

令和元年6月2日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14272

研究課題名（和文）宇宙マイクロ波背景放射偏光観測における偏光変調器のための低温連続回転機構の開発

研究課題名（英文）Development of a cryogenic continuous rotation mechanism for a polarization modulator in cosmic microwave background polarization experiment

研究代表者

櫻井 雄基 (Sakurai, Yuki)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号：50780847

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙のインフレーション理論の実証は、現代物理学の最重要課題の一つである。偏光変調器は、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）偏光観測における系統誤差の大幅な軽減を可能にするため、インフレーション探索の鍵となる装置である。本研究の目的は、偏光変調器に使用する極低温回転機構を開発し、10K以下での安定的かつ低発熱な動作の確立である。低発熱化のための開発を行った超伝導磁気軸受と同期モーターを導入した小型、及び実機サイズの回転機構試作機を作製し、その性能評価を行った。これにより、衛星、及び地上実験に実際に使用する偏光変調器の性能要求を満たす極低温回転機構の実現性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙のインフレーション理論は、現代宇宙論の未解決な問題を一挙に解決可能であるため、最重要研究課題の一つである。また、インフレーションのエネルギースケールは未到達である大統一理論（GUT）スケールに対応するため、高エネルギー物理学においても重要な意義を有する。インフレーションの実験的検証のためには、CMB偏光観測実験の高感度化、つまり偏光変調器の開発が必須である。本研究では、偏光変調器の主要部である極低温回転機構を開発し、実際の実験の要求を満たす実現性を示した。これにより、インフレーションの実験的検証に向けた装置開発において、大きく前進したと言える。

研究成果の概要（英文）：One of the most important topics in current cosmology is the verification of the cosmic inflation theory. A polarization modulator is a key instrument in the search for the cosmic inflation since it enables to significantly reduce systematic uncertainties in cosmic microwave background (CMB) polarization measurement. The purpose of this research is the development of a cryogenic rotation mechanism used in the polarization modulator and to establish stable rotation with low heat dissipation at 10 K or less. We have fabricated small-sized and actual-sized prototypes of the cryogenic rotation mechanism. The prototypes are implemented a superconducting magnetic bearing and a synchronous motor developed for low heat dissipation. From the evaluation of the prototype performance, we showed the feasibility of a cryogenic rotation mechanism that satisfies the requirements of polarization modulators used in satellite and ground experiments.

研究分野：高エネルギー物理学、宇宙物理学

キーワード：CMB インフレーション 偏光変調器 半波長板 極低温 回転機構 超伝導磁気軸受 同期モーター

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の精密観測によって、ビッグバン宇宙論は現在の宇宙を記述する確実なモデルとなった。しかしながら、地平線問題、宇宙の平坦性問題、モノポール問題に代表される未解決な問題は数多く存在する。宇宙物理学では、これらの根源的な問題の解決に向けて、様々な理論・実験が活発に展開されている。中でも初期宇宙の指数関数的膨張を記述するインフレーション理論は、上記の問題を一挙に解決可能であるため、有望かつ重要な理論である。インフレーション時に発生した原子重力波は、CMB に特殊な偏光パターン「B モード」を生成すると予言されている。したがって、CMB の精密な偏光観測からインフレーション由来の B モードを発見することで、インフレーション理論の実験的検証が可能である。B モード偏光測定の実験的検証は、原始重力波の大きさを表すテンソル・スカラー比( $r$ )によって記述される。 $r$  の数値によって異なるインフレーションモデルの精査が可能である。当時、BICEP/Keck 地上実験と WMAP/Planck 実験の統合解析によって、 $r < 0.09$  という制限が与えられていた。代表的なインフレーションモデルの発見又は棄却には  $r$  の観測誤差  $\delta r < 10^{-3}$  の達成が必要であった。統計的な感度向上は、実験を大型化し検出器数を増加させることで実現可能である。一方、ノイズ・系統誤差の低減は別のアプローチが必要となる。望遠鏡の開口部に偏光変調器を搭載することは、これらを低減する有力な手段である。そこで、偏光変調器の開発が実験の高感度化に必須であり、世界各地で装置開発が進められていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙のインフレーション探索に向けた宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測実験に用いる偏光変調器のための極低温連続回転機構の開発である。インフレーションの実験的検証のためには、インフレーション時に発生した原子重力波起因の特徴的な CMB 偏光パターンである「B モード」を捉えることが必要である。そのため、超精密な偏光観測を可能にする偏光変調器の観測装置への導入が必要である。偏光変調器とは、光学素子である半波長板を連続回転させ、入射偏光信号に変調を付加することで、観測の系統誤差と低周波ノイズを極限まで低減させる装置である。CMB 偏光観測実験では、熱ノイズを抑制するため、観測機器を 20K 以下の極低温まで冷却する。したがって、偏光変調器には極低温で連続回転を実現する回転機構が要求される。そこで、本研究ではこの回転機構の極低温における安定的かつ低発熱な動作の確立を目的とした。

