

UN SIGNAL D'UN NOUVEAU TYPE

Le 17 août 2017, les interféromètres *Ligo* et *Virgo* détectaient un signal qui a été l'objet de nombreuses rumeurs. Deux mois plus tard, après l'analyse des données, la confirmation est tombée : les ondes gravitationnelles du 17 août ont été émises par la fusion de deux étoiles à neutrons, un événement noté GW170817. La différence majeure avec la coalescence de deux trous noirs est que dans ce cas, l'émission des ondes gravitationnelles s'accompagne d'une contrepartie électromagnétique, avec des émissions de lumière à différentes longueurs d'onde. Et c'est exactement ce qui a été vu par près de 70 télescopes et observatoires au sol et dans l'espace. Deux éléments suggéraient que cet événement était d'une autre nature que celle des précédentes ondes gravitationnelles observées. La forme du signal des ondes gravitationnelles pour commencer. En effet, lors de la fusion de deux trous noirs, ceux-ci tournent de plus en plus vite l'un autour de l'autre en se rapprochant jusqu'à entrer en collision, tout en faisant vibrer l'espace-temps sous la forme d'ondes



Vue d'artiste de deux étoiles à neutrons lors de la coalescence avec l'émission d'ondes gravitationnelles et sa contrepartie électromagnétique.

gravitationnelles. Mais les interféromètres ne perçoivent que la fin de ce ballet cosmique, un « chirp » bref d'une fraction de seconde. Pour GW170817, le signal a duré près de 100 secondes. Par ailleurs, la présence d'une contrepartie électromagnétique (un sursaut gamma détecté par l'observatoire spatial *Fermi*) plaçait pour la coalescence de deux étoiles à neutrons ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir. L'analyse des signaux a tranché en faveur de la première hypothèse. L'étude de la contrepartie électromagnétique a fait l'objet de nombreuses découvertes sur ce qui se passe pendant la

coalescence, à commencer par le sursaut gamma. Les astrophysiciens pensaient que la coalescence de paires d'étoiles à neutrons en produisait, ils en ont désormais la preuve ! Mais une nouvelle question se pose. L'intensité du sursaut est plus faible que ce que les modèles prévoyaient. De nouveaux scénarios sont à l'étude pour expliquer cet écart. Un autre résultat important concerne la matière expulsée au moment de la fusion. Cette matière initialement très chaude se refroidit rapidement en émettant de la lumière dans les différentes longueurs d'onde. On parle de kilonova, un phénomène qui avait été

uniquement prédit par la théorie. Selon les modèles, ce type d'événement est le siège de réactions nucléaires de synthèse d'éléments plus lourds que le fer grâce à l'abondance de neutrons dont regorgent les deux étoiles. Or, de nombreux observatoires ont scruté le rayonnement de GW170817 pendant les heures, les jours voire les semaines après la fusion. L'observatoire *Gemini* américain, le VLT européen et le télescope *Hubble* ont observé dans l'infrarouge des indices de production de plomb, d'or et de platine. On aurait ainsi observé pour la première fois ce qui est probablement l'un des principaux processus de productions d'éléments lourds. Et ce n'est pas tout. Selon une méthode proposée en 1986 par Bernard Schutz, de l'université de Cardiff, en comparant la distance des étoiles à neutrons données par l'onde gravitationnelle au décalage vers le rouge de la contrepartie électromagnétique dû à l'expansion de l'Univers, il est possible de mesurer d'une nouvelle façon le paramètre de Hubble qui indique la vitesse d'expansion de l'Univers.

Sean Bailly

- déterminer, par triangulation, la position sur la voûte céleste de la source d'ondes gravitationnelles. Ce fut le cas dès la première détection en 2015. De fait, les données de *Virgo* et de *Ligo* sont distribuées et analysées en commun depuis 2007. Le principe est le même que celui de la détection de l'origine d'un son. L'écart temporel entre les perceptions de chacune de nos deux oreilles renseigne sur la provenance du signal.

PARTAGER, C'EST CONFIRMER

Le partage des données a un second avantage : une onde gravitationnelle devrait être observée dans tous les détecteurs. C'est une bonne façon de confirmer le signal.

Déterminer la position de la source d'une onde gravitationnelle en temps réel permet de transmettre l'information aux télescopes et aux satellites qui observent le ciel dans divers domaines du spectre électromagnétique afin qu'ils pointent dans cette direction et essaient d'observer des phénomènes, par exemple l'émission de rayonnement gamma, en lien avec l'onde gravitationnelle détectée. Cette stratégie fut cruciale lors de la première observation d'une fusion d'étoiles à neutrons en août 2017 (voir l'encadré ci-dessus).

Après une série d'améliorations, les premiers détecteurs *Ligo* et *Virgo* ont changé de nom (pour *Advanced Ligo* et *Advanced Virgo*) et vu leur sensibilité croître au point de

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.