

3

Bienvenue dans l'ère de l'astronomie multimessager

Frédéric Daigne, Institut d'astrophysique de Paris (CNRS, université Pierre-et-Marie-Curie) et **Matteo Barsuglia**, laboratoire astroparticule et cosmologie (CNRS, université Paris Diderot, CEA, Observatoire de Paris)

L'année 2017 restera dans l'histoire de l'astronomie comme celle de la première détection conjointe des ondes gravitationnelles et de la lumière émises par une même source astrophysique : Ligo, Virgo et plus de 70 télescopes ont observé une fusion d'étoiles à neutrons. Les résultats obtenus ont une importance fondamentale pour l'astrophysique, la physique nucléaire et la cosmologie.

L'histoire commence le 17 août 2017. Alors que les deux détecteurs Ligo situés aux États-Unis recueillent des données depuis plusieurs mois, Virgo, en Italie, a commencé sa période d'observation depuis deux semaines. Les trois détecteurs marchent parfaitement : le 14 août, ils ont effectué leur première détection conjointe – la quatrième onde gravitationnelle (*) produite par la fusion de deux trous noirs. À 14h41, un signal d'onde gravitationnelle compatible avec la fusion de deux

étoiles à neutrons est détecté. En s'appuyant sur la comparaison entre ondes gravitationnelles et ondes sonores, le signal ressemble à un gazouillement, un son qui augmente en amplitude et en fréquence. Il est clairement visible dans un « spectrogramme », une espèce de partition musicale utilisée pour visualiser ces événements au milieu du bruit instrumental. L'axe horizontal représente le temps, l'axe vertical la fréquence, et la couleur l'amplitude.

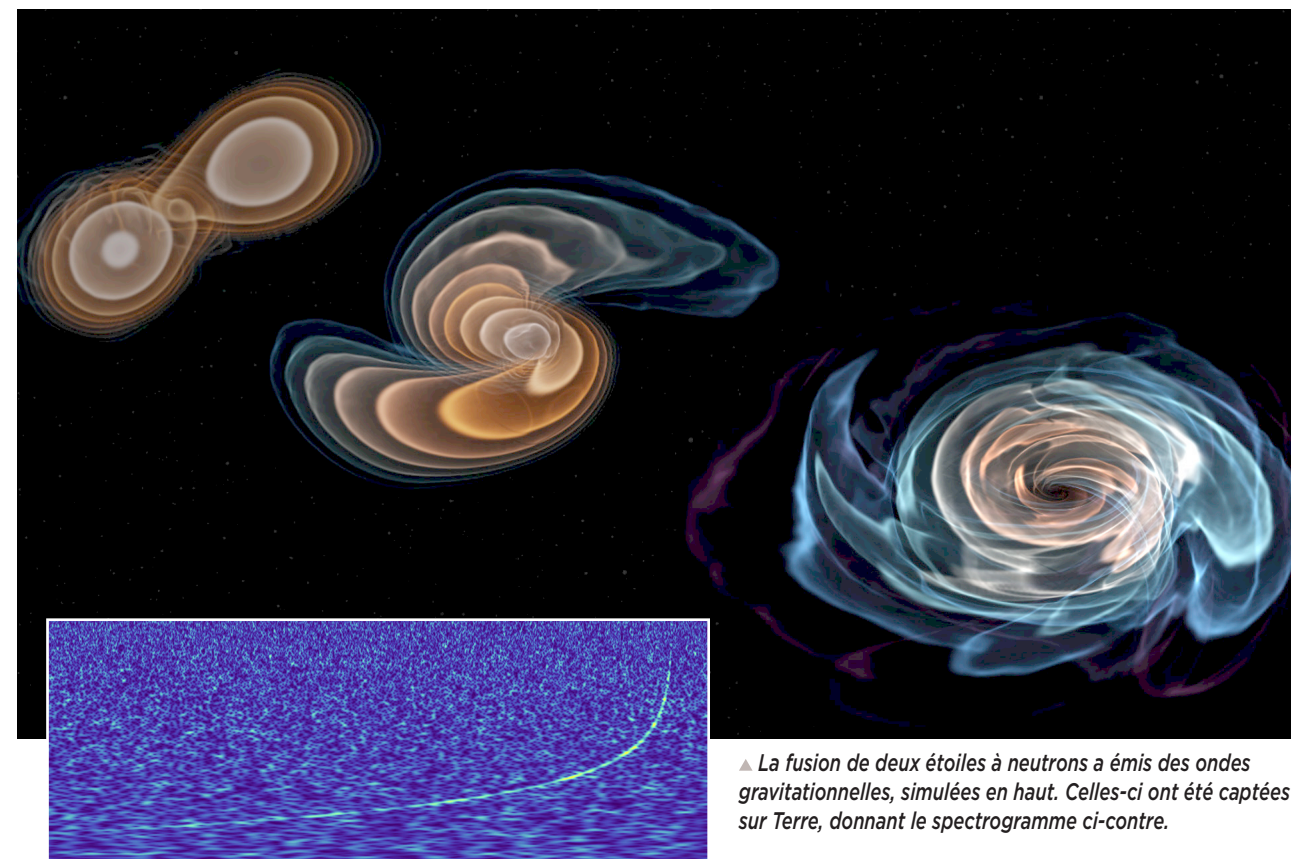
Le signal commence par un *piano* de fréquences graves et se termine avec un *forte* dans les aigus, au moment de la fusion. L'évolution



