

Sujet de stage, période : **période automne 2025**

Élève-Ingénieur(e), Étudiant(e) en Master Optique, Photonique, Optoélectronique, Télécom optiques

Contribution à l'étude d'un instrument de mesure de la lumière parasite dans les bancs optiques du détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles Virgo

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

Mots clefs : Métrologie optique, lumière parasite, mesure de phase optique, schéma de détection hétérodyne, interféromètre de Mach-Zehnder fibré, asservissements

Contexte du stage :

Introduction – la détection des ondes gravitationnelles

Depuis l'attribution du prix Nobel de physique 2017 pour la première détection directe d'une onde gravitationnelle (OG) par le détecteur américain LIGO¹ plus de 250 évènements résultats de la coalescence de binaires de trous noirs et/ou d'étoiles à neutron ont été détectés conjointement par le détecteur européen Virgo² et LIGO. Dans la perspective d'augmenter la sensibilité de ces détecteurs un arrêt de 2 ans est programmé à partir d'octobre 2025 pour permettre l'intégration de composants plus performants et de nouvelles stratégies de contrôle. **Le stage proposé s'intègre dans ce contexte, il vise à mettre au point un instrument pour l'identification des composants émetteurs de lumière parasite générée dans les bancs optiques de Virgo**, la lumière parasite étant un des facteurs limitant la sensibilité des détecteurs. Cet instrument sera utilisé durant la phase de préparation à la prochaine session d'observation conjointe de Virgo et LIGO qui doit débuter en 2028.

1. Cadre général

Virgo est un interféromètre de Michelson dont les bras (3 km) subissent une légère déformation lors du passage d'une OG. L'observable ici est la variation de phase optique du faisceau laser qui parcourt les bras de l'interféromètre qui va porter la signature de l'OG. Le faisceau est mis en forme, détecté, contrôlé lors de la traversée de nombreux bancs optiques, de la lumière parasite est alors inévitablement générée au travers de phénomène de diffusion par les défauts de surfaces des optiques rencontrées ou diffraction en cas d'alignements non optimaux. Mal maîtrisée cette lumière peut se recombiner au faisceau nominal et contribuer à la phase optique détectée. Cette contribution qui dépend du chemin optique emprunté par la lumière parasite va brouiller la signature du signal gravitationnel. Il est donc fondamental d'identifier l'ensemble des contributeurs à la lumière parasite pour permettre leur remplacement le cas échéant.

2. Principe de fonctionnement de l'instrument de mesure de la lumière parasite

Un laser dont on varie la fréquence linéairement éclaire le système optique à caractériser (Device Under Test, DUT). On détecte son interférence avec la contrepartie optique rétrodiffusée par le DUT. Le signal obtenu est la superposition de franges d'interférences temporelles variant sinusoidalement aux fréquences $f_i = \vartheta/c \times (L_i + l_0)$, où ϑ est la vitesse de balayage de la fréquence du laser (en Hz/s), L_i est le double du chemin optique entre le plan d'interférence et la source de lumière diffusée considérée, l_0 est un offset propre au montage et c est la vitesse de la lumière. Une analyse par transformée de Fourier du signal donne un ensemble de pics dont les fréquences et les amplitudes correspondent à la position des contributeurs (L_i) et à l'amplitude de la lumière parasite qui leur est associée.

Un instrument³ de même nature a été développé au laboratoire dans le cadre du projet LISA. Les performances seront améliorées et avec des spécificités propres à la configuration de Virgo.

