

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01240

研究課題名（和文）宇宙マイクロ波背景放射観測の高感度化を実現する観測システム

研究課題名（英文）Developments of observation systems for high-precision measurements of Cosmic Microwave Background

研究代表者

西野 玄記（Nishino, Haruki）

公益財団法人高輝度光科学研究センター・情報処理推進室・テニュアトラック研究員

研究者番号：80706804

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は宇宙マイクロ波背景放射（CMB）観測の高精度化を実現することによるインフレーション理論の実験的な検証などを通じた宇宙論の進展を目的としたものである。CMB観測の高精度化の手段として、新たな環境モニターの開発とそれを導入するための観測・データ収集システムの開発を進めてきた。チリ・アタカマ砂漠におけるCMB偏光観測実験Simons Array実験においては本研究で開発された観測システムがその観測制御の要となり、同実験のCMB観測遂行の基礎的な役割を担っている。また、高精度な温度測定系、偏光変調装置のデータ収集系を開発するなど、将来のCMB偏光観測実験でも応用可能な観測システムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では宇宙マイクロ波背景放射（CMB）観測のための観測システムの開発により、CMB観測の高精度化を図ろうとするものであった。CMB偏光観測により宇宙の始めに何が起きたかの証拠を見つけることは宇宙論のその後を決定づけるものとなる。さらに人類のこの世界の成り立ちに関する理解の根本に関わるという意味では、学術の範囲にとどまらない意義を持つ成果に繋がる可能性を持つ。本研究期間内に得られた成果としては、開発されたシステムを用いたCMB観測を開始させることができたところまでであったが、今後高精度なCMBデータにより新たな発見が生み出されるための基礎となる技術となったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to advance our understanding of the beginning of our universe by improving the precision of polarization measurements of Cosmic Microwave Background (CMB). We have developed telescope control and bolometer data acquisition systems for a CMB measurement. Also, we developed a new environmental monitoring system, which was integrated into the data acquisition system. Those systems were deployed to a CMB polarization experiment, Simons Array, at the Atacama desert in Chile. The Simons Array experiment started observations in Chile using the data acquisition and transfer systems. Moreover, we also developed monitoring systems for measuring temperatures of experimental instruments and polarization modulation instruments, which can be applied broadly to future CMB experiments.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射

1. 研究開始当初の背景

観測可能な最古の光と考えられている宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測は、その発見以来、人類の宇宙の成り立ちに関する理解の礎となってきた。特に、CMB の発見によるビッグバン宇宙論の確立はその最たるものであると言える。近年では、ビッグバン以前の宇宙、すなわち、インフレーションと呼ばれる加速的な急膨張があったとするインフレーション理論を実験的に証明することに注目が集まっている。インフレーション理論の特徴的な予言の一つに宇宙初期の時空の揺らぎによって生じた原始重力波の存在がある。さらに、原始重力波が存在したとすると CMB の偏光成分に「*B* モード」と呼ばれる奇パリティの渦上のパターンを残すことが予言される。*B* モードの強度は、インフレーションのモデルによって様々な値を持ちうるテンソル・スカラー比 (r) と呼ばれる値に比例する。したがって、*B* モードの発見とその強度の測定によって、インフレーションの決定的な検証、さらには、インフレーションモデルの定量的な弁別までもが可能になると期待されている。

上記のような理論的な重要性の認識のもとで、研究開始当初、既に世界各地で様々な CMB 偏光観測実験が進行中であった。本研究の開始の数年前には南極で観測を進めていた BICEP2 と呼ばれる実験が原始重力波の信号を捉えたという発表をしたものの、後に銀河系内の塵の放射で説明できることがわかり、発見競争は振り出しに戻っていた。当該実験の測定結果によりテンソル・スカラー比 r にして、 $r < 0.07$ という制限が付けられており、測定感度の向上を目指した研究開発が進められていた。