PROFESSEUR ET DIRECTEUR DE RECHERCHE
Frédéric Daigne (1) travaille sur les sursauts gamma et les contreparties électromagnétiques des ondes gravitationnelles. Matteo Barsuglia (2) est responsable de l'équipe Virgo au laboratoire astroparticule et cosmologie de Paris.

avec le temps de la phase du signal nous renseigne sur les masses des étoiles, qui sont plus faibles que pour les observations précédentes et compatibles avec celles des étoiles à neutrons. De plus, pour les observations déjà effectuées de trous noirs, le signal était visible moins de 2 secondes, tandis qu'ici, le signal reste dans la bande passante des détecteurs pendant 100 secondes (1).

Deux secondes après la fusion des étoiles, indiquée par la fin de l'onde gravitationnelle, les satellites américain Fermi et européen Integral détectent un sursaut gamma (*). Il s'agit d'un flash de photons gamma, d'une durée d'environ deux secondes, comme on en observe une centaine par an. Cependant, la coïncidence spatiale et temporelle entre ces deux signaux, qui a une chance sur vingt millions de se produire par hasard, est le signe que quelque chose de très spécial est en train de se dérouler. Ligo



▲ La fusion de deux étoiles à neutrons a émis des ondes gravitationnelles, simulées en haut. Celles-ci ont été captées sur Terre, donnant le spectrogramme ci-contre.

Contexte

Notre vision de l'Univers a changé complètement chaque fois que nous l'avons regardé avec des instruments nouveaux, comme l'avait fait Galilée au XVII^e siècle. Deux ans après la première détection de fusion de trous noirs, de nombreux observatoires ont analysé la fusion d'étoiles à neutrons, à la fois grâce aux ondes gravitationnelles et aux ondes électromagnétiques. Il s'agit de la naissance d'une nouvelle astronomie « multimessager ».

et Virgo reconstruisent la position de l'événement dans l'hémisphère boréal et dans la constellation de l'Hydre, dans une zone de 30 degrés carrés et à une distance d'environ 130 millions d'années-lumière. Cet événement montre immédiatement les avantages de la présence d'un troisième détecteur comme Virgo : la localisation de la source est six fois plus précise que celle donnée par les seuls instruments de Ligo. On peut considérer ce réseau de trois interféromètres comme un seul instrument, avec un gros atout par rapport aux télescopes conventionnels : il peut observer pratiquement tout le ciel en même temps et continuellement, l'hémisphère nord comme l'hémisphère sud, la nuit comme le jour. À la suite de la détection d'un signal gravitationnel, Virgo et Ligo peuvent donc indiquer rapidement aux télescopes où pointer.

Ce 17 août, une alerte est envoyée à 70 observatoires partout dans le monde, qui guettent d'autres messagers venus du cosmos, les photons ou les neutrinos.

Une kilonova identifiée

Et c'est à partir de là que l'histoire devient colorée – d'abord bleue, puis rouge. Les nombreux groupes qui se mettent à rechercher de telles contreparties peuvent se concentrer sur la cinquantaine de galaxies situées à la fois dans la bonne région du ciel et à la bonne distance, indiquées par le signal d'ondes gravitationnelles. Environ onze heures après l'alerte, une nouvelle source lumineuse est découverte dans l'une de ces galaxies, NGC 4993. Dans un intervalle d'une heure, cette source est identifiée par six groupes différents – le premier d'entre eux étant la collaboration Swope, qui se consacre

