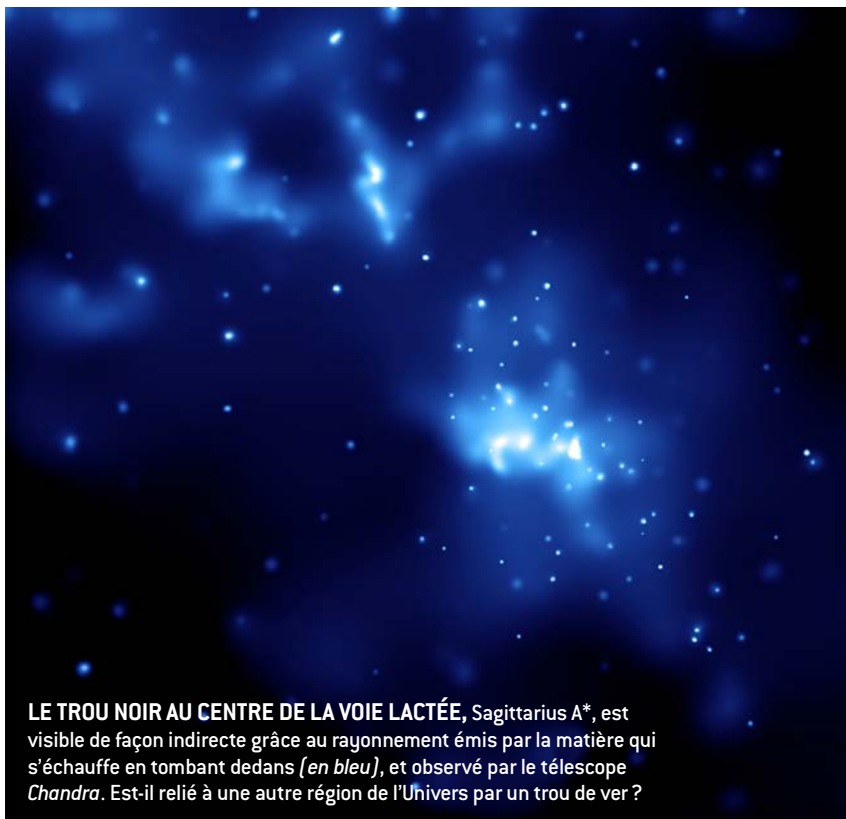




LE TROU NOIR AU CENTRE DE LA VOIE LACTÉE, Sagittarius A*, est visible de façon indirecte grâce au rayonnement émis par la matière qui s'échauffe en tombant dedans (*en bleu*), et observé par le télescope *Chandra*. Est-il relié à une autre région de l'Univers par un trou de ver ?

© NASA/CXC/Caltech/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 ?