

“Nous l’avons fait !”

La détection des ondes gravitationnelles : écouter l’univers

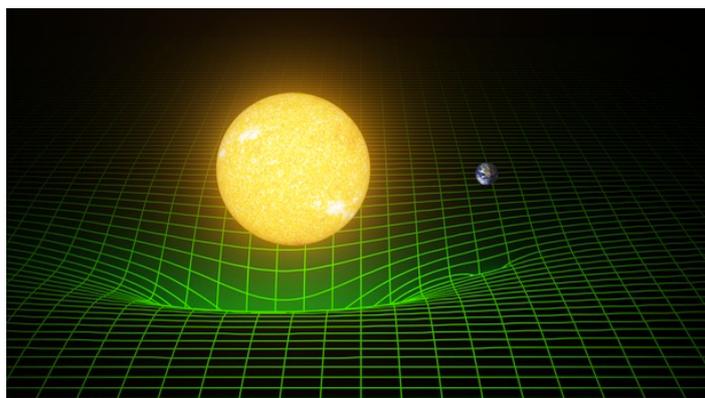
Judith Biernaux (ULg), Mars 2016

“Mesdames et Messieurs, nous avons détecté des ondes gravitationnelles. Nous l’avons fait !” annonce fièrement David Reitze, directeur du laboratoire LIGO à Caltech, lors d’une conférence de presse ce 11 février 2016. Par cette simple phrase, David Reitze lance le début d’une nouvelle ère. Son équipe ouvre une nouvelle fenêtre sur l’univers, et apporte la dernière pièce au puzzle de la théorie de la relativité générale. Pourquoi les ondes gravitationnelles constituent-elles une découverte majeure ? Quelles avancées scientifiques apportera l’astronomie des ondes gravitationnelles ? Et puis, de quoi s’agit-il exactement ?

La relativité générale, une nouvelle vision du cosmos

Au début du XX^{ème} siècle, Einstein propose, avec sa théorie de la relativité générale, une nouvelle conception de la gravité. L’univers se comporte comme un tissu, sur lequel sont posés tous les objets qui le constituent : planètes, étoiles, Ce tissu représente ce qu’Einstein appelle le continuum espace-temps. Lorsqu’on y pose un objet, ce dernier creuse un puits autour de lui, comme on peut le vérifier en plaçant une boule de billard sur une étoffe tenue par les coins. Plus un objet est massif, plus il courbe le tissu. Une boule de billard creuse un puits plus important qu’une balle de golf, mais moins important qu’une balle de bowling. De la même façon, une planète déforme plus fort l’espace-temps autour d’elle que la Lune, mais moins qu’une étoile. Cependant, il n’y a pas que la masse qui compte : la densité de l’objet entre en jeu également. Ainsi, un trou noir, même s’il n’a que la masse du Soleil, produira une courbure très forte dans l’espace-temps, car toute sa masse est concentrée dans un volume réduit.

Einstein affirme que l’attraction gravitationnelle entre les corps est due à cette courbure de l’espace-temps. Un corps léger passant à proximité d’un autre, plus lourd, tomberait dans le puits gravitationnel de celui-ci, de la même façon que la balle de golf glisse vers la boule de billard sur notre tissu. C’est véritablement cette explication de la gravitation qui porte le nom de relativité générale.



La grille représente le continuum espace-temps, déformé par la masse du Soleil. La Terre ressent cette attraction gravifique. Image : LIGO - Caltech.

Concevoir une théorie, c'est bien. La valider, c'est mieux. Pour ce faire, la nouvelle théorie doit fournir des prédictions. Il ne s'agit pas de pouvoirs divinatoires, mais bien de conséquences logiques, mathématiques, et surtout observables, de la nouvelle théorie. Ces prédictions doivent être précises, différer significativement de celles de l'ancienne théorie qu'elle vise à remplacer, et concerner des phénomènes de préférence encore inobservés. Pour la relativité générale, plusieurs prédictions ont été vérifiées rapidement après leur énoncé, comme la perturbation de l'orbite de Mercure. D'autres ont eu besoin de plus de temps, comme par exemple le décalage de la lumière vers le rouge quand elle est émise près d'un objet massif. Détecté dès 1959, ce décalage est aujourd'hui pris en compte dans nos satellites GPS, sans quoi ils fonctionneraient de manière incorrecte. La liste se poursuit, et au cours du vingtième siècle ainsi qu'au début des années 2000, la quasi totalité des prédictions d'Einstein a été vérifiée. L'une d'elles restait encore inobservée : les ondes gravitationnelles.

