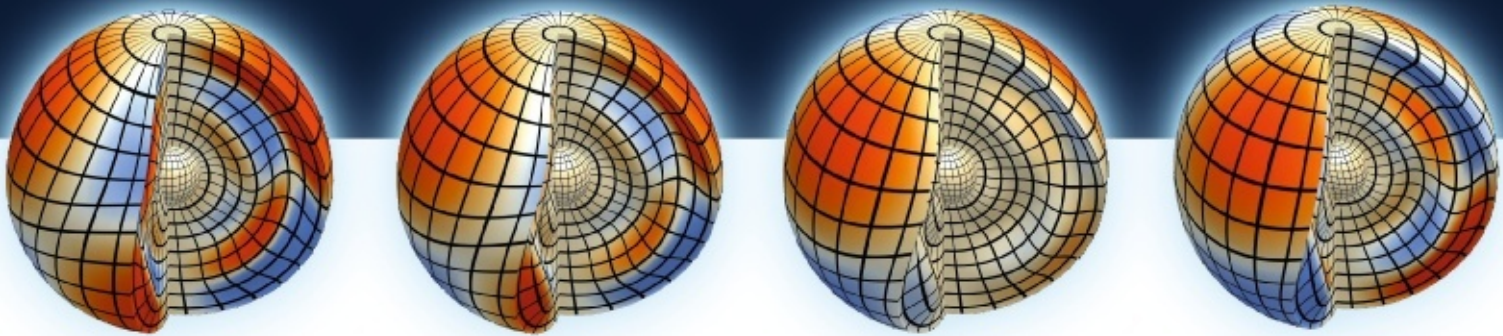


L'astérosismologie :



L'observation, avec les satellites *CoRoT* et *Kepler*, des ondes sismiques qui agitent la surface des étoiles fait entrer la physique stellaire dans une nouvelle ère.

Éric Michel, Michel Auvergne et Annie Baglin

Cette cloison que vous projetez d'abattre est-elle pleine ou creuse ? D'expérience, vous savez qu'il suffit de taper à sa surface et d'écouter le son qui en résulte : s'il est sourd, étouffé, le mur est plein. Si en revanche le son est « clair », il y a tout à parier que la cloison n'est pas très dense.

Analyser le son que produit un objet pour déterminer sa structure interne est une technique couramment employée par de nombreux artisans, industriels et scientifiques. Les sismologues étudient par exemple la propagation des ondes acoustiques engendrées par les séismes pour sonder l'intérieur de la Terre : l'analyse des temps de parcours les renseigne sur les différentes couches traversées.

Il en est de même avec les étoiles. Loin d'être immobiles, elles vibrent en permanence en raison de divers processus qui agitent le gaz brûlant dans leurs entrailles. Les infimes oscillations visibles en surface offrent aux astronomes un aperçu de leur structure interne.

Si le principe de cette « sismologie stellaire », ou astérosismologie, est sim-

ple, sa mise en œuvre est un véritable défi, tant en termes d'observations que de modélisation théorique. Longtemps limité par les difficultés des observations au sol, le domaine connaît une révolution depuis le lancement du satellite franco-européen *CoRoT*, fin 2006, et du satellite américain *Kepler*, en 2009. Une avalanche de nouvelles observations d'une précision inédite apportent un éclairage nouveau sur des questions brûlantes de la physique stellaire.

De nouvelles observables

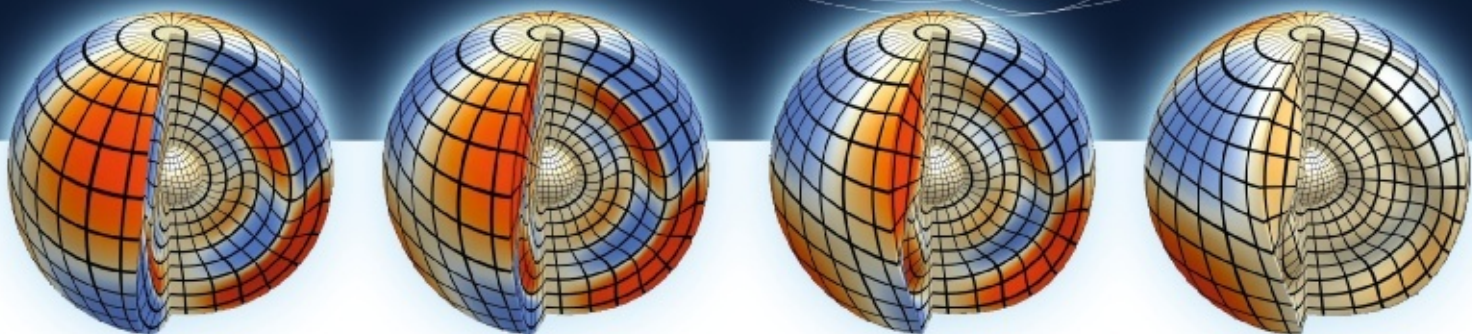
Car contrairement à ce que l'on pourrait penser, il reste beaucoup à apprendre de la physique des étoiles. En première approximation, une étoile est une boule de gaz très chaud, née de la contraction gravitationnelle d'un nuage de gaz et de poussière interstellaire. Lorsque le cœur est assez chaud et dense pour que s'y amorce la fusion nucléaire de l'hydrogène, la contraction s'arrête. Tant que cette source d'énergie perdure, l'étoile est en équilibre entre sa propre gravité et la pression interne.

