

Ondes gravitationnelles : une collision entre un trou noir et une étoile à neutrons observée par LIGO et Virgo ?

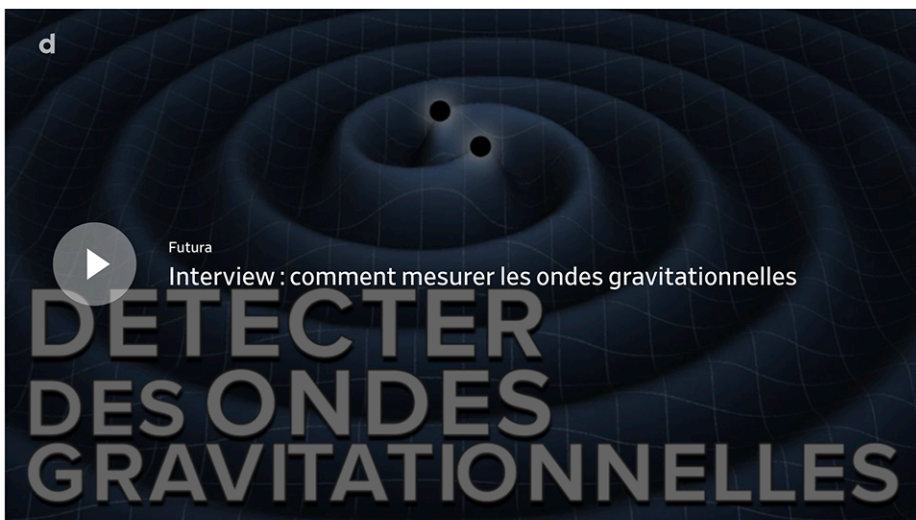
ACTUALITÉ

Classé sous : THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE , DÉCOUVERTE DES ONDES GRAVITATIONNELLES AVEC LIGO , TROU NOIR

Laurent Sacco
Journaliste

Publié le 06/05/2019

Après des améliorations, les détecteurs d'ondes gravitationnelles, LIGO et Virgo, sont repartis à la chasse aux collisions d'astres compacts *via* les émissions d'ondes gravitationnelles : cinq candidats ont déjà été observés dont une possible collision entre un trou noir et une étoile à neutrons, ce qui serait une grande première. L'astrophysicien Olivier Minazzoli fait un premier point avec nous sur ces détections et sur ce qui s'annonce pour cette année d'observation qui a débuté ce 1^{er} avril 2019.



Interview : comment mesurer les ondes gravitationnelles ? Les ondes gravitationnelles sont des déformations de l'espace-temps prédites par Einstein. Il serait possible de les mesurer avec des outils appropriés. L'éditeur littéraire Dunod a interviewé Pierre Binétruy, professeur au laboratoire Astroparticule et Cosmologie de l'université Paris Diderot, afin d'en savoir plus sur ces mystérieuses ondes et sur la façon dont on pourrait les détecter.

Le regretté Pierre Binétruy aimait à dire que le XXI^e siècle allait être gravitationnel, c'est-à-dire que la physique et l'étude du cosmos observable seraient dominées par l'essor de l'astrophysique relativiste et de la gravitation quantique, alors que le XX^e siècle avait été dominé par les développements de l'électromagnétisme et de la physique quantique, des interactions entre la matière et la lumière au niveau atomique, et même nucléaire, jusqu'à notre échelle et au-delà.

On espérait le voir déjà avec la mise en service du LHC, également du fait des théories développées juste à la fin du siècle dernier ; ces dernières laissaient sérieusement penser que l'on pourrait créer des minitrous noirs au LHC et mettre plus généralement en évidence les effets de

l'existence de dimensions spatiales supplémentaires gouvernées par une généralisation de la théorie de la [relativité générale](#), que ce soit avec la théorie de cordes ou simplement la [supergravité](#).

