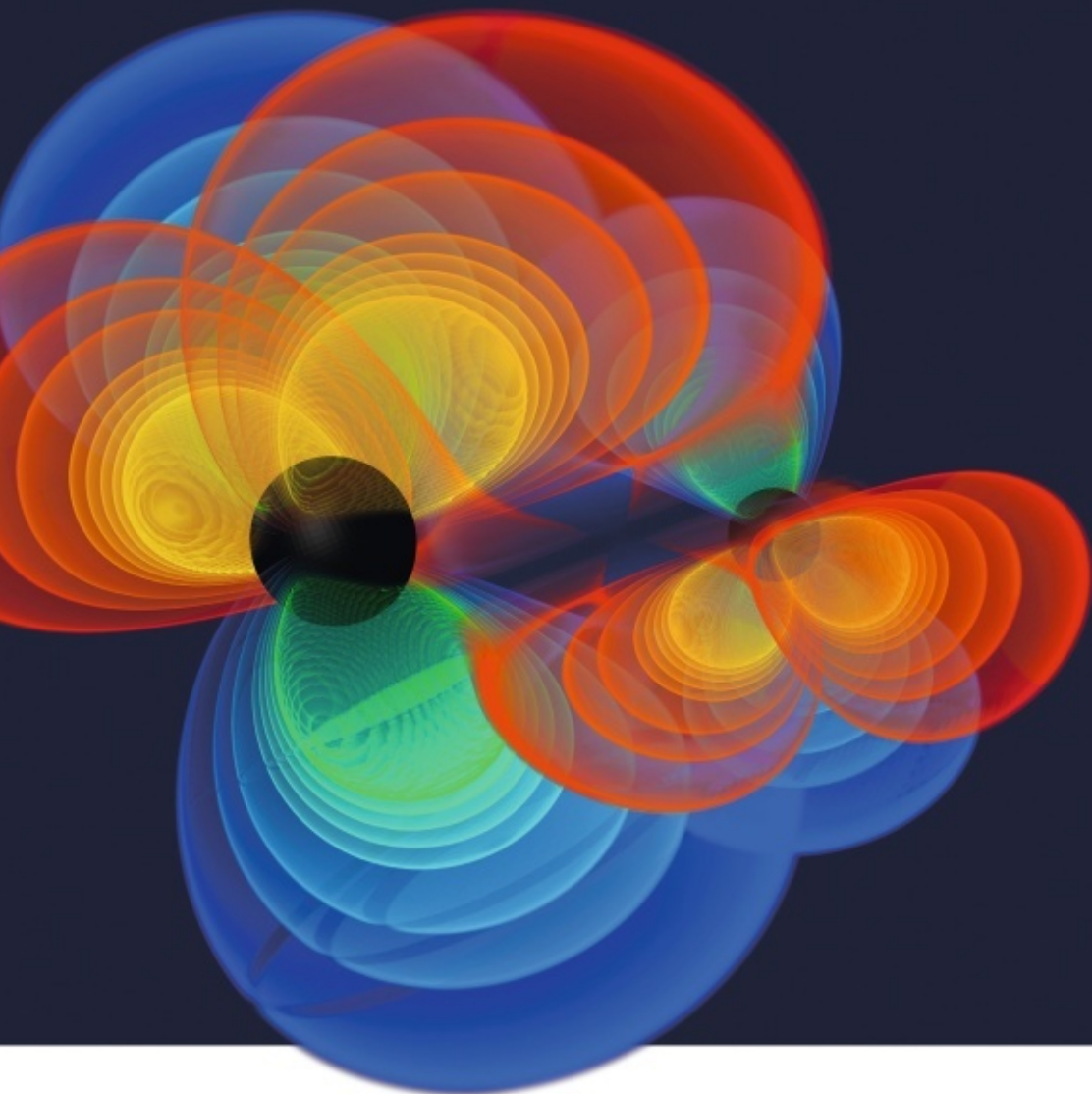




L'ESSENTIEL

- ✓ Les ondes gravitationnelles sont des vibrations dans la trame de l'espace-temps, émises par des corps massifs en mouvement, tels les trous noirs supermassifs ou les systèmes binaires compacts.
- ✓ Elles ont jusqu'ici été détectées seulement de façon indirecte.
- ✓ Le projet LISA, un interféromètre large de cinq millions de kilomètres et placé dans l'espace, devrait observer d'ici peu ces « sons de l'Univers » dans une large gamme de fréquences.
- ✓ Leur détection offrirait une vision inédite de l'Univers.

Albert Einstein Institute/Milieu Science

tions légèrement différentes pointant vers le centre du Soleil. En exerçant des forces différentes en des points distants, ces infimes variations de gravité engendrent de petites déformations sur Terre, les marées. Des marées bien plus intenses sont provoquées selon le même mécanisme par la Lune, plus petite mais beaucoup plus proche.

