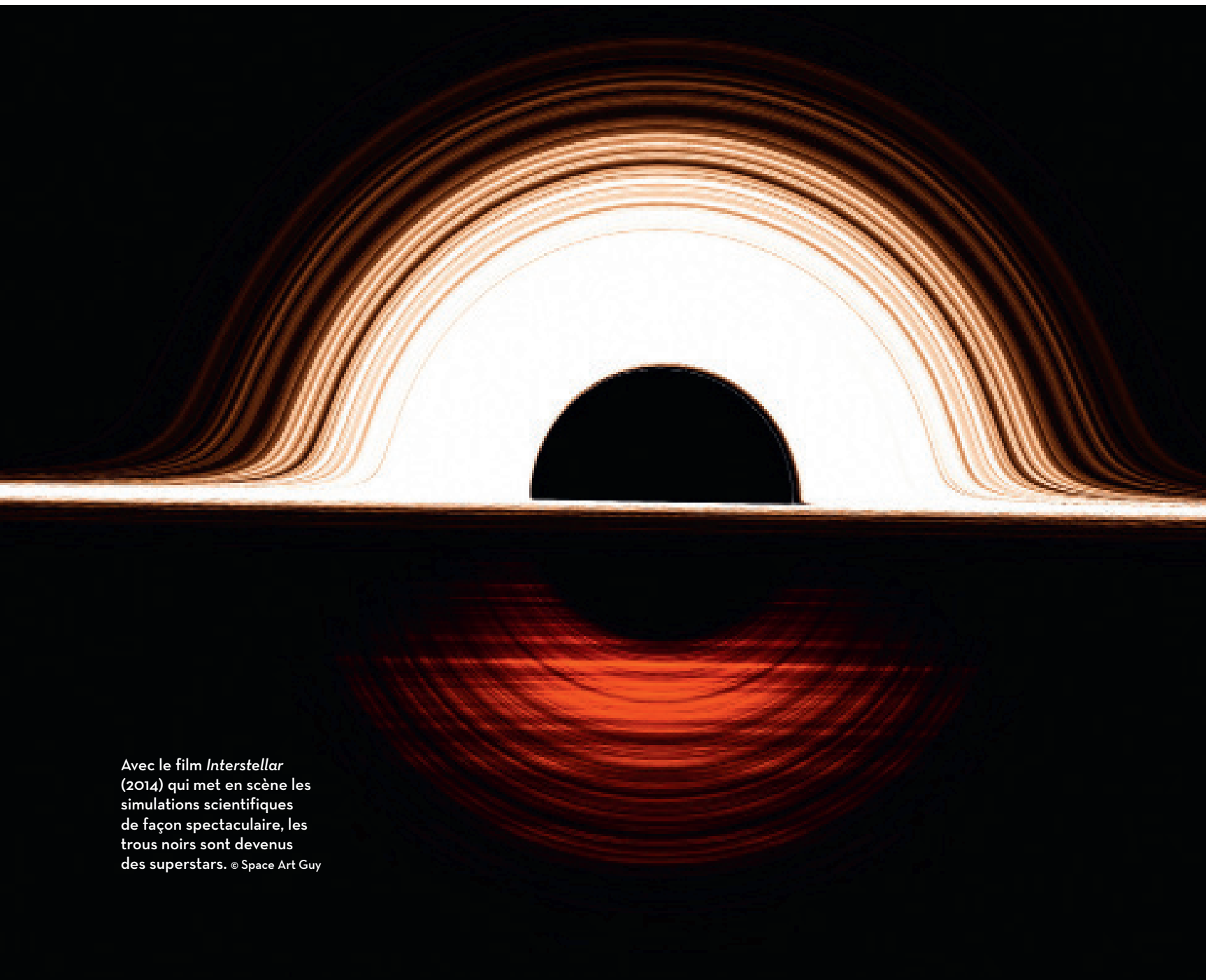


TROUS NOIRS

LEUR EXPLORATION COMMENCE



Avec le film *Interstellar* (2014) qui met en scène les simulations scientifiques de façon spectaculaire, les trous noirs sont devenus des superstars. © Space Art Guy

