

Les ondes gravitationnelles

*Trinh Xuan Thuan
Professeur émérite d'astronomie
Université de Virginie*

Des vibrations dans le tissu de l'espace-temps

La seconde moitié du XX^e siècle et le début du XXI^e siècle ont vu une résurgence des idées d'Einstein sur tous les fronts, faisant de cette période l'« âge d'or » de la théorie de la relativité générale. Et cela grâce à une série de découvertes en astrophysique plus extraordinaires les unes que les autres. Parmi celles-ci, les « trous noirs » figurent en bonne place. Leur gravité extrême donne lieu à des phénomènes physiques qui défient le sens commun quand il s'agit de l'espace-temps.

Une autre conséquence spectaculaire de la relativité est l'existence d'ondes gravitationnelles qui se propagent dans le tissu de l'espace-temps. Einstein introduisit ce concept dès 1916, juste quelques mois après la publication des équations de la relativité générale. Mais c'est seulement un siècle plus tard que cette idée sera vérifiée directement par l'observation. La relativité nous dit que la courbure de l'espace est due à la matière et que cette courbure reste constante tant que la matière est immobile. Mais dès que celle-ci est en mouvement accéléré, des ondes apparaissent qui transportent de l'énergie gravitationnelle et provoquent des déformations infimes de l'espace-temps, étirant et contractant les distances. Ainsi, lorsque des objets très massifs accélèrent – par exemple deux trous noirs qui tournent l'un autour de l'autre – ils provoquent des vibrations dans le tissu de l'espace-temps. Ces vibrations se propagent sous forme d'ondes : ce sont les ondes gravitationnelles.

Einstein a pu calculer la vitesse à laquelle se propagent ces ondes de gravité. Celles-ci ne voyagent pas d'un endroit de l'espace à un autre de façon instantanée, c'est-à-dire à une vitesse infinie comme la théorie de gravité de Newton le préconise, mais à une vitesse exactement égale à celle de la ...lumière (300'000 kilomètres par seconde).

Détecter des ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles sont générées par des phénomènes cosmiques extrêmement énergétiques, associés à des champs de gravité intenses. Ainsi une paire d'objets compacts tournant l'un autour de l'autre est une source intense d'ondes gravitationnelles. Quant aux objets compacts, ils peuvent prendre la forme de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, cadavres stellaires extrêmement denses résultant de la mort d'étoiles massives. Les étoiles à neutrons sont aussi appelées « pulsars » car elles émettent un faisceau de lumière radio qui balaie la Terre à chaque rotation, produisant des signaux périodiques ou « pulses » en anglais. En se propageant vers

l'extérieur, ces ondes gravitationnelles volent de l'énergie de mouvement aux deux objets compacts, ce qui les fait tourner en spirale l'un vers l'autre dans un mouvement orbital qui s'accélère jusqu'à atteindre la vitesse de la lumière. Les deux objets compacts se rapprochent de plus en plus pour fusionner ensemble, événement salué par un jaillissement final de nouvelles ondes gravitationnelles intenses.

La première mise en évidence de l'existence des ondes gravitationnelles fut indirecte. Elle est due au radioastronome américain Joseph Taylor et à son étudiant Russell Hulse. Ayant découvert en 1974 une paire de pulsars appelée « pulsar binaire », les deux astronomes ont suivi pendant plusieurs décennies, avec le radiotélescope géant d'Arecibo, à Porto Rico, la danse endiablée de ces deux pulsars, l'un tombant vers l'autre. Hulse et Taylor ont pu démontrer que ce mouvement ne pouvait s'expliquer que si chacun des deux pulsars perdait de l'énergie en émettant des ondes gravitationnelles, et ce exactement dans la quantité prévue par la relativité. Leur travail fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1993.

Des cylindres et des interféromètres

Mais pouvons-nous espérer détecter directement des ondes gravitationnelles ? À cause de la faiblesse de la force de gravité comparée à la force électromagnétique, les ondes gravitationnelles sont beaucoup plus ardues à détecter que les ondes électromagnétiques (c'est-à-dire les ondes lumineuses), même si elles sont émises par les objets les plus massifs de l'univers. D'autre part, les objets compacts massifs, sources d'ondes gravitationnelles, ne sont pas nécessairement situés dans la Voie lactée mais peuvent être loin dans l'espace, dans d'autres galaxies situées à des millions, voire des milliards d'années-lumière. Les ondes gravitationnelles sont d'autant plus faibles qu'elles viennent de plus loin. Leur amplitude diminue en fonction inverse de leur distance.

