



## Etudes des propriétés X et gamma de microquasars : le monitoring INTEGRAL de GRS 1915+105

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LEPCHE](#)

**Candidature avant le** 01/05/2022

**Durée** 3 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [RODRIGUEZ Jerome](#)  
+33 1 69 08 98 08  
[jerome.rodriquez@cea.fr](mailto:jerome.rodriquez@cea.fr)

### Résumé

Le but du stage est d'analyser la grande base de données du satellite INTEGRAL en se focalisant sur le microquasar GRS 1915+105. Des données d'archives mais aussi en cours d'acquisition durant le stages seront systématiquement scrutées

### Sujet détaillé

Les microquasars sont des systèmes binaires X contenant habituellement un trou noirs et sièges de jets relativistes. Ils passent la majorité de leur vie en dormance et entrent sporadiquement dans des périodes d'activité, nommées éruptions, durant lesquelles ils deviennent extrêmement lumineux à toutes longueurs d'onde, et en particulier en rayons X et gamma.

Notre équipe mène depuis de nombreuses années des campagnes de suivis de nombreux microquasars afin de comprendre les mécanismes responsables des grandes variations de leur luminosité au cours des éruptions. En sus des diagnostics 'classiques' (variations temporelles, spectroscopie X) INTEGRAL permet de plus de sonder les propriétés de haute énergie (typiquement au-delà de 100 keV) de manière unique, et aussi d'aborder ces émissions sous l'angle de la polarimétrie.

Nous nous intéresserons pendant le stage à GRS 1915+105, un microquasar en activité depuis 30 ans, au comportement assez singulier, et qui a montré depuis 2018 une baisse historique de sa luminosité. L'origine de ce comportement est débattu, et sera l'une des questions principales du stage: la source a-t-elle subit une transition d'état classique vers la dormance ou expérimente-t-on la présence d'un "nuage" absorbant le rayonnement?

Nous nous focaliserons aussi sur sur la potentielle présence d'une composante dure (au delà typiquement de 50-100 keV) parfois détectée dans ces objets et dont l'origine est largement débattue:

-Couronne d'électrons sources de rayonnement Compton

-Base d'un jet relativiste source de rayonnement Synchrotron

Si le temps le permet les propriétés de polarisation de ce rayonnement seront abordées.

Enfin la campagne de monitoring étant prévue pour continuer en 2022 (l'encadrant de stage est PI du projet), avec notamment des prises de données en général planifiée entre Mars et Juin, ces observations seront d'abord analysées

---

en temps quasi-réel (2heures de décalage entre l'observation et la réception des données) afin de scruter les variabilités de GRS 1915+105 et des sources du large champ céleste couvert par INTEGRAL (29x29 degrés), et prendre les initiatives appropriées en cas d'événement particulier (Télégramme astronomique, déclenchement de ToO, suivis multi-longueur d'onde...).

Un niveau bac +5 (équivalence de Master II) est requis, ainsi qu'une formation de base en astrophysique. Une poursuite en thèse pourra être envisagée selon l'issue du stage.

### **Mots clés**

Astrophysique des hautes énergies - objets compacts - accréation / éjection

### **Compétences**

Observations et analyses de données Réductions des observations avec pipeline officielles Analyse temporelle Spectroscopie Polarimétrie Développement d'outils spécifiques si nécessaires en python

### **Logiciels**

Linux python

---

**Summary**

**Full description**

**Keywords**

**Skills**

**Softwares**

Linux python



## Correction des images de la mission TESS (NASA) grâce aux techniques d'ondelettes

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LDE3](#)

**Candidature avant le** 01/09/2022

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** non

**Contact** [GARCIA Rafael A.](#)

+33 1 69 08 27 25

[rafael.garcia@cea.fr](mailto:rafael.garcia@cea.fr)

**Autre lien** <http://irfu.cea.fr/Pisp/sandrine.pires/>

### Résumé

Pendant le stage, l'étudiant se familiarisera avec des techniques innovantes en traitement du signal pour le traitement des données de la mission NASA/TESS actuellement en vol. Le stage servira également d'introduction à la physique stellaire et aux processus physiques qui régissent la rotation des étoiles.

### Sujet détaillé

Nous disposons actuellement de millions d'observations d'étoiles par la mission NASA TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) qui n'ont pas encore pu être étudiées en détail à cause des problèmes de calibration des courbes de lumière.

Les images acquises par le satellite TESS présentent des artefacts instrumentaux et environnementaux qui ont des périodicités similaires à la période de rotation des étoiles. La présence de ces artefacts perturbent l'analyse des données et demandent d'aller vers des traitements de pointe.

Dans ce stage, nous proposons d'utiliser de nouvelles méthodes de traitement basées sur des représentation de type ondelettes, ridgelets ou curvelets. Ces méthodes vont permettre de séparer le signal des artefacts de mesure et ainsi permettre l'étude des courbes de lumière stellaires.

Le stage finira par l'étude de la rotation de surface d'un sous-échantillon d'étoile pour valider la méthode.

Pendant le stage, l'étudiant se familiarisera avec des techniques innovantes en traitement du signal pour le traitement des données de la mission TESS actuellement en vol. Le stage servira également d'introduction à la physique stellaire et aux processus physiques qui régissent la rotation des étoiles.

---

Les résultats de ce stage seront présentées à la réunion de la SF2A (Société Française d'Astronomie et astrophysique) ou au meeting international TESS Asteroseismic Science Consortium (TASC)-2022

Le stage se déroulera au Département d'Astrophysique du CEA/Saclay. Le stage sera encadré par Rafael A. García (DAP/LDE3 -AIM), expert en physique stellaire, et Sandrine Pires (DEDIP/LILAS - AIM), experte en traitement numérique et méthodes statistiques en astronomie.

### **Mots clés**

Traitement numérique, Physique stellaire, Astérosismologie

### **Compétences**

### **Logiciels**

Python 3

---

## **Correction of raw images of the NASA/TESS mission using wavelet techniques**

### **Summary**

During the internship, the student will become familiar with innovative signal processing techniques for processing data from the NASA/TESS mission currently in flight. The internship will also serve as an introduction to stellar physics and the physical processes that govern the rotation of stars.

