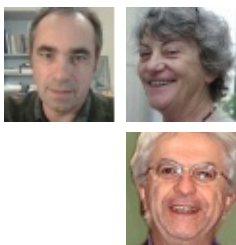


LES AUTEURS



Éric MICHEL est astronome au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA) de l'Observatoire de Paris, et responsable du programme de sismologie stellaire du projet CoRoT.

Annie BAGLIN est directrice de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique principal du projet CoRoT.

Michel AUVERGNE est directeur de recherche du CNRS au LESIA et responsable scientifique de l'instrumentation du projet CoRoT.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Deheuvels *et al.*, Constraints on the structure of the core of subgiants via mixed modes : the case of HD49385, *Astronomy & Astrophysics*, à paraître.

T. Bedding *et al.*, Gravity modes as a way to distinguish between hydrogen- and helium-burning red giant stars, *Nature*, vol. 471, pp. 608-611, 2011.

B. Mosser *et al.*, The universal red-giant oscillation pattern, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 525, L9, 2011.

P. Degroote *et al.*, Deviations from a uniform period spacing of gravity modes in a massive star, *Nature*, vol. 464, pp. 259-261, 2010.

R. Samadi *et al.*, The CoRoT target HD 49933. II. Comparison of theoretical mode amplitudes with observations, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 509, L16, 2010.

R. A. Garcia *et al.*, CoRoT reveals a magnetic activity cycle in a Sun-like star, *Science*, vol. 329, p. 1032, 2010.

A. Miglio *et al.*, Probing populations of red giants in the galactic disk with CoRoT, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 503, L21, 2009.

amplitude résulte du bilan énergétique entre l'amortissement et l'excitation par la pression de convection.

Les premières mesures effectuées sur les étoiles HD49933, HD181420 et HD181906, plus chaudes que le Soleil (6300 à 6800 kelvins en surface), ont confirmé que l'amplitude des modes augmente avec la température. Elle est environ 1,5 fois supérieure à celle observée pour le Soleil, soit 25 pour cent de moins que ne le préoyaient les modèles.

Cette différence peut être en partie expliquée par la teneur en éléments plus lourds que l'hélium (la « métallicité ») de ces étoiles. Par ailleurs, la largeur des modes – inversement proportionnelle à leur durée de vie – est trois fois plus grande que celle estimée, écart qui reste à expliquer. Ces résultats nous renseignent sur la distribution des vitesses caractéristiques de la convection et apportent des tests pour les modélisations numériques en trois dimensions.

L'activité magnétique dévoilée par sismologie

Ce travail est actuellement étendu aux étoiles géantes rouges. Les modélisations les plus avancées sous-estiment l'amplitude des modes observés d'un facteur trois, comme le montrent les travaux de Reza Samadi, de l'Observatoire de Paris, et ses collègues. C'est le signe que les échanges d'énergie entre les oscillations et les couches superficielles de l'étoile doivent encore être précisés.

Les petites cellules brillantes séparées par des parois plus sombres qui tapissent la surface du Soleil, ou granules, sont une autre manifestation de la convection. Les dimensions et la durée de vie des granules sont liées à des grandeurs caractéristiques du processus convectif. Les données de CoRoT nous ont permis, avec nos collègues, de mesurer pour la première fois le spectre de la granulation dans différentes étoiles. Pour les étoiles de classe F, plus chaudes que le Soleil, les granules se révèlent être trois fois plus grands que ceux du Soleil, et leur durée de vie 30 pour cent plus élevée. Les simulations, qui reproduisent bien ces phénomènes dans le cas du Soleil, échouent pour l'instant à reproduire la granulation de ces étoiles.

L'astérosismologie apporte également un regard neuf sur l'activité magnétique des étoiles. Le champ magnétique est un ingrédient encore très mal connu de la physique stellaire. Depuis quelques années, une nouvelle génération de spectromètres (ou spectropolarimètres) permet d'établir des cartographies de plus en plus précises du champ magnétique à la surface des étoiles. Les données de CoRoT ont pour leur part mis en évidence pour la première fois en 2010 les variations de fréquence et d'amplitude des oscillations induites par un cycle d'activité magnétique dans une autre étoile de type solaire, HD49933. Raphael Garcia, du Service d'astrophysique du CEA, à Saclay, et ses collègues ont constaté en particulier que l'amplitude des modes décroît lorsque leur fréquence augmente, de la même façon que pour le Soleil au cours de son cycle magnétique. Ces variations résulteraient de l'évolution de l'activité magnétique de l'étoile, qui modifie sa structure. Le cycle magnétique de cette étoile 20 pour cent plus massive que le Soleil serait ainsi de 120 jours, contre 11 ans pour le Soleil. La rotation, huit fois plus rapide que celle du Soleil, pourrait être à l'origine de cette différence.

