

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

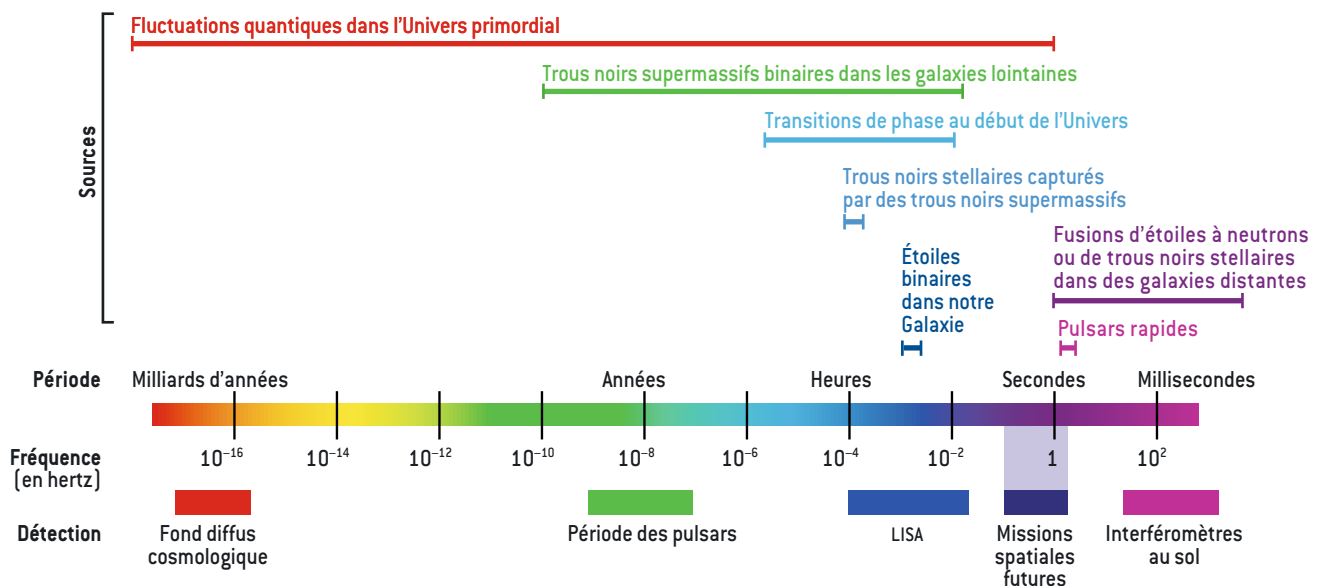
En raison de la vitesse de propagation finie de la lumière et des ondes gravitationnelles, observer des objets lointains revient à remonter dans le temps. Les systèmes binaires que LISA devrait révéler formeront une sorte de « stratigraphie » du cosmos, qui permettra d'en reconstituer en partie l'histoire. 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.

Une oreille pour écouter les « sons » cosmiques

Dans sa version initiale, la mission LISA comporte trois satellites dont les orbites sont définies avec soin pour qu'ils forment à tout instant un triangle équilatéral de cinq millions de kilomètres de côté. Ce triangle tourne autour du Soleil et sur lui-même en un an, et est incliné de 60 degrés par rapport au plan de l'orbite terrestre.

Chaque satellite contient deux masses tests : des cubes d'or et de platine de cinq centimètres de côté. Le principe de la détection des ondes gravitationnelles par LISA est de mesurer la distance entre les masses situées aux sommets du triangle. Le passage d'une onde gravitationnelle exerce une accélération sur chacune

des masses et modifie leur distance et leur vitesse relative.

Pour s'assurer que seule l'onde gravitationnelle influe sur les masses, chacune flotte librement dans son satellite hôte. Leur position est mesurée en continu et des micropropulseurs forcent le satellite à rester centré par rapport à elles.

Pour que LISA atteigne la sensibilité espérée, toute force autre que la gravitation s'exerçant sur les masses doit être 10^{-20} fois plus faible que leur poids sur Terre.