当時、既に CMB の偏光観測における成果を上げていた実験の一つとして、本研究課題の研究代表者も参加していた POLARBEAR と呼ばれるチリ・アタカマ砂漠における CMB の地上観測実験があった。研究開始時点では、そのアップグレード実験である Simons Array 実験の開始に向けて、日本国内での統合試験が行われているという状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目指す最終的な到達点は、CMB 偏光の観測感度を向上させ、原始重力波を起源とする信号の探索、及び、そこからもたらされる宇宙論の進展である。それらを実現するため、本研究では、CMB 偏光観測のための環境モニターや観測システムの開発・高度化を行うことにより観測装置が持つ本来の統計感度を達成することを目的とした研究を推進することとした。

様々な CMB 偏光観測プロジェクトにおいて検出器の多素子化、望遠鏡の多アレイ化が進められている。それに伴い、統計感度は自ずと向上していくことが期待されている。そうした中で次第に顕在化してくると期待されるのは、低周波数領域の $1/f$ 雑音の影響である。CMB 偏光観測実験は一般に南極やアタカマ砂漠のような厳しい自然環境の中で観測が行われることが多い。そのような中で、例えば、大気や装置由来のゆらぎにより、100 mHz の周波数領域まで顕著な $1/f$ 雑音が存在すると、本来装置が持つ性能 (統計感度) を発揮できず、原始重力波探索性能を損なうことが予想される。したがって、高精度なデータの補正や選別に用いるための環境データを取得するためのモニター系の開発、及び、それに連動して動く観測システムの開発が必要となった。したがって、本研究ではそうした観測システムの開発を行うことによって CMB の偏光の測定感度向上を実現することを目的とした研究を進めることとした。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究では CMB 偏光地上実験における厳しい自然環境に対応するための環境モニターシステムとそれを統合した観測システム、及びデータ収集系の開発を行った。研究代表者が参加してきた CMB 偏光観測実験 POLARBEAR のアップグレード実験 Simons Array をその研究・開発の実験場として用いることにより、実際に世界最高感度の原始重力波探索をすることを目指した。

3.1 環境モニターシステムの開発

原始重力波の発見を試みる CMB 偏光観測では、角度にして数度を越えるような比較的大きな角度スケールでの CMB の到来方向による強度の違い、すなわち揺らぎを精度よく測定することが必要である。一般に CMB 偏光観測は望遠鏡の視野をスキャンしながら観測を行うため、広角度の信号は低周波領域の信号成分に相当する。一方で、実際に測定される信号は、大気や検出器、光学系の温度揺らぎなどに起因する揺らぎの信号も混在して測定される。そのような揺らぎの成分も原始重力波起源の信号と同様な低周波領域に現れるため、環境由来の揺らぎが原始重力波探索の感度に影響をもたらすことになる。例えば、 $1/f$ 雑音の影響を統計感度と比べて十分小さいレベルに抑えるためには望遠鏡の主鏡の温度揺らぎを (10 秒の時間スケールで) 約 10 mK の精度で測定しなくてはならないことが予想される。したがって、主鏡を始めとした光学系の温

度、及び振動を高精度かつリアルタイムでモニターするシステムを構築した。そのための各種センサーとその読み出し方法の選定を行い、観測システムへと導入した。

また、そうした低周波の環境由来の揺らぎと CMB 偏光本来の揺らぎを選別するための手段として、偏光信号を特定の周波数へ変調するという手法も考えられる。その目的で広く用いられているのが、複屈折を持つ半波長板を光学経路中に導入し、それを連続回転させながら観測を行う手法である。ただし、変調された信号から本来測定したい CMB 偏光信号を復調するには半波長板の回転の速さを正確にモニターできることが必須となる。そこで、波長板の回転をモニターするエンコーダのデータ取得系の開発、及び、その観測システムへの統合を行った。

