

■ L'AUTEUR



Juan MALDACENA est physicien théoricien à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis. Il est connu pour ses contributions à l'étude de la gravitation quantique et de la théorie des cordes.

Une compréhension approfondie de cette relation entre intrication et trous de ver aboutira peut-être à une piste pour unifier la physique quantique et la relativité générale et ainsi pour développer une théorie quantique de la gravitation. En effet, à ce jour, la physique quantique, qui décrit notamment les interactions subatomiques, et la relativité générale, qui rend compte de la dynamique de l'espace-temps et de la gravitation, sont incompatibles. Or une théorie quantique de la gravitation est nécessaire pour explorer les instants les plus reculés de l'histoire de l'Univers et l'intérieur des trous noirs.

De façon étonnante, les idées d'intrication quantique et de trous de ver remontent toutes deux à des articles écrits en 1935 par Albert Einstein et ses collaborateurs. Ces articles traitent de phénomènes très différents, et Einstein n'a probablement jamais imaginé qu'il pourrait y avoir entre eux un rapport. Et ce d'autant plus que, pour le célèbre physicien, l'intrication quantique traduisait l'existence de problèmes fondamentaux au cœur de la théorie quantique. L'ironie est grande: ce phénomène pourrait aujourd'hui ouvrir une voie pour concilier la théorie de la relativité générale, développée par Einstein en 1915, et la physique quantique.

Des trous noirs aux trous de ver

Afin d'expliquer pourquoi l'intrication quantique et les trous de ver pourraient être apparentés, penchons-nous d'abord sur certaines propriétés des trous noirs. Ces objets de l'extrême sont décrits dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Celle-ci montre comment la matière et l'énergie déforment l'espace-temps et que la force gravitationnelle est une manifestation de la courbure de ce dernier.

Dans la plupart des situations, la courbure de l'espace-temps est très faible. Mais elle devient extrême dans les trous noirs. On distingue alors deux régions: l'intérieur du trou noir, d'où même des objets se déplaçant à la vitesse de la lumière dans le vide (environ 300 000 kilomètres par seconde) ne peuvent s'échapper, et son extérieur, où l'espace-temps est courbé mais d'où les objets et l'information peuvent encore s'échapper. On nomme «horizon des événements» la frontière séparant ces deux régions. D'après la relativité générale, cet horizon n'est qu'une surface immatérielle: un astronaute qui le traverserait ne ressentirait

rien de particulier. Mais une fois qu'il l'aura franchi, le voyageur de l'espace ne pourra plus s'échapper. Il sera condamné à atteindre la région du trou noir où la courbure devient infinie selon la physique non quantique, nommée la singularité interne.

En 1916, soit un an seulement après l'introduction de la relativité générale par Einstein, le physicien allemand Karl Schwarzschild trouva la solution la plus simple des équations d'Einstein décrivant ce qu'on nommera plus tard un trou noir. Cependant, la géométrie de l'espace-temps correspondant à la solution de Schwarzschild – et à la plupart des autres solutions aux équations d'Einstein – était difficile à interpréter jusque dans ses plus subtiles conséquences. En effet, les physiciens maîtrisaient peu à l'époque les mathématiques associées à la géométrie différentielle et à l'invariance sous les changements de coordonnées, qui sont nécessaires pour décrire ce qui se passe au voisinage d'un trou noir.

En 1935, Einstein et son collègue Nathan Rosen, alors à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, découvraient la possibilité qu'existent des trous de ver – on parle aussi de ponts d'Einstein-Rosen (ou ponts ER). Les deux physiciens n'en saisissaient pas toute la géométrie. Il fallut attendre les années 1960 pour que les chercheurs commencent à comprendre le sens de la solution de Schwarzschild et comment un trou de ver y relie en quelque sorte deux trous noirs. Vus de l'extérieur, les deux astres se présentent comme des entités distinctes situées dans des régions différentes de l'espace-temps, mais, d'après les équations, les trous noirs partagent le même intérieur.

Le trou de ver de la solution de Schwarzschild diffère *a priori* des trous noirs qui se forment dans le cosmos suite à l'effondrement d'étoiles massives en cela qu'il ne contient pas de matière, mais uniquement de l'espace-temps courbe. En outre, un trou noir né d'une étoile n'a qu'un seul extérieur, alors que ce trou de ver en a deux. La plupart des chercheurs considèrent la solution de Schwarzschild présentant deux extérieurs comme une curiosité mathématique sans pertinence pour le monde réel. Les physiciens théoriciens se sont néanmoins interrogés sur son interprétation physique.