Des plis dans l'espace-temps !

Puisque l'espace-temps peut se déformer, des ondes peuvent s'y propager. De telles ondes, dites gravitationnelles, naissent quand des objets massifs se déplacent et modifient la courbure de l'espace-temps sur leur passage, en y formant des plis. Cette déformation peut être périodique, par exemple quand deux astres denses tournent l'un autour de l'autre. Elle peut aussi être continue : dans ce cas, elle est produite par tout objet dense en rotation sur lui-même, pour peu qu'il présente une petite imperfection (un "balourd"). Enfin, tout phénomène chaotique, comme l'effondrement d'une étoile en supernova, peut en produire. On parle alors "d'explosion" d'ondes gravitationnelles.

Ces plis sont d'autant plus prononcés que les objets impliqués sont massifs, denses, et qu'ils se déplacent rapidement. Où trouver de tels objets dans l'univers ?



La coalescence de deux astres denses (représentés par les sphères) génère des ondes gravitationnelles. Image : Caltech.

Les meilleurs candidats sont des couples de cadavres stellaires qui tournent l'un autour de l'autre - pulsars binaires ou trous noirs. EN 1974, Hulse et Taylor analysent un pulsar binaire, et montrent que les deux astres se rapprochent. Pourquoi ? En tournant, les deux pulsars, qui sont parmi les objets les plus denses de l'univers, déforment l'espace-temps et génèrent une onde gravitationnelle. Pour émettre cette onde, le couple a besoin d'énergie. Il en puise dans son énergie orbitale, qui a pour rôle de maintenir les pulsars sur leurs orbites respectives. En grignotant leur stock d'énergie orbitale, les deux compagnons se rapprochent. Le taux de

rapprochement mesuré pour ce pulsar binaire correspond exactement à celui prédit par la relativité générale. Cette découverte a valu à Hulse et Taylor le prix Nobel de physique en 1993. Toutefois, il ne s'agit pas d'une détection directe d'ondes gravitationnelles, seulement d'un sérieux indice : les astronomes avaient mesuré les conséquences de l'émission d'ondes gravitationnelles, pas les ondes elles-mêmes.

Comment, alors, les détecter directement ? En se propageant à la vitesse de la lumière, une onde gravitationnelle comprime l'espace-temps dans certaines directions, et l'étire dans d'autres. C'est en 1992 que des scientifiques américains proposent de

construire un gigantesque détecteur, constitué de deux tubes perpendiculaires appelés bras, mesurant chacun 4 kilomètres de long et terminés par un miroir. Au sein de chaque bras se propage un faisceau laser. Après avoir parcouru toute la longueur du bras, les faisceaux sont réfléchis sur le miroir, parcourent le chemin retour et se re-croisent à l'intersection des bras. Ils s'y combinent alors pour former un motif lumineux. Si une onde gravitationnelle passe par là, elle comprime l'espace-temps dans la direction d'un bras, et l'étire dans la direction de l'autre. Un bras s'allonge, l'autre se raccourcit. L'un des faisceaux met alors plus de temps à parcourir son bras que l'autre, et ils arrivent désynchronisés à l'intersection. Le motif lumineux change, et c'est ainsi que l'on détecte l'onde gravitationnelle. Voilà donc l'idée qui aboutit à la construction d'un instrument d'observation des ondes gravitationnelles, baptisé *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*, ou LIGO. Un jumeau européen de LIGO existe en Italie, sous le nom de Virgo. Ces deux observatoires travaillent main dans la main.

