Sujet de stage

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

Contribution à la conception 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, mesure de signaux faibles

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 LIGO[1] plus de 300 évènements résultats de la coalescence de binaires de trous noirs et/ou d'étoiles à neutron ont été détectés conjointement par le détecteur européen Virgo[2] et LIGO. Dans la perspective d'augmenter la sensibilité de ces détecteurs un arrêt de 2 ans est programmé à partir de novembre 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 SLS_Id (StrayLight Source Identifier) pour la mesure de la lumière parasite

Le SLS_Id utilise le concept mis en œuvre dans l'Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) : on utilise un laser dont on balaye la fréquence linéairement pour éclairer un système optique que l'on veut caractériser (Device Under Test, DUT). On collecte la lumière rétrodiffusée par le DUT que l'on fait interférer avec le faisceau laser incident, le signal obtenu est alors la superposition de franges d'interférences temporelles variant sinusoïdalement aux fréquences $f_i = \vartheta/c \times L_i$, 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, c est la vitesse de la lumière. Une analyse par transformée de Fourier du signal donnera 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. On peut ainsi évaluer la quantité de lumière rétrodiffusée par chaque composant rencontré par le faisceau incident, estimer son degré de « nuisance » et décider d'une possible action (inspection, nettoyage, alignement, remplacement…).

---

[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. Objectifs du stage

Le stagiaire intégrera et testera les différentes stratégies proposées pour valider le concept de l'instrument LSL_Id en termes de fonctionnalités et de performances. L'instrument est en cours de développement et d'assemblage depuis juin 2025 selon trois axes qui seront investis par le stagiaire selon son intérêt et les priorités définies par l'équipe :

- **Contrôle du balayage de la fréquence du laser**

Deux stratégies sont développées avec des spécificités propres :
- On asservit la fréquence du laser sur un interféromètre de référence pour obtenir un balayage parfaitement linéaire (à 1e-4 près). On utilise un interféromètre fibré de Mach-Zehnder déséquilibré (différence de bras ΔL ~ 10 m) où le faisceau d'un des bras est décalé en fréquence (modulation acousto-optique à la fréquence F_0) *instrument*[3] [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 décalée « F_1 » peut alors être utilisée comme signal d'erreur d'un asservissement propre à figer la configuration d'une rampe de fréquence à la vitesse $\vartheta = (F_1 - F_0) \times c/\Delta L$. Le montage optique fibré et ses asservissements ont été récemment intégrés, un travail d'exploitation et d'optimisation reste à faire.
- La seconde option consiste à mesurer la fréquence du laser durant un balayage (pas nécessairement linéaire) puis à échantillonner le balayage en fonction de la fréquence optique plutôt que le temps afin de substituer au signal temporel $\sin(2.\pi \times \left[\frac{2L_i}{c}\right] \times [v(k.\Delta t)])$ (où k est un nombre entier), le signal $\sin\left(2.\pi \times \left[\frac{2L_i}{c}\right] \times [k.\Delta v]\right)$. Ce dernier, de la forme $\sin(2.\pi \times f_i \times v)$, est exprimé selon 2 variables conjuguées dont l'échantillonnage régulier de la fréquence optique autorise une FFT qui permettra de préciser la seconde variable, f_i , soit L_i. On utilise ici un Mach-Zehnder en détection homodyne, très déséquilibré (100m) afin d'obtenir la datation du passage de chaque maximum de transmission durant le balayage de la fréquence du laser (espacés de l'intervalle spectral libre de l'interféromètre, ~ 1 MHz). On est alors en mesure de reconstituer le balayage en fonction de la fréquence optique plutôt que le temps puis d'interpoler le signal à des valeurs de fréquence régulièrement échantillonnée. Le montage optique est intégré et donne des résultats encourageants sur la détermination de L_i. On cherchera ici à améliorer l'autre paramètre important qui est la sensibilité de la mesure pour permettre la détection de source de très faibles niveaux de rétrodiffusion (composants avec « Total Integrated Scattering » de l'ordre de quelques 1e-6).

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

Un banc opto-mécanique permet déjà d'obtenir et des franges d'interférence associées à la lumière parasite. Il s'agit d'un interféromètre de type Mach-Zehnder en espace libre, associé à un schéma de détection homodyne. Il faut exploiter ce montage pour en évaluer les limitations. Un second montage basé sur une détection hétérodyne sera être mis en œuvre. L'intérêt de la détection hétérodyne réside dans sa sensibilité moindre aux bruits de puissance basse fréquences générés par l'environnement. Les performances des deux systèmes seront comparées.

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

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

---

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

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

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 janvier 2026.

Le stage pourra donner lieu à une thèse :
Le sujet sera étendu à la mise en œuvre de l'instrument SLS_Id en situation réelle avec des mesures sur le site de l'instrument Virgo (Pise, Italie) et dans les différents laboratoires français de la collaboration VirgoFrance (le LAPP à Annecy, l'APC à Paris…)

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