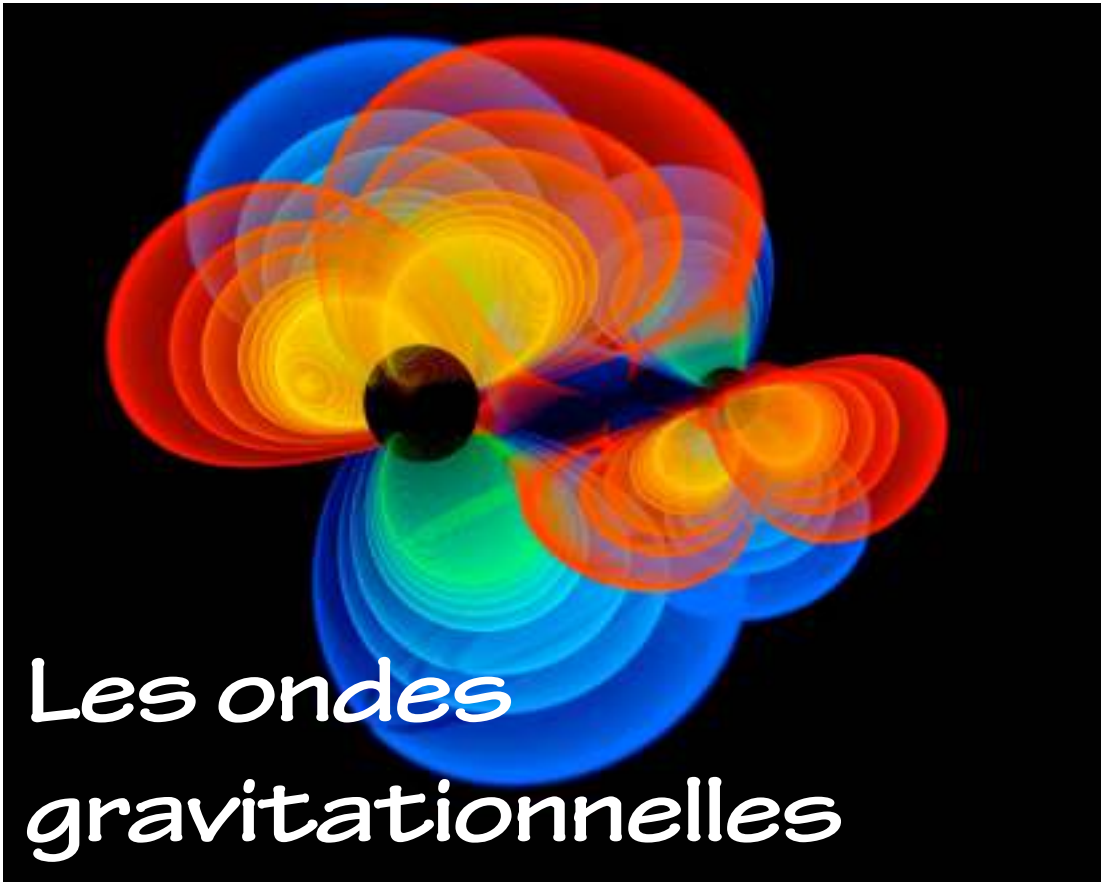
L'Univers dans ma poche

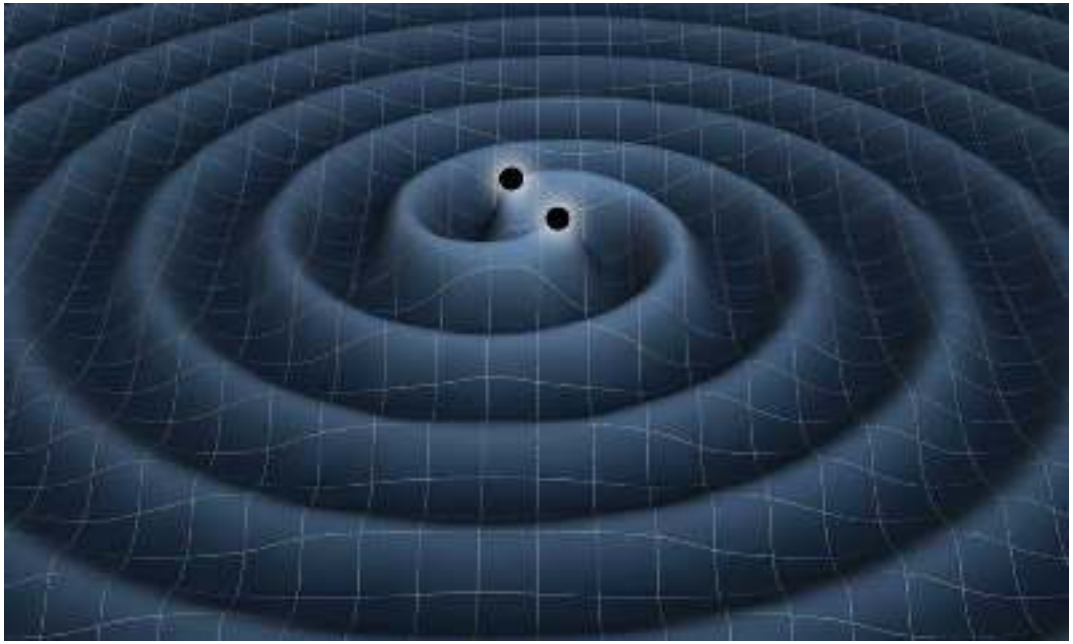


Les ondes gravitationnelles

TUIMP
Nº 18
THE UNIVERSE IN MY POCKET

Laura Bernard et
Alexandre Le Tiec
Observatoire de Paris

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.



[Crédit: NASA]

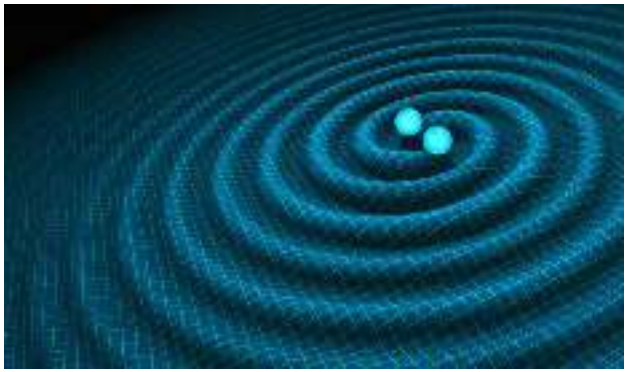
Quèsaco ?

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.

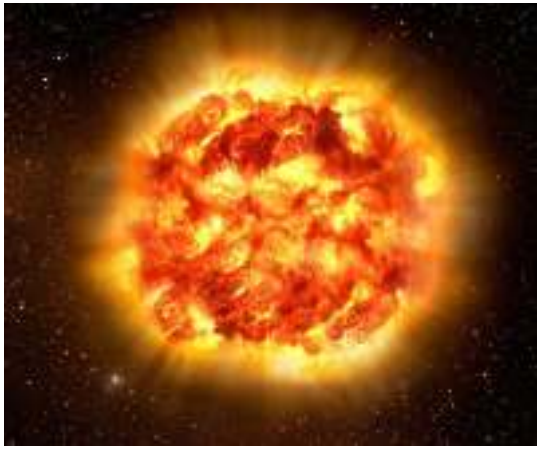
