

Une nouvelle source d'informations sur le cosmos

Les signaux en provenance de fusions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons permettent de tester les théories de la gravitation, mais aussi de lever le voile sur la nature et l'origine de ces astres ultra-compacts.

Au-delà de l'exploit de réussir à capter les ondulations de l'espace-temps, la traque des ondes gravitationnelles a ouvert une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Et les avancées scientifiques sont déjà là. Ainsi, l'observation du 14 septembre 2015 marque non seulement la première détection directe des ondes gravitationnelles, mais aussi la preuve de l'existence de couples de trous noirs, qui tournent l'un autour de l'autre avant de fusionner. C'est le final de cette danse, durant une fraction de seconde, qui peut être perçu par les interféromètres (Fig. 1). « *La fusion de tels objets compacts est un processus qui dure des centaines de millions d'années* », explique Marie-Anne Bizouard, physicienne à l'Observatoire de la Côte d'Azur et membre de la collaboration Virgo.

Astre de 62 masses solaires

Au départ, lors de la phase spirale, la fréquence de ces ondes, qui correspond au double de la fréquence orbitale à laquelle les objets tournent l'un autour de l'autre, est trop faible pour entrer dans la bande de détection des interféromètres. Mais le système émet des ondes gravitationnelles, donc perd de l'énergie. Pour conserver leur moment angulaire (grosso modo pour continuer à tourner à la même vitesse), les deux trous noirs se rapprochent jusqu'à se rendre détectables juste avant de ne former qu'un seul trou noir final. La stabilisation de celui-ci constitue la dernière phase du signal : l'astre se désexcite en émettant des ondes gravitationnelles qui s'amortissent rapidement jusqu'à ce qu'il atteigne

un état parfaitement symétrique, où plus aucune onde n'est produite. « *La forme générale des ondes émises par la fusion de deux trous noirs était connue théoriquement, par une combinaison de méthodes analytiques et numériques*, poursuit Marie-Anne Bizouard. *Lorsqu'un signal arrive, des algorithmes recherchent quels paramètres du modèle théorique (masses des objets, moments angulaires, distance...) donnent la forme la plus proche de l'observation.* »

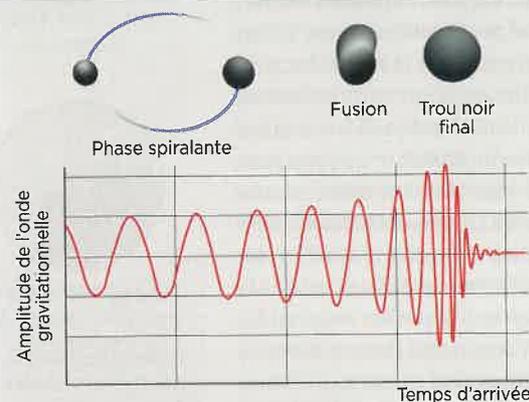
Les scientifiques sont ainsi remontés aux caractéristiques de l'événement du 14 septembre 2015 : deux trous noirs de respectivement 29 et 36 fois la masse du Soleil, situés à plus d'un milliard d'années-lumière de la Terre, ont formé un trou noir de 62 masses solaires en émettant l'équivalent énergétique de trois fois la masse du Soleil en ondes gravitationnelles. Depuis, neuf autres fusions de trous noirs similaires ont été officiellement annoncées par les collaborations Ligo et Virgo (Fig. 2). La théorie de la relativité générale fait donc coup double : d'une part, les ondes gravitationnelles sont bien détectables directement ; d'autre part, les modèles théoriques qu'elle a permis de développer collent très bien aux données. Cependant, si la théorie d'Einstein est aujourd'hui d'une efficacité redoutable, les scientifiques tentent par tous les moyens de la pousser dans ses retranchements. Les signaux d'ondes gravitationnelles permettent de lui faire passer toute une batterie de nouveaux tests. Par exemple, l'un d'eux consiste à soustraire la forme d'onde calculée à l'aide de la relativité

générale de la forme d'onde observée et d'analyser le signal restant. C'est un peu comme si l'on effaçait la partie musicale d'un disque vinyle et qu'on le réécoutait à la recherche d'une mélodie cachée parmi les grésillements parasites. S'il restait effectivement quelque chose, on pourrait conclure que la relativité générale n'est pas complète.

