

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

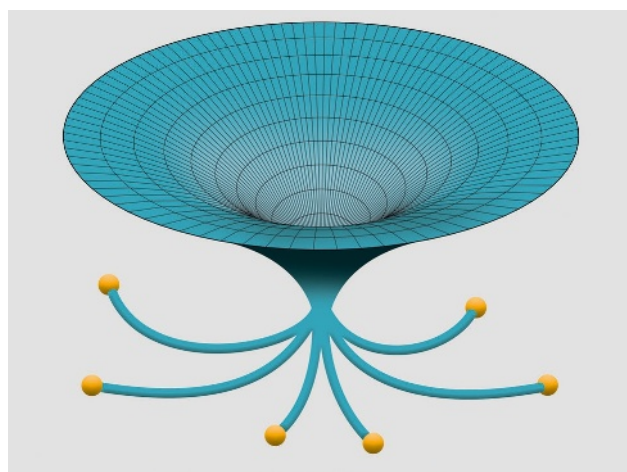
Dans son article, Steven Giddings insiste sur un point crucial : les solutions au paradoxe de l'information ne doivent pas violer le principe de localité. Ce dernier implique qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière, en accord avec la relativité restreinte d'Einstein. Cependant, 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



Le détecteur Virgo, près de Pise, collabore avec les interféromètres Ligo, aux États-Unis. Ils traquent des ondes gravitationnelles émises par la coalescence de trous noirs ou d'étoiles à neutrons.

Ligo et Virgo pourraient détecter des échos gravitationnels

> rayonnement gravitationnel émane de cette région proche de l'horizon.

Une exception possible est celle des «échos» gravitationnels. En 2016, Vitor Cardoso, de l'université de Lisbonne, et ses collègues ont suggéré que si deux vestiges se combinent pour former un vestige final qui, pendant un temps très court, vibre avant de se stabiliser, les ondes gravitationnelles émises lors de cette phase de transition peuvent se réfléchir sur la surface du vestige, et cette réverbération (les échos) serait observable comme un motif qui se répète de façon atténuée dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles. En octobre 2020, la collaboration *Ligo-Virgo* a publié un catalogue enrichi de 39 détections de fusions d'une paire de trous noirs ou d'étoiles à neutrons. Son analyse ne met en évidence aucun écho, ce qui contraint d'autant les scénarios de vestiges.

La plupart de ces scénarios à vestige modifiant la nature de l'horizon seront donc difficiles à écarter sur la base des seules observations. Et,

comme nous l'avons mentionné, d'un point de vue théorique, il reste difficile de comprendre pourquoi ces objets restent stables et ne s'effondrent pas à leur tour pour former des trous noirs. Ce problème est général à tous les scénarios de vestiges massifs, mais il devient encore plus aigu dans la situation d'une collision de deux de ces objets.

Les perspectives sont meilleures pour tester certains des scénarios où de nouvelles interactions apportent des modifications subtiles de la géométrie de l'espace-temps, mais s'étendent très au-delà de l'horizon. Par exemple, dans le scénario «non violent fort», la vibration du halo quantique du trou noir peut dévier la lumière passant à proximité du trou noir. Si ce scénario est correct, le scintillement entraînerait des distorsions des images de l'EHT qui changeraient au cours du temps.

Avec Dimitrios Psaltis, de l'université de l'Arizona, nous avons calculé que ces changements se produiraient sur une durée d'environ une heure pour le trou noir supermassif situé au centre de la Voie lactée. Parce que l'EHT combine des observations sur plusieurs heures et en fait une moyenne, de tels effets seraient sans doute difficiles à voir. Mais les temps caractéristiques des fluctuations pour le trou noir supermassif de M87, qui est mille fois plus gros, seraient plutôt de l'ordre de quelques dizaines de jours. En prolongeant les durées de prises de données de l'EHT (de sept jours dans le projet initial), nous pourrions déceler ces distorsions.