

L'ASTRONOMIE MULTIMESSAGER

Pierre-Alexandre Duverne, post doctorant au laboratoire APC
(AstroParticules et cosmologie)

Observer l'Univers sous toutes ses coutures

Si la mention de l'astronomie évoque plutôt des images de galaxies prises par des instruments tels que le télescope spatial Hubble, l'étude de l'Univers s'est considérablement enrichie ces dernières décennies. En effet, il y a désormais quatre « messagers » différents permettant d'observer le ciel sous toutes ses coutures. Les photons, les particules de lumière, sont la méthode la plus usuelle de le faire, et ceci sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Ainsi, les observations se font des très énergétiques rayons gamma et X, émis lors des événements astrophysiques les plus extrêmes comme les supernovae, à la lumière visible et aux ondes radio émises par les noyaux actifs de galaxies. Au début du xx^e siècle, des particules chargées, appelées rayons cosmiques, ont fait leur apparition dans le paysage de l'astronomie. Ces rayons cosmiques sont généralement des protons, ou des noyaux d'atomes légers comme l'hélium, et sont émis par diverses sources telles que le Soleil ou les noyaux actifs de galaxies. Dans les années 1930, lors du développement de la mécanique quantique, l'existence des neutrinos a été prédite et ces derniers ont été découverts en 1956. Ce sont des particules élémentaires, très légères et n'interagissant que très peu avec la matière ordinaire, les rendant particulièrement difficiles à étudier, et qui sont produits lors de réactions nucléaires. Finalement, les dernières arrivées ont été les ondes gravitationnelles, détectées pour la première fois en 2015, cent ans après leur prédiction par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Ce sont des déformations infimes de l'espace-temps produites lors d'événements violents tels que la fusion de deux trous noirs, comme lors de leur première détection en 2015.

Chaque messager est d'une nature fondamentalement différente des trois autres et interagit d'une manière spécifique avec son environnement, offrant des outils spécifiques pour sonder l'Univers. Ainsi, il est possible de combiner ces différents messagers lorsqu'ils sont émis par la même source pour avoir une vision plus complète de certains événements astrophysiques, et c'est ce qui constitue la base de l'astronomie multimessager. Cette branche de l'astronomie est récente et a vraiment pris de l'ampleur ces dernières années à la faveur d'un événement astrophysique majeur, elle est actuellement un domaine de recherche particulièrement actif.

Les événements multimessager SN1987A et GW170817

La première observation en astronomie multimessager remonte à 1987, lorsqu'une étoile située dans le Grand Nuage de Magellan, une des galaxies satellites de la Voie lactée, a explosé en une supernova nommée SN1987A. Ces explosions marquent la fin de vie d'étoiles massives lorsque les réactions nucléaires à l'intérieur de l'étoile ne produisent plus assez d'énergie pour empêcher qu'elle s'effondre sous son propre poids.

La supernova SN1987A a d'abord été détectée par des télescopes optiques et en parallèle, trois détecteurs de neutrinos – Kamiokande au Japon, IMB aux États-Unis et Baksan Neutrino Observatory en Russie – ont détecté une bouffée de neutrinos émis en très grande quantité quelques heures avant l'explosion.

Si cet événement a marqué l'histoire de l'astrophysique, c'est en grande partie grâce à sa relative proximité à l'échelle de l'Univers. Bien que les supernovae soient fréquentes dans l'Univers – plusieurs étant découvertes chaque semaine – la détection de neutrinos n'est possible que si l'explosion se produit dans notre galaxie ou dans son voisinage immédiat. On estime qu'une supernova ne se produit qu'une à deux fois par siècle dans la Voie lactée, ce qui limite fortement les opportunités d'observation d'une supernova en coïncidence avec des neutrinos. Malgré la rareté des supernovae dont l'émission de neutrinos est détectable, l'importance de cette découverte a conduit à la création du programme SNEWS qui permet de coordonner les observatoires neutrinos afin qu'ils puissent alerter tout le monde au cas où ils détecteraient un signal associable à une supernova.

