

régions et apportent ainsi des informations localisées sur l'intérieur stellaire. L'amplitude et la durée de ces modes propres découlent pour leur part des mécanismes d'excitation des oscillations et des énergies mises en jeu. Nous y reviendrons.

En théorie, il suffit ainsi de mesurer les oscillations d'une étoile, d'isoler par une analyse du signal les différents modes propres dans le spectre de fréquences obtenu, puis d'« inverser le problème » pour remonter à la structure interne de l'astre.

Plus facile à dire qu'à faire. Il faut déjà mesurer ces oscillations avec une précision suffisante. On comprend depuis le début du XX^e siècle comment les étoiles peuvent vibrer, et donc se contracter et se dilater localement. Ces fluctuations entraînent des variations de luminosité. En effet, les régions qui se contractent deviennent plus chaudes et plus brillantes, tandis que les régions qui se dilatent s'assombrissent en refroidissant.

En 1953, l'astronome russe Sergei Zhevakin proposa un mécanisme pour expli-

quer l'origine des vibrations stellaires : une petite oscillation fait varier localement la pression et la température du gaz, modifiant ainsi sa capacité à bloquer le flux lumineux (son opacité). Cette variation permet le transfert de l'énergie radiative à l'oscillation, qui ainsi va gagner en énergie et en amplitude au fil des cycles. Ce mécanisme dit d'opacité explique aujourd'hui un grand nombre d'étoiles pulsantes connues.

Au cœur du Soleil

Et le Soleil ? Ce n'est qu'en 1962 que ses oscillations ont été mises en évidence. Et pour cause : la variation de luminosité correspondante, de l'ordre d'un millionième, est 10 000 fois plus faible que celle des étoiles pulsantes observées à l'époque. La période caractéristique des oscillations solaires est de l'ordre de cinq minutes.

On s'est vite rendu compte que les oscillations solaires ne résultent pas d'un mécanisme d'opacité, mais de la convec-

tion. Les mouvements du gaz dans la couche convective engendrent un bruit de fond acoustique qui couvre une large gamme de fréquences. Ces oscillations aléatoires (ou stochastiques) interfèrent de façon tantôt constructive, tantôt destructive, et ont dans l'ensemble un effet nul, excepté celles dont la fréquence est proche de celle d'un mode propre, qui entrent alors en résonance. L'oscillation puise alors de l'énergie dans la convection pour gagner en amplitude.

Depuis lors, des milliers de modes propres du Soleil ont été mesurés (notamment par le satellite SOHO). Ils ont dévoilé des détails insoupçonnés de sa structure interne. On a par exemple pu établir la vitesse de rotation en fonction de la profondeur et de la latitude, ce qui a mis en évidence que la rotation différentielle visible en surface – la période de rotation est de 24 jours à l'équateur et de 31 jours à 75 degrés de latitude – se poursuit en profondeur jusqu'à la base de la zone convective, où elle laisse brutalement place à une

COMMENT LES ÉTOILES VIBRENT

Comme une corde de violon ou la surface d'un tambour, les étoiles peuvent vibrer selon toute une gamme d'oscillations élémentaires, ou modes propres.

Chaque mode est caractérisé par une fréquence et un type de déformation. Dans le cas d'une étoile, qui est un objet sphérique, la déformation la plus simple est le mode radial fondamental : toute l'étoile se dilate puis se contracte de façon périodique (seul le centre reste fixe). À une fréquence supérieure, il existe un second mode radial : le cœur se contracte pendant que l'enveloppe se dilate et inversement. Plus « l'ordre radial » d'un mode est élevé, plus le nombre de couches qui se dilatent et se contractent alternativement est élevé. L'étoile peut également vibrer suivant des modes non radiaux,

qui ne respectent pas la symétrie sphérique. Par exemple, les pôles peuvent se dilater tandis que l'équateur se contracte.

Plus le degré d'un mode est élevé, plus la surface se décompose en zones qui se dilatent et se contractent alternativement, séparées par des lignes qui restent immobiles, les « lignes nodales ».

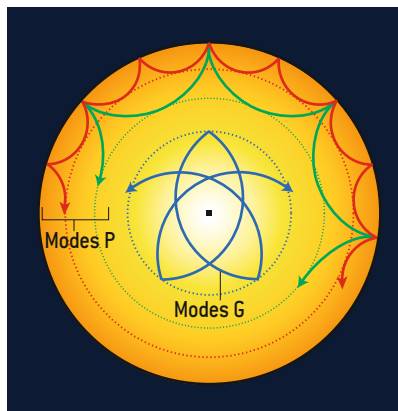
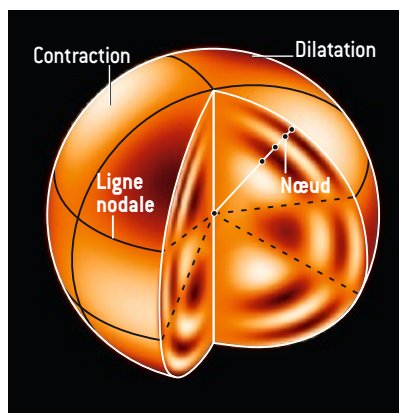
Un mode propre général est ainsi déterminé par un motif spécifique de déformation en trois dimensions, qui combine une déformation radiale et une déformation non radiale. Il est caractérisé par trois nombres : l'ordre radial n , l'ordre azimutal m et le degré l (voir ci-dessous).

Pour un mode de degré élevé, les déformations se compensent d'une région à l'autre de la surface (l'une se contracte pendant que

l'autre se dilate), de sorte que la variation de luminosité globale résultante est faible. De fait, dans des étoiles autres que le Soleil, seuls les modes de degré inférieur à quatre ont été mis en évidence.

Les modes que peut exprimer une étoile ne dépendent que de sa structure interne et de sa géométrie, et non du mécanisme d'excitation initial de l'oscillation. Ce dernier n'influe que sur l'amplitude des modes effectivement exprimés.

Différents modes sont sensibles à différentes régions de l'étoile. Les modes de pression de haut degré sont par exemple confinés près de la surface de l'étoile, tandis que les modes de bas degré se propagent à travers presque toute l'étoile. Les modes de gravité, quant à eux, sont plus sensibles au cœur de l'étoile.



À gauche, une représentation du mode de vibration $l = 4, m = 2, n = 5$. Les différentes régions de l'étoile se dilatent (*en foncé*) et se contractent (*en clair*) alternativement. Le degré l est le nombre de méridiens et parallèles laissés fixes par l'oscillation, ou lignes nodales (*en noir*). L'ordre azimutal m est le nombre de méridiens nodaux. Enfin, l'ordre radial n indique le nombre de nœuds le long d'un rayon (*points noirs*). À droite, les trajectoires des ondes associées aux modes de pression (*mode P en rouge et en vert*), qui mettent en jeu la surface et l'enveloppe de l'étoile jusqu'à des profondeurs variables, et des modes de gravité (*mode G en bleu*), plus sensibles aux régions centrales.

Éric Michel/PLS