

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL

1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre <i>Pourquoi le Soleil brille</i> de Roland Lehoucq (37931069)	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 98,80€	79€ Au lieu de 130,40€	99€ Au lieu de 190,40€

40 %
de réduction *

39 %
de réduction *

48 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Marketing – 170 bis boulevard du Montparnasse – 75 014 Paris – email : boutique@pourlascience.fr

PAG20NOE



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à
POUR LA
SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)



FORMULE PAPIER
• 12 n° du magazine papier
+ UN CADEAU

59€
Au lieu de 98,80€

DIA59EK9



**FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
+ UN CADEAU

79€
Au lieu de 130,40€

P1A79EK9



FORMULE INTÉGRALE
• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne
+ UN CADEAU

99€
Au lieu de 190,40€

1IA99EK11

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal [] [] [] [] [] [] Ville :

Téléphone [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Date d'expiration [] [] [] [] Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) [] [] []

Signature obligatoire :

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre *Pourquoi le Soleil brille* pour 16,00 €.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z

TROUS NOIRS

Comment résoudre le paradoxe de l'information?

Alors que le prix Nobel de physique vient de récompenser trois spécialistes des trous noirs, ces étranges objets soulèvent encore d'importantes interrogations. En particulier, ils détruiraient l'information associée à la matière qu'ils engloutissent, ce qui serait contraire aux lois de la physique quantique. Un paradoxe que de nouvelles observations aideront à dissiper.

Pour la première fois, le 10 avril 2019, l'humanité a contemplé l'image d'un vrai trou noir. En utilisant un réseau de radiotélescopes terrestres fonctionnant de concert, l'équipe du programme *EHT* (*Event Horizon Telescope*) a construit un cliché du trou noir de 6,5 milliards de masses solaires tapi au centre de la galaxie voisine M87. C'est un exploit époustouflant : l'existence des trous noirs avait été prédite depuis longtemps, mais ces mystérieux objets n'avaient jamais été « observés » directement. Et cette performance ne se limite pas à l'obtention d'un cliché. Cette image et les observations à venir nous livreront des indices pour percer l'une des plus grandes énigmes des trous noirs et de toute la physique.

Cette énigme est un paradoxe qui porte sur le devenir de l'information dans un trou noir. >

L'ESSENTIEL

> Les trous noirs semblent détruire l'information qui y tombe, ce qui est en contradiction avec les principes de la mécanique quantique.

> Les scientifiques ont proposé diverses modifications de la description classique des trous noirs pour résoudre ce paradoxe, mais il leur manque des données pour les tester.

> Cependant, le programme *Event Horizon Telescope*, qui a publié en 2019 la première image d'un trou noir, et les interféromètres *Ligo* et *Virgo*, qui détectent des ondes gravitationnelles produites par les collisions de trous noirs, changeront bientôt la donne et fourniront des indices cruciaux.

L'AUTEUR



STEVEN GIDDINGS
physicien théoricien
à l'université de Californie
à Santa Barbara,
aux États-Unis

À quoi ressemble vraiment un trou noir ? Sa description classique, donnée par la relativité générale, se heurte à certains principes fondamentaux de la mécanique quantique. En particulier, le devenir de l'information pose un sérieux problème.

> En étudiant cette question, les physiciens ont découvert que la simple existence des trous noirs est en contradiction avec les lois de la physique quantique, qui décrivent jusqu'à présent avec succès tout le reste de l'Univers. Pour résoudre ce paradoxe, il sera peut-être nécessaire d'opérer une révolution conceptuelle aussi profonde que celle qui a conduit à l'avènement de la mécanique quantique.

Les théoriciens ont exploré de nombreuses pistes, mais ils disposent de très peu d'indices directs pour les aider à résoudre ce problème. Cependant, la première image d'un trou noir marque le début d'une période captivante, qui voit arriver des données réelles pour guider nos idées. Les observations futures de l'EHT, en particulier celles susceptibles de montrer l'évolution des trous noirs au fil du temps, et les détections récentes de collisions de trous noirs grâce aux observatoires d'ondes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo*, apporteront certainement des éclairages déterminants et ouvriront la voie à une nouvelle ère de la physique.

INFORMATION PERDUE OU CONSERVÉE ?

Les observations de l'EHT et les détections d'ondes gravitationnelles sont les preuves les plus récentes et les plus directes de l'existence des trous noirs. Cependant, ces objets sont en conflit avec les fondements actuels de la physique. Les principes de la physique quantique sont censés s'appliquer à tous les objets de la nature, mais quand on les utilise pour décrire les trous noirs, on se heurte à des contradictions, qui mettent en évidence un défaut de la forme actuelle de ces lois.