Cette phase qui dure la majeure partie de sa vie est nommée séquence principale. Une fois l'hydrogène épuisé, l'étoile connaît ensuite successivement des phases de contraction puis de fusion d'autres éléments, avant de connaître une fin plus ou moins violente selon sa masse initiale.

Ce tableau fait déjà intervenir de nombreux processus physiques complexes : réactions nucléaires, interactions entre rayonnement et matière, propriétés thermodynamiques en conditions extrêmes, etc. Il est cependant loin d'être complet. De nombreux autres processus entrent en jeu : transport de l'énergie par le brassage convectif dans les couches proches de la surface, ségrégation des différents éléments chimiques au fil du temps sous l'effet de la gravité et du flux de rayonnement, mélange associé à la circulation à grande échelle induite par la rotation de l'étoile, influence d'un champ magnétique éventuel, etc. Ces phénomènes complexes à modéliser modifient la structure interne des étoiles, et par là, leur évolution.

Or notre compréhension actuelle des étoiles repose essentiellement sur des gran-

voir battre le cœur des étoiles



deux caractérisant leur surface. L'analyse spectroscopique de la lumière émise permet ainsi d'estimer la température, la composition chimique ou la gravité à la surface de l'étoile. Ces observations ont permis de comprendre les grandes lignes de la structure des étoiles et de leur évolution, mais elles apportent trop peu de renseignements sur ce qui se passe à l'intérieur. Pour mieux comprendre les étoiles, de nouvelles observables sont indispensables. C'est précisément ce qu'apporte l'astérosismologie.

Quand les étoiles résonnent

Un grand nombre d'étoiles, à commencer par le Soleil, vibrent. Ces oscillations, qui animent une étoile dans son ensemble, résultent de la propagation de deux types d'ondes à l'intérieur de l'astre. D'une part, des ondes de pression, similaires aux ondes sonores usuelles qui sont dues à la propagation d'une perturbation de la pression au sein du gaz. D'autre part, des ondes de gravité, équivalentes à celles créées par un caillou à la surface de l'eau; elles correspondent à la propagation d'une perturbation engendrée par un élément de volume qui oscille autour de sa position d'équilibre sous l'effet de la force d'Archimède.

Ces ondes traversent l'étoile à des vitesses qui dépendent des conditions locales de température, de densité ou de composition chimique. Elles sont réfléchies en

totalité ou en partie par la surface et par l'interface entre les différentes couches. À certaines fréquences bien définies, qui dépendent des vitesses de propagation, des dimensions et de la forme de l'étoile (qui peut notamment être aplatie par la rotation), ces ondes se superposent de façon que toute l'étoile vibre au même rythme. Une telle vibration constitue ce que l'on nomme un mode propre d'oscillation. Chaque mode propre correspond à une fréquence précise et à un type de déformation, où des régions de la surface et de l'intérieur de l'astre se contractent et se dilatent alternativement de façon périodique (voir l'encadré page 74). On parle de modes de pression (modes P) quand des ondes de pression sont en jeu, et de modes de gravité (modes G) lorsque des ondes de gravité sont impliquées. Certains modes résultant du couplage d'un mode P et d'un mode G sont dits mixtes. Comme un instrument de musique, les étoiles peuvent vibrer selon une superposition de ces fréquences fondamentales, ou modes propres.

Les modes propres sont une source d'information unique sur la structure interne d'une étoile. De même qu'un violon produit un son plus aigu qu'un violoncelle ou n'a pas le même timbre qu'une guitare, les modes propres dépendent de la structure de l'étoile: sa taille et sa forme, mais aussi la densité, la composition ou la vitesse de rotation de chaque couche influent sur les modes propres. Des modes distincts sont sensibles à différentes

1. SIMULATION D'UN MODE
de vibration propre d'une étoile
(sur quelques minutes
de gauche à droite).

L'ESSENTIEL

- ✓ Les étoiles vibrent en permanence sous l'effet des ondes sismiques qui les traversent.
- ✓ Les modes propres d'oscillation apportent des informations sur leur composition et leur structure interne.
- ✓ Leur observation depuis l'espace révolutionne l'étude sismique des étoiles.
- ✓ L'astérosismologie apporte ainsi une vue inédite sur le cœur, la convection ou encore le champ magnétique des étoiles.

Richard Townsend