



Les ondes gravitationnelles

JP. Maratrey - juillet 2009-MAJ mai 2019

1 - Historique

L'idée de l'existence des ondes gravitationnelles remonte à 1905.

Henri Poincaré (1854-1912) les envisage comme des « ondes gravifiques ».

Albert Einstein (1879-1955) précise leur validité avec sa théorie de la relativité générale. Quoique la réalité physique de ces ondes fut largement débattue, ce n'est qu'en 1957 que cette réalité physique fut acceptée.

Entre 1974 et 1993, l'étude de la légère diminution de la vitesse de rotation d'un pulsar amena un indice convaincant en faveur de l'existence des ondes gravitationnelles.

Dès lors, des instruments ont été imaginés et construits pour leur détection effective, directe.

En 2015, les instruments LIGO (USA, Louisiane et Washington) détectent conjointement une onde gravitationnelle due à la coalescence de deux trous noirs situés à 1,3 milliards d'années-lumière.

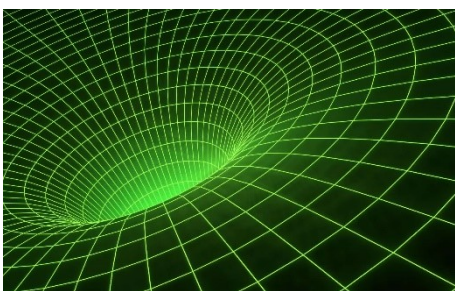
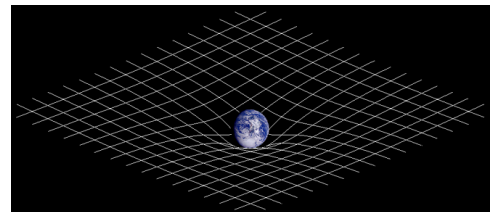


En 2017, le prix Nobel de physique est décerné à Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Storn pour leur contribution décisive à la détection directe des ondes gravitationnelles.

2 - C'est quoi, une onde gravitationnelle ?

D'après la relativité générale d'Einstein, la gravité est le résultat de la déformation de l'espace et du temps (l'espace-temps) au voisinage d'une masse importante. La forme de l'espace-temps dépend de la matière présente.

L'espace-temps est très rigide. Il ne se déforme qu'avec des masses importantes. Plus la masse est importante, plus la déformation est grande. Une étoile la déforme peu, mais suffisamment pour contraindre des planètes. Une étoile à neutrons est encore plus dense et massive.



Un trou noir l'est tellement qu'il « troue » littéralement l'espace-temps.

Les masses très importantes, comme les étoiles à neutrons et pire, les trous noirs, lorsqu'elles se déplacent dans l'espace-temps, y créent des vagues à la manière d'un caillou jeté dans une mare.

A leur passage, les ondes dilatent et contractent l'espace-temps, et plus particulièrement l'espace, puisque c'est lui qui sera mesuré avec les instruments.

Remarquons qu'en raison du fait que tout est perpétuellement traversé par des ondes gravitationnelles, aucun corps, aussi rigide soit-il, n'est parfaitement indéformable.

En se rencontrant, deux trous noirs génèrent des ondes gravitationnelles qui se déplacent dans l'espace à la vitesse de la lumière.

Le même phénomène est produit lors d'une explosion d'une étoile en supernova.

La perte d'énergie d'un système de deux trous noirs provoque leur rapprochement, et inéluctablement leur fusion.

Le rapprochement s'accélère à mesure que les astres s'approchent l'un de l'autre. Plus les astres sont proches, plus la vitesse est grande, et plus les ondes gravitationnelles émises sont importantes.

3 - Les effets des ondes gravitationnelles

Il faut bien se rendre compte que les variations de l'espace engendrées (même par la fusion de deux trous noirs) sont extrêmement petites. La déformation est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la vitesse de la lumière.

La petitesse de ces variations explique les difficultés pour leur détection. Il a en effet fallu mesurer un déplacement de l'ordre de 10^{-18} mètre !!! ¹

La polarisation des ondes permet d'avoir une petite idée de sa source : son orientation grossière par rapport à l'observateur et sa nature : les trous noirs, les étoiles à neutrons, leur coalescence, les supernovas...

