

Les télescopes de l'ESO détectent la toute première lumière issue d'une source d'ondes gravitationnelles

Une fusion d'étoiles à neutrons se traduit par la dispersion d'or et de platine dans l'espace



Plusieurs télescopes de l'ESO au Chili ont pour la première fois détecté la contrepartie visible d'une source d'ondes gravitationnelles. Ces observations historiques suggèrent que ce singulier objet résulte de la fusion de deux étoiles à neutrons. Les conséquences cataclysmiques de ce type de fusion – des événements prédits de longue date et baptisés kilonovae – disséminent des éléments lourds tels que l'or et le platine dans tout l'Univers. Cette découverte a fait l'objet d'une série d'articles publiés au sein de revues telle Nature. Elle apporte la preuve irréfutable que les sursauts gamma de courte durée sont causés par les fusions d'étoiles à neutrons.

Les astronomes viennent, pour la toute première fois, d'observer simultanément les ondes gravitationnelles et lumineuses (rayonnement électromagnétique) produites par un seul et même événement, grâce à un effort collectif mondial et à la rapidité de réaction des installations de l'ESO et d'autres instruments disséminés à la surface du globe.

Le 17 août 2017, l'instrument LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) de la NSF aux Etats-Unis, en collaboration avec l'interféromètre Virgo basé en Italie, a détecté le passage d'ondes gravitationnelles au travers de la Terre. Cet événement, le cinquième détecté à ce jour, fut baptisé GW170817. Quelque deux secondes plus tard, deux observatoires spatiaux, le Fermi Gamma-ray Space Telescope de la NASA et l'INTERNational Gamma Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL) de l'ESA, ont détecté un sursaut gamma court en provenance de cette même région du ciel.

Le réseau d'observatoires LIGO-Virgo a localisé la source dans une vaste région du ciel austral, de dimensions équivalentes à celles de plusieurs centaines de pleines Lunes, et peuplée de millions d'étoiles [1]. A la nuit tombée, de nombreux télescopes implantés au Chili ont sondé cette zone du ciel, à la recherche de nouvelles sources. Parmi ces télescopes figuraient VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) et le VST (VLT Survey Telescope) installés à l'Observatoire de Paranal de l'ESO, le télescope italien REM (Rapid Eye Mount) qui opère depuis l'Observatoire de La Silla de

l'ESO, le télescope LCO de 0,4 mètres à l'Observatoire Las Cumbres, et l'américain DECam à l'Observatoire Inter-américain de Cerro Tololo. Le télescope Swope d'1 mètre fut le premier à détecter une nouvelle source de lumière à proximité directe de NGC 4993, une galaxie lenticulaire située dans la constellation de l'Hydre. Les observations menées au moyen de VISTA ont quasi-simultanément repéré cette même source à diverses longueurs d'onde infrarouges. A mesure que les régions occidentales du globe plongeaient dans l'obscurité, les télescopes hawaïens Pan-STARRS et Subaru l'ont à leur tour repérée et regardée évoluer rapidement.

“Rares sont les occasions pour un scientifique d’assister aux débuts d’une nouvelle ère”, précise Elena Pian, astronome à l'INAF, Italie, et auteur principal de l'un des articles parus au sein de la revue Nature. *“En voici une !”*

L'ESO a lancé l'une des plus importantes campagnes d'observations qui soit et de nombreux télescopes de l'ESO et de partenaires de l'ESO ont suivi l'objet, des semaines durant après sa détection [2]. Le VLT (Very Large Telescope), le NTT (New Technology Telescope), le VST de l'ESO, le télescope MPG/ESO de 2,2 mètres et ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) [3] ont tous observé l'événement ainsi que ses conséquences sur une vaste gamme de longueurs d'onde. Quelques 70 observatoires disséminés dans le monde entier ont également observé cet événement, tel le Télescope Spatial Hubble du consortium NASA/ESA.

Les estimations de distance déduites des données concernant les ondes gravitationnelles ainsi que d'autres observations confirment la même distance à la Terre pour GW170817 et NGC 4993 – soit environ 130 millions d'années-lumière. Cette source constitue donc la source d'ondes gravitationnelles ainsi que l'une des sources de sursaut gamma les plus proches détectées à ce jour [4].