### **Full description**

### **Keywords**

### **Skills**

### **Softwares**

Python 3



## A la découverte des cycles magnétiques avec la mission Kepler (NASA)

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LDE3](#)

**Candidature avant le** 01/09/2022

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [GARCIA Rafael A.](#)

+33 1 69 08 27 25

[rafael.garcia@cea.fr](mailto:rafael.garcia@cea.fr)

### Résumé

Au cours de ce stage nous proposons de rechercher des cycles d'activité magnétique. Les étoiles comme le Soleil avec un taux de rotation moyen d'environ 27 jours ont des cycles d'activité d'environ 11 ans. Bien que nous n'ayons que 4 ans de données Kepler, nous proposons d'étudier des proxys d'activité solaire comme le nombre de taches solaires pour lequel plusieurs centaines d'années sont disponibles afin de rechercher des méthodes fiables pour dévoiler la présence d'un cycle magnétique dans des fenêtres de 4 ans dans les données de Kepler. Les méthodes s'appliqueront ensuite aux étoiles de type solaire avec des taux de rotation similaires à ceux du Soleil.

### Sujet détaillé

Les étoiles similaires au Soleil avec des enveloppes convectives externes développent des cycles magnétiques à cause de l'interaction entre la rotation, la convection et les champs magnétiques. La mission Kepler de la NASA a été un succès en surveillant pendant 4 années continues environ 190 000 étoiles avec une cadence d'au moins un point toutes les 30 minutes. Avec cette base de données, notre équipe a pu construire le plus grand catalogue de périodes de rotation et d'indicateurs d'activité magnétique pour les étoiles de type solaire, comprenant plus de 55 000 étoiles.

Au cours de ce stage nous proposons de rechercher des cycles d'activité magnétique. Les étoiles comme le Soleil avec un taux de rotation moyen d'environ 27 jours ont des cycles d'activité d'environ 11 ans. Bien que nous n'ayons que 4 ans de données Kepler, nous proposons d'étudier des proxys d'activité solaire comme le nombre de taches solaires pour lequel plusieurs centaines d'années sont disponibles afin de rechercher des méthodes fiables pour dévoiler la présence d'un cycle magnétique dans des fenêtres de 4 ans dans les données de Kepler. Les méthodes s'appliqueront ensuite aux étoiles de type solaire avec des taux de rotation similaires à ceux du Soleil.

Ce stage sera une introduction à la physique solaire et stellaire, en particulier aux processus physiques régissant leur dynamique de surface tout en aidant à mieux comprendre à quel point notre Soleil est commun en termes de propriétés magnétiques de surface.

Présentation des résultats :

---

Les résultats seront présentés lors de la réunion annuelle 2022 de la Société française d'astronomie et d'astrophysique (SF2A) ainsi qu'un poster lors de la réunion du TESS Asteroseismic Science Consortium (TASC-2022)

Le stage se déroulera au Département d'Astrophysique (DAp) du CEA/Saclay. Il sera dirigé par Rafael A. García (DAp/LDE3-AIM) avec la co-direction d'Angela Santos (U. Warwick, Royaume-Uni) et Savita Mathur (IAC/Tenerife/Espagne).

### **Mots clés**

Magnétisme de surface, Cycles magnétiques, Evolution stellaire, analyse de données

### **Compétences**

### **Logiciels**

Python 3



---

# Unveiling magnetic activity cycles using observations from the NASA/Kepler mission

## Summary

During this internship we propose to look for magnetic activity cycles. Stars like the Sun with an average rotation rate of ~27 days, have activity cycles of around 11 years. Although we only have 4 years of Kepler data, we propose to study long solar activity proxies as the sunspot number for which several hundreds of years are available in order to look for reliable methods to unveil the presence of a magnetic cycle in windows of 4 years in the Kepler data, while providing a statistical likelihood of the findings. The methods will then apply to solar-like stars with similar rotation rates to the Sun.

## Full description

Stars similar to the Sun with external convective envelopes develop magnetic cycles as a consequence of the interaction between, rotation, convection, and magnetic fields. The NASA Kepler mission has been a success by monitoring during 4 continuous years around 190,000 stars with a cadence of, at least, one point every 30 minutes. With this database our team was able to build the largest catalog of rotation periods and magnetic activity proxies for solar like stars including more than 55,000 stars.

During this internship we propose to look for magnetic activity cycles. Stars like the Sun with an average rotation rate of ~27 days, have activity cycles of around 11 years. Although we only have 4 years of Kepler data, we propose to study long solar activity proxies as the sunspot number for which several hundreds of years are available in order to look for reliable methods to unveil the presence of a magnetic cycle in windows of 4 years in the Kepler data, while providing a statistical likelihood of the findings. The methods will then apply to solar-like stars with similar rotation rates to the Sun.

This internship will be an introduction to solar and stellar physics, in particular to the physical processes governing their surface dynamics while helping to better understand how common our Sun is in terms of its surface magnetic properties.

Presentation of the results:

Results will be presented at the 2022 annual meeting of the French Astronomy and Astrophysics Society (SF2A) as well as a poster at the TESS Asteroseismic Science Consortium meeting (TASC-2022)

The internship will be at the Astrophysics Division (DAp) of the CEA/Saclay. It will be directed by Rafael A. García (DAp/LDE3-AIM) with the co-direction of Angela Santos (U. Warwick, UK) and Savita Mathur (IAC/Tenerife/Spain).

## Keywords

Surface magnetism, Magnetic cycles, Stellar evolution, data analysis

## Skills

## Softwares

Python 3



## Qui veut la peau du disque protoplanétaire caché dans B335 ?

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LFEMI](#)

**Candidature avant le** 30/04/2022

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [MAURY Anaelle](#)

+33 1 69 08 36 61

[anaelle.maury@cea.fr](mailto:anaelle.maury@cea.fr)

### Résumé

Alors que la communauté astrophysique se mobilise pour scruter les propriétés physico-chimiques des disques protoplanétaires de quelques millions d'années, une équipe franco-allemande se penche sur un problème bien plus "obscur": la caractérisation des disques les plus jeunes, dont l'assemblage commence dans les phases les plus enfouies de la formation des étoiles. A l'aide d'observations menées avec le plus grand radio-télescope de la planète, ALMA, nous vous proposons de vous lancer à la recherche du disque protostellaire dans la proto-étoile B335. Objet prototypique pour la formation des étoiles de type solaire, B335 a révélé récemment sa nature magnétisée, et, fait surprenant, l'absence d'un disque en rotation Képlérienne malgré l'importante rotation observée dans son enveloppe aux plus grandes échelles. De récentes observations menées par notre équipe ont cartographié une cinématique du gaz plus complexe que prévue, et des structures en vitesse jusqu'à maintenant passées inaperçues. L'enquête peut donc être relancée, à la lumière de ces nouvelles connaissances, pour remonter la piste du disque protoplanétaire de B335.

