

Réconcilier enfin relativité générale et physique quantique ? Un rêve de physiciens qui prendrait corps avec une nouvelle théorie : l'intrication quantique de deux trous noirs correspondrait à la formation d'un trou de ver reliant les deux astres.

La physique théorique regorge de notions étonnantes, mais deux des plus étranges sont certainement l'intrication quantique et les trous de ver. La première est un phénomène purement quantique, dans lequel deux objets (en général des particules subatomiques) ont des propriétés directement corrélées même si de grandes distances les séparent et qu'aucun lien physique ne semble exister entre eux. Quant aux trous de ver, prédits par la théorie de la relativité générale, ce sont des raccourcis qui connecteraient des régions éloignées de l'espace-temps, par exemple deux trous noirs distants. Ces dernières années, avec plusieurs autres physiciens, j'ai suggéré que ces deux concepts *a priori* si différents sont peut-être liés. À partir de calculs portant sur des trous noirs, nous nous sommes rendu compte que l'intrication de la physique quantique et les trous de ver de la relativité générale pourraient constituer deux facettes d'un même phénomène. Et nous pensons que cette similitude s'étend à des situations qui ne se limitent pas aux trous noirs.

Nous n'en sommes qu'aux prémices de cette idée, mais si elle se confirme, elle aura des conséquences profondes sur notre compréhension du monde. En effet, elle suggère par exemple que l'espace-temps lui-même émergerait de l'intrication de constituants microscopiques plus fondamentaux. Elle laisse aussi penser que la relation entre objets intriqués (et qui ont longtemps été considérés comme n'ayant pas de lien physique entre eux) serait moins « magique » qu'elle n'apparaît.

DEUX TROUS NOIRS, situés à grande distance l'un de l'autre, pourraient être reliés par un trou de ver, d'après les équations de la relativité générale. En s'inspirant de certains résultats de la théorie des cordes, des physiciens pensent que les trous de ver et l'intrication quantique sont deux aspects d'un même phénomène.

Malcum Goatin, Moarunna Design

■ 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.

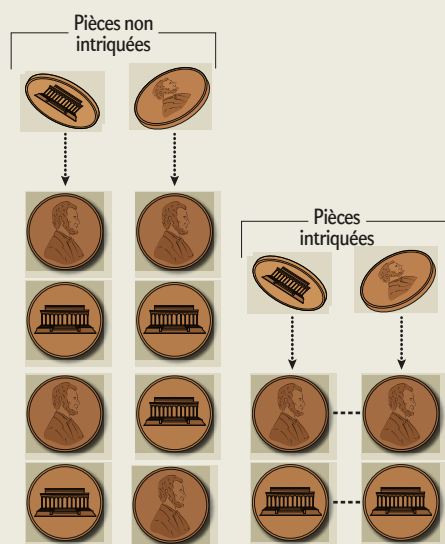
En 1962, les physiciens américains John Wheeler et Robert Fuller ont montré que le trou de ver reliant les extérieurs des deux trous noirs est instable. Il s'allonge et s'affine à mesure que le temps passe, comme de la

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.

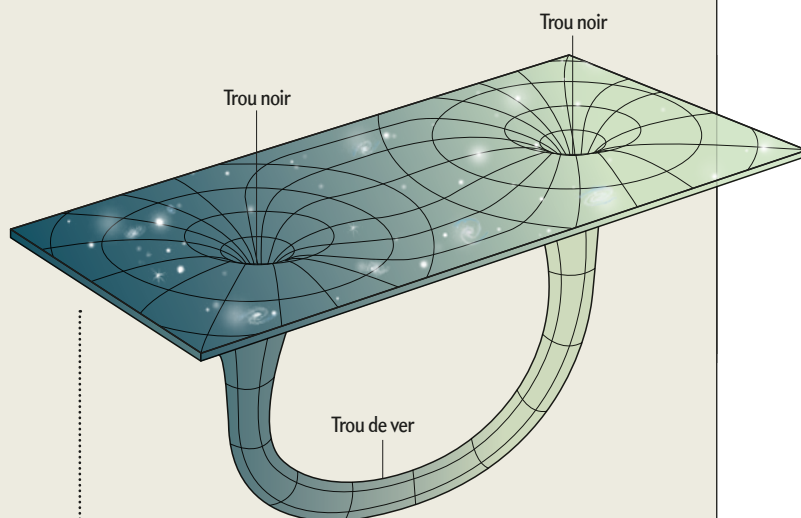
QUAND L'INTRICATION QUANTIQUE RENCONTRE LES TROUS DE VER

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).

