

Des technologies utilisées pour la détection des Ondes Gravitationnelles

1.Introduction :

En 2016, le dispositif LIGO prouve expérimentalement l'existence des ondes gravitationnelles (OG). Les OG ont une place centrale dans la théorie de la relativité générale ainsi que dans la compréhension de la gravité.

Une OG est une oscillation de la courbure de l'espace temps qui se propage à grande distance de son point de naissance. Par exemple un objet massif en mouvement, typiquement un trou noir (TN), déformera l'espace temps avoisinant.

Quand ces OG traversent un espace tel un cercle, le cercle se déforme selon la figure 1 :

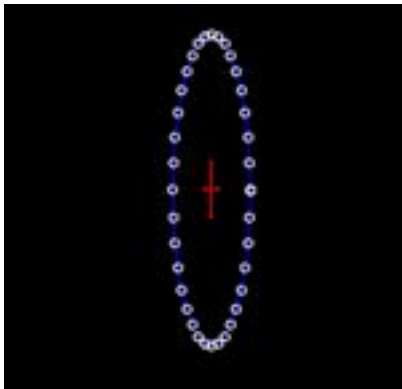


figure 1

L'amplitude relative h des OG est de $h=10^{-20}$ (sans unité), (l'équivalent de 10^{-13} m pour un cercle de la taille de la Terre). Ce qui nécessite des instruments ultra précis dont la réalisation se fait sur plusieurs décennies.

Cette publication va porter sur les défis de conception et de réalisation de tels instruments de mesures d'OG, ainsi que de la moisson de résultats produits depuis 2015.

On distinguera les projets opérationnels comme VIRGO, LIGO et GEO des projets en cours de conception comme LISA. On discutera des structures communes.

Le terme « trou noir » a été inventé par le physicien américain John Wheeler, en 1967, pour décrire une concentration de masse-énergie qui s'est effondrée gravitationnellement sous sa propre force d'attraction et qui est devenue si compacte que même les photons ne peuvent se soustraire à cette force gravitationnelle.

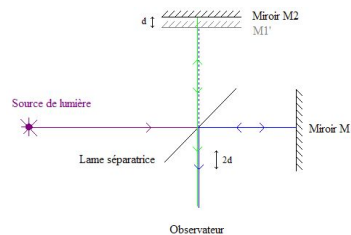
2. Conception :

A. Présentation des structures LIGO et VIRGO.

Les interféromètres LIGO et VIRGO sont des interféromètres de Michelson (IM) conçus pour détecter une déformation de notre espace-temps. En mesurant les franges interférométriques résultantes, cela permet de détecter des variations de tailles fabuleusement faibles. Ces variations pourraient être la manifestation d'OG.

B. Présentation du modèle théorique général

L'IM est constitué d'un laser de longueur d'onde λ , de 2 bras, 2 miroirs et d'une lame semi-réfléchissante et mesure les interférences lumineuses en divisant les amplitudes. Un premier rayon laser est projeté sur un miroir orienté à 45° placé à une distance d_1 de la source. Cette configuration est appelée lame d'air (Voir figure ci dessous).