### Sujet détaillé

Alors que la communauté astrophysique se mobilise pour scruter les propriétés physico-chimiques des disques protoplanétaires de quelques millions d'années, autour d'étoiles de type T-Tauri, une équipe franco-allemande se penche sur un problème bien plus "obscur": la caractérisation des disques les plus jeunes, dont l'assemblage commence dans les phases les plus enfouies de la formation des étoiles.

Avec l'arrivée récente de nouvelles observations qui ont révélé que les disques de T-Tauri sont très structurés et pourraient donc déjà abriter des planètes, la caractérisation des phases précoces de la vie des disques circumstellaire devient cruciale pour comprendre les premières phases de formation planétaire.

Vous analyserez les observations ALMA de l'émission moléculaire du gaz, pour chercher des signatures cinématiques de la présence d'un disque protostellaire enfoui dans l'enveloppe de la proto-étoile B335.

Objet prototypique pour la formation des étoiles de type solaire, B335 a révélé récemment une enveloppe magnétisée, et, fait surprenant, l'absence d'un disque en rotation Képlérienne malgré l'importante rotation observée dans son

---

enveloppe aux plus grandes échelles. Ce cas d'école questionne les mécanismes de formation des disques, et aussi des planètes qui devraient s'y former.

De récentes observations menées par notre équipe ont cartographié une cinématique du gaz plus complexe que prévue, et des structures en vitesse jusqu'à maintenant passées inaperçues. Il faut donc revisiter les observations du gaz aux petites échelles pour y inclure ces nouvelles connaissances et relancer l'enquête pour remonter la piste du disque protoplanétaire de B335.

### **Mots clés**

### **Compétences**

### **Logiciels**

---

## Who framed the protoplanetary disk hidden in B335 ?

### Summary

While the astrophysical community is mobilizing to scrutinize the physico-chemical properties of proto-planetary disks a few million years old, a Franco-German team is working on a much more "obscure" problem: the characterization of the youngest disks, whose assembly begins in the deepest phases of star formation. With the help of observations carried out with the largest radio telescope on the planet, ALMA, we propose you to search for the protostellar disk in the protostar B335. A prototypical object for the formation of solar-type stars, B335 has recently revealed its magnetized nature, and, surprisingly, the absence of a Keplerian rotating disk despite the important rotation observed in its envelope at larger scales. Recent observations by our team have mapped a more complex kinematics of the gas than expected, and velocity structures that had so far gone unnoticed. The investigation can thus be relaunched, in the light of this new knowledge, to trace the protoplanetary disk of B335.

### Full description

While the astrophysical community is mobilizing to scrutinize the physico-chemical properties of proto-planetary disks a few million years old, around T-Tauri stars, a French-German team is addressing a much more "obscure" problem: the characterization of the youngest disks, whose assembly begins in the deepest phases of star formation.

With the recent arrival of new observations revealing that the T-Tauri disks are highly structured and could therefore already host planets, the characterization of the early phases of the life of circumstellar disks becomes crucial to understand the first phases of planetary formation.

You will analyze ALMA observations of the molecular emission from the gas, to search for kinematic signatures of a protostellar disk buried in the envelope of the protostar B335.

A prototypical object for our understanding of star formation, B335 has recently revealed a magnetized envelope, and, surprisingly, the absence of a disk in Keplerian rotation despite the important rotation observed in its envelope at larger scales. This textbook case questions the physical mechanisms responsible for disk formation, and also of the planets that should form therein.

Recent observations by our team have uncovered a more complex gas kinematics than expected, and velocity structures that have been unnoticed until now. It is therefore necessary to revisit the observations of the gas at small scales to include this new knowledge and to revisit the investigation to trace the protoplanetary disk of B335.

### Keywords

### Skills

### Softwares



## Apprentissage automatique et modèles de grains interstellaires

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LFEMI](#)

**Candidature avant le** 13/04/2022

**Durée** 3 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [GALLIANO Frederic](#)  
+33 1 69 08 18 21  
[frederic.galliano@cea.fr](mailto:frederic.galliano@cea.fr)

### Résumé

Ce stage propose d'étudier l'efficacité des méthodes d'apprentissage automatique pour calculer des modèles complexes d'émission du milieu interstellaire. Nous concentrerons sur l'application aux modèles de poussières.

### Sujet détaillé

La poussière interstellaire est un ingrédient physique clef des galaxies, responsable de l'obscurcissement de la formation stellaire, de la régulation du chauffage et du refroidissement du gaz, et de la croissance de la complexité chimique. La modélisation de l'émission thermique des grains est un outil incontournable pour étudier aussi bien la physique du milieu interstellaire local que la formation d'étoiles enfouie des galaxies distantes.

Notre groupe au CEA a une expertise reconnue sur l'analyse des distributions spectrales d'énergie de poussière. Nous avons développé un code bayésien hiérarchique unique à cet effet (Galliano, 2018, MNRAS, 476, 1445). L'utilisation de ce code requiert de calculer un très grand nombre de modèles de grains (typiquement  $1.E11$ ). Pour le moment, cela se fait en interpolant une grille pré-calculée, ce qui limite le nombre de dimensions de l'espace des paramètres que l'on peut explorer. Nous souhaitons appliquer les techniques d'apprentissage automatique (machine learning) pour pallier à ce problème. Ces techniques ont démontré leur efficacité pour les modèles de photoionisation. L'idée est d'entraîner un algorithme pour reproduire les sorties du modèle. C'est le but du stage.

