



Première observation d'ondes gravitationnelles

© NASA

Une fois encore les observations prouvent qu'Einstein avait raison. L'une des prédictions de la théorie de la relativité générale d'Einstein concerne les ondes gravitationnelles. Ces ondes qui touchent la fabrique même de l'espace sont extrêmement difficiles à détecter et on n'avait que des preuves indirectes de leur existence en constatant les pertes d'énergie dans des systèmes tels qu'un pulsar double. En 2014 on avait cru voir leur manifestation dans les « modes B » de polarisation du fond micro-onde cosmologique mesuré depuis l'Antarctique avec l'expérience BICEP2, mais ce n'était qu'une illusion due aux poussières interstellaires de la Voie lactée. Cette fois, il s'agit bien de la détection directe du passage d'une onde gravitationnelle avec les interféromètres ultrasensibles LIGO.

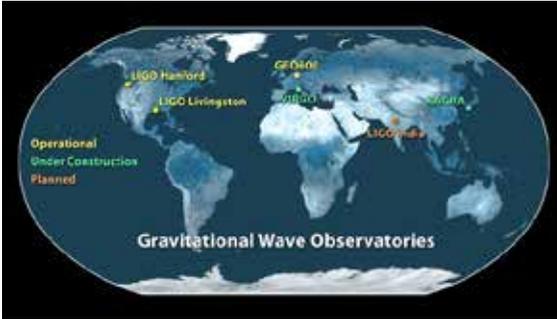
Tout avait commencé en septembre 2015 lorsque des rumeurs se propagèrent sur les médias sociaux selon laquelle LIGO venait de déceler des ondes gravitationnelles à une, voire deux occasions. Cela faisait immédiatement suite à une importante mise à jour des détecteurs qui avait demandé plusieurs

années de travail. Muni du nouvel équipement, LIGO devait théoriquement permettre des détections relativement fréquentes d'ondes gravitationnelles. La rumeur pouvait donc être prise au sérieux. Le doute se dissipa lorsque l'équipe LIGO annonça une conférence de presse pour une communication importante. Cette fois on n'avait pas affaire aux *teasers* habituels de la NASA qui sont censés nous accrocher avant de nous révéler la n-ième preuve de l'action de l'eau sur un caillou martien, ou la découverte de la plus exotique des exoplanètes parmi celles qui sont ceci sans être cela.

Le 11 février, les scientifiques annonçaient que pour la première fois on avait pu observer la fusion de deux trous noirs et ce au moyen des déformations de l'espace-temps.

L'Univers s'ouvrait au travers d'une nouvelle fenêtre¹, à côté de celles du spectre électromagnétique, mais aussi des neutrinos et des rayons cosmiques, sans parler des météorites.

¹ Cela n'empêche pas certains de rester aveugles. L'annonce de la découverte sur CNN côtoyait celle d'un rappeur soutenant que la Terre est plate.



Le réseau global des détecteurs d'ondes gravitationnelles ne se limite pas aux deux LIGO. La multiplication des sites devrait permettre une meilleure triangulation des sources et une plus grande fiabilité. (Caltech/MIT/LIGO)

ou quelques centièmes du diamètre d'un atome par rapport à celui du Soleil.

Les interféromètres LIGO munis des nouveaux détecteurs ont travaillé en tandem pendant 1 100 heures entre leur mise en service en septembre 2015 et la fin du premier « *run* » en janvier 2016. Un deuxième *run* est prévu cette année et bénéficiera de diverses améliorations de l'équipement ainsi que de l'expérience glanée lors du premier *run*. Gageons que le moral de la collaboration sera au zénith pour compléter ce programme.

D'autres observatoires d'ondes gravitationnelles sont en activité ou vont bientôt l'être. La conjugaison de plus de deux sites permettra de préciser par triangulation la position des sources observées tout en assurant les confirmations souhaitées. Le 14 septembre, seuls les deux LIGO d'Amérique étaient en mesure d'observer la fusion des trous noirs.

