



Laurent Sacco
Journaliste

Publié le 02/11/2017
Modifié le 03/11/2017

Ligo et Virgo ont détecté conjointement une fusion de trous noirs mais aussi d'étoiles à neutrons donnant lieu à une kilonova, source d'un sursaut gamma court. Ces deux observations ont été utilisées pour contraindre une nouvelle physique qui pourrait provenir de la théorie des supercordes. Futura a demandé quelques explications à Olivier Minazzoli, membre de la collaboration Virgo et qui travaille au centre scientifique de Monaco et à l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA).



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.

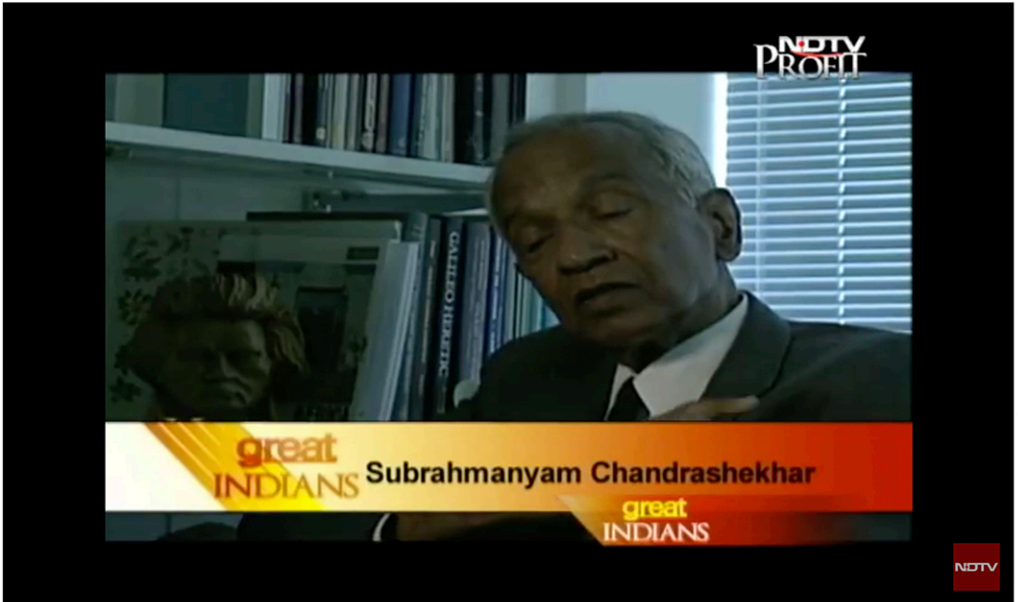
La découverte conjointe par Ligo et Virgo de l'émission d'une onde gravitationnelle par la source GW170817 associée à un sursaut gamma SGRB170817A, qui a, de plus, toutes les caractéristiques d'une kilonova, montre spectaculairement tout le potentiel de l'astronomie gravitationnelle. Elle confirme également que nous sommes entrés dans l'ère de l'astronomie « multimessager ».

L'évènement aurait sans aucun doute ravi le prix Nobel de physique indien Subrahmanyan Chandrasekhar, qui a été un pionnier de la théorie des étoiles relativistes dans les années 1960 et de celle des trous noirs dans les années 1970. D'autant plus que l'analyse des ondes (détectées non seulement par Ligo et Virgo mais aussi par environ 70 instruments au sol ou dans l'espace dans tout le spectre des ondes électromagnétiques) nous assure maintenant que GW170817 était une

collision d'étoiles à neutrons mais aussi qu'au moins certains sursauts gamma courts sont bien le résultat de telles collisions qui, très vraisemblablement, forment finalement un autre objet compact, un trou noir.

L'avènement d'une nouvelle astronomie, fort justement récompensé par le [prix Nobel de physique 2017](#), ne concerne pas seulement l'[astrophysique relativiste](#) et l'[astrophysique nucléaire](#) (en éclairant l'origine des éléments lourds tels l'or et le platine). Elle concerne aussi la physique fondamentale. Il y a en effet des enseignements à tirer de ce point de vue de la détection de GW170817, qui, comme son nom l'indique, s'est produit le 17 août 2017. Il en est de même avec l'annonce, le mois dernier, de la détection de GW170814 qui, remarquablement, s'est produit le 14 août 2017 ; il s'agissait cette fois d'une collision avec [fusion](#) de deux [trous noirs stellaires](#).

