

grande distance, ils ont cherché un autre site pour ce troisième détecteur. L'Inde semble prête à l'accueillir. À plus longue échéance, nous réfléchissons à une nouvelle génération d'interféromètres, tel le *Einstein Telescope*. Le concept n'est toujours pas arrêté, mais avec les techniques actuelles, nous pourrions gagner encore un ordre de grandeur sur la sensibilité et donc multiplier par 1000 le nombre de sources astrophysiques potentiellement détectables.

PLS

On dit que les ondes gravitationnelles ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Que vont-elles révéler ?

B. M. : L'étude des ondes gravitationnelles apportera son lot de découvertes astrophysiques. D'une part, la découverte de septembre 2015 confirme l'existence de binaires de trous noirs, des systèmes que l'on n'avait jamais observés. *A priori*, ces objets n'émettent que des ondes gravitationnelles et seuls les interféromètres sont capables de les « voir ». Mais si au moins l'un des trous noirs est remplacé par une étoile à neutrons, elle sera disloquée et la coalescence s'accompagnera de fortes émissions de photons ou de neutrinos. C'est pourquoi, lorsque les interféromètres détectent un signal, l'alerte est transmise à de nombreux télescopes ainsi qu'aux expériences de neutrinos *IceCube* et *Antares*.

La complémentarité des observations permettra de mieux connaître les phénomènes qui se déroulent dans l'Univers. Par exemple, lorsqu'une étoile massive explose, elle forme une supernova, source intense de lumière et de neutrinos. Son cœur s'effondre et laisse un objet très compact, tel qu'une étoile à neutrons ou un trou noir. Mais l'évolution du cœur de l'étoile durant l'explosion, opaque à la lumière, est mal connue. Les ondes gravitationnelles émises pendant l'effondrement pourraient fournir de précieuses informations.

Nous allons aussi pouvoir étudier les étoiles à neutrons. Celles-ci ont un champ gravitationnel si intense qu'elles sont parfaitement sphériques, mais elles pourraient malgré tout présenter des « montagnes » de quelques millimètres. Cette asymétrie serait source d'ondes gravitationnelles.

Pour en revenir aux binaires de trous noirs, ces systèmes sont invisibles avec les télescopes, et les ondes gravitationnelles sont



UNE ÉTOILE À NEUTRONS

est si dense que sa gravité lui impose une forme sphérique quasi parfaite. Si une « montagne » haute de quelques millimètres était présente à sa surface, cet astre en rotation rapide émettrait des ondes gravitationnelles détectables.

donc le seul moyen d'estimer leur nombre dans l'Univers. Par ailleurs, nous serons aussi en mesure d'analyser la composition des étoiles et de l'environnement qui ont engendré ces trous noirs. Par exemple, dans le système détecté en septembre, les trous noirs sont plutôt massifs ; les étoiles qui les ont produits ont donc perdu une quantité limitée de matière, le reste ayant formé les trous noirs. D'après les modèles théoriques, ce scénario n'est possible que si la métallicité des étoiles (la concentration en éléments lourds) était très faible.

Grâce à *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo*, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu et récolterons des données qui aideront à affiner les modèles théoriques.

PLS

D'autres objets sont des sources intéressantes d'ondes gravitationnelles. Pourra-t-on, par exemple, étudier les trous noirs supermassifs ?

B. M. : Les trous noirs supermassifs, tels ceux tapis au centre des galaxies, peuvent former des systèmes binaires, mais ils ne tournent pas au rythme d'une centaine de tours par seconde comme les binaires de trous noirs stellaires en coalescence. La fréquence des ondes gravitationnelles émises est donc beaucoup plus faible. Or les

interféromètres au sol se heurtent au bruit ambiant, trop important dans cette gamme de fréquences. Il faut donc s'éloigner de la Terre et s'installer dans l'espace. C'est l'idée du projet *eLISA* : trois satellites formeront un triangle équilatéral d'un million de kilomètres de côté. Le principe est le même que les interféromètres au sol – mesurer les distances entre les satellites –, mais les problématiques et les techniques à mettre en œuvre sont très différentes.