Un tournant majeur a eu lieu à l'été 2017. Un peu plus de cent millions d'années auparavant, après une longue phase d'évolution orbitale, deux étoiles à neutrons – les vestiges d'étoiles massives – ont fini par fusionner en émettant une onde gravitationnelle. Celle-ci a traversé l'espace pour être détectée le 17 août 2017 par les instruments LIGO et Virgo et est connue sous le nom GW170817 (GW étant l'acronyme anglais de *Gravitational Waves*). Cette collision a également donné lieu à deux autres phénomènes. D'une part, elle a produit un jet étroit et symétrique de matière émettant des bouffées de rayons gamma, appelé sursaut gamma, détecté sur Terre environ deux secondes après les ondes gravitationnelles

par les satellites Fermi et INTEGRAL. D'autre part, une partie de la matière des étoiles à neutrons a été éjectée sous forme de noyaux atomiques lourds. Rendus instables par la capture de neutrons, ces noyaux se désintègrent et chauffent le milieu environnant. Ce processus engendre une émission lumineuse d'abord bleutée durant les deux à trois premiers jours, puis plus rouge à mesure que le milieu se refroidit. Ce phénomène, appelé kilonova, a été observé environ dix heures après l'arrivée des ondes gravitationnelles grâce au télescope terrestre SWOPE. Cette détection a déclenché une vaste campagne d'observation astronomique qui a mobilisé un nombre très important d'instruments dans le monde entier. Ces différentes observations sont présentées dans la figure 1. Pendant plusieurs semaines, la communauté scientifique s'est mobilisée intensément, produisant une quantité exceptionnelle de résultats, couvrant de très nombreux sujets allant du comportement de la matière dense à l'estimation du taux d'expansion de l'Univers.

Les événements SN1987A et GW170817 constituent les deux jalons fondateurs de l'astronomie multimessager, et plus largement de l'astrophysique moderne. Ces observations ont profondément transformé notre manière d'étudier les phénomènes astrophysiques, en montrant la puissance d'une approche combinant différents messagers. Elles ont motivé un effort de recherche considérable, particulièrement intensifié ces dernières années à la suite de GW170817, avec le développement d'instruments, de réseaux d'alerte et de stratégies d'observation dédiés à l'astronomie multimessager.

Pour la suite de cet article, nous allons nous concentrer sur les observations multimessagers centrées sur les ondes gravitationnelles.

Le paysage multimessager actuel

Depuis la détection de GW170817 en 2017, le paysage de l'astronomie multimessager a connu des développements importants permettant au domaine de se structurer, portés par plusieurs communautés et instruments complémentaires. Du côté des ondes gravitationnelles, la collaboration LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) opère des campagnes d'observation longues et de plus en plus sensibles : après les campagnes O1 en 2015 et O2 en 2017 qui ont permis respectivement la première détection d'ondes gravitationnelles et l'observation multimessager de GW170817, O3 s'est déroulée entre avril 2019 et mars 2020, suivie de O4 de mai 2023 à novembre 2025. Un système d'alertes en temps réel a été mis en place, permettant aux autres communautés – neutrinos, gamma et optique – de déclencher des observations de suivi afin de rechercher des contreparties électromagnétiques ou des neutrinos aux candidats d'ondes gravitationnelles.

Dans le domaine de l'astronomie gamma, des satellites comme Fermi et Swift jouent un rôle central dans la détection de sursauts gamma potentiellement associés aux événements gravitationnels. Plus récemment, le satellite SVOM, fruit d'une collaboration franco-chinoise et lancé en juin 2024, a rejoint cet effort et a contribué aux recherches de contreparties durant la fin de la campagne O4.