さらに、大気モニター手段として、広角な可視光のカメラ、及び赤外線カメラを設置することにより、観測する視野方向の雲の存在を確認できるシステムの開発を行った。また、GPS に代表されるような全球測位衛星システム (GNSS) を応用した大気中の水分量の測定にも挑戦することで多角的なモニターシステムの導入を試みた。

3.2 観測システムの開発と運用

上記のモニターシステムを観測システムの中へ組み込み、同期して動かすために、観測システムの開発を行い、その運用を行うこととした。

本研究で開発試験を行うモニターシステムを導入するために、多種多様なモニターデータを容易にデータ収集系へ組み込むことができるデータ取得システムを構築した。また、CMB を観測する検出器、超伝導 TES ボロメータのデータと同期することが必要なシステムのために、高精度タイムスタンプを用いた同期処理が可能となるシステムを構築した。

さらに、本システムの成功のために、データを素早く解析してその結果をフィードバックする必要があると考えられたため、観測サイトにおける観測システムだけでなく、観測データを迅速に世界中の共同研究者のもとに届け、その解析を進めるためのデータ転送・分配システムを構築した。

4 . 研究成果

4.1 Simons Array 実験における観測システムの開発と導入

2018 年度前半に、Simons Array 実験の一台目の受信機 POLARBEAR-2 の日本国内における統合試験が行われている機会を活かして、観測制御・データ収集系の開発を行った。当該年度後半においては、開発されたシステムをチリ・アタカマ砂漠の観測サイトへ移送し、観測サイトにおけるシステムの立ち上げとその後の運用を行った。

開発・導入されたシステムの概要を図 1 に示した。観測サイトにおけるデータ収集系としては主に、TES ボロメータのデータ収集、望遠鏡の制御・データ収集、環境モニター系のデータ収集からなるシステムを構築した。また、収集されたデータを全世界の共同研究者の元へと転送するシステムも同時に開発された。データ転送システムにより、観測終了から数十分のうちに、世界中へとデータが転送され、素早いデータ解析によるフィードバックが可能となった。

Simons Array 実験は本システムの稼働により、2018 年度末にチリ・アタカマでの観測を開始した。図 2 が本システムと POLARBEAR-2 受信機により、「ファーストライト」として最初に観測された金星の信号である。本研究において開発されたデータ収集系、及び、POLARBEAR-2 受信機の立ち上げの成果などは「主な発表論文等」の中で示したような国際会議で報告がなされた。

その後、Simons Array 実験は観測サイト付近の自然災害、及び、新型コロナウイルスの世界的な流行などに伴い、何度かサイトの閉鎖を余儀なくされたこともあり、本研究期間中に観測データを用いた科学解析結果を公表するには至っていないが、現在も引き続き観測が進められている。

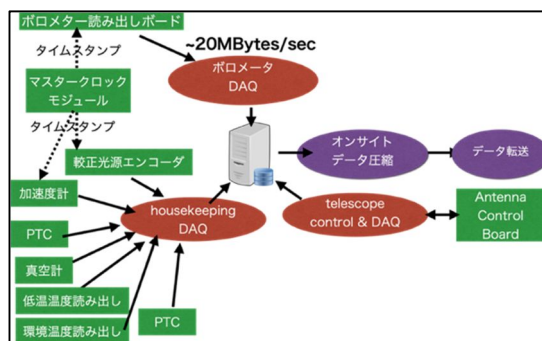


図 1 本研究において開発され、Simons Array 実験に導入された観測・データ収集システムの概要。

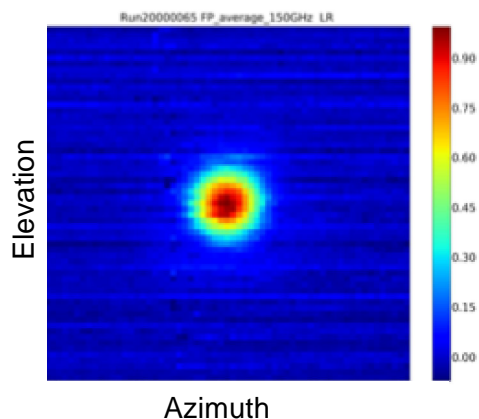


図 2 本システムにより取得された最初の天体 (金星) の信号 (詳細解析前)