Le 14 septembre 2015, une fraction de seconde est venue apporter une réponse claire à un siècle de recherche. La détection de la première onde gravitationnelle, suivie depuis par des dizaines d'autres, puis par la première image d'un trou noir, confirme l'existence de ces astres fascinants. Vestiges d'étoiles massives ou noyaux actifs de galaxies, les trous noirs, auxquels Albert Einstein lui-même ne voulait pas croire, nous réservent de nombreuses découvertes.

“**Q**uand je me suis engagé dans ce projet il y a quarante ans, j'étais certain qu'il allait réussir. Même si je ne savais pas combien de temps il nous faudrait pour construire l'observatoire et si nous allions obtenir l'argent nécessaire. En 2005, je pensais que nous allions détecter les premières ondes gravitationnelles en 2017. Et nous y sommes parvenus dès 2015, en captant la fusion de deux trous noirs !” Un prix Nobel de physique plus tard ⁽¹⁾, Kip Thorne continue de s'enthousiasmer pour chaque découverte se rapportant à ces ogres cosmiques, qui happent tout ce qui passe à leur portée pour l'avalier vers une destination inconnue. Les trous noirs, comme leur nom l'indique, sont impossibles à observer directement car ils n'émettent aucun rayonnement. Seuls les phénomènes atypiques qui se produisent dans leur environnement trahissent leur présence, comme des mouvements d'étoiles ou le rayonnement intense de la matière alentour.

Le 14 septembre 2015, pour la première fois dans l'histoire, l'observatoire Ligo ⁽²⁾ détecte un signal correspondant à un phénomène jusque-là décrit seulement par des formules mathématiques. L'onde gravitationnelle qui a atteint la Terre ce jour-là a été émise par deux trous

noirs. Moins d'un mois plus tard, le 12 octobre, un événement similaire s'est reproduit, suivi d'un troisième le 26 décembre. Les détections n'ont fait qu'augmenter au cours des trois campagnes d'observation menées jusqu'à présent, entre lesquelles la sensibilité des détecteurs a été considérablement améliorée. Elles ont été au nombre huit pendant la deuxième campagne, et lors des huit premiers