La première étape consistera à se familiariser avec le modèle physique. Celui-ci prend en compte l'émission d'un mélange de grains de tailles et compositions chimiques différentes. Le spectre émis est calculé à l'aide d'un code de chauffage stochastique, qui permet de décrire le comportement hors-équilibre des plus petits grains. Le spectre prédit est ensuite intégré dans les bandes passantes d'un grand nombre d'instruments (Spitzer, Herschel, Planck, etc.).

La deuxième étape consistera ensuite à déterminer quelle méthode d'apprentissage automatique est la plus adaptée et quels sont les paramètres du réseau de neurones dont nous avons besoin. Le but est de contrôler la précision du résultat. Cela se fera en étudiant la dispersion de plusieurs modèles concurrents.

---

S'il reste du temps, cette méthode pourra être étendue à des modèles plus complexes, prenant en compte le transfert radiatif, ou à des modèles d'évolution cosmique des grains. En fonction de l'investissement de l'étudiant, le travail de stage peut donner lieu à la publication d'un logiciel d'intérêt général qui pourra servir, entre autres, à l'interprétation des observations du JWST.

### **Mots clés**

Milieu interstellaire - physique des galaxies

### **Compétences**

Apprentissage automatique ; physique statistique.

### **Logiciels**

Fortran et Python.

---

## Machine learning and interstellar grain models

### Summary

This internship aims at studying the efficiency of machine learning methods to compute complex models of emission of the interstellar medium. We will focus on their application to dust models.

### Full description

Interstellar dust is a key physical ingredient of galaxies, obscuring star formation, regulating the heating and cooling of the gas, and building-up chemical complexity. Modeling thermal grain emission is a unavoidable tool to study both the physics of local interstellar medium and the embedded star formation in distant galaxies.

Our group at CEA has renown expertise on the analysis of dust spectral energy distributions. We have developed a hierarchical Bayesian code to that purpose (Galliano, 2018, MNRAS, 476, 1445). Using this code requires to compute a very large number of grain models (typically  $1.E11$ ). For now, we are interpolating a large pre-computed grid, limiting the number of dimensions of the parameter space that we can explore. We would like to apply machine learning technics to solve this problem. These technics have demonstrated their efficiency in the case of photoionisation models. The idea is to train an algorithm to reproduce the model outputs. This is the goal of this internship.

The first stage will consist in getting used with the physical model. It accounts for the emission of the mixture of grains with different sizes and chemical composition. The emitted spectrum is computed with stochastic heating code, which describe the out-of-equilibrium properties of the smallest grains. The predicted spectrum is then integrated into the filters of a large number of instruments (Spitzer, Herschel, Planck, etc.).

The second stage will consist in determining which machine learning method is the most appropriate and what are the neural network parameters we need. The goal is to control the accuracy of the result. This will be done studying the scatter of several competing models.

If there is more time, this method will be applied to more complex models, accounting for radiative transfer, or to chemical evolution models. Depending on the investment of the student, this internship work can result in the publication of a general interest software which could be useful, among others, to interpreting JWST data.

### Keywords

Interstellar medium - physics of galaxies

### Skills

Machine learning ; statistical physics.

### Softwares

Fortran et Python.



## Réalisation d'une campagne d'irradiation de protons sur le détecteur X de la mission spatiale SVOM pour prédire son comportement en vol

**Spécialité** Spectroscopie

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LSAS](#)

**Candidature avant le** 18/04/2022

**Durée** 5 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [MEURIS Aline](#)

+33 1 69 08 12 73

[aline.meuris@cea.fr](mailto:aline.meuris@cea.fr)

### Résumé

L'objectif du stage est la préparation, la conduite et l'exploitation d'une campagne d'essais dans un accélérateur de particules avec le modèle de vol de rechange du plan focal de MXT, instrument à bord de la mission d'astronomie franco-chinoise SVOM lancée en 2023.

### Sujet détaillé

SVOM est une mission franco-chinoise qui sera lancée début 2023 pour l'étude des sursauts gamma, événements explosifs d'étoiles les plus énergétiques existants dans l'Univers. Le Département d'Astrophysique du CEA a la responsabilité scientifique du télescope X (MXT) à bord de SVOM pour localiser à la minute d'arc les sources et observer leurs émissions X rémanentes. MXT embarque dans sa caméra un spectro-imageur de type pnCCD de 256 x 256 pixels. L'instrument de vol sera livré en Chine fin 2021.

En 2022, une campagne d'irradiations sous protons doit être organisée avec un détecteur du même lot que le modèle de vol pour prédire le comportement en vol de celui-ci. Les enjeux de ces essais sont de répondre aux questions suivantes :

- Comment se comporte le détecteur lorsqu'il reçoit des particules saturantes pendant son fonctionnement (effets singuliers) ? Quelles sont les anomalies possibles et leur occurrence ?
- Comment se dégradent les performances spectrales après 3 à 5 ans en orbite (effets de dose) ? Quel est l'impact sur l'étalonnage de l'instrument et sur le retour scientifique ?

L'objectif du stage est la préparation, la conduite et l'exploitation d'une campagne d'essais dans un accélérateur de particules, potentiellement le cyclotron Arronax de Nantes. Un modèle de plan focal associé à un cryostat de test et un système d'acquisition seront disponibles pour ces essais. Sous la supervision de la responsable scientifique des essais, l'étudiant aura la responsabilité des tâches suivantes :

- Définition de la configuration des essais (énergie, flux, fluence des protons) par simulations physiques
- Préparation technique des essais, en adaptant les moyens matériels et logiciels existants aux contraintes de



---

l'infrastructure et à nos objectifs scientifiques

- Coordination logistique et technique des essais (contact avec l'installation et l'équipe projet MXT)
- Conduite d'essais et début de l'exploitation des résultats (analyse de données)

Pour mener à bien ces travaux, l'étudiant sera en forte interaction avec les techniciens, ingénieurs, physiciens instrumentalistes et astrophysiciens associés au projet. Aisance relationnelle, dynamisme et sens de l'organisation seront des atouts appréciables pour atteindre les objectifs.

