

Ondes gravitationnelles : un nouvel âge d'or pour l'astronomie

15.01.2024, par [Mathieu Grousson](#)

Vue d'artiste des distorsions de l'espace-temps qu'induit le passage d'ondes gravitationnelles générées par un trou noir binaire supermassif.

© Aurore Simonnet / NANOGrav

Moins d'une décennie après son avènement, l'astronomie gravitationnelle renouvelle toutes les sciences du ciel. Plusieurs projets d'observatoires promettent de révéler le cosmos tel qu'on ne l'a jamais vu.

Depuis mai dernier, une partie des détecteurs de la collaboration Ligo-Virgo-Kagra sont à nouveau à l'écoute du cosmos, enregistrant trois à quatre « événements » par semaine. Fusions impliquant des trous noirs, des étoiles à neutrons... la campagne d'observation n'est pas terminée. Mais il est probable qu'au total, environ deux cents détections viennent enrichir l'inventaire des découvertes de la toute jeune astronomie gravitationnelle. Toute jeune, mais déjà mature, un peu plus de huit ans après [la première observation de la coalescence de deux trous noirs](#) [7], révélée par l'enregistrement des vibrations de l'espace-temps résultant de ce cataclysme cosmique. Alors même qu'en 2015, l'existence des ondes gravitationnelles prédites par la relativité générale n'avait encore reçu aucune preuve directe !



Le bras ouest de l'interféromètre Virgo, situé à Cascina, en Italie, mesure 3 km de long.

© Cyril Fréssillon / Virgo / CNRS Images

« Nous sommes comme Galilée lorsque, tournant sa lunette vers le ciel, il a découvert un nouveau monde et ouvert une nouvelle fenêtre sur l'Univers », s'enthousiasme Patrice Verdier, à l'Institut de physique des deux infinis de Lyon¹ et responsable France du projet Einstein Telescope. Évolution stellaire, astrophysique galactique, tests de la relativité générale, physique des astres denses et de la matière extrême, cosmologie primordiale : les ondes gravitationnelles bouleversent déjà nos connaissances dans chacune des disciplines intéressées par les mystères du cosmos. Et de l'amélioration des infrastructures existantes aux projets de détecteurs géants en passant par la diversification des techniques de détection, ceci n'est qu'un début.

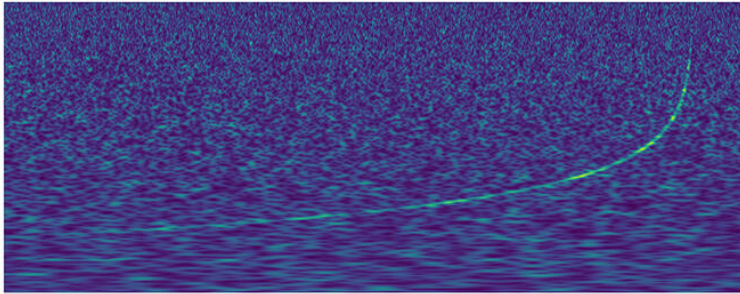
Des ondes longtemps insaisissables

Longtemps, les ondes gravitationnelles ont pourtant semblé inaccessibles. Et pour cause : pour observer le signal produit par la fusion de deux trous noirs de quelques masses solaires, il faut pouvoir mesurer des vibrations de l'espace correspondant à des variations de longueur 10 000 fois plus petites que la taille d'un proton ! Pour vaincre le scepticisme alors majoritaire quant à la faisabilité d'un tel projet, il aura fallu toute la ténacité de quelques physiciens, dont [Alain Brillet, Médaille d'or du CNRS en 2017](#) [10] et père de l'interféromètre gravitationnel européen Virgo.

Depuis 2015, c'est une succession de découvertes et de révolutions.

Son principe, comme celui de son alter ego américain Ligo : un puissant laser dont la lumière, séparée en deux faisceaux, réalise plusieurs allers-retours dans les deux bras perpendiculaires et longs de plusieurs kilomètres de l'infrastructure, avant de se croiser.