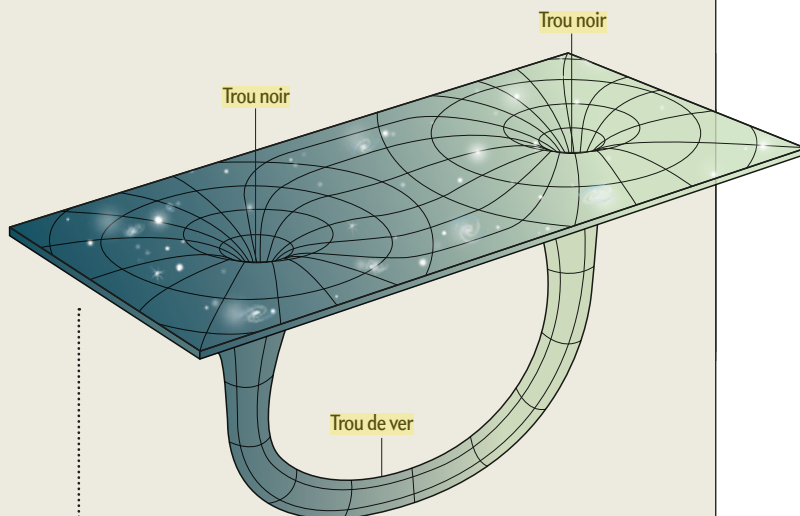
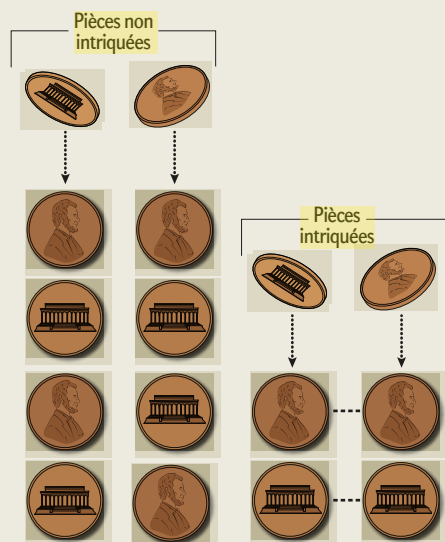
En 1962, les physiciens américains John Wheeler et Robert Fuller ont montré que le trou de ver reliant les extérieurs des deux trous noirs est instable. Il s'allonge et s'affine à mesure que le temps passe, comme de la

L'ESSENTIEL

- La physique quantique permet l'intrication d'objets éloignés, les mesures réalisées sur l'un affectant celles sur l'autre, même s'il n'y a pas de lien physique entre eux.
- Les équations de la relativité générale, qui décrivent la géométrie de l'espace-temps, autorisent l'existence de trous de ver, des raccourcis entre des régions éloignées.
- Les deux phénomènes pourraient être équivalents. Cette équivalence fournirait une piste pour élaborer une description quantique de l'espace-temps.

QUAND L'INTRICATION QUANTIQUE RENCONTRE LES TROUS DE VER

L'intrication est un concept de la physique quantique qui décrit un type particulier de corrélations entre les propriétés de deux objets, quelle que soit la distance qui les sépare. Les trous de ver, prédits par la relativité générale, sont des ponts spatio-temporels pouvant relier des régions éloignées, dans certains cas deux trous noirs. Certains physiciens émettent l'hypothèse que ces deux phénomènes, apparemment sans rapport, sont fondamentalement liés.



INTRICATION QUANTIQUE

Quand on lance deux pièces quelconques, le résultat du tirage de l'une n'influe pas sur celui de l'autre – n'importe laquelle des quatre combinaisons se produira (à gauche). Mais si les deux pièces sont intriquées, alors le résultat du lancer de la première détermine celui du lancer de la seconde. Si la première tombe sur pile, par exemple, la seconde tombera également sur pile, et si la première donne face, la seconde donnera face aussi (à droite).

TROUS DE VER

Les équations de la relativité générale suggèrent qu'un trou de ver peut connecter deux trous noirs, même très distants l'un de l'autre, pour créer un pont dans l'espace-temps. À un observateur extérieur, les trous noirs donneraient l'impression de constituer des entités séparées, mais ils seraient reliés par un intérieur partagé. Cependant, aucune personne ni signal ne pourraient voyager à travers.

UN SEUL ET MÊME PHÉNOMÈNE ?

Si deux trous noirs venaient à être intriqués, tous les éléments microscopiques à l'intérieur du premier trou noir seraient corrélés avec ceux du second. Dans cette situation, il semble que les trous noirs formeraient un espace-temps qui présente un trou de ver reliant les intérieurs des deux astres. Cette découverte suggère que l'intrication et les trous de ver seraient des phénomènes équivalents.