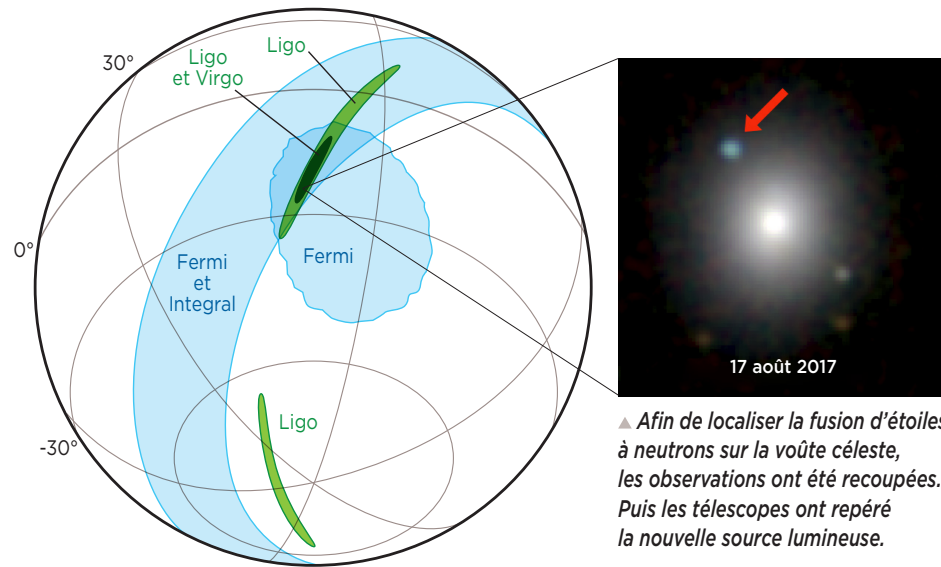
(*) **Les ondes gravitationnelles** sont des déformations de l'espace-temps qui se propagent. Elles sont provoquées par des objets massifs en accélération.

(*) **Les sursauts gamma** sont des flashes ponctuels brillants constitués de photons énergétiques. Les sursauts courts, de moins de 2 secondes, proviendraient de la fusion d'étoiles à neutrons ; les sursauts longs sont produits après l'effondrement d'étoiles massives.

habituellement à la recherche de supernovae – des explosions d'étoiles. Dans les heures et jours qui suivent, cette source est observée par une myriade d'instruments : après avoir rapidement atteint un maximum, l'intensité de la lumière décroît vite. En moins de deux semaines, la source s'éteint. Initialement plutôt bleue, la source rougit au cours du temps, et même « infrarougit » puisqu'elle émet principalement dans l'infrarouge dans ses derniers jours. Cela ne ressemble à aucun autre phénomène astronomique transitoire connu. Les caractéristiques diffèrent par exemple notablement de celles d'une supernova, qui est beaucoup plus lumineuse à son maximum d'intensité et qui s'éteint plutôt en plusieurs mois. La source est finalement identifiée comme une kilonova, un phénomène associé aux ●●●

... coalescences (aux fusions) d'étoiles à neutrons, qui avait été prédit théoriquement mais n'avait jamais été observé.

Une position beaucoup plus précise de la source devient disponible grâce à ces images. Elle permet de continuer à rechercher d'autres émissions associées, à d'autres longueurs d'onde. Neuf jours après l'événement initial, une nouvelle émission est trouvée en rayons X par le satellite Chandra de la Nasa, et une semaine plus tard, ce sont des ondes radio qui sont détectées. L'événement du 17 août 2017 est donc exceptionnel et marque l'avènement d'une nouvelle astronomie à plusieurs messagers (2), puisque le même phénomène cataclysmique – la fusion de deux étoiles à neutrons – a été détecté à la fois en ondes gravitationnelles et en radiation électromagnétique dans de nombreux domaines de longueur d'onde: rayons gamma, lumière visible et infrarouge, rayons X et ondes radio. La présence de neutrinos a aussi été recherchée, sans succès, mais cela a permis de placer des limites supérieures sur l'émission de ces particules. En 1987, les neutrinos de la supernova 1987A, observés en coïncidence avec la lumière mais sans les ondes gravitationnelles, avaient représenté



▲ Afin de localiser la fusion d'étoiles à neutrons sur la voûte céleste, les observations ont été recoupées. Puis les télescopes ont repéré la nouvelle source lumineuse.

le premier exemple d'astronomie à plusieurs messagers. Tous ces signaux combinés aujourd'hui contiennent une information très riche et complémentaire. L'exploitation scientifique prendra des mois, mais des résultats importants sont déjà connus.

