

令和元年6月14日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05448

研究課題名(和文) 新世代断熱フィルターのコンビネーションで実現する高感度CMB偏光観測

研究課題名(英文) The observation of CMB polarization with the combination of the novel IR-filter

研究代表者

小栗 秀悟 (Oguri, Shugo)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：20751176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,800,000円

研究成果の概要(和文)：新開発の放射冷却式断熱フィルターRT-MLIを、GroundBIRD望遠鏡に組み込み、望遠鏡の性能向上を行なった。その結果、望遠鏡の窓から300Kの放射熱を導入した状態で、超伝導検出器を、0.20Kまで冷却できた。当初の目標は0.22Kであり、それをさらに20mK低温まで冷却することができた。望遠鏡の感度は、オランダ宇宙研究所からお借りした検出器を用いて評価し、目標とする感度を達成している事を確認した。期間内に観測開始までは至らなかったが、現在スペインの観測地にて測定の見込みを進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波望遠鏡は、「大型化」と「検出器の冷却」によって高感度化を実現する。しかし、大型化が進むと光を取り入れる窓からの熱流入が増加し、検出器の冷却が難しくなるため、この二つを高い次元で両立する技術が求められていた。本研究は、その技術を編み出し、本格的に応用した最初の例である。申請者が発明したRT-MLIの技術をCMB偏光観測装置に応用し、期待以上の断熱性を実現できた。この技術は他の電波望遠鏡にも容易に適用可能で、業界全体のブレークスルーをもたらすと期待している。

研究成果の概要(英文)：I improved the performance of the telescope for the CMB experiment, "GroundBIRD", by RT-MLI which I invented. RT-MLI is a new-type IR filter which is cooled by a similar principle to conventional multi-layer insulation. I success to cool down the super-conducting detector at 0.20 K with the optical loading from a 300-K black body. I also evaluated the performance of the telescope using a detector fabricated by SRON. I confirmed that GoundBIRD has enough performance to the original design. Now, GroundBIRD telescope is almost ready to start the observation in Spain.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：宇宙物理 CMB

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)に含まれる偏光信号は宇宙のはじまりを解明する重要な情報源である。Planck 等の衛星実験による無偏光信号の精密観測により、ビッグバン以後の宇宙は明らかになってきたが、それ以前の描像は未だ謎のままである。ビッグバン以前を説明する有力候補が佐藤勝彦氏らの提唱したインフレーション宇宙論である。その実証の鍵となるのが、インフレーション時に生成した原始重力波の観測である。CMB の偏光信号は、レーザー干渉計を用いた実験と並び、原始重力波を捉える最良のプロープとして期待を集める。原始重力波が引き起こす時空の歪みによって光子は局所的に等方性を失う。その異方性が生み出す偏光パターン「B モード」によってインフレーション宇宙の検証が可能となる。このホットな議論に決着をつける術のひとつが、広帯域にわたる B モードの空間スペクトル分析である。申請者が開発現場を主導する GroundBIRD 実験 (別予算) は広い領域を観測することでこの検証を目指す。

(2) CMB は 2.7K (室温の 1/100 程度!) の微弱な黒体放射である。熱放射に由来する環境ノイズを抑えるために、検出器の周りを冷却する。一方で、観測装置の性質上、CMB を導入するための窓を開ける必要がある。窓からの熱放射は検出器冷却の妨げになるため、サングラスのような断熱フィルターが必要になる。近年の観測装置の大口径化に伴い、断熱フィルター自体の冷却が問題となっていた。仮に断熱フィルターの温度が上昇すると、そのフィルターからの熱放射が検出器の冷却の妨げになる。高感度の観測装置の開発と次世代冷却フィルターの開発は表裏一体の関係である。

### 2. 研究の目的

従来と一線を画す新しい原理のフィルターのコンビネーションで高い次元での熱放射遮蔽を確立し、観測装置の高感度化を実現する。放射冷却式フィルターとガス対流冷却式フィルターの 2 種類のフィルターを、GroundBIRD 実験に組み込み、超伝導検出器感度を向上させる。具体的には、冷却温度を当初の予定の 250mK から 220mK まで改善させる。GroundBIRD 実験では、超伝導体としてアルミを使用しており、たった 30mK 程度でも 2 倍程度の感度向上が見込まれる。