Le problème découle d'une des questions les plus simples que l'on puisse poser sur les trous noirs : qu'arrive-t-il à la matière qui tombe dedans ? Nous savons, d'après les lois actuelles de la physique quantique, que la matière et l'énergie peuvent changer de forme. Les particules peuvent, par exemple, se transformer en d'autres particules. Mais une chose est sacrée et n'est jamais détruite : l'information quantique, c'est-à-dire l'information sur l'état d'un système quantique. Si nous connaissons complètement l'état quantique d'un tel système, nous devrions toujours être en mesure de déterminer exactement son état passé ou futur sans perte d'information. Une question plus précise est donc : qu'arrive-t-il à l'information quantique qui tombe dans un trou noir ?

Notre compréhension des trous noirs vient de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, qui décrit la gravité comme une manifestation de la courbure de l'espace-temps ; on visualise souvent cette idée avec une balle déformant la surface d'un trampoline. La trajectoire des corps massifs et de la lumière s'incurve en suivant la déformation de

l'espace-temps, et c'est cela qu'on nomme la « gravité ». Et si, dans un espace assez petit, on accumule assez de masse, la déformation de l'espace environnant est tellement forte que même la lumière ne peut pas s'échapper.

La région d'où il n'est plus possible, même pour la lumière, de fuir constitue un « trou noir ». Elle est délimitée par ce qu'on nomme l'« horizon des événements ». Si rien ne peut



Le réseau Event Horizon Telescope a construit la première image d'un trou noir réel



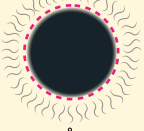
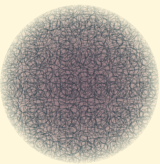
voyager plus vite que la lumière (y compris l'information), tout doit donc rester piégé à l'intérieur de cette frontière. Les trous noirs sont alors des gouffres cosmiques emprisonnant l'information au même titre que la lumière et la matière.

La situation s'est compliquée en 1974 quand le physicien britannique Stephen Hawking a prédit le phénomène d'évaporation des trous noirs. D'après la physique quantique, partout et tout le temps, il se crée des paires de « particules virtuelles », constituées d'une particule et de son antiparticule et qui, en général, s'annihilent très rapidement. Hawking a étudié les conséquences de ce phénomène près de l'horizon des événements : l'une des particules de la paire peut apparaître à l'intérieur de cette frontière, et l'autre à l'extérieur. La particule à l'extérieur peut s'éloigner du trou noir en emportant de l'énergie.

Pour un observateur à distance, le trou noir semble alors émettre un rayonnement, nommé « rayonnement de Hawking », et perdre de l'énergie. Il s'évapore progressivement suivant ce processus jusqu'à disparaître complètement. Or le rayonnement de Hawking ne contient aucune information liée à la matière qui a pénétré dans le trou noir. La conséquence problématique des travaux de Hawking revient à comprendre que l'information quantique qui tombe dans un trou noir ne s'en échappe pas et que, le trou noir finissant pourtant par disparaître, l'information est détruite. Un résultat en contradiction directe avec les principes de la physique quantique.

UN PROBLÈME POSÉ IL Y A PLUS DE QUARANTE ANS

La relativité générale prévoit l'existence des trous noirs, et de nombreuses observations tendent à confirmer la présence de ces objets dans l'Univers. Mais, en 1974, Stephen Hawking a avancé que ces objets s'évaporent. Si c'est le cas, tout ce qui tombe dedans est détruit, en particulier l'information rattachée à la matière engloutie. C'est un problème, car la physique quantique et la conservation de l'énergie interdisent toute destruction de l'information. Les physiciens ont proposé diverses solutions en modifiant notre vision du trou noir.

	HYPOTHÈSE	DESCRIPTION	PROBLÈME
L'information est détruite	TROU NOIR « CLASSIQUE »  Horizon des événements	Le trou noir a un horizon des événements ; l'information qui pénètre dans le trou noir est détruite quand le trou noir s'évapore.	Cette piste contredit la physique quantique et la conservation de l'énergie, qui impliquent que l'information ne peut être détruite.
L'information est conservée	CHEVEUX SOUPLES  Empreinte de l'information	L'information ne pénètre pas complètement dans le trou noir mais laisse une « empreinte » juste à l'extérieur de l'horizon des événements.	La plupart des spécialistes ne considèrent pas cette description comme une solution convaincante.
	PELOTE DUVETEUSE 	Dans ce type de vestige massif, l'horizon des événements est remplacé par des cordes dans une géométrie à grand nombre de dimensions.	Les trois scénarios ci-contre exigent une modification de la notion conventionnelle de localité, c'est-à-dire l'idée selon laquelle rien, y compris l'information, ne peut voyager plus vite que la lumière.
	MUR DE FEU  Mur de particules	Ce type de vestige massif présente un « mur » de particules de haute énergie qui remplace l'horizon ; il n'y a pas d'intérieur du trou noir.	
	HALO QUANTIQUE 	Un trou noir quantique interagit avec son environnement par le biais de petites fluctuations de l'espace-temps. Ce mécanisme permet à l'information d'être transférée vers l'extérieur du trou noir.	

