

Évolution de la dynamique interne des étoiles de type solaire et rétroaction sur leur structure: rotation et champ magnétique

Evolution of the internal dynamics of solar-like stars and feedbacks on their structure: rotation and magnetic field

DESCRIPTION ET PROBLEMATIQUE

Depuis la découverte et la caractérisation de milliers d'exoplanètes jusqu'à la compréhension fine de l'évolution chimique des galaxies, le développement d'une vision cohérente de l'évolution et de la dynamique des étoiles ainsi que de leurs interactions avec leur environnement constitue une pierre angulaire incontournable de l'astrophysique moderne. Dans le cas des étoiles analogues à notre Soleil, elle nous permet de replacer ce dernier ainsi que notre système solaire dans le contexte global de l'Univers qui nous entoure. Du fait de leur enveloppe convective externe, les étoiles de type solaire sont le siège de modes d'oscillation cohérents dont l'observation par la sismologie du Soleil et des étoiles (l'hélio- et l'astéro-sismologie) nous permet de caractériser leurs paramètres fondamentaux (i.e. leur masse, leur rayon et leur âge), l'ensemble de leurs propriétés structurelles et thermodynamiques (densité, pression, température, etc., García & Ballot 2019), mais aussi leur dynamique de surface depuis leur rotation (García et al. 2014 ; Santos et al. 2021) jusqu'à leur activité magnétique (Mathur et al. 2023) ainsi que le lien qui les unit (Mathur et al. 2024).

Un obstacle subsiste néanmoins dans l'élaboration d'une vision complète et cohérente. Durant la séquence principale, l'enveloppe convective turbulente des étoiles de type solaire empêche la détection des modes individuels permettant la caractérisation de leur cœur (García et al. 2007). Ce verrou a été partiellement ouvert depuis une douzaine d'années grâce aux étoiles sous géantes et géantes rouges observées par la mission *Kepler* de la NASA dans lesquelles les modes mixtes gravito-acoustiques, se propageant depuis leur surface jusqu'à leur cœur, nous ont permis de caractériser leur rotation profonde (Deheuvels et al. 2012, 2014 ; Beck et al. 2012 ; Mosser et al. 2013 ; Gehan et al. 2018 ; Li et al. 2024). En particulier, en appliquant des techniques d'inversion, il est devenu possible de contraindre le profil de rotation en fonction du rayon ce qui est extrêmement important pour comprendre les processus physiques à l'œuvre dans le cœur des étoiles de type solaire. En effet, la comparaison des données avec les prédictions des modèles de structure et d'évolution stellaire incluant la rotation et les seuls processus hydrodynamiques associés a montré des différences de plus de deux ordres de grandeur sur la rotation du cœur (e.g. Ceillier et al. 2012). Cela a mis en évidence la nécessité d'inclure de nouveaux processus physiques, par exemple le champ magnétique, pour augmenter le transport du moment cinétique prédit par les modèles (e.g. Eggenberger et al. 2017 ; Moyano et al., 2023). Cependant, après plus de dix ans depuis les premières inversions des profils de rotation de ces étoiles, la compréhension et la modélisation du magnétisme profond des étoiles restent dans leur enfance du fait du manque d'observables directes.

Cette situation a changé depuis 4 ans, tout d'abord grâce aux études théoriques menées au sein du LDE3 au CEA dans le cadre de la thèse du Dr. Lisa Bugnet. Elles ont posé les fondements théoriques de la recherche des champs magnétiques internes dans les étoiles géantes rouges qui sont les descendantes des étoiles de type solaire et de masses intermédiaires (Bugnet et al. 2021 ; Mathis et al. 2021). Ces travaux ont permis leur première détection ainsi que le développement d'outils de prédictions théoriques et de diagnostics astéro-sismiques généraux (Li et al. 2022 ; Bugnet 2022 ; Mathis & Bugnet 2023 ; Das et al. 2024). Depuis, l'amplitude de ces champs magnétiques internes a été mesurée pour une trentaine d'étoiles (Li et al. 2022, 2023 ; Deheuvels et al. 2023 ; Hatt et al. 2024) ce qui ne constitue que le début de leur détection et de leur caractérisation.