4 - Les détecteurs

a. Décroissance orbitale des pulsars binaires

Il en a été question plus haut. En 1974, un système binaire d'étoiles à neutrons a été étudié, en particulier sa période orbitale. Il s'avère que cette période diminue en accord parfait avec un rayonnement gravitationnel. C'est l'une des premières mises en évidence des ondes gravitationnelles. Les auteurs sont Russell Hulse et Joseph Taylor. Ils ont reçu le prix Nobel de physique en 1993 pour ces travaux.

Ils ont prédit une fusion des deux étoiles dans 300 millions d'années ! (la date exacte n'est pas précisée...).

b. Interféromètres terrestres

Ils sont au nombre de 5 :

- LIGO : projet américain composé de trois interféromètres de 4 km, situés aux Etats-Unis dans l'état de Washington et en Louisiane. L'analyse des données est internationale (900 scientifiques dans le monde).
- VIRGO : projet franco-italien. L'interféromètre de 3 km est situé en Italie. Les Pays-Bas, la Pologne et la Hongrie ont rejoint les deux pays d'origine.
- GEO600 : projet germano-britannique. Plus petit avec ses bras de 300 mètres, il est situé à Hanovre en Allemagne.

Les détecteur LIGO et VIRGO coopèrent étroitement depuis 2007, en échangeant leurs données, entre autres pour la confirmation des détections. Les publications sont communes.

Tous ces détecteurs fonctionnent sur le même principe : mesurer des variations de longueur des bras des instruments.

¹ La taille d'un neutron est d'environ 10^{-15} mètres...

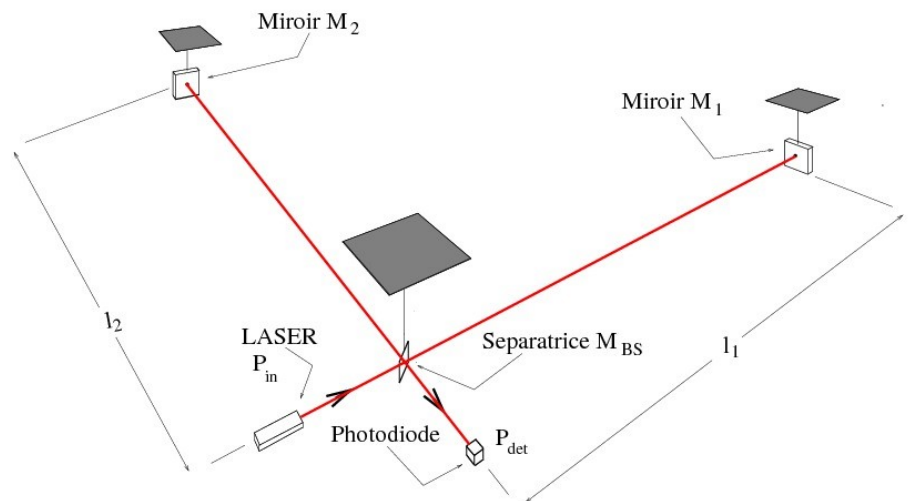
5 - Comment ça marche ?

Nous l'avons vu, LIGO et VIRGO coopèrent.

Cette coopération est nécessaire : ces détecteurs ne sont pas directionnels (ils observent l'ensemble du ciel) et cherchent des signaux d'amplitudes extraordinairement faibles, rares et perturbés par des bruits instrumentaux et des vibrations d'origines très variées. Ainsi, seule la détection simultanée d'une onde gravitationnelle dans plusieurs instruments permet de conclure à une découverte et d'obtenir des informations sur la source de ce signal.

Cette coopération est nécessaire : ces détecteurs ne sont pas directionnels (ils observent l'ensemble du ciel) et cherchent des signaux d'amplitudes extraordinairement faibles, rares et perturbés par des bruits instrumentaux et des vibrations d'origines très variées. Ainsi, seule la détection simultanée d'une onde gravitationnelle dans plusieurs instruments permet de conclure à une découverte et d'obtenir des informations sur la source de ce signal.

Pour décrire ces instruments, nous prendrons comme exemple l'interféromètre VIRGO, sachant que les autres fonctionnent avec le même schéma.



En voici le principe

Le but de cet instrument est de mesurer très exactement les longueurs l_1 et l_2 . Si une onde gravitationnelle passe, elle va modifier ces longueurs.

