

氏 名 杉本 良介

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2483 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Experimental Demonstration of Back-Linked Fabry-Perot
Interferometer for the Space Gravitational Wave Antenna

論文審査委員 主 査 神田 展行
大阪公立大学 大学院理学研究科 教授
船木 一幸
宇宙科学コース 教授
国分 紀秀
宇宙科学コース 准教授
山田 亨
宇宙科学コース 教授
安東 正樹
東京大学 大学院理学系研究科 准教授
中川 貴雄
JAXA 宇宙科学研究所 教授

博士論文の要旨

氏 名：杉本良介

論文題目：Experimental Demonstration of Back-Linked Fabry-Perot Interferometer for the Space Gravitational Wave Antenna

Since the groundbreaking observation of gravitational waves radiated from a binary black hole by Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory in 2015, the network of terrestrial gravitational wave interferometers finished conducting three observing runs in March 2020, reporting the observations of 90 gravitational wave event candidates from compact binary coalescences. Currently, the terrestrial network is in the fourth observing run. All the events so far were identified to be those radiated from binary systems consisting of either two neutron stars, two stellar-mass black holes or a combination of the two. They are found to be in the mass range of $1-100M_{\odot}$, corresponding to the observation frequency band of 10Hz-1kHz. In June 2023, the North American Nanohertz Observatory for Gravitational Wave, one of the pulsar timing array (PTA) experiments, reported the observational evidence of the detection of an nHz gravitational wave background, likely from the ensemble of supermassive black hole binaries.

On the other hand, the frequency band of mHz-10 Hz remains unexplored as a frequency gap, given the fact that the frequency band of terrestrial interferometers is limited by ground vibration noises and that of the PTA experiments is limited by the integration time. Complementing this gap is of high importance because it would offer observations of the binary systems of new mass range and cosmological sources. Several strategies, such as LISA, B-DECIGO, and DECIGO, have been proposed for space-borne interferometer missions to essentially avoid the terrestrial environment and exploit this frequency band.

In particular, B-DECIGO, an inter-satellite Fabry-Perot interferometer, has the potential to achieve a high sensitivity in the 0.1 Hz band. It is capable of observing the intermediate-mass black hole binaries with a total mass of $100-10^4 M_{\odot}$ up to a redshift of ~ 300 with a signal-to-noise ratio of 8. It will also be capable of detecting neutron star binaries before they merge. For instance, B-DECIGO should be able to detect such a system 7 years before the merger if it is at a distance of 40 Mpc comparable to GW170817. DECIGO, the ambitious successor of B-DECIGO, will improve the sensitivity by an order of magnitude and is hoped to achieve a direct observation of primordial gravitational wave backgrounds.

The back-linked Fabry-Perot interferometer (BLFPI) was proposed as one of the implementation method of the inter-satellite Fabry-Perot interferometer. BLFPI is a

configuration with two laser sources on one spacecraft. BLFPI enables all the cavities to be kept in resonance by only controlling the laser frequency, thus avoiding the unprecedented nanometer precision control of the inter-satellite distance in orbit required in the case of keeping the resonance by displacement control and expected to overcome the serious design problem where the amount of propellant stringently limits the length of the observation period due to continuous control of the satellite positions. Also, in another proposed scheme, which requires cavity length control, one cavity length degree of freedom is forced to leave uncontrolled, and the uncontrolled cavity requires the tuning of length. Since BLFPI employs a simple control configuration in which each laser is locked into each corresponding cavity, there are no restrictions on cavity length, allowing the spacecraft to form a free and flexible triangular formation. In addition, the simple configuration provides operational advantages, such as a straightforward lock-acquisition procedure for the interferometer in orbit.

While BLFPI alleviates the propellant limitations of formation flight and provides flexibility in the formation configuration, a critical conundrum significantly contaminates the gravitational wave signal due to the laser frequency noise. To address this frequency noise issue, BLFPI offers a new offline noise subtraction scheme similar to time-delay interferometry utilized in LISA. In the BLFPI spacecraft, in addition to the error signals from each cavity, the heterodyne beat note signals are obtained for this subtraction process by optically connecting the two lasers with an optical fiber called back-link similar to LISA. The success of BLFPI heavily relies on this subtraction process, which has not experimentally been tested.