### 3. 研究の方法

一般的な接触型回転機構では、物理的な摩擦によって大きな発熱が生まれる。そこで本研究では、極低温かつ低発熱な回転機構を実現するため、完全非接触な超伝導磁気軸受と同期モーターが開発項目である。超伝導磁気軸受では低発熱化のため、リング型磁石の磁場均一化を行う。そのため、永久磁石とヨークを組み合わせた磁気回路の設計と開発を行う。同期モーターでは、コイルと永久磁石、磁気コアの設計の最適化を行う。さらにコイルと磁気コアには、損失を最小化する材質を開発・導入する。これらによって、モーター駆動による発熱を最小化する。これらの低発熱化の開発を小型試作機（内径 100mm）において行い、その設計を基に実機サイズ（内径 400mm 以上）の試作機を作製し、その性能評価を行う。これらの開発から、実際の CMB 偏光観測実験で使用する偏光変調器に適応可能な極低温回転機構を開発する。

#### 4. 研究成果

初年度は実機サイズの回転機構に向けて、小型試作機（内径 100mm）の作製と 10K 以下の極低温における性能評価を行った。実際に極低温クライオスタット内に小型回転機構を導入し、10K 以下での安定回転を実現した。また、小型試作機から測定した発熱特性を反映させたシミュレーションによる回転機構の熱モデルを構築した。最終年度では、LiteBIRD 衛星実験に向けた実機サイズ（内径 400mm）の回転機構試作機を図 1 の様に作製した。この試作機の設計には、小型試作機から得た知見がフィードバックされている。10K 以下に冷却されたクライオスタット内において、実機サイズ試作機の安定的連続回転を実現した。発熱特性測定も実施し、回転子への入熱を実験的に測定した。それを基に構築した熱シミュレーションモデルから、更なる軽量化と設計の最適化によって、衛星実験に適応可能な低発熱回転機構の実現性を実証した。また、図 2 の様に、地上実験 Simons Observatory で実際に使用される超伝導磁気軸受の作製と評価も行った。これは内径 500mm の世界最大サイズの CMB 実験用超伝導磁気軸受であり、性能評価から実際の実験の要求を満たす性能であることを実験的に示した。

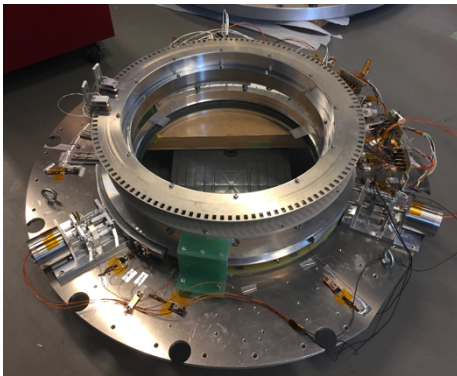


図 1 衛星実験用回転機構の試作機

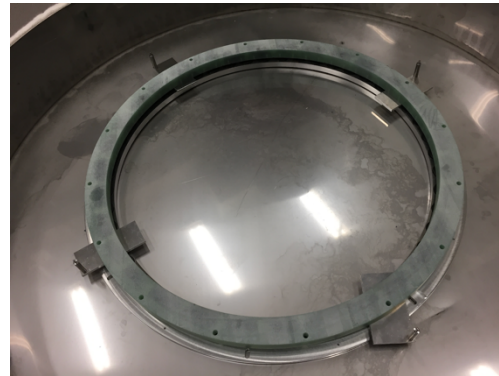


図 2 地上実験用超伝導磁気軸受の実機

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Y. Sakurai, T. Matsumura, T. Iida, H. Kanai, N. Katayama, H. Imada, H. Ohsaki, Y. Terao, T. Shimomura, H. Sugai, H. Kataza, R. Yamamoto, S. Utsunomiya, Design and thermal characteristics of a 400mm diameter levitating rotor in a superconducting magnetic bearing operating below at 10K for a CMB polarization experiment, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 28, Issue: 4, pp. 1-4, 2018 (査読あり)
2. Y. Sakurai, T. Matsumura, N. Katayama, H. Kanai, T. Iida, Development of a cryogenic remote sensing thermometer for CMB polarization experiment, Proceedings of 29th IEEE International Symposium on Space THz Technology ISSTT2018 pp. 169~174 (2018)
3. Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Kataza, S. Utsunomiya, and R. Yamamoto, Estimation of the Heat Dissipation and the Rotor Temperature of Superconducting Magnetic Bearing Below 10 K, IEEE Transactions on Applied Superconductivity Volume: 27 Issue: 4 012011 (2017) (査読あり)
4. Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Sugai, N. Katayama, H. Ohsaki, Y. Terao, Y. Terachi, H. Kataza, S. Utsunomiya, and R. Yamamoto, Vibrational characteristics of a superconducting magnetic bearing

