

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03670

研究課題名(和文) 宇宙マイクロ波背景放射偏光成分の精密観測によるニュートリノ質量絶対スケールの研究

研究課題名(英文) Probing the Absolute Neutrino Mass scale with a Precise Measurement of Cosmic Microwave Background Polarization

研究代表者

長谷川 雅也 (HASEGAWA, MASAYA)

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・研究機関講師

研究者番号：60435617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000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)の偏光成分を通してニュートリノ質量和に関する情報を得る事を念頭に、POLARBEAR-1実験による重力レンズ起源CMB偏光の精密測定と、POLARBEAR-1の性能を数倍向上させた新しい検出器システム「POLARBEAR-2」によるCMB観測データの収集を目的に行なった。POLARBEAR-1では、重力レンズ起源偏光Bモードのさらなる高感度観測を実現し、ニュートリノ質量和探索への道筋をつける事に成功した。POLARBEAR-2は開発を完了し、観測サイトであるチリへの移設と機器の立ち上げを行って、科学観測開始への目処をつけることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノ質量の絶対スケールの測定及び質量構造の解明は、素粒子物理および宇宙物理の最重要課題の1つである。宇宙観測を通じたニュートリノ質量絶対スケールの探索は、地上実験をしのぐ感度が期待されており、本研究を通してその原理検証が大きく進展し、かつ、新型検出器の実現により数年のスケールでの質量精密測定の実現が視野に入ってきた事は学術的に大きな意義がある。

ニュートリノの性質の解明は、宇宙の進化の様相を明らかにすると共に、なぜこの宇宙に物質しかないのか？等、我々の“起源”の解明につながる豊富な情報を有しており、社会的な関心やインパクトも非常に大きいと考ええる。

研究成果の概要(英文)：The main goal of this study is precise measurement of cosmic microwave background (CMB) polarization, and exploring the finite neutrino masses with the data. We continued the POLARBEAR-1 data taking, and developed a new receiver POLARBEAR-2, which has six times higher mapping speed, for the objective.

We successfully improved the precision for the lensing B-mode power spectrum, and laid a groundwork for future precise measurement of neutrino masses.

The development and integration in the laboratory of POLARBEAR-2 is completed. The receiver was successfully deployed at the observation site in the Atacama desert, Chile in late 2018, and the first light was received at the beginning of 2019. After the commissioning work, we're almost ready to start the science observation.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙背景放射 インフレーション 原始重力波 偏光 重力レンズ ニュートリノ質量 検出器開発 超伝導検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の発見によりニュートリノの有限な質量は証明されたが、質量の絶対スケール及び階層構造はまだ解明されていない。ニュートリノが質量を獲得する過程には、背後に力の統一に関連する理論が密接に関わっており、研究の為に重要な情報として解明が期待されている。絶対質量の探索方法として、近年、重力レンズ効果による生じる宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の特殊な偏光パターン(偏光 B モード)を用いた探索法が提案されている。CMB は宇宙の晴れ上がり時には原始の密度揺らぎにより偏光 E モードと呼ばれる偏光パターンを生じる。通常はこの E モードを観測するが、途中で強い重力場があると重力レンズ効果により偏光の方向が回転し、偏光 B モードと呼ばれる渦巻き状のパターンが生成される。重力レンズ効果による偏光 B モードの強度はニュートリノ質量和に大きく依存する為、重力レンズ B モードの信号強度を精密に測定する事でニュートリノ質量和の測定が可能になる。

宇宙観測によるニュートリノ質量への制限は WMAP 衛星以降の比較的新しい研究対象であるが、CMB の偏光観測によるニュートリノ有限質量の探索はアイデア自身がさらに新しく、また実現すればもちろん世界で初の試みとなる。重力レンズ B モード偏光の信号強度を 10%程度の精度で測定できると、現在ニュートリノ振動実験の結果から示唆されている質量和の下限値(質量逆階層シナリオの場合)に迫れると期待されており、この精度が目指すべき目標となる。