This thesis reports an experimental demonstration of the BLFPI. A miniature of the BLFPI was built on an optical bench with the main aim of validating the critical function called the frequency noise subtraction. We show that the frequency noise can be subtracted to a suppression ratio of 188 ± 29 and discuss the current limitations for the subtraction ratio.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 杉本良介

Title
論文題目

Experimental Demonstration of Back-Linked Fabry-Perot Interferometer for the Space Gravitational Wave Antenna

出願者は、宇宙機によるレーザー干渉計型重力波検出器の重要な技術となるバックリンク型ファブリ・ペロー干渉計(BLFPI)を構築して、理論的に提案されていた「引き算法」による雑音低減を初めて実験的に検証した。また、将来の検出器のために本技術の展望を示した。本博士論文はそれらをまとめたものである。

重力波は一般相対論で予言された時空の歪みが伝播する波動で、2015年の初観測以来、米国のLIGO実験、欧州のVirgo実験、日本のKAGRAといった地上設置のkm級の基線長をもつレーザー干渉計型検出器が観測を推進している。これらの検出器が観測しているのは今までのところブラックホールや中性子星からなる連星の合体で放射される重力波であり、その周波数は数10Hzから数kHzである。しかし、それとは異なる周波数帯にも重力波が予想されている。有力な周波数帯の一つは0.1~1 Hz帯域で、宇宙初期のインフレーションや相転移といった宇宙論的な起源をもつ重力波の探索に有利であると考えられている。

宇宙機は地面振動や重力場変動といった地上設置の検出器では避け難い雑音の影響がないために低い周波数帯域でも高感度が期待でき、基線長1000kmのDECIGO計画はその一つである。しかし、地上と違って固定されていない基線のために、長基線のレーザー干渉計の実現にはいくつかの重要な技術の開発が必要である。スペースでのレーザー干渉計では、3台の宇宙機にそれぞれ搭載した鏡で長基線の干渉計を構成し、宇宙機の組み合わせの異なる基線の差分変位から、重力波による時空の歪みを測定する。DECIGO計画のようなファブリ・ペロー干渉計を直接動作させる方式では、同一のレーザー光源を用いた異なる2つの基線の干渉計が同時に動作するように鏡の位置を制御する必要があり、その難しさが懸案であった。

申請者が取り組んだバックリンク型ファブリ・ペロー干渉計(BLFPI)は、2組のファブリ・ペロー干渉計をそれぞれ独立したレーザーの周波数制御により共振に保ち、干渉計の反射光をピックアップして光ファイバーでリンクし、そこから2つの基線長の差分変位を得るものである。共振を保つのに鏡間の基線長を直接に制御する必要がないという大きな利点がある。宇宙機におけるレーザー干渉計型重力波検出器計画への応用を念頭に、「引き算法」と呼ばれる2つのリンクしたレーザーの制御信号処理が理論的に提案されていた。申請者は「引き算法」による雑音低減を初めて実験的に検証した。申請者は2組のファブリ・ペロー干渉計を準備し、テーブルトップでBLFPIを構築した。それぞれの干渉計をPound-Drever-Hall法により共鳴状態に制御し、一方の反射光を光ファイバーを通して取

り出し、もう一方の反射光と干渉させて測定した。測定したデータを解析して、計算機で引き算法の処理をおこなった。その結果、試験のために注入した雑音にたいして約200倍の低減率を達成した。また20~50kHz帯域では雑音フロアの改善も明確に見られ、引き算法が有効に機能していることを示している。世界で初めて BLFPI の引き算法を実証した先駆的な実証実験であり、開発のマイルストーンを達成したと言えるであろう。さらに、本論文では実験・解析における実際の低減率を制限している理由や誤差の要素の検討も含まれており、丁寧に優れた実験研究である。

これらの結果は、すでに *Phys. Rev. D* 109, 022003 として査読付き学術雑誌にて出版(2024年1月10に日付)されている。

さらに学位論文では、今回実証できた BLFPI の性能を元に将来の DECIGO 計画における達成要求も議論しており、自らの研究がもたらす展望が考えられている。審査会においても研究の背景から丁寧に説明した。審査員他からの質問に対して必ずなんらかの答えがあり、未解決の問題や改良できる点について常に思考し続けることができ、博士として重要な資質を有している。

以上の理由により、審査委員会は本論文が学位の授与に値すると判断した。