

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684017

研究課題名(和文)ビッグバン以前の宇宙を探る科学衛星に向けた小型地上観測実験GroundBIRD

研究課題名(英文)GroundBIRD - pioneer experiment towards satellite mission to understand begin of the universe

研究代表者

田島 治 (Tajima, Osamu)

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・准教授

研究者番号：80391704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,900,000円、(間接経費) 5,970,000円

研究成果の概要(和文)：インフレーション宇宙論が予言する、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光の渦パターンの観測を目指す実験装置GroundBIRDの開発を行った。その信号は本研究採択時には未発見であったが、平成26年3月に米国BICEP2実験によって「らしき信号」の発見が報告され、その観測の重要性が急激に高まった。この信号をインフレーション起源と決定づけるためには、従来の1.0倍もの広い領域の観測を実現することが必須である。本研究により、2つの世界初「回転系での0.23ケルビン到達」、「黒体偏光をつかった超伝導検出器の較正」を達成できた。これらは広い領域の観測を実現するための重要なマイルストーン達成である。

研究成果の概要(英文)：We have developed CMB (cosmic microwave background radiation) telescope "GroundBIRD" which aims to detect a signal from the inflationary universe. Discovery of the signal was claimed by the BICEP2 experiment while it was not discovered when we accepted this grant program. An importance of the GroundBIRD became high because our large-sky coverage (about 10 times larger than others) will probe the ever-presence of the primordial gravitational waves which is the source of the signal. Two important key technologies were established: achievement of 0.23 Kelvin condition on the high-speed rotation system at 20 revolution per minute, and pseudo-observation of CMB polarization by using superconducting detectors in the laboratory. We achieved milestones to achieve the large-sky coverage from the ground.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：インフレーション 原始重力波 CMB偏光観測 超伝導検出器

1. 研究開始当初の背景

最近 20 年間の宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 観測の目覚ましい成果により、ビッグバン宇宙論はたしかなものとなったが、全ての観測事実を説明するには至っていない。それらを説明するのが、「ビッグバン以前の宇宙を記述するインフレーション宇宙論」である。インフレーション宇宙論の決定的な証拠が、CMB の偏光成分にあらわれる B モードと呼ばれる特徴的なパリティ負の渦パターンであり、いまだ未発見である。図 1 に示すように B モードの検出を目指した CMB 偏光の地上観測実験が、欧米を中心に積極的に進められている。

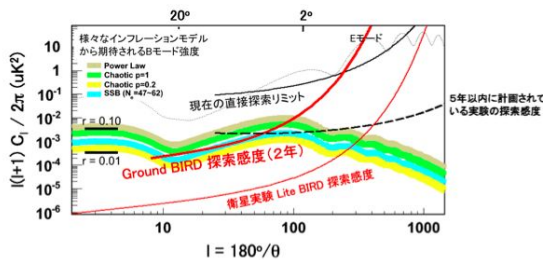


図 1 GroundBIRD および他の実験の B モード探索感度。B モードの強度は r というパラメータでスケールされ、多くのモデルが $r=0.01\sim 0.1$ 程度の強度を期待している。横軸は角度スケールの逆数に比例する量 $l = 180^\circ / \theta$ 。

2. 研究の目的

今後 5 年の間に地上実験で、いくつかのインフレーションモデルが示唆する強度の B モードが探索可能になる見込みがある。しかしながら、全ての有力なインフレーションモデルを網羅し、B モード初検出後も詳細にインフレーションモデルの研究を行うには、科学衛星による大気の影響のない宇宙空間での観測実験が重要となる。衛星に搭載可能な観測器を作り上げるには、そのプロトタイプ装置での性能実証が必須となる。それが本研究のテーマ、小型地上観測実験 GroundBIRD の開発である。

GroundBIRD が将来的に達成する成果は装置の性能実証にとどまらない。ユニークな実験アイデアにより、他の実験を凌駕する B モード探索感度を実現する。特に、高速回転スキャンは、検出器性能を 100%引き出すだけでなく、地上実験最大の観測領域を実現する。図 2 より、GroundBIRD の観測領域の広さは他の実験と比較して圧倒的であることがわかる。地上実験でここまで広い領域を観測した例はこれまでにない。GroundBIRD のような最新検出器を用いる実験では、狭い領域を重点的に観測するよりも観測領域を広げるほうが B モード探索感度を飛躍的に向上できる (図 3)。現行実験が数多く行われているチリ・アタカマ高地(大気が薄く、乾