Alors que la mission CoRoT a été prolongée jusqu'en 2013, l'échantillon d'étoiles observé couvre une large gamme de masses et de stades évolutifs, des étoiles comparables au Soleil jusqu'à d'autres 40 fois plus massives, et des étoiles de moins de un million d'années à plus de dix milliards d'années, comme certaines géantes rouges. Les données livrées par *Kepler* depuis 2009 sont en train d'élargir cet échantillon de façon spectaculaire et donneront accès à des durées d'observation de plusieurs années, hors de portée de CoRoT.

D'autres projets sont en préparation, tel BRITTE, une flottille de nanosatellites dédiée à la photométrie des étoiles les plus brillantes (le lancement des deux premiers est prévu en 2012), ou PLATO, en cours d'évaluation par l'Agence spatiale européenne, qui propose d'étudier les systèmes stellaires dans leur ensemble, en réalisant l'étude sismique des étoiles autour desquelles il aura détecté des planètes.

La moisson de résultats récents confirme d'ores et déjà que l'astérosismologie apporte bien le regard nouveau sur la physique stellaire que les astrophysiciens attendaient. Gageons que les années à venir seront tout aussi riches en découvertes, sinon plus!

Ondes gravitationnelles

la bande son de l'Univers

Bernard Schutz et Stefano Vitale

La mission spatiale LISA, prévue pour détecter des ondes gravitationnelles, devrait bientôt jeter un regard neuf sur des phénomènes cosmiques violents, mais jusqu'ici invisibles, tels que la fusion de deux trous noirs ou celle d'autres systèmes binaires.

La fin du muet approche en astronomie. Plusieurs grands instruments, dont la mission spatiale LISA, vont bientôt nous permettre d'écouter les « sons » de l'Univers et d'ouvrir une nouvelle dimension dans l'étude du cosmos. Le concert cosmique auquel nous pouvons nous attendre s'annonce prometteur.

Bien sûr, ces sons cosmiques ne sont pas les sons usuels : l'espace est presque vide et, faute de support, les ondes acoustiques ne peuvent s'y propager. Il s'agit des ondes gravitationnelles, la propagation des vibrations de l'espace-temps lui-même. La théorie de la relativité générale décrit comment les masses déforment l'espace-temps. Ainsi, quand des corps massifs accélèrent, par exemple lorsque deux étoiles tournent l'une autour de l'autre dans un système binaire, des déformations se propagent dans l'espace-temps, un peu comme un navire engendre un train d'ondes dans son sillage. Ces ondes dites gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière.