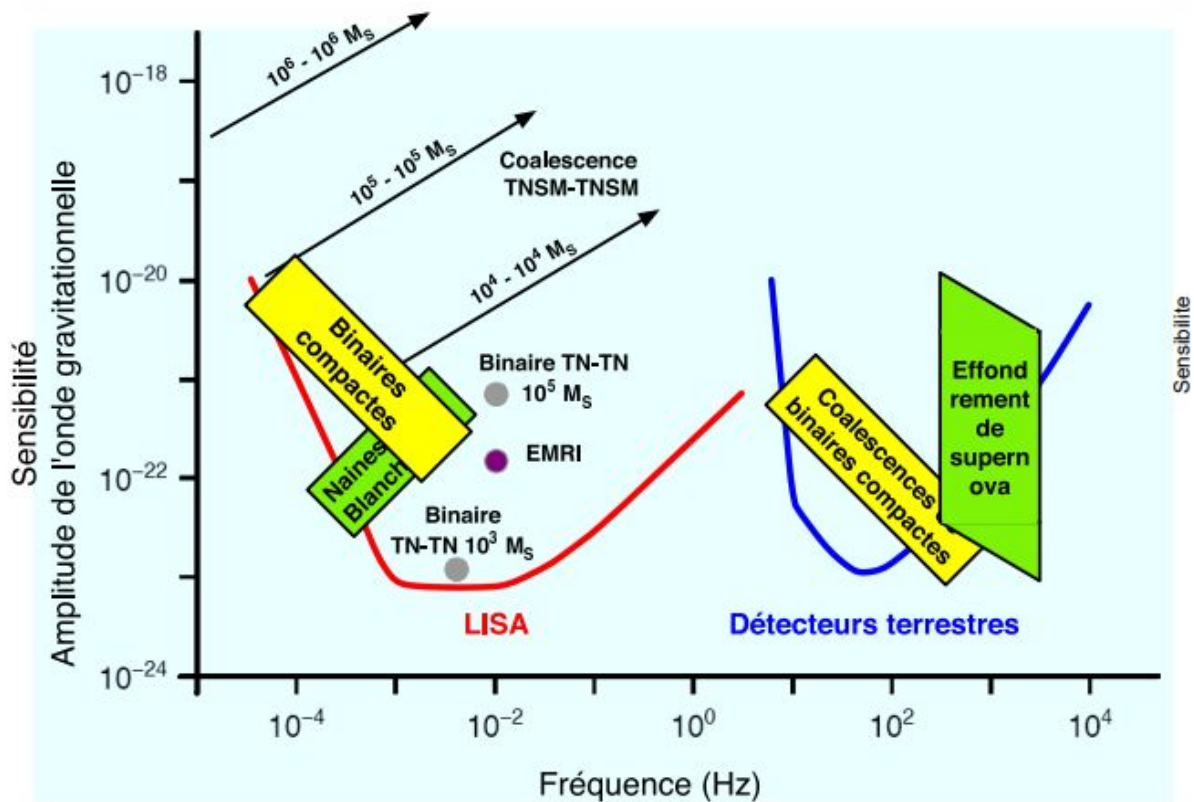
Le faisceau se scinde en deux rayons perpendiculaires qui sont réfléchis par des miroirs. Lorsque les deux rayons scindés reviennent, ils forment une figure d'interférence. Pour une variation infime de la position d'un des miroirs, la figure d'interférence obtenue va bouger. L'IM mesure une variation $\delta = d_2 - d_1$ de la position des miroirs qui peut être une manifestation d'un passage d'une OG.

3.Réalisation

C.Application de ce modèle théorique avec LIGO et VIRGO

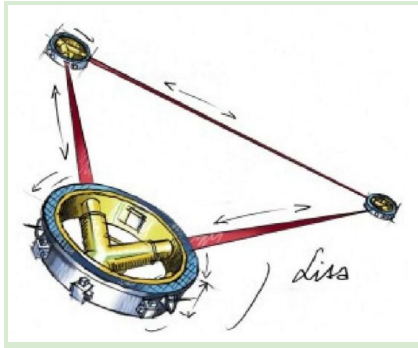
Le passage d'une OG induit une déformation de l'ordre de 10^{-18} m sur les bras des détecteurs, il est indispensable de minimiser les bruits. Virgo a été conçu pour réduire les bruits instrumentaux. Les miroirs sont suspendus grâce à de minces fibres de silices fondues, à une chaîne d'atténuateurs et placés sous ultraviolette afin de réduire les bruits sismiques. Les lasers sont de basse puissance et très stables en amplitude afin de ne pas polluer les interférences. Ils émettent à 1064 nm avec une puissance de 200 watts après amplification. Les miroirs sont des cylindres de 35 cm de diamètre et 20 cm d'épaisseur, fait dans un verre très pur. Ils sont polis au niveau atomique pour ne perdre que 0.002% de la lumière incidente lors de la réflexion. Tous ces procédés diminuent les bruits d'un facteur 10^{16} .

1) e Lisa (Lisa)



Cette figure représente le domaine de sensibilité des détecteurs interférométrique

La mission Laser Interferometer Space Antenna (LISA) détectera des OG en dessous de 1Hz, VIRGO LIGO des OG entre 1 et 100 Hz. LISA permet de détecter des systèmes binaires (étoiles ou trous noirs) et du fond cosmique d'OG. Son principe regroupe une circulation de faisceaux laser entre six masses en chute libre qui donne plusieurs interféromètres.