Les oscillations de l'espace-temps baptisées ondes gravitationnelles résultent de masses en mouvement. Seules les plus intenses, générées par de brusques variations de vitesse d'objets très massifs, peuvent à l'heure actuelle être détectées. Parmi ces événements figure la fusion d'étoiles à neutrons, les noyaux extrêmement denses et effondrés d'étoiles de masse élevée ayant achevé leur existence en supernovae [5]. Ces fusions sont vraisemblablement à l'origine des sursauts gamma courts. Un événement de nature explosive et de luminosité 1000 fois supérieure à celle d'une nova classique – baptisé kilonova – est en effet attendu à la suite de ce type d'événement.

Les détections quasi-simultanées d'ondes gravitationnelles et de rayons gamma en provenance de GW170817 invitent à penser que cet objet consistait vraisemblablement en une kilonova – longtemps recherchée mais encore indétectée. Les observations effectuées au moyen des installations de l'ESO ont effectivement révélé des propriétés remarquablement proches des prévisions théoriques. L'existence des kilonovae a été suggérée voici plus de trente ans. Mais il s'agit là de leur toute première détection. Suite à la fusion des deux étoiles à neutrons, un jet d'éléments chimiques lourds radioactifs en expansion rapide a quitté la kilonova, à une vitesse proche du cinquième de la vitesse de la lumière. Durant les jours qui suivirent, la couleur de la kilonova est passée du bleu profond au rouge intense. Ce changement s'est effectué en un temps bien plus court que celui caractérisant toute autre explosion stellaire connue.

“Lorsque le spectre est apparu sur nos écrans, j’ai compris qu’il s’agissait de l’événement transitoire le plus étrange qu’il m’ait été donné de voir”, précise Stephen Smartt, qui conduisit les observations au moyen du NTT de l'ESO dans le cadre du programme d'observations étendu baptisé Sondage Spectroscopique Public d'Objets Transitoires de l'ESO (ePESSTO). *“Je n’avais jamais rien vu de tel. Nos données, combinées à celles acquises par d’autres équipes, démontraient sans ambiguïté aucune qu’il ne s’agissait pas d’une explosion de supernova ni d’une quelconque étoile variable située au premier plan, mais bel et bien d’un objet tout à fait singulier.”*

Les spectres acquis dans le cadre du programme ePESSTO ainsi qu'au moyen de l'instrument X-shooter installé sur le VLT suggèrent la présence de césium et de tellure issus de la fusion des étoiles à neutrons. Ces éléments lourds, ainsi que d'autres, produits lors de la fusion d'étoiles à neutrons, auraient été disséminés dans l'espace lors de la phase kilonova. Ces observations suggèrent la formation, au sein

d'objets stellaires de densité élevée, d'éléments plus lourds que le fer produit lors de réactions nucléaires. Ce processus de nucléosynthèse de type r était jusqu'à présent demeuré purement théorique.

“Les données observationnelles dont nous disposons à ce jour sont étonnamment proches de la théorie. Ce résultat est tout à la gloire des théoriciens. Il confirme la réalité des événements observés par LIGO-Virgo et couronne la performance réalisée par l'ESO – avoir rassemblé un si vaste ensemble de données relatives à la kilonova”, ajoute Stefano Covino, auteur principal de l'un des articles parus au sein de la revue Nature Astronomy.

“La grande force de l'ESO réside dans le fait de disposer d'une gamme étendue de télescopes et d'instruments mis à disposition des projets astronomiques les plus ambitieux et les plus complexes. Nous sommes entrés dans une nouvelle ère de l'astronomie multimessagers!” conclut Andrew Lean, auteur principal de l'une des publications scientifiques.

Notes

[1] Le réseau LIGO-Virgo a localisé la source dans une zone du ciel de quelque 35 degrés carrés de superficie.

[2] La galaxie ne pouvait être observée qu'en soirée au mois d'août. En septembre, elle se trouvait à trop grande proximité du Soleil pour être observable.

