

cette critique en soulignant que le paradoxe apparent réside dans l'attachement d'Einstein au principe de localité. Selon Bohr, l'intrication est un phénomène non local : les deux particules forment un système lié indépendamment de la distance qui semble séparer ses entités.

Le défi était donc de vérifier qui, d'Einstein ou de Bohr, avait raison. En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a obtenu un système d'inégalités portant sur les corrélations entre les particules et que l'on pouvait tester expérimentalement : si ces inégalités sont satisfaites, c'est qu'il existe des variables cachées ; à l'inverse, si elles sont violées, c'est que l'intrication quantique est bien un phénomène non local.

Une telle expérience a été difficile à mettre en place, mais en 1980, Alain Aspect et ses collègues, en France, ont réussi à montrer de façon convaincante que les inégalités de Bell sont violées. Et d'autres expériences ont suivi afin de vérifier de façon toujours plus rigoureuse la nature non locale de l'intrication quantique (voir la figure pages 34-35).

L'intrication pourrait sembler n'être qu'une propriété ésotérique des systèmes quantiques. Pourtant, au cours des deux dernières décennies, ces corrélations quantiques ont conduit à des applications et percées dans des domaines tels que la cryptographie et l'informatique quantique.

Jusqu'à présent, nous avons décrit dans les grandes lignes les trous de ver et l'intrication quantique. Comment ces deux phénomènes si différents peuvent-ils être reliés ? Une réponse s'est profilée en étudiant d'un peu plus près les trous noirs. En 1974, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement similaire à celui d'un objet chaud.

Le physicien anglais s'est intéressé à un phénomène quantique qui se déroule en permanence. L'espace sans matière est loin d'être vide : des paires particule-anti-particule y naissent spontanément, et disparaissent tout aussi vite en s'annihilant. Stephen Hawking a considéré des paires qui se forment juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir. Il peut arriver qu'une des particules d'une paire tombe dans le trou noir et que l'autre s'échappe loin de l'astre. Pour un observateur distant, le trou noir

semble alors rayonner à la manière d'un corps chaud, si bien que ce phénomène implique aussi que le trou noir a une température.

Or depuis le XIX^e siècle, les physiciens ont compris que la température d'un système résulte des mouvements erratiques de ses constituants microscopiques. Dans un gaz, par exemple, la température est liée à l'agitation des molécules. Par conséquent, si les trous noirs ont une température, on peut s'attendre à ce qu'ils renferment eux aussi des constituants microscopiques collectivement capables d'adopter différentes configurations, que l'on nomme micro-états, dont certaines correspondraient au même état macroscopique du trou noir.

ER = EPR

Les trous de ver,
ou ponts ER,
et l'intrication quantique en
jeu dans le paradoxe EPR
pourraient être deux
aspects d'un même
phénomène

Les travaux de Stephen Hawking ont conduit les physiciens à considérer que, au moins vus de l'extérieur, les trous noirs devraient se comporter comme des systèmes quantiques. Ils devraient donc être soumis à toutes les lois quantiques. Pour résumer, quand nous regardons un trou noir macroscopique de l'extérieur, nous devrions observer un système qui a de nombreux micro-états possibles, chacun ayant la même probabilité d'être réalisé.

Puisque, vus de l'extérieur, les trous noirs ressemblent à des systèmes quantiques ordinaires, rien ne nous empêche (en théorie) de considérer deux trous noirs intriqués et très distants l'un de l'autre. Chacun a un grand nombre de micro-états quantiques possibles. Et l'on peut imaginer

une intrication telle que chaque micro-état quantique du premier trou noir est corrélé avec le micro-état correspondant du second. En particulier, si l'on mesure un certain état pour le premier trou noir, l'autre trou noir devra être exactement dans le même état.

L'histoire devient alors fascinante. En s'appuyant sur certaines considérations inspirées de la théorie des cordes (qui est l'une des pistes les plus explorées pour parvenir à une théorie quantique de la gravitation), nous avons suggéré qu'une paire de trous noirs aux micro-états ainsi intriqués (ce qu'on pourrait nommer un état d'intrication EPR) produirait un espace-temps dans lequel un trou de ver (un pont ER) relierait l'intérieur des deux trous noirs. En d'autres termes, l'intrication quantique crée une connexion géométrique entre les deux trous noirs. C'est étonnant, car on pensait que l'intrication implique des corrélations sans liens physiques ; or ici, les deux trous noirs distants sont physiquement connectés par leur intérieur grâce au trou de ver.

