

氏 名 Rishabh BAJPAI

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2349 号

学位授与の日付 2022 年 9 月 28 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Vibration Noise Study of KAGRA Cryogenic System

論文審査委員 主 査 中本 建志  
加速器科学専攻 教授  
道園 真一郎  
加速器科学専攻 教授  
本田 融  
加速器科学専攻 教授  
長谷川 雅也  
素粒子原子核専攻 講師  
内山 隆  
東京大学 宇宙線研究所 准教授  
都丸 隆行  
物理科学研究科 天文科学専攻 教授

(Form 3)

## Summary of Doctoral Thesis

Name in full      Rishabh BAJPAI

Title      Vibration Noise Study of KAGRA Cryogenic System

Ground-based gravitational wave (GW) detectors are ultra-sensitive interferometers that detect displacements of the order of  $10^{-19}$  m between mirrors several kilometers apart, making it essential to minimize environmental displacement noise. Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope (KAGRA) is a Fabry-Perot Michelson Interferometer based GW detector located in Kamioka mine, Japan. The features distinguishing KAGRA from other GWDs are its underground location and cryogenic operation of the four main mirrors inside a double radiation shield cryostat. While the underground location provides a quiet site with low seismic and gravity gradient noise, the cryogenic operation cools the mirrors down to 20 K, reducing the thermal noises. The cryogenic system is a necessary feature of KAGRA as it reduces the thermal noise by cooling the mirror down to 20K, but the vibration generated from the system is a noise source, making the quiet underground location (low seismic and gravity gradient noise) redundant. While few studies have reported that this vibration could couple to the mirrors and contaminate the detector sensitivity, a detailed vibration analysis of the cooling system at cryogenic temperature at the KAGRA site has never been conducted. Furthermore, the impact of cooling system Newtonian noise on sensitivity has never been evaluated as previous studies only focused on the direct vibration transfer through heat-links. To bridge this gap, I studied the vibration noise generated from the KAGRA cryogenic system at 12 K in this research. Furthermore, I also evaluated if this vibration contaminates the detector sensitivity through direct or Newtonian noise coupling. Since no high sensitivity commercial cryogenic accelerometers were available to conduct the vibration analysis, a novel self-calibrating cryogenic accelerometer with Michelson interferometer was developed at first. The optical and mechanical components were selected, designed and tested to minimize loss of interferometer output at cryogenic temperature. The developed accelerometer was tested in KEK and KAGRA cryostat and satisfied all the calibration, sensitivity and temperature requirements. It showed a sensitivity of  $3.33 \times 10^{-11}$  m/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 1 Hz at 300 K and stable operation down to 12 K with no significant drop in the interferometer visibility. While the accelerometer was developed for KAGRA, it can be employed in any low vibration cryogenic experiments for a multitude of applications. The developed accelerometer was then used to conduct the first-ever vibration analysis of the cryogenic system at cryogenic temperature at KAGRA. The measurement results at 12 K show that inner shield vibration follows the ground motion below 1 Hz. In 1-

100 Hz, the shield vibration is 2-3 orders larger than seismic motion due to internal resonances of the cooling system and cryocooler operation. Furthermore, it was observed that while the operation of the cryocooler does not change the noise floor, several 2 Hz peaks and their harmonics appear over the entire spectra. It was also observed that the vibration spectra at 12 K was much larger than 290 K. A hammering test was also conducted to identify the origin of cryostat and radiation shield resonance peaks. Finally, these results were used to calculate the direct coupling of cryogenic system vibration to the mirror through heat-links and proved that the coupling is below the KAGRA design requirement and should not be an issue.

Cooling system components are relatively heavy and in close proximity to the mirrors, so when they vibrate, the Newtonian gravitational force they exert on the mirror fluctuates, causing it to move; this is called Newtonian noise and could contaminate the detector sensitivity. Therefore, the results from the vibration analysis were used to estimate cooling system Newtonian noise in the 1-100 Hz frequency band. This calculation shows that Newtonian noise is below KAGRA sensitivity but several peaks in 16-50 Hz are larger than final design requirement. This was the first-ever study to evaluate Newtonian noise from the cooling system of KAGRA, and it was concluded that KAGRA would need to subtract this noise (peaks between 16-50 Hz) from the interferometer output using the developed cryogenic accelerometer to achieve the final design sensitivity.