Du fait de leur faible amplitude, nombre de physiciens pensaient que les ondes gravitationnelles étaient plus une curiosité théorique née de l'imagination fertile d'Einstein que des entités expérimentales qui pouvaient être captées et analysées. Mais cela ne découragea pas le physicien américain Joseph Weber qui, dans les années 1950, fut le premier à tenter de détecter des ondes gravitationnelles, en utilisant un énorme bloc cylindrique en aluminium de 2 mètres de long et de 1 mètre de diamètre, le tout pesant une tonne. Le physicien raisonnait ainsi : tout comme une flûte de champagne possède une fréquence de vibration qui lui est propre, ce bloc d'aluminium a la sienne. De même que si vous donnez un petit coup sec à la flûte, vous l'entendrez toujours vibrer du même joli son cristallin, si des ondes gravitationnelles venaient à traverser le détecteur, celui-ci se mettrait à vibrer. Il suffirait alors de mesurer ces vibrations pour que les ondes gravitationnelles nous révèlent leur nature.

Mais c'est beaucoup plus vite dit que fait : la détection d'ondes gravitationnelles n'est pas une entreprise aisée. Même avec des sources d'ondes gravitationnelles les plus proches et les plus intenses, les calculs montrent que l'amplitude d'une vibration sera moindre que la taille d'un proton, soit 10^{-15} mètre. Un défi technique extraordinaire. Il y a en outre le problème difficile d'isoler le cylindre de toutes les sources terrestres de vibration susceptibles d'introduire des parasites dans les mesures, comme les vibrations causées par des ondes sismiques, par des voitures ou des trains qui passent, par des arbres qui tombent, etc. Avec son cylindre, Weber réussit à mesurer des vibrations d'une amplitude de 10^{-14} mètre, soit encore dix fois plus grand que la taille d'un proton. Une prouesse technique certes, mais encore des milliers de fois insuffisante pour détecter les ondes gravitationnelles provenant de la fusion d'une paire de trous noirs d'une dizaine de masses solaires chacun, située dans une galaxie lointaine, par exemple à une distance d'un milliard d'années-lumière. Bien qu'en 1969, Weber ait annoncé la détection d'ondes gravitationnelles avec

Éditorial
de Trinh
Xuan Thuan

HIVER 2026

son cylindre, ses résultats ne purent jamais être confirmés par d'autres chercheurs, utilisant les mêmes techniques.

Face à ces difficultés monumentales, les chercheurs d'ondes gravitationnelles se tournèrent vers d'autres moyens de détection. Le physicien germano-américain Rainer Weiss travaillant au MIT, proposa en 1967 un autre type de détecteur d'ondes gravitationnelles, basé sur le principe de l'interférométrie laser. Cet interféromètre a la forme d'un «L» géant, et dans chacune des branches du «L» de 4 kilomètres de longueur, un faisceau laser va et vient dans un vide extrême (de l'ordre de 10^{-9} atmosphère) entre des miroirs de 40 kilogrammes chacun, suspendus aux extrémités de chaque branche. Après avoir accompli de multiples aller-retours chacun dans sa branche, les deux faisceaux se retrouvent à nouveau, et se recombinent en produisant des interférences. Le passage d'une onde gravitationnelle ferait qu'alternativement l'une des branches se contracterait et s'allongerait légèrement, tandis que l'autre qui lui est perpendiculaire, s'allongerait et se contracterait légèrement. Pour augmenter la sensibilité, les faisceaux laser rebondissent des centaines de fois dans chaque bras et la distance effective parcourue par les faisceaux laser atteint plusieurs centaines de kilomètres. Les infimes changements lors de l'arrivée d'une onde gravitationnelle modifieraient légèrement la longueur du trajet du faisceau laser dans chaque branche. Il en résulterait un léger déphasage du faisceau laser dans une branche du L par rapport à l'autre, qui se manifesterait par une modification des interférences. La longueur de chaque branche n'étant plus de 2 mètres comme pour le cylindre de Weber, mais de plusieurs kilomètres, il deviendrait possible de mesurer d'infimes changements de longueur avec une précision des milliers de fois plus grande. Autre avantage fondamental : un interféromètre n'est pas sensible à une seule fréquence de vibration, comme c'est le cas d'un cylindre en aluminium, mais à un éventail relativement étendu de fréquences d'ondes gravitationnelles, ce qui permet d'explorer les propriétés d'une plus grande variété d'objets compacts massifs.

