

Les ondes gravitationnelles

PRINCIPE



Issues d'événements cosmiques spectaculaires, elles parcourent l'Univers en déformant l'espace-temps. Pour découvrir ces ondes gravitationnelles, Einstein a imaginé une histoire d'équivalence, masse, gravitation, accélération ; et des scientifiques américains de Ligo ont bâti des instruments géants...

La théorie de la relativité générale

PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

→ La trajectoire de la lumière est courbée par la gravitation

En chute libre, nous ne sentons pas notre poids et nos objets proches (lunettes, clés...) tombent de la même manière que nous (vitesse, trajectoire...), comme si l'accélération de la chute effaçait le champ de gravitation local... Si cette accélération peut effacer localement la gravitation, elle pourrait aussi en créer l'apparence alors qu'il n'y en a pas ? C'est le principe d'équivalence d'Einstein.

Or, ce principe implique que la lumière, bien que de masse nulle, ne se propage pas de façon rectiligne : un faisceau de lumière traversant un ascenseur en élévation, parallèlement à son plancher, atteindra la paroi opposée de la cabine sur un point plus proche du plancher que l'orifice de départ.

GRAVITATION

→ La gravitation n'est pas une force mais une manifestation de la courbure de l'espace-temps

Mais qu'est-ce que la gravitation ? Selon Newton, c'est une force qui attire des corps entre eux, sous l'effet de leur masse : la Terre tourne ainsi autour du Soleil qui exerce sur elle une force gravitationnelle.

Pour Einstein, et son principe d'équivalence : la Terre tourne autour du Soleil parce qu'elle se soumet à la configuration de l'espace-temps, lequel est localement courbé par la masse du Soleil.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

→ La forme de l'espace-temps dépend de la matière qui s'y loge

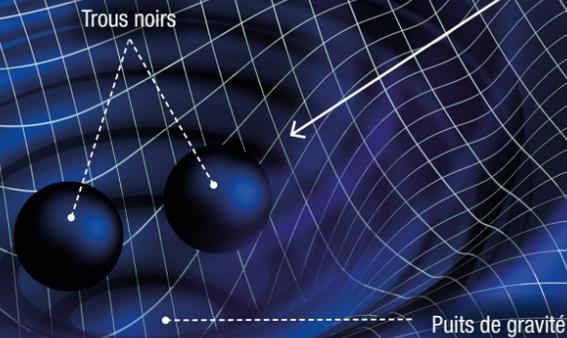
Cette courbure de l'espace-temps peut être calculée, en fonction de la distribution des masses, dans une équation à double sens : la courbure (G) de l'espace-temps ($\mu\nu$) dicte le mouvement de la matière (T) qui le compose ; et la matière dicte la déformation de l'espace-temps.

LES ONDES GRAVITATIONNELLES

→ L'accélération de la matière ondule l'espace-temps

Et si la masse de la matière était accélérée, pourrait-elle rayonner des ondes comme une charge électrique accélérée émet des ondes électromagnétiques ?

Voici le principe des ondes gravitationnelles (OG) qu'Einstein identifie à des ondulations de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière : au passage d'une OG, l'espace se dilate puis se contracte.

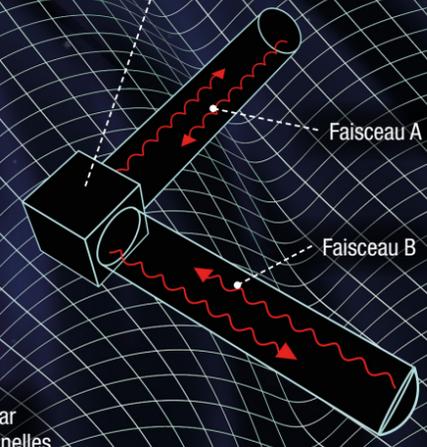


Fusion des trous noirs - Terre
= environ 1,3 milliard années-lumière

Soleil - Terre
= 8 minutes-lumière

Courbures de l'espace-temps par la masse des astres

Ondulations de l'espace-temps par les ondes gravitationnelles



INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON

Un faisceau laser, divisé en deux, est dirigé dans deux bras vers des miroirs, puis recombinaison. Si les ondes se compensent, aucun signal n'est détecté ; si la recombinaison produit une interférence, cela indique que les ondes n'ont pas parcouru la même distance, donc que la longueur des bras a été modifiée...