### **Mots clés**

spectro-imagerie X, environnement spatial, interaction rayonnement-matière, détecteur semi-conducteur

### **Compétences**

simulations, mesures physiques, analyse de données

### **Logiciels**

Python, Labview

---

# Lead of a proton irradiation test campaign with the X-ray detector of the SVOM space astronomy mission to predict its behavior in flight

## Summary

The goal of the internship is the preparation, the lead and the exploitation of a test campaign in a particle accelerator with the flight spare model of the focal plan of MXT, instrument on-board the Sino-French astronomy mission SVOM to be launched in 2023.

## Full description

SVOM is a Sino-French mission to be launched beginning of 2023 to study the gamma-ray bursts, the most energetic explosive events in the Universe. The Department of Astrophysics has the scientific lead of the X-ray telescope (MXT) in SVOM to localize the sources with the arcminute resolution and observe their X-ray afterglow emission. MXT integrates in its camera a pnCCD-type imaging spectrometer with 256 x 256 pixels. The flight instrument will be delivered to China end of 2021.

In 2022 a proton irradiation campaign shall be organized with a detector of the same fabrication batch of the flight one to predict the behavior in flight of the latter. The motivations for these tests is to answer to some key questions for the mission:

- How behaves the detector when it is bombarded by saturating particles when operated (single events)? Which kind of anomaly can occur and with which probability?
- How does the spectral performance of the detector degrade after 3 to 5 years in orbit (cumulative dose effects)? What is the impact on the spectral calibration and the scientific exploitation?

The goal of the internship is the preparation, the lead and the exploitation of a test campaign in a particle accelerator (probably the Arronax cyclotron in Nantes, France). With the supervision of the scientific responsible of the experiment, the intern will have the following missions:

- Definition of the test configuration (proton energy, flux, fluence) justified with physical simulations
- Technical preparation of the tests, by adapting the existing hardware and software solutions to the facility constraints and the test scientific goals.
- Logistic coordination of the tests (contacts with the facility and the CEA project team)
- Lead of the tests, data reduction and analysis

To carry out this work, the student will be in close interaction with the technicians, engineers and instrumentation physicists and astrophysicists of the project. Interpersonal skills, dynamism and organizational skills will be appreciated assets for the success of the project.

## Keywords

X-ray imaging spectroscopy, space environment, light matter interaction, semiconductor detector

## Skills

simulations, data acquisition, data analysis

## Softwares

Python, Labview



## Caractérisation 4D de sources astronomiques en rayons X

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Ingénieur/Master

**Unité d'accueil** [DAP/LCEG](#)

**Candidature avant le** 15/02/2022

**Durée** 6 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [PIERRE Marguerite](#)  
+33 1 69 08 34 92  
[marguerite.pierre@cea.fr](mailto:marguerite.pierre@cea.fr)

### Résumé

Les images des astres en rayons X contiennent à la fois une information angulaire (morphologie des sources), spectrale et temporelle. Le but du stage est d'utiliser toutes ces composantes pour différencier les amas de galaxies, des noyaux actifs de galaxies.

### Sujet détaillé

Voir description dans <https://www.cosmostat.org/jobs/xray-4d>

### Mots clés

Traitement du signal, parcimonie, ondelettes, deep learning, XMM, Athena

### Compétences

Transformation en ondelette, multi-échelle, deep learning

### Logiciels

C++, Python

---

## **Four-dimensional characterisation of astronomical X-ray sources**

### **Summary**

X-ray emission from extragalactic sources conveys information about the shape, the spectrum and the variability of the emitting objects.

The goal of this internship is to extract this information in order to discriminate active galaxies from clusters of galaxies

### **Full description**

### **Keywords**

### **Skills**

Multi-scale wavelet transform, deep learning

### **Softwares**

C++, Python



## Cosmologie gamma : Mesures du champ magnétique intergalactique avec les sursauts gamma et CTA

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LEPCHE](#)

**Candidature avant le** 21/05/2022

**Durée** 3 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [Belmont Renaud](#)  
+33169089808  
[renaud.belmont@cea.fr](mailto:renaud.belmont@cea.fr)

**Autre lien**  
[http://irfu.cea.fr/en/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_techique.php?id\\_ast=3709](http://irfu.cea.fr/en/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_techique.php?id_ast=3709)

### Résumé

Ce stage propose de contraindre le champ magnétique intergalactique par la modélisation de la propagation des rayons gamma issus de sursauts (GRB) et l'analyse des futures observations CTA.

### Sujet détaillé

Depuis une vingtaine d'années, l'avènement des télescopes Tcherenkov a permis le développement de l'astronomie gamma à très haute énergie (>20GeV), avec des retombées dans beaucoup de domaines de l'astrophysique, et en particulier en cosmologie. La cosmologie gamma repose sur l'absorption, par la lumière infra-rouge des galaxies, des rayons gamma émis par des sources lointaines de l'Univers. Cette absorption est en effet directement liée à l'histoire de la formation stellaire et au modèle cosmologique qui conditionne l'apparition des grandes structures de l'Univers. L'absorption des rayons gamma par les photons infrarouge produit des électrons et des positrons qui interagissent sur le fond diffus cosmologique et produisent à leur tour des rayons gamma. Ces rayons gamma secondaires peuvent eux-mêmes être absorbés, produisant en cascade de nouvelles paires électron-positron. Ces cascades électromagnétiques se développent dans le milieu intergalactique et possèdent différentes signatures qui sont recherchées dans les données : d'une part, les rayons gamma secondaires, d'énergie plus faible, créent un excès sur la partie à basse énergie du spectre ; d'autre part, le champ magnétique intergalactique (Intergalactic Magnetic Field, IGMF) dévie les particules chargées, produisant un halo diffus autour de la source et un retard dans le temps d'arrivée des rayons gamma secondaires. La recherche de ces signatures dans les observations gamma permet d'étudier ce champ magnétique dont l'origine remonte probablement aux premiers instants de l'Univers. Cette méthode permet d'accéder à des très faibles intensités et à des propriétés à grande échelle, inaccessibles aux mesures traditionnelles de champ magnétique.

---

Le travail de stage s'intéressera à l'étude des cascades issues des sursauts gamma (GRB) et aux contraintes qu'elles peuvent apporter sur l'IGMF en particulier avec l'observatoire CTA en cours de construction. CTA comportera à terme 19 télescopes sur le site Nord (La Palma, îles Canaries), et 99 sur le site Sud (désert d'Atacama au Chili). Le premier grand télescope de 23 m a commencé sa prise de données laissant espérer plusieurs détections dans les années qui viennent.

