

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05441

研究課題名(和文)インフレーション宇宙探索のための低温広帯域偏光変調器の開発

研究課題名(英文)Development of cryogenically cooled broadband polarization modulator to probe the inflationary universe

研究代表者

松村 知岳 (Matsumura, Tomotake)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：70625003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：インフレーション仮説は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測にて検証が可能である。偏光詳細観測にて鍵となる偏光変調器の開発を行なった。この仮説検証に求められる感度はナノケルビン程度の微弱な揺らぎであり、偏光変調器を導入することで装置由来の擬似偏光信号と縮退を解く。広帯域かつ低温にて半波長板を連続回転させるという挑戦的な開発項目がある中で、サファイア半波長板へのモスアイ加工により1:8の広帯域反射防止の実証、また超電導磁気軸受を用いた連続回転機構の開発を行なった。CMB偏光観測で求められる偏光編長期の光学、熱、機械的特性の要素技術評価を行い、インフレーション探索の装置として実現性を示した。

研究成果の概要(英文)：The theory of inflation is testable by using the measurement of the cosmic microwave background (CMB) polarization. The expected sensitivity for a next-generation CMB polarization experiment is to probe the nano-Kelvin fluctuation. The experimental challenge comes when one has to make a distinction between the signal and the instrumentally induced fluctuation. In order to overcome this challenge, we develop a polarization modulator using a cryogenically cooled continuously rotating broadband half-wave plate. We achieve a broadband anti-reflection by a moth-eye structure and also we build a rotational mechanism using a superconducting magnetic bearing. We characterize its thermal, optical, and kinematic performances experimentally, and demonstrate the applicability of such this system for a next-generation CMB polarization experiment.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：インフレーション 宇宙マイクロ波背景放射 偏光観測 応用超電導 超電導磁気軸受 レーザー加工

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

初期宇宙論の分野では欧州宇宙機関の宇宙マイクロ波背景放射（cosmic microwave background=CMB）観測衛星 Planck の結果が2013年、2015年と公表され、標準宇宙論の確立がより明確となった。同時に、Planck の結果がインフレーションの存在に対して無矛盾であることから、地上、気球を用いたインフレーション仮説の検証を目的とした CMB 偏光観測に向けて加速していた。また、Planck および BICEP2 の結果から、我々の銀河系内からの放射（前景放射）の除去がインフレーション探索の鍵だという認識が浸透し、結果として広帯域の観測の重要性が再認識された。さらに、将来衛星計画が米国、欧州、日本、それぞれで議論が進み、将来衛星観測に向けた要求を明確になってきた時期であり、衛星を含む観測装置として広帯域で詳細偏光観測が実現できる装置開発が求められる背景があった。

### 2. 研究の目的

宇宙マイクロ波背景放射のB-mode偏光観測はインフレーション仮説に対し感度を持つ。世界的にその探索へ熾烈な競争があるが、現在の実験感度では強い制限を与えるに至らない。本研究提案では統計、及び系統誤差を同時に低減できる偏光変調器を開発する。特に変調器の広帯域性、そして自身の熱放射を押さえる4Kでの動作、を同時に達成することで、初期宇宙探索で鍵となる前景放射除去に必須となる広帯域高感度観測が可能となる。これにより代表的なsingle-field slow-roll インフレーションモデル( $r \sim 0.001$ )の探索に必要なかつ実装可能な偏光計を確立する。

### 3. 研究の方法

本計画で提案する連続回転半波長板を用いた低温広帯域偏光変調器の開発要素は、光学的要素である半波長板の広帯域反射防止膜と低温メカトロニクスである超伝導軸受けを用いたモーター部に分類できる。広帯域反射防止膜はレーザー微細加工を用いたモスアイ形状の作成により実現する。微小面積での加工性の検証は終了しており、大面積の加工のため高出力レーザーを用いた加工の高速化を実証する。一方、低温にて実現する軸受け及びモーター部は、超伝導軸受け及び超伝導線コイル

ルを用い、世界初となる完全非接触での低発熱4K連続回転ACモーターを開発する。低発熱超伝導線コイル及び超伝導軸受けはそれぞれ過去の科研費等で開発済みであり、開発要素としてその統合及び評価試験が残されている。また、国内及び国際共同研究体制を既に構築しており、本提案によりCMB偏光実験で搭載可能な偏光変調器を開発する。

### 4. 研究成果

インフレーション仮説は宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光観測にて検証が可能である。偏光詳細観測にて鍵となる偏光変調器の開発を行なった。この仮説検証に求められる感度はナノケルビン程度の微弱な揺らぎであり、偏光変調器を導入することで装置由来の擬似偏光信号と縮退を解く。広帯域かつ低温にて半波長板を連続回転させるという挑戦的な開発項目がある中で、サファイア半波長板へのモスアイ加工により1:8の広帯域反射防止の実証（図1、2）、また超伝導磁気軸受けを用いた連続回転機構の開発（図2）を行なった。CMB偏光観測で求められる偏光編長期の光学、熱、機械的特性の要素技術評価を行い、インフレーション探索の装置として実現性を示した。