Un démonstrateur du principe d'*eLISA*, *LISA Pathfinder*, a été envoyé il y a quelques mois dans l'espace. Si tout va bien, le décollage d'*eLISA* est prévu pour 2034.

eLISA suivra aussi les systèmes binaires d'étoiles à neutrons ou de trous noirs qui sont encore loin de la coalescence et dont les orbites décrivent un tour par heure, par exemple. Le signal serait assez faible, mais il pourra être suivi sur une longue durée.

Pour être complet, les interféromètres ne sont pas le seul moyen d'étudier les ondes gravitationnelles. Des projets utilisent les pulsars, des étoiles à neutrons qui émettent un signal périodique extrêmement régulier. On peut donc établir un réseau de pulsars qui, lors du passage d'une onde gravitationnelle, avance ou retarde leurs signaux périodiques. Ces projets sont également à suivre de près. ■

Propos recueillis par Sean BAILLY

Quand nos horloges biologiques se dérèglent

Keith Summa et Fred Turek

Les fonctions du foie, du pancréas et d'autres tissus se synchronisent avec l'horloge centrale de l'organisme grâce à l'action de certains gènes. Le dérèglement de ces horloges périphériques augmente le risque d'obésité, de diabète, de dépression...

L'effet d'un décalage horaire ne vous est probablement pas inconnu. Si vous avez voyagé en avion pendant plusieurs heures vers l'est ou vers l'ouest, vous avez déjà ressenti ce qui se produit lorsque l'horloge interne de l'organisme n'est pas en phase avec le fuseau horaire où vous vous trouvez. Il faut parfois plus d'une semaine pour se remettre du décalage horaire (*jetlag* en anglais), selon l'avance ou le retard que doit prendre l'horloge centrale, au cœur du cerveau, pour synchroniser avec la tombée de la nuit le moment où l'organisme et le cerveau ont besoin de dormir.

Ces dernières années, cependant, des biologistes ont montré que l'horloge centrale n'est pas le seul élément de notre horloge interne. Le fonctionnement de l'organisme dépend de plusieurs autres horloges localisées dans le foie, le pancréas et d'autres organes, ainsi que dans le tissu adipeux – les cellules qui stockent des graisses. Si l'une ou l'autre de ces horloges périphériques se désynchronise de l'horloge centrale, le désordre qui en résulte favorise le développement de l'obésité, du diabète, de la dépression ou d'autres troubles complexes.

L'ESSENTIEL

- Dans le cerveau, une horloge centrale régule les cycles de nombreux processus biologiques.
- Dans le foie, le pancréas et divers organes et tissus, d'autres horloges synchronisent le fonctionnement de ces différentes parties avec l'horloge centrale.
- Manger ou dormir de façon répétée aux mauvais moments désynchronise ces horloges.
- Ces perturbations prédisposent au développement de l'obésité, du diabète, de la dépression et d'autres maladies.

Nous nous sommes tous deux consacrés à l'exploration du mode de fonctionnement de ces horloges périphériques et à l'identification des gènes qui régulent leur activité – rassemblés sous le nom de gènes d'horloge. Le premier a été isolé chez la mouche du vinaigre en 1984. L'un de nous (Fred Turek) faisait partie de l'équipe qui, en 1997, a découvert le premier gène impliqué chez les mammifères. Depuis, des chercheurs du monde entier ont identifié des dizaines de gènes jouant un rôle dans la synchronisation de l'organisme, auxquels ils ont donné des noms évocateurs tels que *Clock* (pour horloge), *Per* (pour période) ou *Tim* (pour timeless ou intemporel).

Dans notre laboratoire, les études ont porté sur des souris, mais une étonnante variété d'organismes vivants, allant de bactéries aux mouches du vinaigre et à l'homme, présentent des gènes d'horloge. Beaucoup de ces gènes semblent similaires chez de nombreuses espèces, signe qu'ils ont été essentiels à la survie au fil de l'évolution.

L'avancée la plus importante à ce jour est la compréhension du rôle des horloges dans les troubles du métabolisme. Le métabolisme