Au passage d'une onde gravitationnelle, un bras s'allonge et l'autre rétrécit, certes de manière infinitésimale, mais suffisamment pour que la différence soit détectable dans le signal issu de la recombinaison des deux faisceaux.



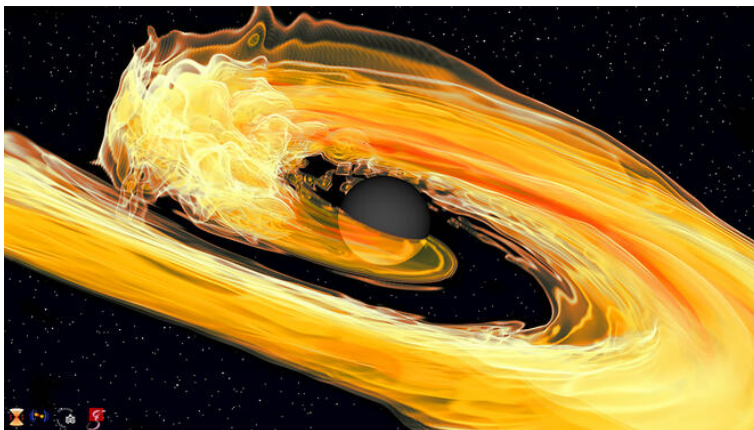
Ce spectrogramme, qui combine les signaux des détecteurs Ligo américains, « montre » la production d'ondes gravitationnelles de plus haute fréquence (ligne verte) lorsque deux étoiles à neutrons se rapprochent l'une de l'autre, en tournant de plus en plus vite.

© LSC / Alex Nitz

Au démarrage de Ligo, en 2015, après une phase préparatoire de vingt ans, personne ne peut jurer de rien. Mais avant même le début officiel de la campagne d'observation, [l'interféromètre détecte sa première coalescence](#) [12]. « *C'est arrivé tellement vite que pendant 24 heures, on a cru que c'était un test* », se souvient Frédérique Marion, au Laboratoire d'Annecy de physique des particules² et porte-parole adjointe de la collaboration Virgo. Non seulement la détection est bien réelle, mais de plus, le signal perçu surprend les spécialistes. Correspondant à des trous noirs de 29 et 36 masses solaires, ces derniers sont bien plus massifs qu'attendu pour des astres issus de l'effondrement du cœur d'étoiles. « *Ça a d'abord été l'incrédulité, puis une joie immense, et d'entrée de jeu une remise en cause* », résume Marie-Anne Bizouard, au laboratoire Artemis³.

Naissance de l'astronomie multi-messager

Depuis ce premier run (ou campagne), deux autres ont eu lieu et le quatrième est en cours. À chaque fois, les bonnes surprises ont été au rendez-vous. Lors du deuxième run, en 2016-2017, [les chercheurs ont ainsi observé leur première fusion d'étoiles à neutrons](#) [13], des objets issus de l'effondrement gravitationnel du cœur de certaines étoiles massives. Mieux, comme le décrit Sarah Antier, à l'Observatoire de la Côte d'Azur, « *la contrepartie électromagnétique du signal a pu être observée simultanément, puis ensuite pendant plusieurs jours, à l'aide de plusieurs télescopes en orbite et au sol, et ce sur tout le spectre électromagnétique* », la séquence signant l'acte de naissance de l'astronomie multi-messager avec des ondes gravitationnelles.



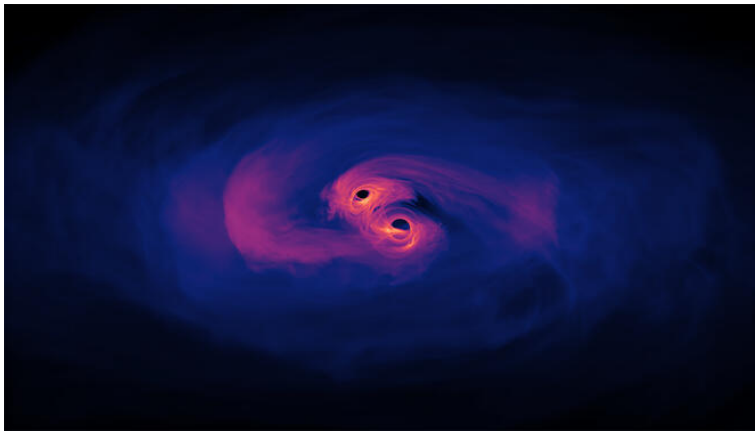
Simulation de la fusion entre une étoile à neutrons et un trou noir. La différence de forces gravitationnelles en jeu déchire peu à peu l'étoile.