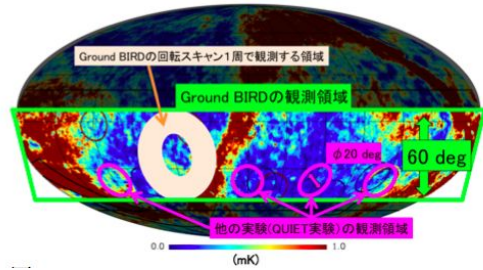


図 2. GroundBIRD と従来実験の観測領域の全天マップ上での比較。大きなドーナツ領域は GroundBIRD の回転スキャン一周で観測する領域を表す。このドーナツ領域が地球の時点と共に並行移動して、全天の 1/3 もの広大な観測領域を実現する。

燥した場所)での観測により、他の実験が探索できない大角度スケールにおいて抜群の探索感度を達成できる(図 1)。仮に B モードの強度が大きかった場合($r \sim 0.1$)、他の実験とは異なった角度スケールの情報がえられるので、インフレーションモデルの研究に多大なる貢献を果たす。(研究期間終了直前に米国 BICEP2 実験によって、その信号らしきものの発見が報告された。発見された信号強度は $r \sim 0.2$ である。それゆえ、本課題に続く研究が今後にもたらす重要性がますます高まっている。)

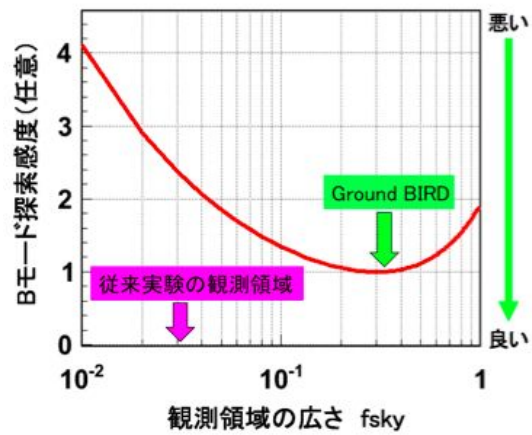


図 3. B モード探索感度と観測領域の関係。全天観測は $fsky = 1$ となる。ここでは、 $r = 0.10$ を仮定している。

この将来目標にむけて、本研究では個々の要素技術を確認し、それらを統合化した試験を行う。

3. 研究の方法

GroundBIRD は独自のアイデアで、小型ながらも従来実験を凌駕する性能を達成する。特に、高速回転スキャンの実現により、大気の影響 ($1/f$ ノイズ) を除去して検出器性能を 100%引き出し、地上実験最大の観測領域を達成する。

実験装置をユニット化することにより効率的に開発を進める。本研究では実験成功の鍵となる高速回転スキャンユニットの開発を中心に開発をすすめ、続いて、コンパクトに検出器を実装するクライオスタートユニットの開発、検出器校正ユニットの開発をおこなう。最終的に、個々のユニットを統合した試験を行い、装置の完成度を評価する。

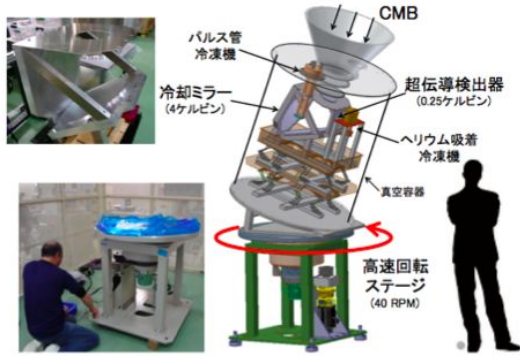


図 4. GroundBIRD の外観イメージ図 (右) とそのプロトタイプミラー、高速回転ステージの写真 (左)。ミラーやステージは本科研費によって開発された。

図 4 に観測装置の全体図を示す。直径 40 cm のミラーを 4 K まで冷却する。CMB 偏光信号はミラーで反射 (集光) されて、焦点面上超伝導検出器で測定される。ミラーを冷却することにより、検出器の冷却が容易になり、システム全体がコンパクトにまとめることが出来る。さらにはミラーの熱放射の影響も無視できるほど小さくなるため、検出器性能を 30% 向上できる。