Les forces de marée sont ainsi le seul effet observable de la gravité exercée par les corps célestes dans un dispositif expérimental flottant librement dans l'espace. C'est aussi valable pour les ondes gravitationnelles : leur passage entraîne une modification de la courbure de l'espace-temps, et donc du champ gravitationnel, ce qui engendre des forces de marée accélérant des masses éloignées les unes par rapport aux autres.

Telle est la clef pour construire une « oreille » capable d'entendre les ondes gravitationnelles. Les interféromètres au sol *Virgo* et *LIGO* comportent par exemple deux bras de plusieurs kilomètres, dans lesquels un faisceau laser est envoyé et réfléchi à leur extrémité par un miroir. Ce faisceau permet de mesurer en perma-

nence la longueur des bras, et de détecter une éventuelle variation due au passage d'une onde gravitationnelle.

Le cri des systèmes binaires

Le projet LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) est construit sur le même principe, mais à une échelle plus ambitieuse : la longueur des bras est de cinq millions de kilomètres ! Trois satellites embarquant chacun deux masses d'épreuve, l'une en or et l'autre en platine, tourneront autour du Soleil en formant un triangle équilatéral de cinq millions de kilomètres de côté (voir l'encadré page 87). Un interféromètre à laser mesurera la vitesse relative entre chaque couple de masses situées aux extrémités des bras. Au repos, les masses seront immobiles l'une par rapport à l'autre, et le passage d'une onde gravitationnelle provoquera une variation de distance et de vitesse relative qui seront mesurables. LISA mesurera ainsi des variations de vitesse inférieures à 3×10^{-13} mètre par

seconde, et ce pour des oscillations de période comprise entre dix secondes et trois heures (c'est-à-dire une fréquence allant de 10^{-2} à 10^{-4} hertz).

Développée depuis plus de deux décennies à parts égales par l'Agence spatiale européenne (ESA) et la NASA, la mission LISA devait être opérationnelle vers 2020. Mais son avenir est aujourd'hui incertain : la NASA semble déterminée à se retirer du projet, ce qui forcerait l'ESA à revoir les ambitions de la mission à la baisse. Dans la suite, nous évoquerons cependant les caractéristiques de LISA telles que cette mission a été initialement conçue.

Revenons aux ondes gravitationnelles elles-mêmes. Par quels types d'objets sont-elles émises ? Il existe au centre de nombreuses galaxies, sinon de toutes, des

1. LA FUSION DE DEUX TROUS NOIRS en orbite l'un autour de l'autre n'émet presque aucun signal électromagnétique, mais elle provoque une puissante émission d'ondes gravitationnelles, des déformations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière.

objets invisibles de grande masse, que l'on soupçonne être des trous noirs supermassifs. Les étoiles du centre de la Voie lactée gravitent par exemple autour d'un corps invisible; leurs orbites indiquent que celui-ci a une masse d'un peu plus de quatre millions de fois celle du Soleil.

Lors des collisions de galaxies, les trous noirs supermassifs qu'elles abritent peuvent entrer en orbite l'un autour de l'autre, formant alors un système binaire. C'est une puissante source d'ondes gravitationnelles. Au début, les deux trous noirs gravitent lentement l'un autour de l'autre. Durant cette phase, le système émet déjà un intense flux d'ondes. La perte d'énergie qui en résulte fait tomber progressivement les trous noirs en spirale l'un vers l'autre, chacun tournant de plus en plus vite. La théorie indique que les ondes gravitationnelles émises par un couple de trous noirs ont une période égale à la moitié de la période de révolution du système. Ainsi, à mesure que les deux trous noirs se rapprochent, la période des ondes gravitationnelles diminue et leur fréquence augmente. À la fin, les deux trous noirs fusionnent en libérant une gigantesque bouffée d'ondes gravitationnelles.

La puissance dégagée par la fusion de deux trous noirs supermassifs est telle que LISA devrait détecter ces événements où qu'ils se déroulent dans l'Univers. LISA est conçu pour être sensible aux trous

noirs de masse comprise entre 10 000 et 100 millions de masses solaires; au-delà, la fréquence des ondes émises est trop basse. Mais comme la fréquence des ondes gravitationnelles d'un trou noir binaire augmente au fil du temps, celui-ci va émettre à un moment ou un autre des ondes gravitationnelles dont les fréquences sont détectables par LISA. De ces mesures, les astronomes déduiront la masse et la vitesse de rotation de chacun des trous noirs, et leur période de révolution l'un autour de l'autre.

