

L'interféromètre *Virgo* comprend deux bras qui abritent des faisceaux laser. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse la Terre, elle contracte l'espace dans une direction, puis dans l'autre. La longueur des bras de *Virgo* varie alors de l'ordre d'un cent millièmes de la taille d'un proton.



repérer un premier événement gravitationnel dès leur mise en œuvre, en septembre 2015. Cet événement, nommé GW150914 (voir l'encadré page 27), était le résultat de la fusion de deux trous noirs, chacun d'environ 30 fois la masse du Soleil et situés à quelque 1 300 millions d'années-lumière. Cette détection a valu en 2017 le prix Nobel à Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.

Après une nouvelle phase d'amélioration des détecteurs, la deuxième période de prise de données (entre décembre 2016 et août 2017) fut aussi l'occasion d'une première, la détection d'une fusion d'étoiles à neutrons. L'événement, noté GW170817, a été observé conjointement par les trois détecteurs de la collaboration *Ligo-Virgo*. Sollicité immédiatement, un ensemble de télescopes et d'instruments dans une large gamme de longueurs d'onde de la lumière a permis de repérer la galaxie hôte du phénomène et d'identifier celui-ci comme étant une kilonova, un phénomène prédit mais jamais encore observé (voir l'encadré page ci-contre).

## LES DÉTECTIONS S'EMBALLENT

La troisième collecte de données a commencé en avril 2019. La sensibilité des détecteurs est telle qu'il y a une alerte par semaine ! Leur certification est en cours, mais on a d'ores et déjà une bonne idée de ce que l'on observe : des fusions de trous noirs, d'étoiles à neutrons ou d'un trou noir et une étoile à neutrons.

La sensibilité est mesurée par la distance maximale d'une source détectable. Cette

distance dépend du type de source, de ses caractéristiques, de l'amplitude de l'onde gravitationnelle émise, de sa durée... Pour donner un exemple, une collision d'étoiles à neutrons dont chacune serait 1,4 fois plus massive que le Soleil émettrait une onde gravitationnelle à la limite de la sensibilité actuelle de *Virgo*, si elle se trouvait à environ 160 millions d'années-lumière. Un pulsar ne se ferait « entendre » qu'à seulement quelques dizaines de milliers d'années-lumière.

## AUGMENTER LE VOLUME DE L'UNIVERS SONDÉ

Cette distance maximale étant connue, on doit aussi tenir compte de la rareté des sources astrophysiques, comme les collisions d'étoiles à neutrons. Une sensibilité accrue augmente la probabilité de détection. En d'autres termes, on augmente le volume de l'Univers sondé. À l'horizon 2025, la portée prévue pour les collisions d'étoiles à neutrons devrait se situer aux alentours de 1 000 millions d'années-lumière pour *Ligo* et 600 millions d'années-lumière pour *Virgo*. Parallèlement, de nouveaux détecteurs sont en construction au Japon (*Kagra*) et en Inde (*Ligo India*).

Dans un avenir plus lointain, grâce à des projets ambitieux, tels le télescope *Einstein* doté de faisceaux de 30 kilomètres de long au sol ou *Lisa* et ses bras de deux millions et demi de kilomètres dans l'espace, ce n'est plus quelques instruments de l'Univers que nous entendrons, mais tout un orchestre ! ■

## BIBLIOGRAPHIE

N. DERUELLE ET J.-P. LASOTA, *Les Ondes gravitationnelles*, Odile Jacob, 2018.

P. GRANDCLÉMENT, Trous noirs et ondes gravitationnelles, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

B. SCHUTZ ET S. VITALE, *Ondes gravitationnelles, la bande-son de l'Univers*, *Pour la Science*, n° 409, novembre 2011.

D. KENNEFICK, *Traveling at the Speed of Thought : Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton University Press, 2007.