Si l'onde est parallèle à l'axe $M_{BS}-M_1$, c'est la longueur l_1 qui va être modifiée, et pas l_2 .

Si l'onde est parallèle à l'axe $M_{BS}-M_2$, c'est la longueur l_2 qui va être modifiée, et pas l_1 .

Si l'onde est quelconque, les deux longueurs seront plus ou moins modifiées.

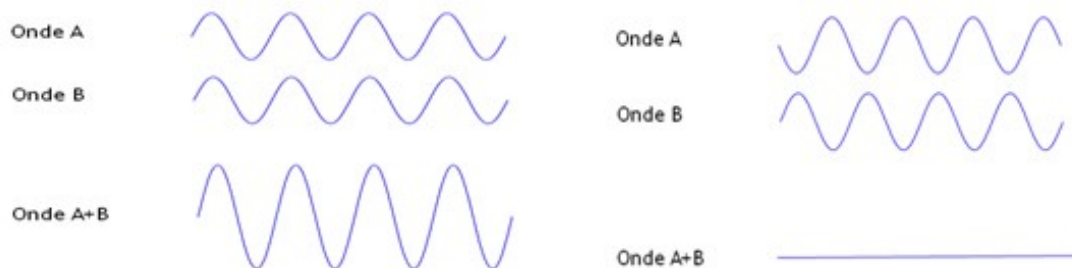
Un générateur laser P_{in} envoie un rayon cohérent sur la lame séparatrice M_{BS} inclinée à 45°. Comme son nom l'indique, cette lame sépare le faisceau laser en deux faisceaux perpendiculaires.

L'un est envoyé vers le miroir M_1 , l'autre vers le miroir M_2 .

Les distances l_1 et l_2 sont de 3 km (4 km pour les interféromètres américains LIGO).

M_1 et M_2 renvoient leurs faisceaux respectifs vers la lame séparatrice, où ils interfèrent. Le rayon est envoyé sur une photodiode P_{det} , qui analyse l'interférence.

C'est quoi une interférence ?



Deux ondes en phase s'additionnent.

Deux ondes en opposition de phase s'annulent.

Si l_1 est égal à l_2 , alors les rayons sont en phase, et ils s'additionnent. Les distances parcourues par le laser sont identiques. Le résultat est une plage de lumière claire.

Si l_1 est différent l_2 , du fait du passage d'une onde gravitationnelle qui modifie les longueurs, alors l'interférence donne une plage plus sombre, jusqu'à s'éteindre complètement si les deux rayons sont en opposition de phase.

La technologie

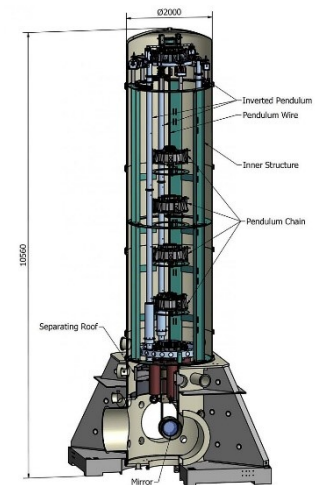


Comme les distances à mesurer sont extrêmement faibles, tout l'instrument est isolé des vibrations terrestres de toutes sortes.

Les miroirs de 35 cm de diamètre sont maintenus avec des systèmes de suspension sophistiqués, à la limite des technologies actuelles (maintenus par de fins fils de verre). Ils sont enfermés dans une enceinte sous vide de 10 mètres de hauteur.

La pureté du verre utilisé pour les miroirs, la précision de la forme et du dépôt réfléchissant font que seul 0,002% de la lumière incidente est perdue.

Les miroirs sont équipés d'optique adaptative pour compenser la turbulence (faible mais présente) sur les trajets des lasers.



Les rayons laser circulent dans des tubes de 120 cm de diamètre, maintenus sous le vide extrême de 10^{-12} atmosphère, soit un millième d'un milliardième d'atmosphère. C'est la plus grande enceinte à vide d'Europe, avec un volume total de 6 800 m³.

La source laser doit être très stable et puissante. Elle fait actuellement 200 W.

6 - Premières détections

La première détection directe d'ondes gravitationnelles fut observée par les chercheurs du LIGO (USA) le 14 septembre 2015 et publiée le 11 février 2016.

