

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24684017

研究課題名(和文)世界最大の超伝導ミリ波検出器アレイによる宇宙背景放射偏光成分の精密測定

研究課題名(英文)Precise Measurement of Cosmic Microwave Background Polarization with a Large Superconducting Detector Array

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・助教

研究者番号：60435617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、宇宙背景放射(CMB)偏光成分の精密測定を通して原始重力波の痕跡をとらえる事を念頭に、現在世界最高レベルの感度を誇るPOLARBEAR-1実験による重力レンズ起源CMB偏光の精密探索と、POLARBEAR-1の性能を6倍に向上させた新しい検出器システム「POLARBEAR-2」の開発を目的に行った。POLARBEAR-1では、世界で初となるCMB偏光データのみを用いた重力レンズ起源の偏光Bモードの観測に成功した。またPOLARBEAR-2の開発では、世界最大級の焦点面検出器アレイの実現のために課題であった、光学系の構築と焦点面周辺の熱負荷の制御に成功し、開発をほぼ完了させている。

研究成果の概要(英文)：The main goals of this study are precise measurement of cosmic microwave background (CMB) polarization with POLARBEAR-1 towards the detection of the special polarization pattern originating primordial gravitational wave (B-modes), and development of a new receiver POLARBEAR-2 which has six times higher mapping speed.

We successfully measured the lensing B-mode power spectrum with CMB data alone at 4.7sigma level. Systematic errors are well controlled, and we proved our technology and observing strategy are promising for the primordial B-mode search.

The development of POLARBEAR-2 receiver is almost completed. One of the challenges is to cool down the large focal plane with more than 7600 detectors to 250mK. We constructed a dedicated optical system with novel lenses and filter with alumina, and successfully controlled the thermal load onto the focal plane. After some laboratory testing, we plan to deploy POLARBEAR-2 in Chile early spring next year, and start data-taking in next summer.

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

1. 研究開始当初の背景

宇宙背景放射(CMB)観測は、1964年の発見以来、宇宙の誕生と進化の謎について我々に多くの知見をもたらし、WMAPによる温度揺らぎの精密測定を経て、現在我々はその標準的なモデルを確立するに至っている。WMAP以降のCMB研究の展開として、偏光Bモードと呼ばれるCMBの特殊な偏光パターンの検出が期待されている。これはインフレーションにより生成される原始重力波によってCMBに残される偏光パターンであり、宇宙の晴れ上がり以前を見るベストプローブとして、世界中で検出を目指したプロジェクトが計画・推進されている。

しかし、予想される偏光Bモードの強度は非常に微弱な為(WMAP衛星が観測した温度揺らぎの1/100以下程度)、研究開始当時チリや南極で稼働中の(~100個の検出器を用いた)観測による検出は難しく、多数(1000個以上)の超伝導検出器を用いる次世代実験に発見の期待がかかっている。

ただし、検出した渦パターンの偏光成分が確実に原始重力波起源の物である事を実証するには、さらに(1)重力レンズ起源の渦パターン(比較的小さい角度スケールにパワーのピークをもつ成分)と統計的に寄与を分離する為、広い角度スケールに渡ってスペクトルを精密に測定する事。(2)強度の周波数依存性が強い銀河からの放射成分(前景放射)を分離する為、複数の周波数帯で測定する事。(3)観測の系統誤差を信号強度に対して十分小さくする事。が必須である。これを実現して世界最高感度でのBモード偏光の探索を行い、渦パターンが検出された際には確実に原始重力波起源の偏光パターンである事を実証するのが、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、現在世界最高レベルの感度を有する「POLARBEAR-1」ミリ波望遠鏡による宇宙背景放射(CMB)偏光成分の精密測定及びその感度を飛躍的に向上させるために次世代の観測装置「POLARBEAR-2」を完成させる事である。CMB偏光分布に生成される渦パターン「偏光Bモード」の検出はインフレーションの直接の証拠となる原始重力波発見のもっとも有望な手法であり、宇宙論最大の課題であるインフレーション宇宙の実験的検証が現実的なレベルでいよいよ可能になる。また偏光Bモードは宇宙大規模構造の重力レンズ効果によっても生成される。この重力レンズ由来の偏光Bモード(以下、重力レンズBモード)は、視線方向に(最終散乱面まで)積算したエネルギー密度の良いトレーサーになっており、精密測定を通してニュートリノ質量和や暗黒エネルギーに迫ることができる。

