

## **Multi-band spectro-interferometric survey of massive stars with the new generation instruments at VLTI & CHARA**

Massive stars are key components of the Universe and understanding these extreme objects is crucial for all astronomical domains, from stellar physics to galactic evolution and the early Universe which they re-ionized. Through strong winds and supernovae, they inject kinetic and radiative energy, dust, and metals in the interstellar medium. Their final collapse is at the origin of neutron stars and black holes. Massive stars are fascinating objects, which call for a clear understanding of their birth, evolution, and death. But such an understanding requires a good description of their interior including rotation and pulsations, their observable atmosphere, and their often-complex environment.

Among all available observing techniques, interferometry is the only one providing the milli-arcsecond (mas) angular resolution needed to resolve stellar surfaces and close-by environments, allowing for instance to directly probe departure from spherical symmetry induced by fast-rotation or binarity and thus to put strong physical constraints on these phenomena.

The Lagrange laboratory of the Observatoire de la Côte d'Azur is a leading institute in the development and scientific exploitation of interferometric beam-combiners. For more than twenty years, we have been building state-of-the-art instruments for the world major interferometric arrays: The Center for High Angular Resolution Array (CHARA) in California, and the European Very Large Telescope Interferometer (VLTI) in the Atacama Desert in Chile. Among these instruments are AMBER, the first K-band instrument at VLTI, and until now the most productive interferometric beam-combiner ever built; MATISSE, the new mid-infrared VLTI spectro-interferometric imager operating since 2018; VEGA the first visible instrument at CHARA and SPICA its upcoming successor that will be installed this year.

Thanks to these instrumental developments, our team in Nice has gathered a huge and invaluable amount of visible-to-mid-infrared spectro-interferometric data on various massive stars ranging from classical Be stars, i.e., close to main-sequence extreme rotators surrounded by gaseous environments, to more evolved objects, such as supergiants stars, which shows strong radiative winds or even more complex dusty and gaseous disk-like environments such as the one found around B[e] supergiants.

These data will be analyzed in the frame of the MASSIF ANR project (<https://www.anr-massif.fr/>) which aim at building synergies between specialists in interferometry, radiative transfer, and stellar interiors to progress in the understanding of massive stars.

A PhD scholarship on this subject is funded by the MASSIF project and the PhD student will work within the stellar physics team at the Lagrange laboratory in Nice on the analysis of spectro-interferometric data already collected, and on the preparation and conduct of new observational campaigns at VLTI and CHARA. This thesis will cover a large field of research ranging from stellar physics of massive stars and radiative transfer in atmosphere and circumstellar environments, to interferometric data reduction and analysis using and developing model-fitting and image reconstruction software.

Thus, we are looking for a motivated candidate, having a background in Astrophysics, especially on massive stars, astronomical data reduction and/or numerical simulations. A background or interest in stellar interferometry will certainly be a plus. Our proposal is based on a culture of inclusion and diversity and an environment that guarantees equal opportunities. We also strongly encourage applications from women.

## **Etude statistiques des étoiles massives en spectro-interférométrie multi-bandes avec la nouvelle génération d'instruments au VLTI et à CHARA**

Les étoiles massives sont une composante clé de l'Univers et leur compréhension est cruciale pour tous les domaines astronomiques, de la physique stellaire à l'évolution galactique et même à l'Univers primordial qu'elles ont ré-ionisé. Du fait de leur fort vents radiatif et leur fin de vie sous forme de supernovae, elles injectent de l'énergie cinétique et radiative, de la poussière et des métaux dans le milieu interstellaire. Leur effondrement final est à l'origine des étoiles à neutrons et des trous noirs. Les étoiles massives sont des objets fascinants, mais leur compréhension nécessite une bonne description de leur intérieur incluant rotation et pulsations, de leur atmosphère et de leur environnement souvent complexe.

Parmi toutes les techniques d'observation, l'interférométrie est la seule à atteindre une résolution angulaire de l'ordre de la milliseconde d'arc nécessaire pour résoudre spatialement les surfaces stellaires et les environnements proches, permettant par exemple de détecter directement une rupture de symétrie sphérique induite par la rotation rapide ou la binarité et de permettre par conséquent de contraindre fortement la physique de ces phénomènes.

Le laboratoire Lagrange de l'Observatoire de la Côte d'Azur est un leader dans le développement et l'exploitation scientifique d'instruments interférométriques. Depuis plus de vingt ans, nous construisons des instruments pour les principaux interféromètres mondiaux : le Center for High Angular Resolution Array (CHARA) en Californie et le Very Large Telescope Interferometer (VLTI) dans le désert d'Atacama au Chili. Parmi ces instruments figurent AMBER, le premier instrument en bande K du VLTI, et jusqu'à présent l'instrument interférométrique le plus productif jamais construit ; MATISSE, le nouvel imageur spectro-interférométrique dans infrarouge thermique opérationnel depuis 2018 sur le VLTI ; VEGA le premier instrument visible de CHARA et SPICA son successeur qui sera installé cette année.

Grâce à ces développements instrumentaux, notre équipe à Nice a accumulé une grande quantité de données spectro-interférométrique visibles et infrarouges sur divers types d'étoiles massives allant des Be classiques (étoiles proches de la séquence principale en rotation rapide entourées par des disques de gaz), à des objets plus évolués, étoiles supergéantes possédant de forts vents radiatifs ou des environnements plus complexes de gaz et de poussières comme les supergéantes B[e].

L'ensemble des données acquises doivent être analysées dans le cadre du projet ANR MASSIF (<https://www.anr-massif.fr/>) qui vise à créer des synergies entre spécialistes de l'interférométrie, du transfert radiatif et des intérieurs stellaires des étoiles massives.

Une bourse doctorale sur ce sujet est financée par le projet MASSIF et le doctorant travaillera au sein de l'équipe de physique stellaire du laboratoire Lagrange à Nice sur l'analyse de données spectro-interférométriques déjà collectées, et sur la préparation et la conduite de nouvelles campagnes d'observation au VLTI et à CHARA. La thèse couvrira un large domaine de recherche : physique stellaire des étoiles massives, transfert radiatif dans l'atmosphère et les environnements circumstellaires, réduction et analyse de données interférométriques et reconstruction d'images.

Nous recherchons donc un candidat motivé, ayant une formation en astrophysique, notamment sur les étoiles massives, la réduction de données astronomiques, et/ou les simulations numériques. Une formation ou un intérêt pour l'interférométrie stellaire sera certainement un plus. Notre proposition est basée sur une culture d'inclusion et de diversité et un environnement qui garantit l'égalité des chances. Nous encourageons également fortement les candidatures féminines.