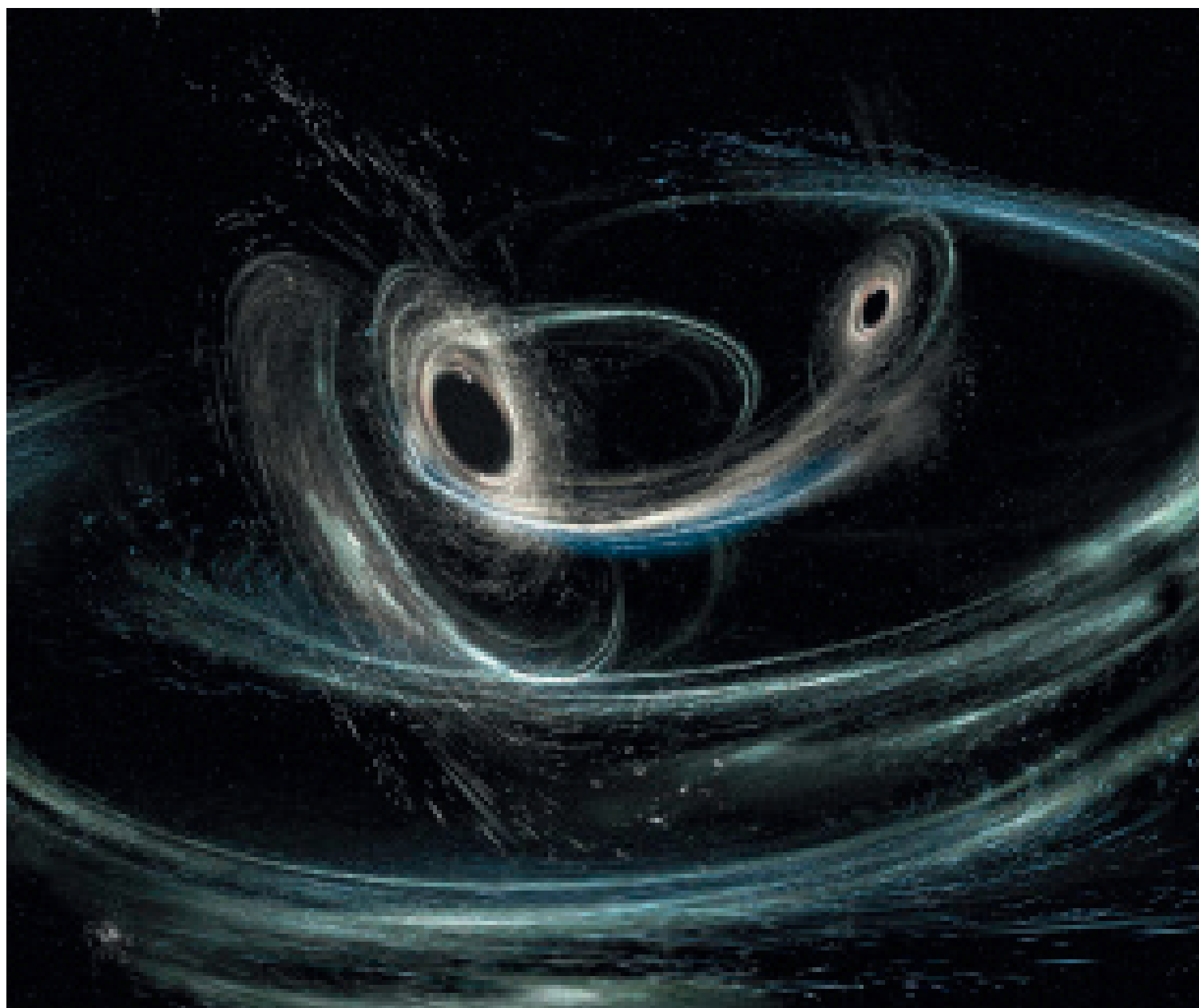
mois de la troisième campagne, pas moins de 46 événements ont été enregistrés et attendent d'être confirmés. “*Les performances des détecteurs ont plus ou moins doublé, donc on voit plus loin*, note Olivier Minazzoli, chercheur au Centre scientifique de Monaco et membre de la collaboration Virgo. *Quand on voit dix fois plus loin, on scrute un volume mille fois plus important.*”

Pour le physicien Kip Thorne, qui a conseillé le réalisateur Christopher Nolan pour *Interstellar*, les trous noirs ne sont pas que du cinéma. La preuve par les ondes gravitationnelles.
© Leyde Univ.





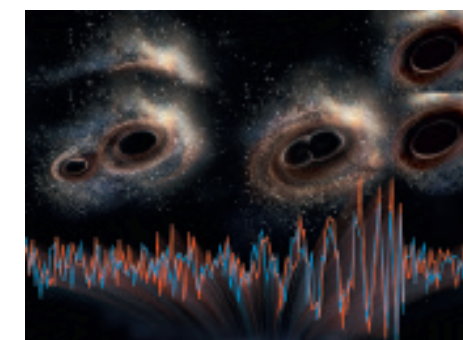
Deux observatoires hors normes, distants de 3 000 km, ont été construits aux États-Unis pour la détection des ondes gravitationnelles : à Hanford (à gauche), dans l'État de Washington, et à Livingston, en Louisiane. Émises lors de la fusion de deux trous noirs, elles traversent l'Univers à la vitesse de la lumière. © Ligo/NSF et A. Simmonet/Ligo/NSF