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 <https://www.virgo-gw.eu/>

³ « Interférométrie à dérive de fréquence pour la mesure de la lumière parasite cohérente sur l'instrument spatial LISA », Amaël Roubeau-Tissot, juillet 2024

Objectifs du stage : L'objectif du stage est de mettre en œuvre, tester et valider l'instrument. L'instrument est en cours d'assemblage depuis juin 2025 l'activité au cours du stage dépendra donc de son degré de maturité. Le projet s'articule selon trois axes dont les développements associés au planning de chacun d'entre eux définiront l'activité durant le stage :

- **Mise en œuvre de la génération la rampe en fréquence du laser**

On utilise un interféromètre fibré de Mach-Zehnder déséquilibré (différence de bras $\Delta L \sim 10$ m) où le faisceau d'un des bras est décalé en fréquence (modulation acousto-optique à la fréquence F_0)⁴. Dans le cas d'un laser balayé en fréquence à la vitesse ϑ le signal en sortie de l'interféromètre est un battement à la fréquence $F = F_0 + \vartheta \times \Delta L/c$. Le signal démodulé à une fréquence légèrement décalée « F_1 » peut alors être utilisée comme signal d'erreur d'un asservissement propre à figer cette configuration pour une rampe de fréquence à la vitesse $\vartheta = (F_1 - F_0) \times c/\Delta L$. Le montage optique fibré et ses asservissements est en cours d'intégration, on doit optimiser ses performances, et caractériser la linéarité de la rampe en fréquence par l'analyse de des modes de couplages des différentes sources de bruits dans le système.

- **Mise en œuvre du schéma de détection des interférences**

On mettra en place le montage opto-mécanique pour obtenir les franges d'interférence associées à la lumière parasite ainsi que l'ensemble de la chaîne de détection. Il s'agit d'un interféromètre de type Mach-Zehnder en espace libre, associé à un schéma de détection hétérodyne ou homodyne. On testera les 2 configurations. Le cas échéant on exploitera les signaux par des analyses de premier niveau visant à identifier les contributions propres à chaque composant. On développera le traitement de signal approprié (matlab ou python).

- **Mise en œuvre d'une stratégie pour contourner la problématique de speckle dans la lumière parasite**

La rétrodiffusion d'un faisceau de lumière cohérente par une surface a une répartition spatiale de type speckle. Dans ces conditions la position du détecteur des interférences doit être considérée pour éviter le scénario qui le placerait dans une zone « sombre » du speckle où l'amplitude de l'interférence serait très atténuée. La stratégie adoptée est d'intégrer un réseau de détecteurs répartis spatialement le champ du speckle pour obtenir une statistique représentative de l'amplitude des franges. On utilisera un faisceau d'une dizaine de fibres, chacune connectée à une photodiode qui permettra l'échantillonnage approprié du champ d'interférence détecté.

Laboratoire d'accueil : Observatoire de la Côte d'Azur, Equipe ARTEMIS (<https://artemis.oca.eu/fr/accueil-artemis>). Boulevard de l'Observatoire, B.P. 4229, F-06304, NICE Cedex 4.

Durée du stage : Stage de 6 mois de préférence, de niveau M2. Le stage peut commencer dès le **1^{er} septembre 2025**.

Encadrement : Frédéric Cleva, Ingénieur de recherche, email : cleva@oca.eu, tél. : 04 92 00 31 97 et Eleonora Polini, Chercheuse, email : eleonora.polini@oca.eu, tél. : 04 92 00 19 41

Connaissances et compétences abordées :

- L'étudiant devra disposer d'une base solide en optique, lasers et photonique ainsi qu'une bonne connaissance des langages python ou Matlab. Une familiarité avec les techniques déclinées ci-dessous serait un atout.
- Techniques et méthodes mise en œuvre : Interférométrie optique (espace libre et fibrée), schéma de détection homodyne/hétérodyne, analyse spectrale (signaux), notion de densité spectrale de bruit, asservissements.
- L'étudiant évoluera au sein d'une équipe ayant une grande expertise sur l'ensemble des sujets traités, et bénéficiera des conseils des étudiants ayant soutenu leur thèse sur des sujets connexes.

⁴ "An agile laser with ultra-low frequency noise and high sweep linearity", Jiang, Opt. Express, Vol. 18, 2010