

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 pouirlascience.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@pouirlascience.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.pouirlascience.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@pouirlascience.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 époustoufflant : 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.