Les premières détections de Ligo avaient permis de vérifier que la forme des ondes gravitationnelles est bien celle attendue par la relativité générale d'Albert Einstein. Ensuite, avec la détection conjointe Virgo et Ligo, une autre propriété de la théorie avait été testée pour la première fois: les ondes gravitationnelles produisent des modifications de l'espace-temps

perpendiculaires à leur propagation et avec un effet asymétrique, contraction de l'espace dans une direction et dilatation dans la direction perpendiculaire. Avec l'observation conjointe d'une onde gravitationnelle et d'un flash gamma en provenance de la même région du ciel, une autre prédiction de la théorie d'Einstein a été vérifiée de façon spectaculaire: les ondes gravitationnelles voyagent à la même vitesse que la lumière. Ce qui impose des contraintes très sévères aux théories alternatives à la relativité d'Einstein (lire ci-contre).

Les ondes gravitationnelles peuvent servir aussi à tester la structure interne des étoiles à neutrons, concentrations de matière les plus denses de l'Univers. Elles ont une masse comparable à celle du Soleil et une densité comparable à celle du noyau atomique. Étudier les étoiles à neutrons revient donc à faire de la physique nucléaire et à étudier la matière d'ultra-haute densité. Pendant les dernières orbites avant la fusion, quand les étoiles sont très proches, l'énorme gravité de l'une des deux étoiles déforme l'autre. La déformation des étoiles modifie à son tour la forme des ondes gravitationnelles émises, qui dépendent de la

distribution de matière. Les données recueillies ont donc permis de comparer la forme des ondes gravitationnelles observées à celle des modèles théoriques d'étoiles à neutrons. Ainsi, des limites sur les déformations typiques des étoiles ont pu être obtenues, et les modèles qui prédisent des étoiles à neutrons trop grandes ont été exclus. Leur rayon est vraisemblablement inférieur à 14 km (pour des étoiles de 1,4 fois la masse du Soleil). Mais la nature de l'astre produit par la fusion – étoile à neutrons massive ou trou noir – reste inconnue.

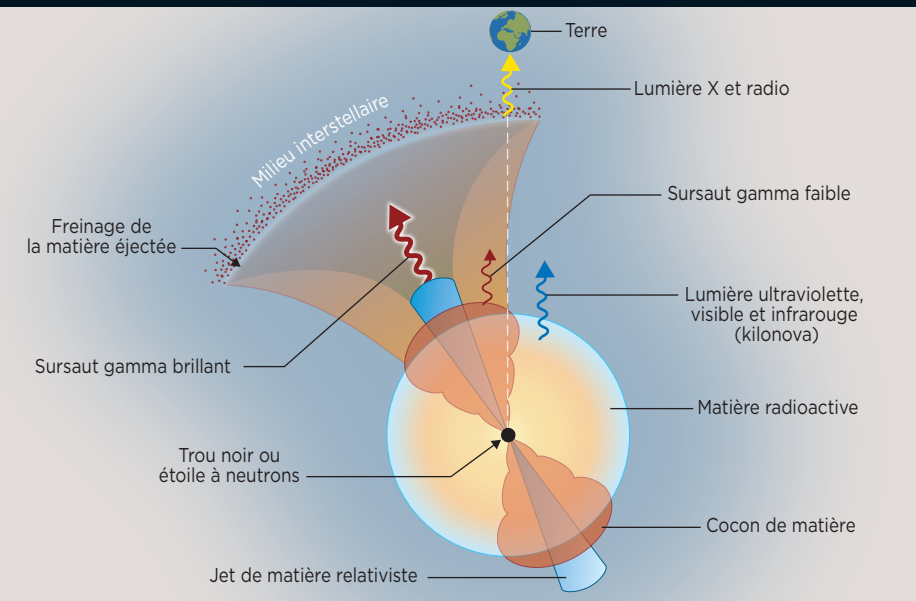
Les observations du 17 août ont permis de sonder les propriétés de la gravitation et celles des étoiles à neutrons, mais aussi d'étudier l'Univers dans son ensemble, en fournissant une mesure alternative de la constante de Hubble, qui quantifie le taux d'expansion de l'Univers (lire p. 54).

Prédictions confirmées

À côté de ces résultats importants pour la physique fondamentale ou la cosmologie, l'événement du 17 août 2017 est également une source inestimable d'informations pour les astrophysiciens. Il permet d'étudier en détail un phénomène cataclysmique rare: l'association d'une certaine classe de sursauts gamma, les plus courts, avec la coalescence d'étoiles à neutrons était très attendue. C'est une prédiction théorique, due à Bohdan Paczynski et Joseph Goodman en 1986, qui se voit confirmée.