この改良によって、より高感度な B モード空間スペクトルの観測を行い、原始重力波発見を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 従来の断熱フィルターは、放射熱を吸収し、フィルターの縁から排熱をする手法が主流であった。しかし、この手法ではフィルターの中央から縁にかけて熱勾配が発生してしまい、十分にフィルターの冷却ができない、という問題を抱えていた。そこで申請者は、縁から排熱するのではなく熱放射として再度打ち返す RT-MLI という技術を発明し、それを適用することで望遠鏡の高感度化を行った。別予算で開発が進められている GroundBIRD 望遠鏡にこの技術を導入した。当初の予定では、この技術をさらに発展させ、ヘリウムガスによってフィルターを冷却する技術を確認する予定であった。しかし、ヘリウムを保持したまま冷却可能な容器の開発が難航する一方で、RT-MLI と商用のメタルメッシュフィルターを組み合わせる運用方法を工夫することで期待以上の断熱効果が得られたため、この手法で望遠鏡を改良することに決めた。

(2) GroundBIRD 望遠鏡の 40K シールドと 4K シールドに設けられているパツフルに、RT-MLI とメタルメッシュフィルターを導入した。RT-MLI は多層の断熱材で段階的に放射熱を跳ね返すため、フィルターの縁から迂回して放射熱が侵入すると性能が落ちる。そこで、RT-MLI の側面、および、メタルメッシュフィルターとの間を完全に遮光した。逆に RT-MLI は熱伝導の悪い物質で構成されているため、フィルター間の接触は問題にならない。この工夫を行い、窓から 300K の熱放射を導入した状態で、何 K まで検出器が冷却可能かを測定した。



図 1: RT-MLI のインストール。側面をアルミテープで遮光することで、期待以上の効果を得ることができた。

(3) 新しい断熱フィルターを導入した状態で、望遠鏡の感度評価を行った。検出器は、オランダ宇宙研究所 (SRON) からお借りしたものをを用いて評価した。クライオスタットの上に液体窒素で冷やした黒体を設置して擬似的な 77K の空を作り、その空と窓の間にスタイロフォームを入れることで、検出器に入る強度を調整した。その調整に対する応答の変化から検出器の応答感度を計算し、白色雑音のノイズレベルがどの程度であるかを評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 検出器の冷却

GroundBIRD 望遠鏡は、ソーブション冷凍機を用いて検出器の冷却を行う。使用している冷凍機は He4/He3/He3 の三段のステージで構成され、 $3\mu\text{W}$  の熱負荷の条件で  $0.25\text{K}$  の温度を維持する性能を持つ。本研究以前の計画では、放射熱による熱負荷は  $3\mu\text{W}$  程度で、この温度に到達することを目標にしていた。

本研究による断熱材を施した結果、冷却温度を  $0.20\text{K}$  まで下げることに成功した。ソーブション冷凍機の冷却能力から算出すると、熱流入量は  $0.1\mu\text{W}$  程度以下であり、非常に高い断熱性能が実現できていることが確認できた。

(2) SRON の検出器を用いて、光に対する応答性とノイズレベルを比較した結果、GroundBIRD 望遠鏡の目標とする白色雑音レベル  $2.4 \times 10^{-16} [\text{W} / \sqrt{\text{Hz}}]$  を下回っていることを確認した。SRON の検出器は別の用途用に作成したものを借りているため、望遠鏡の光学フィルターの透過する周波数と一致していない。現在開発中の検出器を乗せることで、さらなる高感度化が期待できる。

(3) 検出器が外の光源を検出できるかの確認も行った。望遠鏡の設置している実験ホールの天井の水銀灯を点光源とし、望遠鏡を動かして、「点」として観測できるかを確認した。また、望遠鏡の角度分解能が、設計値と比較してほぼ一致していることを確認した。

(4) 国内での望遠鏡開発を終了し、観測地スペインへ輸送して、観測準備を進めている。期間内に CMB の観測開始までは至らなかったが、観測開始に向けての最終準備までこぎつけた。

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計7件)

T. Nagasaki, S. Oguri *et al.*, GroundBIRD - observation of CMB polarization with a high-speed scanning and MKIDs, J. Low Temperature Phys., 査読有, Vol.193, 2018, 1066-1074.

DOI: 10.1007/s10909-018-2036-7

H. Kutsuma, S. Oguri *et al.*, Optimization of geomagnetic shielding for MKIDs mounted on rotating cryostat, J. Low Temperature Phys., 査読有, Vol.193, 2018, 203-208.