L'IGMF a déjà été étudié avec une population de noyaux actifs de galaxie (AGN) qui a permis d'établir des limites inférieures sur l'intensité moyenne du champ ( $B > 10^{-16}$  G). Les sursauts gamma, très brefs par nature, permettront une approche basée sur les retards temporels, très différente de celle utilisée pour les AGN et donc des contraintes indépendantes et complémentaires sur l'IGMF.

Le travail de ce stage consistera à utiliser des simulations numériques de cascades issues des GRB et à étudier leurs signatures observationnelles. Plus précisément, les cascades simulées seront couplées à la chaîne d'analyse développée dans le groupe pour CTA, permettant ainsi de définir ses capacités à contraindre l'IGMF.

L'étudiant(e) sera intégré(e) à l'équipe LEPCHE du Département d'Astrophysique du CEA Paris-Saclay. Cette équipe est très impliquée à la fois dans les observations de GRB, ainsi que dans la préparation de futur grand télescope Tcherenkov CTA. Les chercheurs de l'équipe sont en particulier chargés de préparer les futures observations de GRB avec CTA.

### **Mots clés**

rayons gamma, astroparticules, cosmologie

### **Compétences**

Modélisation avec des simulations numériques Monte Carlo Analyse de données

### **Logiciels**

python

---

## **Gamma cosmology: Measures of the intergalactic magnetic field using gamma-ray bursts and CTA**

### **Summary**

This internship proposes to constrain the intergalactic magnetic field by modelling the propagation of gamma rays produced by gamma-ray bursts (GRBs), and analysing future CTA observations.

### **Full description**

In the past 20 years, the advent of Cherenkov telescopes has allowed for the rapid growth of very high energy gamma-ray astronomy, and had provided impacts in many fields of astrophysics including cosmology. Gamma-ray cosmology is based on the absorption of very high energy photons ( $>100$  GeV) from extragalactic sources by infrared photons emitted by stars in galaxies. Such absorption is linked to the history of star formation and to the cosmological model implied in the formation of large-scale structures in the Universe.

The absorption of gamma rays by infrared photons also produces pairs of electrons and positrons that interact with photons from the cosmological microwave background (CMB) and produce more gamma rays. These secondary high energy photons can also be absorbed, generating a cascade of pairs and photons. These electromagnetic cascades develop in the intergalactic medium and provide specific observational signatures that are searched in gamma-ray data. On the one hand, the secondary photons are responsible for an excess emission at lower emission. On the second hand, the intergalactic magnetic field (IGMF) deflects the charged particles, producing an extended halo around point sources and a time delay in the arrival of secondary gamma rays. This large-scale magnetic field is expected to originate from the very first epoch of the cosmic history. The search for these signatures in gamma-ray observations hence allows to probe this relic field at very low intensities, where traditional methods fail.

The work will focus on cascades induced by gamma-ray bursts (GRBs) and on the constrains they can provide on the IGMF. In particular, it will be done in preparation of the future CTA observatory. This array of Cherenkov telescopes will have 19 telescopes in its north site (La Palma, Canary islands) and 99 in its south site (Chili). The first 23m telescope is already operational, promising several GRB detections in the next years.

The IGMF has already be studied using active galactic nuclei (AGN), which has provided lower limits on its intensity ( $B > 10^{-16}$  G). The very short duration of GRBs will allow for a very different approach, based on time delays, hence for independent and complementary constrains.

The work will consist in using numerical simulations of gamma-ray induced cascades, using a Monte Carlo simulation code and studying their observational signatures. Namely the simulated cascades will be coupled to the CTA data analysis chain developed in the group in order to predict constrains on the IGMF.

The student will work in the LEPICHE team of the Astrophysics Department at CEA Paris-Saclay. The team is strongly involved in GRB observations and in the preparation of CTA in general. More specifically, its researchers are charged with the preparation for GRB observations with CTA.

### **Keywords**

gamma-rays, astroparticles, cosmology

### **Skills**

Modelling with Monte Carlo numerical simulations, Data analysis

### **Softwares**

---

python





## Machine Learning pour les modèles de la fonction d'étalement du point basés sur le front d'onde

**Spécialité** Traitement d'image

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [D'Ap/LCS](#)

**Candidature avant le** 01/02/2022

**Durée** 6 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [STARCK Jean-luc](#)  
+33 1 69 08 57 64  
[jean-luc.starck@cea.fr](mailto:jean-luc.starck@cea.fr)

### Résumé

La très large bande passante de l'instrument VIS du télescope spatial Euclid rend la tâche de modélisation de la réponse instrumentale difficile. Le but de ce stage est de reconstruire le front d'onde et la réponse instrumentale simultanément en utilisant des techniques de deep learning.

### Sujet détaillé

Le projet spatial Euclid, dont le lancement est prévu en 2023, observera le ciel en optique et en infrarouge et permettra de construire des cartes de très grandes échelles afin de mesurer les distorsions gravitationnelles jusqu'à des redshifts très élevés. Grâce à ces mesures de cisaillement gravitationnel, nous pourrions reconstruire des cartes de matières noires de 20000 degrés carrés, soit la moitié du ciel.

La lentille gravitationnelle faible (weak lensing en anglais) permettra de construire ce type de matière noire. Néanmoins, l'un des problèmes majeurs pour atteindre les objectifs scientifiques est la nécessité de modéliser la fonction d'étalement du point (Point Spread Function ou PSF en anglais) du satellite (PSF) avec une très grande précision.

La très large bande passante de l'instrument VIS d'Euclid rend la tâche de modélisation de la PSF plus difficile. Chaque observation est intégrée dans cette bande qui va des 550nm jusqu'à 900nm, et on les connaît sous le nom d'observations polychromatiques. Néanmoins, la haute précision attendue par la mission Euclid nous oblige à faire une modélisation spectrale de la PSF (en fonction de la longueur d'onde) à partir des observations polychromatiques. Cela est un problème inverse très mal posé.