3. 研究の方法

POLARBEAR-1では、まずは重力レンズBモードの初検出を目指して、比較的狭い空の領域(3°x3°)を集中して観測する。重力レンズBモードは確実に存在する事が保証されており、またその信号強度は主要なインフレーション理論で発見を予想する信号強度とも近い為、インフレーションBモード発見の重要なマイルストーンとなる。

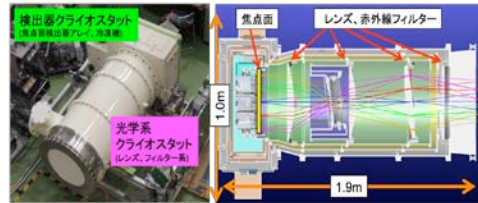


図1 POLARBEAR-2 外観(左)と断面図(右)

並行してPOLARBEAR-2 レシーバシステムの開発を進める。図1は観測装置の全体図である。POLARBEAR-1の6倍の7600個の検出器を配置する焦点面は、大きさがΦ380mmと世界最大レベルとなり、焦点面を外部からの赤外線に打ち勝って如何に冷やすかが実験成功の鍵となる。

そこでシステムを大きく「光学系クライオスタット」「検出器クライオスタット」の2つに分けて開発を進める。光学系クライオスタットでは、熱伝導度の高いアルミナを用いたフィルターおよびレンズを導入し、赤外線を吸収した際の熱をすみやかにクライオスタット側に伝送する事で光学素子の温度上昇を抑え、かつ光学素子全体を4K(フィルターは50K)に冷却する事で焦点面への熱輻射に影響が無視できる程度に抑える。検出器クライオスタットでは信号読み出し用のケーブル等からの熱侵入を抑える為に、検出器を配置する250mK部と読み出しに用いるSQUIDアンプを配置する4K部の間をニオブチタンを用いた超伝導ケーブルで接続する。また冷凍機の振動を極力抑えた設計を行い、焦点面への余分な熱寄与を抑える。これらの工夫により、検出器の冷却が容易になり、熱雑音を抑えて検出器の性能を30%程度向上出来ると期待出来る。

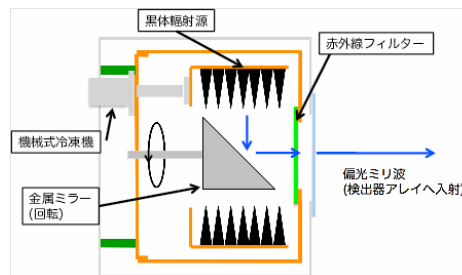


図2. 基準偏光源の外観図。強度と方向の良く決まった偏光ミリ波を発生出来る。

また、開発したシステムの偏光波に対する感度を実験室で評価する為に図2の様な基準偏光源を開発する。これは代表者が若手研究(B)のサポートの下で開発した世界初のチリアタカマ高地の輻射環境を完全に再現したミリ波偏光源をPOLARBEARの検出器(超伝導検出器)用に改良した物を用いる。これにより観測サイトでの観測計画(空のどの領域を、どの大きさで観測するか等)をあらかじめ決定出来る。

4. 研究成果

POLARBEAR-1の初年度に取得したおよそ4000時間のデータを元に、以下の3つの手法で重力レンズBモードの探索を行い、結果を報告した。

- (1) 赤外線データとの相互相関解析(発表論文③)
 - (2) 多点(4点)相関解析を用いた曲がり場(deflection field)のパワースペクトル解析(発表論文②)
 - (3) Bモードの自己相関解析(発表論文①)
- いずれの手法でも期待通り重力レンズBモードの信号を高い信頼度で確認した。特に(2)についてははじめてCMBの偏光データのみで重力レンズ効果を確認した結果として、(3)については世界で初となるBモードパワースペクトルの測定に成功した結果として、画期的な結果と言える。結果はそれぞれジャーナル誌に掲載済みで、(1)(2)に関してはPRLのeditor's suggestionに選ばれている。現在は原始重力波Bモードの検出を目指して、観測領域を拡張した観測を行っている。