Comme nous allons le voir, des événements comme GW170817 et GW170814, dont les observations devraient se multiplier dans un avenir proche (d'autant plus qu'il est prévu d'augmenter encore la sensibilité de Ligo et Virgo), nous permettent de poser des bornes sur de la nouvelle physique, notamment sur celle que la [théorie des cordes](#) peut impliquer dans le domaine de l'existence de dimensions spatiales supplémentaires, de la nature de l'[énergie noire](#) et d'une possible violation de l'invariance de Lorentz, invariance qui est à la base de la théorie de la [relativité restreinte](#). Commençons par discuter le cas de la collision des étoiles à neutrons.



Le prix Nobel de physique indien Subrahmanyan Chandrasekhar a été un pionnier de la théorie des étoiles relativistes dans les années 1960 et de celle des trous noirs dans les années 1970. Pour obtenir une traduction en français assez fidèle, cliquez sur le rectangle blanc en bas à droite. Les sous-titres en anglais devraient alors apparaître. Cliquez ensuite sur l'écrou à droite du rectangle, puis sur « Sous-titres » et enfin sur « Traduire automatiquement ». Choisissez « Français ». © NDTV

Les ondes gravitationnelles des kilonovae, clé d'une nouvelle physique

Pour mesurer des variations dans le temps de la [vitesse d'expansion de l'univers observable](#), il faut mesurer les distances et les décalages spectraux de certains objets pouvant être considérés comme des chandelles standard, ou peu s'en faut, c'est-à-dire des objets dont la luminosité absolue est connue et relativement constante. On a de bonnes raisons de penser que c'est le cas des SN Ia, ces [supernovae](#) qui sont des explosions liées à des [naines blanches](#), puisqu'il s'agit d'objets compacts dont les [masses](#) devraient être de l'ordre de la fameuse [masse de Chandrasekhar](#), ce qui limite l'énergie disponible pour le rayonnement émis, qu'il soit électromagnétique ou gravitationnel.

Si l'on utilise la métaphore du son pour décrire la propagation des ondes gravitationnelles dans le tissu de l'[espace-temps](#), ces kilonovae devraient donc être des « sirènes standard », car on peut déduire l'amplitude des ondes gravitationnelles émises à partir de leurs caractéristiques observées, tout comme dans le cas de la fusion des trous noirs. Le rapport entre l'amplitude émise et l'amplitude observée nous permet alors d'en déduire une distance, comme avec les SN Ia. Par [analogie](#), plus une chandelle est loin, moins elle nous apparaît lumineuse ; plus une sirène est loin, moins elle nous semble puissante.

Or, les mesures de distance se font en s'appuyant sur une échelle de techniques qui commence avec la mesure des [parallaxes stellaires](#) dans la [Voie lactée](#) et se poursuit avec les [Céphéides](#) extragalactiques jusqu'aux supernovae. Les erreurs propres à chaque technique s'accumulent et entachent d'incertitudes la mesure des distances dans l'univers, desquelles on peut déterminer la vitesse d'expansion du cosmos observable, ou, dit autrement, la fameuse [constante de Hubble](#), quand on dispose des mesures du [redshift](#) par ailleurs.



Bernard F. Schutz est un physicien américain dont les recherches portent sur la théorie de la relativité générale d'Einstein, plus concrètement, sur la physique des ondes gravitationnelles. Il est l'un des directeurs et chef du groupe d'astrophysique de l'Institut Max Planck de physique gravitationnelle de Potsdam, en Allemagne. Il a joué un rôle clé dans la fondation de la revue numérique *Living Reviews in Relativity*. © N. Michalke, AEI

En 1986, le physicien Bernard F. Schutz a montré le premier que les ondes gravitationnelles émises par une collision d'étoiles à neutrons permettaient de mesurer la valeur de la [constante de Hubble](#) avec une précision de quelques pour cent. Surtout, en combinant la détection de ces ondes avec une contrepartie électromagnétique, il est possible d'obtenir cette valeur directement, c'est-à-dire sans se reposer sur l'emboîtement successif des techniques de mesure de distance. Le résultat serait donc plus robuste que celui qui a pu être obtenu avec le SDSS ou les mesures déduites des SN la puisqu'il s'affranchit de ces sources d'erreur. La mesure de la constante de Hubble à l'aide de l'étude de GW170817 et SGRB170817A (le sursaut gamma associé à cette onde gravitationnelle) est compatible avec les estimations précédentes, même celle déduite des mesures de [Planck](#), ce qui consolide le [modèle cosmologique standard](#). Comme les données vont continuer à affluer de cette façon dans un futur proche, il se peut que l'on apprenne de cette manière quelques-uns des secrets de l'énergie noire.