employed for a prototype polarization modulator, Journal of Physics Conference Series 871 012091 (2017) (査読あり)

5. Y. Terachi, Y. Terao, H. Ohsaki, Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Sugai, S. Utsunomiya, H. Kataza, and R. Yamamoto, Numerical analysis of fundamental characteristics of superconducting magnetic bearings for a polarization modulator, Journal of Physics Conference Series (査読あり)
6. T. Iida, Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Sugai, H. Imada, H. Kataza, H. Ohsaki, M. Hazumi, N. Katayama, R. Yamamoto, S. Utsunomiya and Y. Terao, Thermal analysis of a prototype cryogenic polarization modulator for use in a space-borne CMB polarization experiment, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 278, No. 1, p.012011, 2017 (査読あり)

[学会発表] (計 11 件)

1. Yuki Sakurai, Tomotake Matsumura, Nobuhiko Katayama, Hiroaki Kanai, Teruhito Iida, Development of a cryogenic remote sensing thermometer for CMB polarization experiments, 29th IEEE International Symposium on Space THz Technology ISSTT2018
2. Yuki Sakurai et al., Design and development of a polarization modulator unit based on a continuous rotating half-wave plate for LiteBIRD, SPIE2018 Astronomical Telescopes + Instrumentation
3. Yuki Sakurai, Tomotake Matsumura, Teruhito Iida, Kunimoto Komatsu, Nobuhiko Katayama, Hajime Sugai, Hiroyuki Ohsaki, Yutaka Terao, Yukimasa Hirota, Hisashi Enokida, Development of a contactless cryogenic rotation mechanism employed for a polarization modulator unit in cosmic microwave background polarization experiments, The 31st International Symposium on Superconductivity ISS2018
4. Y. Sakurai et. al., LiteBIRD: lite satellite for the study of B-mode polarization and inflation from cosmic microwave background radiation detection, International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPA2017)
5. Y. Sakurai, T. Matsumura, T. Iida, H. Kanai, N. Katayama, H. Imada, H. Ohsaki, Y. Terao, T. Shimomura, H. Sugai, H. Kataza, R. Yamamoto, S. Utsunomiya, Design and thermal characteristics of a 400mm diameter levitating rotor in a superconducting magnetic bearing operating below at 10K for a CMB polarization experiment, 13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2017)
6. Y. Sakurai, T. Matsumura, N. Katayama, H. Ohsaki, Y. Terao, T. Shimomura, H. Kanai, H. Sugai, H. Imada, H. Kataza, S. Utsunomiya, R. Yamamoto, Design of the prototype SMB system for the space-borne polarimeter, The 10th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials (PASREG 2017)
7. 桜井雄基, 松村知岳, 片山伸彦, 小松国幹, 杉山真也, 高久諒太, LiteBIRD 衛星計画低周波望遠鏡搭載に向けた偏光変調器の開発概要、日本物理学会 第 74 回年次大会
8. 桜井雄基, 松村知岳, 片山信彦, 小松国幹, 菅井肇, 大崎博之, 寺尾悠, 廣田幸真, 榎田壽史, 宇宙のインフレーションを探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験のための偏光変調器における極低温連続回転機構の開発、第 27 回日本 AEM 学会 MAGDA コンファレンス(電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス、Magnetodynamics Conference)

9. 桜井雄基、松村知岳、飯田光人、片山伸彦、菅井肇、大崎博之、寺尾悠、寺地祐介、下村俊貴、今田大皓、山本亮、宇都宮真、片座宏一、宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験のための偏光変調器用超伝導軸受の発熱特性、第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29)
10. 桜井雄基、松村知岳、片山信彦、小松国幹、杉山真也、高久諒太、LiteBIRD 科学衛星のための偏光変調器の開発、第19回宇宙科学シンポジウム
11. 桜井雄基、他 LiteBIRD Phase A1 team、LiteBIRD 科学衛星のための偏光変調器の開発状況、第18回宇宙科学シンポジウム

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。