

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20925

研究課題名（和文）次世代実験での原始重力波検出を見込んだ振動雑音フリーな超伝導検出器アレイの開発

研究課題名（英文）Development of a new anti-vibration isolation system for Superconducting detector array towards detection of primordial gravitational wave in future CMB experiment

研究代表者

長谷川 雅也（HASEGAWA, MASAYA）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：60435617

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、CMB偏光実験による原始重力波探索で重要となる1Hz以下の低周波領域での雑音を低減する手法を確立し、次世代実験における原始重力波の発見能力を格段に向上させる事を目的としている。低周波雑音の主要な要因の一つに、超伝導検出器の振動がある。主な振動源の一つである検出器を冷却するための冷凍機の振動を、アクチュエータを用いて能動的に防振する事に成功した。また、低温で動作する変位計の開発にも目処が付き、最終目標である低温部の防振システムについて技術的に目処をつける事が出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって振動による超伝導検出器への過剰ノイズを十分小さく抑える事で次世代CMB偏光実験における原始重力波の発見能力が格段に向上出来ると期待できる。これにより宇宙誕生を記述する有力な仮説であるインフレーション理論の実験的な検証が実現できる。また、本研究を通して実現を目指す能動防振技術は、精密観測を行う他の最先端実験で広く使われる事が期待できる。もし原始重力波が検出できれば、「宇宙のはじまりとは？」という人類究極の問いに、あらたな回答を与える事が出来る。社会的な関心やインパクトも非常に大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：This research aims to establish a method to reduce noise in the sub-1Hz low-frequency range, which is crucial for detecting primordial gravitational waves through CMB polarization experiments. The goal is to significantly improve the discovery capability of primordial gravitational waves in next-generation experiments. One of the main factors contributing to low-frequency noise is the vibration of superconducting detectors. We have successfully achieved active vibration isolation of the detector, which is one of the main vibration sources, by using actuators. Furthermore, we have made progress in the development of displacement sensors operating at low temperatures, and we have achieved technological milestones for the vibration isolation system in the low-temperature section, which is the final objective.

研究分野：宇宙物理

キーワード：超伝導検出器 防振装置 CMB偏光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

CMB 偏光観測による原始重力波で問題となるのがいわゆる $1/f$ ノイズと呼ばれる低周波ノイズである。地上実験において最も大きな $1/f$ ノイズ源となっているのが大気の揺らぎであるが、大気からの輻射は無偏光であるため、半波長板等の変調装置を用いて偏光信号のみを変調する事により削減する事が出来る。しかし、検出器周辺環境(温度等)の不安定性による $1/f$ ノイズが当時の検出器感度と同等のレベルで残っており、現行実験よりも1桁以上検出器感度の向上を図る次世代実験では、この残留低周波ノイズが主要なノイズ源として実験の感度を制限する恐れがある。残留ノイズの起源としていくつかの要因が挙げられるが、その中で主要な原因と考えられているのが振動である。これを現行実験よりも1桁以上抑える事が求められている。

CMB 偏光検出装置の振動源としては主に(1) 検出器を冷却するための冷凍機の振動(熱リンクを通して検出器を振動させる)と(2)望遠鏡のモーター等の振動(検出器システム全体を振動させる)の2つであり、これらを能動的に防振する事で低周波の振動雑音を抑えられると期待できる。

2. 研究の目的

宇宙が誕生直後に加速的膨張をした、とするインフレーション仮説の検証は宇宙創成の謎に迫る1歩として宇宙物理および素粒子物理の最重要課題の一つである。特にインフレーション仮説の最も重要かつ決定的な予言である「時空の量子揺らぎに起因する重力波(原始重力波)」を検出すれば、科学史に残る大発見となる。原始重力波を検出出来るほぼ唯一の手段が、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光精密観測である。原始重力波はCMBの直線偏光パターンに「Bモード」と呼ばれる特殊な渦巻き状のパターンを生成するため、偏光Bモードをとらえる事で原始重力波の検出が可能になる。本研究の目的は、CMB 偏光観測装置にKAGRA等の重力波実験で採用されている能動防振系の技術を応用して低周波領域(数Hz以下)の振動雑音低減の可能性を検証し、次世代CMB 偏光実験において原始重力波の発見能力を格段に向上させるための基盤技術を確立する事である。具体的には研究期間内に以下の3点の研究を重点的に行う

