

平成30年6月6日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247045

研究課題名(和文) CMB偏光の広視野観測にむけた高速回転望遠鏡の開発 インフレーション宇宙への挑戦

研究課題名(英文) Development of CMB telescope with high-speed rotating scan modulation - quest for the cosmic inflation

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) 31,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙初期のビッグバンは「インフレーション」と呼ばれる時空の加速膨張を源にするという説が有力である。その決定的な証拠である原始重力波は、宇宙背景放射(CMB)偏光の大角度スケール渦パターン「原始重力波Bモード」として観測できるが、まだ検出されていない。本研究では、この原始重力波Bモードの測定に特化した高速回転望遠鏡「GroundBIRD」の開発研究を行った。高速回転スキャンをはじめとする独創的な技術を駆使した望遠鏡の開発に成功し、試作した超伝導検出器を搭載した評価試験を実験室内にて行なった。今後、超伝導検出器アレイを量産したうえで、本実験へむけた海外観測サイトへの移設準備が整った。

研究成果の概要(英文)：The cosmic inflation is a leading hypothesis to generate the Big-Bang, super high density and super hot era at the early stage of the universe. Its accelerated expansion of space-time metric generated the primordial gravitational waves as well as the Big-Bang. Cosmic Microwave Background radiation (CMB), in particular its asymmetric component of polarization patterns "B-mode", is the smoking gun evidence for the primordial gravitational waves. This primordial B-mode has not been observed yet.

We developed a CMB telescope "GroundBIRD" which aims for the primordial B-mode. This telescope implements unique technologies: high-speed rotating scan modulation, cold optics, and cutting-edge superconducting detector. This grant focused on developments for systems for high-speed scan and cold optics. We established the technology to operate superconducting detectors on such an unique operation condition.

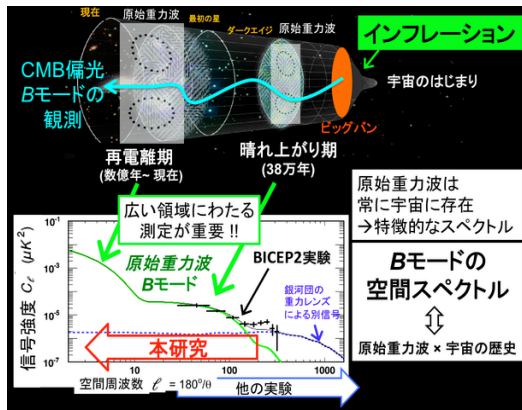
研究分野：宇宙・素粒子物理学

キーワード：宇宙背景放射 インフレーション 超伝導検出器

1. 研究開始当初の背景

宇宙初期のビッグバン(高温・高密度状態)は「インフレーション」と呼ばれる時空の加速膨張を源にするとする説が有力であるが、その決定的検証には至っていない。そして、インフレーションの最も重要な予言が原始重力波の存在であり、その最良のプロブが宇宙背景放射(CMB)偏光に現れる大角度スケール渦パターン「原始重力波 Bモード」である。特に、研究開始直前 2014 年 3 月に米国の BICEP2 実験は Bモード信号の兆候の発見を報告したが、Planck 衛星の観測により銀河ダストの影響が大きいことが明らかとなり、発見の是非は依然として未決着である。そして、その決着をつけるステップとして、広い領域の観測「空間スペクトル測定」が切望されている。なお、Planck 衛星実験は偏光観測に特化されていないため、Bモード発見に関する感度は不十分である。

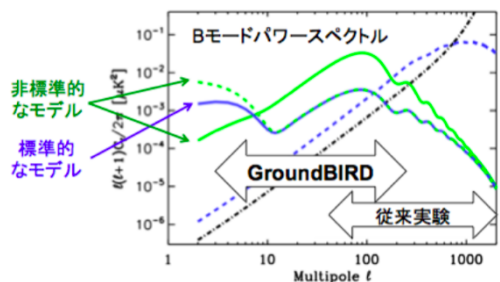
この現状を打破する実験計画が GroundBIRD (以後 GB) である。



2. 研究の目的

GB は広い領域にわたって地上から CMB 偏光を観測する実験計画である。本研究はその望遠鏡の開発を行う。

広い領域の「空間スペクトル測定」に加えて、複数の周波数帯域で観測を行うことにより CMB とダストを切り分ける観測を実現する。インフレーション宇宙論には数多くのモデルが提案されているが、真のモデル選定には空間スペクトル測定が必須である。従来の地上実験では得られない測定を実現することを目指す。この点を実現することにより、例えば“現在の宇宙の前”にも宇宙が存在し、それが一旦収縮した後現宇宙を形作ったというような再帰的宇宙モデルの可否の検