高速回転スキャン (30RPM) を実現する。これにより検出器ベースラインを揺るがす巨大な $1/f$ ノイズの影響を完全に除去できる。図 5 に示すように、GroundBIRD は従来実験よりも実効的 2 倍以上の感度を達成する。これは小型化を追求したことにより採用できる技術である。

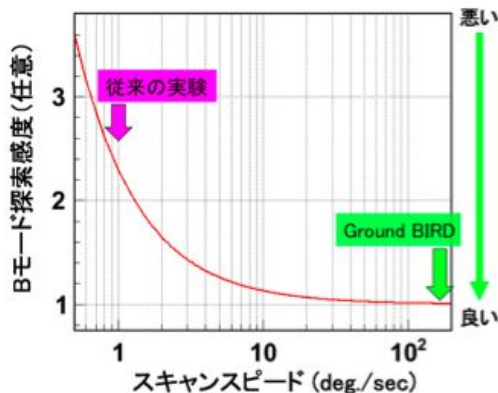


図 5. Bモード探索感度とスキャンスピードの相対関係 ($1/f$ knee 100mHz, $l = 50$) $1/f$ ノイズの影響を取り除くには、高速なスキャンスピードが要求される。

B モードの測定は系統誤差との戦いである。検出器の偏光特性の校正が最重要課題となる。偏光は強度と角度の 2 つの自由度を持つ。研究代表者が考案し、QUIET 実験において高い実績のある「まばらな」ワイヤーグリッドを用いて校正を行なう。ワイヤーで反射された周辺温度の一部が、非常に一様で安定な偏光シグナルとなる。QUIET 実験での実績をもとに見積もると、長さ 5 m のワイヤーの末端を 2cm 程度の精度でアライメントすることにより、偏光強度の相対応答性と偏光角度を十分な精度で校正できる見込みである (図 6)。

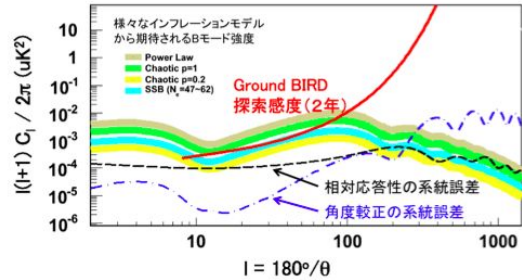


図 6. 「まばらな」ワイヤーグリッドによる校正で達成される系統誤差のシミュレーション。十分に小さい系統誤差を達成する見込みである。

4. 研究成果

2 つの世界初「回転系での 0.23 ケルビンへの到達」、「(実験室内で) 超伝導検出器をつかった「模擬 CMB 偏光」観測」を実現した。前者は高速回転スキャンユニットとクライオスタートユニットの統合試験、後者は検出器と校正ユニットの統合試験の達成に相当する。

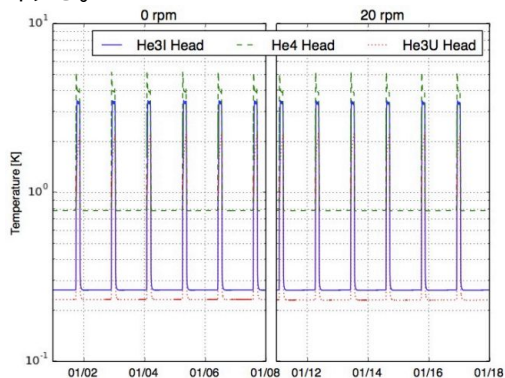


図 7. パルス管冷凍機とヘリウムソーブション冷凍機を連続運転した試験結果: 無回転時 (0 rpm) と高速回転時 (20 rpm)。到達温度 (He3U Head: 0.23 ケルビン)、低温保持時間 (24 時間以上) 共にカタログ仕様を満たすことを確認した。高速回転スキャンの実現可能性とその安定性を示した。

図7に、高速回転ステージ上での冷凍機の性能試験結果を示す。到達温度、保持時間共にカタログ仕様を満たすことを確認した。一方、ヘリウムソープション冷凍機は定期的により充電操作というものを必要とする。本観測時には、高速回転を維持したままこれを行えることが望ましい。本観測を想定した自動リチャージ試験を行い成功した(図7の定期的な温度の上り下がりが見られる)。