4.2 高精度温度モニターシステムの開発と導入

4.1 で述べた Simons Array 実験における観測システムの開発と並行して、環境モニター系の開発と導入を行った。特に、研究の目的で述べたような低周波数領域の装置等の温度の揺らぎによる系統誤差の低減のため、望遠鏡の主鏡の温度を 10 mK の精度で測定するための研究開発を行った。

一般に、高精度な温度センサーとしては白金抵抗体が用いられるが、高精度な白金抵抗体とその読み出し系を数多く配置することは現実的には難しい。本研究の目的で必要とされているのは相対的な温度精度であることから、比較的安価なサーミスタに着目し、その精度と読み出しシステムの検証を行った。検証の結果、高精度 CMB 偏光観測で求められる精度を達成できることが確認され、その結果が現在論文として投稿されている。

要求される精度を確認した後、図 3 の写真で示すように Simons Array 実験の装置の温度揺らぎを測定するために、主鏡などへ温度センサーが取り付けられ、環境モニター系の一部として 4.1 で述べた観測システムへと導入され、今後 CMB 解析への応用研究へと進める道筋が建てられた。

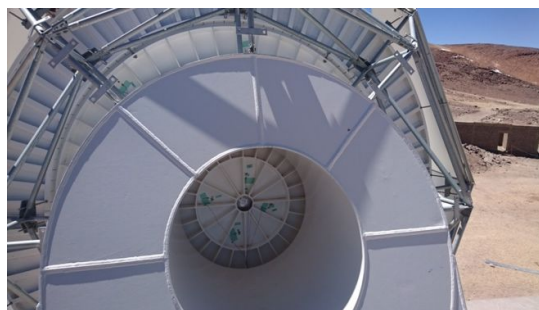


図 3 Simons Array 実験で用いられている望遠鏡の主鏡の裏側の写真。(最終的にはこれらを覆うパネルがつけられ、主鏡裏側は直接外からは見えなくなる。)緑色のテープがはられている部分に温度センサーが取り付けられている。

4.3 連続回転半波長板モニターのためのデータ取得システムの開発

CMB 偏光観測実験の系統誤差削減のために連続回転半波長板の回転をモニターするデータ収集系の開発を行った。この開発にあたっては、前述の Simons Array 実験のためのものだけでなく、次世代の CMB 偏光観測実験である Simons Observatory を見据えた開発を行った。本研究では、米国の共同研究者により開発されたエンコーダ読み出しシステムを、観測システムのデータ収集系へと統合させるための開発を中心として行った。

図 4 に開発されたデータ収集システムにより取得されたデータのモニターのプロットの例を示す。半波長板の回転周波数が期待通りの精度でモニターできていることが示され、これから始まろうとする次世代実験における高精度偏光測定に貢献することが期待される。

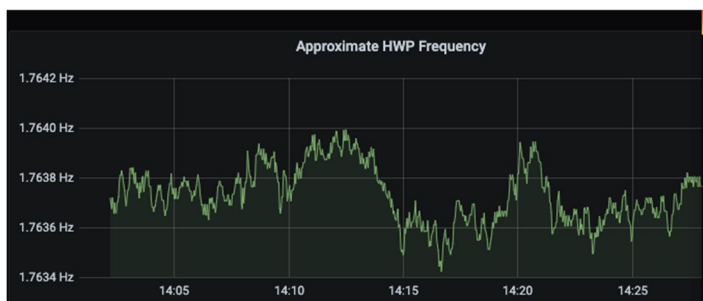


図 4 本研究により開発されたデータ収集系のデータを用いた半波長板回転周波数モニターの例。

4.4 全方位カメラや GNSS による大気モニターの開発研究

最後に、厳しい自然環境下にある装置の状態を高精度にモニターするだけでなく、大気の状態を積極的にモニターするための試みも重ねてきた。その一つが、全方位を撮影できる可視光カメラの望遠鏡への設置であるが、他方で、GNSS を用いた大気中の水蒸気量モニターの CMB 観測への応用にむけた検証と開発の研究にも取り組んだ。