重力レンズ B モードは期待される信号強度が微弱であるため(WMAP 衛星が観測した温度揺らぎの 1/100 以下程度)、従来の 100 個程度のミリ波検出器を用いた実験では観測が困難であったが、1274 個の超伝導検出器を搭載した POLARBEAR 実験によって初めて信号が検出された。この研究を進め、精度を上げていく事でニュートリノ質量和探索の実現可能性を示すことが本研究の目的である。さらに、感度向上を大幅に推し進めるためには、より多数の検出器を搭載した大型の超伝導検出器アレイを実現し、CMB 以外の信号(代表的な物に銀河面からのダスト放射等の前景放射など)との分離能力を向上するために複数の周波数帯での同時観測、そして系統誤差のさらなる削減である。これらを実現・実証するのが、本研究のテーマである「POLARBEAR 及び POLARBEAR-2」である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(研究開始当時)世界最高レベルの感度を有する「POLARBEAR」ミリ波望遠鏡による CMB 偏光観測によるより精密な測定を行い、またその感度を飛躍的に向上させるために新型ミリ波望遠鏡「POLARBEAR-2」を完成させて稼働を開始させる事である。CMB 偏光分布に生成される小角度スケールの渦パターン「偏光 B モード」の精密測定は、ニュートリノ質量和測定のもっとも有望な手法であり、ニュートリノ振動実験により示唆される質量領域での探索が現実的なレベルでいよいよ可能になる。具体的には研究期間内に以下の 3 点の研究を重点的に行う

- POLARBEAR により小角度偏光 B モードの観測精度を向上する。また、重力レンズ効果の源である宇宙大規模構造のさらなる理解を目指して、他の波長帯との相関解析を行う。
- 新型ミリ波偏光検出器「POLARBEAR-2」の開発を完了し、チリ・アタカマ高地に移設し CMB 偏光観測を行う
- 次世代観測による精密測定の実現に向けて、系統誤差制御に関する開発・検証を行う。

3. 研究の方法

POLARBEAR レシーバを用いた CMB 偏光データの取得を続ける。科学目的の一つに大角度スケールの偏光 B モードの精密観測を通じた原始重力波の検出がある。そのために、期間途中から広域観測に切り替えるが、引き続き重力レンズ B モードの観測は行う。CMB による観測は、晴れ上がれの時期から現代までの重力レンズ効果の総計を見ることになるが、これと他波長の観測データとの相関を見ることにより、ある程度 z について範囲を区切って見る事が可能になるため、ニュートリノ質量和に加えて暗黒エネルギー等の研究が可能になる。これら相関解析についてもグループとして研究を進める。

並行して、POLARBEAR-2 レシーバシステムの開発を進める。右図は観測装置の全体図である。POLARBEAR の 6 倍の 7588 個の検出器を配置する焦点面は、大きさが 380mm と世界最大レベルとなり、その冷却が最大の技術的挑戦となる。そのために、(1) 赤外線に強い光学系の開発、(2) 熱侵入をおさえるレシーバ内部の構造体の設計、(3) 検出器の多重化読み出しシステムの開発と原理検証を行う。検証が終わり次第、チリに移設し、レシーバの立ち上げおよび観測を開始する。

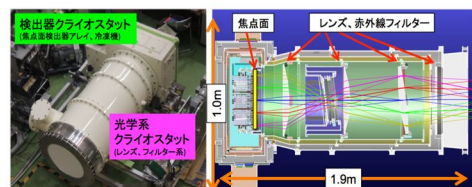


図 POLARBEAR-2 外観と断面図

重力レンズ B モードの観測からニュートリノ質量和の情報を得るためには、徹底した系統誤差の削減が必要である。これまでの実験よりも厳しい要求が課されるため、新たに較正装置を開発・運用を行う。また、機器の温度安定性についてもアクティブな制御が要求されるレベルに入ってくる。そのためのフィードバックシステムを用意し、常温部であれば 1mK レベル・低温部であれば数 10 μ K レベルでの安定性を実現する。