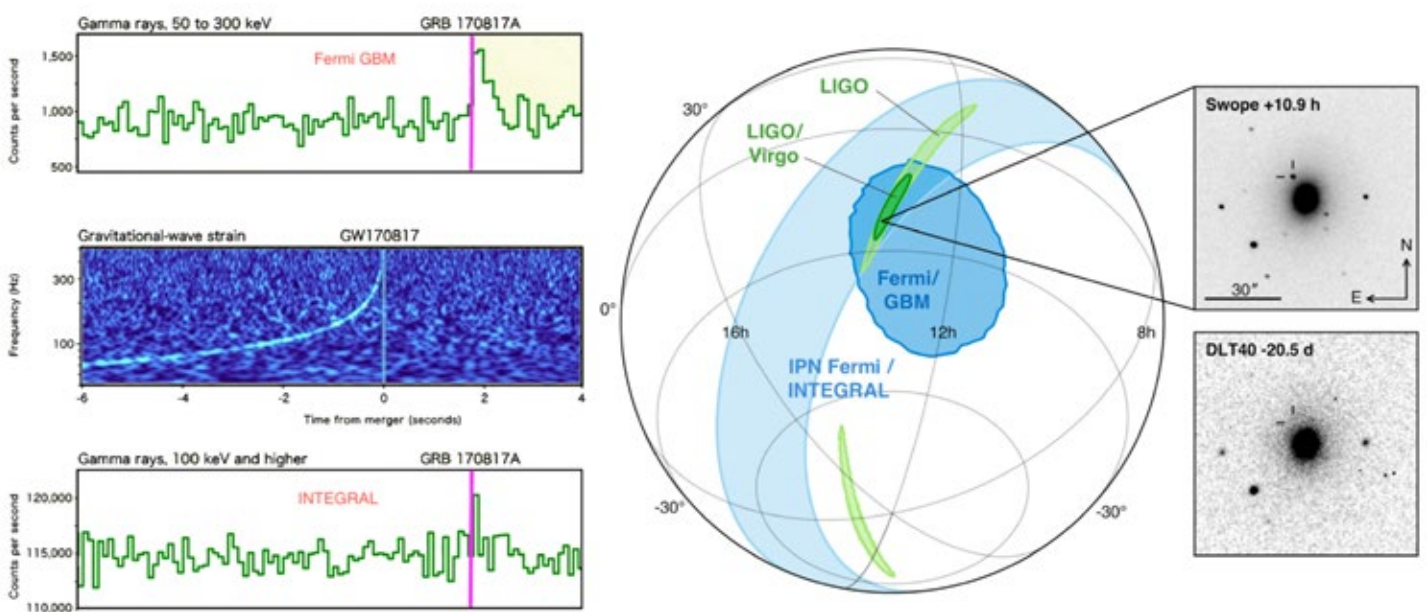


Fig.1. À droite, les localisations de la source de ces signaux, obtenues par les différents instruments : en bleu foncé FERMI, en vert pâle, celle des deux détecteurs LIGO, et en vert foncé la meilleure localisation de l'onde gravitationnelle obtenue en ajoutant les données de Virgo. Tout à droite, les images des télescopes SWOPE et DLT40 qui ont détecté la kilonova. La grosse tâche centrale correspond au noyau de la galaxie NGC 4993 abritant la kilonova, laquelle correspond au point mis en évidence par une mire un peu au-dessus à gauche du noyau de la galaxie. [Crédit : LIGO, Virgo, Fermi, Swope, DLT40. Figure tirée de l'article Gamma-Ray Astrophysics, De Angelis et al. <https://arxiv.org/abs/1805.05642>].

Du côté optique, des réseaux tels que GRANDMA de petits instruments ont émergé afin de mutualiser les ressources de nombreux télescopes et d'optimiser les stratégies de suivi lors des alertes émises par LVK. Parallèlement, des avancées majeures ont eu lieu avec le développement d'instruments à grand champ capables de couvrir rapidement de vastes régions du ciel. En particulier, le Vera C. Rubin Observatory, équipé d'un miroir de près de 9 mètres et d'un champ de vue d'environ 10 degrés carrés, représente une avancée déterminante dans ce domaine. Bien qu'il n'ait commencé ses observations qu'à la toute fin de la campagne O4, il est appelé à devenir un acteur majeur de l'astronomie multimessager lors des prochaines campagnes, en permettant une exploration systématique et rapide du ciel transitoire – le ciel ou les phénomènes observés ont une courte durée de vie, typiquement un mois pour une supernova ou une semaine pour une kilonova.

Organiser une campagne de suivi multimessager

Lors d'une campagne d'observation de la collaboration LVK, les données sont analysées en temps réel. Lorsqu'un signal candidat est identifié, une estimation rapide de sa position sur le ciel est produite sous la forme d'une carte du ciel. Cette information est ensuite diffusée automatiquement via différents canaux d'alerte, en particulier le *Gamma-ray Coordinates Network* (GCN), utilisé depuis plusieurs décennies pour partager des alertes astrophysiques entre communautés. L'information centrale transmise qui guide les observations de suivi est la carte de localisation et l'objectif est alors d'identifier une contrepartie électromagnétique en observant cette région du ciel. La principale difficulté réside dans la grande taille des zones de localisation, qui peuvent couvrir plusieurs centaines de degrés carrés, nécessitant une mobilisation importante de ressources observationnelles, principalement du temps d'observation qui est limité et particulièrement précieux pour les plus grands instruments.