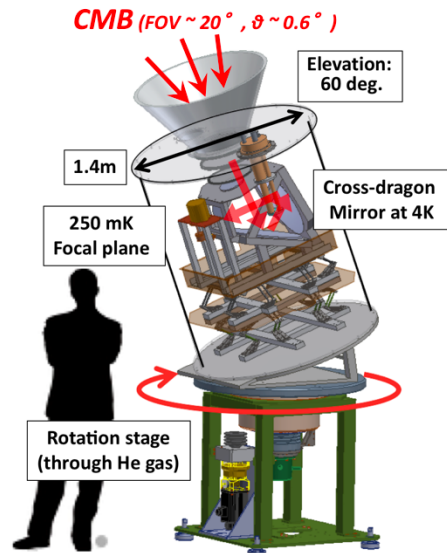
証が出来る。このように、本研究は単に研究の進展のみならず人類の宇宙観をも左右し、その社会的インパクトは極めて大きい。

日本独自の技術を実装した初の国産実験でもあることも本研究の重大な意義のひとつである。従来実験では大気揺らぎのため、地上からの広視野 CMB 観測は不可能とされてきたが、本研究はそのような常識を大きく覆す意義をもつ。このような実験は GB 実験を除くと衛星実験でなければ実現できず、より高感度な将来の衛星実験の先駆けとなる。また、本研究は北天を観測するので、主要な他実験(全てが南天を観測)と相補的な成果(例えば宇宙の異方性の検証など)をもたらす。本研究を基盤として、将来的に 2 台目の GB による南天観測を追加して全天観測を実現できれば、さらなる発展が期待される。

さらに、本研究で得られる科学的知見は、インフレーション宇宙論の検証にとどまらない。Bモード観測から得られるインフレーションのポテンシャルエネルギーは、素粒子大統一理論と同程度のスケールと見込まれている。これらの全く独立に構築された宇宙と素粒子の 2 大理論が、同じスケールを予言することは驚くべきことである。本研究は、この活発に議論されている課題「2 大理論のあまりにも出来すぎた偶然」に対しても、知見を与える実験となる。

3. 研究の方法

広範囲にわたる Bモード空間スペクトル測定を将来観測で実現する。そのための望遠鏡開発を 3 つのユニークなアイデアを駆使して行う。望遠鏡デザインの概念図を下記に示す。超伝導偏光検出器を搭載した受信機を天頂角方向から  $35^\circ$  傾けて回転ステージ上に搭載し、ステージの回転によって天頂を中心にドーナツ型に空を掃く。その掃走領域が地球の自転と共にまわることにより、全天の約半分もの観測領域を達成する(従来実験の約 25 倍!)。観測はカナリア諸島ティデ観測所



(高度 2,400m)にて行うことを想定している。同観測所は天候が極めて安定しており仰角 40° 以上の視界に雲がかかる事が稀なため、広領域観測に最適のサイトである。また、電気・水道・コンクリート基礎等のインフラが非常に充実しており、迅速に観測を開始できる。

#### (1) 高速回転スキャン変調

検出器応答に存在するベースラインゆらぎによって測定効率が低減する問題がどの実験にも存在する。そのため、従来実験では広い観測領域を実現することは極めて難しかった。本研究では、観測視野を高速回転するスキャン変調でその影響を取り除く。この従来実験よりも桁違いにはやい変調は、連続回転系での冷凍機運転という特許技術によって実現された。本グループがその技術を発明し市販化もされた。研究開始当初には BICEP2 実験のアップグレードへの実装も検討されており、国内外で評価の高い技術である。

#### (2) 複数帯域

天体由来の系統誤差「前景放射」の理解・除去が重要である。本研究では、GB の 2 周波数帯によって CMB とダスト成分を切り分ける。

#### (3) 極低温工学系と最先端超伝導計測

CMB はミラーで集光された後に検出器で測定するが、従来の地上実験ではミラーの熱放射が無視できないノイズ源となっていた。そこで本研究では、ミラーも冷却して熱放射由来のノイズを除去する。また、ミラー冷却によって焦点面の冷却能力も向上するため、最先端の超伝導検出器 MKID の搭載が容易となる。この組み合わせにより、高感度での観測実験を実現する。