« *Il s'agit aussi de mettre à l'épreuve les théories alternatives, par exemple celles qui tentent d'expliquer le problème de la matière noire en modifiant les lois de la gravitation ou celles qui cherchent à unifier la gravitation et la physique quantique* », précise Olivier Minazzoli, astrophysicien au Centre scientifique de Monaco et à l'Observatoire de la Côte d'Azur. L'une des contraintes les plus fortes sur ces théories provient des ondes gravitationnelles issues de la fusion de deux étoiles à neutrons dont les conséquences ont également été vues par des télescopes optiques. Ces mesures ont permis de comparer la vitesse de la lumière à celle des ondes gravitationnelles. « *Un certain nombre de théories, dites de Horndeski, qui tentent notamment de décrire l'accélération de l'expansion*

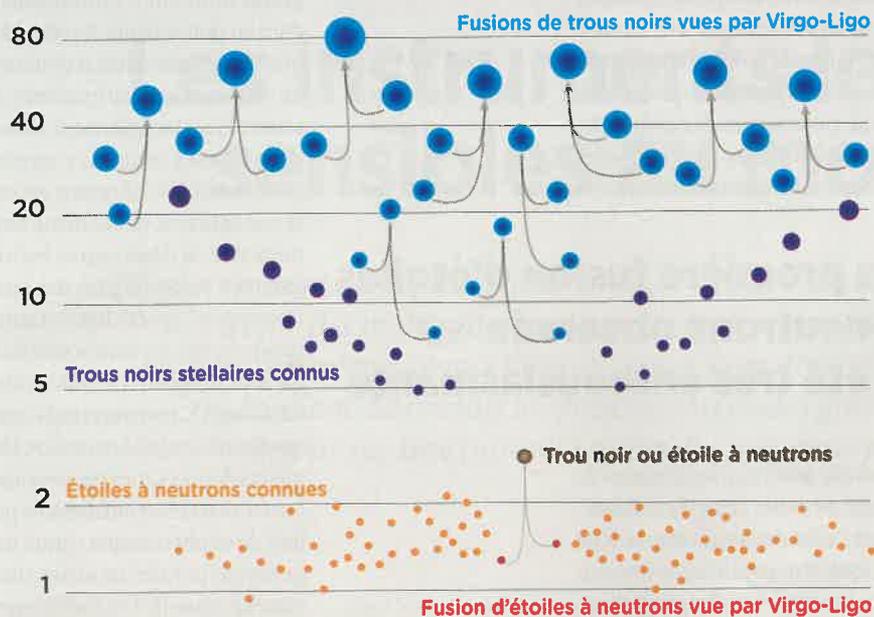
(*) **Le théorème de la calvitie** de la relativité générale stipule que trois paramètres suffisent à décrire un trou noir à l'équilibre : sa masse, son moment angulaire (spin) et sa charge électrique.

Fig. 1 La fusion de deux trous noirs



▲ Deux trous noirs en orbite émettent des ondes gravitationnelles, qui deviennent détectables sur Terre lors des derniers instants avant la fusion des deux astres.

Fig. 2 Onze événements observés

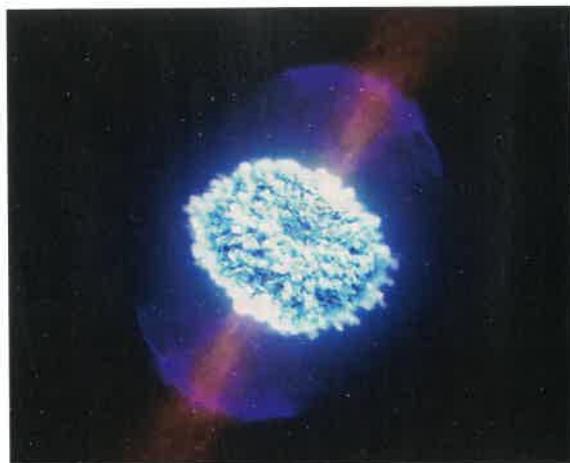


▲ Dix fusions de trous noirs et une fusion d'étoiles à neutrons ont été détectées grâce aux ondes gravitationnelles. L'axe vertical représente la masse des astres, exprimée en nombre de fois la masse de notre Soleil. Les trous noirs observés par ce biais sont sensiblement plus massifs que les trous noirs stellaires déjà connus.

de l'Univers de manière différente de la relativité générale, prédisent pour les ondes gravitationnelles une vitesse différente de celle de la lumière », détaille le physicien. Mais le résultat de la course est clair : dans la gamme de fréquences des interféromètres, la vitesse des ondes gravitationnelles et celle de la lumière sont équivalentes à 10^{-15} près (1). Une large partie de ces modèles alternatifs sont donc exclus. Néanmoins, tout un bestiaire de ces théories existe, dont certaines ne prédisent pas de différence de vitesse...