Imaginez. Il y a 1,3 milliard d'années, la vie sur Terre barbote encore à l'état cellulaire dans l'océan. Dans les profondeurs de l'Univers, deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires dansent une étrange valse. Orbite après orbite, ils se rapprochent inexorablement. Alors qu'ils ne sont plus qu'à quelques centaines de kilomètres l'un de l'autre, ils se tournent autour avec une telle frénésie qu'ils libèrent des flots d'énergie gravitationnelle. Puis, à la fraction de seconde où ils fusionnent, ils émettent une bouffée finale d'énergie qui déforme l'Univers autour d'eux de la même façon qu'une énorme vague agite la surface de l'océan. Le nouveau trou noir issu de cette fusion est 62 fois plus massif que le Soleil, mais ne dépasse pas 366 km de diamètre — moins d'un Lyon-Paris à vol d'oiseau.

La vague, elle, se propage dans toutes les directions à la vitesse de la lumière. Rien ne l'arrête, ni le gaz, ni les poussières, ni les astres qu'elle rencontre sur son chemin. En 1915, au moment où Einstein écrit la théorie de la relativité générale et prédit son existence, elle a déjà traversé une bonne partie de notre galaxie. Elle s'est largement affaiblie depuis son point de départ. Lorsqu'elle croise les détecteurs de Ligo, la perturbation est aussi infime que le déplacement de quelques centièmes de proton. C'est alors une autre vague qui prend le relais, un bruit enthousiaste qui se répand dans le monde parmi tous les chercheurs qui travaillent sur le projet. *“La détection du 14 septembre 2015 est non seulement la première preuve directe de l'existence des trous noirs, mais c'est aussi une grande découverte pour la science fondamentale, commente Sylvain Chaty, astrophysicien à l'université de Paris et au CEA. Nous allons pouvoir étudier l'Univers autrement que par le biais des ondes électromagnétiques.”*

Pour en arriver là, il a fallu concevoir et construire un instrument d'une sensibilité inouïe. Imaginé dans les années 1970 dans les bureaux des universités américaines MIT et Caltech, Ligo a connu une histoire pavée d'obstacles techniques, financiers ou humains. Inaugurés en 1999, les deux sites de Ligo sont distants de 3 000 km. L'un se trouve à Livingston, en Louisiane, l'autre à Hanford, dans l'État de Washington. S'ils sont aussi éloignés l'un de l'autre, c'est pour mieux analyser les signaux détectés. Les capteurs sont sensibles à la moindre vibration, qu'il s'agisse d'un



tremblement de terre ou du passage d'un camion sur une route voisine. Si les deux observatoires reçoivent en même temps le même signal, de telles incertitudes peuvent déjà être levées. Depuis 2016, une troisième confirmation est apportée par leur collègue Virgo, installé dans le nord de l'Italie.

UNE VIBRATION DE L'ESPACE-TEMPS

Construits en L, ces observatoires disposent chacun de deux très longs bras (4 km pour Ligo, 3 km pour Virgo) où circule un faisceau laser émis en amont et séparé en deux par un miroir à l'entrée de chaque bras. À l'extrémité de ceux-ci, le faisceau est réfléchi par un autre miroir et retourne vers le miroir de départ pour être recombinaison au faisceau qui circule dans l'autre bras. Quand une onde gravitationnelle

traverse les détecteurs, elle comprime ou étire chacun des faisceaux, qui parcourent alors une distance légèrement différente avant d'être recombinaison.

Il existe sans doute peu de choses plus complexes que les calculs pour remonter à la source de l'onde. *“Une fois qu'un signal probable est détecté, il faut faire une analyse plus détaillée et rechercher si un signal théorique est compatible avec les paramètres observés, explique François Foucart, physicien à l'université du New Hampshire. C'est beaucoup de travail, avec énormément de statistiques.”* Les ondes gravitationnelles se traduisent sur les écrans par des sinusoides dont la fréquence et l'amplitude augmentent jusqu'à ce que les scientifiques appellent le *chirp* (*gazouillis*, en anglais), le moment où les trous noirs entrent en collision. *“La fréquence de ces ondes nous informe sur la masse des objets en jeu, précise Olivier Minazzoli. Plus les objets sont massifs, plus la fréquence est basse.”* Ligo et Virgo sont sensibles aux ondes gravitationnelles dont la fréquence se situe entre 20 et 1 000 Hz, ce qui correspond à la catégorie des trous noirs stellaires. *“Les trous noirs plus massifs, comme ceux qui se trouvent au cœur des galaxies, émettent à des fréquences bien plus basses”,* ajoute le chercheur.

