

> sorte que cela ne détruit pas, par exemple, un astronaute qui traverserait la région où se trouverait normalement l'horizon des événements. Dans ce scénario «non violent fort», ces fluctuations de l'espace-temps transfèrent de l'information vers l'extérieur.



L'espace-temps émergerait d'une structure plus fondamentale



En outre, j'ai remarqué que l'information peut aussi s'échapper d'une façon intrinsèquement quantique, plus subtile. Dans le scénario «non violent faible», même de minuscules fluctuations quantiques de la géométrie de l'espace-temps à proximité du trou noir peuvent transférer de l'information à des particules émanant du trou noir. Dans les deux cas, le trou noir se trouve entouré d'un «halo quantique», où les interactions restituent l'information à son environnement, ce qui permet de sauver les principes de conservation de la mécanique quantique.

De façon étonnante, ces scénarios, bien qu'ils semblent nécessiter une propagation superluminique de l'information, ne conduisent pas nécessairement au paradoxe du grand-père. Les deux phénomènes se manifestent seulement à proximité du trou noir, où la géométrie spatio-temporelle est courbe et donc différente de celle d'un espace plat, la configuration qui permet la communication avec le passé (en toute rigueur, elle est possible en espace-temps courbe, mais dans des situations extrêmes et peu naturelles). Autre conséquence intéressante de ces scénarios, ils suggèrent que le principe de localité est à revoir dans sa formulation actuelle.

RÉÉCRIRE LES LOIS DE LA PHYSIQUE

Jusqu'à présent, le scénario de halo quantique n'a pas été formulé dans le cadre d'une théorie complète de la physique qui réconcilierait la mécanique quantique et la relativité générale. Si un tel scénario est correct, il est peut-être la manifestation de la nature plus profonde du monde. Nos notions mêmes d'espace et de temps, qui sous-tendent le reste de la science, auront alors besoin d'une refonte importante.



À lire



THEMA Les trous noirs

Les Thema sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

En vente sur notre site uniquement :
boutique.pourlascience.fr

Les travaux théoriques actuels pour comprendre les trous noirs rappellent les premières tentatives de modélisation de la physique de l'atome par Bohr et d'autres. Leurs descriptions de l'atome étaient approximatives et ce n'est que plus tard qu'elles ont débouché sur la structure théorique profonde de la mécanique quantique. Bien qu'il puisse sembler fou de vouloir modifier la localité, nous pouvons nous rassurer en notant que la mécanique quantique avait tout d'une idée folle pour les physiciens de l'époque aux prises avec leurs découvertes.

Étant donné le défi immense que constitue la conception des trous noirs quantiques et de la théorie plus complète qui les décrit, les physiciens ont hâte de disposer d'indices expérimentaux et observationnels pour les guider. Les passionnantes avancées récentes ont ouvert pour l'humanité deux fenêtres observationnelles directes sur le comportement des trous noirs. En plus des images de trous noirs du réseau *EHT* de radiotélescopes, les observatoires *Ligo* et *Virgo* ont commencé à détecter des ondes gravitationnelles issues de collisions de trous noirs. Ces ondes sont porteuses d'informations précieuses sur les propriétés et le comportement des objets qui les ont émises.

D'un point de vue naïf, il semble absurde d'imaginer que l'*EHT* ou les détecteurs d'ondes gravitationnelles puissent révéler une quelconque entorse à la description des trous noirs par la relativité générale. On ne s'attend à voir des déviations à la théorie d'Einstein que dans des régions où la courbure de l'espace-temps est extrêmement forte, principalement à l'intérieur du trou noir. Or, au niveau de l'horizon d'un trou noir de plusieurs masses solaires, la courbure est assez faible. Pourtant, le paradoxe de l'information et les pistes de résolution avancées suggèrent que les changements aux lois de la physique ne se manifestent pas uniquement dans les profondeurs du trou noir, mais aussi à son horizon et en dehors. Dans le cas du trou noir de M87, la distance à laquelle nous nous attendons à trouver des déviations par rapport aux prédictions classiques est égale à plusieurs fois la taille du Système solaire.

Déjà, *Ligo-Virgo* et le réseau *EHT* ont exclu certaines pistes. Spécifiquement, si les trous noirs étaient remplacés par des vestiges massifs de plus de deux fois le diamètre du supposé trou noir, nous en aurions vu des signes dans les données observationnelles. Dans le cas de l'*EHT*, une bonne partie du rayonnement qui a produit les images désormais célèbres provient d'une région dont la taille fait environ 1,5 fois le diamètre de l'horizon. Et pour *Ligo-Virgo*, une partie du signal que nous détectons est émise quand les deux objets sur le point d'entrer en collision se retrouvent à une distance

comparable. Bien que l'étude de ces signaux n'en soit qu'à ses débuts, l'EHT et *Ligo-Virgo* ont révélé des objets très sombres et très compacts qui produisent des signaux en très bon accord avec ceux prédits pour les trous noirs de la relativité générale.

Cependant, il est important d'étudier ces signaux plus en détail. Une analyse minutieuse mettra peut-être au jour des indices supplémentaires sur la nature quantique des trous noirs. Et même si aucun nouvel effet n'est observé, nous aurons alors des informations qui contraignent les descriptions possibles de leur comportement quantique.