© T. Dietrich (Potsdam Univ. et Max Planck Institute for Gravitational Physics), N. Fischer, S. Ossokine, H. Pfeiffer (Max Planck Institute for Gravitational Physics), S.V. Chaurasia (Stockholm Univ.), T. Vu

À la clé, une pluie de résultats : un lien établi entre fusion d'étoiles à neutrons et sursauts gamma courts, soit des bouffées de photons ultra-énergétiques dont l'origine était discutée ; [une nouvelle façon de mesurer de la constante de Hubble](#) [15], relative à l'expansion de l'Univers, via la comparaison de la distance de l'événement, obtenue grâce au signal gravitationnel, et de son décalage vers le rouge, déduit des observations lumineuses ; enfin, une mesure de la vitesse de propagation des ondes gravitationnelles, compatible avec la vitesse de la lumière, qui a permis de contraindre nombre des théories alternatives à la relativité générale ! Quant à la troisième campagne d'observation, menée en 2019, elle a notamment permis d'observer [deux trous noirs stellaires si lourds qu'ils pourraient constituer les progéniteurs des trous noirs supermassifs](#) [16] qui se logent au cœur des galaxies. « *Depuis 2015, c'est simple, c'est une succession de découvertes et de révolutions* », commente Marie-Anne Bizouard.

De l'observation ponctuelle aux statistiques

En même temps, au fur et à mesure des différentes campagnes, la fréquence et donc le nombre des détections n'ont cessé d'augmenter : trois lors de la première, une dizaine avec la deuxième, une petite centaine en ajoutant la troisième et probablement autour de trois cents au terme de la quatrième, à la fin de cette année. Conséquence, « *au-delà des événements singuliers, on observe désormais des amorces de tendances pertinentes sur le plan statistique* », traduit Astrid Lamberts, à l'Observatoire de la Côte d'Azur. De quoi commencer à faire le tri entre différents scénarios et hypothèses dans plusieurs domaines.



Simulation de la lumière émise par un système binaire de trous noirs supermassifs, où le gaz environnant est optiquement mince (transparent).

© Nasa, Goddard Space Flight Center / Scott Noble (simulation data d'Ascoli et al. 2018)

C'est notamment le cas en astrophysique stellaire où les propriétés des trous noirs observés permettent de clarifier ce que l'on sait du cycle de vie des étoiles qui en sont à l'origine. Ainsi, le constat de trous noirs étonnamment massifs a permis de montrer que contrairement à ce qui est observé dans notre galaxie, de très nombreuses étoiles naissent et évoluent dans un environnement de très faible métallicité, c'est-à-dire très peu enrichi en éléments lourds. « *Plus la métallicité d'une étoile est faible, moins ses vents solaires sont importants et plus le trou noir résultant de l'effondrement du cœur sera massif* », décrypte Marie-Anne Bizouard.

Quant aux statistiques de rotation des trous noirs, elles sont un marqueur de l'évolution stellaire pour laquelle il existe au moins deux scénarios : soit les étoiles naissent et évoluent en couple qui finit par se muer en binaire de trous noirs ; soit elles apparaissent seules dans des amas d'environ un million d'étoiles, au sein desquels les interactions gravitationnelles empêchent d'abord la formation de paires, les binaires ne se formant qu'une fois que chaque élément de la paire a fini son évolution sous la forme d'un trou noir. « *Ces scénarios ont longtemps été en compétition*, explique Astrid Lamberts. *Or les données montrent que les deux sont possibles, sans que l'on sache encore lequel domine l'autre.* »

De plus en plus d'instruments de plus en plus sensibles

Ces résultats sont le fruit d'une augmentation constante de la sensibilité des détecteurs. Suspension et état de surface des miroirs, lumière laser, environnement... tout est bon pour réduire le bruit, qu'il soit d'origine sismique ou lié à la nature quantique de la lumière.