Par ailleurs, la théorie relativiste de la gravitation d'Einstein, la relativité générale, prédit que les ondes gravitationnelles voyagent à la même vitesse que la [lumière](#). Il existe pourtant des théories alternatives où ce n'est pas le cas (et même certaines où la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide n'est pas exactement celle que l'on croit du fait d'effets de gravitation quantique, par exemple ceux que la [théorie des supercordes](#) implique). Dans le cas de GW170817 et SGRB170817A, les [rayons gamma](#) sont arrivés environ deux secondes après les ondes gravitationnelles. Ce retard est sans doute dû aux mécanismes d'émission de ces ondes mais, comme les signaux ont voyagé sur une distance de 130 millions d'années, cela implique que la différence de vitesse est, de toute façon, extrêmement faible et inférieure à une borne donnée (la différence relative sur la [vitesse de la lumière](#) est inférieure au milliardième de milliardième). De futures détections conjointes devraient permettre de démêler les parts des contributions des différences de temps d'émission par rapport au temps de propagation relatif, car seul ce dernier dépend de la distance.

On a pu également poser des contraintes sur la violation de l'[invariance de Lorentz](#), violation qui se manifesterait notamment par des différences de vitesses de propagation pour les ondes électromagnétiques et gravitationnelles dans le vide selon leur énergie. Toutefois, dans le cas de GW170817, on a en fait testé des violations de l'invariance de Lorentz dites « non dispersives », c'est-à-dire celles qui ne sont pas reliées à ce genre de phénomènes de variation des vitesses en fonction de l'énergie ou, plus précisément, des [fréquences](#) contenues dans les ondes.



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

La polarisation des ondes gravitationnelles des trous noirs

Tournons-nous maintenant vers la nouvelle détection de collision de trous noirs, avec l'observation de GW170814. Il n'y a pas eu de contrepartie électromagnétique à cet évènement, comme on devait s'y attendre en général avec la fusion de deux trous noirs de masses stellaires.

Mais, ce qui a rendu cette quatrième détection de fusion de trous noirs si intéressante, c'est d'abord le fait que trois [interféromètres](#) étaient impliqués pour la première fois. De quoi enfin localiser la source sur la voûte céleste avec une précision qui permet de rechercher avec beaucoup moins d'ambiguïté une éventuelle contrepartie électromagnétique.

En second lieu, ces trois machines permettent maintenant de poser des contraintes sur la polarisation des ondes gravitationnelles. Or, comme nous l'avait expliqué le physicien Olivier Minazzoli (voir article ci-dessous), membre de la collaboration Virgo et qui travaille au centre scientifique de Monaco et à l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), la polarisation de ces ondes nous permet potentiellement d'aller au-delà de la théorie d'Einstein et peut-être même, bien que cela n'aille pas de soi, de rendre plus crédible la théorie des supercordes. Nous lui avons donc demandé de nous donner quelques explications supplémentaires.

Futura : Les collaborations Ligo et Virgo ont fait savoir que GW170814 permettait d'étudier la nature des polarisations des ondes gravitationnelles. Pourquoi ne pouvait-on pas le faire avant, uniquement avec les deux interféromètres de Ligo ?

Olivier Minazzoli : Tout d'abord, rappelons que la relativité générale prédit un certain type de polarisation que l'on nomme « tensoriel ». En revanche, la quasi-totalité des théories alternatives à la théorie d'Einstein induit des types de polarisation supplémentaires, que l'on nomme « vectoriel » et « scalaire ». En tout, il y a 6 modes de polarisation théoriquement possibles, 2 pour chaque type.

Pour faire la mesure de tous les modes de polarisation envisageables théoriquement, il faut plusieurs interféromètres avec des orientations relatives différentes. Or, les deux détecteurs de Ligo sont presque coalignés. En revanche, à cause de la rotondité de la [Terre](#), l'interféromètre de Virgo n'est pas coaligné avec ses équivalents américains. Il est donc possible de commencer à déterminer le contenu d'une onde gravitationnelle en termes de polarisation, directement depuis la mesure de celle-ci. Une première !