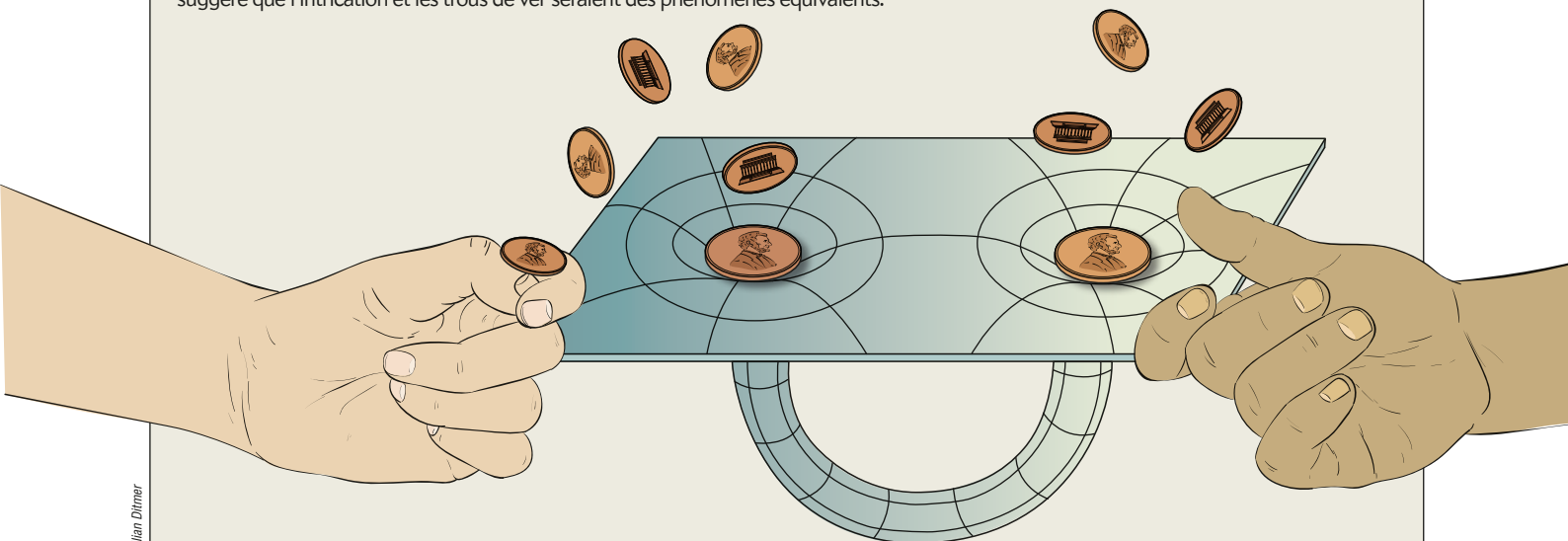


TROUS DE VER

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.





LE TROU NOIR AU CENTRE DE LA VOIE LACTÉE, Sagittarius A*, est visible de façon indirecte grâce au rayonnement émis par la matière qui s'échauffe en tombant dedans (*en bleu*), et observé par le télescope *Chandra*. Est-il relié à une autre région de l'Univers par un trou de ver ?

© NASA/CXC/Callech/M. Muno et al.

pâte à pain que l'on étirerait. Les horizons des trous noirs finissent alors par se séparer. En fait, ils s'écartent tellement vite qu'il est impossible d'utiliser un trou de ver de ce type pour voyager d'un extérieur à l'autre. Dit autrement, le pont s'écroule avant que nous puissions le traverser.

Les trous de ver à la Einstein-Rosen diffèrent donc en partie de ceux que l'on rencontre parfois dans la science-fiction, comme dans le film *Interstellar* de Christopher Nolan, car ils ne sont pas « traversables ». S'ils ne sont pas qu'une curiosité mathématique, on pourrait néanmoins les inclure dans le scénario d'une œuvre de science-fiction de la façon suivante : pour séparer Roméo et Juliette, les familles des deux amants les envoient dans deux galaxies éloignées, en leur interdisant de voyager. Mais les tourtereaux, très doués en physique, réussissent à se construire un trou de ver. De l'extérieur, le trou de ver semble n'être qu'une paire de trous noirs, l'un dans la galaxie de Roméo, l'autre dans celle de Juliette. Les amants se jettent alors à l'intérieur de leur trou noir respectif. Aux yeux de leurs familles, ils se sont simplement suicidés et on n'a jamais plus entendu parler d'eux. Mais la géométrie du trou de ver est telle que Roméo et Juliette se sont en réalité retrouvés

dans l'intérieur partagé, à l'insu du monde extérieur ! Et ils y vivent heureux ensemble pendant un petit moment, avant que le pont ne s'écroule, détruisant l'intérieur et les tuant tous les deux.