Ces espoirs sont pour le moment (définitivement ?) déçus mais les récents succès de la collaboration de l'[Event Horizon Telescope](#) -- qui a formé pour la première fois ce qui semble bien être l'image d'un [trou noir](#) entouré d'un [disque d'accrétion](#) --, et surtout la détection directe sur Terre des [ondes gravitationnelles](#) par les collaborations [LIGO](#) et [Virgo](#) sont en train de donner du poids aux prédictions de Pierre Binétruy.

La détection de ces ondes est potentiellement très riche en informations de toutes sortes sur la physique des trous noirs, classique ou quantique, et sur l'astrophysique et la [cosmologie](#) plus généralement. Le comité Nobel ne s'y est pas trompé en 2017 et on peut raisonnablement penser que d'autres prix Nobel de physique seront attribués en relation avec cette physique dans un avenir proche, en particulier pour deux Français : [Thibault Damour](#) et [Alain Brillet](#).

En attendant, la chasse aux ondes gravitationnelles a repris il y a un mois, comme l'expliquait le précédent article de Futura ci-dessous, et cinq candidats sérieux concernant des [fusions](#) d'[astres](#) compacts ont déjà été détectés. Ils sont en cours d'analyse pour des confirmations et pour en extraire des informations concernant, notamment, les masses et les distances de ces astres, très probablement à l'origine des trous noirs binaires pour les trois premiers. Des étoiles à neutrons semblent impliquées pour les deux derniers candidats et on envisage même, ce qui serait une grande première, une collision entre un trou noir et une étoile à neutrons. Le site de Virgo donne d'ailleurs les précisions suivantes à ce sujet :

« La probable fusion d'un système binaire d'étoiles à neutrons ("BNS" pour "Binary Neutron Star") a été observée jeudi 25 avril, vers 8 h 18 temps universel (10 h 18 heure de Paris) : cet événement a été baptisé "S190425z" -- voir ce lien pour plus d'informations. La recherche de contreparties électromagnétiques du candidat S190425z se poursuit. C'est un défi bien plus difficile que dans le cas de GW170817 car la nouvelle source est quatre fois plus lointaine et sa localisation dans le ciel fournie par LIGO et Virgo est bien plus incertaine. En effet, le signal du candidat S190425z a été enregistré alors que seulement deux détecteurs sur trois fonctionnaient : Ligo-Livingston et Virgo.

L'autre signal potentiel impliquant une étoile à neutrons a été détecté le lendemain 26 avril, vers 15 h 22 temps universel (17 h 22 heure de Paris) : les informations sur ce candidat, S190426c, sont disponibles [ici](#). Si les trois détecteurs LIGO-Virgo prenaient des données à ce moment-là, le signal détecté est plus faible et il est donc possible qu'il ne vienne pas du cosmos. Néanmoins, S190426c est un candidat très intéressant car sa forme suggère qu'il a été émis par un système double mixte, la fusion d'une étoile à neutrons avec un trou noir ("BH") plus massif - un événement "NS-BH". Si cette classification se confirme, ce serait une autre découverte sans précédent ».

Futura s'est à nouveau tourné vers [Olivier Minazzoli](#), membre de la collaboration Virgo, qui travaille au centre scientifique de Monaco et qui est actuellement détaché au laboratoire Artemis de Nice (Observatoire de la Côte d'Azur-OCA), pour qu'il nous explique cette troisième campagne d'observation menée avec des versions améliorées des détecteurs aux USA pour LIGO, et dans la région de Pise, en Italie, pour Virgo.



Chercheur en astrophysique relativiste, [Olivier Minazzoli](#) a notamment travaillé pour la Nasa au JPL ([Jet Propulsion Laboratory](#)), à Pasadena, en Californie, aux États-Unis. © [Olivier Minazzoli](#)

Mais, avant de lui donner la parole, il est bon de rappeler quelques éléments concernant la théorie de la relativité, les trous noirs et les ondes gravitationnelles.