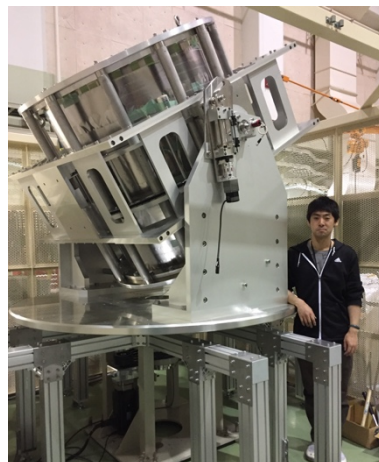
### 4. 研究成果

#### 【望遠鏡の製作】

GB 望遠鏡構造体の主たる開発要素は、集光ミラーと検出器、それら冷却する機械式冷凍機を組み込んだ「受信機」と、それを搭載し高速スキャンを実現する「回転機構」であった。その開発を並行して進め、それらを統合した望遠鏡システムを構築し、冷却試験において目標温度 250 mK 以下での 24 時間以上の保持を確認した。実際の観測では回転型望遠鏡の視野の安定性も重要である。特に、受信機（総重量 500 kg 以上）を 30° 傾けた状態で 20 rpm もの高速で回転させる事は前例のない世界初のチャレンジであった。徹底的なアライメントにより回転軸の不安定性を徹底抑制した上で、3 次元加速度計を使った評価実験で回転速度に関係なく望遠鏡の角度分解能 (0.5°) より十分小さいことを確認した。

一方、超伝導検出器 MKID は超高感度であるがゆえに、外部磁場の変動にも敏感である。高速回転スキャンと高感度の維持を両立するためには、MKID が感じる地磁気の変動を抑制する「磁気シールド」の開発が必須であっ

た。そこで、MKID に対して外部磁場を変調印加する評価装置を開発して、磁場に対する応答性の定量評価を世界で初めて行った。その結果にもとづき磁気シールドを設計した。



#### 【超伝導検出器アレイの開発】

CMB の偏光成分は無偏光成分より 5 桁以上微弱であり、同一ピクセルで検出した縦偏光アンテナ信号と横偏光アンテナ信号を引き算して装置に漏れ込んだ無偏光成分を精度よく差し引く。しかしながら、MKID における同技術は国内では確立していなかったため、光学ホーンと超伝導線のミリ波回路を新規に設計した。超伝導ミリ波回路・MKID・読み出し線は、シリコン基板上にフォトリソグラフィで回路パターンを作製する。試作検出器の作製を理研と国立天文台のクリーンルームを組み合わせで行なった。



#### 【読み出しシステムの構築】

MKID は最新の超伝導計測技術であるため、信号読み出しに用いるエレクトロニクス・ソフトウェアともに世界的にみても開発途上期にある。特に、CMB 観測実験への MKID の利用は世界初の取り組みであり、長期観測に耐えうる高い信頼性が要求される。この目的のため、本研究では市販の FPGA デジタルボードに独自開発のアナログボード (RHEA と命名) を組み合わせたハイブリッドシステムを採用して、機能性と信頼性の両立を図った。RHEA は 200MHz のクロックと DAC/ADC から構成されるアナログボードであり、高エネ研の先端計測技術オープンソースコンソーシアム Open-It を活用して設計・製作することで

安価で汎用性の高いボードを実現した。システムはコンピュータとLAN接続しており、高い利便性を確保している。さらに、多重読み出し信号を適切な処理のために、CUIベースのソフトウェアに加えてユーザーフレンドリーなGUIベースのソフトウェアも開発した。これによって、毎秒1kサンプル、deadtimeなしでの多素子リアルタイム測定に成功した。また、複数の周波数を同時に読みだせるという特徴を活かしたノイズ低減手法も開発し、大領域観測に必須となる1/fノイズの低減にも成功した。



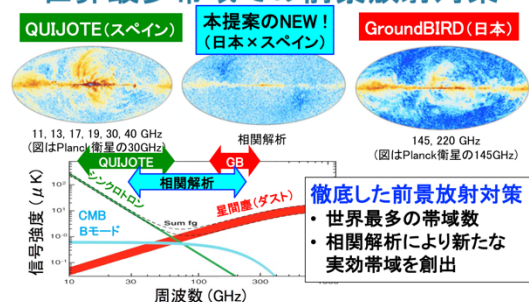
### 【統合試験】

以上の要素技術を組み合わせた統合試験を現在進めている。観測状況を模擬した環境下でノイズスペクトル測定や宇宙線イベントによる時定数測定などを行い、雑音等価感度  $NEP=2 \times 10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{kHz}$  を実現した。また、実際の観測に向けて1時間連続観測のシミュレーションも開始し、統合試験で取得した実ノイズデータを含めたシミュレーションを行うソフトウェアも試作開発した。