Nous assistons à l'éclosion d'un écosystème mondial d'observatoires d'ondes gravitationnelles, techniquement robuste et scientifiquement prometteur.

« *C'est aussi une somme de petites choses, mais à chaque fois très complexes et très difficiles à réaliser*, pointe Frédérique Marion. *Et ce n'est jamais terminé car nos exigences ne font que croître !* » Ainsi, la prise de données envisagée pour 2027-2028 bénéficiera notamment de miroirs plus grands, au substrat plus lourd, et élaborés selon de nouvelles techniques de dépôt en couches minces qui permettront de réduire drastiquement le bruit thermique.

Au-delà, les collaborations Virgo et Ligo se projettent déjà dans des versions dites respectivement « nEXT » et « A# » des interféromètres, non encore actées, mais selon une logique « *d'aller aux limites de ce que permettent les infrastructures existantes* », anticipe Frédérique Marion. À quoi s'ajoutent la montée en puissance de l'interféromètre japonais Kagra, qui a contribué marginalement à la sensibilité du début des observations en cours, et la mise sur les rails de Ligo-India dont la construction a récemment commencé. « *Nous assistons à l'éclosion d'un écosystème mondial d'observatoires d'ondes gravitationnelles, techniquement robuste et scientifiquement prometteur* », analyse Marie-Anne Bizouard. Celui-ci va monter en puissance au cours du siècle, avec en ligne de mire l'après Ligo-Virgo, à l'horizon 2040.

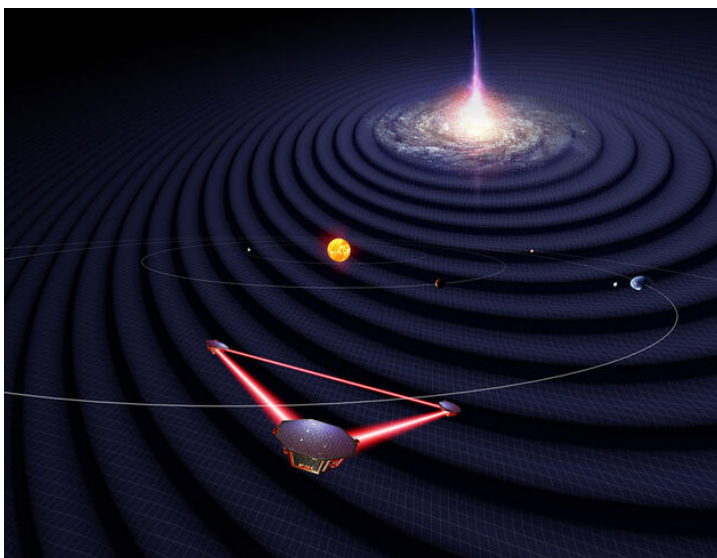


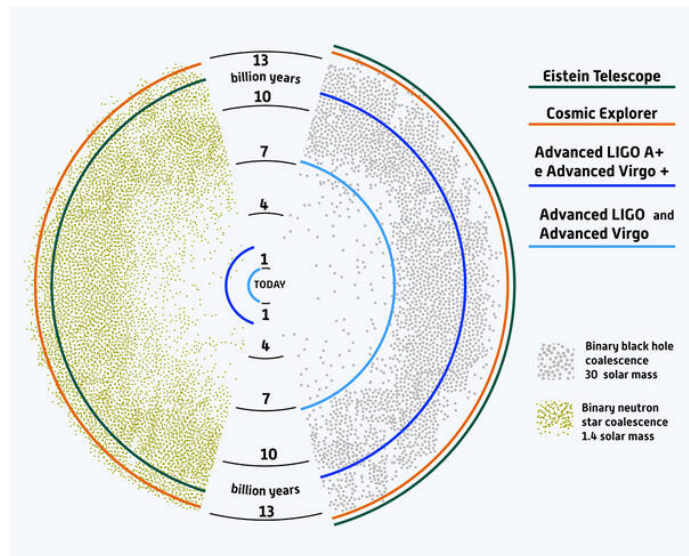
Illustration de l'interféromètre Lisa avec ses « bras » constitués par trois satellites positionnés aux sommets d'un triangle équilatéral de 2,5 millions de km de côté et reliés deux à deux par des faisceaux laser.