L'étude précise du sursaut gamma observé le 17 août montre cependant que celui-ci possède quelques caractéristiques inhabituelles: si sa durée est courte et s'il émet bien des rayons gamma, la connaissance de la distance de la source révèle qu'il est intrinsèquement environ 10 000 fois moins brillant que les sursauts gamma

Fig. 1 Un scénario pour expliquer les différents signaux



▲ La fusion de deux étoiles à neutrons produit un trou noir ou une étoile à neutrons en émettant des ondes gravitationnelles. Cette fusion répand de la matière radioactive dans toutes les directions. De la lumière bleue, rouge, puis infrarouge est émise (une kilonova). En même temps, un jet de matière relativiste très directionnel serait expulsé, associé à un sursaut gamma court et brillant, mais qui ne serait pas dirigé vers la Terre. Le sursaut faible repéré par les télescopes viendrait d'un cocon de matière enrobant le jet. Peu après, la matière éjectée, freinée dans le milieu interstellaire, aurait rayonné de la lumière X et des ondes radio.

10 000 FOIS

LE SURSAUT GAMMA observé le 17 août 2017 est intrinsèquement environ 10 000 fois moins brillant que les sursauts gamma « classiques ».

« classiques ». L'étude de l'onde gravitationnelle n'exclut pas que le système d'étoiles à neutrons ait pu ne pas être observé exactement de face, mais un peu de côté. Or un sursaut gamma est associé à de la matière éjectée à une vitesse proche de celle de la lumière – un jet dit « relativiste » – dans la direction perpendiculaire à celle du plan orbital initial. Dans les sursauts gamma habituels, ce jet est vu de face, ce qui rend la source très brillante et aisément détectable à grande distance. En effet, lorsque de la matière se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière, elle focalise fortement son rayonnement vers l'avant. Dans le cas de l'événement du 17 août, il y a eu peut-être un jet relativiste comme dans les autres sursauts,

mais il n'a pas pu être détecté car l'angle de vue était trop grand. En revanche, l'émission tardive vue en rayons X et en ondes radio pourrait être due au freinage de ce jet par le milieu environnant la source. Le sursaut gamma lui-même pourrait être associé à de la matière entourant ce jet central (Fig. 1). Plusieurs hypothèses sont à l'étude pour expliquer les observations (3): éjecta moins énergétique ou moins relativiste, « cocon », jet peinant à s'échapper de la matière responsable de l'émission de la kilonova. La kilonova observée est aussi une belle confirmation d'une prédiction théorique faite des années plus tôt, notamment par Bohdan Paczynski en 1998, à propos de la création de certains éléments chimiques. Lors de la coalescence des ...

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE TESTÉE

L'analyse de l'onde gravitationnelle captée le 17 août 2017 a permis de tester trois prédictions de la théorie de la relativité générale.

- Les ondes lumineuses et les ondes gravitationnelles voyagent à la même vitesse. Avec seulement 2 secondes de retard de la lumière par rapport au signal gravitationnel, sur un voyage long de 130 millions d'années, l'écart relatif entre les deux vitesses est forcément plus petit de quelques milliardièmes de milliardième.
- L'invariance de Lorentz, qui stipule que le résultat d'une expérience ne dépend ni de l'orientation ni de la vitesse du laboratoire, est respectée. Cela réduit le champ des possibles de certaines théories de gravitation quantique dans le cadre des extensions du modèle standard.
- Le principe d'équivalence (ou universalité de la chute libre) est encore vérifié. Les ondes gravitationnelles « chutent » de la même manière que la lumière dans un champ gravitationnel.

INFOGRAPHIE: BRUNO BOURGEOIS D'APRÈS LIGO-VIRGO • SANTA CRUZ AND CARNegie OBSERVATORIES/RVYAN FOLEY

INFOGRAPHIE: BRUNO BOURGEOIS

●●● deux étoiles à neutrons, de la matière est éjectée à grande vitesse. Elle est riche en neutrons et donc le siège d'une nucléosynthèse particulière, faisant grossir rapidement les noyaux présents par capture de neutrons jusqu'à former des éléments très lourds, comme le platine, l'or ou l'uranium.

Les noyaux lourds formés sont initialement radioactifs : trop riches en neutrons, ils subissent des désintégrations bêta – un neutron se change en un proton et le noyau éjecte un électron – pour devenir plus stables. L'éjecta se retrouve donc chauffé par la radioactivité et se refroidit en rayonnant, ce qui explique l'évolution des photons émis du bleu vers le rouge.

