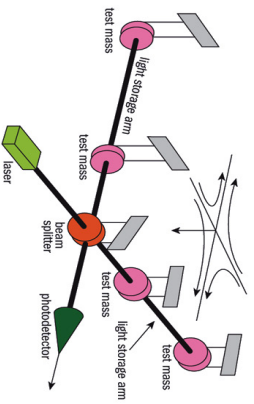


Schéma de fonctionnement d'un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles.



Le détecteur

LIGO à

Livingston

(Louisiane,

Etats-Unis).

Le détecteur

Virgo à Cascina,

près de Pise

(Italie).

Les détecteurs actuels

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles existants reposent sur le principe de **interférométrie optique** : ils mesurent d'infimes variations relatives de longueur en faisant se superposer de la lumière laser avec elle-même.

Ils sont constitués de deux bras perpendiculaires de taille kilométrique, dans lesquels circule la lumière. Lors du passage d'une onde gravitationnelle, la différence de longueur entre ces deux bras varie légèrement en suivant les modulations d'amplitude de l'onde. Cette variation est de l'ordre d'un millième de la taille d'un noyau atomique, soit

0,0000000000000000000000000000001 mètre. Quatre détecteurs sont en fonction :

- les deux instruments **LIGO** aux États-Unis (à Livingston et Hanford) ;
- l'observatoire franco-italien **Virgo**, près de Pise en Italie ;
- le détecteur **KAGRA** au Japon.

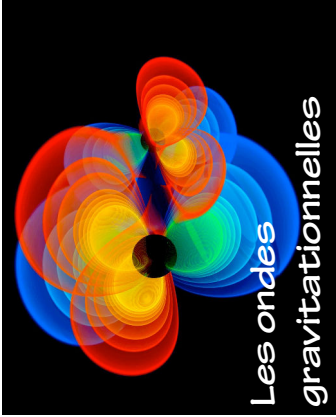
Le signal observé en rayon gamma par FERMI et la position de la source prédite par LIGO-Virgo (en vert). [Crédits : LIGO-Virgo, FERMI]

Signaux de fusion de deux étoiles à neutrons : en haut en rayon gamma et en bas l'augmentation de la fréquence de l'onde gravitationnelle.

[Crédits : LIGO-Virgo, FERMI]

12

L'Univers dans ma poche



Laura Bernard et
Alexandre Le Tiec
Observatoire de Paris



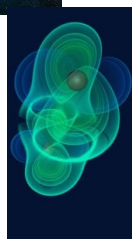
Parmi ces astres, lequel n'émet pas d'ondes gravitationnelles ?



Quiz



Réponse au dos



L'astronomie multi-messagers

En août 2017 fut observée pour la première fois la coalescence de deux étoiles à neutrons. Presque simultanément, **LIGO** et **Virgo** ont mesuré le signal d'ondes gravitationnelles émis lors du spiralement des deux corps compacts et le satellite **FERMI** a détecté le sursaut gamma (voir TUMIP n°9) issu de leur fusion. Au cours des jours qui ont suivi, de nombreux télescopes ont observé les diverses contreparties électromagnétiques (visible, infra-rouge, radio, etc.) de cet événement.

Cette observation historique inaugure l'astronomie dite **multi-messagers**, qui détecte non seulement les ondes électromagnétiques, mais aussi les ondes gravitationnelles et les particules de haute énergie. Elle a permis de nombreuses avancées, confirmant la propagation des ondes gravitationnelles à la vitesse de la lumière, le lien pressenti entre sursauts gamma courts et coalescence d'étoiles à neutrons, et le mécanisme de la synthèse de l'or.

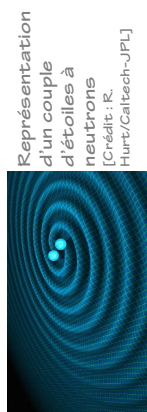
13

Les sources localisées

Les principales sources d'ondes gravitationnelles sont constituées d'astres massifs et compacts (voir TUMIP n°9), tels les trous noirs, les étoiles à neutrons et les naines blanches, isolées ou en couple. On distingue les sources localisées suivantes :

- **Systèmes binaires d'objets compacts** spiralant et fusionnant (trous noirs et étoiles à neutrons), galactiques ou extra-galactiques ;
- **Couples de naines blanches** au sein de la Voie Lactée ;
- **Étoiles à neutrons isolées**, légèrement asymétriques et en rotation, dans le proche voisinage galactique ;
- **Explosion d'étoiles massives** (supernovae) dans notre galaxie conduisant à la formation d'étoiles à neutrons ou de trous noirs.

5



Représentation d'un couple d'étoiles à neutrons

[Crédit : I.R. Hunt/Calttech-JPL]



Vue d'artiste d'un couple de naines blanches [Crédit : ESO]



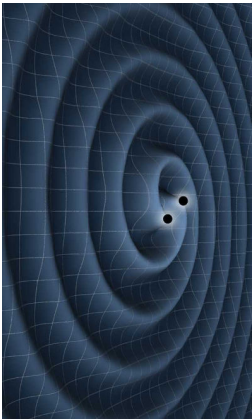
Vue d'artiste d'une étoile à neutrons la [Crédit : ESO]



Vue d'artiste d'une étoile à neutrons isolée [Crédit : NASA]

4

[Crédit: NASA]



Vue d'artiste de deux trous noirs orbitant l'un autour de l'autre sous l'effet de leur attraction gravitationnelle mutuelle. Leur mouvement orbital génère des ondes gravitationnelles.

