

Détection des ondes gravitationnelles

Consigne individuel puis mise en commun en grand groupe (30 min)

Quatre documents sont disponibles, complémentaires à celui-ci, ainsi que deux vidéos :
[onde-gravitationnelle.pdf] ; [methode.pdf] ; [michelson.pdf] ; [virgo] ;
[comprendre.mp4] ; [explications.mp4].

Voir également les vidéos de :

<https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2016/06/15/481934630/gravitational-waves-from-colliding-black-holes-shake-scientists-detectors-again?t=>

Il s'agit d'extraire les éléments pertinents pour expliquer, de façon ordonnée avec les éléments quantitatifs utiles, le phénomène des ondes gravitationnelles ainsi que les moyens et difficultés de leur observation.

Les calculs montrent que (dans le cas le plus simple d'une onde gravitationnelle d'amplitude h constante perpendiculaire au plan des bras de l'interféromètre) le **décalage temporel** entre les deux rayons laser A et B (faisant l'aller-retour dans chacun des deux bras de l'interféromètre de même longueur initiale L), c étant la célérité de la lumière dans le vide ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$), est égal à : $\Delta t = 2 L h / c$

Donc le déphasage entre les deux rayons est donc : $\Delta \varphi = 4\pi L h / \lambda$

Exemple : L'amplitude des ondes gravitationnelles émises par la **coalescence de deux trous noirs** à une distance de 300 millions d'années-lumière est de l'ordre de $h = 10^{-21}$ (sans unité).

https://fr.wikipedia.org/wiki/Onde_gravitationnelle

On note usuellement l'amplitude des ondes gravitationnelles h , qui est un nombre sans dimension, quantifiant l'importance relative de la compression ou de l'étirement dans les animations. L'amplitude montrée ci-contre est d'environ $h = 0,5$ (soit 50 %). Dans la réalité, les ondes gravitationnelles reçues sur Terre sont imperceptibles : typiquement, on estime que $h \approx 10^{-20}$, c'est-à-dire qu'un cercle de la taille de la Terre subirait une déformation d'environ 10^{-13} m , soit mille fois plus petite qu'un atome.

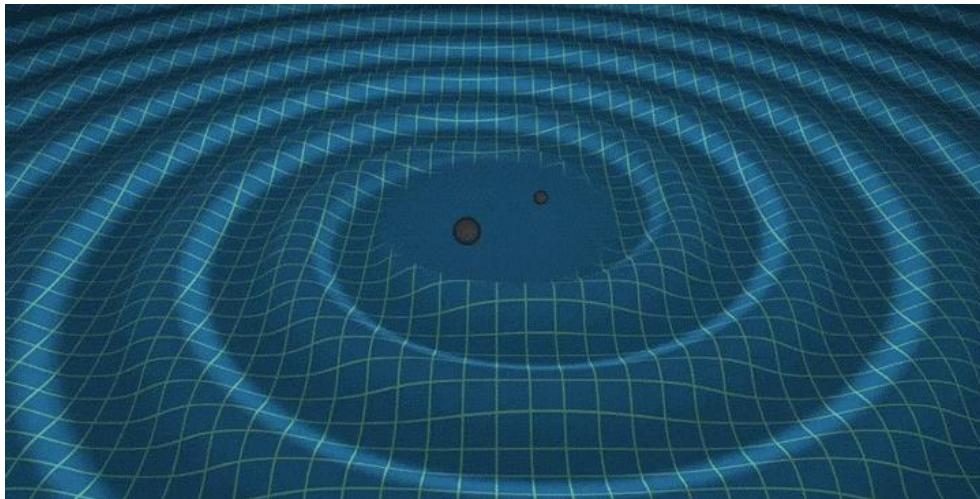
Les systèmes binaires compacts coalescents sont formés de deux objets compacts de masses comparables, et résultent de l'évolution de systèmes binaires d'étoiles massives ($M \geq 10 M_{\odot}^*$). Les objets compacts en question sont des étoiles à neutrons ou des trous noirs de masse stellaire. La masse d'une étoile à neutrons est voisine de la masse de Chandrasekhar, soit environ $1,4 M_{\odot}$. La masse d'un trou noir résultant de l'effondrement du cœur d'une étoile massive est typiquement de l'ordre de $10 M_{\odot}$.

M_{\odot}^* : masse solaire.

Alexandre Le Tiec. *Coalescence de trous noirs en relativité générale & Le problème de la matière noire en astrophysique.* Physique mathématique [math-ph]. Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2010.

Coalescences de systèmes binaires Un type de source que l'on considère habituellement est la coalescence de deux objets compacts tels des trous noirs ou des étoiles à neutrons. Lorsque deux de ces objets tournant l'un autour de l'autre forment un système binaire, celui-ci est hautement asymétrique. Les ondes gravitationnelles émises entraînent une perte d'énergie de rotation du système, donc une diminution de la distance entre les corps et une augmentation de la vitesse de rotation. Cette phase spiralante se termine par une phase de coalescence (mélange) des deux objets pour n'en former plus qu'un. C'est lors des dernières secondes de la phase spiralante que la fréquence des ondes gravitationnelles émises entre dans la bande passante d'un détecteur interférométrique terrestre.

Damir Buskulic. *Ondes gravitationnelles, aspects théoriques et expérimentaux.*



<https://www.npr.org/assets/img/2016/06/15/gravitywave.gif?t=1583078977951>

Credit: LIGO/T. Pyle

<http://mavoiescientifique.onisep.fr/premiere-observation-directe-dondes-gravitationnelles/>

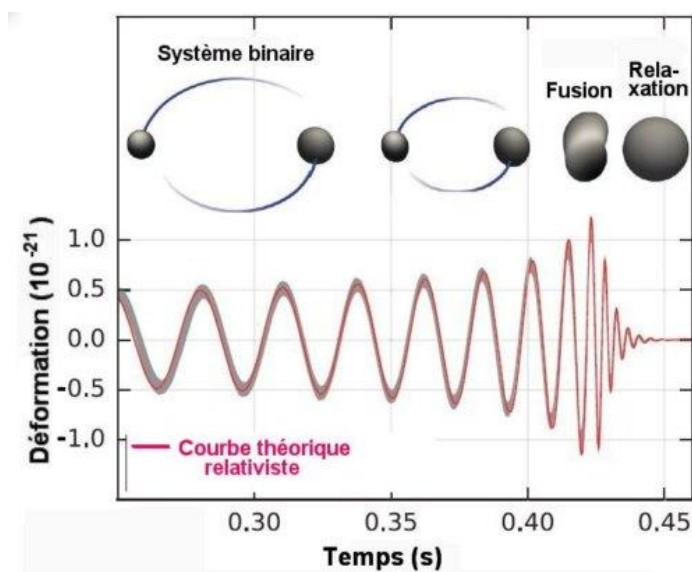


Fig.4. En haut **modèle relativiste de la coalescence des deux trous noirs.**

En bas, courbe donnant l'estimation relativiste de l'événement observé à Hanford. On peut en déduire vitesse et distance relative des deux trous noirs. Adapté de *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger* B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 116, 061102 (2016) avec autorisation Creative Common License.