La première détection instrumentale d'une onde gravitationnelle eut lieu en 2015 grâce aux détecteurs LIGO. Cette onde gravitationnelle provenait de la coalescence de deux trous noirs d'une trentaine de masses solaires chacun.



Représentation d'un couple d'étoiles à neutrons [Crédit : R. Hurt/Caltech-JPL]

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

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



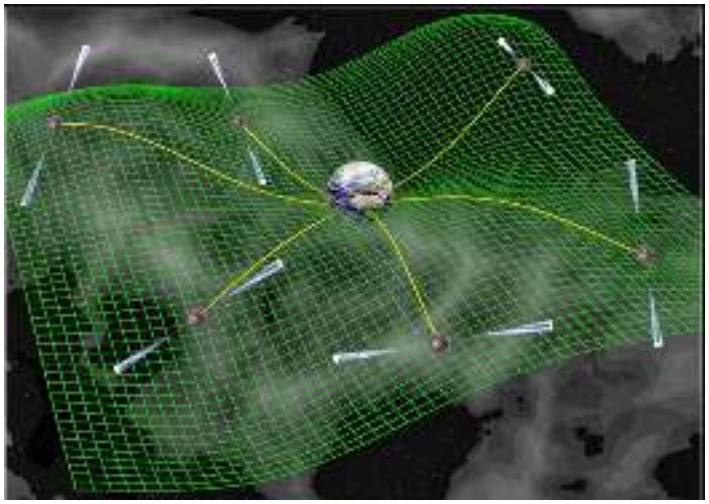
Vue d'artiste d'une supernova de type Ia [Crédit : ESO]

