

> et Andrew Strominger, de l'université Harvard, ont fait une proposition qui a retenu l'attention des spécialistes. Ils ont suggéré qu'une erreur s'était glissée dans l'analyse initiale: l'information n'entrerait en fait jamais vraiment dans le trou noir, mais laisserait une sorte d'empreinte à l'extérieur, sous la forme de «cheveux souples» (cette expression fait référence au théorème affirmant qu'un trou noir n'a pas de cheveux», un tel objet étant défini par seulement trois grandeurs: sa masse, sa charge électrique et son moment cinétique). Mais une analyse plus approfondie de cette idée montre qu'elle est problématique et la plupart des chercheurs n'y croient plus. Pour résumer, une nouvelle approche plus radicale semble nécessaire.

Une autre piste consiste à envisager que des lois physiques inconnues empêchent la formation de véritables trous noirs. Ces derniers résultent en général de l'effondrement de très grosses étoiles en fin de vie qui ont épuisé leur combustible. Sous l'effet de sa propre gravité, la masse stellaire se concentre en son cœur et donne naissance à un trou noir. Et si cependant ce stade n'était jamais atteint et la mort d'une étoile produisait d'autres objets ayant un «meilleur» comportement?

Par exemple, des étoiles plus légères, comme le Soleil, finissent leur vie sous la forme de vestiges denses tels que des naines blanches ou des étoiles à neutrons, mais jamais en trous noirs. Il se pourrait qu'un phénomène inconnu empêche aussi les étoiles plus grosses de former

LA PREMIÈRE IMAGE D'UN TROU NOIR

En 2019, l'équipe de l'*Event Horizon Telescope* (une installation virtuelle reposant sur plusieurs radiotélescopes à travers le monde qui synchronisent leurs observations) a réalisé l'image du trou noir supermassif au centre de la galaxie M87 (à gauche). Il s'agit plus précisément de son ombre, la lumière étant celle émise par

la matière très chaude de son disque d'accrétion.

Les équations de la relativité générale permettent de prédire la forme précise de cette ombre. On peut donc utiliser cette image pour tester cette théorie et peut-être mettre en évidence certaines anomalies. L'image s'est révélée compatible avec la relativité générale. Dans une nouvelle étude, l'équipe a

adopté la stratégie inverse: elle a considéré une grande variété de théories modifiant la relativité générale et a regardé si les prédictions simulées (à droite) sont compatibles avec l'image réelle. Cette étude met des contraintes 500 fois plus sévères sur ces modèles que les précédents travaux utilisant des observations portant sur le Système solaire.

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