国内における検証データの取得し、実用性の確認を行った後、アタカマの Simons Array 実験のサイトにおいて運用可能なコンパクトな受信機システムを開発した。そのシステムをアタカマ砂漠の Simons Array 実験のサイトに設置し、データ取得を行った。本研究期間中に一年間程度の安定したデータ取得を実現し、そのデータ解析を進めている。今後、CMB 観測のための大気モニターとしての有効性の検証に関する結果を発表することを予定している。



図 5 Simons Array の実験サイトに導入された GNSS のアンテナ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Adachi S., et al.	4. 巻 931
2. 論文標題 Improved Upper Limit on Degree-scale CMB B-mode Polarization Power from the 670 Square-degree POLARBEAR Survey	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 101 ~ 101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac6809	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Abitbol Maximilian H., et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 The Simons Observatory: gain, bandpass and polarization-angle calibration requirements for B-mode searches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 032 ~ 032
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2021/05/032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Daisuke Kaneko, et al.	4. 巻 199
2. 論文標題 Deployment of Polarbear-2A	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1137 ~ 1147
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-020-02366-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Haruki Nishino, et al.
2. 発表標題 Data acquisition and management system for the CMB polarization experiment: Simons Array
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoru Takakura and Haruki Nishino
2. 発表標題 Development of cloud monitoring system at Simons Array
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野玄記、他POLARBEARコラボレーション
2. 発表標題 Simons Array実験の現状報告
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野玄記、他POLARBEARコラボレーション
2. 発表標題 Simons Array実験の進捗報告
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地修平、他POLARBEARコラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR-2aにおける常温温度モニターの現状
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田邊大樹、他POLARBEAR コラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR-2 実験における温度モニターデータを用いた較正手法の開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西野玄記、他POLARBEAR コラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR-2 実験の現状
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊地修平、他POLARBEAR コラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR-2実験における望遠鏡常温部の温度モニターシステムの研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daiki Tanabe, et al.
2. 発表標題 An ambient temperature monitoring system for precision measurements of CMB polarization with TES bolometers at the Simons Array
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Kaneko, et al.
2. 発表標題 Deployment of POLARBEAR-2A
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-18) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西野玄記、他POLARBEAR コラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR-2/Simons Array実験の現状
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田邊大樹、他POLARBEAR コラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR-2装置温度モニターシステム開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruki Nishino
2. 発表標題 Neutrino mass measurement in a CMB experiment
3. 学会等名 International Symposium on Neutrino Frontier (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西野玄記、他POLARBEAR Collaboration
2. 発表標題 POLARBEAR-2統合試験の状況
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田邊大樹、他POLARBEAR Collaboration
2. 発表標題 POLARBEAR-2読み出し回路温度依存性評価試験
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西野玄記、他POLARBEAR Collaboration
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験POLARBEAR-2の観測開始に向けた準備状況
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	長谷川 雅也 (Hasegawa Massaya)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田邊 大樹 (Tanabe Daiki)		
研究協力者	菊地 修平 (Kikuchi Shuhei)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	カリフォルニア大学バークレー校	ローレンス・バークレー国立研究所	カリフォルニア大学サンディエゴ校	他7機関
カナダ	マギル大学			
フランス	パリ大学			
イタリア	SISSA			
英国	カーディフ大学	マンチェスター大学	インペリアル・カレッジ・ロンドン	