

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.

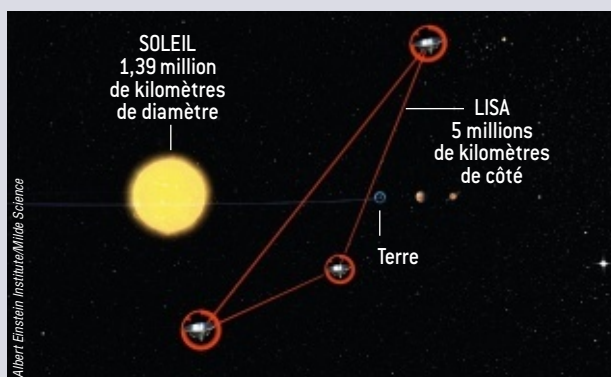
Chaque satellite contient deux masses tests : des cubes d'or et de platine de cinq centimètres de côté. Le principe de la détection des ondes gravitationnelles par LISA est de mesurer la distance entre les masses situées aux sommets du triangle. Le passage d'une onde gravitationnelle exerce une accélération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

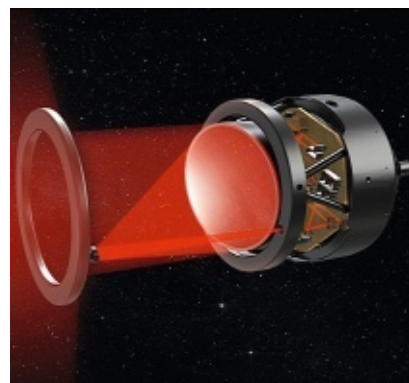
Sirènes standards

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 1000 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).

LISA Pathfinder, la science de l'immobilité

Les masses d'épreuve du détecteur LISA ne doivent subir aucune autre accélération que celle induite par les ondes gravitationnelles. Pour ce faire, il faut éliminer toutes les perturbations autres que gravitationnelles. L'objectif est d'obtenir une « immobilité » telle que si deux des masses aux extrémités d'un bras étaient arrêtées l'une par rapport à l'autre à un moment donné, elles se déplaceraient de moins d'un milliardième de mètre en deux heures.

Des données expérimentales indiquent qu'il est possible d'atteindre

une telle immobilité. Toutefois, en apporter la preuve en laboratoire est impossible en raison de la gravité terrestre. Ce point est si critique que l'ESA a mis sur pied une mission spatiale, LISA Pathfinder, pour le vérifier.

Il s'agit en quelque sorte d'une version réduite de LISA : deux masses d'épreuve seront mises en orbite, non pas à cinq millions de kilomètres l'une de l'autre, mais à moins d'un mètre, à l'intérieur d'un satellite semblable à ceux de LISA (*ci-contre*). Un interféromètre laser mesurera leur vitesse relative.

Des chocs avec les rares molécules de gaz présentes jusqu'aux variations de la gravité dues au satellite lui-même, plusieurs facteurs contribuent à accélérer les masses. Ces perturbations ont été modélisées, et l'un des objectifs de la mission est de vérifier si ces modèles sont corrects et si des perturbations susceptibles de compromettre le succès de la mission principale n'ont pas été négligées.

Quelques composants restent à mettre au point, après quoi LISA Pathfinder sera prêt à être lancé et à tracer la voie à la mission LISA.



LES AUTEURS



Bernard SCHUTZ est directeur de l'Institut Albert Einstein à Potsdam, en Allemagne, et cofondateur du projet LISA.

Stefano VITALE est professeur de physique à l'Université de Trente, en Italie, et rapporteur principal de la mission LISA Pathfinder.

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Hogan, *Les sons de l'espace-temps*, *Pour la Science*, n° 357, juillet 2007.

É. Gourgoulhon, *Des ondes gravitationnelles pour scruter le cosmos*, *Pour la Science*, n° 326, décembre 2004.

Mission LISA Pathfinder sur le site de l'ESA : <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=LISAPATHFINDER>

Site de la mission LISA à la NASA : <http://lisa.nasa.gov/>

plus grande par le biais de la gravitation entraînera sans doute des découvertes inattendues et devrait livrer des informations sur la formation de la Voie lactée.

Ces sources étant très nombreuses, la plupart ne pourront pas être distinguées les unes des autres ; l'ensemble créera un fond diffus d'ondes gravitationnelles, le « murmure » de la Voie lactée. Mais LISA pourrait détecter un autre fond diffus gravitationnel, à l'origine bien plus lointaine.

Le bruit de fond diffus

La découverte et l'étude du fond cosmique de rayonnement micro-ondes ont révolutionné notre compréhension de l'Univers. Il s'agit du fossile de la première lumière, libérée environ 380 000 ans après le Big Bang, lorsque les atomes neutres se sont formés et que le contenu de l'Univers est devenu transparent aux ondes électromagnétiques. C'est une frontière indépassable pour l'observation du cosmos par le biais de la lumière.

En revanche, l'Univers a toujours été transparent aux ondes gravitationnelles. Elles offrent ainsi un moyen de remonter bien plus loin vers le Big Bang. Certains modèles cosmologiques, fondés sur la théorie des cordes (une théorie qui tente d'unifier les interactions fondamentales), prédisent par exemple l'existence d'objets appelés supercordes cosmiques. Les supercordes, créées dans l'Univers primordial et « étirées » par l'expansion cosmique, pourraient émettre un spectre caractéristique d'ondes gravitationnelles de basse fréquence. Plus tôt encore, quelques fractions de seconde après le Big

Bang, les fluctuations quantiques ont pu engendrer des ondes gravitationnelles de très basse fréquence.

LISA, dans sa version initiale, pourra observer des ondes de fréquences aussi basses que 10^{-4} hertz. Cela correspond à des ondes émises environ 10^{-18} seconde après le Big Bang, quand l'Univers observable mesurait à peine un millimètre et que sa température était de 10^{15} degrés. Nous ignorons si le bruit de fond gravitationnel primordial est suffisamment intense pour être décelé, mais s'il était mis en évidence, il s'agirait d'une révolution dans la physique des interactions fondamentales.

Enfin, même plus près de nous, la gravité n'est pas silencieuse. Les variations de gravité dues aux oscillations internes du Soleil pourraient être révélées par LISA, et offriraient ainsi un nouvel outil pour explorer l'anatomie de notre étoile. Les astéroïdes passant à proximité du détecteur produiront également des signaux observables.

La mission préliminaire de l'ESA, nommée LISA Pathfinder, démontrera bientôt que les composants fondamentaux de LISA sont opérationnels (*voir l'encadré ci-dessus*). Si le retrait de la NASA devait finalement se confirmer, le projet LISA serait revu à la baisse par l'ESA. Une version réduite, avec des satellites séparés par une distance plus courte et moins de faisceaux laser, a été étudiée. La sensibilité et la résolution seraient inférieures, mais même dans cette configuration, LISA détecterait des milliers de systèmes binaires dans la galaxie et des dizaines de fusions de trous noirs supermassifs. Les astronomes seront alors aux premières loges pour écouter le concert de l'Univers. ■