POLARBEAR-2 レシーバシステムの開発については、綿密な熱設計の下、検出器および光学系クライオスタットの製作が完了し、実際に7600個の超伝導検出器を配置する焦点面構造を実際に窓を開けて外からの赤外線を受けた状態で、目的の250mKに冷却する事に成功し、試験用に搭載した超伝導検出器が実際に超伝導に転移している事を確認した。これにより、冷却についての原理検証を完了したとともに実際にチリにレシーバを移設する目処が立った。基準偏光源に関しては、装置の開発を完了し、ミリ波源の冷却試験を行って、実際にチリの空と同程度の輻射環境を再現出来る事を確認した。以上の通り、新型の観測装置POLARBEAR-2の開発は本研究を通してほぼ完了している。今後はPOLARBEAR-2で用いる検出器が共同研究機関から到着し次第クライオスタットに搭載し、基準偏光源を用いて性能を確認した後チリで望遠鏡に設置し本観測を開始する予定である。レシーバ開発の経過及び開発にともない得られた新たなミリ波技術等の成果については論文(発表論文④~⑨)、学会等(学会発表①~⑬)で報告している。

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9件)

①著者名:P. A. R. Ade, M. Hasegawa (20番目)
他72名
論文標題:A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-Mode Polarization Power Spectrum at Sub-Degree Scales with POLARBEAR
雑誌名:Astrophys. J
査読の有無:有
巻:794
発行年:2014
頁:171
DOI: 10.1088/0004-637X/794/2/171

②著者名:P. A. R. Ade, M. Hasegawa (20番目)
他70名
論文標題:Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum with the POLARBEAR Experiment
雑誌名:Physical Review Letters
査読の有無:有
巻:113
発行年:2014
頁:021301
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.021301

③著者名:P. A. R. Ade, M. Hasegawa (19番目)
他68名
論文標題:Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-correlation with the Cosmic Infrared Background
雑誌名:Physics Review Letters
査読の有無:有
巻:112
発行年:2014
頁:131302
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.131302

④著者名:K. Hattori, M. Hasegawa (7番目)
他14名
論文標題:Adaptation of frequency-domain readout for Transition Edge Sensor bolometers for the POLARBEAR-2 Cosmic Microwave Background Experiment.
雑誌名:Nucl. Instrum. Meth.
査読の有無:有
巻:A732
発行年:2013
頁:299-302
DOI: 10.1016/j.nima.2013.07.052

⑤ 著者名: Masaya Hasegawa
論文標題: Cosmology and particle physics with POLARBEAR
雑誌名: Proceedings of Science
査読の有無: 無
巻: ICHEP2012
発行年: 2013
頁: 440
DOI: 無

⑥ 著者名: T.Tomaru, M.Hasegawa(16 番目) 他 46 名
論文標題: The POLARBEAR-2 experiment
雑誌名: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng
査読の有無: 無
巻: 8452
発行年: 2012
頁: 84521H
DOI: 10.1117/12.926158

⑦ 著者名: T.Matsumura, M.Hasegawa(14 番目) 他 46 名
論文標題: POLARBEAR-2 optical and polarimeter designs
雑誌名: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.
査読の有無: 無
巻: 8452
発行年: 2012
頁: 84523E
DOI: 10.1117/12.926770

⑧ 著者名: Z.Kermish, M.Hasegawa (18 番目) 他 52 名
論文標題: The POLARBEAR Experiment
雑誌名: Proc. SPIE Int. Opt. Eng.
査読の有無: 無
巻: 8452
発行年: 2012
頁: 84521C
DOI: 10.1117/12.926354