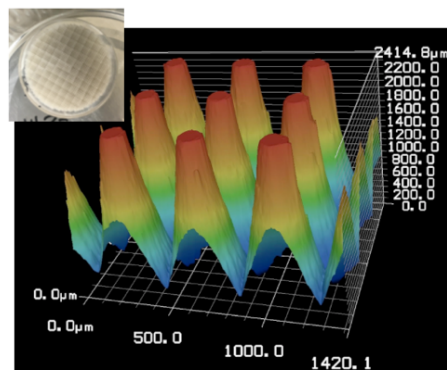


図1 モスアイ加工の共焦点望遠鏡写真。

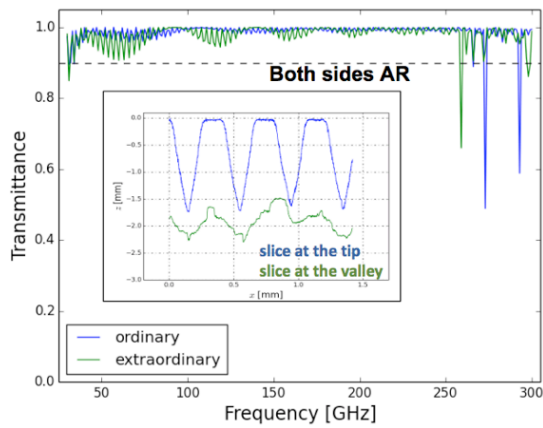


図 2 形状に基づく期待される透過率。シミュレーションであるが、シミュレーション結果と実測の整合性は確認済み。

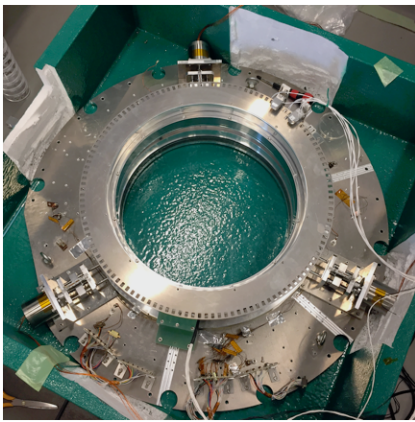


図 3 偏光変調器の回転機構。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 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, and S. Utsunomiya”, Design and Thermal Characteristics of a 400 mm Diameter Levitating Rotor in a Superconducting Magnetic Bearing Operating Below at 10 K for a CMB Polarization Experiment”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 28, NO. 4, JUNE 2018. (査読あり)
2. S. Kashima, M. Hazumi, H. Imada, N. Katayama, T. Matsumura, Y. Sekimoto, and H. Sugai, “Wide field-of-view crossed Dragone optical system using anamorphic aspherical surfaces”, Applied Optics Vol. 57, Issue 15, pp. 4171–4179 (2018). (査読あり)
3. T. Iida, Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Sugai, H. Imada, H. Kataza, H. Ohsaki, M. Hazumi, N. Katayama, R. Yamamoto, S. Utsunomiya, 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, No. 278, Vol. 1, Page. 012011, (2017). (査読あり)
4. Y. Terachi, Y. Terao, H. Ohsaki, Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Sugai, S. Utsunomiya, H. Kataza, R. Yamamoto, “Numerical analysis of fundamental characteristics of superconducting magnetic bearings for a polarization modulator”, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 871, No. 1, Page. 012094, IOP Publishing (2017). (査読あり)
5. Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Sugai, N. Katayama, H. Ohsaki, Y. Terao, Y. Terachi, H. Kataza, S. Utsunomiya, R. Yamamoto, “Vibrational characteristics of a superconducting magnetic bearing employed for a prototype polarization modulator”, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 871, No. 1, Page 012091, (2017). (査読あり)