SANS ONDE GRAVITATIONNELLE



AVEC UNE ONDE GRAVITATIONNELLE



L'observation des ondes gravitationnelles

DÉTECTION

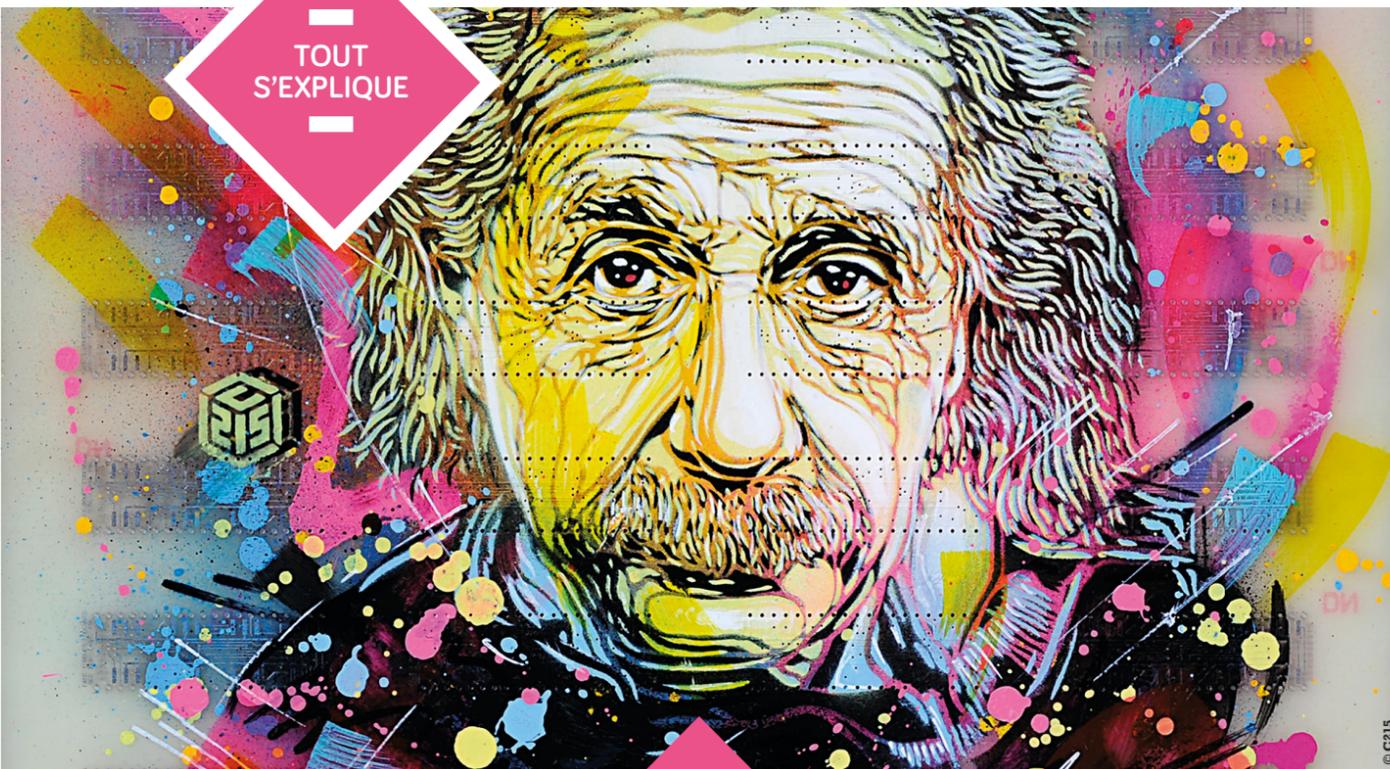
→ Pour voir une déformation locale de notre espace-temps sur Terre, la distance entre deux points de référence est mesurée. Cette mesure est répétée pour « voir » si cette distance s'est soudainement allongée et/ou rétrécie. Cela, par la lumière et avec un interféromètre de Michelson.

→ Pour déduire le passage d'une onde gravitationnelle sur Terre, toutes ces mesures sont faites en deux lieux distincts pour détecter et confirmer les déformations en éliminant toute cause de perturbations locales.

IDENTIFICATION

En menant ces expériences avec deux interféromètres géants installés à 3 000 km de distance (Hanford/Washington et Livingston/Louisiane), deux équipes de Ligo ont détecté des ondes gravitationnelles. Leur résultat, après analyses et croisement des données : elles résultent de la fusion, il y a 1,3 milliard d'années, de deux trous noirs d'environ 36 et 29 masses solaires ; et elles ont engendré une déformation de l'espace-temps de 10^{-19} m.