### 【前景放射対策】

前述のように、天体由来の系統誤差「前景放射」の理解・除去が重要である。その成分は銀河のシンクロトロン放射とダスト放射に大別され、CMBとは異なる周波数依存性を持つ。GBの2周波数帯による観測と現地で観測中の別実験 QUIJOTE のデータを統合して、CMB、ダスト成分、シンクロトロン成分を切り分ける協力研究を行うことにした。複数周波数帯データの相互相関によって実効的に帯域数も増すため、世界最多の帯域をカバーするロバストな前景放射対策となる。これは本課題開始直後には想定してなかった大きな進展の1つである。

### 世界最多帯域での前景放射対策



### 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10件)

- ① H. Watanabe, S. Mima, S. Oguri, M. Yoshida, M. Hazumi, H. Ishino, H. Ishitsuka, A. Kibayashi, C. Otani, N. Sato, O. Tajima, N. Tomita, “Development of an Optical Coupling with Ground-Side Absorption for Antenna-Coupled Kinetic Inductance Detectors”, IEICE Trans. Electron., vol. E100-C, pp. 298-304 (2017).  
査読有り,  
DOI:10.1587/transele.E100.C.298
- ② O. Tajima, K. Araki, H. Ishimoto, T. Nagasaki, “Sensing of the Atmospheric Water Vapor with Millimeter Wave Spectrometer - KUMODES”, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), pp. 4157-4161 (2016).  
査読有り,  
DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735564
- ③ S. Oguri, J. Choi, T. Damayanthi, M. Hattori, M. Hazumi, H. Ishitsuka, K. Karatsu, S. Mima, M. Minowa, T. Nagasaki, C. Otani, Y. Sekimoto, O. Tajima, N. Tomita, M. Yoshida, E. Won, “GroundBIRD - observing cosmic microwave polarization at large angular scale with kinetic inductance detectors and high-speed rotating telescope”, J. Low Temperature Physics, 184, pp. 786-792 (2016).  
査読有り,  
DOI:10.1007/s10909-015-1420-9
- ④ T. Nagasaki, K. Araki, H. Ishimoto, K. Kominami, O. Tajima, “Monitoring System for Atmospheric Water Vapor with a Ground-Based Multi-Band Radiometer: Meteorological Application of Radio Astronomy Technologies”, J. Low Temp. Phys., 184, pp674-679 (2016).  
査読有り,  
DOI:10.1007/s10909-015-1412-9
- ⑤ N. Tomita, H. Jeong, J. Choi, H. Ishitsuka, S. Mima, T. Nagasaki, S. Oguri, O. Tajima, “World’s Cheapest Readout Electronics for Kinetic Inductance Detector by Using RedPitaya”, J. Low Temp. Phys., 184, pp443-448 (2016).  
査読有り,  
DOI:10.1007/s10909-016-1485-0
- ⑥ H. Ishitsuka, M. Ikeno, S. Oguri, O. Tajima, N. Tomita, T. Uchida, “Front-End Electronics for the Array

Readout of a Microwave Kinetic Inductance Detector Towards Observation of Cosmic Microwave Background Polarization”, J. Low Temp. Phys., 184, pp424–430 (2016).  
査読有り,  
DOI:10.1007/s10909-015-1467-7

- ⑦ K. Karatsu, S. Mima, S. Oguri, O. Tajima (22 番目), 他 22 名, “Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Cosmological Observation”, IEICE Trans Electron, Vol.E98-C, No.3, pp.207-218 (2015),  
査読有り,  
DOI:10.1587/transele.E98.C.207
- ⑧ S. Oguri, H. Ishitsuka, J. Choi, M. Kawai, and O. Tajima, “Sub-Kelvin refrigeration with dry-coolers on a rotating system”, Rev. Sci. Instru., 85, 086101, 1-3 (2014).  
査読有り,  
DOI:10.1063/1.4891618
- ⑨ K. Takahashi, S. Mima, S. Oguri, C. Otani, O. Tajima, H. Watanabe, M. Yoshida, “Callibration System with Modulated Polarization Source for Superconducting Detectors at 0.1 K”, J. Low Temp. Phys., 176, 822-828 (2014).  
査読有り,  
DOI:10.1007/s10909-013-1054-8
- ⑩ S. Oguri, J. Choi, O. Tajima, M. Hazumi, E. Won, M. Yoshida, M. Kawai, “GroundBIRD Experiment -- Detecting CMB polarization Power in a Large Angular Scale from the Ground”, J. Low Temp. Phys., 176, 691-697 (2014).  
査読有り,  
DOI:10.1007/s10909-014-1138-0