Formalisme à paramètres post-newtoniens et modes quasi-normaux

La théorie d'[Einstein](#) qui permet de réconcilier la théorie de la [relativité restreinte](#) et l'invariance de la vitesse de la lumière pour tous les observateurs (une conséquence d'une symétrie, la fameuse invariance de Lorentz) et sa valeur, comme limite de la propagation de tous les signaux physiques permettant de transmettre une information (on ne peut pas téléphoner plus vite que la lumière avec l'effet EPR) repose sur plusieurs [postulats](#).

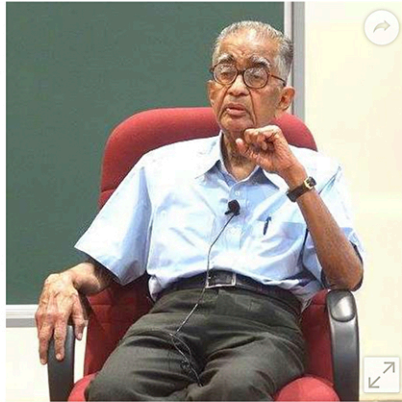
Le premier est l'existence d'un [espace-temps](#) qui peut être courbe et qui se réduit à l'espace-temps plat de la relativité restreinte quand le champ de gravitation est nul, ou peu s'en faut. La gravitation est un effet de cette courbure et elle fait intervenir ce que l'on appelle une métrique, précisément un [tenseur](#). Ce tenseur et la courbure associée varient dans l'espace et dans le temps en suivant une loi qui est celle des [équations d'Einstein](#).

Au cours des années, les physiciens se sont rendu compte qu'une théorie relativiste de la gravitation pouvait conserver certains des postulats précédents, mais utiliser d'autres équations que celles d'Einstein pour la relativité générale. En outre, la métrique pouvait ne pas être le seul champ intimement lié à la gravitation. On pouvait faire intervenir des champs supplémentaires, mathématiquement cousins de celui du boson de Brout-Englert-Higgs, des champs scalaires.

Des chercheurs comme [Clifford M. Will](#) ont donc mis sur pied un cadre général pour ces variantes de la théorie d'Einstein que l'on appelle celui des théories métriques de la gravitation. Will et des

collègues, comme Ken Nordtvedt et Wei-Tou Ni, ont de plus développé, dans ce cadre, ce que l'on appelle le formalisme à paramètres post-newtoniens (*Parameterized post-Newtonian formalism* ou PPN en anglais).

Ce formalisme permet de décrire dans les grandes lignes toutes les modifications aux prédictions de la théorie de la gravitation de [Newton](#) quand le champ de [gravité](#) n'est pas trop fort. Les différentes théories métriques font des prédictions parfois différentes et d'ampleur dissemblable pour les paramètres décrivant les effets de ces [mouvements](#) déduits des solutions des équations considérées. On peut ainsi faire des tests sur les [mouvements](#) des planètes dans le [Système solaire](#) ou des étoiles autour d'un [trou noir supermassif](#), la [déviation](#) des rayonnements lumineux (par exemple, par effet de [lentille gravitationnelle](#)) ou la [perte d'énergie](#) sous forme d'ondes gravitationnelles émises par des [pulsars](#) binaires.