M. BARTUSIAK, *Einstein's Unfinished Symphony : Listening to the Sounds of Space-Time*, Berkley Publishing Group, 2003.

## L'ESSENTIEL

● Dans le cadre de la relativité générale, les trous noirs sont chauves, c'est-à-dire qu'ils ne sont définis que par leur masse et leur mouvement angulaire.

● La détection et l'étude des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs permettent de tester cette hypothèse.

● Cette spectroscopie gravitationnelle est en passe de devenir un nouveau type de tests de la relativité générale.

● Tout écart à la théorie serait le signe d'une nouvelle physique.

## L'AUTEUR



OLIVIER MINAZZOLI  
Astrophysicien au centre scientifique de Monaco et de l'observatoire de la Côte d'Azur. Membre de la collaboration *Virgo*.

# Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

**L'analyse du spectre des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs est une aubaine pour étudier ces astres et, plus encore, la relativité générale dans des conditions extrêmes. Une nouvelle science ébouriffante !**

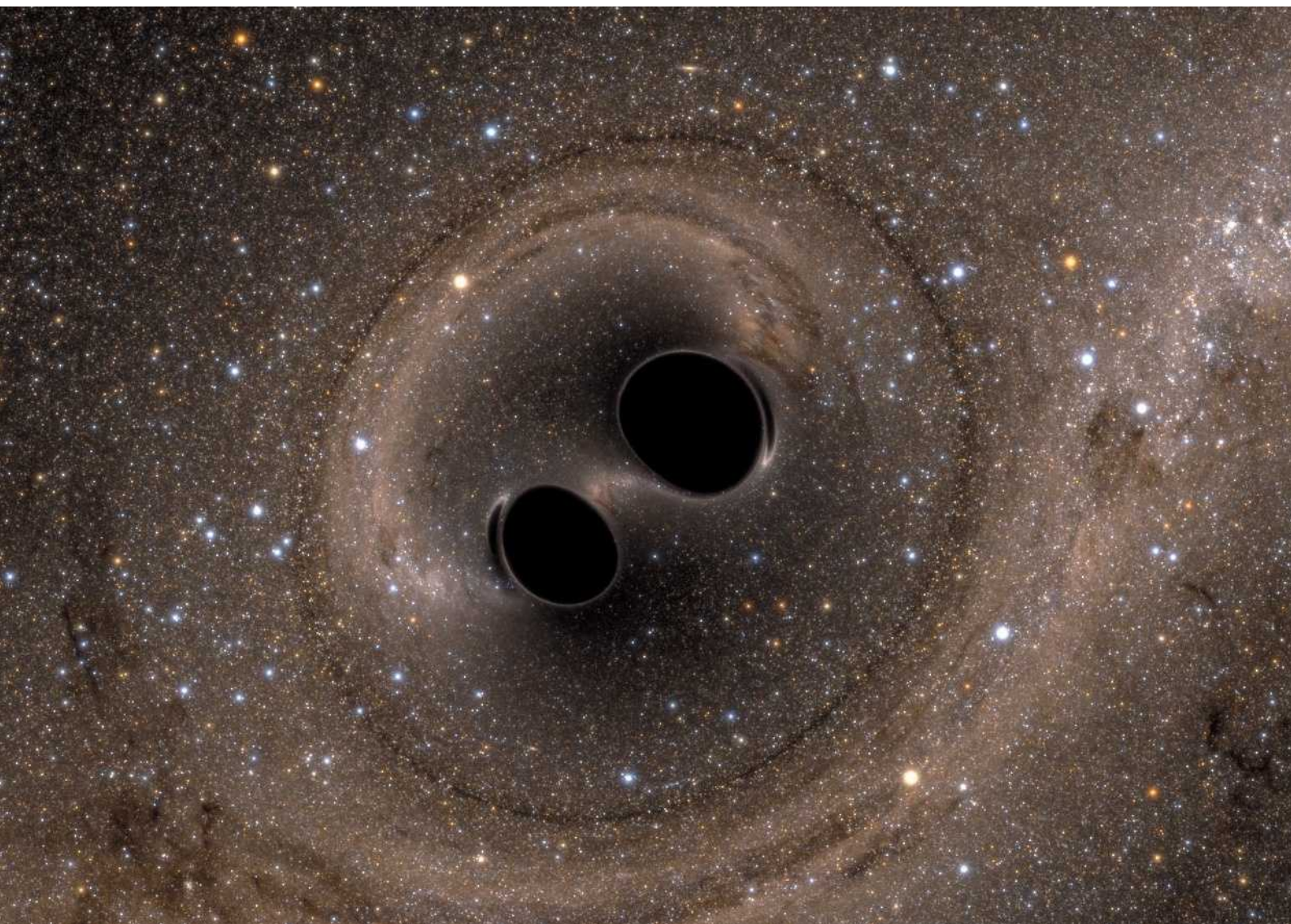


# E

n janvier 1971, dans un article de la revue *Physics Today*, les physiciens Remo Ruffini et John Wheeler sont catégoriques : « *Black holes have no hair* », soit, en français « les trous noirs n'ont pas de cheveux ». Ce n'est à l'époque qu'une conjecture. Elle sera démontrée quelques années plus tard et prendra alors le

nom de « théorème de calvitie » des trous noirs (le « *no hair theorem* » en anglais). Les trous noirs auraient donc un système pileux ? Non. Explication.

L'existence des trous noirs, objets prédits par la théorie de la relativité générale depuis des décennies, n'a été confirmée que très récemment (voir *L'épopée d'une image historique*, par A. Riazuelo, page 16). Paradoxalement, dans le cadre de cette théorie, ils seraient aussi les objets macroscopiques les plus simples de la nature, puisqu'ils seraient entièrement décrits par seulement trois paramètres : leur masse, leur moment cinétique (ou « moment angulaire », ce nombre décrivant leur rotation) et leur charge. Plus encore, la charge d'un trou noir astrophysique est très probablement