Les sources localisées

Les principales sources d'ondes gravitationnelles sont constituées d'astres massifs et compacts (voir TUIMP n°9), tels les trous noirs, les étoiles à neutrons et les naines blanches, isolés ou en couple.

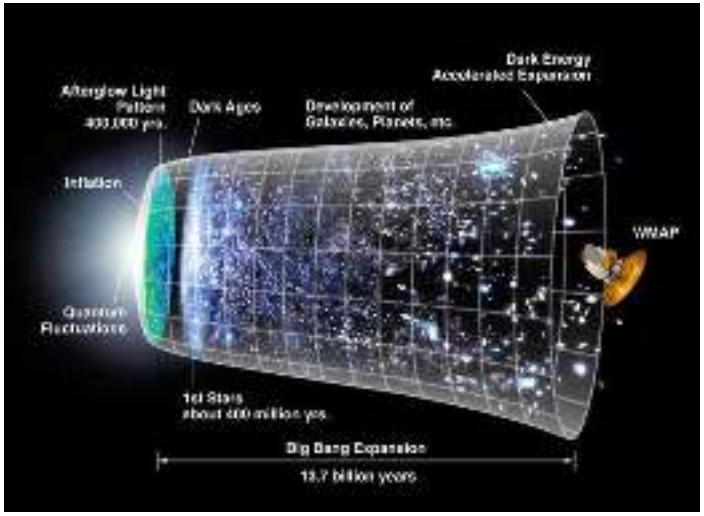
On distingue les sources localisées suivantes :

- 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.



[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.

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.

Le détecteur Virgo à Cascina, près de Pise (Italie).

Le détecteur LIGO à Livingston (Louisiane, Etats-Unis).

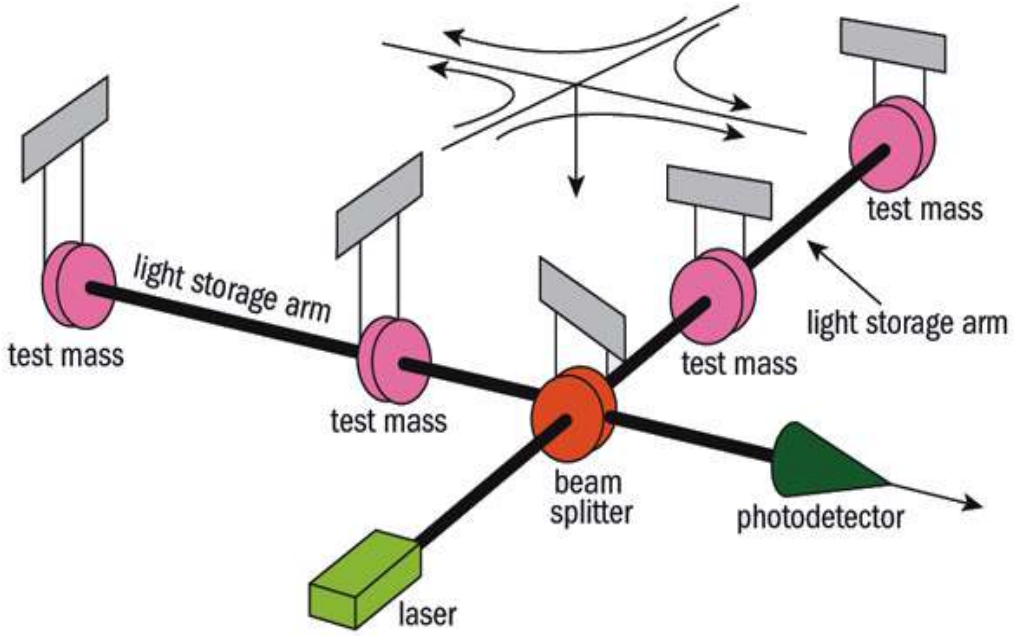


Schéma de fonctionnement d'un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles.

