

Identification rapide des paramètres des binaires galactiques à partir des signaux gravitationnels de l'interféromètre LISA

Spécialité Mathématiques appliquées

Niveau d'étude Bac+5

Formation Master 2

Unité d'accueil [DPhN/LSN](#)

Candidature avant le 28/02/2021

Durée 6 mois

Poursuite possible en thèse oui

Contact [MOUTARDE Herve](#)
+33 1 69 08 73 88
herve.moutarde@cea.fr

Autre lien <http://jerome-bobin.fr>

Résumé

Le travail de stage porte sur le développement d'une méthode rapide pour l'identification d'un grand nombre de systèmes binaires galactiques.

Sujet détaillé

A la suite des premières détections directes d'ondes gravitationnelles en 2015 par les interféromètres au sol LIGO et VIRGO, une nouvelle fenêtre d'observation de notre Univers s'est ouverte, ouvrant la voie à la mission spatiale LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Cet observatoire spatial, dont le lancement est prévu en 2034, permettra la détection directe d'ondes gravitationnelles indétectables par les interféromètres terrestres.

A la différence des observatoires au sol, sensibles à de rares signaux d'ondes gravitationnelles et soumis à un bruit de mesure dominant, l'interféromètre spatial LISA devrait pouvoir observer un grand nombre de signaux distincts. Les estimations actuelles des quantités et types de source prévoient entre autres 60 millions de systèmes binaires galactiques émettant de manière continue, 10 à 100 signaux annuels provenant de trous noirs supermassifs, et de 10 à 1000 signaux annuels issus de systèmes binaires avec des rapports de masses très élevés.

Un des objectifs scientifiques de LISA est l'étude de la formation et de l'évolution des systèmes binaires galactiques : des naines blanches, mais aussi des étoiles à neutrons ou des trous noirs d'origine stellaires.

LISA devrait permettre la caractérisation d'environ 25000 systèmes binaires galactiques. De plus, comme dans toute expérience, les données réelles seront soumises à un certain nombre de bruits et d'artefacts à prendre en compte pour optimiser le potentiel scientifique de la mission.

L'un des défis posés par l'analyse des données de la mission LISA sera l'identification rapide, robuste et fiable des

quelques 25000 systèmes binaires attendus, pouvant être détectés de manière individuelle. Plus précisément, l'identification de chaque système binaire consiste en l'estimation des paramètres des modèles physiques décrivant la forme des signatures temporelles observées de tels systèmes. A cette fin, l'approche la plus classique est fondée sur l'utilisation de méthodes Markov Chain Monte Carlo (MCMC) pour l'estimation par maximum de vraisemblance de ces paramètres. Cependant, le traitement conjoint de milliers de binaires requiert l'estimation d'un grand nombre de paramètres, conduisant à un coût calculatoire très élevé, sans mentionner les problèmes de convergence des algorithmes MCMC en grande dimension. Ce problème devient d'une extrême complexité si l'on prend en compte le caractère incomplet des données lié aux périodes d'interruption dans l'acquisition des données.

Le travail de stage porte sur le développement d'une méthode rapide pour l'identification d'un grand nombre de systèmes binaires galactiques. A cette fin, les problèmes auxquels nous nous attaquerons seront:

- * Le développement d'une méthode d'analyse fondée sur une approche en deux étapes: i) une étape de détection des systèmes binaires par modélisation parcimonieuse des données [1] et ii) une identification en parallèle des binaires préalablement détectées. Cette dernière étape sera construite sur une méthode MCMC.

- * L'extension au cas de l'estimation de systèmes binaires dont les signatures harmoniques interfèrent (par exemple une forte corrélation entre les signaux observés pour différents systèmes binaires).

- * L'évaluation sur des simulations réalistes du futur observatoire LISA.

- * La prise en compte de données incomplètes, dues aux périodes d'interruption dans l'acquisition des données (maintenance, instabilités de sous-systèmes, etc.).

Ce travail reposera sur l'application de méthodes statistiques pour l'analyse des données et sur la représentation parcimonieuse des signaux. En particulier, il fera appel aux méthodes stochastiques d'échantillonnage (MCMC).

Ce sujet comporte une dominante de traitement du signal et de programmation soignée; le candidat recherché doit avoir de solides connaissances en statistiques et en traitement du signal.