Comme les ondes mécaniques ou électromagnétiques, les ondes gravitation-

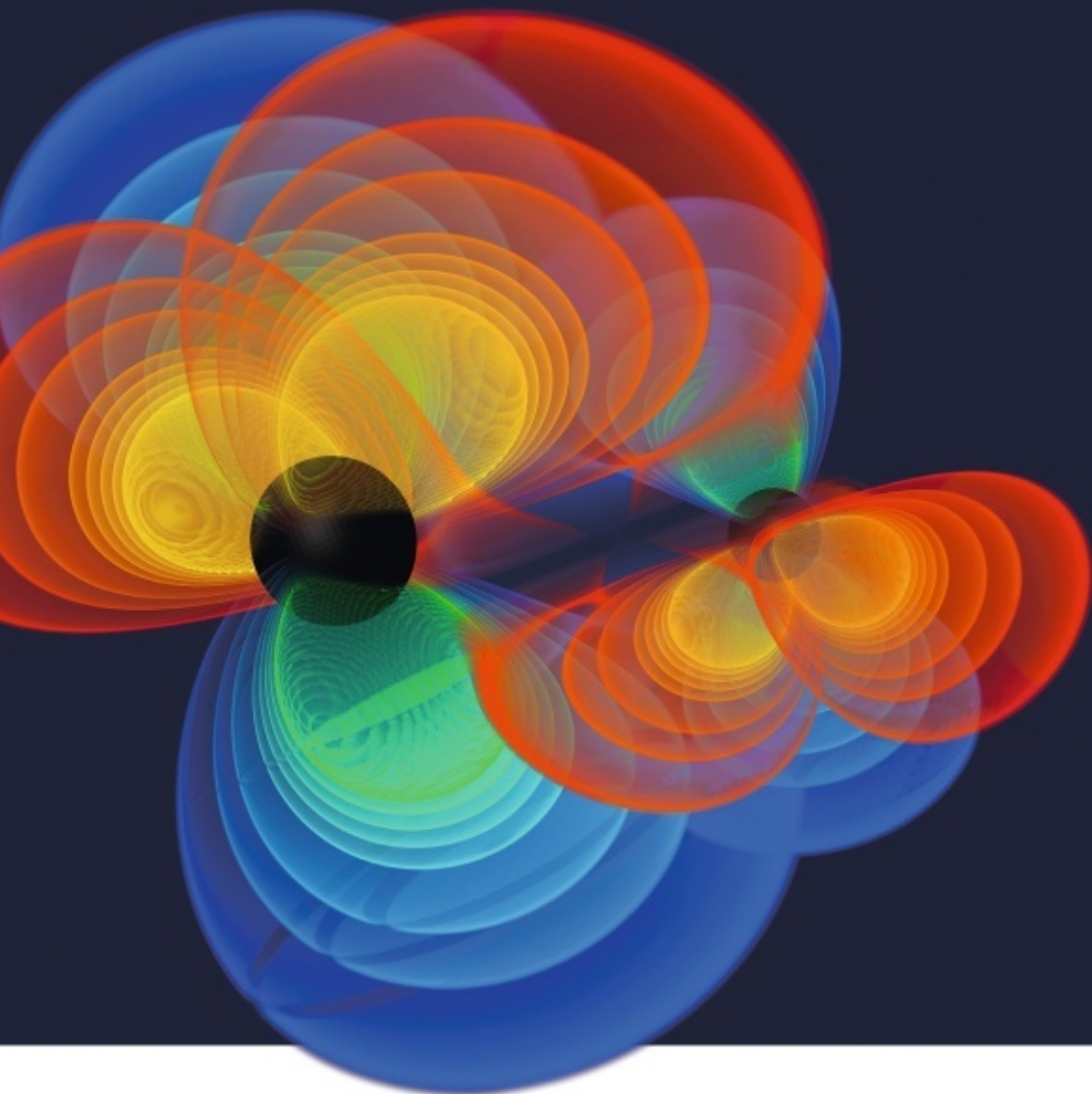
nelles dissipent l'énergie du système qui les produit. Leur existence a ainsi été prouvée indirectement par la mesure du ralentissement de la période de pulsars binaires (des couples d'étoiles à neutrons émettant des faisceaux radio périodiques), qui trahit la perte d'énergie par l'émission d'ondes gravitationnelles, en parfait accord avec les prédictions de la théorie de la relativité.

Notre connaissance de l'Univers provient presque exclusivement de la lumière, autrement dit des ondes électromagnétiques, que nous captions à l'aide d'instruments de plus en plus sensibles dans une vaste gamme de longueurs d'onde, allant des ondes radio aux rayons gamma. Toutefois, de nombreux objets et phénomènes cosmiques, tels les trous noirs supermassifs tapis au centre des galaxies, n'émettent pas de lumière et sont invisibles dans le spectre électromagnétique. Cependant, leurs mouvements provoquent une émission intense d'ondes gravitationnelles, qui traversent toute forme de matière et parviennent jusqu'à nous de partout dans l'Univers. Ainsi, si nous pouvions

écouter les ondes gravitationnelles, le cosmos, qui nous semble aujourd'hui silencieux et inhabité comme un désert, nous apparaîtrait comme une forêt vierge luxuriante remplie de mille cris d'animaux.

Discrète gravité

La gravité est cependant une force difficile à observer. Elle est faible par rapport aux autres interactions fondamentales et, surtout, tous les objets plongés dans un même champ de gravitation subissent la même accélération, comme le mit en évidence Galilée. Ainsi, nous suivons tous avec la Terre la même orbite autour du Soleil, et nous « tombons » tous ensemble dans son champ de gravité. Dans un laboratoire sur Terre, à première vue, on ne peut détecter l'influence de la gravité du Soleil. Mais en y regardant de plus près, on constate que la force exercée par le Soleil est un peu plus forte dans les régions de la Terre les plus proches de l'astre, et plus faible aux points plus éloignés ; et en des points distants sur Terre, elle présente des direc-



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/Mitde 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.