4 . 研究成果

POLARBEAR で 2017 年までに取得した 10000 時間以上のデータを元に、重力レンズ B モードの高精度観測を行い、以下の結果を報告した。

- (1) 重力レンズ B モード自己相関解析 (The Astrophysical Journal 848, 121 (2017))
 - (2) 可視光観測との相関解析 (The Astrophysical Journal 882, 62-73 (2019))
 - (3) POLARBEAR データを用いた(原始重力波探索を主論んだ)重力レンズ B モード成分除去に関する研究 (Physics Review Letter 124, 131301 (2020))
- (1) は 2014 年に初検出を報告した B モード自己相関に関するアップデート論文であり、単独の観測で 3 シグマを超える信頼度で重力レンズ B モードのパワースペクトルを観測した。これは、CMB 偏光観測によるニュートリノ質量観測精密測定に道筋をつけた、という点で重要な結果である。(2) は可視光測定との相関解析により、はじめて重力レンズ効果を観測した結果であり、ニュートリノ質量和に加えて、暗黒エネルギー等への応用に道筋をつけた結果である。(3) は原始重力波探索の感度を向上させるための基礎研究であり、大角度スケールの偏光 B モード探索に小角度スケールのデータ重要であることを示した結果である。

POLARBEAR-2 レシーバシステムの開発については、“世界最大レベルの超伝導検出器アレイ (7588 個の TES ポロメータ) の実現が最大の挑戦である。実現の課題として、空を観測しながら (外部から赤外線による熱負荷を受けながら) 以下に検出器を冷却し転移端に状態を保つか、が上げられる。この課題の達成に向けて、「ミリ波を透過して赤外線を効率的に落とす光学素子 (Applied optics 55, 22 (2016))」や「信号読み出し線を通して入る熱負荷を効率的に落とす為の超伝導材を用いたケーブルの開発 (Journal of Low Temperature physics 193(3-4), 547-555 (2018))」、「超伝導検出器の多重化読み出しの検出器本体への実装 (Journal of Low Temperature Physics 193 (5-6), 1094-1102 (2018))」を実現し、超伝導検出器を実際の観測環境を模擬した条件下で期待通り運用出来る事を確認した。実験室での光学試験による基礎性能の確認を経て、2018 年 10 月に観測サイトであるチリ・アタカマ高地に移設し、2 ヶ月の準備期間を経てファーストライト (観測装置が立ち上がり、最初に空を観測したデータ) を達成した。

最終年度は、主に POLARBEAR-2 のコミッショニング作業を行なった。まず 7588 個の検出器を有する検出器アレイを冷却し、実験室と同等の冷却能力を示している事を確認した。さらに実際の観測環境の下、超伝導転移端に設定できる事を確認し、配線されている検出器のおよそ 95% の検出器で空からのミリ波信号を検出できている事を確認した。またニュートリノ質量に感度を有する重力レンズ B モード信号の検出には、デザイン値通りの角度分解能を達成している事が重要である。レシーバの位置を調整しながら角度分解能が最大になる場所に調整し、十分な分解能を有する事を確認した。また、長期間安定したデータ収集をするのに重要なオンラインでのモニターリングシステムの立ち上げ等を経て、本観測開始への準備がほぼ完了した。並行してニュートリノ質量和の精密測定に向けて、検出器較正装置 (Stimulator) 等の導入や、装置全体の精密な (常温度度の温度を 1mK の精度で測定できる) 温度モニターシステムの導入等をおこなって、系統誤差制御に関する研究を進めた (Journal of Low Temperature Physics, 199, 1137-1147 (2020))。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 The POLARBEAR Collaboration, Ade P. A. R., M. Hasegawa(31番目) 他79名	4. 巻 848
2. 論文標題 A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-mode Polarization Power Spectrum at Subdegree Scales from Two Years of polarbear Data	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 121 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8e9f	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 Takakura Satoru, M. Hasegawa(21番目) 他51名	4. 巻 2017
2. 論文標題 Performance of a continuously rotating half-wave plate on the POLARBEAR telescope	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 008 ~ 008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2017/05/008	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 D.Ooletti, M. Hasegawa (20番目) 他47名	4. 巻 600
2. 論文標題 Making maps of cosmic microwave background polarization for B-mode studies: the Polarbear example	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astron.Astrophys	6. 最初と最後の頁 A60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201629467	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 Y. Inoue, T. Hamada, M. Hasegawa, M. Hazumi, Y. Hori, A. Suzuki, T. Tomaru, T. Matsumura, T. Sakata, T. Minamoto and Tohru Hirai	4. 巻 55
2. 論文標題 Two-layer anti-reflection coating with mullite and polyimide foam for large-diameter cryogenic infrared filters	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.55.000D22	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 N. Stebor, M. Hasegawa (33番目) 他88名	4. 巻 9914
2. 論文標題 The Simons Array CMB Polarization Experiment	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc.SPIE Int.Soc.Opt.Eng.	6. 最初と最後の頁 99141H
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2233103	査読の有無 無
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 Peter A.R. Ade, M. Hasegawa(24番目) 他84名	4. 巻 92
2. 論文標題 POLARBEAR Constraints on Cosmic Birefringence and Primordial Magnetic Fields	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.92.123509	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 -