LIGO opère sur deux sites, Hanford que voici dans l'est de l'état de Washington, et Livingston en Louisiane. (Caltech/MIT/LIGO)

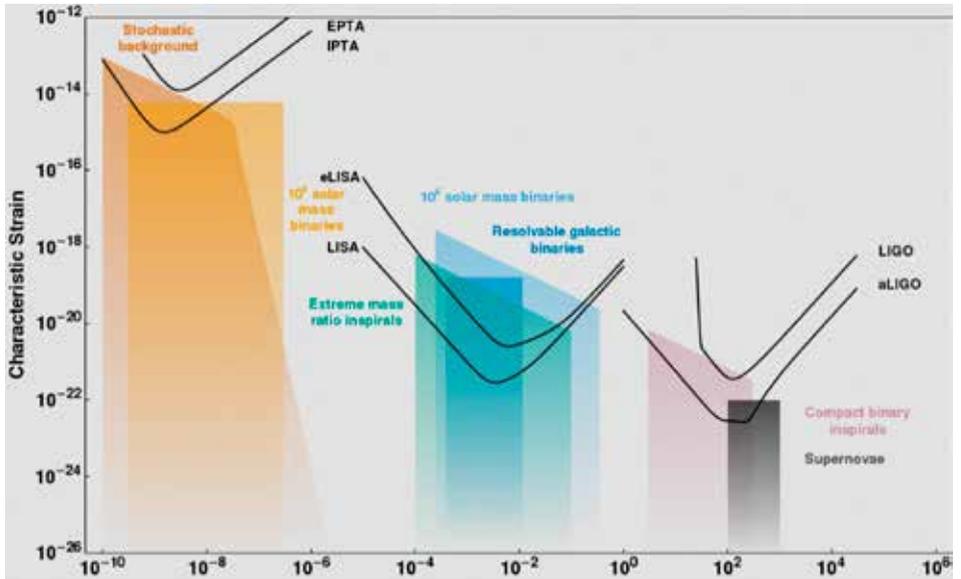


C'était aussi la première fois que l'on pouvait observer directement des trous noirs et, bien évidemment, c'était une nouvelle et magnifique confirmation de la théorie d'Einstein.

Les ondes gravitationnelles ne sont pas des ondes électromagnétiques (radio, infrarouge, visible, ultraviolet, X, gamma...). Ce sont des vibrations de l'espace-temps engendrées par le mouvement – ou plutôt l'accélération² – de corps massifs. De la même façon que des charges électriques en mouvement engendrent des ondes électromagnétiques (par exemple des électrons qui oscillent dans une antenne), des masses en mouvement émettent des ondes gravitationnelles qui déforment l'espace environnant, qui se propagent à la vitesse de la lumière et dont l'énergie s'amenuise en raison inverse du carré de la distance.

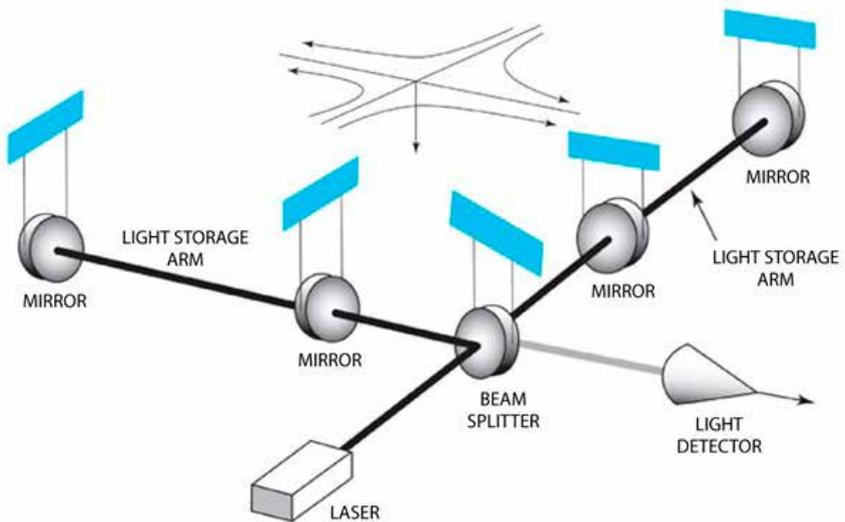
Si on s'imagine l'espace constitué d'un matériau élastique les ondes seraient des vibrations se propageant dans ce matériau et affectant tout ce qui s'y trouve. Lorsqu'une onde traverse un objet, celui-ci se déforme. Le principe des détecteurs d'ondes gravitationnelles est de mesurer ces déformations. Celles-ci sont infimes. Une onde comme celle qui a été détectée et que l'on peut qualifier d'exceptionnelle, puisqu'aucune autre n'a été observée, provoque une variation relative des dimensions de 10 à la puissance -21, soit une déformation d'une petitesse inimaginable, de l'ordre d'un centième de millimètre sur une année-lumière,

² Une accélération affecte tout mouvement autre que rectiligne uniforme. Ainsi le mouvement de la Terre est une accélération permanente autour du Soleil.