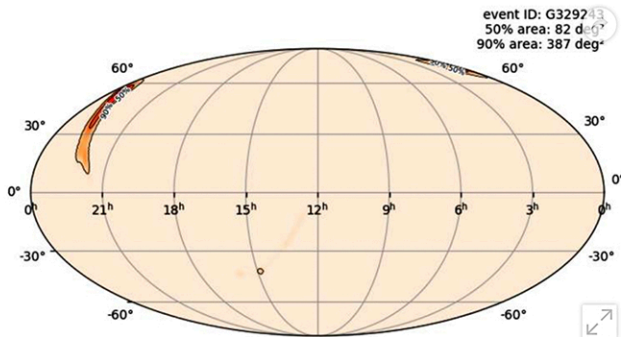


Le travail le plus célèbre du physicien indien, C.V. Vishveshwara (1938-2017), est la découverte des modes quasi-normaux des trous noirs. En 1970, il a montré qu'un trou noir de Schwarzschild perturbé par une impulsion de rayonnement gravitationnel reprendra son état d'origine en émettant des ondes gravitationnelles d'une forme caractéristique déterminée par ce qui est appelé des modes quasi-normaux. Les fréquences (complexes) de ces modes quasi-normaux pour des trous noirs de Schwarzschild sont indépendantes de la forme de cette perturbation et sont entièrement caractérisées par la masse du trou noir. Plus tard, ce résultat a été généralisé au cas des trous noirs de Kerr en rotation. Les modes quasi-normaux sont alors des fonctions de la masse et du moment angulaire propre, le spin, du trou noir. L'observation des modes quasi-normaux est considérée comme un moyen d'établir l'existence des trous noirs. © International Centre for Theoretical Sciences, Bengaluru

Quand le champ de gravité devient nettement plus fort, en particulier au moment de la collision et de la fusion de deux trous noirs pour en former un nouveau, on doit s'y prendre autrement pour tester des théories alternatives à celles d'Einstein. Il faut avoir recours à des [simulations numériques](#) avec de puissants [ordinateurs](#), même si l'on peut obtenir quelques résultats analytiques comme l'ont montré des chercheurs tels que [Thibault Damour](#) et [Alessandra Buonanno](#). On sonde alors le régime pleinement non-linéaire de la relativité générale et des autres théories métriques.

Dans le cadre de ce régime, le nouveau trou noir formé n'a pas un [horizon des événements](#) régulier, la surface qui le définit est bosselée -- rappelons que c'est la présence d'un tel horizon et rien d'autre qui définit un trou noir, pas même la présence d'une singularité qui est, de plus, douteuse à cause des effets quantiques -- ; l'horizon vibre comme le ferait une cloche sous l'effet d'un coup. Il existe alors ce que l'on appelle, d'ailleurs dans les deux cas, des modes quasi-normaux pour ces [vibrations](#) qui vont s'amortir sous l'effet de l'émission d'ondes gravitationnelles dans les premiers cas, et avec des émissions sonores pour une cloche. L'effet d'amortissement va faire prendre au trou noir, après une fusion, la forme exacte décrite par la fameuse métrique de Kerr pour un trou noir neutre en rotation.

Comme ces modes quasi-normaux ont des [fréquences](#) déterminées par la théorie des trous noirs, faire leur découverte dans le [spectre](#) des ondes gravitationnelles serait une preuve très convaincante de l'existence d'un horizon des événements et donc, de l'existence des trous noirs.



Une première alerte publique de détection d'une onde gravitationnelle, envoyée le 8 avril 2019, décrit ce que l'on pense être une fusion de trous noirs binaires qui s'est produite à environ 4 milliards d'années lumière de distance (1473 ± 358 Mpc). Les observatoires Hanford et Livingston de LIGO, et le détecteur Virgo, en Italie, étaient tous en mode d'observation à l'époque, et ont contribué à la détection. La combinaison des données obtenues par chaque site a donné la carte ci-dessus. La région du ciel, supposée contenir la source de l'onde gravitationnelle détectée, couvre une superficie de 387 degrés carrés, soit près de 2.000 pleines lunes, coupant à peu près les constellations de Cassiopeïde, du Lézard, d'Andromède et de Céphée. © LIGO, Caltech / MIT

Forts de ces rappels, abordons maintenant les questions que nous avons posées à Olivier Minazzoli, et surtout ses réponses.