Dans le domaine gamma, des satellites comme Fermi, Swift et SVOM disposent de champs de vue très larges, leur permettant de surveiller en continu une grande fraction du ciel. Étant donné que l'émission la plus précoce attendue est souvent un sursaut gamma, les équipes vérifient si un tel signal a été détecté en coïncidence temporelle avec l'événement gravitationnel.

Du côté optique, la grande taille des cartes de localisation produites par LIGO-Virgo est beaucoup plus problématique et deux types d'approches ont été mises en place afin de trouver la source du signal gravitationnel. La première est utilisée par des télescopes ayant un champ de vue d'au moins un degré carré et consiste

simplement à prendre des images couvrant la plus grande partie possible de la carte LVK, puis on regarde si un objet est apparu dans l'une des images en comparant avec les objets déjà observés et catalogués. C'est la technique utilisée en général pour les télescopes comme le Vera C. Rubin Observatory qui peuvent ainsi balayer de larges portions de la carte de localisation.

La seconde technique est faite pour exploiter les instruments ayant un petit champ de vue, typiquement inférieur au degré carré. Elle consiste à cibler les galaxies connues situées dans la région de localisation, en supposant que la source de l'événement s'y trouve. On liste toutes les galaxies connues qui tombent dans la carte de localisation et elles sont observées individuellement pour détecter l'émergence d'une nouvelle source. Les deux approches sont illustrées dans la figure 2 (page suivante).

Si un ou des candidats crédibles pour être la source de l'onde gravitationnelle sont identifiés dans les images prises par l'une ou l'autre des techniques de suivi, alors une nouvelle alerte est diffusée afin de coordonner des observations de suivi avec d'autres instruments. Si la contrepartie est confirmée, elle est ensuite suivie aussi longtemps que possible pour en caractériser l'évolution temporelle.

En complément de ces suivis rapides, il existe également des recherches de coïncidences réalisées a posteriori entre les événements détectés par différentes expériences. Contrairement aux campagnes de suivi en temps réel, ces analyses ne sont pas contraintes par l'urgence observationnelle. Elles consistent à croiser des catalogues d'événements – issus par exemple des détecteurs d'ondes gravitationnelles, des observatoires de sursauts gamma ou des détecteurs de neutrinos – afin d'identifier des signaux pouvant provenir d'une même source astrophysique. Ce type d'approche permet d'explorer des associations plus faibles ou plus complexes, qui n'auraient pas été identifiées immédiatement, et constitue un complément essentiel aux observations multimessager en temps réel.

L'astronomie multimessager depuis 2017

Depuis l'événement fondateur GW170817, aucune nouvelle détection multimessager confirmée associant ondes gravitationnelles et contrepartie électromagnétique n'a été réalisée. Plusieurs éléments permettent d'expliquer cette absence de nouvelle détection. Du côté des détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO, Virgo et KAGRA, les campagnes récentes ont mené à la détection de plusieurs centaines de fusions de trous noirs, faisant de l'astronomie gravitationnelle un domaine particulièrement dynamique. Cependant, ces événements ne produisent