Travaillant en collaboration avec les physiciens américains Kip Thorne et Barry Barish du Caltech, Weiss vit son concept devenir réalité quand le Congrès américain décida en 1992 de financer l'observatoire LIGO (acronyme de *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*). LIGO est composé non pas d'un seul mais de deux interféromètres séparés par plus de 3'000 kilomètres sur le territoire des États-Unis, l'un situé à Livingston en Louisiane, et l'autre à Hanford, dans l'État de Washington. Des interféromètres séparés géographiquement sont essentiels pour s'assurer que le signal détecté est bien d'origine cosmique. Dans ce cas, les deux interféromètres les détecteront quasi simultanément (le délai est de l'ordre de 10 millisecondes, le temps mis pour les ondes gravitationnelles (ou la lumière) pour parcourir la distance qui sépare les deux stations). En revanche s'il s'agit d'une perturbation locale, comme une voiture qui passe, un seul interféromètre y sera sensible.

La moisson scientifique prodigieuse de LIGO

Cette stratégie a été payante. LIGO est capable de mesurer, comme prévu, d'infimes changements de longueur, de l'ordre d'un milliardième de milliardième de mètre (10^{-18} mètre), soit 1'000 fois plus petit que le rayon d'un proton. C'est comme si vous mesuriez une variation de distance qui équivaldrait à changer la distance Terre-Soleil de la taille d'un seul atome ! Les résultats ont été spectaculaires. Après des décennies de travail ardu pour le concevoir, le construire et le mettre au point, l'observatoire LIGO a détecté le 14 septembre 2015 les premières ondes gravitationnelles. L'événement a été baptisé GW150914 : GW pour *Gravitational Wave* et les chiffres correspondant à la date de l'événement, écrite à la manière anglo-saxonne (yymmdd). La distribution en fréquence et l'amplitude du signal renseignent les physiciens sur la nature du système astrophysique qui a émis ces ondes gravitationnelles. Ainsi, les chercheurs ont pu déterminer

Éditorial
de Trinh
Xuan Thuan

HIVER 2026

que GW150914 provient de la fusion d'une paire de trous noirs, avec des masses respectives de 36 et 29 masses solaires, et situés dans une lointaine galaxie à une distance d'environ 1,3 milliards d'années-lumière. GW150914 inaugure ainsi l'ère de l'astronomie gravitationnelle.

D'autres détections d'ondes gravitationnelles ont rapidement suivi. Jusqu'au 19 mars 2025, le nombre total estimé de détections d'ondes gravitationnelles par LIGO (et le réseau LIGO-Virgo-KAGRA) est de l'ordre de 290 sources. Ces résultats extraordinaires ont valu à Barish, Thorne et Weiss le Prix Nobel de physique en 2017.

Comme mentionné, certaines détections ont été menées en réseau avec l'interféromètre européen Virgo situé près de Pise, en Italie, et devenu opérationnel en août 2017 (voir la figure ci-dessous), et avec l'interféromètre japonais KAGRA. Le fantastique succès scientifique de LIGO a en effet donné un coup de fouet à d'autres projets dans le monde visant à traquer les ondes gravitationnelles. Une semaine après l'annonce de leur découverte, le gouvernement indien a pris la décision de financer la construction de LIGO-Inde, prévu pour être opérationnel en 2030. Le Japon s'est aussi mis de la partie. Il a construit un interféromètre souterrain (et donc moins sensible aux vibrations sismiques) nommé KAGRA. L'interféromètre japonais a participé aux observations des ondes gravitationnelles en réseau avec LIGO et Virgo à partir de mai 2023. En plus de la sensibilité accrue, la détection (quasi) simultanée d'ondes gravitationnelles par trois observatoires situés en différents endroits du globe permet, par triangulation, de mieux localiser dans le ciel l'événement cataclysmique responsable des ondes gravitationnelles.



LIGO et les objets compacts

LIGO a permis de découvrir des paires d'objets compacts en orbite l'un autour de l'autre et d'étudier leur fusion. La majorité des événements détectés par LIGO correspondent à des coalescences de paires de trous noirs stellaires. Ces observations ont révélé l'existence de populations de trous noirs plus massifs que ce que l'on connaissait auparavant par les seules observations électromagnétiques. LIGO a permis de mesurer avec précision leurs masses (entre 2.5 et 140 masses solaires), leurs spins et les distances auxquelles ces fusions se produisent. Ces résultats ont profondément renouvelé les modèles de formation et d'évolution des systèmes binaires compacts. Ils suggèrent l'existence de différents modes de formation (évolution binaire isolée, amas stellaires denses) et fournissent des contraintes inédites sur la physique des étoiles massives.