Cette conclusion a déclenché une crise profonde en physique théorique. Or de telles crises ont souvent servi d'impulsion pour de grandes avancées. Par exemple, au début du ^{xx}e siècle, la physique classique semblait prédire une inévitable instabilité des atomes, en contradiction évidente avec l'existence de la matière. Plus précisément, les électrons en orbite au sein des atomes, changeant constamment de direction, auraient dû émettre continuellement de la lumière, ce qui aurait entraîné une perte d'énergie et leur chute en spirale sur le noyau. Ce problème a joué un rôle clé dans la révolution quantique. En 1913, Niels Bohr a suggéré que les électrons ne peuvent occuper que des orbites particulières et ne peuvent donc pas tomber en spirale. Cette idée radicale a contribué à poser les fondements de la mécanique quantique, à partir desquelles les physiciens ont réécrit les lois de la nature.

ALTERNATIVES QUANTIQUES

La crise des trous noirs conduit de la même façon à un nouveau changement de paradigme en physique. Quand Hawking a découvert que les trous noirs s'évaporent, il a initialement conclu que la mécanique quantique devait être erronée et que la destruction de l'information était autorisée. Mais les physiciens ont rapidement compris que ce changement conduirait à une violation majeure du principe de conservation de l'énergie, ce qui invaliderait notre description actuelle de l'Univers. Il fallait clairement chercher la solution ailleurs. Et d'autres arguments théoriques ont renforcé la conviction que l'information est toujours conservée.

Une autre idée, au début, était que les trous noirs ne s'évaporent pas complètement, mais cessent de rétrécir quand ils atteignent une taille minuscule, laissant derrière eux des vestiges microscopiques contenant l'information d'origine. Mais les scientifiques ont remarqué que dans ce cas, d'après la physique quantique, la matière ordinaire deviendrait très instable et exploserait en vestiges de ce type, là encore en contradiction avec notre expérience quotidienne.

Il est tentant de penser que la conclusion initiale de Hawking est probablement fausse et que l'information conservée s'échappe bien du trou noir. Mais cette solution naïve se heurte au principe de localité selon lequel aucune information ne peut se déplacer d'un point à un autre plus vite que la lumière. Or pour échapper à un trou noir, il faudrait voyager plus vite que la lumière. Un excès de vitesse clairement problématique. Depuis la découverte de Hawking, les physiciens ont tenté de trouver une porte de sortie à ce paradoxe tout en restant dans le cadre de la physique conventionnelle. Sans succès jusqu'à présent.

En 2016, Hawking lui-même, Malcolm Perry, de l'université Queen Mary, à Londres, ➤

> 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.