Elle était due à la fusion de deux trous noirs, dans la direction approximative du grand nuage de Magellan dans l'hémisphère sud, mais bien plus lointaine. L'imprécision de la localisation est dû au fait que seulement deux instruments ont détecté l'évènement.

Le signal a duré un peu plus de 0,2 secondes, et fut nommé GW150914 : GW pour Gravitational Wave (Onde gravitationnelle), 150914 étant la date de détection au format US.

Il a été observé par les deux sites LIGO américains séparés d'environ 3 000 km, avec un décalage de 7 millisecondes, compatible avec une propagation des ondes à la vitesse de la lumière.

Les études statistiques du bruit de fond des instruments avant et après l'évènement montrent une probabilité de réelle détection de 99,99998 % !

Pour ce premier évènement, VIRGO était à l'arrêt et n'a donc rien détecté. GEO600 est trop peu sensible pour avoir détecté quoi que ce soit.

L'étude de l'origine du phénomène indique la fusion de deux trous noirs situés à 1,3 milliards d'années-lumière, de 36 et 29 fois la masse du Soleil. Le trou noir résultant a une masse de 62 masses solaires. Dans la fusion, le système a donc perdu 3 masses solaires. Cette masse a été convertie en ondes gravitationnelles en accord avec la théorie de la relativité ($E=mc^2$).

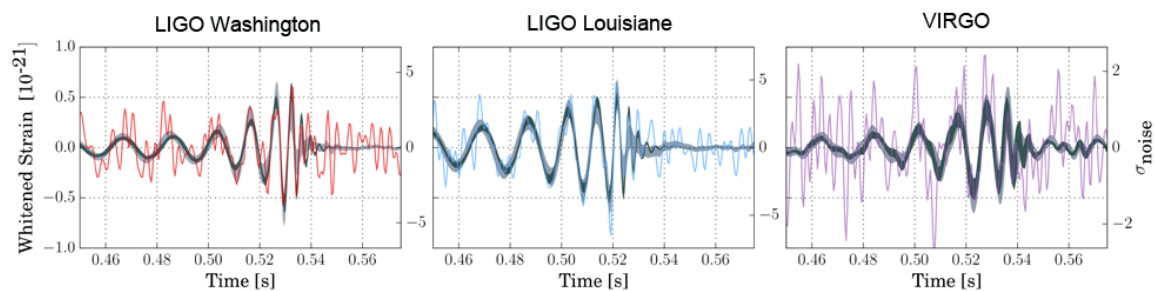
Peu avant la fusion, les deux trous noirs tournaient l'un autour de l'autre à 350 km de distance, et à près de 180 000 km/s, soit 60% de la vitesse de la lumière.

Cette détection marque aussi la première preuve observationnelle de l'existence des trous noirs et de la possibilité de leur coalescence.

La seconde détection d'appelle GW151226 et date donc du 26 décembre 2015. Elle a été réalisée par les deux LIGO. Les deux trous noirs avaient 14,2 et 7,5 masses solaires, et le trou noir résultant 20,8 masses solaires. La différence de 0,9 masses solaires a été convertie en ondes gravitationnelles. La confirmation date du 15 juin 2016.

Deux autres détections par LIGO ont été faites les 4 janvier 2017 et 8 juin 2017.

La suivante est réalisée en collaboration entre les deux équipes de LIGO et VIRGO le 14 août 2017. Les deux trous noirs de 30,5 et 25,3 masses solaires ont fusionné en un trou noir de 53,2 masses solaires, avec une perte de 2,7 masses solaires. Avec un instrument supplémentaire, les mesures sont un peu plus précises. La distance de l'évènement est évaluée à 1,76 milliards d'al. Les graphiques ci-dessous montrent les différences entre le bruit et le signal, faibles, mais réelles.



D'autres détections ont suivi, de coalescences de trous noirs ou d'étoiles à neutrons. Ce sont les évènements produisant les ondes gravitationnelles les plus intenses qui sont aujourd'hui détectées.

Aller plus loin demandera de gros progrès dans l'instrumentation.

7 - Et demain ?

De même que le photon est le vecteur de la force électromagnétique, le « graviton » serait le vecteur de la force de gravité. Cette particule de masse nulle est prévue par la théorie mais reste hypothétique à ce jour.