La nouvelle méthode proposée dans le laboratoire CosmoStat [1] qui construit le modèle de PSF directement dans le front d'onde et se base sur un modèle optique différentiable qui encode les processus physiques pour aller d'un PSF en front d'onde jusqu'à un PSF au niveau des pixels. Ce modèle est très prometteur pour la mission Euclid concernant la modélisation de la PSF basée sur les données (data-driven).

---

C'est habituel d'utiliser certaines étoiles dans le champ de vue comme échantillons du champ de la PSF. Elles sont utilisées pour contraindre le modèle de PSF basée sur les données. Les étoiles ont une certaine distribution spectrale d'énergie, ou SED pour ses sigles en anglais, qui contribuent à l'observation polychromatique des étoiles. La connaissance de la SED est importante pour pouvoir bien contraindre le modèle de PSF. Néanmoins, on ne sait pas la qualité des estimations des SEDs stellaires et comment des erreurs dans la SED vont impacter le modèle de PSF proposé dans [1].

Une étude [2] a déjà montré qu'on peut classifier des SEDs stellaires que à partir des images VIS d'Euclid grâce à l'aide des nouvelles techniques de machine learning, plus spécifiquement apprentissage profond ou deep learning. Ce stage de fin d'études peut commencer par une étude courte sur l'impact des erreurs de la SED dans le modèle de PSF. Ensuite, on peut reprendre les travaux de [2] et se familiariser avec la classification des SEDs stellaires. Après, on pourra utiliser les résultats de la classification comme point de départ des SEDs pour faire une estimation jointe des SED et du modèle de PSF dans le champ de vue à partir des observations des étoiles. L'idée est de concevoir et développer un nouvel algorithme basé sur le modèle de PSF [2] qui permet d'estimer la PSF et les SED stellaires d'une façon jointe

L'environnement scientifique :

Le stage se déroulera au sein du groupe de recherche pluridisciplinaire, CosmoStat , au Département d'Astrophysique (DAp) du CEA, sous la direction de Jean-Luc Starck et de Tobias Liaudat. L'équipe est très impliquée dans le weak lensing. L'équipe a une très forte expertise dans différents domaines (mesure de PSFs, Machine Learning, optimisation, mesure de formes, problèmes inverses, weak lensing, etc.) qui faciliterons le déroulement du stage.

#### Références

- [1] Liaudat, T., Starck, J.-L., and Kilbinger, M. (2021). Rethinking the modeling of the instrumental response of telescopes with a differentiable optical model. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. Accepted in the Machine Learning and the Physical Sciences workshop.
- [2] Kuntzer, T., Tewes, M., and Courbin, F. (2016). Stellar classification from single-band imaging using machine learning. *A&A*, 591:A54.

#### Mots clés

machine learning, astrophysique

#### Compétences

Moyens techniques/informatiques Le stage nécessitera des connaissances et expérience en Machine Learning et apprentissage profond. Des connaissances en traitement du signal et d'images sont un plus.

#### Logiciels

Une bonne maitrise du langage de programmation Python est attendu.

---

## **Machine learning to reconstruct the wavefront error of the point spread function**

### **Summary**

### **Full description**

### **Keywords**

machine learning, astrophysique

### **Skills**

### **Softwares**

Une bonne maitrise du langage de programmation Python est attendu.



## Cartographie de paramètres physiques dans les vestiges de supernova par machine learning

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LEPCHE](#)

**Candidature avant le** 30/01/2022

**Durée** 5 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [Acero Fabio](#)

+33 1 69 08 47 05

[fabio.acero@cea.fr](mailto:fabio.acero@cea.fr)

**Autre lien** <https://github.com/facero/sujets2022>

### Résumé

Le but de ce stage est d'implémenter un outil d'apprentissage, intitulé Interpolation Auto-Encoder (IAE), pour la cartographie des paramètres physiques (e.g. température, indice spectral, etc) d'un cube de données en rayons X avec une contrainte de régularisation spatiale.

### Sujet détaillé

Contexte: Les spectro-imageurs en rayons-X permettent de mesurer la position, l'énergie et le temps d'arrivée pour chaque photon incident. Cette liste de photons permet de créer des cubes de données (X, Y, Energie) où un spectre est accessible pour chaque pixel de l'image. En dépit de la richesse des archives en rayons X et du bond en performance des missions à venir, nos méthodes d'analyses n'ont que trop peu évolué dans les dernières décennies et ne peuvent extraire la richesse d'informations scientifiques contenue dans ces données.

Ce projet s'intéressera en particulier aux méthodes de traitement du signal pour la cartographie des paramètres physiques (ex: température, métallicité, et vitesse du plasma) dans les sources étendues telles que les vestiges de supernova (voir Figure 1) ou les amas de galaxies. Cela consiste à obtenir pour chaque pixel ou groupe de pixels, une série de paramètres physiques à partir de leur information spectrale.

Les méthodes classiques d'ajustement spectral d'un cube de données sont lentes et bruitées, un facteur limitant l'analyse des données à très haute résolution spectrale des satellites à venir XRISM en 2023 et Athena X-IFU en 2034.

Objectif: Nous proposons d'explorer de nouvelles méthodes pour la cartographie de paramètres physiques en mettant à profit de récents développements méthodologiques dans notre laboratoire s'appuyant sur les concepts de parcimonie, d'analyse en ondelettes et d'apprentissage profond afin d'obtenir une méthode rapide et robuste. En particulier, l'objectif du stage sera d'implémenter un outil d'apprentissage, intitulé Interpolation Auto-Encoder (IAE, [3]), pour la cartographie des paramètres d'un cube de données avec une contrainte de régularisation spatiale [1]. L'algorithme ainsi développé sera tout d'abord évalué sur des données simulées, puis testé sur données réelles

---

suivant l'avancement du stage.

Candidat/Candidate: La personne recrutée doit être en formation de Master 2 (ou équivalent) et devra posséder de bonnes connaissances en traitement du signal/des images, ainsi qu'en apprentissage automatique (machine learning). Idéalement, le langage Python devra être connu et la connaissance du module d'apprentissage JAX et d'outils d'optimisation convexe est un plus.

Le candidat / la candidate acquerra une expertise en traitement du signal parcimonieux (notamment de données multi-valuées) et en apprentissage automatique.