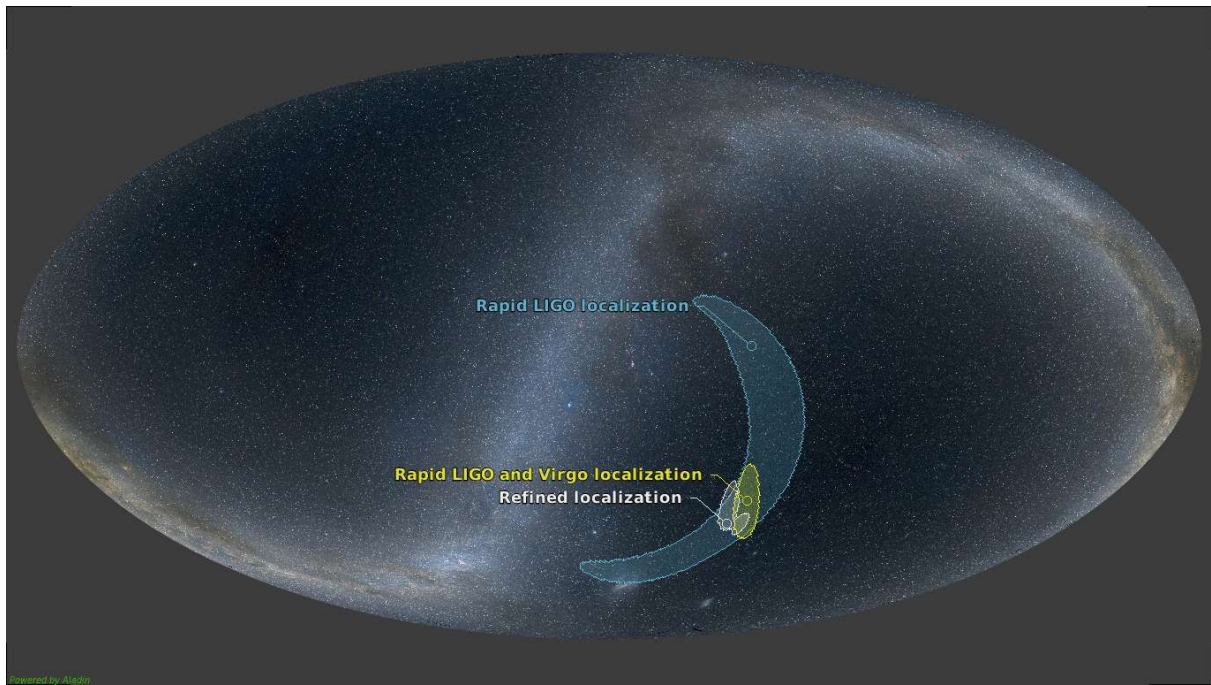


LISAcodes est un simulateur de LISA mis en place pour traiter les données fournies par la mission. Cette simulation qui modélise entre autres les OG et les différents bruits qui sont corrigés.

Production :

Les scientifiques des collaborations LIGO et VIRGO ont observé, pour la première fois avec deux détecteurs, des OG émises lors de la fusion de deux trous noirs.

Ces OG se sont propagées dans l'espace pendant 1,8 milliard d'années avant d'être détectées par LIGO (États-Unis) et après par Advanced Virgo (Italie).



Localisation de la source des ondes gravitationnelles.

En jaune : localisation obtenue avec les deux détecteurs LIGO.

En vert : localisation obtenue en utilisant les données des trois détecteurs (LIGO et Virgo), par une analyse en temps réel.

En mauve : localisation plus précise obtenue après une analyse plus poussée.

La fusion de trou noir génère tellement d'énergie que dans certain cas cela peut être visible par des télescopes optiques.

Avec seulement deux LIGO, la zone de recherche dans le ciel s'étendait sur une zone équivalant à plusieurs milliers de fois la surface de la pleine Lune. Grâce à Virgo, elle est environ dix fois plus petite, et l'estimation de la distance à laquelle se trouve la source est meilleure.

résultat LISA :

Les résultats obtenus par LISAcodes et LISA Pathfinder confirment que le dispositif peut être opérationnel d'ici quelques années. Les observations effectuées sur les fréquences 1Hz et en dessous ont atteint leurs objectifs, et même de les dépasser d'un facteur 100 après optimisation. Il est possible que LISA puisse détecter des phénomènes encore inconnus jusqu'alors. La collaboration de toutes ces structures a permis d'améliorer significativement la localisation des événements astrophysiques.

Conclusion

Toutes ces collaborations tiennent pour le moment leurs engagements. Les projets opérationnels (LIGO & VIRGO), obtiennent des résultats inédits, confirmant les théories. On attend un bouleversement des observations dans les années à venir avec LISA qui offrira une sensibilité inédite aux OG et ainsi nous permettre de mieux comprendre notre univers.