Sensibilité en fonction de la fréquence de différents observatoires d'ondes gravitationnelles, existants ou en projet. Les ordres de grandeurs de phénomènes produisant ces ondes sont indiqués.

Schéma d'un interféromètre. Les faisceaux font des allers-retours dans les bras de stockage avant d'être recombinés pour la détection. (Caltech/MIT/LIGO)



Le principe de LIGO est de comparer des distances dans deux directions perpendiculaires. La précision requise est obtenue en utilisant un interféromètre extrêmement stable et précis. Un faisceau lumineux est divisé avant de parcourir de longs trajets dans deux directions orthogonales puis recombéné. La superposition des ondes montre la plus infime perturbation du système.

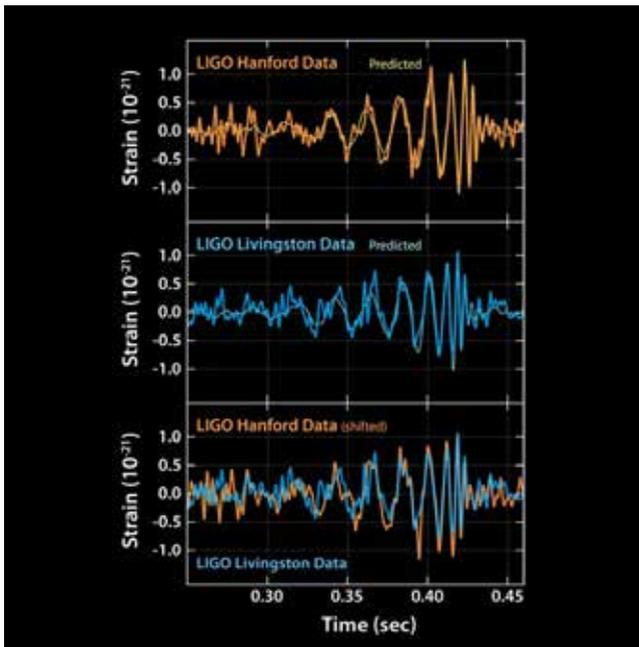
Les sources principales d'ondes gravitationnelles sont celles qui mettent en jeu les plus grandes masses et les plus fortes accélérations. Ce sont donc les objets binaires très massifs et très proches en rotation rapide, les collisions titanesques, les effondrements d'étoiles en trou noir... On aura parmi les émetteurs les plus puissants les collisions et fusions d'étoiles à neutrons, a fortiori les fusions de trous noirs, sans oublier les supernovæ massives. Les couples serrés émettent de façon continue avec une puissance nettement moindre. La déperdition d'énergie entraîne un rétrécissement de l'orbite, une spirale infernale qui mène à l'événement final catastrophique et à un sursaut d'ondes gravitationnelles.

Un des scénarios les plus fantastiques serait sans doute celui de la fusion de deux trous noirs supermassifs de plusieurs millions ou milliards de masses solaires suite à une collision de galaxies.