Les détecteurs actuels

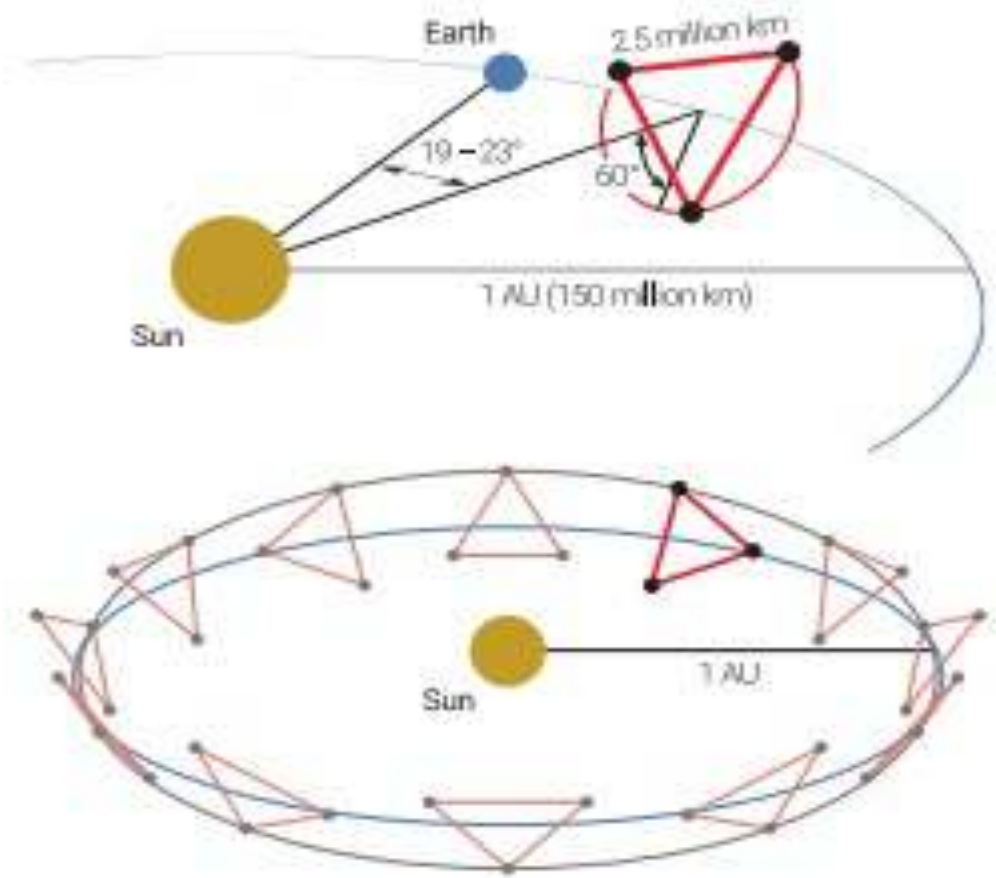
Les détecteurs d'ondes gravitationnelles existants reposent sur le principe de l'interférométrie optique : ils mesurent d'infimes variations relatives de longueur en faisant se superposer de la lumière laser avec elle-même.

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 0,00000000000000001 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.

Image du futur détecteur européen Telescope Einstein.

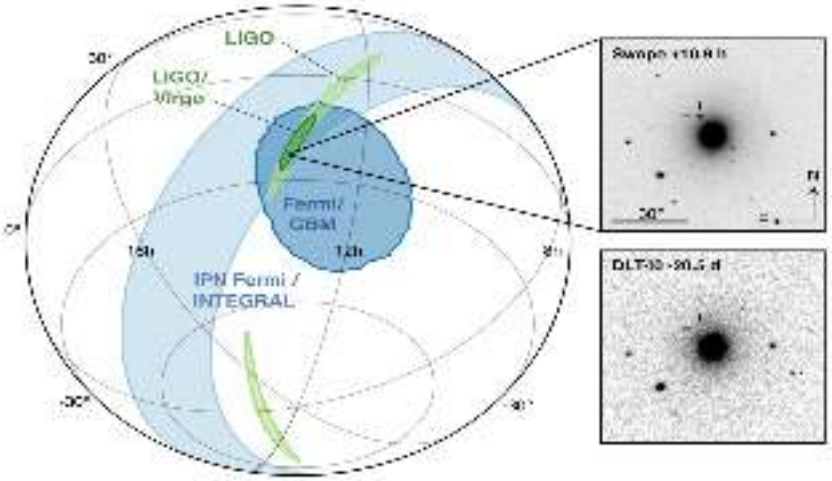


Le futur détecteur spatial LISA. Les trois satellites en configuration triangulaire suivent l'orbite de la Terre.