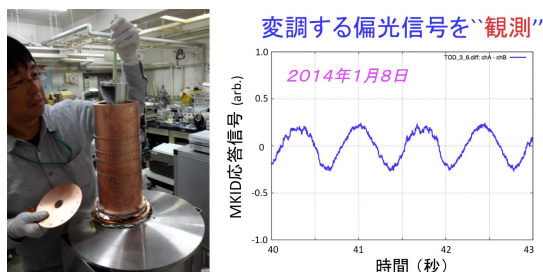


図8. CMB 偏光観測シミュレーター(左写真)とそれを使った模擬観測結果(右図)。超伝導検出器で変調する偏光信号を観測していることがわかる。

図8に、実験室内での模擬CMB偏光の観測試験装置とその観測結果を示す。超伝導検出器を使って、変調をかけた偏光信号を測定できていることがわかる。このような「CMB偏光観測シミュレーター」を使っている超伝導検出器の試験は世界初の試みであったが、これを達成した。

以上、本研究により「これまでにない広い領域の観測」を実現する実験装置 GroundBIRDの要となるキーテクノロジーを完成させた。

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) ``GroundBIRD Experiment - Detecting CMB polarization Power in a Large Angular Scale from the Ground'', S. Oguri, J. Choi, O. Tajima, M. Hazumi, E. Won, M. Yoshida, M. Kawai, J. Low Temp. Phys., Published Online 28, February, 1 - 7 (2014). DOI: 10.1007/s10909-014-1138-0, 査読あり
- (2) ``Calibration System with Modulated Polarization Source for Superconducting Detectors at 0.1 K'', K. Takahashi, S. Mima, S. Oguri, C. Otani, O. Tajima, H. Watanabe, M. Yoshida, J. Low Temp. Phys., Published Online 23, February, 1 - 7 (2014). DOI:10.1007/s10909-013-1054-8, 査読あり
- (3) ``Radio-transparent multi-layer insulation for radiowave receivers'', J. Choi, H. Ishitsuka, S. Mima, S. Oguri, K. Takahashi, and O. Tajima, Rev. Sci. Instrum., 84, 114502, 1 - 6 (2013). DOI: 10.1063/1.4827081, 査読あり
- (4) ``Cryogenic cooling with cryocooler on a rotating system'', S. Oguri, J. Choi, M. Kawai, and O. Tajima, Rev. Sci. Instrum. 84, 055116, 1 - 5 (2013). DOI: 10.1063/1.4807750, 査読あり
- (5) ``The Q/U Imaging Experiment Instrument'', QUIET Collaboration: C. Bischoff, O. Tajima (47番目), 他52名 (アルファベット順表記), Astrophys. J. 768, 9, 1 - 28 (2013). DOI: 10.1088/0004-637X/768/1/9, 査読あり
- (6) ``Second Season QUIET Observations: Measurements of the CMB Polarization Power Spectrum at 95 GHz'', QUIET Collaboration: D. Araujo, O. Tajima (48番目), 他49名 (アルファベット順表記), Astrophys. J. 760, 145, 1 - 10 (2013). DOI: 10.1088/0004-637X/760/2/145, 査読あり
- (7) ``GroundBIRD: an experiment for CMB polarization measurements at a large angular scale from the ground'', O. Tajima, J. Choi, M. Hazumi, H. Ishitsuka, M. Kawai, and M. Yoshida, Proc. SPIE 8452, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI, 84521M, 1 - 9 (2012). DOI: 10.1117/12.925816, 査読なし
- (8) ``Novel Calibration System with Sparse Wires for CMB Polarization Receivers'', O. Tajima, H. Nguyen, C. Bischoff, A. Brizius, I. Buder, A. Kusaka, J. Low Temp. Phys., 167, 936 - 942 (2012). DOI: 10.1007/s10909-012-0545-3, 査読あり
- (9) ``Ethernet-Based DAQ System for QUIET-II Detectors'', M. Nagai, K. Ishidoshiro, T. Higuchi, M. Ikeno, M. Hasegawa, M. Hazumi, O. Tajima, M. Tanaka and T. Uchida, J. Low Temp. Phys., 167, 689 - 694 (2012). DOI: 10.1007/s10909-012-0561-3, 査読あり
- (10) ``Innovative Demodulation Scheme for Coherent Detectors in CMB Experiments'', K. Ishidoshiro, Y. Chinoue, M. Hasegawa, M. Hazumi, M. Nagai, O. Tajima, Rev. Sci. Instrum. 83, 056104, 1 - 3 (2012). DOI: 10.1063/1.4719922, 査読あり