Néanmoins, nous ne sommes pas encore en mesure d'étudier la polarisation des ondes gravitationnelles de façon optimale. En effet, il y a 6 différents modes de polarisation théoriquement possibles et intriqués. Ainsi, pour pouvoir décorrélérer les effets de chacun des modes de polarisation sur les interféromètres, il faudrait idéalement avoir au moins 6 interféromètres orientés différemment, ce dont nous ne disposons pas actuellement.

Malgré tout, avec les interféromètres de Ligo et Virgo, nous pouvons déjà dire si les modes de polarisation semblent soit « complètement tensoriels », en accord avec les prédictions de la relativité générale, soit « complètement vectoriels », soit « complètement scalaires ». Néanmoins, nous ne pouvons rien dire sur les cas où ces types de polarisation seraient mélangés entre eux dans le signal, avec différentes amplitudes pour chaque mode. Or, la plupart des théories allant au-delà de la relativité d'Einstein prédisent un tel mélange. Nous sommes donc encore loin de pouvoir pleinement contraindre les théories alternatives par la mesure des modes de polarisation, mais c'est une étape majeure qui a été accomplie.

Nous attendons donc avec impatience les détecteurs japonais Kagra et indien Ligo-India, qui nous permettront d'affiner ces recherches. D'autres méthodes pourraient cependant s'affranchir de la nécessité d'avoir plus d'interféromètres. En effet, nous avons récemment montré avec des collègues de la collaboration Ligo-Virgo ([voir ici](#)), que les détecteurs Ligo et Virgo seuls pourraient mesurer le contenu en mode de polarisation du fond stochastique d'ondes gravitationnelles - c'est-à-dire, la somme des ondes qui sont individuellement trop faibles pour être détectées directement.

D'autres collègues de la collaboration ont aussi montré une telle possibilité à partir des ondes gravitationnelles produites par certaines étoiles à neutrons en rotation rapide ([voir ici](#)). L'inconvénient de ces deux méthodes est qu'il faut accumuler des données sur (potentiellement) plusieurs années avant de pouvoir détecter ces signaux. Donc, dans tous les cas, nous avons encore quelques années devant nous avant de contraindre pleinement les théories alternatives à partir des modes de polarisation contenus dans les ondes gravitationnelles observées.

Quel a donc été le résultat de la polarisation de l'onde émise par GW170814 ?

Olivier Minazzoli : Il est conforme aux prédictions de la théorie de la relativité générale ; la polarisation semble toujours purement tensorielle, ou pour le moins largement sous cette forme. C'est déjà ce que nous disaient les études concernant les [pulsars](#) binaires. Car, si d'autres modes de polarisation étaient présents, et avec une amplitude non négligeable, la binaire perdrait de l'énergie beaucoup plus rapidement sous forme d'ondes gravitationnelles et l'on observerait donc les pulsars se rapprocher entre eux plus vite que ce que l'on constate.

Toutefois, les prédictions concernant ce phénomène varient selon les modèles utilisés et il est donc difficile d'aboutir à des conclusions indépendantes de la théorie considérée.

La grande nouveauté avec la mise en service de détecteurs comme Ligo et Virgo est que l'on peut tester la présence d'une composante non tensorielle sans avoir à faire intervenir un modèle précis de nouvelle physique. Nos conclusions deviennent alors indépendantes - ou moins dépendantes - des cadres théoriques de la physique contemporaine, ce qui est idéal pour tenter de s'affranchir de tout biais que nos connaissances actuelles pourraient introduire dans nos interprétations des phénomènes gravitationnels.

📌 CE QU'IL FAUT RETENIR

La théorie des supercordes nécessite des dimensions spatiales supplémentaires, qui sont celles déjà envisagées par les théories de Kaluza-Klein pour unifier la physique. Malheureusement, l'observation de celles-ci exigerait un accélérateur de particules de la taille de la Voie lactée.

Des collisions de trous noirs pourraient, en quelque sorte, faire vibrer l'espace de ces dimensions supplémentaires et ainsi modifier les caractéristiques des ondes gravitationnelles émises. Ces modifications seraient détectables sur Terre, ce qui pourrait renforcer la confiance en l'existence de ces dimensions spatiales ou bien infirmer leur existence, et donc réfuter la théorie des cordes. Mais, comme l'explique l'astrophysicien Olivier Minazzoli, cela n'est en rien évident.

Ces dimensions spatiales produisent aussi une nouvelle physique affectant la polarisation des ondes gravitationnelles que l'on peut détecter sur Terre, que ces ondes soient produites par des collisions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons.