

des trous noirs et les conduise à produire une sorte de «vestige massif», quelque chose qui ressemblerait davantage à une étoile à neutrons qu'à un trou noir.

L'inconvénient de cette proposition est que nous ne savons pas expliquer pourquoi ces objets seraient stables: aucune loi connue de la physique n'empêcherait la poursuite de l'effondrement sous l'effet de la gravité, et toute tentative d'explication physique suppose une transmission superluminique de signaux d'un côté à l'autre de la matière qui s'effondre.

Malgré les problèmes de ce genre de scénarios, les physiciens en ont exploré différentes versions. Par exemple, en 2003, Samir Mathur, de l'université d'État de l'Ohio, a avancé une idée fondée sur la théorie des cordes (où les particules fondamentales sont décrites par de minuscules cordes).

Son idée est qu'un trou noir se transforme en «pelote duveteuse» (*fuzzball*), une sorte de vestige massif, ou même qu'une telle pelote duveteuse se forme dès le départ à la place d'un trou noir. Grâce à la physique de la théorie des cordes qui fait intervenir plus de dimensions que les quatre habituelles de l'espace-temps, les pelotes duveteuses auraient une géométrie complexe de plus grande dimensionnalité; au lieu de la frontière nette et lisse d'un trou noir au niveau de l'horizon

des événements, une pelote duveteuse aurait une frontière plus floue et étendue.

Une version plus récente du scénario de vestige est l'idée selon laquelle l'horizon du trou noir est remplacé par un «mur de feu» (*firewall*) constitué de particules de haute énergie. Ce mur de feu incinérerait tout ce qui arrive dessus et le transformerait en énergie pure (voir l'encadré page 27). Mais la pelote duveteuse et le mur de feu ont deux problèmes en commun: ils supposent une violation de la localité, et les objets en résultant auraient des propriétés très difficiles à expliquer.

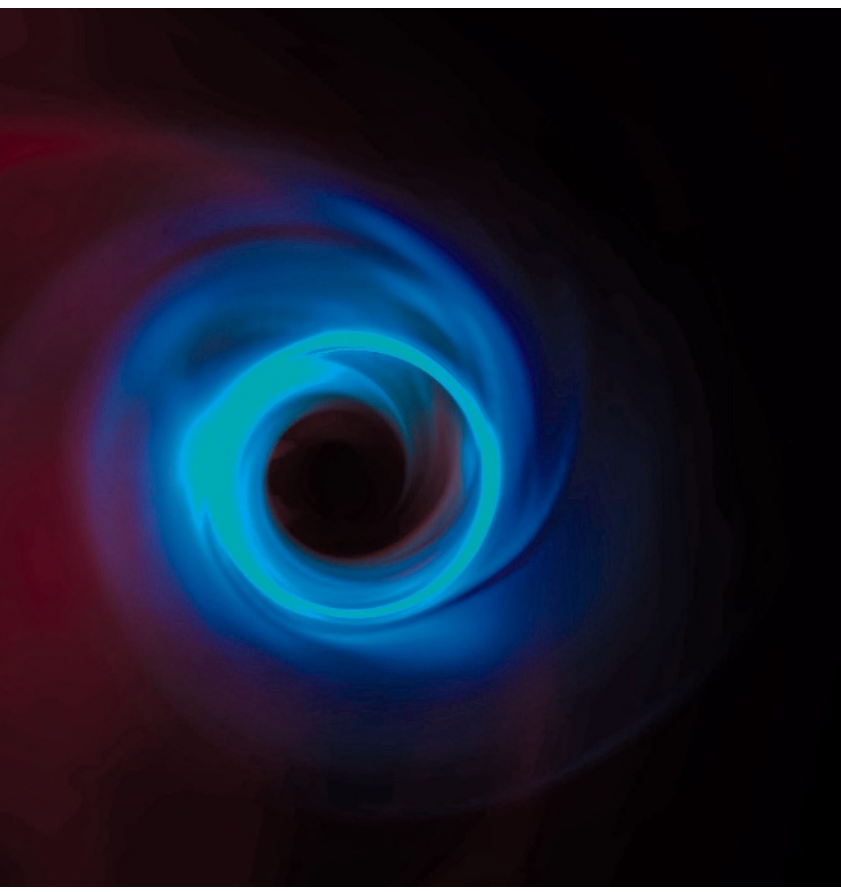
MODIFIER LA LOCALITÉ

Ces différentes pistes semblent toutes sauver l'information au détriment du principe de localité. Mais si l'on fait cela sans précaution, on est conduit typiquement à un autre paradoxe lié à la causalité: avec un signal superluminique, dans un espace vide et plat, une personne peut envoyer un message dans le passé. Mais si ce message déclenche la mort de son grand-père avant la naissance de son père, comment cette personne pourrait-elle être née pour envoyer le message?

La question est donc de savoir s'il est possible de modifier le principe de localité de façon subtile sans faire apparaître de paradoxes. Est-il possible par exemple de «délocaliser» l'information? Ce mécanisme pourrait apparaître de façon très naturelle dans la théorie qui unifiera la physique quantique et la relativité générale, l'un des problèmes les plus difficiles de la physique actuelle. Et nous avons d'autres raisons de penser qu'une telle subtilité existe. L'idée même d'information localisée (le fait qu'elle puisse exister à un endroit et pas à un autre) est plus délicate à définir dans les théories qui incluent la gravité que dans celles qui ne le font pas, parce que les champs gravitationnels s'étendent à l'infini, ce qui complique le concept de localisation.

La formation de vestiges massifs semble être une réponse trop radicale au problème de l'information qui s'échappe d'un trou noir. D'ailleurs, il s'accumule de nombreuses preuves que des objets dans l'Univers ont bien l'apparence et le comportement des trous noirs classiques, tels qu'ils sont décrits par la théorie d'Einstein. Il faut donc chercher des effets faibles (et donc passés inaperçus jusqu'à présent) qui n'altèrent pas notre vision de l'espace-temps, mais qui assureraient la délocalisation de l'information et lui permettraient de s'échapper des trous noirs.

Récemment, j'ai proposé deux versions d'un possible mécanisme de ce type. Dans le premier, la géométrie de l'espace-temps près d'un trou noir est modifiée. Elle se courbe et ondule d'une façon qui dépend de l'information dans le trou noir, mais doucement, de telle



> 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