

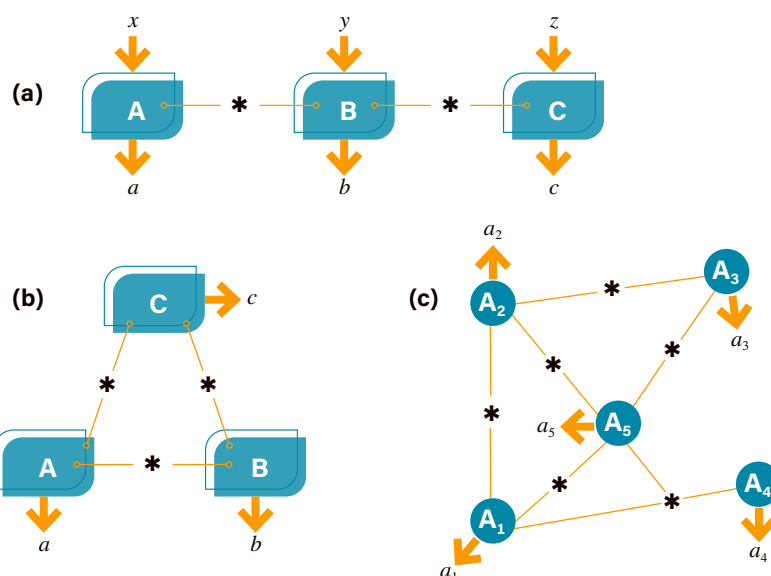
identique: les corrélations doivent s'expliquer par une cause – ou une source – unique. Notons que le détective n'a aucune raison de limiter le nombre de chats émis par cette source: ici, pour coller aux observations, il imaginera une source unique qui émet une «paire de chats» vers chacune des scientifiques. Ainsi, la topologie de l'expérience imaginée par le détective devient différente de la topologie réelle de l'expérience.

Pour éviter cette différence, nous choisissons en quelque sorte d'aider le détective en lui indiquant la topologie de l'expérience et le fait que les corrélations proviennent d'un réseau constitué de trois sources indépendantes disposées en triangle. Il doit alors chercher un raisonnement compatible avec la localité, l'indépendance du choix de la mesure et la topologie expérimentale pour expliquer les résultats des chercheuses. Cette topologie du réseau triangulaire impose de nouvelles contraintes qui réduisent drastiquement le nombre d'explications possibles pour le détective. Ainsi, connaissant la topologie en triangle, il y a davantage de raisons d'arriver à une contradiction.

## LE DÉFI DES RÉSEAUX

Pour le détective, le problème devient pourtant beaucoup plus difficile à analyser. La raison est mathématique: avec une source unique, les trois scientifiques peuvent se coordonner. Par exemple, imaginons qu'elles ont à leur disposition une première expérience fondée sur une première source de chats, mesurés d'une certaine façon, et une seconde expérience utilisant une seconde source de chiens, mesurés d'une autre manière. Il leur est possible de créer une troisième expérience à partir de ces deux premières, où une nouvelle source construite à partir des deux précédentes envoie tantôt les chats de la première source, tantôt les chiens de la seconde et un signal indiquant aux scientifiques s'il faut cette fois-ci mesurer des chats ou des chiens. Cette possibilité de coordination implique que la structure de l'espace des explications possibles est «convexe». Cette propriété permet une exploration assez simple de toutes les stratégies possibles, et ainsi de démontrer que l'expérience observée par le détective est nécessairement non locale.

Dans le cas de trois sources indépendantes, ce type de coordination est totalement impossible: dans un réseau en triangle, à partir d'une première expérience avec des chats, et d'une seconde avec des chiens, il est impossible d'en créer une nouvelle où les chats et les chiens alternent (il arrivera toujours un moment où une source enverra des chats, et une autre des chiens, simultanément). Ainsi, le problème n'est plus convexe: malgré un plus faible nombre de stratégies possible, les explorer toutes devient très difficile. C'est toute la



difficulté pour les spécialistes de la non-localité en réseau: pour une topologie donnée, quelle expérience (ou stratégie) est non locale, et comment le démontrer?