L'analyse de la forme de l'onde donne également l'autre information essentielle pour décrire un trou noir : son spin, c'est-à-dire sa rotation. *“D'après la relativité générale, la masse et le spin sont les deux paramètres qui définissent ces objets, rappelle Olivier Minazzoli. On peut y ajouter la charge électrique, mais elle doit être négligeable, car il n'y a pas de raison de penser que les trous noirs aient accreté préférentiellement de la matière chargée positivement, ou l'inverse.”* La valeur du spin varie

Suite page 48

ANATOMIE D'UN TROU NOIR

Un cœur sombre et un environnement extrêmement brillant : telle est la structure de ces aspirateurs de matière qui emportent vers leur centre tout ce qui s'approche trop près d'eux.

Le trou noir, un monstre...



... qui concentre infiniment la matière

Un exemple : la masse du trou noir stellaire Cygnus X-1 vaut 10 fois celle du Soleil, soit plus de 3 millions de masses terrestres. Mais, avec ses 30 km, il n'est pas plus grand que Paris et sa proche banlieue. Pis : toute sa masse est en fait concentrée en un point !



... qui tord la lumière

En accord avec la relativité générale, la masse du Soleil est capable de dévier légèrement la trajectoire des photons issus d'étoiles situées à l'arrière-plan. Un trou noir, lui, courbe tellement l'espace que le trajet de la lumière peut s'enrouler plusieurs fois autour de lui avant de se poursuivre dans une direction quelconque.



... à la rotation ultrarapide

L'horizon d'un trou noir peut tourner à pratiquement 100 % de la vitesse de la lumière.



... à la force d'attraction inouïe

De 4,3 millions de fois la masse du Soleil, Sgr A*, au centre de notre galaxie, n'a que 10 fois la taille du Soleil. À 1 000 m de son horizon, la force d'attraction est 100 millions de milliards de fois supérieure à celle à la surface de la Terre.



... aux rayonnements les plus intenses de l'Univers

La fusion de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires, découverte en septembre 2015 grâce à son émission d'ondes gravitationnelles, a libéré pendant 0,2 seconde autant d'énergie que toutes les étoiles de l'Univers. Si cette puissance de $3,10^{49}$ W avait été émise et avait voyagé sous forme sonore, elle aurait provoqué sur Terre un bruit aussi intense que celui d'un orchestre symphonique. La fusion a pourtant eu lieu à plus d'un milliard d'années-lumière !



... qui transforme efficacement la matière en énergie

En théorie, entre 6 % et 42 % de la masse d'un disque de gaz en rotation autour d'un trou noir sont transformés en rayonnement. Ce rendement est 9 à 63 fois meilleur que celui de la fusion de l'hydrogène au cœur des étoiles.