Éditorial
de Trinh
Xuan Thuan

HIVER 2026



Vue aérienne
de l'observatoire d'ondes
gravitationnelles européen
Virgo, situé près de Pise
en Italie.

Comme son frère américain
LIGO situé dans
les états de Louisiane
et de Washington,
Virgo héberge
un interféromètre à laser
en forme de L, chaque
branche mesurant
3 kilomètres (au lieu de
4 kilomètres pour LIGO).

Dans chaque branche,
un faisceau laser va et vient
dans un vide extrême
entre des miroirs
de 40 kilogrammes chacun,
suspendus aux extrémités
de l'interféromètre.

Les signaux mesurés par LIGO-Virgo-KAGRA constituent une base de données unique pour tester la relativité générale dans des conditions extrêmes. Jusqu'à présent, toutes les observations sont compatibles avec les prédictions de la théorie d'Einstein, y compris lors des phases de fusion des trous noirs. LIGO a également permis d'éliminer certaines théories alternatives de la gravitation et de tester des concepts fondamentaux, tels que la vitesse de propagation des ondes gravitationnelles ou les propriétés des horizons des trous noirs. Ces tests renforcent la relativité générale tout en limitant le champ des possibles des théories de gravité nouvelles.

La naissance de l'astronomie multi-messagers

L'événement GW150914 a donc ouvert une nouvelle fenêtre d'observation pour l'astronomie. Mais il y a plus. Le 17 août 2017, les observatoires LIGO et Virgo (KAGRA n'était pas encore en opération) ont observé une autre onde gravitationnelle appelée GW170817 qui va jouer un rôle historique aussi important que GW150914. Son importance scientifique couvre aussi bien l'astrophysique stellaire que la cosmologie et la physique fondamentale.

GW170817 est la première onde gravitationnelle attribuée sans ambiguïté à la fusion d'une paire d'étoiles à neutrons, confirmant l'existence de tels systèmes, et vérifiant les prédictions de la relativité générale dans un régime extrême. Les deux étoiles à neutrons possèdent chacune un rayon de 14 kilomètres et une masse d'une à deux fois celle du Soleil. Initialement séparées de 300 kilomètres, elles se sont rapprochées en spirale l'une de l'autre et ont tourné de plus en plus vite en générant des ondes gravitationnelles intenses, jusqu'à la fusion finale.

L'étude de GW170817 s'avère aussi remarquable d'un autre point de vue : elle constitue l'acte fondateur de l'astronomie dite « multi-messagers ». Pour la première fois, un même événement a été observé non seulement via les ondes gravitationnelles (LIGO/Virgo), mais aussi via les ondes électromagnétiques : les rayons gamma, les rayons X, la lumière visible, et les ondes radio. Et cela grâce à la forte mobilisation de la communauté astronomique internationale, galvanisée par la découverte des ondes gravitationnelles.

Quelques heures après la détection de l'onde gravitationnelle GW170817, des télescopes au sol et dans l'espace ont pu détecter une contrepartie lumineuse : d'abord un sursaut gamma (une explosion cosmique très brève et très énergétique détectée sous la forme de rayons gamma), puis une autre explosion appelée « kilonova ». Celle-ci est appelée ainsi parce qu'elle est environ 1'000 fois plus lumineuse qu'une nova classique, mais est moins lumineuse qu'une supernova. Cette émission électromagnétique a été localisée dans la galaxie NGC 4993, située à environ 130 millions d'années-lumière de la Terre, dans la constellation de l'Hydre. Ces observations démontrent sans ambiguïté que NGC 4993 est la galaxie-hôte de l'événement GW170817, et qu'une fusion d'étoiles à neutrons émet des ondes gravitationnelles et produit des sursauts gamma courts tout en forgeant des éléments plus lourds que le fer, tels l'or et le platine. Songez que grâce à GW170817 nous savons que la bague à notre doigt est constituée de noyaux d'atomes d'or provenant d'une collision d'étoiles à neutrons !

Cet événement a inauguré une nouvelle façon de faire l'astronomie : l'astronomie multi-messagers, basée non seulement sur les ondes électromagnétiques (la lumière) mais aussi sur les ondes gravitationnelles. Alors que les ondes lumineuses nous renseignent sur les propriétés de la matière autour des objets compacts telles la densité et la température du gaz interstellaire et l'abondance des éléments chimiques, les ondes gravitationnelles nous fournissent des informations complémentaires essentielles sur les déformations de l'espace-temps autour de ces objets compacts. Les observations multi-messagers sont aussi utiles pour la physique fondamentale et la cosmologie. Ainsi, on pourra s'en servir

Éditorial
de Trinh
Xuan Thuan

HIVER 2026

pour tester l'égalité entre la vitesse de la lumière et celle des ondes gravitationnelles, et aussi pour calculer le taux d'expansion de l'univers et son âge.

