

Paris, le 05 mai 2014

Modélisation 3D du Soleil : de son cœur à sa surface

Une équipe du laboratoire Astrophysique Instrumentation & Modélisation (CEA/CNRS/Université Paris Diderot) a réussi à modéliser les effets d'ondes de gravité dans une simulation du Soleil extrêmement complète, de son cœur nucléaire à sa surface convective, et ce en 3 dimensions. Les résultats donnent accès à des informations d'une très haute précision et livrent une description rigoureuse et inédite de la dynamique interne du Soleil. Ces travaux, publiés dans la revue *Astronomy and Astrophysics*, devraient permettre d'affiner grandement les modèles théoriques et de mieux préparer les futures missions spatiales (Solar-Orbiter, Plato) d'observation d'étoiles telles que le Soleil.

Les ondes qui se propagent à l'intérieur des étoiles, et dans le cas présent du Soleil, influencent leurs structures, évolutions et dynamiques. Pouvant créer des pulsations globales, elles sont une source d'information précieuse pour étudier les phénomènes dynamiques à l'intérieur des étoiles. Ces ondes se divisent en 2 types :

1. les ondes acoustiques, tout à fait semblables aux ondes sonores ;
2. les ondes de gravité, qui se propagent dans tout fluide stratifié en densité, sans mouvement à grande échelle (macroscopiques) de convection.

Ces ondes jouent un rôle important dans l'évolution de la rotation et du mélange des éléments chimiques dans les couches profondes des étoiles de même type que notre Soleil. À l'instar des ondes acoustiques, ces ondes de gravité peuvent, selon leur fréquence, entrer en résonance dans le Soleil sur des modes appelés « modes g » : il se produit alors le même phénomène qu'avec une corde de guitare, qui résonne sur certaines harmoniques ou modes propres.

Grace aux simulations non linéaires effectuées par l'équipe du laboratoire Astrophysique Instrumentation & Modélisation dans le cadre du projet ERC STARS 2¹, il est possible de comparer l'amplitude de ces ondes dans le cœur du Soleil et d'en suivre la présence et la dynamique, du cœur à la surface. Ces résultats fournissent une base de travail solide pour affiner les modèles théoriques et ouvrent la possibilité à des observations mieux ciblées, participant ainsi à une connaissance toujours plus précise d'étoiles telles que le Soleil et de leur évolution.

Ces simulations constituent une première et un véritable tour de force tant le nombre de phénomènes et l'étendue spatiale pris en compte sont grands : turbulence, convection, effets thermiques, radiatifs et visqueux, rotation différentielle... Pour la première fois, ces travaux offrent une simulation 3D extrêmement riche et complète (97% du volume du Soleil) de la dynamique d'une étoile dans ses 3 dimensions. D'un point de vue purement numérique, la force de ces résultats tient dans le code ASH², co-développé et utilisé par cette équipe.

Il s'agit de simulations haute performance, qui ont nécessité 5 millions d'heures de calcul sur le ordinateur Ada de GENCI, installé à l'Idris (CNRS), et 15 millions sur le supercalculateur Curie mis à disposition par GENCI auprès des chercheurs européens dans le cadre de l'infrastructure de recherche PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe*).

¹ Simulations of Turbulent, Active and Rotating Suns and Stars <http://www.stars2.eu/>

² ASH= Anelastic Spherical Harmonics

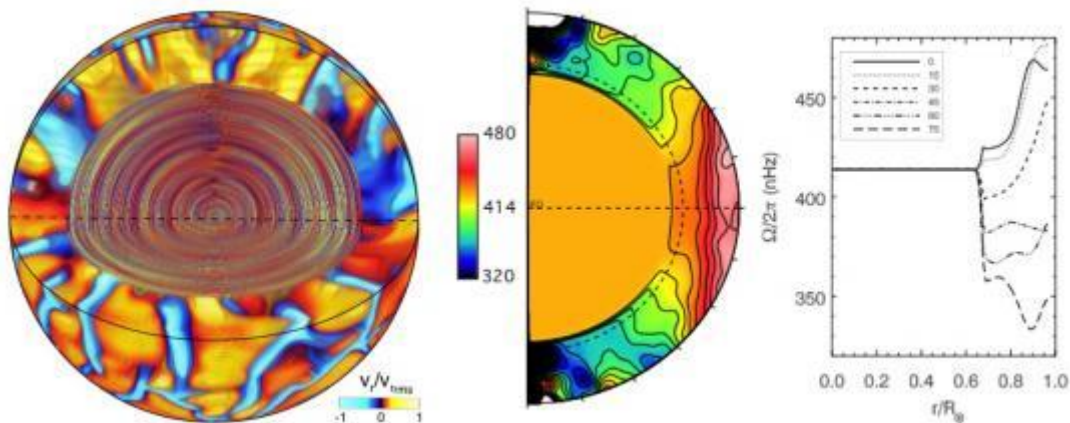
Comprendre le couplage entre les couches internes et externes d'une étoile

L'intérieur d'une étoile est composé de deux zones, dont les tailles dépendent de la masse de l'étoile.

- Dans le cas des étoiles de type solaire, simulées ici, la zone la plus externe est convective et turbulente : les transferts de chaleurs se font par des mouvements de matière, comme l'air dans une maison chauffée par des convecteurs.
- La zone interne, quant à elle, est stablement stratifiée : c'est une zone radiative où ce sont principalement les photons (la lumière) qui évacuent l'énergie vers l'extérieur. C'est uniquement dans cette zone stable que les ondes de gravité peuvent naître et se propager, mais elles sont très difficiles à détecter depuis l'extérieur car la zone convective est une barrière qui les atténue fortement.

De surcroît, le couplage entre la zone radiative et la zone convective est une des grandes questions actuelles de la physique solaire, et représente un défi numérique important dû à la large gamme d'échelles spatiales et temporelles impliquées. En effet, les phénomènes à prendre en compte sont nombreux, et ils n'interviennent pas tous sur les mêmes échelles, s'influençant les uns les autres de manière très complexe.

Ainsi ces résultats ouvrent un large champ d'exploration comme la possibilité de prendre en compte aussi le champ magnétique et son interaction avec les ondes, et de s'approcher encore un peu plus de la réalité.



À gauche : Vue 3D d'une simulation du Soleil, dans laquelle on a retiré un quart de sphère pour voir l'intérieur de l'étoile. Quand les flots convectifs descendants (bleus) arrivent à l'interface avec la zone radiative (localisée à 70% du rayon de l'étoile), ils excitent des ondes de gravité qui se propagent dans la zone radiative en « spiralant » vers le centre.

À droite : Coupe du plan méridien montrant la vitesse de rotation dans les zones internes de l'étoile. Dans la zone convective, le taux de rotation dépend de la latitude. Le profil obtenu dans la simulation est très proche de celui déduit des mesures héliosismiques. La zone radiative, elle, tourne comme un solide, à un taux de rotation constant. © CEA/SAp

Références: "Theoretical seismology in 3D : nonlinear simulations of internal gravity waves in solar-like stars", Lucie Alvan, Allan Sacha Brun, Stéphane Mathis, publié dans la revue *Astronomy & Astrophysics*. Pour une version électronique : <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201323253>

Contact Presse : CEA / Service Information-Media
Nicolas TILLY | T. +33 (0)1 64 50 17 16
nicolas.tilly@cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
CEA service information média | T. +33 (0)1 64 50 20 11