Éléments lourds créés

Plusieurs observations de la kilonova confirment cette prédiction : d'abord, le fort rougissement tardif ne peut s'expliquer que si la matière éjectée est devenue très opaque, une signature attendue des éléments lourds, en particulier ceux du groupe des lanthanides (*) ; ensuite, un spectre obtenu environ deux jours après le début des observations par l'instrument Xshooter installé au Very Large Telescope, au Chili, montre des raies d'absorption larges associées à deux éléments



▲ Le Very Large Telescope (VLT) est installé au Chili.

lourds, le tellure et le césium. Des éléments lourds ont donc bien été créés. Cette observation exceptionnelle apporte un indice significatif à un mystère ancien : les éléments les plus lourds sont très rares dans l'Univers et le site astrophysique de leur production encore inconnu. Nous savons désormais que les coalescences d'étoiles à neutrons jouent très vraisemblablement un rôle majeur pour leur apparition au sein des galaxies. Étonnant de penser en regardant un bijou en or que les atomes qui le constituent ont été forgés il y a plusieurs milliards d'années lors d'une coalescence de deux étoiles à neutrons...

Les détecteurs Ligo et Virgo ont arrêté de recueillir des données fin août 2017 : des améliorations des instruments ont commencé et

(*) Les lanthanides

sont une famille d'éléments chimiques allant du lanthane (57 protons) au lutécium (71 protons). Ils font partie des terres rares.

dureront environ un an. Doubler la sensibilité équivaut à regarder deux fois plus loin dans l'Univers et un volume huit fois plus grand. Un programme qui alterne améliorations et observations est donc en place pour les prochaines années. Le réseau des détecteurs est aussi prêt à s'élargir, avec l'entrée du japonais Kagra vers 2020, puis un troisième Ligo construit en Inde. Et en regardant cette fois vers le ciel, vers 2034 sera lancé le détecteur spatial Lisa, qui cherchera des sources d'ondes gravitationnelles complémentaires à celles de Ligo et Virgo, tels les trous noirs supermassifs. En ce qui concerne la coalescence d'objets compacts de masse stellaire – trous noirs et étoiles à neutrons –, une telle moisson de résultats depuis 2015 nous rend très optimistes.

L'accumulation des observations permettra d'essayer de répondre à plusieurs questions ouvertes. Après les systèmes de deux trous noirs et de deux étoiles à neutrons, découvrirons-nous des couples mixtes, composés d'une étoile à neutrons et d'un trou noir ? Pourrions-nous un jour détecter le faible signal gravitationnel attendu juste après la fusion de deux étoiles à neutrons, qui permettrait de savoir si le nouvel objet astrophysique formé est un trou noir ou une nouvelle étoile à neutrons hypermassive ? Sera-t-il possible d'évaluer précisément la quantité d'éléments lourds synthétisés pour déterminer s'il s'agit bien du processus dominant pour leur production dans l'Univers ? L'aventure de l'astronomie combinant ondes gravitationnelles et lumière ne fait que commencer. ■

(1) B. P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161101, 2017.

(2) B. P. Abbott *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, 848, L12, 2017.

(3) M. M. Kasliwal *et al.*, *Science*, doi:10.1126/science.aap9455, 2017.

UNE MESURE DE L'EXPANSION DE L'UNIVERS

Deux méthodes principales existent déjà pour déterminer la constante de Hubble, qui indique comment la vitesse d'éloignement entre les galaxies augmente avec leur distance relative. Les cosmologistes tirent cette valeur de l'analyse du fond diffus cosmologique, mais aussi de l'étude de supernovae. Il existe un désaccord, qui n'est pas encore résolu, entre les deux valeurs obtenues. L'astronomie multimessager, comme ici l'observation d'une fusion d'étoiles à neutrons, offre une troisième voie (1).

L'identification de la galaxie hôte, grâce aux observations optiques, a rendu possible la mesure de sa vitesse d'éloignement, tandis que l'amplitude de l'onde gravitationnelle donne accès à la distance qui nous sépare de cette galaxie. La valeur de la constante de Hubble ainsi obtenue est compatible avec les résultats antérieurs, mais n'est pas encore assez précise pour résoudre le désaccord. Toutefois, cette méthode est très prometteuse pour l'avenir.

(1) B. P. Abbott *et al.*, *Nature*, 551, 85, 2017.