Les LIGO du futur

Tandis que les LIGO actuels poursuivent leur travail, ceux de la 3^{ème} génération (3G) se profilent déjà à l'horizon. Les détecteurs 3G auront une sensibilité environ 10 fois meilleure, ce qui augmentera le volume de l'Univers observable par un facteur de 1'000. Aux États-Unis, le projet 3G a pour nom *Cosmic Explorer* et est prévu pour 2035. La configuration de son interféromètre sera en L comme LIGO, mais la longueur des bras sera de 40 kilomètres, soit 10 fois plus long. Les Européens ont eux aussi proposé un projet 3G, le *Einstein télescope*, avec des bras de 10 kilomètres, qui sera complémentaire à *Cosmic Explorer*. Les LIGO 3G, conçus pour observer l'univers en ondes gravitationnelles depuis ses débuts jusqu'à aujourd'hui, avec des centaines de milliers, voire des millions de détections d'ondes gravitationnelles prévues par an, permettront l'observation des premières générations de trous noirs, une meilleure compréhension de la matière des étoiles à neutrons, en plus des tests très précis de la relativité générale, et une détermination plus affinée des paramètres cosmologiques de l'univers.

Encore plus impressionnant, il est prévu de construire un LIGO dans l'espace. Pour que la taille de l'interféromètre ne soit plus limitée par le diamètre de la Terre et pour éliminer tout parasite terrestre (comme les ondes sismiques), il n'y a rien de mieux que d'aller dans l'espace. L'Agence spatiale européenne, en coopération avec la NASA, a annoncé le projet de mettre en orbite autour du Soleil un interféromètre spatial géant nommé LISA (acronyme de *Laser Interferometer Space Antenna*) vers 2035. LISA sera constitué de trois satellites spatiaux formant un triangle équilatéral géant et échangeant des faisceaux laser extrêmement précis. Le principe de LISA est le même que celui des interféromètres installés sur Terre, mais cette fois les stations ne sont plus séparées de quelques kilomètres, mais de 2,5 millions de kilomètres ! L'objectif est d'observer des ondes gravitationnelles de basse fréquence, impossibles à détecter depuis la Terre, à cause surtout des ondes sismiques. LISA pourra observer les fusions de trous noirs supermassifs, ceux qui ont des masses de millions, voire de milliards de masses solaires, et non pas des dizaines de masses solaires comme les trous noirs stellaires étudiés par LIGO et Virgo. LISA étudiera aussi les systèmes binaires compacts de naines blanches et d'étoiles à neutrons, et éventuellement des signaux liés à l'univers primordial. LISA ouvrira ainsi dans l'espace une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers, complémentaire à celle des détecteurs terrestres.

En une décennie, LIGO a déjà profondément modifié notre compréhension de l'univers. De la confirmation des ondes gravitationnelles à l'étude de la fusion de paires de trous noirs et d'étoiles à neutrons, en passant par des tests sans précédent de la relativité générale, ses apports scientifiques ont été considérables. LIGO a inauguré une nouvelle ère de l'astronomie, dans laquelle l'Univers n'est plus seulement observé par la lumière, mais aussi « écouté » à travers les vibrations de l'espace-temps. Les futures améliorations des détecteurs et l'arrivée de nouveaux observatoires promettent d'enrichir encore davantage cette formidable révolution scientifique.

Charlottesville, le 21 décembre 2025

Éditorial
de Trinh
Xuan Thuan

HIVER 2026



ASTRONOMER JOHANNES HEVELIUS OBSERVING THE NIGHT SKY (C. 1647), DÉTAIL.



ESAWANNA M. (2013), "MISTIC MOUNTAIN" (2013), DÉTAIL.

Institut
À Ciel Ouvert
 SCIENCE & SPIRITUALITÉ

**RUE DU VIEUX-COLLÈGE 10BIS
 1204 GENÈVE**

+41 22 316 01 91

**FONDATION@INSTITUTACIELOUVERT.SWISS
 WWW.INSTITUTACIELOUVERT.SWISS**



**N'HÉSITEZ PAS
 À DIFFUSER
 CET ÉDITORIAL**