Les tests de la relativité générale avec les ondes gravitationnelles vont continuer à gagner en précision, au fur et à mesure de l'amélioration des détecteurs et de l'accumulation d'observations permettant des analyses statistiques. Deux points sont à suivre en particulier. D'abord, les tests en « champ gravitationnel fort » : juste avant la fusion, les astres, pourtant très massifs, se déplacent à des

vitesse colossales, proches de celle de la lumière ! Si l'on compare l'espace-temps à l'océan, il serait agité par une tempête dantesque, lors de laquelle il faut évaluer la solidité de la théorie de la relativité générale alors qu'elle n'a navigué jusque-là que sur des mers calmes, autrement dit



▲ Une collision de deux étoiles à neutrons provoque un phénomène lumineux appelé kilonova (vue d'artiste).

des champs gravitationnels faibles. Seules les fusions de trous noirs permettent de sonder ce régime. « Avec les observations actuelles, le bruit parasite est encore trop fort par rapport au signal pour permettre des tests précis », souligne Olivier Minazzoli, également membre de la collaboration Virgo. L'autre point concerne la dernière phase, c'est-à-dire la stabilisation du trou noir final. « La prédiction théorique est bien connue dans le cadre du théorème de la calvitie (2), l'un des grands théorèmes de la relativité générale. Mais ces signaux sont d'amplitude très faible, donc très difficiles à mettre en évidence. Ce que nous attendons avec impatience, c'est une fusion de trous noirs forte et plus proche de nous. Cela va arriver dans les prochaines années », espère Marie-Anne Bizouard.

Énigme astrophysique

Si l'événement du 14 septembre 2015 a conforté la théorie de la relativité générale, il a également posé une énigme astrophysique d'importance : comment des trous noirs pesant une trentaine de fois la masse du Soleil peuvent-ils exister ? « On pense que ces couples de trous noirs étaient à l'origine des couples d'étoiles massives qui ont formé ces objets compacts à la fin de leur vie. Mais on n'imaginait pas que leur masse pouvait être aussi élevée ! », s'étonne Sylvain Chaty, astrophysicien au laboratoire astroparticule et cosmologie de l'université Paris Diderot. Les scientifiques connaissent plusieurs types de trous noirs : les supermassifs et les stellaires. Les premiers sont logés au centre des galaxies et pèsent plusieurs millions, voire milliards, de soleils, tel celui de la galaxie M87 dont une « photographie » a été publiée cette année. On ne peut pas encore détecter la fusion de ces béhémotes grâce aux détecteurs d'ondes gravitationnelles actuels. À l'autre bout du spectre, les trous noirs stellaires sont issus ●●●

●●● de l'effondrement d'étoiles très massives en fin de vie. « *Nous savons que les étoiles très massives possèdent un vent stellaire fort, c'est-à-dire qu'elles éjectent beaucoup de masse au cours de leur vie. Ainsi, une étoile de 30 masses solaires finit sa vie à 15 masses solaires, voire moins.* » Les plus gros trous noirs stellaires que l'on connaissait grâce à l'émission de rayons X dans leur environnement faisaient une quinzaine de fois la masse de notre étoile. Les ondes gravitationnelles ont forcé les astrophysiciens à retourner au tableau pour ajuster leurs modèles (2). « *Cela nous a conduits à envisager des étoiles beaucoup moins riches en métaux que le Soleil* », explique Sylvain Chaty. En astrophysique, le terme « métal » désigne tout élément plus lourd que l'hydrogène ou l'hélium. Plus la métallicité est élevée, plus le vent stellaire sera fort. En effet, les atomes sont éjectés à cause de l'énergie que leurs électrons reçoivent des photons émis par l'étoile, énergie qui se transforme en mouvement. Or, dans un atome lourd, le carbone par exemple, un électron peut monter sur des niveaux d'énergie plus élevés que dans l'hydrogène. Une