Based on the results obtained from all three studies, potential future issues were considered, and future development work for KAGRA was recommended. A method to improve the sensitivity of the current cryogenic accelerometer and the development of a vertical cryogenic accelerometer were outlined. Furthermore, a development and calibration plan of a cryogenic accelerometer for cryogenic payload control was also outlined. The issue of high thermal resistance and its reduction without increasing vibration coupling was also highlighted.

KAGRA is the first large-scale gravitational wave detector constructed underground and employs cryogenics to cool down its test masses. These technologies will be employed in third-generation detectors like Einstein Telescope. Therefore, the findings reported in this thesis will help readers understand how the cooling infrastructure can affect the sensitivity of third-generation gravitational wave detectors. Furthermore, we hope our study can serve as a guide in designing the cooling infrastructure for third-generation gravitational wave detectors like Einstein Telescope.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 Rishabh BAJPAITitle  
論文題目 Vibration Noise Study of KAGRA Cryogenic System

重力波検出器は、数キロメートル離れたミラー間の  $10^{-19}$  m オーダーの変位を検出する超高感度なレーザー干渉計であり、外乱による変位ノイズを最小限に抑えることが不可欠となる。大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は、岐阜県飛騨市神岡町池ノ山地下にある Dual Recycled Fabry-Perot Michelson 干渉計型重力波検出器で、その特徴は、地面の常時微動や重力勾配のノイズ（ニュートニアンノイズ）が少ない地下に設置されている点と、ミラーを極低温まで冷却することで熱ノイズを大幅に低減できる点である。その一方で、冷却システムから発生する振動はノイズ源となり、ミラーを振動させることで検出感度が損なわれる可能性がある。ただ、これまでの先行研究は常温での振動解析のみであり、実際に KAGRA が運転されている極低温での詳細な振動解析を行った例はない。さらに、先行研究は熱リンクを介した直接的な振動伝達のみで焦点を当てていたため、冷却システムの振動に起因するニュートニアンノイズが検出感度に与える影響を評価した研究はこれまで実施されていない。

出願者は、これらの点に注目し、まず 12 K における KAGRA 極低温システムから発生する振動ノイズを調べた。さらに、この振動が直接またはニュートニアンノイズカップリングを介して検出感度に及ぼす影響について評価を行った。

本研究には、高感度の極低温で駆動可能な加速度計が必要だったが、市場には存在しなかった。このため、出願者自身の手によりマイケルソン干渉計ベースの極低温加速度計を新規に開発した。開発した加速度計は、300 K、1 Hz において  $3.33 \times 10^{-11}$  m/ $\sqrt{\text{Hz}}$  の感度を示し、また最低 12 K まで安定して動作することを確認した。

次に、開発した極低温加速度計を用いて、KAGRA で初めての極低温状態 (12 K) での振動測定を実施した。その結果、1 Hz 以下の周波数帯域では、冷却シールドの振動は地面振動に追従していることがわかった。一方 1~100 Hz の帯域では、クライオスタットの熱輻射シールドの共振がブロードに現れており、地面振動よりも 2~3 桁大きい振動を示した。最終的にヒートリンクを介してミラー部に伝わる振動解析を行った結果、KAGRA の設計要求よりも低く、問題にはならないことを明らかにすることができた。

冷却システムのコンポーネントは比較的重く、ミラーに近接しているため、振動するとミラーにかかるニュートン重力が変動し、ミラーが動く。これはニュートニアンノイズと呼ばれ、検出感度を低下させる可能性がある。振動解析の結果を用いて、1~100 Hz の周波数帯域における冷却システム各部からのニュートニアンノイズを推定したところ、全般的に KAGRA の設計要求を下回ることがわかった。ただし、16~50 Hz のいくつかのピークは最終的な設計要件を超えており、無視できなくなる可能性がある。また、将来 KAGRA の低周波感度を向上させるようなアップグレードを実施した場合にはニュートニアンノイズ

が問題となり、極低温加速度計を用いたノイズキャンセリングを行う必要があるとの結論が得られた。

博士論文審査会及び公開論文発表会では、出願者は博士論文の内容を的確に纏めた発表を行った。その後の審査員を含む聴講者からの質疑に対しても、明確な応答がなされた。また、本研究に関する査読付き論文（英語）がすでに2編受理されており、他の1編が投稿準備中である。以上から、専門とする分野について博士としての学識を十分に持っていると判断した。なお、博士論文が英語で書かれていること並びに発表及び質疑応答が英語で行われていることから英語力に関しても問題ない。

以上のことから、審査委員全員一致でBAJPAI氏の博士論文の本審査を合格と判定した。

以上