- (11) ``Readout system with on-board demodulation for CMB polarization experiments using coherent polarimeter arrays'', K. Ishidoshiro, M. Nagai, T. Higuchi, M. Hasegawa, M. Hazumi, M. Ikeno, O. Tajima, M. Tanaka, T. Uchida, IEEE Trans. Nucl. Sci., 59 (3 Part 2), 647 - 655 (2012). DOI: 10.1109/TNS.2012.2195029, 査読あり
- (12) ``Calibration System with Cryogenically-Cooled Loads for CMB Polarization Detector'', M. Hasegawa, O. Tajima, Y. Chinone, M. Hazumi, K. Ishidoshiro, M. Nagai, Rev. Sci. Instrum. 82, 054501 (2011). DOI: 10.1063/1.3590931, 査読あり
- (13) ``First Season QUIET Observations: Measurements of CMB Polarization Power Spectra at 43 GHz in the Multipole Range $25 \leq l \leq 475$ '', QUIET Collaboration, C. Bischoff, O. Tajima, Astrophys. J. 741, 111 (2011). DOI: 10.1088/0004-637X/741/2/111, 査読あり

〔学会発表〕(計 13 件)

- (1) 石塚光, 「ヘリウム吸着式冷凍機の簡易制御装置の開発」, 日本物理学会年会 (東海大学), 2014 年 3 月 29 日.
- (2) 小栗秀悟, 「CMB 偏光観測装置 GroundBIRD における焦点面の熱・構造設計」, 日本物理学会年会 (東海大学), 2014 年 3 月 27 日.
- (3) Jihoon Choi, ``Simulation Study of GroundBIRD Optics'', 日本物理学会年会 (東海大学), 2014 年 3 月 27 日.
- (4) 美馬覚, 「CMB 観測用 MKID アレイの黒体偏光に対する応答性評価」, 日本物理学会年会 (東海大学), 2014 年 3 月 27 日.
- (5) 高橋研太, 「CMB 偏光観測用超伝導検出器の較正装置の開発」, 日本物理学会秋季大会 (高知大学), 2013 年 9 月 21 日.
- (6) 小栗秀悟, 「CMB 偏光観測装置 GroundBIRD の冷却システムと構造設計」, 日本物理学会秋季大会 (高知大学), 2013 年 9 月 21 日.
- (7) Jihoon Choi, ``Beam profile measurement system for GroundBIRD'', 日本物理学会秋季大会 (高知大学), 2013 年 9 月 21 日.
- (8) 田島治, 「受信器の大口径化にむけた電波透過性多層断熱材の開発」, 日本天文学会年会 (東北大学), 2013 年 9 月 11 日.
- (9) S. Oguri, ``GroundBIRD - a novel CMB polarization telescope for the

inflation with a high-speed rotation system'' (ポスター発表), The 12th Asia Pacific Physics Conference (日本・幕張), 2013 年 7 月 15 日

- (10) S. Oguri, ``GroundBIRD Experiment - Detecting CMB Polarization Power in a Large Angular Scale from the Ground'', 15th International Conference on Low Temperature Detectors (米国・パサディナ), 2013 年 6 月 27 日.
- (11) O. Tajima, ``Cryocooling system on a high-speed rotating stage'' (ポスター発表), 15th International Conference on Low Temperature Detectors (米国・パサディナ), 2013 年 6 月 28 日.
- (12) O. Tajima, ``GroundBIRD Experiment'', International Conference on Cosmic Microwave Background (日本・沖縄), 2013 年 6 月 13 日(招待講演)
- (13) O. Tajima, ``QUIET'', International Conference on Cosmic Microwave Background (日本・沖縄), 2013 年 6 月 10 日(招待講演)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 電波測定装置
 発明者: 田島治, 小栗秀悟
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特願 2013-116571
 出願年月日: 2013 年 6 月 3 日
 国内外の別: 国内

名称: 連続回転系で極低温を実現する装置
 発明者: 田島治
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特願 2013-027675
 出願年月日: 2013 年 2 月 15 日
 国内外の別: 国内および国外 (米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田島 治 (Osamu Tajima)
 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・准教授
 研究者番号: 80391704