- 冷凍機起因の振動をアクチュエータを用いて防振出来る事を実証する
- 低温の防振ステージの実現に向けて、低温で使用可能な変位系の実証を行う
- 振動様式の時間変化に備えて、アクチュエータをフィードバックモードで運用する

3. 研究の方法

本計画では、まず(1)冷凍機の振動削減から行う。全てのコンポーネントを常温に設置する事ができ、振動を抑えるアクチュエータや制御信号を生成するための変位計等は基本的には市販の物を組み合わせる事で実現できるため、短期間での実装が可能である。まずは、実際にCMB実験で使用するものと同型の冷凍機を用いて振動による変位量を確認し、必要な変位量をカバー出来る、かつ真空圧による重量を支えられるアクチュエータを選定する。その後実際にどれくらい振動が能動的に削減できるかを短期間のデータにて(フィードバック無しで)評価し、原理的に振動雑音をおこまで削減できるかの確認を行う。

次に(2)低温領域での超伝導検出器アレイの防振系の開発を行う。現在、極低温(4ケルビン以下)で使用できる振動計は市販化されていないため、開発を行う。いくつか手法はあるが、まずは重力波実験で常温で使用されている変位計(LEDとフォトダイオード)を低温で使用して感度を評価し、本計画の目的で使用可能かどうかを検証する。並行して(3)アクチュエータのフィードバック制御化の準備を進める。

4. 研究成果

まずレーザー変位計を用いて具体的に冷凍機の振動レベルを確認し、振幅として約10マイクロメートルの振動である事を確認した。この偏位を十分制御するために、90マイクロメートルのダイナミックレンジを持つアクチュエータの使用を決定した。また、アクチュエータを制御するための電圧源を準備し、実際にアクチュエータを規定の幅で稼働する事に成功した。次に、冷凍機の鉛直報告の防振を目的に、3本のアクチュエータを用いた防振ステージを作成して冷凍機のヘッド部分と結合させ、レーザー変位計でヘッドの動きをモニターしながらそれを打ち消す様に(オープンループにて)アクチュエータを駆動し、振動レベルが1/10程度に抑えられる事を確認した。まだ同様に水平方向についても同様の手順でアクチュエータを配置し、振動が抑えられている事を確認した。

低温で使用できる加速度センサーの開発についても進展があった。まずはLEDとフォトダイオードを組み合わせた反射型のシステムを構築し、低温で駆動すること、また、精密1軸ステージを用いて応答を較正し、防振に十分な分解能を有している事を確認した。アクチュエータに關しても候補を選定し、低温防振のデモンストレーションに向けた目処が立っている。

フィードバック制御に関しては、変位計からの信号をデジタル化するための ADC と、その値からアクチュエータを制御する信号を生成する DAC、および不要な周波数帯の信号を除去するためのフィルタ等のハードウェアの準備が整い、ADC の値から DAC の値を決定するソフトウェアの準備を進めている。フィードバック制御を用いた長時間の防振実証に関しても目処が立ちつつある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金山高大
2. 発表標題 CMB観測実験におけるアクティブ除振装置の設計開発
3. 学会等名 核融合科学研究所 技術研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

KEK-CMBグループ cmb.kek.jp Masaya Hasegawa's Homepage http://research-up.kek.jp/people/masayan/index.html KEK-CMBグループ cmb.kek.jp Masaya Hasegawa's Homepage http://research-up.kek.jp/people/masayan/index.html

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------