La mesure de la distance entre les masses est fondée sur l'interférométrie laser : un faisceau est envoyé d'une masse à l'autre et réfléchi ; toute variation de distance



LES TROIS SATELLITES DE LA MISSION LISA formeront le plus grand objet du Système solaire.

entraîne par effet Doppler une variation de la fréquence du signal retourné. LISA pourra ainsi mesurer

des variations de distance de 10^{-12} mètre, soit une variation relative de 10^{-21} .

vitational ultime d'un objet engendre un trou noir. LISA nous dira si cette hypothèse dite de « censure cosmique » est correcte.

L'observation de la chute de trous noirs stellaires ou d'étoiles compactes sur des trous noirs supermassifs permettra en outre de tirer de nombreux autres enseignements sur la population d'étoiles à proximité du trou noir central ou la dynamique autour du cœur galactique.

Les ondes gravitationnelles ont aussi un rôle à jouer en cosmologie. Les astronomes s'appuient d'habitude sur des étoiles qualifiées de « chandelles standards », dont la luminosité intrinsèque est supposée invariable (des supernovae de type Ia), pour estimer la distance des galaxies dans l'Univers lointain.

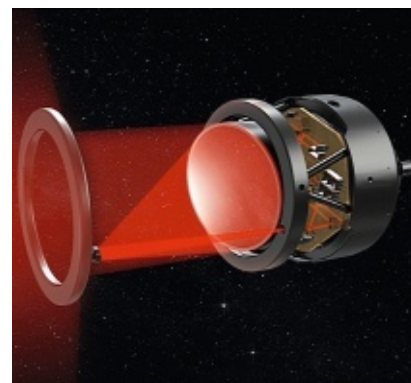
Sirènes standards

Or LISA pourra mesurer la direction des sources d'ondes gravitationnelles les plus intenses avec une précision de 0,05 degré. En outre, à partir de la fréquence de l'onde et de la vitesse de variation de celle-ci, on peut estimer la masse des trous noirs binaires qui constituent la source. En croisant cette information avec l'intensité du signal reçu, on estimera ainsi avec précision la distance de cette source. Les trous noirs supermassifs binaires pourraient ainsi jouer le rôle de « sirènes standards » !

Cette piste est d'un grand intérêt pour la cosmologie. L'une des grandes découvertes de ces 15 dernières années est que l'expansion de l'Univers a accéléré depuis le

début de l'histoire cosmique. On explique aujourd'hui cette accélération par l'existence d'une énergie de nature inconnue qui emplit le cosmos, l'énergie sombre, sujet pour lequel les trois lauréats du prix Nobel de physique 2011 ont été récompensés. C'est aujourd'hui l'un des sujets brûlants de la cosmologie, et plusieurs missions spatiales ont été mises en œuvre pour retracer précisément l'histoire de l'expansion. Son effet le plus visible est la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent de nous en fonction de leur distance. L'observation des ondes gravitationnelles ne permet pas de repérer directement les galaxies hôtes, et donc de mesurer leur vitesse de fuite. Cependant, la précision angulaire de LISA suffira pour limiter à quelques milliers le nombre de galaxies visibles – dont nous connaissons la vitesse de fuite – parmi lesquelles peut se trouver la source du signal gravitationnel. Un traitement statistique devrait permettre d'identifier la bonne. Cette approche offrira une méthode indépendante et d'une précision comparable aux meilleures observations pour mesurer la relation entre la distance et la vitesse de fuite des galaxies.

LISA verra bien d'autres choses, par exemple les ondes gravitationnelles émises par les milliers d'étoiles binaires compactes dans notre Galaxie. De quel type d'astres s'agit-il : naines blanches, étoiles à neutrons ou trous noirs ? Quelle est leur masse ? Échangent-ils de la matière entre eux ? Des dizaines d'objets de ce type ont été observées avec des télescopes classiques ; la détection d'une population 1 000 fois



3. DES TÉLESCOPES focaliseront le faisceau laser (en haut) émis par le satellite placé à l'autre sommet du triangle. Chaque satellite comportera deux télescopes (en bas, dans leur enveloppe) et deux masses d'épreuve (à l'intérieur des parties grises, non visibles).