



Sujet de Stage 2023

**Élève-Ingénieur(e) ou Étudiant(e) en Master Optique, Photonique,
Optoélectronique, Télécommunications optiques**

Mesure du profil d'intensité d'un faisceau de type Flattop pour la caractérisation des bancs optiques de la mission LISA de détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles

Laboratoire ARTEMIS – Observatoire de la Côte d'Azur – Nice, France

Mots clefs : mesures à bas bruit, faisceau laser, profil d'intensité Flattop, contrôleur de position, programmation, stabilisation de puissance, asservissement.

Contexte du stage :

Introduction – la détection des ondes gravitationnelles

« Il ne fait aucun doute que le domaine des ondes gravitationnelles, aussi bien théorique qu'expérimental, va exploser dans les années à venir ». Cet augure ponctuait les demandes de budget auprès des potentiels financeurs dès 2017. Depuis les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles Virgo et LIGO ont récolté une moisson de détection¹, avec des évènements inédits comme la détection de trous noirs de masses intermédiaires dont aucun modèle ne sait prévoir la formation (**GW190521**), ou de coalescence de binaire d'étoiles à neutron de masses jamais observées jusqu'alors (GW190425), de coalescence entre deux trous noirs de masses excessivement différentes.

Le projet LISA (Laser Interferometer Space Antenna) est un projet de détecteur spatial d'ondes gravitationnelles sélectionné par l'ESA. Homologue de Virgo et LIGO (mais dans l'espace) il observera dans une bande d'observation complémentaire à celle des détecteurs terrestres.

1. Cadre général

La France (via le CNES) a endossé la responsabilité des tests des bancs optiques de LISA. La possibilité de ces tests implique le développement d'outils de caractérisation originaux. Les laboratoires de recherche impliqués dans le projet, et l'équipe ARTEMIS en particulier, ont été sollicités pour mettre aux points des prototypes de ces outils complexes et lever les verrous technologiques qui y sont associés.

ARTEMIS doit développer un démonstrateur pour la mesure du couplage Tilt-to-Length^{2 3} (TTL) des bancs optiques de LISA (banc TTL-OB). Ce couplage, inévitable, sera partiellement sur LISA, mais nécessite une connaissance précise de sa valeur. Les fluctuations résiduelles de position du satellite (rotations de quelques 10 μ rad/sqrt(Hz)) sont la source des bruits qui se coupleront dans le signal scientifique de LISA par le biais du TTL. Il est donc fondamental de réduire, et donc de mesurer précisément ce couplage pour éviter qu'il ne masque le signal scientifique. Une erreur trop importante sur cette mesure rendrait caduque la mission LISA.

¹ Abbott *et al.* LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 – Published 11 February 2016

² TTL: couplage d'une perturbation angulaire qui affecte les faisceaux incidents du fait des mouvements résiduels des satellites convertie en fluctuation longitudinale

³ « Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer », M. Chwalla, *Phys. Rev. Applied* **14**, 014030 – Published 10 July 2020

2. Principe du banc démonstrateur TTL_OB

Le banc de mesure TTL-OB doit délivrer un faisceau simulant le faisceau incident sur les satellites de LISA. Ce faisceau est appelé « Rx ». Il sera affecté d'un tilt connu (10 urad). Ce tilt a son point de pivot précisément localisé sur la pupille de sortie du banc. Un second faisceau, dit « REF », fixe, sera émis en parallèle du faisceau « Rx ». Il servira de référence de phase entre les deux faisceaux. L'ensemble va illuminer le banc optique de LISA et mesurer le déphasage induit entre les deux faisceaux. Il s'agit aussi du déplacement longitudinal équivalent induit par le tilt de « Rx ». Ce déplacement est directement proportionnel au couplage TTL.

La sensibilité requise impose d'aligner les faisceaux entre eux ainsi que le point de pivot à mieux que 0,4 microns près sur la pupille du banc. La mesure des angles des faisceaux entre eux est obtenue par une lecture des signaux délivrés par une photodiode segmentées à 4 cadrans et sur la base d'un schéma de détection hétérodyne. La mesure de la phase sur l'ensemble des 4 cadrans entre « REF » et « Rx » permet de remonter à la mesure précise de la perturbation angulaire qui affecte le faisceau « Rx » (par la différence des signaux des cadrans) ainsi que le déphasage global entre les 2 faisceaux (piston) par la somme des signaux des cadrans. Les niveaux de phase détectés ne sont que de quelques centaines de microradians (100 microcycles).