Futura-sciences : *La collaboration LIGO-Virgo a conduit à la découverte de 10 fusions avec des trous noirs binaires et une collision d'étoiles à neutrons au cours des deux dernières campagnes d'observations. Les détecteurs ont été améliorés et sont désormais plus sensibles : la preuve en est que moins d'un mois après le début de la troisième campagne d'observations, trois nouvelles fusions de trous noirs probables ont été annoncées. Sachant cela, il est sans doute possible de commencer à estimer le nombre et la nature des événements que l'on devrait voir au cours de cette nouvelle chasse aux ondes gravitationnelles. À quoi peut-on donc s'attendre ?*

Olivier Minazzoli : Pour cette troisième campagne d'observation, baptisée O3, et qui va durer une année, il est attendu à peu près entre 10 et 40 fusions de trous noirs binaires et de 1 à 10 collisions d'étoiles à neutrons. En théorie, il doit exister aussi des systèmes binaires contenant un trou noir et une étoile à neutrons qui devraient donc finir par entrer en collision, toujours du fait des pertes d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles.

Mais il est encore trop tôt pour donner une estimation fiable du taux de collisions attendu dans ce dernier cas. Celui-ci dépend encore trop des modèles considérés, étant donné que ces modèles n'ont pas encore été contraints par l'observation puisque nous n'avons pas encore de détection

confirmée) pour des systèmes. Beaucoup de modèles semblent néanmoins donner des taux compris entre ceux des binaires de trous noirs et des binaires d'étoiles à neutrons.

Futura-sciences : Les annonces de la détection de nouvelles fusions de trous noirs et d'étoiles à neutrons semblent beaucoup plus rapides que les précédentes, est-ce bien le cas, et à quel point peut-on faire confiance à ces annonces ?

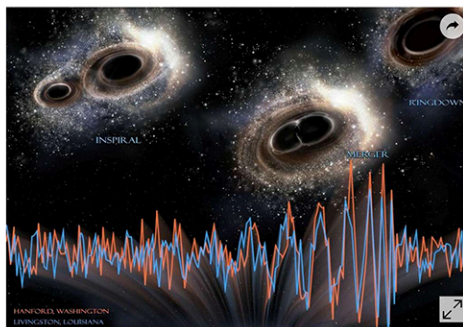
Olivier Minazzoli : Les annonces sont beaucoup plus rapides car nous envoyons des alertes publiques dès que nos algorithmes de détection rapide voient un signal qui semble suffisamment significatif. Durant la campagne d'observation O2, seuls des observatoires partenaires ayant signé un MOU (*Memorandum Of Understanding*) avec la collaboration recevaient ce type d'alertes rapides. Mais le choix a été fait pour O3 de rendre ces alertes publiques, afin que toute la communauté astrophysique puisse participer à la recherche des contreparties électromagnétiques aux ondes gravitationnelles (ou sous forme de [neutrinos](#)), s'ils en avaient le désir.

Les informations données par ces algorithmes rapides sont préliminaires, et l'utilisation d'analyses plus sophistiquées et plus longues permet de mieux caractériser les sources. Néanmoins, ces algorithmes rapides sont déjà très fiables et permettent d'avertir en quelques minutes la communauté astrophysique de la détection d'un événement potentiel. En particulier, ils délivrent une probabilité de localisation de la source dans l'espace et une estimation des probabilités que cette dernière soit une binaire de trous noirs, une binaire d'étoiles à neutrons ou un couple étoile à neutron-trou noir, ainsi que la probabilité qu'il y ait une différence de masse importante entre les objets de la binaire. Cela donne notamment la possibilité aux observatoires de faire un choix éclairé sur leur participation à la recherche de potentielles contreparties électromagnétiques ou pas. En effet, en fonction du type de la source, et/ou de la distance, des contreparties électromagnétiques observables sont attendues, ou pas.

Pour être plus précis, la procédure suivie est celle-ci : si certains critères sont respectés, les algorithmes rapides génèrent et envoient automatiquement une annonce publique en quelques minutes, par l'intermédiaire d'un réseau géré par la [Nasa](#) appelé GCN (*Gamma-ray burst Coordinates Network*). Alors, des membres de garde de la collaboration doivent, à toute heure du jour ou de la nuit, se réunir en ligne pour vérifier l'événement, et envoyer une deuxième annonce pour confirmer l'annonce automatique ou, à l'inverse, pour envoyer une rétraction si un problème était constaté. Ensuite, des mises à jour peuvent être envoyées en fonction des résultats d'analyses plus longues à réaliser.