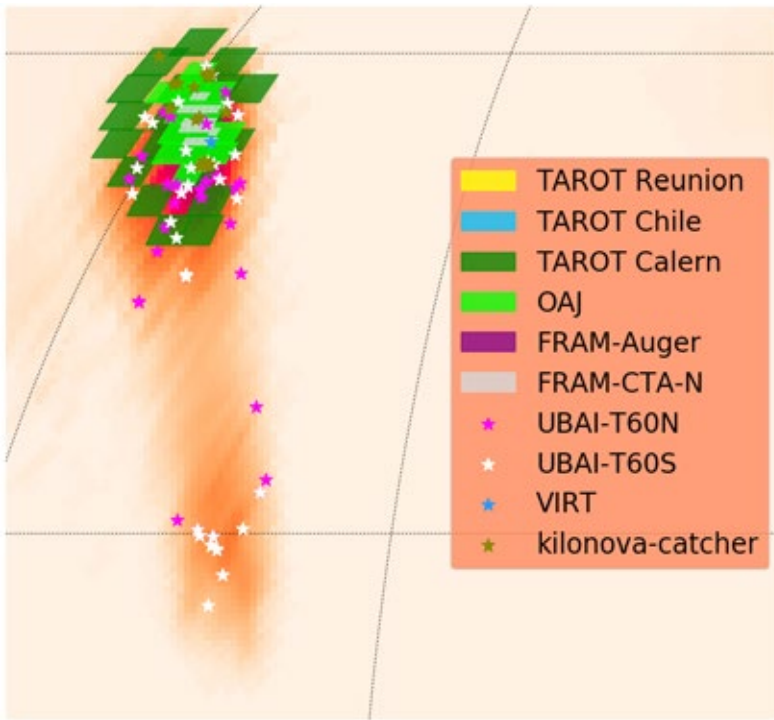


Fig.2. Un exemple de campagne de suivi faite avec le réseau de télescopes GRANDMA. La surface orange correspond à la localisation probable fournie par LIGO et Virgo pour un signal candidat pouvant être une onde gravitationnelle, détecté pendant la campagne O3. Les rectangles correspondent à des images prises par des télescopes à grand champ de vue, selon la première technique pour rechercher une kilonova associée à une onde gravitationnelle décrite dans le paragraphe 4. Les étoiles correspondent à des observations de galaxies faites par des instruments avec un champ de vue plus petit, en utilisant la seconde approche décrite dans le paragraphe 4. La légende décrit les noms de télescopes qui ont pris les différentes images. On peut noter que Kilonova Catcher est le nom de la branche de GRANDMA qui inclut des astronomes amateurs et amatrices qui ont ainsi pu contribuer au suivi des alertes pendant la campagne O3. [Crédit : Collaboration GRANDMA. Figure tirée de l'article GRANDMA Observations of Advanced LIGO's and Advanced Virgo's Third Observational Campaign, Antier et al. <https://arxiv.org/abs/2004.04277>].

pas d'émission électromagnétique détectable puisqu'il n'y a pas de matière le permettant. Lors de la campagne O3, une seule fusion d'étoiles à neutrons – les sources les plus favorables à une détection multimessenger si on se base sur l'événement GW170817 – a été observée, et aucune lors de la campagne O4. Ce faible taux de fusion d'étoiles à neutrons rend ainsi les potentielles observations multimessenger particulièrement rares.

Du côté électromagnétique, les kilonovae associées à ces événements sont intrinsèquement difficiles à détecter : elles sont relativement peu lumineuses et évoluent très rapidement, offrant une fenêtre d'observation de l'ordre d'un à deux jours seulement pour les instruments actuels. À ces contraintes physiques s'ajoutent des défis organi-

60 sationnels et techniques majeurs. L'astronomie multimessenger repose en effet sur la coordination de nombreux instruments aux caractéristiques très hétérogènes – interféromètres comme LIGO et Virgo, satellites gamma, télescopes optiques au sol et parfois détecteurs de neutrinos. Cela implique de gérer des alertes en temps réel, des stratégies d'observation complexes, des contraintes de visibilité du ciel et des priorités scientifiques concurrentes. La taille importante des régions de localisation, les délais de réaction et la nécessité de mobiliser rapidement des ressources distribuées à l'échelle mondiale rendent ces campagnes particulièrement exigeantes.

Quelques perspectives pour le futur de l'astronomie multimessenger

Les perspectives pour l'astronomie multimessenger dans la prochaine décennie sont néanmoins très prometteuses. Du côté des détecteurs au sol, la future génération d'interféromètres comme Einstein Telescope offrira une sensibilité bien supérieure à celle des instruments LIGO, Virgo et KAGRA, augmentant significativement le volume d'Univers accessible et donc le nombre de sources détectées, en particulier les fusions d'étoiles à neutrons.

D'autre part, la mission spatiale LISA ouvrira une nouvelle fenêtre en détectant des ondes gravitationnelles à basse fréquence, complémentaires de celles observées par LIGO, Virgo et KAGRA ou Einstein Telescope. Elle sera notamment sensible aux fusions de trous noirs supermassifs, dont l'environnement riche en gaz et en poussières est susceptible de produire des émissions électromagnétiques détectables. Cette complémentarité entre nouvelles générations de détecteurs gravitationnels et instruments électromagnétiques laisse entrevoir une augmentation significative des détections multimessenger, rendant les perspectives particulièrement enthousiasmantes pour les années à venir. ■

Errata, Oh !

Dans le CC 193 page 17, sous la figure 3 aux lignes 3 et 6, est apparu lors de la mise en pages, un signe vectoriel sur V_e et V_{emax} . Ce signe n'a évidemment aucune raison d'être.