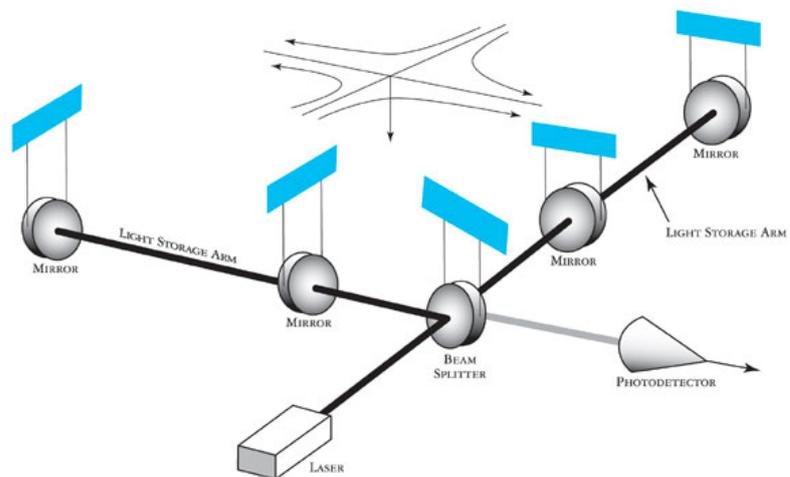


Schéma de l'interféromètre LIGO. Les deux faisceaux lasers sont créés en séparant un unique faisceau en deux, grâce une lame séparatrice.
Image : LIGO - Caltech

Si l'idée paraît simple, la construction d'un tel instrument n'en est pas moins une opération délicate. En effet, cette variation de longueur des bras est estimée à environ un cent-milliardième de la largeur d'un cheveu. Les détecteurs doivent donc être extrêmement sensibles. Cela signifie qu'ils sont capables de repérer la moindre petite vibration dans les environs (chute d'un tronc coupé dans les bois alentours, passage des camions sur l'autoroute non loin, vagues qui s'écrasent sur le rivage voisin, micro-séismes, ...). La localisation du détecteur doit être soigneusement choisie, loin de toute activité humaine et sismique, pour éviter la contamination du signal. Cependant, aucune localisation parfaite n'existe... La solution ? Une astuce mise au point par l'équipe de LIGO : construire deux détecteurs absolument identiques, l'un à Livingston, Louisiane et l'autre à Hanford, Washington, séparés de 3000 kilomètres. Si une perturbation locale parvenait malgré tout à contaminer l'un d'eux, le deuxième ne la ressentirait pas. En revanche, une onde gravitationnelle produirait le même signal sur les deux détecteurs de manière (quasi-)simultanée. Ainsi, les chercheurs peuvent se concentrer sur la recherche de signaux apparaissant en même temps sur les deux détecteurs. La construction et l'opération de LIGO impliquent une collaboration internationale de 15 pays et 83 institutions, avec plus de 1000 membres, se partageant la collecte des données, leur analyse ainsi que la maintenance du détecteur. Sa construction démarre en 1994, pour s'achever cinq ans plus tard. Jusqu'en 2010, LIGO fonctionne sans toutefois parvenir à détecter la moindre onde gravitationnelle. Des travaux sont alors entrepris, visant à améliorer encore la sensibilité du détecteur, jusqu'en septembre 2015 où il peut enfin être relancé. Pendant ce temps, son jumeau Virgo subit le même traitement, mais son redémarrage est prévu pour fin 2016. LIGO assure donc seul l'acquisition de données de septembre 2015 à janvier 2016, période pendant laquelle la première véritable détection d'ondes gravitationnelles a lieu, avant d'être annoncée ce 11 février dernier.

Cette fois-ci, le signal ne provient pas de pulsars qui se rapprochent mais bien d'un couple de trous noirs, pesant respectivement 29 et 36 masses solaires, distant de la Terre d'environ 1,3 milliards d'années-lumière. Ceux-ci sont également en rotation l'un autour de l'autre, se dirigeant petit à petit vers une fusion pour ne plus former qu'un seul trou noir. Au cours de cette spirale, le mouvement des trous noirs génère une onde gravitationnelle, mais c'est surtout lors de la fusion, ou coalescence, que la majeure partie du signal est émise.

Une nouvelle facette de l'univers à découvrir

L'annonce de David Reitze ne fournit pas seulement une preuve observationnelle supplémentaire (une cerise sur le gâteau) à la relativité générale. À ce jour, l'observation avec des télescopes classiques permet de recevoir la lumière provenant d'objets célestes sous toutes ses formes (rayons X, ondes radio, infra-rouge, ultraviolet ou visible). Si les télescopes donnent à l'astronomie le sens de la vue, LIGO et Virgo sont en quelques sortes son ouïe. Les ondes gravitationnelles sont un vecteur d'information sur des phénomènes extrêmes, jusqu'alors inobservés, et permettent d'en étudier directement la dynamique. Par exemple, dans le cas présent, il est possible d'étudier de plus près le phénomène de coalescence de deux trous noirs.