[学会発表] (計 8 件)

主要な招待講演のみリストする。

多数の講演実績がある

- 招待講演: 2 4 件(内 8 件のみリスト)
  - 国際会議発表: 1 8 件
  - 国内会議発表: 2 6 件
- ① 田島治, “GroundBIRD 実験と関連技術の動向・展望”, 宇電懇シンポジウム FY2017「未来を拓く技術開発とその将来展望」, 2018 (招待講演).
- ② O. Tajima and R.G.Santos, “CMB Polarization at Canary Islands - QUIJOTE and GroundBIRD”, Large Infrastructures for Astrophysics Synergies and Cooperation between Spain and Japan, 2018 (招待講演).
- ③ O. Tajima, “GroundBIRD - KIDs meet the cosmic inflation”, Exploring the Energetic Universe, the inaugural

international conference of the Energetic Cosmos Laboratory (ECL), 2017 (招待講演).

- ④ 大谷知行, “宇宙の始まりを超伝導ミリ波検出器で探る”, 公開講演会「マイナス約 270 度の冷たい検出器で探る熱い宇宙と宇宙の創生」, 2017 (招待講演)
- ⑤ K. Kiuchi, “Neutrino mass from Cosmology”, Gordon Research Conference-Particle Physics, 2017 (招待講演).
- ⑥ 田島治, “ミリ波センシングで拓く宇宙素粒子実験と竜巻・ゲリラ豪雨予測 - 社会に役立つ基礎科学”, フロンティア宇宙開拓リーダー養成セミナー, 2017 (招待講演).
- ⑦ O. Tajima, “Quest for the origin of the Big Bang Universe by using cutting-edge superconducting detectors, KIDs”, International Workshop on Superconductivity and Related Functional Materials 2016 (IWSRFM2016), 2016 (招待講演).
- ⑧ C. Otani, “Development of microwave kinetic inductance detectors for ground-based CMB polarization experiment GroundBIRD”, Science and Applications of Thin Films, Conference and Exhibition (SATF 2016), 2016 (招待講演).

[図書] (計 1 件)

- ① 田島治、アドコム・メディア株式会社、光と画像の技術雑誌 OplusE 2017 年 6 月号 (第 451 号) 特集記事: クモデスーミリ波分光で竜巻・ゲリラ豪雨の「予兆の予兆」を捉える、2016、6

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

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: 大学共同利用機関法人高エネルギー  
種類: 特許  
番号: 特願 2013-027675, 特開 2014-156952  
出願年月日: 平成 2 5 年 2 月 1 5 日  
国内外の別: 国内  
(米国での外国特許を先行取得済み・後述)

○取得状況 (計 3 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: 6029079  
取得年月日: 平成 2 8 年 1 0 月 2 8 日

国内外の別： 国内

名称：放射測定器  
発明者：田島治、長崎岳人  
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：6019508  
取得年月日：平成28年10月14日  
国内外の別： 国内

名称：Apparatus for achieving cryogenic temperature in movable system  
発明者：田島治  
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：US9, 316, 418 B2  
取得年月日：平成28年4月19日  
国内外の別： 外国

[その他]

Kyoto CMB Group ホームページ  
<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/CMB/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

大谷 知行 (OTANI, Chiko)  
独立行政法人理化学研究所・テラヘルツイメージング研究チーム・チームリーダー  
研究者番号：50281663

服部 誠 (HATTORI, Makoto)  
東北大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：90281964

蓑輪 眞 (MINOWA, Makoto)  
東京大学・理学研究科・教授  
研究者番号：90126178

羽澄 昌史 (HAZUMI, Masashi)  
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・教授  
研究者番号：20263197

### (3) 連携研究者

関本 裕太郎 (SEKIMOTO, Yutaro)  
国立天文台・先端技術センター・准教授  
研究者番号：70262152

内田 智久 (UCHIDA, Tomohisa)  
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：4043615

吉田 光宏 (YOSHIDA, Mitsuhiro)  
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：60391710

永井 誠 (NAGAI, Makoto)  
筑波大学・数理物質科学研究科・助教  
研究者番号：50522877

唐津 謙一 (KARATSU, Kenichi)  
国立天文台・先端技術センター・研究員  
研究者番号：80624783

### (4) 研究協力者

Ricardo Genova Santos  
カナリア天文物理研究所 (IAC)・天文物理学部・准教授

Rafael Rebolo Lopez  
カナリア天文物理研究所 (IAC)・天文物理学部・教授/研究所所長

Eunil Won  
コリア大学・物理学部・教授