

Détection par ondes gravitationnelles des systèmes binaires à rapport de masses extrême

Spécialité Mathématiques appliquées

Niveau d'étude Bac+4/5

Formation Ingenieur/Master

Unité d'accueil [DPhN/LSN](#)

Candidature avant le 23/12/2022

Durée 6 mois

Poursuite possible en thèse oui

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

Résumé

Le travail proposé consiste à définir des méthodes robustes de détection des systèmes binaires à rapport de masses extrême à partir de certaines de leurs caractéristiques génériques.

Sujet détaillé

En 2016, l'annonce de la première détection directe d'ondes gravitationnelles a ouvert une ère durant laquelle l'univers sera sondé d'une manière inédite. Simultanément, le succès complet de la mission LISA Pathfinder a validé certaines technologies retenues pour le projet LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Cet observatoire spatial serait constitué de trois satellites éloignés de 2.5 millions de kilomètres et permettrait la détection directe d'ondes gravitationnelles indétectables par les interféromètres terrestres. Son lancement est prévu par l'ESA pour 2035.

Les systèmes binaires à rapport de masses extrême (« extreme mass ratio inspiral » ou EMRI) consistent en un couple de trous noirs dont les masses diffèrent d'au moins 4 ordres de grandeur. Il s'agit typiquement d'un trou noir d'une dizaine de masses solaires orbitant autour d'un trou noir d'un million de masses solaires. Le corps léger agit comme une masse test sondant la géométrie de l'espace-temps au voisinage du corps le plus massif. La gamme de fréquences à laquelle l'observatoire spatial LISA sera sensible permettra de suivre cette évolution orbitale pendant des dizaines de milliers d'orbites. De telles configurations ouvrent donc la voie à des tests uniques de relativité générale en couplage fort, faisant de ces systèmes une observable d'intérêt spécifique.

A la différence des observatoires au sol, sensibles à de rares signaux d'ondes gravitationnelles et soumis à un bruit de mesure dominant, un interféromètre spatial sera en permanence alimenté par un grand nombre de signaux distincts et caractérisés théoriquement à divers degrés de précision. Le calcul précis de la signature gravitationnelle des EMRI pose encore de nombreux problèmes théoriques, mais leurs caractéristiques qualitatives générales sont connues. Définir des méthodes robustes de détection des EMRI à partir de ces caractéristiques est un enjeu important d'analyse de données pour la mission LISA.

Les LISA data challenges (LDC) constituent un effort collectif pour résoudre des problèmes d'analyse de données

associés à LISA, stimuler le développement d'algorithmes et de codes de calcul, et démontrer la faisabilité de l'exploitation scientifique des données. Les LDC sont le cadre idéal pour développer de nouvelles méthodes de détection d'EMRI et les évaluer sur des données simulées. Cet objectif peut être atteint en deux étapes :

1. L'étude des méthodes utilisées avec succès dans les LDC passés et leur reproduction sur des jeux de données récents. Ces algorithmes reposent sur l'estimation des paramètres physiques décrivant le signal émis par un EMRI.
2. L'étude de méthodes non-paramétriques utilisées pour la détection d'autres types de signaux par LISA et l'évaluation de leur pertinence dans le cas des EMRI.

Dans la mesure où la forme d'onde des EMRI n'est qu'imparfaitement connue, une approche en deux étapes, dissociant détection du signal et estimation des paramètres physiques sous-jacents, pourrait être particulièrement adaptée. De telles méthodes n'ont pas encore été explorées pour les EMRI. Elles requièrent au préalable une compréhension des caractéristiques qualitatives à rechercher pour détecter les EMRI, et l'identification des limites des méthodes paramétriques précédemment utilisées. Une difficulté supplémentaire est que LISA détectera de nombreux types de sources, ouvrant la possibilité de mélange voire de confusion entre sources.

Dans l'ensemble, il faut préciser que si ce sujet comporte une part importante de traitement du signal et des aspects de programmation soignée, un effort devra être porté sur la physique, la compréhension fine du contenu des signaux, et les moyens à mettre en œuvre pour la réalisation des objectifs de physique de la mission LISA.

Contacts :

- Hervé Moutarde herve.moutarde@cea.fr
- Jérôme Bobin jerome.bobin@cea.fr

Mots clés

Ondes gravitationnelles, statistiques, MCMC, EMRI

Compétences

Logiciels

Python

Gravitational wave detection of binary systems with extreme mass ratio

Summary

The proposed work consists in defining robust methods for the detection of binary systems with extreme mass ratio based on some of their generic characteristics.

Full description

In 2016, the announcement of the first direct detection of gravitational waves ushered in an era in which the universe will be probed in a way never before possible. Simultaneously, the complete success of the LISA Pathfinder mission validated some of the technologies selected for the LISA (Laser Interferometer Space Antenna) project. This space observatory would consist of three satellites 2.5 million kilometers apart and would allow the direct detection of gravitational waves undetectable by ground-based interferometers. Its launch is planned by ESA for 2035.

Binary systems with extreme mass ratio (EMRI) consist of a pair of black holes whose masses differ by at least 4 orders of magnitude. It is typically a black hole of about ten solar masses orbiting a black hole of one million solar masses. The light body acts as a test mass probing the geometry of space-time in the vicinity of the more massive body. The range of frequencies to which the LISA space observatory will be sensitive will allow to follow this orbital evolution during tens of thousands of orbits. Such configurations thus open the way to unique tests of general relativity in strong coupling, making these systems an observable of specific interest.

Unlike ground-based observatories, sensitive to rare gravitational wave signals and subject to a dominant measurement noise, a space interferometer will be permanently fed by a large number of distinct signals and theoretically characterized at various degrees of accuracy. The precise calculation of the gravitational signature of EMRIs still poses many theoretical problems, but their general qualitative characteristics are known. Defining robust methods for detecting EMRIs from these characteristics is an important data analysis challenge for the LISA mission.

The LISA data challenges (LDCs) are a collaborative effort to solve LISA-related data analysis problems, stimulate the development of algorithms and computational codes, and demonstrate the feasibility of scientific exploitation of the data. LDCs are the ideal setting to develop new EMRI detection methods and evaluate them on simulated data. This goal can be achieved in two steps:

1. Studying methods successfully used in past LDCs and replicating them on recent datasets. These algorithms are based on the estimation of physical parameters describing the signal emitted by an EMRI.
2. The study of non-parametric methods used for the detection of other types of signals by LISA and the evaluation of their relevance in the case of EMRI.

Since the EMRI waveform is only imperfectly known, a two-step approach, dissociating the detection of the signal and the estimation of the underlying physical parameters, could be particularly suitable. Such methods have not yet been explored for EMRI. They require an understanding of the qualitative characteristics to look for in order to detect EMRI, and the identification of the limitations of the parametric methods previously used. An additional difficulty is that LISA will detect many types of sources, opening the possibility of mixing or even confusing sources.

Overall, it should be noted that while this subject includes a significant amount of signal processing and careful programming aspects, an effort will have to be made on the physics, the fine understanding of the content of the signals, and the means to be implemented for the realization of the physics objectives of the LISA mission.

Contacts :

- Hervé Moutarde herve.moutarde@cea.fr
- Jérôme Bobin jerome.bobin@cea.fr

Keywords

Gravitational waves, statistics, MCMC, EMRI

Skills

Softwares

Python