C'est donc une nouvelle fenêtre sur l'univers qui vient de s'ouvrir. Outre la fusion de trous noirs, les astronomes s'attendent aussi à détecter des ondes gravitationnelles de type continu (objets asymétriques en rotation) ou "en explosion" (supernovae), ainsi qu'un fond diffus datant des premiers instants de l'univers. Chacun de ces types d'ondes gravitationnelles produit un signal différent, avec son empreinte particulière, reconnaissable. Les astronomes disposeraient alors d'une toute nouvelle source d'informations sur ces phénomènes, ainsi que sur la prime enfance de l'univers. Pour poursuivre le travail de LIGO et de Virgo, huit instituts de recherche européens se sont réunis pour proposer un détecteur "nouvelle génération", pour les années 2020, baptisé *Einstein Telescope*. Toujours en cours d'étude, ce projet compterait trois bras de 10 km, et aurait une sensibilité encore plus fine que celle de ses grands frères LIGO et Virgo, grâce à un site enfoui profondément sous terre et à un refroidissement cryogénique des miroirs.

Pourquoi ne pas rechercher les ondes gravitationnelles depuis l'espace ? L'Agence Spatiale Européenne prépare une mission baptisée eLISA (*Evolved Laser Interferometer Space Antenna*), constituée de trois satellites destinés à observer les ondes gravitationnelles depuis l'espace. Le 3 décembre dernier, un satellite-test des technologies de eLISA a été lancé et est à présent en opération. Ce dernier porte le nom bien choisi de LISA Pathfinder, ou "l'éclaireur de LISA". Il est également question, depuis les années 1970, d'utiliser comme détecteur d'ondes gravitationnelles des pulsars lointains. En effet, ces objets émettent des signaux lumineux, ou "pulses", à intervalles de temps extrêmement réguliers. En surveillant ces pulses depuis des radiotélescopes terrestres, il est possible de détecter des retards d'arrivée dus au passage d'ondes gravitationnelles entre le pulsar et le radiotélescope. Cette méthode, implémentée par trois projets (*European Pulse Timing Array*, *Parkes Pulsar Timing Array* et *NanoGrav*) réunis sous le nom d'IPTA (*International Pulsar Timing Array*), est complémentaire aux détecteurs directs comme LIGO, Virgo et eLISA car ils sont sensibles aux ondes gravitationnelles de plus basses fréquences. De son côté, la Chine propose pour les années 2030 deux projets de détecteurs spatiaux semblables à eLISA, *Taiji* et *Tianqin*, qui diffèrent l'un de l'autre par le design, les cibles, surtout par.... le budget !

Grâce aux détecteurs présents et futurs, depuis l'espace comme depuis la Terre, les astronomes ont du pain sur la planche, et les ondes gravitationnelles n'ont certainement pas fini de faire parler d'elles !

Pour aller plus loin...

- Site Web de la Collaboration Scientifique de LIGO, pour de nombreuses ressources : <http://www.ligo.org/>
- Vidéo officielle de la conférence de presse du 11 février 2016 : <https://www.youtube.com/watch?v=aEPlwEJmZyE>
- Site Web du détecteur Virgo : <http://www.virgo-gw.eu/>
- Un article très complet de *Science & Vie* : <http://www.science-et-vie.com/2016/02/decouverte-des-ondes-gravitationnelles-une-revolution-pour-lastronomie/>
- Un excellent résumé de *Pour la Science* : http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actu-ligo-une-detection-directe-et-historique-d-ondes-gravitationnelles-36521.php
- Le Site Web du projet eLISA : <https://www.elisascience.org/>
- Une excellente chaîne YouTube pour mieux comprendre les objectifs de eLISA : https://www.youtube.com/watch?v=a_zMKF66tzo&list=PLM05cB3oZeswHDARsVsx6ZNvUDdo_g9cd
- Le Site Web du projet EPTA : <http://www.epta.eu.org/>
- Un article du CNES sur LISA Pathfinder : <https://lisa-pathfinder.cnes.fr/>
- Un article du *Ciel* sur les pulsars comme horloges et détecteurs d'ondes gravitationnelles : http://www.ago.ulg.ac.be/PeM/Docs/leciel_pulsartiming.pdf
- Un commentaire sur les recherches de l'IPTA : <http://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/searching-for-the-gravitational-waves-ligo-can-t-hear/>
- Le site Web du *Einstein Telescope* : <http://www.et-gw.eu/>
- Un communiqué de *Nature* sur les projets chinois de détecteurs : http://www.nature.com/news/chinese-gravitational-wave-hunt-hits-crunch-time-1.19520?WT.mc_id=TWT_NatureNews