... qui ne brille pas par lui-même

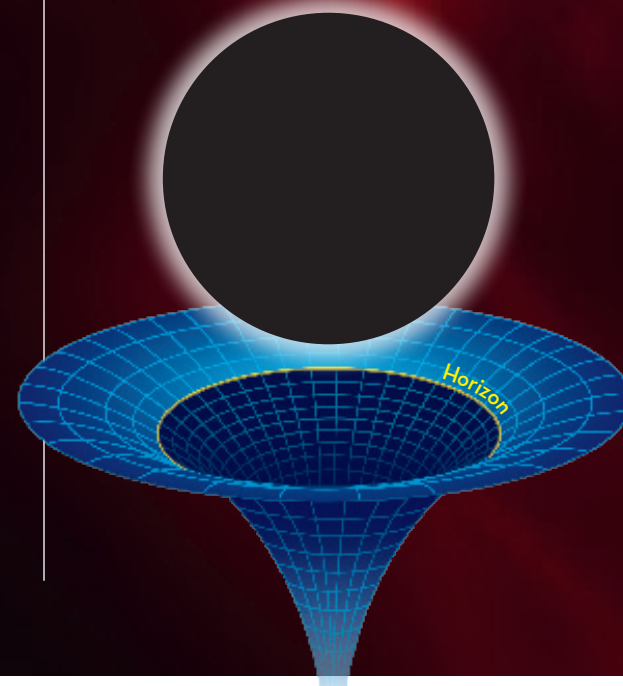
Un trou noir solitaire qui n'est pas entouré par un disque de gaz est virtuellement indétectable. Alors que nos connaissances sur l'évolution des étoiles indiquent que le trou noir stellaire le plus proche devrait statistiquement être à une centaine d'années-lumière, nous n'en n'avons pas découvert à moins de 5500 années-lumière !

Disque d'accrétion

La poussière et des gaz aspirés par le trou noir s'accumulent autour de lui sous la forme d'un disque. Ils circulent à des vitesses différentes et leur interaction chauffe toute la structure dont les températures et la luminosité s'élèvent d'autant plus qu'ils sont proches de l'horizon des événements. Les rayons X et gamma qu'ils émettent trahissent la présence du trou noir.

Un entonnoir infini qui déforme l'espace-temps

Un trou noir peut être représenté comme un puits gravitationnel. L'horizon est la limite en deçà de laquelle les photons eux-mêmes ne parviennent plus à sortir du puits. D'où l'expression "trou noir".



Jets relativistes

Une partie de la matière absorbée par le trou noir est éjectée sur son axe de rotation à des vitesses presque égales à celles de la lumière. Ils peuvent traverser des distances faramineuses. Leur origine n'est pas encore très bien comprise. Les plus puissants émanent des trous noirs supermassifs.

Horizon des événements

C'est la frontière mythique, celle dont on ne revient pas lorsqu'on la traverse. À cet endroit, la gravité est tellement forte qu'elle peut dévier et capturer les rayons lumineux. La distance entre l'horizon des événements et le centre du trou noir est appelée rayon de Schwarzschild. Celui d'un trou noir stellaire mesure seulement quelques kilomètres.

Singularité

Ce point précis est la destination finale de la matière et l'énergie absorbées par le trou noir. Là, la densité devient infinie, tout comme la courbe de l'espace-temps. Les lois de la physique telles que qu'elles sont aujourd'hui comprises n'existent plus.

Sphère de photons

En l'absence de gravité, un photon se déplace en ligne droite. Or le trou noir exerce une force tellement puissante que certaines de ces particules se retrouvent piégées et se mettent à tourner à une certaine distance de l'horizon des événements, créant un halo autour de lui.

Dernière orbite circulaire stable

Cette orbite marque la limite interne du disque d'accrétion. Pour la matière qui circule autour du trou noir, c'est l'endroit le plus proche de lui où elle peut se retrouver sans franchir le point de non-retour.



En haut : la photo du trou noir de la galaxie M87. Cette première image confirme les simulations : le gaz qui tourne autour du centre sombre est échauffé par un environnement extrême (vue d'artiste ci-contre).