Représentation d'un système binaire de trous noirs

MRI for Gravitational Physics / Institute for Theoretical Physics Frankfurt / Zuse Institute Berlin



Tous ces objets sont (ou ont été) sources d'ondes gravitationnelles sauf la nébuleuse planétaire.

La nébuleuse du Crabe, un reste de supernova.

Crédit: HST

Réponse



Vue d'artiste d'une supernova

La nébuleuse planétaire IC 418

Crédit: HST

TUIMP Creative Commons

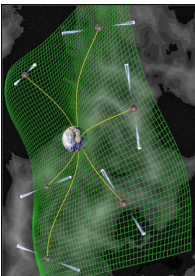


Pour en savoir plus sur cette collection et sur les thèmes présentés dans ce mini-livre tu peux visiter <http://www.tuimp.org>

Image de couverture : Simulation numérique d'un couple de trous noirs et visualisation des ondes gravitationnelles générées lors de leur fusion [crédit : Michael Kopitz/Albert Einstein Institute]

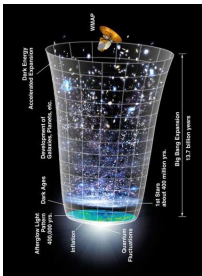
L'Univers dans ma poche N° 18

Ce mini-livre a été écrit par Laura Bernard et Alexandre Le Tiec de l'Observatoire de Paris (France).



[Crédit: D. J. Champion]

Image d'un réseau de pulsars. Chaque ligne de visée vers un pulsar fait office de bras de l'interféromètre sur lequel on mesure le passage d'une onde gravitationnelle.



[Crédit: NASA]

Représentation de l'expansion de l'Univers depuis la période d'inflation jusqu'à nos jours.

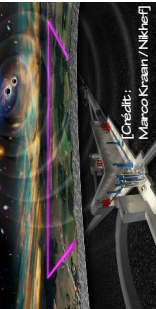
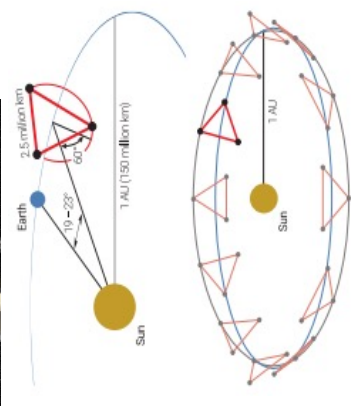


Image du futur détecteur européen Telescope Einstein.

[Crédit: Marco Kraus/Nikhef]



Le futur détecteur spatial LISA. Les trois satellites en configuration triangulaire suivent l'orbite de la Terre.

Les détecteurs du futur

Dans la continuité des détecteurs existants, l'Union européenne envisage la construction du **Télescope Einstein**, un nouvel observatoire d'ondes gravitationnelles. Il aura une configuration triangulaire, une isolation sismique accrue parce qu'il sera placé sous Terre et une technologie de refroidissement cryogénique des miroirs.

Afin de s'affranchir de perturbations d'origine terrestre, comme par exemple le bruit sismique, l'Agence spatiale européenne développe **LISA**, un détecteur d'ondes gravitationnelles spatial. Il sera composé de trois satellites distants de plusieurs millions de kilomètres, permettant d'observer des sources particulièrement massives, complémentaires de celles vues depuis la Terre.

Les sources diffuses

Lorsque les ondes gravitationnelles générées par un très grand nombre de sources localisées se superposent, on ne peut plus les distinguer les unes des autres. On a alors un **fond stochastique astrophysique**.

Par ailleurs, divers phénomènes physiques plus spéculatifs produits peu de temps après le Big Bang (voir TUIMP n°12) peuvent générer un **fond stochastique cosmologique**. On distingue :

- les **cordes cosmiques**, résultant d'un changement d'état brutal du contenu énergétique et matériel de l'Univers primordial ;
- les **trous noirs primordiaux**, qui se seraient formés sous l'effet de grandes fluctuations de densité d'énergie de l'Univers primitif ;
- l'**inflation**, une période de rapide expansion cosmique qui aurait eu lieu une fraction de seconde après le Big Bang.

Quésaco ?

Les ondes gravitationnelles sont de **petites vibrations** dans la **structure de l'espace-temps** qui se propagent à la vitesse de la lumière. Ce sont des ondes transversales, ce qui signifie que le déplacement dans l'espace-temps est perpendiculaire à la direction de propagation.

Elles ont été prédites par la **relativité générale**, la théorie de la gravitation formulée par Albert Einstein en 1915. La première preuve indirecte de leur existence a été l'observation par Hulse et Taylor en 1974 de leur effet sur la période orbitale d'un couple d'étoiles à neutrons.

La première **détection instrumentale** d'une onde gravitationnelle eut lieu en 2015 grâce aux détecteurs **LIGO**. Cette onde gravitationnelle provenait de la coalescence de deux trous noirs d'une trentaine de masses solaires chacun.