Ce type de mesures a été réalisé en 2017 et décrit dans la thèse de S. Schuster ⁴. Les performances visées ici sont de deux ordres de grandeurs plus sensibles.

Ces mesures sont dégradées par les couplages aux entrées multiples de l'expérience. Minimiser ces couplages impose une spécification pour le faisceau Rx tel qu'il doit présenter un profil « flattop », en phase et en amplitude. Il s'agit de générer ce faisceau, le caractériser et vérifier que sa contribution au couplage TTL reste marginale. La spécification sur la caractéristique « Flattop » fr « Rx » est d'avoir un profil d'intensité « plat » sur un diamètre de 3 mm à mieux que 0,5%.

Objectifs du stage :

L'objectif du stage est de générer le faisceau flattop « Rx ». Si la génération ne doit pas poser de difficultés majeures sa caractérisation reste un verrou. Des tentatives faites sur la base d'imagerie par caméra, de lecture par photodiode de petit diamètre scannant le profil transverse du faisceau n'ont pu donner des caractérisations qu'avec une résolution limitée (quelques pourcents).

La proposition est cette fois de déplacer le faisceau rapidement devant une photodiode de petit diamètre (100 um) et de relever le photo-courant délivré par la photodiode. Celui-ci est directement proportionnel à l'intensité du faisceau sur la petite section du profil (diamètre 100 um) et à une position sur le profil variant avec le scan du faisceau. Le déplacement du faisceau est assuré par deux miroirs pilotés en angle et dont les axes de rotation sont orthogonaux entre eux. Ce système, à base de moteurs de type galvanomètre ⁵, permet de déplacer le faisceau très rapidement sur une surface normale à l'axe du faisceau (soit, dans le plan de la photodiode). C'est le faisceau qui se déplace devant la sonde, fixe, plutôt que la sonde qui se déplace pour imager le profil du faisceau.

Certaines des thématiques envisagées pour ce stage sont décrites ci-dessous, mais la liste n'est pas exhaustive et pourra évoluer selon l'avancement du projet :

- Intégration du banc de mesure : moteurs à galvanomètre, photodiode segmentée pour relever la position du faisceau, photodiode de lecture du profil et son électronique
- Pilotage des moteurs pour générer le scan à 2 dimensions de la position du faisceau.
- Mesurer le déplacement du faisceau avec une photodiode segmentée indépendante
- Mettre en œuvre la stabilisation de puissance du faisceau pour réduire les possibles couplages délétères pour la mesure

⁴ « Tilt-to-length coupling and diffraction aspects in satellite interferometry », S. Schuster, PhD, Hanover

⁵ https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14132

- Caractériser le profil en intensité du faisceau, optimiser son profil

Laboratoire d'accueil : Observatoire de la Côte d'Azur, Equipe ARTEMIS, Boulevard de l'Observatoire, B.P. 4229, F-06304, NICE Cedex 4

Encadrement : Frédéric Cleva, Ingénieur de recherche, email : cleva at oca.eu , Tel. : 04 92 00 31 97

Durée du stage : Stage de 6 mois de préférence, de niveau M2. La candidature d'un étudiant de niveau M1 particulièrement motivé et efficace serait étudiée.

Le stagiaire bénéficiera d'une gratification de l'ordre de 570 € /mois.

L'Université de la Côte d'Azur (UCA) a émis un appel à projet pour financer des stages de type M2. Le candidat est invité à soumettre sa candidature en réponse à cet appel d'offre afin de possiblement bénéficier de cette autre source de financement. La date limite de dépôt des dossiers est le 1/02/23 (renseignement auprès du responsable du stage).

D'autres possibilités de financements pourront être considérées

Connaissances et compétences abordées :

L'étudiant devra disposer d'une base solide en optique, lasers et photonique ainsi qu'une bonne connaissance de langage de programmation python ou matlab ou équivalent.

Techniques ou méthodes abordées : Contrôle d'appareil de mesure, stabilisation de puissance optique, lecture de position par photodiode segmentée, mesures à bas bruit, développement d'un algorithme pour un déplacement optimal du faisceau.