La détection d'ondes gravitationnelles est un premier tout petit pas vers une mise en évidence du graviton (s'il existe). De gros progrès devront encore être réalisés pour ne serait-ce qu'imaginer une expérience permettant de le détecter...

La première lumière électromagnétique de l'univers a été émise environ 380 000 ans après le Big-Bang (c'est le fond cosmologique).

La détection d'un fond de type gravitationnel (et non électromagnétique) permettrait d'énormes progrès dans la connaissance des premières fractions de secondes de l'univers. En effet, ce rayonnement gravitationnel primordial a été émis 10^{-22} secondes après le Big-Bang.

L'amélioration commencera par la multiplication des instruments terrestres. Un troisième LIGO est en prévision en Inde.

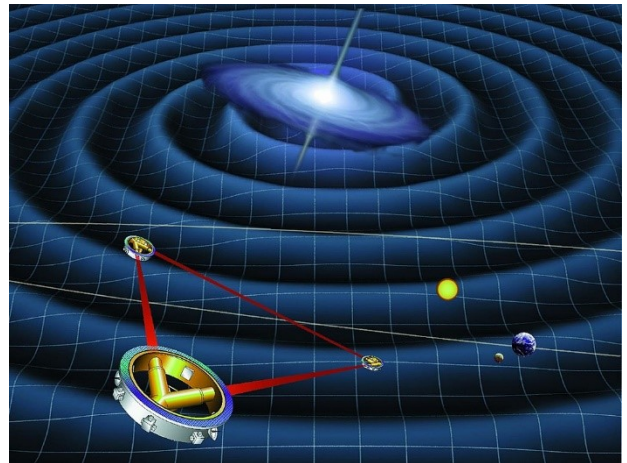
On a vu que le plus gros problème des instruments terrestres est l'élimination des vibrations. Vient alors à l'idée d'envoyer des interféromètres dans l'espace pour s'en affranchir.

Le projet européen **e-Lisa** sera composé de trois satellites formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de km de côté, et tournant de concert autour du Soleil.

Le lancement est prévu en 2032.

Si tout va bien, il permettra :

- D'améliorer la sensibilité aux ondes gravitationnelles.
- De mieux comprendre la formation des étoiles binaires et multiples dans la Voie Lactée.
- De détecter la création des toutes premières étoiles.
- De tester encore la relativité générale.
- D'observer les débuts de l'univers, avant la formation du fond cosmologique, entre le Big-Bang et 380 000 ans après.



Projet eLISA (Européen Laser Interferometer Space Antenna)

A consulter pour plus de détails :

<https://youtu.be/4GbWfNHtHRg>

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2016/02/10/la-lumiere-gravitationnelle-1/>

Compléments :

La force électromagnétique et la force gravitationnelle (d'après JP. Luminet).

La force gravitationnelle est extrêmement petite. Quelques exemples :

- Plaçons deux neutrons à 1 cm l'un de l'autre. Ils sont soumis à deux forces, la force électromagnétique qui les fait se repousser, et la force gravitationnelle qui les fait s'attirer. La première est 10^{37} fois supérieure à la seconde !
- Construisons un oscillateur gravitationnel composé de deux masses de 1 kg à 1 mètre de distance, et qui oscillent de 1 cm 100 fois par seconde. La puissance gravitationnelle produite est si faible qu'il faudrait autant d'oscillateur de ce type qu'il y a de particules dans notre planète pour alimenter une seule ampoule de 50 W.
- Un autre oscillateur gravitationnel pourrait être confectionné avec une barre d'acier de 20 mètres de long, pesant 500 tonnes, et tournant autour de son centre 5 fois par seconde, c'est-à-dire à la limite de rupture de l'acier. La puissance gravitationnelle produite est de 10^{-29} W.
- Dans le système solaire, pour allumer une simple ampoule électrique, il faudrait 50 milliards de météorites de 1 km de diamètre tombant sur Terre à 10 km/s.

Pour générer des ondes gravitationnelles significatives, il faut se tourner vers des astres très compacts comme des étoiles à neutrons ou des trous noirs. De plus ces astres doivent se déplacer à des vitesses proches de celle de la lumière. C'est pourquoi les coalescences de trous noirs ou d'étoiles à neutrons sont de bons candidats. Une explosion de supernova également, à un moindre niveau.