Pour qu'une annonce soit envoyée automatiquement, il faut, par exemple, qu'au moins deux détecteurs parmi les trois (LIGO à Hanford, côte Ouest ; LIGO à Livingston, côte Est ; et Virgo à Pise) soient opérationnels et aient détecté le signal, ce qui n'est pas toujours le cas pour diverses raisons. Par exemple, en cas d'intempéries sur l'un des sites, les perturbations peuvent devenir trop importantes pour être en mesure de détecter le signal.

On peut suivre les annonces des détections des candidats sur un [site public](#) -- Tant que la collaboration ne confirme pas une détection, ce qui peut prendre du temps, on parle de candidat.



Inspiral, merger, ringdown : ce sont les noms anglais des trois étapes qui ont conduit deux trous noirs à se rapprocher en décrivant une spirale suite à des pertes d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles, puis à entrer en collision pour finalement donner un seul trou noir. L'horizon des événements de l'objet compact final a vibré, telle une cloche frappée, en émettant des ondes gravitationnelles. L'événement a duré moins d'une seconde. Les courbes montrent les signaux détectés par les deux interféromètres LIGO, à Hanford, et à Livingston, aux États-Unis, le 14 septembre 2015 et elles sont en correspondance avec la chronologie des événements. © LIGO, NSF, Aurore Simonnet

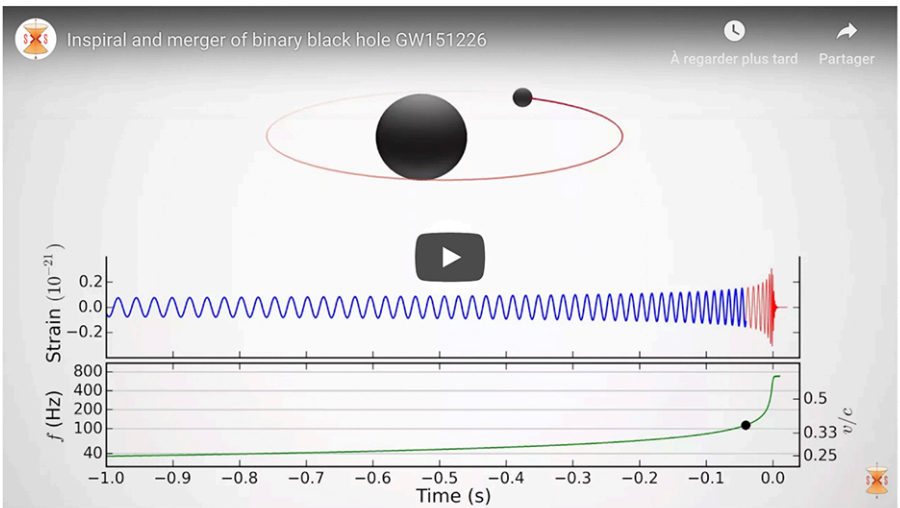
Futura-sciences : Comment LIGO et Virgo vont-ils pouvoir aider à tester la théorie des trous noirs et par la même occasion, la théorie de la relativité générale d'Einstein ?

Olivier Minazzoli : En ce qui concerne les trous noirs, la détection des modes quasi-normaux d'un trou noir de Kerr en rotation est toujours à l'horizon.

Sinon, de manière générale, la théorie d'Einstein nous permet de prédire la forme des ondes gravitationnelles. Les théories alternatives vont, quant à elles, souvent prédire un signal différent de la théorie de la relativité générale. Il y a [cinq stratégies employées par la collaboration](#) pour la tester à partir du [premier catalogue](#) des sources des campagnes d'observation O1 et O2.

La première stratégie consiste à retrancher au signal de la détection la meilleure estimation du signal réalisée par des algorithmes basés sur la relativité générale, et de vérifier que ce qu'il reste est bien conforme à ce que l'on attend du bruit dans les détecteurs.