Le stage se fera au sein des l'Institut de Recherche sur le lois Fondamentales de l'Univers (IRFU), sur une thématique à l'interface entre l'analyse statistique de données et la physique des ondes gravitationnelles.

Contacts : Jérôme BOBIN jerome.bobin@cea.fr ou Hervé MOUTARDE herve.moutarde@cea.fr

Références :

[1] A.Blelly, J.Bobin, H.Moutarde, "Sparsity Based Recovery of Galactic Binaries Gravitational Waves", Phys. Rev. D, en cours de publication, 2020.

[2] T.B.Littenberg, "A detection pipeline for galactic binaries in LISA data", Phys.Rev.D, 84, 063009, (2011).

Mots clés

Statistique, méthodes MCMC, représentations parcimonieuses, ondes gravitationnelles

Compétences

Logiciels

Python

Rapid identification of galactic binary parameters from the gravitational signals of the LISA interferometer

Summary

The internship work focuses on the development of a rapid method for the identification of a large number of galactic binary systems.

Full description

Following the first direct detections of gravitational waves in 2015 by the LIGO and VIRGO ground interferometers, a new window of observation of our Universe has opened, paving the way for the LISA (Laser Interferometer Space Antenna) space mission. This space observatory, scheduled for launch in 2034, will allow the direct detection of gravitational waves undetectable by ground-based interferometers.

Unlike ground-based observatories, which are sensitive to rare gravitational wave signals and subject to dominant measurement noise, the LISA space interferometer should be able to observe a large number of distinct signals. Current estimates of source quantities and types include 60 million continuously emitting galactic binary systems, 10 to 100 annual signals from supermassive black holes, and 10 to 1000 annual signals from binary systems with very high mass ratios.

One of the scientific objectives of LISA is the study of the formation and evolution of galactic binary systems: white dwarfs, but also neutron stars or black holes of stellar origin.

LISA should allow the characterization of about 25000 galactic binary systems. In addition, as in any experiment, the real data will be subjected to a number of noise and artifacts that must be taken into account to optimize the scientific potential of the mission.

One of the challenges of analyzing the LISA mission data will be the rapid, robust and reliable identification of the expected 25,000 or so individually detectable binary systems. Specifically, the identification of each binary system consists of estimating the parameters of physical models describing the shape of the observed time signatures of such systems. For this purpose, the most classical approach is based on the use of Markov Chain Monte Carlo (MCMC) methods for the maximum likelihood estimation of these parameters. However, the joint processing of thousands of binaries requires the estimation of a large number of parameters, leading to a very high computational cost, not to mention the problems of convergence of MCMC algorithms in large dimensions. This problem becomes extremely complex if one takes into account the incomplete nature of the data due to the interruption periods in data acquisition.

The internship work focuses on the development of a rapid method for the identification of a large number of galactic binary systems. To this end, the problems to be addressed will be:

- * The development of an analytical method based on a two-step approach: i) a step of detection of binary systems by parsimonious data modeling [1] and ii) a parallel identification of the previously detected binaries. This last step will be built on an MCMC method.
- * The extension to the case of estimating binary systems whose harmonic signatures interfere (e.g. a strong correlation between the signals observed for different binary systems).
- * The evaluation on realistic simulations of the future LISA observatory.
- * The taking into account of incomplete data, due to periods of interruption in data acquisition (maintenance, subsystem instabilities, etc.).

This work will be based on the application of statistical methods for data analysis and on the sparse representation of signals. In particular, it will make use of stochastic sampling methods (MCMC).

This subject has a strong emphasis on signal processing and careful programming; the candidate must have a solid knowledge of statistics and signal processing.

The internship will take place at the Institut de Recherche sur le Lois Fondamentales de l'Univers (IRFU), on a theme

at the interface between statistical data analysis and gravitational wave physics.

Contacts: Jérôme BOBIN jerome.bobin@cea.fr or Hervé MOUTARDE herve.moutarde@cea.fr

References:

[1] A.Blelly, J.Bobin, H.Moutarde, "Sparsity Based Recovery of Galactic Binaries Gravitational Waves", Phys. Rev. D, in publication, 2020.

[2] T.B.Littenberg, "A detection pipeline for galactic binaries in LISA data", Phys.Rev.D, 84, 063009, (2011).

Keywords

Statistics, MCMC methods, sparse representations, gravitational waves

Skills

Softwares

Python