TOUT
S'EXPLIQUE



Une prouesse qui aurait sidéré Einstein...

par Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences, directeur du Larsim / CEA

En 1916, Einstein était à Berlin, malade et épuisé ; mais toujours alerte pour se demander si une masse en mouvement accéléré pouvait rayonner des « ondes gravitationnelles », comme une charge électrique qu'on accélère rayonne des ondes électromagnétiques. Il découvrit rapidement des solutions de ses équations correspondant à des ondulations de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière. Au cours de leur voyage, elles secouaient l'espace-temps, modifiant brièvement la distance séparant deux points dans l'espace.

La gravitation étant très faible en intensité, de telles ondes sont très difficiles à détecter : même des phénomènes extrêmement puissants n'engendrent que des amplitudes ridiculement petites. De fait, elles n'ont pu être mesurées de façon directe qu'avec la complicité d'un événement monstrueux et sans doute très rare qui s'est produit il y a plus d'un milliard d'années : deux trous noirs voisins ont fusionné à une vitesse égale aux deux tiers de la vitesse de la lumière. Ce phénomène hyper-violent a libéré une énergie inimaginable en seulement 20 millisecondes, et engendré un train d'ondes gravitationnelles qui ont progressivement perdu de la puissance au cours de leur long voyage ; leur passage au travers de la Terre, le 14 septembre 2015 à 9 heures 50 minutes et 45 secondes (Temps universel). Il a pu être détecté grâce aux instruments extrêmement sensibles de l'expérience LIGO (qui – coup de chance incroyable – venaient tout juste d'être mis en service). Une prouesse qui aurait sidéré Einstein, lui qui ne croyait pas que de telles ondes puissent un jour être détectées :

pour cause, les variations de longueur sont de l'ordre de 10^{-19} mètre, c'est-à-dire largement inférieures à la taille d'un proton !

Pour effectuer une telle mesure, il est vain d'utiliser une règle matérielle qui serait elle-même déformée au passage de l'onde gravitationnelle. Il faut donc utiliser une règle qui ne s'étire ni ne se contracte : la lumière. Sa vitesse étant invariante, si l'espace entre deux points se dilate, elle mettra plus de temps à parcourir la distance qui les sépare ; si, au contraire, l'espace se contracte, il lui faudra moins de temps. C'est donc grâce à un faisceau de lumière laser séparé en deux faisceaux envoyés dans deux directions perpendiculaires puis recombinaison l'un à l'autre, que les physiciens ont pu mesurer l'effet du passage de l'onde gravitationnelle : les interférences des deux faisceaux se trouvent modifiées dès qu'une onde gravitationnelle vient allonger ou raccourcir la distance parcourue par chacun d'eux.

L'histoire ne manque pas d'ironie, car Einstein n'a jamais cru en l'existence des trous noirs. Or, ce sont bien de tels objets qui, en fusionnant, ont permis que soient enfin détectées les ondes gravitationnelles qu'il avait prédites. Une nouvelle fenêtre s'ouvre ainsi sur l'univers, car les ondes gravitationnelles se propagent sans être absorbées par la matière, contrairement aux ondes électromagnétiques qui constituent la lumière. Cette propriété leur permet de parvenir jusqu'à la Terre en conservant la trace des caractéristiques des sources qui les ont engendrées, telles des explosions d'étoiles, des trous noirs en formation, ou encore des collisions d'étoiles denses.

les défis 206
du cea

TOUT
S'EXPLIQUE

Les ondes gravitationnelles

GW 09.14.15, pour *Gravitational Wave, september 14, 2015.*

Ce 14 septembre 2015 est en effet une date historique, celle de la détection des premières ondes gravitationnelles, tout droit sorties d'un événement cataclysmique : la fusion de deux trous noirs massifs. Leur découverte intervient un siècle après avoir été prédite par Albert Einstein...

ENJEU



La découverte des ondes gravitationnelles est révolutionnaire, à plus d'un titre. Elle confirme leur prédiction par Einstein, tout comme elle officialise l'existence de trous noirs (également théorisés dans la Relativité Générale) et en révèle une nouvelle classe, de taille intermédiaire (en l'état, 39 et 26 masses solaires) jamais observée auparavant. La détection des ondes gravitationnelles ouvre ainsi un nouveau champ de l'astronomie en dévoilant des objets ou phénomènes, que l'analyse des ondes électromagnétiques (du visible aux rayons

gamma en passant par l'infrarouge) ne permet pas d'appréhender. En effet, contrairement à la lumière qui est chahutée par la matière de l'Univers, les ondes gravitationnelles, qui bousculent elles-mêmes la matière, filent librement dans l'espace-temps : une belle opportunité pour remonter à leur source et pourquoi pas aux confins de l'Univers. Ces nouvelles messagères de l'univers sont promises à un futur Prix Nobel de Physique, dont l'un des récipiendaires pourrait être Kip Thorne, co-fondateur du projet américain Ligo à l'origine de leur détection.