6. K. Young, Q. Wen, S. Hanany, H. Imada, J. Koch, T. Matsumura, O. Suttmann, and V. Schuetz, “Broadband millimeter-wave anti-reflection coatings on silicon using pyramidal sub-wavelength structures”, Journal of Applied Physics 121, 213103 (2017). (査読あり)
7. Y. Sakurai, T. Matsumura, H. Kataza, S. Utsunomiya, R. Yamamoto, “Estimation of the heat dissipation and the rotor temperature of superconducting magnetic bearing below 10 K”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 27, Iss. 4 (2017). (査読あり)
8. V. Schuetz, K. Young, T. Matsumura, S. Hanany, J. Koch, O. Suttmann, L. Overmeyer, and Q. Wen, “Laser Processing of Sub-Wavelength Structures on Sapphire and Alumina for Millimeter Wavelength Broadband Anti-Reflection Coatings”, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 11, No. 2 (2016). (査読あり)
9. Y. Inoue, T. Hamada, M. Hasegawa, M. Hazumi, Y. Hori, A. Suzuki, T. Tomaru, T. Matsumura, T. Sakata, T. Minamoto, and T. Hirai, “Two-layer anti-reflection coating with mullite and polyimide foam for large-diameter cryogenic infrared filters”, Appl. Opt., 55, 22 (2016). (査読あり)
10. T. Matsumura, Y. Sakurai, H. Kataza, S. Utsunomiya, R. Yamamoto, “Magnetically coupled gear based drive mechanism for contactless continuous rotation using superconducting magnetic bearing below 10K”, Physica C: Superconductivity and its Applications, Volume 530, 15 November 2016, Pages 138-141. (査読あり)
11. T. Matsumura, H. Kataza, S. Utsunomiya, R. Yamamoto, M. Hazumi, N. Katayama, “Design and Performance of a Prototype Polarization Modulator Rotational System for Use in Space Using a Superconducting Magnetic Bearing”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016 Volume:26, Issue:3. (査読あり)
12. T. Matsumura, H. Ishino, N. Katayama, Y. Sekimoto, H. Sugai et al., “LiteBIRD: Mission Overview and Focal Plane Layout”, Journal of Low Temperature Physics, 184: 824 (2016). (査読あり)
13. T. Matsumura, K. Young, Q. Wen, S. Hanany, H. Ishino, Y. Inoue, M. Hazumi, J. Koch, O. Suttman, and V. Schuetz et al., “Millimeter-wave broadband antireflection coatings using laser ablation of subwavelength structures”, Applied Optics Vol. 55, Issue 13, pp. 3502-3509 (2016). (査読あり)

[学会発表] (計 3 2 件)

1. T. Matsumura, “LiteBIRD, Lite satellite for the study of B-mode polarization and Inflation from

- cosmic microwave background radiation”, Low Temperature Detector, 2015.
2. T. Matsumura, “Prototype design and performance of a polarization modulator for use in space using a superconducting magnetic bearing”, European Conference on Applied Superconductivity, 2015.
  3. T. Matsumura, “Magnetically coupled gear drive Mechanism for non-contact continuous rotation using the superconducting magnetic bearing”, 28th International Symposium on Superconductivity, 2015
  4. 松村知岳, “宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 LiteBIRDに向けた半波長板偏光変調器開発”, 日本物理学会 2015年秋季、2015年。
  5. T. Matsumura, “Polarization modulator for LiteBIRD”, B-mode from space at IPMU, 2015.
  6. 松村知岳, “インフレーション仮説探索のための半波長板を用いた連続回転偏光変調器の熱特性検討の現状について”, 日本物理学会 2016年春季、2016年。
  7. T. Matsumura, “Polarization modulator for LiteBIRD”, SPIE, 2016.
  8. T. Matsumura, “Estimation of the heat dissipation and the rotor temperature of superconducting magnetic bearing below 10 K”, Applied Superconductivity Conference, 2016.
  9. Y. Sakurai, “Vibrational characteristics of a superconducting magnetic bearing employed for a prototype polarization modulator” 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 2016, Tokyo, Japan, Dec. 2016
  10. Y. Sakurai, “Estimation of the heat dissipation and the rotor temperature of superconducting magnetic bearing below 10K”, Applied Superconductivity Conference 2016 (ASC2016), 2016, Denver, USA, Sep. 2016.
  11. 松村知岳, “インフレーション探索を目的とした宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のための超電導軸受を用いた偏光変調器実証器の開発現状”、低温工学・超電導学会、2017年度秋季。
  12. 松村知岳、“インフレーション探索を目的とした宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のための超電導磁気軸受開発の概要”, 低温工学・超電導学会、2017年度春季。
  13. 櫻井雄基、“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電導軸受の発熱特性”、第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD29 in 倉敷)、2017年。
  14. Y. Sakurai, “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 (PAS- REG 2017), Tokyo, Japan, Dec. 2017

15. T. Matsumura, “Development of a half-wave plate based polarization modulator unit for LiteBIRD”, Low Temperature Detector, 2017.

16. Y. Sakurai, “Design and thermal characteristics of a 400mm diameter levitating rotor in a superconducting magnetic bearing operating below at 10K for a CMB polarization experiment”, European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2017), Geneva, Switzerland, Sep. 2017.

17. 片山伸彦, “宇宙マイクロ波背景放射 Bモード偏光観測衛星LiteBIRDの偏光変調器の開発概要”、2017年秋季日本天文学会、2017年。

18. Y. Sakurai, “Development of a cryogenic remote sensing thermometer for CMB polarization experiment”, 29th IEEE International Symposium on Space TeraHerz Technology (ISSTT2018), Pasadena, USA, Mar. 2018

[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：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

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

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松村知岳 (MATSUMURA, Tomotake)  
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・  
特任准教授  
研究者番号：70625003

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

片山伸彦 (KATAYAMA, Nobuhiko)  
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授  
研究者番号：50290854

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

大崎博之 (OHSAKI, Hiroyuki)  
東京大学、大学院新領域創成科学研究科、  
教授  
研究者番号：10203754