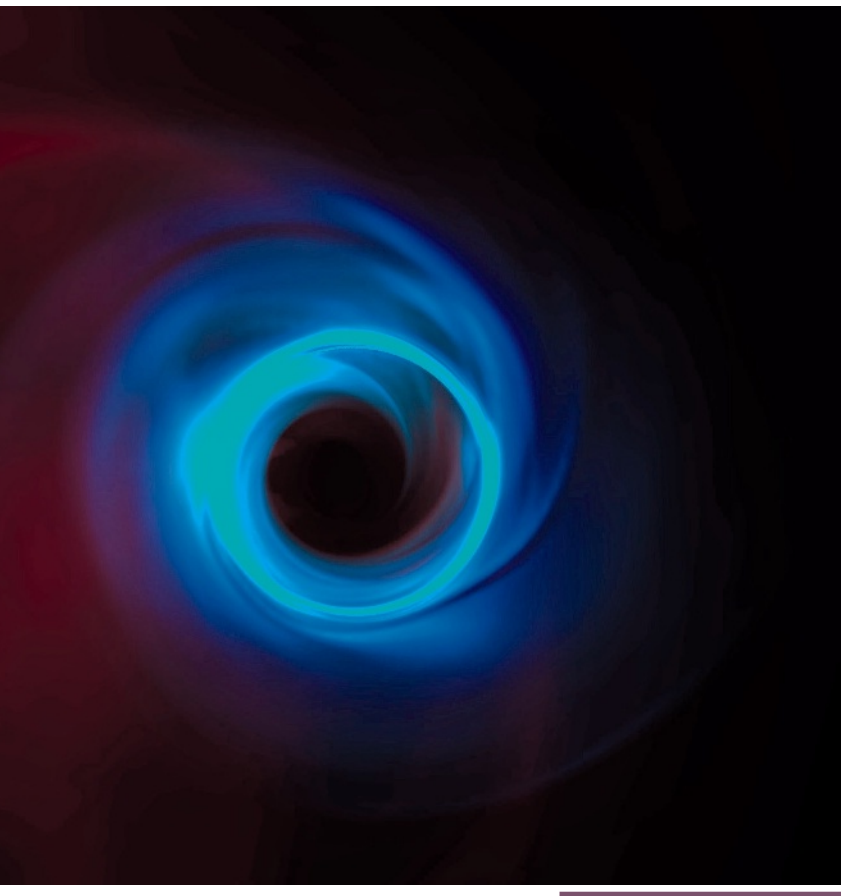
MODIFIER LA LOCALITÉ

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



> 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.

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



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

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

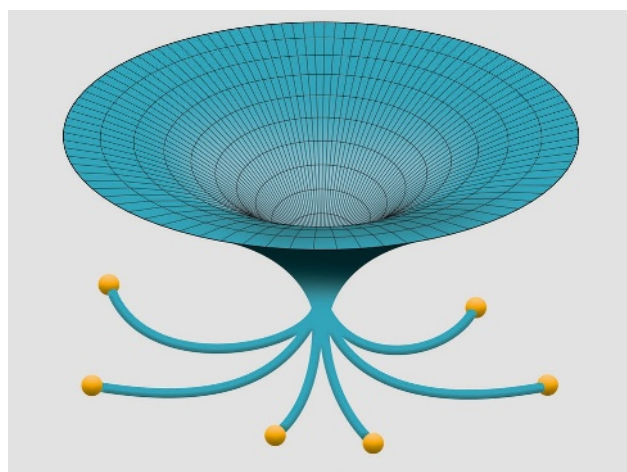
Dans son article, Steven Giddings insiste sur un point crucial : les solutions au paradoxe de l'information ne doivent pas violer le principe de localité. Ce dernier implique qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière, en accord avec la relativité restreinte d'Einstein. Cependant,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

Cette découverte constituerait un indice fantastique pour accéder à la physique quantique des trous noirs. Si, au contraire, ces fluctuations ne sont pas présentes, nous serons aiguillés vers le scénario quantique faible, plus subtil, ou vers quelque chose d'encore plus exotique.

Le scénario «non violent faible» est plus difficile à tester en raison de la petitesse des changements géométriques attendus. Mais des études préliminaires montrent que ce scénario modifierait la façon dont les ondes gravitationnelles sont absorbées ou réfléchies, ce qui produirait peut-être une modification observable des signaux d'ondes gravitationnelles.

Si l'un de ces scénarios est correct, nous en apprendrons davantage non seulement sur ce que sont les trous noirs, mais également sur la nature profonde du monde. Pour l'instant, nous ne savons pas clairement comment caractériser la localisation de l'information en présence de champs gravitationnels. Les avancées récentes en physique quantique suggèrent que l'espace-temps lui-même n'est peut-être pas une composante fondamentale du monde, mais émergerait d'une structure mathématique plus profonde. Des signes de trous noirs quantiques pourraient nous aider à concrétiser cette idée.

Pour en apprendre davantage, il est important d'améliorer à la fois les observations de l'EHT et les mesures d'ondes gravitationnelles. Pour l'EHT, il serait utile de réaliser des observations de durée nettement plus longues, ainsi que des images d'autres cibles, telles que le trou noir au centre de la Voie lactée, deux idées qui sont déjà au programme. Pour les ondes gravitationnelles, de nouveaux interféromètres, au Japon et en Inde, s'ajouteront aux installations existantes en Europe et aux États-Unis, dont on améliore constamment la sensibilité. Parallèlement, les théoriciens travaillent pour affiner leurs modèles, étayer leurs explications et évaluer comment ces scénarios affectent les signaux de l'EHT et des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

Quelle que soit la solution du paradoxe de l'information, les trous noirs renferment des indices cruciaux pour tendre vers une théorie quantique de la gravitation et déterminer la nature même de l'espace et du temps. Comme avec les atomes et la mécanique quantique au début du xx^e siècle, une meilleure compréhension des trous noirs a toutes les chances de montrer la voie de la prochaine révolution conceptuelle de la physique. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. B. Giddings, **Black holes in the quantum Universe**, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 377, 20190029, 2019.