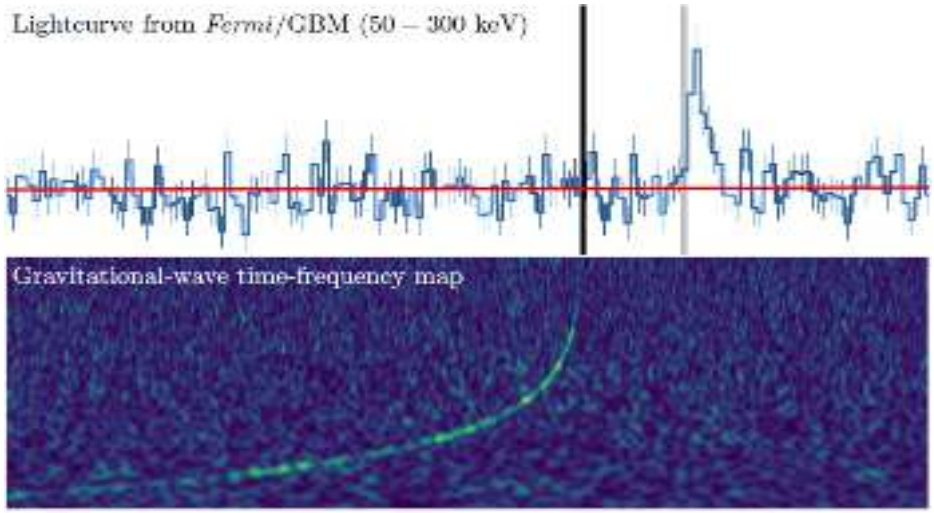
Les détecteurs du futur

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.



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]

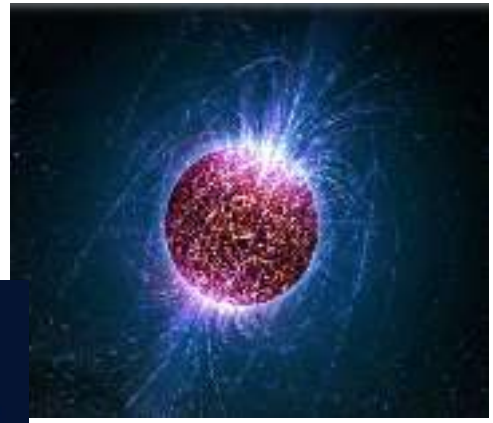
L'astronomie multi-messagers

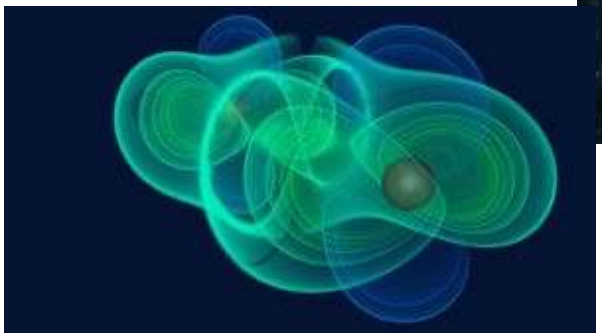
En août 2017 fut observée pour la première fois la coalescence de deux étoiles à neutrons. Presque simultanément, LIGO et Virgo ont mesuré le signal d'ondes gravitationnelles émis lors du spiralement des deux corps compacts et le satellite FERMI a détecté le sursaut gamma (voir TUIMP n°9) issu de leur 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.

Quiz

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





Réponse au dos

La nébuleuse planétaire IC 418

Crédit: HST

Réponse

Vue d'artiste d'une supernova

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

Vue d'artiste d'une étoile à neutrons

Représentation d'un système binaire de trous noirs

MPI for Gravitational Physics / Institute for Theoretical Physics, Frankfurt / Zuse Institute Berlin

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).

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

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

TUIMP Creative Commons