Intrication : d'étonnantes corrélations

L'article de 1935 discutant de l'autre phénomène qui nous intéresse, l'intrication quantique, a été écrit par Einstein, Rosen et Boris Podolsky (alors également à l'Institut d'études avancées). Le trio est généralement désigné par ses initiales, EPR. Dans cet article, les trois physiciens tentaient de mettre au jour un problème de la théorie quantique en exposant un phénomène qui semblait violer le principe relativiste selon lequel aucune particule ou information ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière. Or dans le phénomène présenté par le trio EPR et qu'on nommera plus tard « intrication », deux objets physiques présentent d'étranges corrélations, même s'ils sont distants au point qu'aucun signal physique n'a le temps de se propager de l'un à l'autre au cours de la durée qui sépare les mesures effectuées sur chacun d'entre eux.

Des corrélations, il en existe aussi en physique classique. Imaginez par exemple que vous quittiez la maison muni d'un seul gant parce que vous avez oublié l'autre chez vous. Avant de fouiller votre poche, vous ne savez pas si vous avez emporté le gant gauche ou le droit. Mais une fois que vous avez vu que c'est le gant droit, vous savez immédiatement que c'est le gauche qui est resté à la maison.

Cependant, l'intrication quantique est bien plus intéressante et intrigante. Considérons par exemple les corrélations portant sur la polarisation des photons qui, lorsqu'on la mesure, est soit « horizontale », soit « verticale ». De façon générale, l'état de polarisation d'un photon est, sur le plan mathématique, une combinaison linéaire (une somme pondérée) de ces deux états observables de base. Mais quand on mesure la polarisation, cette superposition d'états disparaît : l'orientation mesurée est soit verticale, avec une certaine probabilité (qui dépend de l'état initial), soit horizontale, avec la probabilité complémentaire.

Maintenant, il est possible de préparer une paire de photons A et B dans un état quantique particulier, dit intriqué, où la polarisation mesurée pour l'un des photons, que le résultat soit « verticale » ou « horizontale », est toujours orthogonale à celle mesurée pour l'autre photon. Le système global a ici un état bien défini (on sait qu'il contient deux photons de polarisations orthogonales), mais on ne peut rien dire sur ceux des particules individuelles avant d'effectuer la mesure.

Une expérience consisterait à produire des paires de photons intriqués A et B qui partent dans des directions opposées et s'éloignent. Supposons qu'à un instant donné, on mesure la polarisation de A ; si le résultat est « verticale », une mesure de la polarisation de B donnera à coup sûr « horizontale », même si aucun signal physique n'a pu aller d'un photon à l'autre dans le laps de temps qui sépare les deux mesures. Ainsi, les deux particules semblent communiquer au moment de la mesure pour s'accorder instantanément sur leurs polarisations respectives, en violation des lois de la relativité. C'est le fameux paradoxe EPR.

Pour le résoudre, Einstein, Podolsky et Rosen suggéraient que la formulation de la théorie quantique était incomplète et qu'il existait des variables cachées donnant cette impression de communication sans lien physique entre les deux photons. Le physicien danois Niels Bohr a répondu à

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-antiparticule 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



© université de Delft

où rien de particulier ne se passe. Mais l'idée ER = EPR, qui stipule que l'intérieur du trou noir fait partie d'un trou de ver reliant l'astre à un autre système, atténue certains aspects de ce paradoxe.

Bien que nous ayons identifié une connexion entre les trous de ver et les états intriqués en considérant des trous noirs, il est tentant de spéculer que le lien est plus général : qu'à chaque fois que nous avons une intrication, nous avons une sorte de connexion géométrique. Il en serait ainsi même dans le cas le plus simple, quand nous n'avons que deux particules intriquées.

Un principe universel ?

Pour en revenir au paradoxe du *firewall*, du fait de l'intrication des paires de particules, l'une s'échappant et l'autre tombant dans le trou noir, un trou de ver devrait les relier et, de fait, les espaces à l'intérieur et à l'extérieur seraient connectés. Pour se faire une image de la situation, le trou noir ressemblerait à une pieuvre géante dont les tentacules (les trous de ver) seraient reliés aux particules du rayonnement de Hawking.