[3] Sur le VLT, les observations furent menées au moyen des instruments suivants : le spectrographe X-shooter installé sur l'Unité Téléscopique 2 (UT2), FORS2 (FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph 2) et NACO (Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS) – Near-Infrared Imager and Spectrograph (CONICA)) installés sur l'Unité Téléscopique 1 (UT1) ; VIMOS (VISible Multi-Object Spectrograph) et VISIR (VLT Imager and Spectrometer for mid-Infrared) situés sur l'Unité Téléscopique 3 (UT3) ; MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer) et HAWK-1 (High Acuity Wide-field K-band Imager) sur l'Unité Téléscopique 4 (UT4). Le VST a effectué ses observations grâce à OmegaCAM et VISTA grâce à VIRCAM (VISTA InfraRed CAMera). Dans le cadre du programme ePESSTO, le NTT a collecté des spectres dans le visible au moyen du spectrographe EFOSC2 (ESO Faint Object Spectrograph and Camera 2) et des spectres dans l'infrarouge au moyen du spectrographe SOFI (Son of ISAAC). Le télescope MPG/ESO de 2,2 mètres a effectué ses observations au moyen de l'instrument GROND (Gamma-Ray burst Optical/Near-infrared Detector).

[4] Les observations ont été rendues possibles par la relativement faible distance – 130 millions d'années-lumière – séparant la Terre des étoiles à neutrons qui ont fusionné. La fusion d'étoiles à neutrons génère des ondes gravitationnelles de moindre intensité en effet que la fusion de trous noirs, vraisemblablement à l'origine des quatre premières détections d'ondes gravitationnelles.

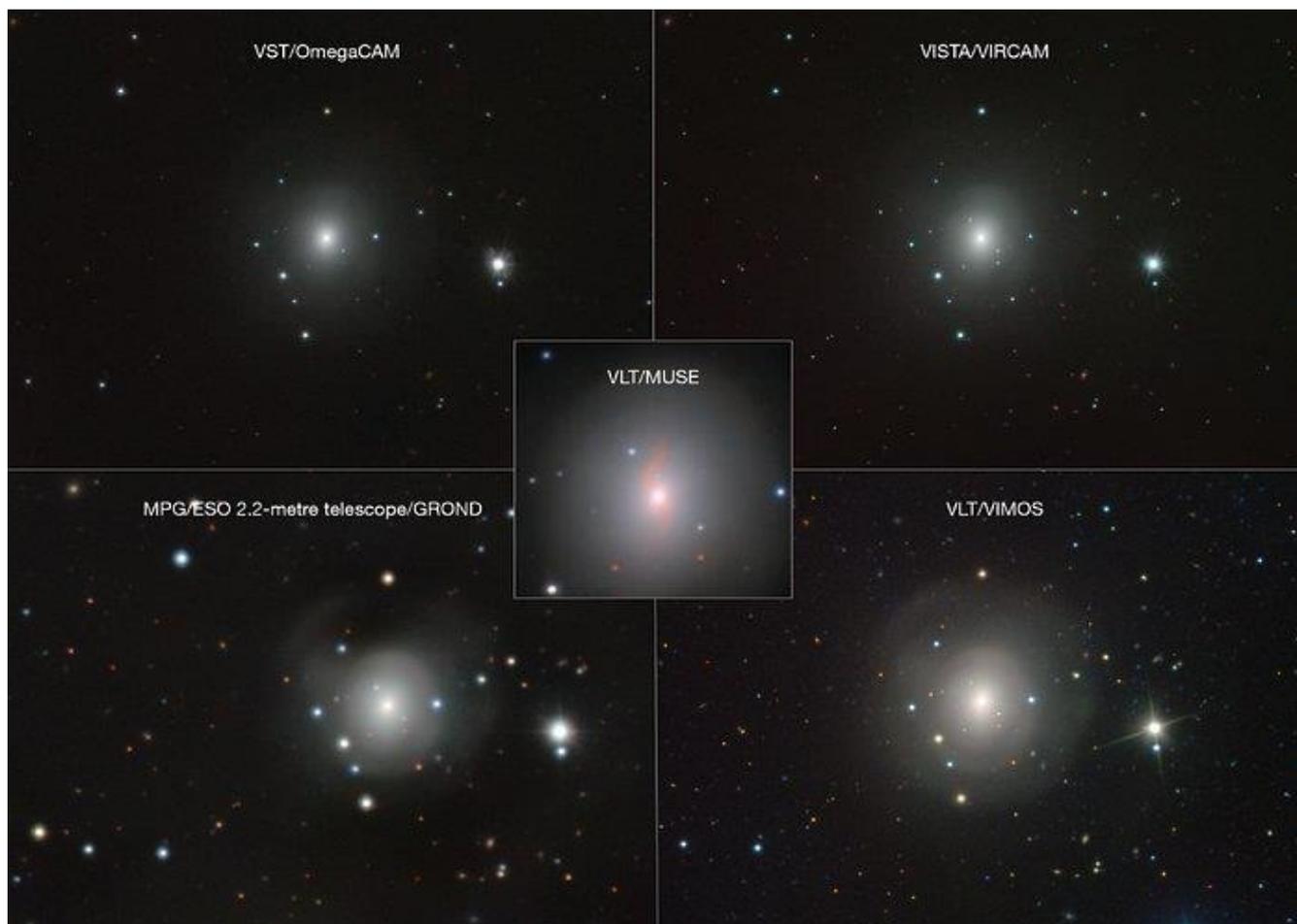
[5] Lorsque les étoiles à neutrons orbitent l'une autour de l'autre dans un système binaire, elles perdent de l'énergie en émettant des ondes gravitationnelles. Elles se rapprochent l'une de l'autre jusqu'à atteindre l'ultime point de rencontre. Une fraction de la masse des restes stellaires se trouve alors convertie en énergie et donne lieu à un violent sursaut d'ondes gravitationnelles, suivant la célèbre équation d'Einstein : $E = mc^2$.