© University of Florida / Simon Barke (CC BY 4.0)

Et ce n'est pas tout puisque l'Agence spatiale européenne (ESA) doit rendre cette année sa décision au sujet du projet d'interféromètre spatial Lisa, dont le décollage est envisagé pour 2035. Composé de trois satellites placés à plusieurs millions de kilomètres les uns des autres pour former un instrument gigantesque, il offrira un accès aux ondes gravitationnelles dans la partie du spectre autour du millihertz. Dans la galaxie, Lisa permettra d'observer des binaires de naines blanches, soit des astres résultant de la mort d'étoiles de type solaire. Il offrira ainsi une nouvelle façon d'étudier l'évolution des populations d'étoiles dans la Voie lactée. Mais surtout, l'interféromètre en orbite révélera les trous noirs supermassifs logés au cœur des galaxies, dont le cycle de vie est relié à celui des galaxies et à l'évolution des grandes structures de l'Univers.

L'Einstein Telescope, pour accéder à tout l'Univers observable

Côté européen, le projet Einstein Telescope envisage la construction d'un instrument composé de trois bras de 10 kilomètres de long formant un triangle dans lequel mettre en œuvre six interféromètres : trois dans la gamme de fréquences couverte par Ligo-Virgo, et trois autres pour la détection d'ondes à plus basses fréquences, jusqu'à 1 Hz, de quoi en particulier mettre à portée de détection la phase de rotation qui précède la fusion de deux astres denses. Enterrée entre 100 et 150 mètres sous terre, la future infrastructure sera par ailleurs hermétique aux secousses sismiques, le tout augmentant la sensibilité de la détection d'un facteur 10 par rapport à l'existant. *« Avec le Einstein Telescope, on vise l'instrument ultime, capable de détecter des événements dans la totalité de l'Univers observable, contre une distance de 2 milliards d'années-lumière actuellement, précise Patrice Verdier. Rien n'est encore acté, mais déjà 1 500 spécialistes ont travaillé sur le design de l'instrument. »*



Les détecteurs de troisième génération seront capables d'observer les événements de fusion d'étoiles binaires à neutrons, ainsi que ceux des trous noirs stellaires, à des distances beaucoup plus grandes que les détecteurs actuels.

© Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Quant aux États-Unis, ils projettent la construction d'un instrument de surface dont les bras atteindraient entre 20 et 40 kilomètres de longueur, pour des performances comparables à celles de son cousin européen. *« L'idée est de tester l'ensemble des technologies qui composeront ces deux instruments dans Virgo, Ligo et Kagra, de les figer dans le courant de la prochaine décennie, et d'attaquer ensuite la construction de ces interféromètres de troisième génération »,* précise le responsable France du Einstein Telescope.

Avec le Einstein Telescope, on vise l'instrument ultime, capable de détecter des événements dans la totalité de l'Univers observable.

Les scientifiques visent plus de statistiques bien sûr, qui permettront en particulier d'affiner la mesure de la constante de Hubble, et peut-être de trancher les tensions qui subsistent actuellement sur sa valeur. Mais également l'accès à de nouveaux phénomènes et processus astrophysiques, tels que l'évolution dans le temps des populations de binaires et, ce faisant, le lien entre évolution stellaire, évolution galactique et formation des grandes structures de l'Univers.

De leur côté, les spécialistes de physique nucléaire envisagent les fusions d'étoiles à neutrons tel un véritable laboratoire offrant des conditions inaccessibles sur Terre pour étudier la matière dans ses états extrêmes. Quant aux experts des supernovas, ils espèrent que les ondes gravitationnelles leur donneront accès au cœur de ce phénomène explosif, quand l'astronomie traditionnelle ne permet que de l'observer en surface.