Depuis une dizaine d'années, les physiciens imaginent des exemples concrets d'expériences afin de mieux comprendre cette nouvelle forme de non-localité en réseau. En 2010, Cyril Branciard, maintenant à l'institut Néel, à Grenoble, et ses collègues (dont l'un de nous, Nicolas Gisin) ont envisagé un nouveau type d'expériences quantiques, dites de «bilocalité», qui utilisent deux sources indépendantes (voir la figure ci-dessus). L'équipe a imaginé une expérience en partant de cette topologie et a montré que les résultats attendus des mesures étaient inexplicables pour le détective. Cette expérience est un premier pas vers un réseau à plusieurs sources. Cependant, on constate que les corrélations restent ici analogues à celles des expériences de type Bell. Autre limite: dans un réseau purement quantique, on voudrait que les mesures soient intriquées. Il s'agit d'une sorte de parallèle avec le chat dans un état «mort et vivant» (voir l'encadré page 38), mais appliqué aux appareils de mesure, où l'on pourra dire qu'un photon est «mesuré venant de la gauche et de la droite».

La recherche d'autres exemples a mené les physiciens à se tourner vers le réseau en triangle. En 2012, Tobias Fritz, alors à l'institut des sciences photoniques de Barcelone, a fait une première découverte importante. En s'inspirant de l'expérience de Bell standard CHSH, qui fait intervenir deux scientifiques uniquement, il est parvenu à construire un premier exemple de non-localité quantique dans le réseau en triangle. En pratique, dans l'expérience CHSH, Aïda et Béatrice sont équipées de générateurs de nombres aléatoires (remplaçant les pièces pour tirer à pile ou face). L'idée

La topologie des systèmes en réseau comportant plusieurs sources de photons indépendantes devient très riche. Dans l'expérience de bilocalité (a), on utilise deux sources de photons entre trois observateurs. L'observateur B réalise une mesure simultanée sur les deux photons qu'il reçoit. Dans le réseau en triangle avec trois sources (b), chacun des trois observateurs reçoit deux photons. Ces réseaux sont déjà complexes à étudier, mais l'internet quantique contiendra bien plus de sources indépendantes (c, un réseau avec seulement six sources)!

est tout simplement d'envoyer les données de ces générateurs à une nouvelle scientifique, Camélia: les trois chercheuses sont connectées par trois sources (la source «CHSH» entre Aïda et Béatrice, et les deux générateurs de nombres aléatoires) dans un réseau en triangle. On demande à chacune des scientifiques d'annoncer les nombres aléatoires qu'elles reçoivent (en plus du résultat de l'expérience CHSH pour Aïda et Béatrice). En utilisant les caractéristiques spécifiques de ce type d'expérience, Tobias Fritz a montré qu'un détective qui connaît la topologie expérimentale pourra relier ce qu'il observe à une expérience CHSH standard, contrôlée par les inégalités de Bell, et ne trouvera donc aucune explication aux résultats satisfaisant au principe de localité. De façon inattendue, cet exemple de non-localité dans un réseau triangle ne fait pas appel à l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure, ce qui montre que cette hypothèse n'est plus nécessaire pour la non-localité en réseau. Elle est remplacée par l'hypothèse d'indépendance des sources.

Avec plusieurs collègues (Elisa Bäumer, Sadra Boreiri et Salman Beigi), nous avons étudié le réseau en triangle en simplifiant au

maximum le problème. Nous avons considéré trois sources émettant des états intriqués identiques vers trois observateurs réalisant le même type de mesure. Comme nous l'avons mentionné, le choix de l'expérience et de la stratégie des mesures est crucial: dans tous les cas connus jusqu'alors (à l'exception de l'exemple précédent), soit les corrélations que l'on obtient étaient locales, soit la non-localité n'avait pas pu être démontrée. Avec un choix judicieux de mesures, nous avons proposé le premier exemple d'une expérience quantique non locale dans le réseau en triangle, pour lequel notre preuve de non-localité repose sur un argument indépendant des expériences de Bell standard (avec une unique source).

Notre exemple d'expérience est intéressant, car il fait intervenir tous les éléments attendus pour un réseau quantique: états intriqués et mesures intriquées (*voir l'encadré page 38*). Ces caractéristiques, ainsi que notre preuve, indiquent que notre expérience pourrait bien être fondamentalement différente de toutes les expériences de Bell standard, comme l'expérience CHSH ou GHZ. Cette affirmation est confortée par de nombreux arguments, mais il reste à le démontrer formellement.



MUSÉUM  
NAT HIST  
& NATURELLE

AUX DE **FRONTIÈRES**  
**L'HUMAIN**

Exposition  
13 oct. 2021 -  
30 mai 2022

MUSÉE  
DE L'HOMME

Musée de l'Homme  
Place du Trocadéro  
Paris 16<sup>e</sup>

Pour la  
Science

MHN 2021 - Œuvre Quadrup de Samuel YAL. Photo © Anna Katharina Schneiderger