Image de la galaxie NGC 4993 acquise par VIMOS, sur laquelle figure la contrepartie visible d'une paire d'étoiles à neutrons en cours de fusion



Sur cette image acquise par l'instrument VIMOS qui équipe le Very Large Telescope de l'ESO à l'Observatoire Paranal au Chili figure la galaxie NGC 4993, située à quelque 130 millions d'années-lumière de la Terre. Bien que relativement classique, cette galaxie renferme un objet encore non observé : les restes de l'explosion d'une paire d'étoiles à neutrons en cours de fusion, un événement exceptionnel baptisé kilonova (légèrement en haut à gauche de la galaxie). La fusion a également donné lieu à l'émission d'ondes gravitationnelles et de rayons gamma, détectés par LIGO-Virgo et Fermi/INTEGRAL respectivement.

Ensemble d'images de NGC 4993 et de la kilonova acquises par les télescopes de l'ESO



Sur cette composition figurent des images de la galaxie NGC 4993 acquises par différents télescopes de l'ESO et instruments associés. Toutes montrent une faible source de lumière à proximité du centre. Il s'agit d'une kilonova, l'explosion résultant de la fusion de deux étoiles à neutrons. Cette fusion a donné lieu à l'émission d'ondes gravitationnelles détectées par LIGO-Virgo ainsi que de rayons gamma détectés par Fermi et INTEGRAL dans l'espace.

Image de la galaxie NGC 4993 et de la kilonova associée acquise par VLT/MUSE

Sur l'image suivante acquise par l'instrument MUSE qui équipe le Very Large Telescope de l'ESO à l'Observatoire Paranal au Chili figure la galaxie NGC 4993 située à quelque 130 millions d'années-lumière de la Terre. Bien que relativement classique, cette galaxie renferme un objet encore non observé : les restes de l'explosion d'une paire d'étoiles à neutrons en cours de fusion, un événement exceptionnel baptisé kilonova (légèrement en haut à gauche de la galaxie). La fusion a également donné lieu à l'émission d'ondes gravitationnelles et de rayons gamma, détectés par LIGO-Virgo et Fermi/INTEGRAL respectivement. En obtenant le spectre de chacune des parties de l'objet, MUSE a permis de mettre en évidence la présence de gaz lumineux, qui apparaît ici en rouge et doté d'une surprenante structure spirale.



Mosaïque d'images de NGC 4993 acquises par VISTA et montrant l'évolution de la kilonova



Cette mosaïque d'images révèle la brillance de la kilonova au sein de NGC 4993, son rougeolement progressif ainsi que la baisse de luminosité durant les semaines suivant son explosion, le 17 août 2017. Ces images ont été obtenues par le télescope de sondage infrarouge VISTA à l'Observatoire Paranal de l'ESO au Chili.