⑨ 著者名: K.Arnold, M.Hasegawa (17 番目) 他 54 名
論文標題: The bolometric focal plane array of the Polarbear CMB experiment.
雑誌名: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng
査読の有無: 無
巻: 8452
発行年: 2012
頁: 84521D
DOI: 10.1117/12.927057

① 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “POLARBEAR-2 レシーバシステムの開発 VIII”
学会等名: 日本物理学会
発表年月日: 2015 年 3 月 21 日
発表場所: 早稲田大学 (東京・新宿区)

② 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “CMB 偏光観測実験 POLARBEAR の最新の結果と今後の展望”
学会等名: 日大理工・益川塾連携素粒子物理学シンポジウム
発表年月日: 2014 年 11 月 9 日
発表場所: 京都産業大学 (京都・京都市)

③ 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “地上の CMB 偏光観測実験による原始重力波探索の現状と今後の展望”
学会等名: 日本物理学会
発表年月日: 2014 年 9 月 20 日
発表場所: 佐賀大学 (佐賀・佐賀市)

④ 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “POLARBEAR-2 レシーバシステムの開発 VII”
学会等名: 日本物理学会
発表年月日: 2014 年 9 月 19 日
発表場所: 佐賀大学 (佐賀・佐賀市)

⑤ 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “POLARBEAR-2 -a new CMB polarization receiver for exploring the physics of inflation and neutrino mass-”
国際学会名: 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2014)
発表年月日: 2014 年 7 月 4 日
発表場所: バレンシア (スペイン)

⑥ 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “POLARBEAR-2 A Brand-new CMB polarization receiver on the Simons Array telescopes”
学会等名: CMB2014
発表年月日: 2014 年 6 月 1 日
発表場所: 理化学研究所 (埼玉・和光市)

⑦ 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “POLARBEAR2 の設計と統合試験”
学会等名: ミリ波・サブミリ波の観測システム
発表年月日: 2013 年 11 月 30 日
発表場所: 倉敷シーサイドホテル (岡山・倉敷)

⑧ 発表者: 長谷川雅也
発表標題: “POLARBEAR-2 実験の為の SQUID アンパ基礎特性の評価”
学会等名: 日本物理学会

発表年月日：2013年9月20日
発表場所：高知大学（高知・高知市）

⑨発表者：長谷川雅也
発表標題：“POLARBEAR 実験における CMB 偏光 B モード探索の現状”
学会等名：日本天文学会
発表年月日：2013年9月10日
発表場所：東北大学（宮城・仙台市）

⑩発表者：長谷川雅也
発表標題：“宇宙背景放射偏光観測によるニュートリノ質量の測定”
学会等名：ニュートリノフロンティア研究会
発表年月日：2013年8月31日
発表場所：東京工業大学（東京・目黒区）

⑪発表者：長谷川雅也
発表標題：“Laboratory Calibration System for Large Focal Planes with Superconducting CMB detectors”
国際学会名：CMB2013
発表年月日：2013年6月12日
発表場所：沖縄（日本）

⑫発表者：長谷川雅也
発表標題：“POLARBEAR 実験 -偏光角較正装置の開発-”
学会等名：日本物理学会
発表年月日：2013年3月29日
発表場所：広島大学（広島・広島市）

⑬発表者：長谷川雅也
発表標題：“POLARBEAR 実験 -偏光検出器の特性評価-”
学会等名：日本物理学会
発表年月日：2012年9月14日
発表場所：京都産業大学（京都・京都市）

⑭発表者：長谷川雅也
発表標題：“Cosmology and Particle Physics with POLARBEAR”
国際学会名：36th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2012)
発表年月日：2012年7月7日
発表場所：メルボルン（オーストラリア）

⑮発表者：長谷川雅也
発表標題：“POLARBEAR 実験の概要”
学会等名：「背景放射で拓く宇宙創成の物理」領域シンポジウム2012
発表年月日：2012年7月26日
発表場所：国立天文台（東京・三鷹）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://cmb.kek.jp>

6. 研究組織

(1)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・助教
研究者番号：60435617

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：