Le stage (5-6 mois) se déroulera au sein du département d'Astrophysique du CEA par Fabio Acero et Jérôme Bobin (Groupe d'analyse de données du DEDIP - CEA Saclay).

Contact: [fabio.acero@cea.fr](mailto:fabio.acero@cea.fr) et [jerome.bobin@cea.fr](mailto:jerome.bobin@cea.fr)

Les candidatures sont attendues avant le 30 janvier 2022

### **Mots clés**

cartographie ; machine learning

### **Compétences**

### **Logiciels**

Python JAX

---

## **Mapping physical parameters in supernova remnants with machine learning**

### **Summary**

The goal of this internship is to implement a machine learning tool called Interpolation Auto-Encoder (IAE) in a method to extract a map of physical parameters from X-ray data cube.

### **Full description**

### **Keywords**

### **Skills**

### **Softwares**

Python JAX



## Analyse cosmologique de l'effet de lentille gravitationnelle faible avec le relevé UNIONS

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DAP/LCS](#)

**Candidature avant le** 28/02/2022

**Durée** 5 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [Kilbinger Martin](#)  
+33 1 69 08 17 53  
[martin.kilbinger@cea.fr](mailto:martin.kilbinger@cea.fr)

**Autre lien**  
[http://www.cosmostat.org/uncategorized/stage\\_wl\\_ia\\_unions\\_2022](http://www.cosmostat.org/uncategorized/stage_wl_ia_unions_2022)

### Résumé

### Sujet détaillé

Voir [http://www.cosmostat.org/uncategorized/stage\\_wl\\_ia\\_unions\\_2022](http://www.cosmostat.org/uncategorized/stage_wl_ia_unions_2022) pour plus de détails.

### Mots clés

cosmologie

### Compétences

Analyse d'image, calcul de corrélations, statistique Bayésienne

### Logiciels

python, C

---

## **Cosmological analysis of weak gravitational lensing with the Ultraviolet Near-Infrared Optical Northern Sky (UNIONS) survey**

### **Summary**

The goal of this M2 stage is to carry out statistical analyses of weak-lensing data from (UNIONS). The student will compute the galaxy shape correlations, and assess the contribution of intrinsic galaxy alignment.

### **Full description**

See this page for details: [http://www.cosmostat.org/uncategorized/stage\\_wl\\_ia\\_unions\\_2022](http://www.cosmostat.org/uncategorized/stage_wl_ia_unions_2022)

### **Keywords**

cosmology

### **Skills**

Image processing, correlation computation, Bayesian statistics

### **Softwares**

python, C





## Excitation stochastique des ondes gravito-inertielles dans les étoiles de masses intermédiaires et massives: effet de la sphéricité et de la modification de la convection par la rotation

**Spécialité** Astrophysique

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Ingenieur/Master

**Unité d'accueil** [DAP/LDE3](#)

**Candidature avant le** 01/06/2022

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [MATHIS Stephane](#)

+33 1 69 08 49 30

[stephane.mathis@cea.fr](mailto:stephane.mathis@cea.fr)

### Résumé

L'astérosismologie a révolutionné notre connaissance des intérieurs stellaires et de leur dynamique interne. Dans ce cadre, les ondes gravito-inertielles ont émergé aux côtés des ondes acoustiques et des ondes de gravité comme une sonde puissante de la rotation stellaire interne. L'objectif de ce stage est de construire le premier modèle théorique pour leur excitation en géométrie sphérique prenant en compte la modification de la convection par la rotation de manière cohérente.

### Sujet détaillé

L'astérosismologie a révolutionné notre connaissance des intérieurs stellaires et de leur dynamique interne. Dans ce cadre, les ondes gravito-inertielles ont émergé aux côtés des ondes acoustiques et des ondes de gravité comme une sonde puissante de la rotation stellaire interne (Ouazzani et al. 2020, Saio et al. 2021). La dynamique de ces ondes est conduite par l'accélération de Coriolis et la stratification et leur détection donne donc un accès direct à la rotation des régions où elles se propagent. Par exemple, la détection des ondes gravito-inertielles dans les étoiles gamma-doradus permet maintenant d'avoir une vision de la rotation de ces étoiles depuis leurs régions radiatives jusqu'à leur cœur convectif (Ouazzani et al. 2020, Saio et al. 2021).

Au delà de la compréhension de leur spectre fréquentiel, se pose maintenant la question de la prédiction/compréhension de leur amplitude et de leur amortissement. En particulier, leur excitation stochastique par la convection turbulente doit être comprise et quantifiée. Dans ce cadre, la prise en compte de la modification de la convection par la rotation doit être prise en compte (Vasil et al. 2021). Trois premiers pas ont été effectués récemment: en premier lieu, Neiner et al. (2020) ont évalué l'excitation stochastique des ondes gravito-inertielles dans les étoiles massives en géométrie sphérique mais en négligeant l'impact de la rotation sur la convection. En second lieu, Augustson, Mathis & Astoul (2020) ont évalué l'excitation stochastique des ondes gravito-inertielles avec prise en compte de la modification de la convection par la rotation mais en coordonnées cartésiennes. Enfin, Deckx Van Ruyskenvelde et al. (in prep.) ont étudié l'impact de la modification de la convection par la rotation sur l'excitation stochastique des ondes acoustiques pour les étoiles de type solaire. L'objectif de ce stage sera donc d'aller au delà de

---

ces preuves de concept et d'évaluer le taux d'injection d'énergie par la convection turbulente dans les ondes gravito-inertiellees et de l'évaluer pour les étoiles de masses intermédiaires et massives. Nous prendrons en compte simultanément la modification de la convection par la rotation et la sphéricité du problème pour la première fois.

Augustson, Mathis & Astoul 2021, ApJ, 903, 90

Deckx Van Ruyskenvelde et al., en préparation pour Astronomy & Astrophysics

Neiner et al. 2020, A&A, 644, A9

Ouazzani et al. 2021, A&A, 640, A49

Saio et al. 2021, MNRAS, 502, 5856

Vasil et al. 2021, PNAS, 118, 2022518118

### **Mots clés**

Mécanique des fluides, physique théorique et mathématique

### **Compétences**

Physique théorique et mathématique Modélisation numérique

### **Logiciels**

---

**Summary**

**Full description**

**Keywords**

**Skills**

**Softwares**