© EHT Collaboration et Univ. of Arizona

de 0 (pas de rotation) à 1 (rotation maximale). L'onde gravitationnelle donne non seulement le spin du nouveau trou noir formé, mais renseigne aussi sur celui des deux trous noirs avant collision. *“C'est passionnant d'obtenir cette information, observe Kip Thorne. Pour moi, le spin est à l'origine des jets de matière les plus puissants de l'Univers, qui sortent par les pôles.”*

Comme le nombre d'événements détectés ne cesse d'augmenter, les statistiques sur la population des trous noirs pourront être affinées. *“On ne sait pas pour l'instant à quelle fréquence ils entrent en collision, indique François Foucart. Cela fait partie des questions sur lesquelles travaillent Ligo et Virgo.”* Les deux instruments n'ont d'ailleurs pas observé seulement des couples de trous noirs. Parmi les événements confirmés figure aussi une collision de deux étoiles à neutrons. Lors de la troisième campagne d'observation, le signal d'une fusion entre un trou noir et une étoile à neutrons est arrivé jusqu'à la Terre, une détection qui attend d'être validée.

LA PHOTO DU MONSTRE

“Avec les ondes gravitationnelles, on ne voit en fait des trous noirs que dans des situations où ils sont extrêmement agités, souligne Kip Thorne. Ils se heurtent, se battent, échangent du moment angulaire, ralentissent ou accélèrent. C'est comme une tempête à la surface de l'océan décuplée par tous ces phénomènes. Auparavant, nous n'avions pas encore compris comment l'espace-temps fonctionnait pendant cette tempête. Mais là, pour la première fois, nous avons pu faire des calculs sur les superordinateurs à la suite d'observations. En plus de cela, nous disposons de nouvelles images qui dévoilent l'influence d'un trou noir sur son environnement.”

L'homme qui a participé à la détection des ondes gravitationnelles a été émerveillé par la première photo d'un

Heino Falcke, membre du projet Event Horizon Telescope, qui a produit la première image d'un trou noir, espère pouvoir faire un film qui détaillerait la rotation du disque lumineux.
© EHT Collaboration



trou noir (3), celui qui se trouve au centre la galaxie M87. Elle a été obtenue par le projet Event Horizon Telescope (EHT) et publiée le 10 avril 2019 (lire C&E 565, p. 30). *“C'est une prouesse technologique, réalisée à l'aide d'une chaîne observationnelle qui a créé le plus grand radiotélescope du monde”, s'enthousiasme Sylvain Chaty. Huit observatoires répartis sur plusieurs continents ont attendu que le ciel soit simultanément clément au-dessus d'eux pour orienter ensemble leur antenne vers M87 pendant quatre jours en avril 2017.*

En combinant les données, les scientifiques ont obtenu une image d'une résolution inégalée de l'objet qui se trouve à près de 54 millions d'années-lumière et ne “pèse” pas moins de 6,5 milliards de masses solaires. *“On voit très bien des structures sur l'horizon des événements [la limite lumineuse d'un trou noir, NDLR], mais il est difficile d'observer des orbites plus internes, explique Heino Falcke (université de Radboud, Pays-Bas), membre du projet EHT. Bien sûr, nous avons élaboré différents modèles correspondant à cette image, dont certains où le trou noir était remplacé par un autre objet compact. Mais ces derniers n'apportent que*

peu de détails, alors que ceux avec un trou noir sont les mieux contraints.”

Ces avancées encouragent les chercheurs à concevoir des projets plus ambitieux afin de multiplier les détections à la fois proches et lointaines. Le réseau de l'EHT devrait s'élargir afin d'augmenter sa résolution, et regarder du côté du trou noir supermassif qui occupe le centre de notre galaxie, la Voie lactée. Peut-être pourra-t-on aussi détecter une onde gravitationnelle correspondant à la fin de vie d'une étoile massive, comme l'espère François Foucart : *“La sensibilité de Ligo va continuer de s'améliorer. Mais son équivalent spatial, l'observatoire Lisa, prévu pour 2034, nous offrira de meilleurs moyens pour décrire la population des trous noirs.”*

DOSSIER RÉALISÉ PAR MYRIAM DÉTRUY

Les propos de Kip Thorne ont été recueillis par Jean-Luc Dauvergne.

(1) Le prix Nobel de physique 2017 a été décerné aux concepteurs du détecteur d'ondes gravitationnelles Ligo, les Américains Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.

(2) Acronyme de Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser).

(3) Lire C&E....