étoile très métallique perdra plus de masse et sera susceptible de former un trou noir de masse « modeste ». Mais si l'étoile possède une métallicité cent fois plus faible que le Soleil, ce qui pourrait être le cas dans les galaxies lointaines, dans lesquelles on observe les fusions de trous noirs,

La première fusion d'étoiles à neutrons observée a été très enthousiasmante

alors elle pourrait perdre moins de masse au cours de sa vie et finalement s'effondrer en un trou noir de quelque 30 masses solaires. Dans un futur proche, les ondes gravitationnelles apporteront d'autres informations sur les phases de la vie de ces couples d'étoiles massives.

À la fin de leur vie, ces étoiles peuvent former non seulement des trous noirs, mais aussi des étoiles à neutrons. On connaît mal ces astres qui concentrent l'équivalent de la masse du Soleil dans un rayon d'une dizaine de kilomètres seulement. La première fusion d'étoiles à neutrons

observée le 17 août 2017 a été un grand moment d'enthousiasme dans la communauté. En effet, alors que la rencontre de deux trous noirs ne crée aucun signal lumineux, les scientifiques pensaient que celle de deux étoiles à neutrons engendrerait une bouffée de rayons gamma et une kilonova, phénomène lumineux visible dans toutes les longueurs d'onde. En plus des interféromètres Ligo et Virgo, 70 autres observatoires ont donc scruté le ciel dans les longueurs d'onde visible, infrarouge, X, gamma et radio, ainsi que des télescopes à neutrinos. Hormis ces derniers, tous ces messagers ont été détectés et ont dressé le portrait de ce phénomène connu uniquement par des modèles théoriques jusque-là. Cet événement a même permis une mesure du taux d'expansion de l'Univers (3).

De grandes avancées

Avec d'autres détections, les astrophysiciens espèrent tirer du signal d'ondes gravitationnelles la signature de l'état de la matière au cœur des étoiles à neutrons car, là encore, de multiples hypothèses existent (4). Après seulement deux campagnes d'observations, le nombre des avancées effectuées grâce aux ondes gravitationnelles est déjà grand. Celui des questions qui restent ouvertes l'est encore plus. Depuis le mois d'avril, les détecteurs Ligo et Virgo sont repartis en quête des vibrations de l'espace-temps. De nouvelles fusions ont déjà été perçues, peut-être même des événements inédits (lire ci-contre). Une chose est sûre : il y aura d'autres surprises. ■ S.G.

NOUVELLES DÉTECTIONS EN PERSPECTIVE



▲ Simulation d'une onde gravitationnelle lors de la collision d'un trou noir et d'une étoile à neutrons.

La 3^e campagne d'observations d'ondes gravitationnelles commencée en avril s'achèvera au printemps 2020. Nouveauté : les collaborations Ligo et Virgo envoient des alertes publiques afin que les télescopes du monde entier puissent se braquer le plus tôt possible dans la direction

d'arrivée des ondes gravitationnelles. Ceci pour tenter de capter la lumière ou les neutrinos émis par le même événement. De nouvelles fusions de trous noirs et au moins une fusion d'étoiles à neutrons auraient été vues. Il se pourrait même que la rencontre entre un trou noir et une étoile à neutrons vienne d'être observée pour la première fois. Le signal n'a pas encore été officialisé : la communauté scientifique a hérité d'une grande prudence après des découvertes annoncées à tort. Au-delà de ces couples d'objets « compacts », des ondes gravitationnelles inédites pourraient arriver en provenance d'étoiles à neutrons asymétriques, de supernovae ou de l'effondrement d'un disque de matière autour d'un trou noir.

(1) B. P. Abbott *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, 848, L13, 2017.

(2) B. P. Abbott *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, 818, L22, 2016.

(3) K. Hotokezaka *et al.*, *Nature Astronomy*, doi.org/10.1038/s41550-019-0820-1, 2019.

(4) J. Margueron, « L'intérieur des étoiles à neutrons sous surveillance », *La Recherche* n° 539, septembre 2018, p. 54.