Cette thèse a donc pour objectif d'apporter des réponses aux questions fondamentales qui suivent pour comprendre et modéliser l'évolution des étoiles de type solaire :

Quelle est l'origine des champs magnétiques observés dans le cœur des géantes rouges, et quel est leur impact sur l'évolution des étoiles ?

Était-il présent dans des étoiles qui avaient un cœur convectif durant la séquence principale ? Était-ce aussi le cas pour celles qui n'en avaient pas ? Quel est l'impact de ce champ magnétique sur la détermination de l'âge des étoiles ?

L'amélioration de ces modèles va permettre, entre autres, une meilleure détermination des âges stellaires cruciaux pour la physique stellaire ainsi que pour la datation des systèmes planétaires et la physique de l'évolution galactique. Cela va nous apporter un tout nouvel éclairage sur les observations obtenues par les missions spatiales telles que *Kepler*, K2 et TESS et par la mission pierre angulaire de l'ESA GAIA pour laquelle les estimations des âges sont partiellement calibrées à partir des mesures sismiques.

Répondre à ces questions est dans ce cadre crucial pour le succès de la mission M3 de l'ESA PLATO, dont le lancement est prévu fin 2026 et dont l'objectif est de détecter d'autres planètes terrestres orbitant autour d'autres soleils et de comprendre les systèmes extrasolaires dans leur ensemble. Le CEA/DRF/IRFU/DAP est fortement impliqué dans sa préparation, tant sur le hardware que sur le segment sol où il a la responsabilité clé du "pipeline" fournissant les paramètres fondamentaux des étoiles telles que la masse, le rayon et l'âge qui permettent la caractérisation des exoplanètes.

DESCRIPTION LABO/ENCADREMENT

L'étudiant(e) sera supervisé(e) par le Dr. (HDR) Rafael A. García, Directeur de Recherche au Laboratoire Dynamique des Étoiles, des (Exo)-planètes, et de leur environnement du Département d'Astrophysique du CEA-IRFU-DRF. Il est le responsable scientifique de l'instrument GOLF/SoHO (ESA/NASA) ainsi que du développement de la mission PLATO (ESA) au DAP/IRFU.

La thèse se déroulera au sein du LDE3 au CEA Paris-Saclay. Le LDE3 est un laboratoire de recherche composé d'une trentaine de personnes. Il est l'un des acteurs principaux de l'hélio- et de l'astéro-sismologie spatiale ainsi que des études de la rotation, du magnétisme et des atmosphères stellaires.

FORMATION ET COMPETENCES REQUISES

Master 2 en astrophysique. Des connaissances et de l'expérience en traitement des données et pour l'utilisation des méthodes d'IA seraient un atout ainsi que des connaissances en physique et en sismologie stellaire et en hydrodynamique.

COMPETENCES ACQUISES

Ce sujet de thèse permettra à l'étudiant de développer une connaissance de niveau international en physique, en sismologie et en hydrodynamique stellaire, en modélisation et en traitement des données astéro-sismiques en lien avec la caractérisation des systèmes exo-planétaires, champs de recherche en plein essor en astrophysique avec les missions *Kepler/K2* (NASA), TESS (MIT/NASA), JWST (NASA/ESA), et dans un futur proche, PLATO (ESA) et ARIEL (ESA).

COLLABORATIONS/PARTENARIATS

Cette thèse s'inscrit dans l'exploitation des missions *Kepler/K2*, TESS, JWST ainsi que sur la préparation du segment sol de la mission M3 PLATO. L'étudiant bénéficiera du large réseau de collaborateurs internationaux du Dr. Rafael A. García, ainsi que des autres membres du LDE3, en Europe, aux USA, et en Australie, notamment pour l'utilisation des codes d'analyses sismiques et de ceux pour la modélisation de la structure et des oscillations des étoiles. Au cours de sa thèse, le doctorant effectuera des séjours à l'étranger, par exemple à l'ISTA en Autriche et à l'IAC en Espagne.

CONTACTS

Dr. Rafael A. García

Phone : 0169082725

E-mail : Rafael.garcia@cea.fr