Un nouvel âge d'or pour l'astronomie

L'ensemble de ces moyens instrumentaux présents et à venir est aussi la garantie de pouvoir tester la relativité générale dans des configurations de champs de gravité extrêmement variées, correspondant à différents secteurs de la théorie. Comme l'explique Laura Bernard, au Laboratoire Univers et théories⁴, *« en couvrant ainsi une large gamme de paramètres, l'objectif est de faire le tri entre les différentes théories au-delà de la relativité générale qui se proposent soit d'expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, soit de réconcilier relativité générale et théorie quantique. »* Cette dernière exigence est nécessaire pour accéder d'une part à la destinée de l'intérieur d'un trou noir, d'autre part pour retracer l'histoire de l'Univers jusqu'au Big Bang.

Dans le futur, si on parvient à séparer le fond cosmologique du fond astrophysique, on peut espérer obtenir des informations sur des phénomènes qui ont immédiatement succédé au Big Bang.

Pour ce faire, la piste des ondes gravitationnelles pourrait là aussi s'avérer la bonne. Plus précisément les ondes gravitationnelles de très basses fréquences, accessibles non pas via l'interférométrie mais en chronométrant le temps d'arrivée des impulsions radio émises par les pulsars (des étoiles à neutrons tournant très rapidement sur elles-mêmes) avec une régularité diabolique. Si bien que la plus légère désynchronisation est le signe du passage d'une onde gravitationnelle ayant modifié le temps de propagation des pulses.

De cette manière, plusieurs équipes ont indiqué en juin dernier avoir enregistré pour la première fois une signature de ce que les spécialistes appellent le fond diffus d'ondes gravitationnelles, soit le bruit de fond gravitationnel de l'Univers tout entier. Or celui-ci est une superposition d'innombrables signaux astrophysiques, mais également d'échos remontant pour certains jusqu'aux toutes premières fractions de seconde du cosmos.



Vue d'artiste des aspects de l'Univers primitif.

© ESA / Science office

« Dans le futur, si on parvient à séparer le fond cosmologique du fond astrophysique, on peut espérer obtenir des informations sur des phénomènes qui ont immédiatement succédé au Big Bang, par exemple l'inflation cosmique, l'ère de grande unification des interactions fondamentales, et les transitions de phases vers la matière telle qu'on la connaît aujourd'hui... », anticipe Danièle Steer, au laboratoire Astroparticules et cosmologie⁵ et responsable du Groupement de recherche Ondes gravitationnelles. À quoi ressembleront ces signaux des origines ? « Ils sont liés à une physique que l'on ne connaît pas, poursuit la théoricienne, donc tout est possible ! »

Une chose est certaine, avec les ondes gravitationnelles, l'astronomie entre dans une ère nouvelle. « On vit un d'âge d'or, se réjouit Sarah Antier. Non seulement les ondes gravitationnelles renouvellent notre vision du cosmos, mais, de plus, les possibilités grandissantes de corrélér leur observation avec des observations classiques, c'est-à-dire en ondes électromagnétiques, voire avec la détection d'émissions de neutrinos, promettent d'enrichir encore le panorama. » L'astrophysicienne ajoute : « Tous ces projets nécessitent une grande synergie de la part de communautés. C'est humainement très stimulant. » Ce que la science offre de plus beau. ♦

Pour aller plus loin

Notre dossier [L'ère des ondes gravitationnelles](#). [21]

Notes

- ^{1.} Unité CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1.
- ^{2.} Unité CNRS/Université Savoie Mont-Blanc.
- ^{3.} Astrophysique relativiste, théories, expériences, métrologie, instrumentation, signaux, unité CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur.
- ^{4.} Unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL.
- ^{5.} Unité CNRS/Université Paris-Cité.

URL source:<https://lejournal.cnrs.fr/articles/ondes-gravitationnelles-un-nouvel-age-dor-pour-lastronomie>