

氏 名 谷岡 諭

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2220 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Optical Loss Study of Molecular Layers Using a Cryogenic  
Folded Cavity for Future Gravitational-wave Detectors

論文審査委員 主 査 辰巳 大輔  
天文科学専攻 助教  
本原 顕太郎  
天文科学専攻 教授  
杉本 正宏  
天文科学専攻 准教授  
三代木 伸二  
東京大学 宇宙線研究所 准教授  
安東 正樹  
東京大学 大学院理学系研究科 准教授

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 谷岡 諭

論文題目 Optical Loss Study of Molecular Layers Using a Cryogenic Folded Cavity for Future Gravitational-wave Detectors

The detection of a gravitational wave (GW) opened a new window to the Universe, called GW astronomy. A number of detections of GWs have been reported, and the existence of intermediate mass black hole was revealed. The Einstein Telescope (ET), a 3rd-generation gravitational-wave detector (GWD) in Europe, and LIGO Voyager, a substantial upgrade of Advanced LIGO (aLIGO), are planning to employ cryogenically cooled mirrors to reduce thermal noise. It is expected that such future cryogenic GWDs will enable to constrain the formation process of intermediate mass black holes or discover new GW sources with improved sensitivity. The development of cryogenically cooled mirrors is an important technical challenge to realize future cryogenic GWDs.

In the future cryogenic GWDs such as the ET and LIGO Voyager, residual gas molecules can be adsorbed by a cryogenic mirror due to the cryopumping effect. The main component of residual gas molecules is water, which is adsorbed as an amorphous ice. The amorphous ice has large optical absorption at the wavelengths which will be employed in the future GWDs. Therefore, the molecular layer formed on the cryogenic mirror surface can cause a problem due to its large optical absorption. We call such a molecular layer a cryogenic molecular layer (CML).

The impacts of the optical loss by the CML have not been studied at wavelengths of 1.5 to 2  $\mu\text{m}$  where the future cryogenic GWDs will employ. We theoretically estimate the optical loss induced by the CML for future GWDs by assuming the Lambert-Beer law. Because of the large absorption coefficient of amorphous ice, the heat input to the cryogenic mirrors in the ET or LIGO Voyager can exceed their cooling capacities even if its thickness is about 1 nm. Therefore, the CML can hinder the detectors from reaching target cryogenic temperature, resulting in worse sensitivity.

In order to investigate the optical loss of the CML, we have developed a cryogenic folded optical cavity, which consists of three mirrors — input and output mirrors and a folding mirror. This device enables us to perform ringdown measurements at a broad temperature range, from the room temperature down to 10 K cryogenic temperature. Moreover, the folding configuration enables us to perform the cavity enhanced ellipsometry, which is a novel technique we developed to estimate the thickness of the CML. By combining the ringdown measurement and the cavity

enhanced ellipsometry, we estimated a method to characterize the optical loss and thickness of CMLs at the same wavelength and the temperature as the ET. The results indicate that the heat input due to the CML can exceed the cooling capacity of the ET even at 2 nm thickness. Therefore, both theoretical and experimental results indicate that a few nanometer-thick CML can prevent cryogenic operation of the ET due to large heat input.

We conducted numerical simulations to estimate the CML formation speed and the time before the CML induced loss becomes unacceptable. We made CAD models of cryotrap in future GWDs, and calculated the CML formation rate assuming the designed vacuum level. For the case of the ET, it can tolerate the CML formation for 4 years before inducing a serious issue. The tolerable time of LIGO Voyager was estimated to be about a half year. Therefore, the CML can become a problem for long-term operation of LIGO Voyager. To mitigate the impacts of the CML, we propose several possible solutions. Employment of longer cryotrap is one possible solution, which can reduce the CML formation speed. For the case of the ET, by using an 8 m long 4 K cryotrap instead of the currently designed 5 m one, tolerable time becomes about 30 years. However, LIGO Voyager cannot use longer cryotrap due to its limited available space in the existing LIGO facility. Based on the cavity enhanced ellipsometry, we propose a monitoring system which can probe the thickness of a CML on a cryogenic test mass. A laser induced desorption system, which can remove the CML by increasing the temperature of the test mass, is also another possible approach to mitigate the impacts of the CML. The cryogenic folded cavity developed in this study can be utilized as a test bench for the desorption system. Further studies are necessary to characterize and reduce the impacts of the CML on future GWDs.

Our study revealed that the CML can become a critical problem in the future cryogenic GWDs. The cryogenic folded cavity and the cavity enhanced ellipsometry developed in this study are useful tools for further investigations of the CML. This study is one important step toward the future cryogenic GWDs.

Results of the doctoral thesis screening  
博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 谷岡 諭

Title  
論文題目 Optical Loss Study of Molecular Layers Using a Cryogenic Folded Cavity for Future Gravitational-wave Detectors

重力波の初検出は、重力波天文学と呼ばれる宇宙への新しい研究分野を開いた。将来の重力波検出器は、その感度向上により巨大なブラックホールの形成シナリオなどのさらなる発見を提供できると期待されている。この様な将来計画にとって低温冷却ミラーの開発は、重要な鍵である。出願者は、低温冷却ミラーの反射面に形成される極低温分子層が、重大な問題になる可能性を理論的研究により示唆し、更に実験的研究により定量的議論を可能とした。

日本は低温重力波検出器開発のパイオニアであり、CLIO と KAGRA の建設に伴い様々な先行研究が行われてきた。その中で真空チャンバー内の残留ガス分子が極低温ミラー表面に付着し、時間とともに成長する分子層形成が起こることが示され、重力波観測装置として長期観測を維持するのに必要とする真空度や低温ダクト設計についての議論が行われてきた。

近年の更なる検出感度向上に向けた開発では、シリコンミラー基材の開発とそれに伴うレーザーの長波長化が議論されるようになり、1064 nm より長波長領域での分子層による光吸収が再度重要となってきた。出願者は、欧州の Einstein Telescope (波長 1550 nm) や米国の LIGO Voyager (波長 2000 nm) での低温分子層形成の影響について理論的に研究を行い、それら検出器のパフォーマンスにおいて多大な影響を及ぼす可能性があることを示唆した。この研究結果は、英文学術論文として Physical Review D 誌に掲載されており、出願者は論文の第一著者である。

さらに、その理論計算結果の信頼性根拠となる低温分子層の厚さあたりの光学ロスについて、1550 nm レーザーを用いた実験を行い、これを測定することに成功した。実験は Folded Cavity と呼ぶ 3 枚ミラー構成の光共振器を 10 K 程度まで冷却して行われた。特に低温分子層の厚さ測定を行うために、Cavity Enhanced Ellipsometry という手法を確立し、精度 0.5 nm でこれを測定することを可能とした。この実験装置では、Cavity Ringdown 法を用いた光学損失測定を行うことも可能で、出願者は 3 ppm 程の精度でこれも測定した。1550nm における実測の結果は、理論的計算に使用した 2 ppm/nm の吸収係数と無矛盾であった。

これら理論的および実験的研究に対して、出願者は主体的に取り組み、その研究成果の独自性は明らかである。以上の理由により、審査委員会は、本論文が博士学位授与に値すると判断した。