1. 著者名 J. Errard, M. Hasegawa(23番目) 他73名	4. 巻 809
2. 論文標題 Modeling atmospheric emission for CMB ground-based observations	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	6. 最初と最後の頁 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0004-637X/809/1/63	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 -

〔学会発表〕 計17件(うち招待講演 2件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Cosmic Inflation and Neutrino Masses at POLARBEAR and Simons Array
3. 学会等名 Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川 雅也
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験 POLARBEAR-2の開発現状
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川 雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2実験:超伝導検出器アレイ読み出し試験
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長谷川 雅也
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のためのPOLARBEAR-2受信機の開発
3. 学会等名 第18回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川 雅也
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験 POLARBEAR-2の準備状況
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川 雅也
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験POLARBEAR-2のレーザーシステムの光学性能評価1
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Cosmology and Particle physics with CMB polarization measurement
3. 学会等名 2016 Joint Workshop of the France-Korea (FKPPL) and France-Japan(TYL/FJPPL) Particle Physics Laboratories (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Cosmology and Particle physics with POLARBEAR and Simons Array
3. 学会等名 38th International Conference on High Energy Physics, ICHEP2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2 レーザーシステムの開発 XI
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2 レシーバシステムの開発 XII
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Cosmic Inflation and Neutrino Masses at POLARBEAR CMB Polarization Experiment
3. 学会等名 WIN2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 Simons Array
3. 学会等名 新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦 -」発足シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Masaya Hasegawa
2. 発表標題 CMBの今と未来
3. 学会等名 Future prospects for Fundamental Particle Physics (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2レシーバシステムの開発IX
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 長谷川雅也
2. 発表標題 POLARBEAR-2レシーバシステムの開発X
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長谷川雅也、秋葉祥希
2. 発表標題 POLARBEAR-2実験：超伝導TESボロメータ評価システムの開発
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長谷川雅也、西野玄記
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験POLARBEAR-2計画の概要と現状
3. 学会等名 天文学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

KEK-CMBグループ cmb.kek.jp POLARBEARグループweb http://bolo.berkeley.edu/polarbear/ Masaya Hasegawa's Homepage http://research-up.kek.jp/people/masayan/index.html KEK-CMBグループ cmb.kek.jp POLARBEAR http://bolo.berkeley.edu/polarbear/ KEK-CMBグループ cmb.kek.jp POLARBEAR http://bolo.berkeley.edu/polarbear/

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
連携 研究者	西野 玄記 (NISHINO HARUKI) (80706804)	東京大学・大学院理学研究科・特任助教 (12601)	