques et des portes agissant sur un seul *qubit* à la fois. Ce résultat est important, car les portes à un *qubit* sont technologiquement beaucoup plus accessibles que les portes à deux qubits. L'astuce pour construire une porte à deux qubits à partir d'un téléporteur consiste à téléporter deux *qubits* de l'entrée de la porte à sa sortie, en utilisant des paires intriquées soigneusement adaptées. Les paires intriquées sont modifiées de sorte que la sortie de la porte reçoive les *qubits* traités comme il convient. La mise en œuvre de la logique quantique arbitraire revient alors à préparer des états intriqués prédéfinis et à les téléporter. Il faut cependant admettre que la mesure de l'état de Bell complet, nécessaire pour la téléportation, est une sorte de traitement à deux *qubits*.



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.