D. Harlow, **Jerusalem lectures on black holes and quantum information**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 88, 015002, 2016.

J. Polchinski, **L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?**, *Pour la Science*, n° 456, octobre 2015.

S. W. Hawking, **Particle creation by black holes**, *Communications in Mathematical Physics*, vol. 43(3), pp. 199-220, 1975.

**changement climatique :
quel impact sur
la diffusion des maladies
infectieuses ?**

table ronde
accès gratuit sur réservation obligatoire

— jeudi 3 décembre à 18h30

cité
sciences
et industrie

AVEC LE SOUTIEN DE **SCIENTES AVENIR** **La Recherche** **SCIENCE**

Déséquilibre des écosystèmes,
multiplication de moustiques vecteurs
de dengue, chikungunya, zika...

Quel est le rôle du changement climatique
dans l'apparition des maladies infectieuses
et la propagation des épidémies ?
Comment l'Europe et l'Afrique de l'Ouest
s'organisent pour mieux les anticiper ?

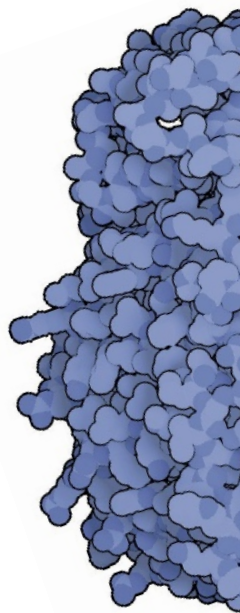
Séance co-organisée avec l'Institut
de recherche et développement (IRD)
et l'Institut national de la santé
et de la recherche médicale (Inserm),
à Paris et en duplex avec les équipes locales
de l'IRD en Côte d'Ivoire.



Informations sur cite-sciences.fr

Les molécules du toucher se dévoilent

Comment les cellules détectent-elles le contact et la pression mécanique pour ensuite transmettre la perception tactile vers le cerveau ? Après des décennies d'interrogations, les chercheurs ont découvert quelques-unes des protéines à la clé de ce processus.



La jeune fille s'efforçait de garder bras et mains immobiles, mais ses doigts se tortillaient en tous sens. Si elle fermait les yeux, c'était encore pire. Ce n'est pas qu'elle manquait de force pour les maîtriser, non : elle n'avait pas vraiment de contrôle fin sur ses membres.

Carsten Bönnemann se souvient d'avoir examiné cette adolescente dans un hôpital de Calgary, au Canada, en 2013. En tant que pédiatre neurologue à l'Institut national américain des troubles neurologiques et des accidents vasculaires cérébraux, à Bethesda, dans le Maryland, il voyageait souvent pour s'occuper de cas déroutants. Mais cette fois, il dut reconnaître qu'il n'avait jamais rien vu de tel.

Si la jeune fille ne regardait pas ses membres, elle semblait dépourvue de toute indication sur leur position. Il lui manquait le sens de la disposition de son corps dans l'espace, une aptitude cruciale nommée «proprioception». «C'est quelque chose qui lui est totalement étranger», précise Carsten Bönnemann.

En 2016, son équipe a séquencé le génome de l'adolescente et celui d'une autre jeune fille présentant des symptômes similaires, et a identifié des mutations dans un gène noté *Piezo2*.

Par une heureuse coïncidence, quelques années plus tôt, en 2010, l'équipe d'Ardem Patapoutian, de l'institut de recherche Scripps, à La Jolla, avait identifié la fonction de ce gène. Alors qu'ils cherchaient à déterminer par quels mécanismes les cellules sentent le toucher, ces chercheurs avaient démontré que le gène en question codait une protéine sensible à la pression physique.

LES PROTÉINES PIEZO, DES CANAUX IONIQUES MÉCANOSENSIBLES

La découverte de cette protéine, Piezo2, et d'une autre apparentée, Piezo1, a été l'apogée de plusieurs décennies de recherche sur les mécanismes qui contrôlent le sens du toucher. Les Piezo sont des canaux ioniques – c'est-à-dire des pores dans la membrane cellulaire qui permettent le passage des ions – sensibles à une tension mécanique. «Nous avons beaucoup appris sur la façon dont les cellules communiquent, et c'est presque toujours par signalisation chimique, explique Ardem Patapoutian. Ce dont on est en train de s'apercevoir aujourd'hui, c'est que la sensation mécanique d'une force physique est aussi un mécanisme de signalisation. Et pour l'heure, on en sait très peu à ce sujet.»

>