La deuxième stratégie consiste à comparer les estimations des masses de la binaire à partir de différentes parties du signal. En effet, la physique de la fusion des binaires passe par plusieurs régimes (*Inspiral, merger, ringdown* en anglais sur l'illustration ci-dessus), décrite par des mathématiques complètement différentes. Ainsi, la cohérence de l'estimation des masses à partir du signal correspondant à différents régimes permet de vérifier que la relativité générale est cohérente dans les différents régimes en question. En effet, si la relativité générale devait être fautive, on peut montrer que l'estimation des masses obtenues à partir des différentes parties des signaux ne devrait pas coller en général.



Les trois régimes de la collision de deux trous noirs sont montrés dans cette vidéo. La partie supérieure de l'animation montre les horizons des deux trous noirs et les mouvements de ces astres compacts. La partie centrale montre la forme de l'onde gravitationnelle observée par le détecteur de LIGO, à Livingston, et la partie inférieure indique la fréquence des ondes gravitationnelles, augmentant progressivement d'environ 35Hz à plus de 700Hz. Les paramètres de ce système sont cohérents avec ceux déduits des ondes gravitationnelles mesurées par LIGO le 26 décembre 2015. © SXS Collaboration

La troisième stratégie consiste à paramétriser une potentielle déformation de la forme des ondes gravitationnelles, qui découlerait d'une modification de la dynamique de la coalescence des binaires par rapport à la relativité générale. La quatrième stratégie pour tester la relativité générale consiste à faire quelque chose de similaire, mais pour des modifications qui seraient dues à une dépendance en fréquence de la vitesse de propagation de l'onde gravitationnelle. C'est-à-dire, qu'il y ait dans le vide un effet de dispersion analogue à ce qui se produit dans un prisme pour les ondes lumineuses, ce que la relativité générale ne prédit pas.

Cela permet notamment de mettre des contraintes sur la masse des ondes gravitationnelles -- alors qu'en physique, toute onde peut éventuellement posséder une masse, la relativité générale prédit que les ondes gravitationnelles n'en ont pas. Plus généralement, on peut ainsi tester des théories qui violent l'invariance de Lorentz et donc indirectement, au moins de manière effective si ce n'est fondamentalement, la théorie de la relativité restreinte.

Enfin, la dernière stratégie consiste à tenter de mesurer la polarisation des ondes gravitationnelles. En effet, comme les ondes électromagnétiques, les ondes gravitationnelles possèdent différents modes de polarisation. La théorie de la relativité générale prédit qu'il ne peut exister que deux modes possibles. Or, la plus grande partie des théories alternatives prédit l'existence d'autres modes de polarisation. Néanmoins, seul un réseau de plus de cinq détecteurs d'ondes gravitationnelles serait capable d'apporter des contraintes réellement fortes sur ces modes de polarisation alternatifs. Nous affinons donc nos armes, pour le moment où les détecteurs japonais (KAGRA) et indien (LIGO India) entreront en fonction, au cours des cinq prochaines années.

📌 CE QU'IL FAUT RETENIR

Après divers améliorations, les détecteurs d'ondes gravitationnelles, LIGO aux USA, et Virgo en Europe, sont repartis pour une année de prise de données.

Plus sensibles, ils pourraient détecter un peu plus d'une fusion de trou noir par semaine, et probablement jusqu'à une fusion d'étoile à neutrons par mois, voire quelques collisions de trous noirs avec des étoiles à neutrons sur une année.

On devrait aussi pouvoir faire de l'astronomie multi-messagers.

On espère tester des alternatives à la théorie de la relativité générale et nos théories sur la physique des trous noirs et des étoiles à neutrons.

Les annonces de détections sont désormais publiques et après un mois de chasse, cinq candidats ont été détectés depuis le 1^{er} avril 2019 et, à ce jour, au début de mai 2019.