DOI: 10.1007/s10909-018-2077-y

J. Choi, S. Oguri *et al.*, Status of the GroundBIRD Telescope, EPJ Web of Conferences, 査読無, Vol.168, 2018, 01014.

DOI: 10.1051/epjconf/201816801014

H. Watanabe, S. Oguri *et al.*, Development of an Optical Coupling with Ground-Side Absorption for Antenna-Coupled Kinetic Inductance Detectors, IEICE TRANSACTIONS on Electronics, 査読有, Vol.E100-C, 2017, 298-304.

DOI: 10.1587/transele.E100.C.298

S. Oguri *et al.*, GroundBIRD: Observing Cosmic Microwave Polarization at Large Angular Scale with Kinetic Inductance Detectors and High-Speed Rotating Telescope, J. Low Temp. Phys., 査読有, Vol.184, 2016, 786-792.

DOI: 10.1007/s10909-015-1420-9

N. Tomita, S. Oguri *et al.*, World's Cheapest Readout Electronics for Kinetic Inductance Detector by Using RedPitaya, J. Low Temp. Phys., 査読有, Vol.184, 2016, 443-448.

DOI: 10.1007/s10909-016-1485-0

H. Ishitsuka, S. Oguri *et al.*, Front-End Electronics for the Array Readout of a Microwave Kinetic Inductance Detector Towards Observation of Cosmic Microwave Background Polarization, J. Low Temp. Phys., 査読有, Vol.184, 2016, 424-430.

DOI: 10.1007/s10909-015-1467-7

##### [学会発表](計12件)

小栗秀悟, 第6回RAPシンポジウム, 理研・和光, 2018年11月,

「超伝導検出器搭載の望遠鏡を用いた宇宙マイクロ波背景放射の精密観測」(口頭)

小栗秀悟, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大, 2018年3月,

「GroundBIRD 望遠鏡の観測に向けた超伝導検出器 MKID のノイズ対策」(口頭)

小栗秀悟, 第18回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ・第4回理研 NICT 合同テラヘルツワークショップ, 国立天文台, 2018年2月,

「高速回転変調と MKID による CMB 地上観測実験 "GroundBIRD"」(口頭)

小栗秀悟, 第18回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ・第4回理研 NICT 合同テラヘルツワークショップ, 国立天文台, 2018年2月, 「電波観測装置を用いた暗黒光子探索」(ポ

スター)

Shugo Oguri, 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, Kurume, Japan, 2017年7月, "Search for hidden photon cold dark matter using radio telescopes", (口頭)

小栗秀悟, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大, 2017年3月, 「GroundBIRD 望遠鏡での検出器読み出しの評価」(口頭)

小栗秀悟, TIA かけはし・ブレインストーミング研究会, NIMS, つくば, 2017年1月, 「室温エレクトロニクス・安い KID 読み出し装置」, (招待講演)

小栗秀悟, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 23aSR-5, 宮崎大, 2016 年 9 月, 「GroundBIRD 望遠鏡での焦点面構造体の開発」(口頭)

Shugo Oguri, SPIE. ASTRONOMICAL TELESCOPES + INSTRUMENTATION, Edinburgh, UK, 2016 年 6 月, "GroundBIRD: observation of CMB polarization with fast scan modulation and MKIDs" (ポスター)

小栗秀悟, 日本物理学会第71回年次大会, 19pAS-9, 東北学院大, 2016年3月, 「GroundBIRD 搭載用超伝導検出器 MKID アレイのデザイン設計」(口頭)

小栗秀悟, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 25aSK-1, 大阪市大, 2015 年 9 月, 「GroundBIRD 実験用超伝導検出器 MKID の光学測定試験」(口頭)

Shugo Oguri, 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, Grenoble, France, 2015 年 7 月, "GroundBIRD - observation of CMB polarization at large angular scales with a combination of MKID arrays and a high-speed rotating telescope" (ポスター)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 1 件)

名称：電波測定装置  
発明者：田島治, 小栗秀悟  
権利者：大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
種類：特許  
番号：第 6029079  
取得年：2016 年  
国内外の別：国内

〔その他〕

アウトリーチ活動

宇宙最古の光を追え!CMB チャンネルで宇宙誕生の瞬間に迫る, KEK サイエンスカフェ, つくば, 2016 年 4 月.

## 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。