Si l'équivalence entre les trous de ver et l'intrication quantique se généralise, la

connexion spatiale pourrait impliquer de minuscules structures quantiques qui ne suivraient pas notre vision habituelle de la géométrie. Nous ne savons toujours pas décrire ces géométries microscopiques, mais l'intrication de ces structures pourrait, d'une manière ou d'une autre, donner naissance à l'espace-temps lui-même. C'est comme si l'intrication pouvait être considérée comme un fil reliant deux systèmes. Quand la quantité d'intrication augmente, nous avons beaucoup de fils, et ensemble ces fils pourraient tisser la trame de l'espace-temps. Dans cette représentation, les équations de la relativité d'Einstein régissent les connexions et les reconnections de ces fils, tandis que la physique quantique serait l'essence de la construction de l'espace-temps.

Pour le moment, ce tableau relève encore d'une spéculation débridée, mais plusieurs indices pointent vers lui, et de nombreux physiciens se penchent sur ses implications. L'hypothèse de l'équivalence entre intrication et trous de ver fournit une piste pour développer une description quantique de l'espace-temps – ainsi qu'une unification très attendue, et jusqu'à présent insaisissable, de la relativité générale et de la physique quantique. ■

L'INTRICATION QUANTIQUE

et sa nature non locale sont testées avec des dispositifs de plus en plus complexes afin d'éliminer toute faille possible dans l'interprétation. En 2015, l'équipe de Ronald Hanson de l'université de Delft, aux Pays-Bas, a réalisé l'une des expériences les plus abouties, à l'aide de deux dispositifs distants de 1,3 kilomètre.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Susskind, ER = EPR, GHZ, and the consistency of quantum measurements, *Fortschritte der Physik*, vol. 64(1), pp. 72-83, 2016.

J. Polchinski, L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?, *Pour la Science*, n° 456, octobre 2015.

R. Cowen, The quantum source of space-time, *Nature*, vol. 527, pp. 290-293, 2015.

J. Maldacena et L. Susskind, Cool horizons for entangled black holes, *Fortschritte der Physik*, vol. 61(9), pp. 781-811, 2013.

Au-delà de la grammaire universelle

Paul Ibbotson et Michael Tomasello

L'enfant est-il muni de règles de grammaire innées qui lui permettent d'apprendre n'importe quelle langue ? Cette théorie de Noam Chomsky, longtemps dominante, a du plomb dans l'aile. L'enfant apprendrait plutôt de ce qu'il entend, en exploitant des facultés cognitives générales.

L'idée que notre cerveau comporte un modèle mental permettant d'apprendre la grammaire, théorie mise en avant par Noam Chomsky, professeur émérite au MIT, l'institut de technologie du Massachusetts, a dominé la science linguistique pendant près d'un demi-siècle. Mais des recherches récentes portant sur de nombreuses langues du monde, ainsi que sur la façon dont les jeunes enfants apprennent à comprendre et parler la langue de leur milieu, ont conduit des chercheurs en cognition et en linguistique à abandonner en masse la théorie de la « grammaire universelle » : ces travaux ne permettent pas de soutenir la conception de Noam Chomsky.

Les travaux de recherche suggèrent une vision radicalement différente, selon laquelle l'apprentissage de la langue maternelle par l'enfant ne repose pas sur un module grammatical inné. Ils montrent plutôt que les jeunes enfants utilisent divers types de capacités cognitives qui ne seraient pas du tout spécifiques au langage, telle la capacité à classer le monde dans des catégories (personnes ou objets, par exemple)

L'ESSENTIEL

- Les études linguistiques de terrain ont remis en question la théorie de la grammaire universelle, selon laquelle le cerveau comporte un modèle mental spécifique à la grammaire.
- Cette théorie de Noam Chomsky a longtemps dominé la linguistique et a été amendée plusieurs fois.
- Celle de la « linguistique fondée sur l'usage » postule que pour apprendre à parler, l'enfant mobilise des capacités cognitives générales et le décodage des intentions des personnes autour de lui.

ou la capacité à comprendre les relations entre les choses. Ces capacités, associées à l'aptitude proprement humaine à saisir ce que les autres cherchent à communiquer, permettent au langage de se développer.

Chercher dans une autre direction

Les nouvelles découvertes indiquent que si les chercheurs veulent véritablement comprendre comment un enfant, ou un adulte, apprend une langue, ils doivent chercher dans une autre direction que celle de la théorie de Chomsky.

Cette conclusion est importante parce que l'étude du langage joue un rôle central dans divers domaines : poésie, intelligence artificielle, linguistique, etc. De plus, les humains utilisent le langage d'une façon que les animaux ne peuvent pas égaler. Si l'on comprend ce qu'est le langage, on comprendra donc un peu mieux la nature humaine.

La première version de la théorie de Chomsky, proposée au milieu du XX^e siècle, faisait écho à deux tendances émergentes