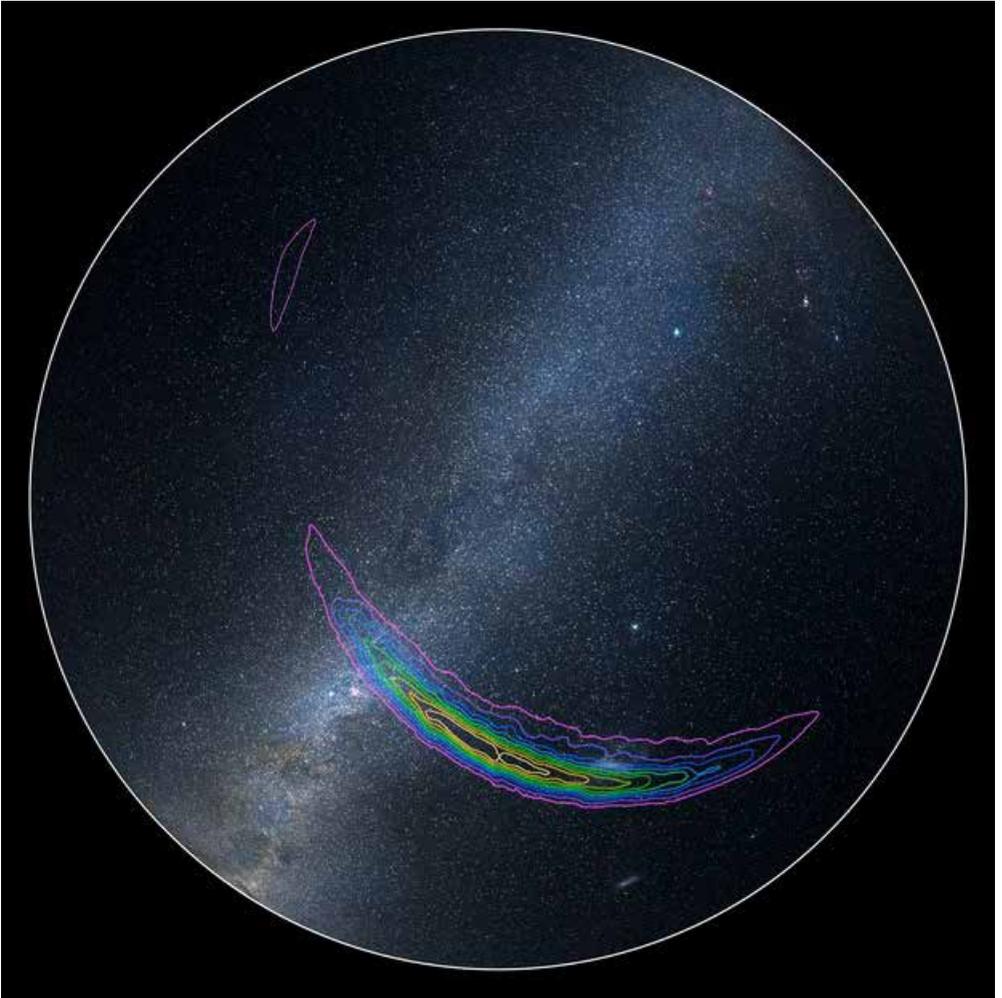
Dans le cas de l'onde détectée par LIGO, les scientifiques pointent le doigt vers un phénomène plus banal, la coalescence de deux trous noirs stellaires de 29 et 36 masses solaires situés entre 700 et 1 600 millions d'années-lumière. Le trou noir résultant pèserait 62 soleils. Ce phénomène, durant sa brève manifestation, a rayonné une puissance bien supérieure à l'émission de tout l'Univers observable, l'équivalent en énergie gravitationnelle de trois masses solaires.

Le schéma ci-dessous montre que le signal s'est résumé à quelques oscillations sur quelques centièmes de seconde et qu'il a pu être fidèlement modélisé.

On envisage encore d'importants gains de sensibilité de l'instrumentation. Des observatoires spatiaux sont en projet. L'ESA vient d'ailleurs de lancer un premier satellite pour tester le concept. Il sera alors possible d'observer directement l'intérieur des supernovæ, des étoiles à neutrons.



*Les signaux détectés par les deux observatoires LIGO sont comparés avec les courbes théoriques correspondant à la fusion de deux trous noirs. Le troisième panneau compare les deux signaux entre eux et confirme que c'est bien le même événement qui a été observé.
(Caltech/MIT/LIGO)*



La zone du ciel où se trouve la source du signal observé par LIGO le 14 septembre. Les lignes de couleur représentent des niveaux de confiance, de 90% en pourpre à 10 % en jaune.

Le délai temporel de 7 millisecondes entre les sites de Livingston (Louisiane) et Hanford (Washington), permettait de localiser la source dans un anneau, trace d'un cône dont l'axe passe par les deux sites. L'analyse de variations d'amplitude du signal a permis de rejeter certaines sections de l'anneau. On peut considérer cela comme une image de la source – à très mauvaise résolution...

*L'addition de sites supplémentaires donnera des triangulations bien meilleures pour les prochains événements que l'on attend avec impatience.
(Caltech/MIT/LIGO)*