Le chant du cygne des petits trous noirs

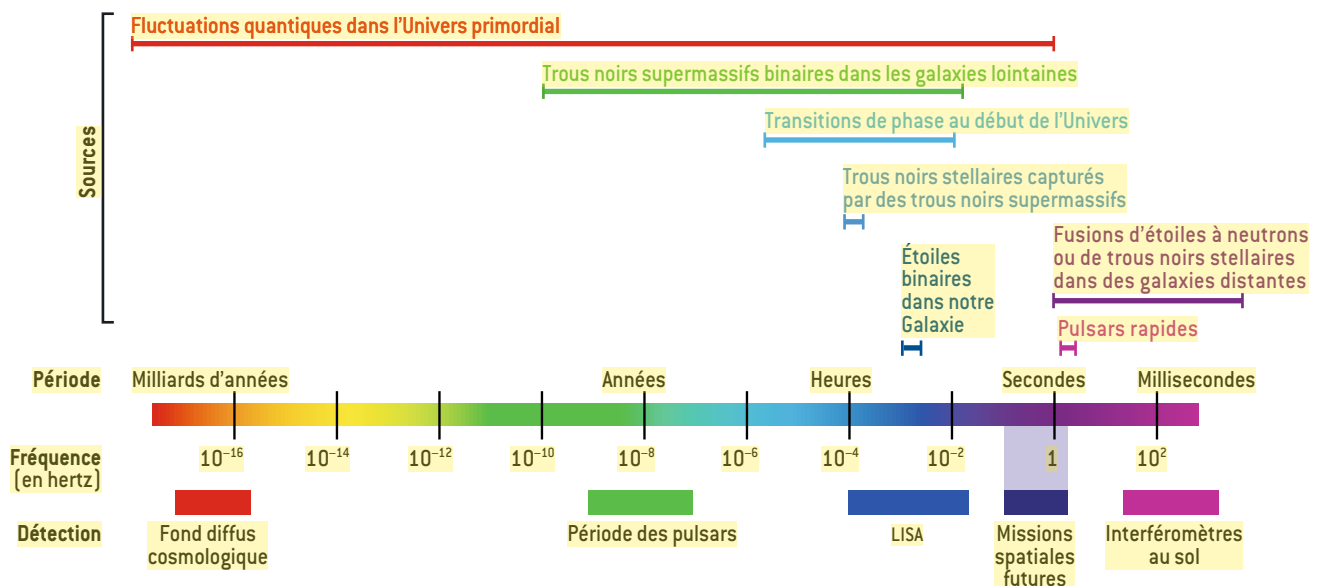
En raison de la vitesse de propagation finie de la lumière et des ondes gravitationnelles, observer des objets lointains revient à remonter dans le temps. Les systèmes binaires que LISA devrait révéler formeront une sorte de « stratigraphie » du cosmos, qui permettra d'en reconstituer en partie l'histoire. Les trous noirs supermassifs et leurs galaxies hôtes se sont-ils formés par la fusion de galaxies plus petites abritant chacune un trou noir plus modeste? Quels sont les progéniteurs des premiers trous noirs, et quand sont-ils apparus? Qu'advient-il des galaxies hôtes lorsque les trous noirs binaires centraux fusionnent?

Le plus souvent, les trous noirs supermassifs ne sont pas en couple. Tapis au cen-

tre des galaxies, ils engloutissent parfois des étoiles qui gravitent à proximité, et sans doute aussi des petits trous noirs de masse comparable à celle du Soleil. Le trou noir supermassif exerce sur les étoiles des forces de marée si intenses qu'elles sont rapidement disloquées. Un petit objet compact tel qu'un trou noir stellaire est moins sujet aux forces de marée, et peut survivre le temps de milliers d'orbites toujours plus serrées, jusqu'à être soudain englouti lorsqu'il traverse l'horizon des événements du trou noir géant (la frontière au-delà de laquelle même la lumière ne peut plus s'échapper).

Durant sa chute, le trou noir stellaire émet un riche « chant du cygne » d'ondes gravitationnelles. On peut déduire de ce signal une carte du champ gravitationnel du trou noir central jusque dans les régions très proches de l'horizon, un peu de la même façon que l'on mesure le champ de gravité de la Terre en suivant la trajectoire de satellites en orbite. L'arrêt brutal du signal gravitationnel montrerait en outre que l'objet supermassif a un horizon des événements, et que c'est donc bien un trou noir.

En effet, la relativité générale n'interdit pas qu'il existe des points où le champ gravitationnel devient infini, mais qui sont dénués d'horizon, les « singularités nues ». L'avis généralement partagé est qu'en pratique, les singularités nues n'existent pas; en d'autres termes, tout effondrement gra-



2. LA FRÉQUENCE DES ONDES GRAVITATIONNELLES dépend de leur source. LISA observera des ondes mettant en jeu des trous noirs supermassifs, et une partie de celles résultant des fluctuations dans l'Univers primordial. Celles-ci devraient par ailleurs laisser leur empreinte dans le

fond diffus cosmologique. Les ondes émises par des événements d'échelle « stellaire », de fréquences plus élevées, seront observées par les interféromètres au sol, tels LIGO et *Virgo*. L'étude de la période des pulsars devrait révéler les ondes dont la période est de l'ordre de l'année.