Leonard Susskind, de l'université Stanford, et moi avons noté « ER = EPR » cette équivalence des trous de ver et de l'intrication. Du point de vue d'EPR, les observations près de l'horizon de chaque trou noir sont corrélées parce que les trous noirs sont dans un état quantique intriqué. Et dans la perspective ER, les observations sont corrélées parce que les deux systèmes sont liés par le trou de ver.

Pour en revenir à Roméo et Juliette, nous sommes maintenant en mesure d'imaginer comment ces amants pourraient créer le trou de ver destiné à les réunir. Tout d'abord, ils doivent produire de nombreuses paires de particules intriquées, semblables à celles examinées plus haut, Roméo possédant un membre de chaque paire intriquée et Juliette l'autre. Il leur faut ensuite construire des ordinateurs quantiques très complexes qui manipuleront leurs particules quantiques respectives et les combineront de façon contrôlée pour créer une paire de trous noirs intriqués. Un tel exploit serait extrêmement difficile à réaliser en pratique. En effet, à la moindre interaction, les particules perdent leurs propriétés d'intrication. Mais l'opération n'est pas interdite par les lois de la physique. Et n'avons-nous pas dit que Roméo et Juliette étaient très intelligents ?



Notre idée s'appuie sur de nombreux travaux réalisés ces dernières décennies. Citons notamment un article publié en 1976 par Werner Israel, alors à l'université de l'Alberta, au Canada, sur la thermodynamique des trous noirs. En 2006, Shinsei Ryu et Tadashi Takayanagi, à l'université de Californie à Santa Barbara, ont étudié la relation entre l'intrication et la géométrie de l'espace-temps. Mais c'est surtout un article récent d'Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski et James Sully, tous alors à l'université de Californie à Santa Barbara, qui nous a incités à regarder de plus près le lien entre intrication quantique et trous de ver. Ces chercheurs ont réexaminé ce que nous savions des trous noirs. Et ils ont mis au jour un paradoxe.

Les trous noirs brûlent-ils ?

Une question majeure concernant les trous noirs est celle de la perte d'information. En effet, toute information qui traverse l'horizon des événements d'un trou noir ne peut en ressortir. *A priori*, cette information ne serait pas réellement perdue, mais juste hors de portée, pour nous autres

à l'extérieur du trou noir. Mais avec les travaux de Stephen Hawking, le sort de l'information est devenu moins trivial. Pour un observateur distant, un trou noir qui rayonne perd de la masse. Il s'évapore jusqu'à disparaître complètement. Que devient l'information (que le rayonnement de Hawking ne peut transporter, en raison de sa nature aléatoire) ? Les physiciens en débattent encore car, en physique quantique, un principe fondamental impose la conservation de l'information.

Les trous noirs violent-ils ce principe ? Pas nécessairement. En 1997, j'ai apporté un élément de réponse en développant le principe holographique. Ce modèle établit une équivalence mathématique entre un univers tridimensionnel régi par la gravitation (qui peut donc contenir des trous noirs) et un univers bidimensionnel dépourvu de gravitation, qui borde l'espace tridimensionnel. Ainsi, la description de l'évolution d'un trou noir en trois dimensions, où le problème de la conservation de l'information se pose, peut être réalisée à l'aide de champs vivants dans un espace à deux dimensions, où le problème ne se pose pas car, sans gravitation, il n'y a pas de trous noirs ! En conséquence, puisque l'information

est préservée dans l'univers 2D, elle l'est nécessairement dans l'univers 3D.

Cependant, cela n'explique pas ce que devient l'information. Dans les années 1990, Leonard Susskind a montré que le rayonnement de Hawking peut porter l'information s'il constitue un système de particules intriquées entre elles. Mais un nouveau problème surgissait : chaque particule du rayonnement de Hawking est *a priori* corrélée à son partenaire tombé dans le trou noir. Or, d'après un principe nommé monogamie de l'intrication, une particule ne peut être simultanément intriquée avec deux systèmes différents (ici, le partenaire tombé dans le trou noir et l'ensemble du rayonnement de Hawking émis par le trou noir).

Pour résoudre cette difficulté, Joe Polchinski et ses collègues ont alors supposé que les intrications des paires étaient rompues au niveau de l'horizon des événements du trou noir. Mais ce phénomène devrait s'accompagner d'une libération d'énergie qui, à l'échelle de l'astre, devient importante au voisinage de l'horizon, ce que les physiciens ont nommé le *firewall* (« mur de feu »). Cette solution a un inconvénient majeur : l'horizon ne serait plus, comme en relativité générale, une frontière virtuelle