Avant de fusionner, deux trous noirs se rapprochent inexorablement en spiralant. Cette simulation montre ce que nous verrions depuis un hypothétique vaisseau spatial situé à proximité de l'événement. Les images des étoiles environnantes sont déformées par la gravité des trous noirs.

nulle, puisque l'on ne s'attend pas qu'un trou noir accrete uniquement de la matière chargée positivement (ou négativement). Deux nombres suffiraient donc à caractériser ces astres. C'est remarquable!

### QUAND DEUX CHAUVES SE RENCONTRENT

Une telle simplicité ne se trouve le plus souvent que dans le monde microscopique et idéalisé des particules élémentaires, telles que les électrons, mais certainement pas dans le monde des objets macroscopiques. L'origine de la métaphore capillaire est ici: elle signifie en quelque sorte que rien à la surface des trous noirs ne complexifie leur nature fondamentalement simple. Un nouveau moyen de le vérifier, et de pousser la relativité générale dans ses retranchements, s'est récemment offert aux astronomes: l'étude des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs.

Lorsque deux trous noirs fusionnent, naît un nouveau trou noir plus massif que chacun des deux trous noirs originels, mais un peu moins massif que la somme des deux masses initiales, car une partie de l'énergie est libérée sous forme d'ondes gravitationnelles en vertu de la célèbre formule  $E = mc^2$ . Pendant un bref instant, le trou noir nouvellement formé émet de telles ondes, avant de retrouver un état d'équilibre. Ces ondes gravitationnelles consistent en des oscillations amorties dont les fréquences particulières, c'est-à-dire le spectre, dépendent exclusivement de la masse et du moment angulaire du trou noir final, si ce dernier est bel et bien chauve comme le prédit la relativité d'Einstein *via* le théorème de calvitie. De manière générale, même hors contexte gravitationnel, ces oscillations amorties sont nommées «modes quasi normaux». Elles sont typiques d'objets qui, soumis à une perturbation, dissipent l'énergie introduite par ➤