Des vestiges de grand diamètre sont maintenant exclus, mais qu'en est-il des scénarios de vestiges qui ne modifient la description du trou noir que tout près de l'horizon? Bien qu'une discussion complète nécessite une théorie plus développée de ces vestiges (tels que les pelotes duveteuses ou les murs de feu), nous pourrions peut-être observer bientôt de premiers indices. Si ces objets avaient des rayons à peine plus grands que le rayon de l'horizon du trou noir correspondant, il est probable que ni l'EHT ni *Ligo-Virgo* ne seront assez sensibles pour révéler une telle structure, parce que très peu de lumière ou de >

ER = EPR, LA PISTE INTRIQUÉE

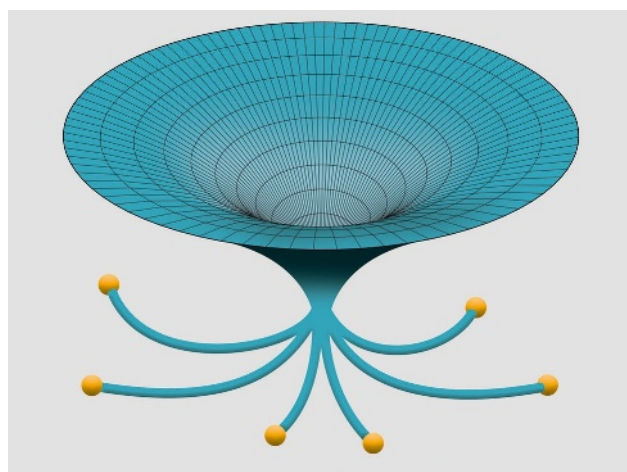
Dans son article, Steven Giddings insiste sur un point crucial : les solutions au paradoxe de l'information ne doivent pas violer le principe de localité. Ce dernier implique qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière, en accord avec la relativité restreinte d'Einstein. Cependant, une autre façon de définir la localité est de dire que deux objets distants ne peuvent avoir d'influence directe l'un sur l'autre. Avec cette définition, on constate que la mécanique quantique est non locale à cause du phénomène d'intrication. Deux particules intriquées voient leurs propriétés corrélées de telle sorte qu'une mesure sur une particule influe instantanément sur l'autre, même si elles sont très éloignées l'une de l'autre. Ce phénomène ne viole pas la relativité restreinte, car il n'est pas possible de l'utiliser pour transmettre de l'information.

Des physiciens se sont demandé s'il n'était pas possible de sauver l'information du trou noir grâce à des processus impliquant l'intrication, où le contenu du trou noir serait intriqué avec le rayonnement de Hawking. En 2012, Joseph Polchinski, de l'université

de Californie à Santa Barbara, et ses collègues ont montré que l'information pouvait être sauvée au prix de la formation d'un « mur de feu » au niveau de l'horizon des événements. Cette conclusion semblait solide et inéluctable. Mais elle était dérangeante, car, en relativité générale, un astronaute qui franchit l'horizon d'un grand trou noir ne sentirait rien, alors qu'avec le mur de feu il serait aussitôt désintégré et converti en énergie pure !

En 2013, Juan Maldacena, de l'Institut des études avancées de Princeton, et Leonard Susskind, de l'université Stanford, ont proposé une piste pour contourner l'émergence du mur de feu. Ils ont conjecturé une relation forte entre l'intrication quantique et une solution des équations de la relativité générale : les trous de ver. Ces objets permettent de relier deux régions de l'Univers par une sorte de raccourci dans l'espace-temps. Les trous de ver particuliers considérés par les deux physiciens sont dits « non traversables », car, même s'ils relient des endroits distants, ils ne permettent pas le transfert d'information, un peu comme le lien créé entre particules par le phénomène d'intrication quantique. La relation proposée est nommée « conjecture ER = EPR » pour, d'un côté, le pont Einstein-Rosen (un trou de ver de la relativité générale) et, de l'autre, le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen, qui a historiquement mis en évidence les propriétés de l'intrication quantique.

Juan Maldacena et Leonard Susskind se sont



Un trou noir déforme l'espace-temps et l'information ne peut *a priori* pas s'en échapper. Une solution possible à ce problème est que le rayonnement de Hawking (en jaune) serait relié par des trous de ver à l'intérieur du trou noir.

intéressés à un modèle idéalisé et peu réaliste : un trou noir éternel (c'est-à-dire qu'il n'est pas né de l'effondrement d'une étoile). Mathématiquement, cet objet peut être interprété comme deux trous noirs dans deux univers différents et partageant le même intérieur. Par conséquent, ils sont quantiquement intriqués. Cette intrication se concrétiserait géométriquement par un trou de ver qui relie les deux trous noirs. En analysant les conséquences de leur conjecture, les deux physiciens ont suggéré que l'intérieur d'un trou noir éternel était connecté au rayonnement de Hawking par des trous de ver. Cette forme d'intrication permet de contourner le problème du mur de feu. Mais cette astuce fonctionne-t-elle aussi avec un trou noir non éternel (pour lequel cet étonnant second univers n'existe pas) ?

En 2019, le groupe d'Ahmed Almheiri, de l'Institut des études avancées de Princeton, puis Geoffrey Penington, de l'université Stanford, ont ainsi étudié des trous noirs non éternels. Ce dernier physicien a considéré le cas d'un trou noir dans une géométrie particulière, dite « anti-de Sitter » (notée AdS et qui ne correspond pas à notre monde), qui lui a permis d'utiliser des outils mathématiques très puissants (la dualité AdS/CFT notamment). Il a alors démontré qu'il était possible de récupérer dans le rayonnement de Hawking l'information tombée dans le trou noir. Cette avancée permettra peut-être de trouver une solution plus générale (application à notre Univers) du paradoxe de l'information dans un trou noir.

SEAN BAILLY
Pour la Science