

令和元年6月7日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220709

研究課題名（和文）宇宙マイクロ波背景放射偏光観測装置POLARBEAR-2で探る宇宙創生の物理学

研究課題名（英文）Physical cosmology with POLARBEAR-2: a new instrument for the cosmic microwave background polarization measurements

研究代表者

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 159,300,000円

研究成果の概要（和文）：熱いビッグバン以前を記述するインフレーション宇宙仮説が予言する原始重力波を検出すれば、科学史上最大の発見になる。現在これを可能にする唯一の手段が、宇宙マイクロ波背景放射（CMBと略す）の偏光観測である。本計画は、現在世界トップレベルの感度を達成しているPOLARBEAR-1 検出器より感度が6倍高く複数周波数を同時に観測できるPOLARBEAR-2を開発し、2019年初頭にファーストライトを得ることができた。POLARBEAR-1検出器を用いて実施した観測のデータ解析も行い、複数の観測成果を発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CMB偏光を用いた観測は、科学のグランドチャレンジを行う本道であり、そのための技術開発で世界のトップレベルに立つことは将来の大発見への重要な布石である。したがって、現在のデータ解析、装置の開発の両面が大きな学術的意義をもつ。世界の中で科学のグランドチャレンジに貢献することは、我が国が国際社会の中で目置かれる存在となることに大きく寄与する。さらに、そこで開発される新しい技術は、将来の国民の生活に資する技術の基礎となるため、大きな社会的意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：The most promising hypothesis for describing the Universe before the Big Bang is cosmic inflation, which predicts the existence of primordial gravitational waves. If observed, it would be one of the biggest scientific discoveries of all time. The only method to make this possible is observations of the polarization of the cosmic microwave background (CMB).

In this project, we successfully developed a new receiver system POLARBEAR-2, and got the first light at the beginning of 2019. We also analyzed data from observations with the POLARBEAR-1 detector system and published observation results.

研究分野：素粒子宇宙物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射 CMB インフレーション宇宙仮説 電波望遠鏡

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

本計画代表者が領域代表をつとめた科研費・新学術領域研究「背景放射で拓く宇宙創成の物理インフレーションからダークエイジまで」(平成21年度-25年度,領域番号2110)により、POLARBEAR-1 検出器が稼働し、CMB 偏光の観測が格段の進展を遂げたが、原始重力波の信号は未だ見つかっていない状態であった。また、Planck 衛星の観測により、POLARBEAR-1 のような単一周波数による観測では前景放射の分離が難しく、複数周波数による観測の重要性が明らかになった状態であった。

## 2. 研究の目的

本計画の目的は、稼働中の POLARBEAR-1 検出器より感度が6倍高く、かつ複数周波数による観測が実施できる POLARBEAR-2 を開発し、新たに観測を実施して、原始重力波の発見をめざすことである。さらに、重力レンズ効果に起因する CMB 偏光を観測し、ニュートリノの質量をこれまでに達成された感度を超えて測定することも付随する目標である。

## 3. 研究の方法

直径3.5メートルの主鏡を持つ望遠鏡をチリ・アタカマ高地に配備し、そこに現在開発中の POLARBEAR-2 検出器を搭載し、観測を実施する。POLARBEAR-2 の大きな特長は、世界初の二波長(95 GHz と 150 GHz)同時読み出し TES ボロメータを7,588個搭載した CMB 観測史上最大級の検出器アレイを搭載することである。

平成29年度研究進捗評価で以下の指摘を受けた

### (1) (意見等)

本研究は、インフレーション宇宙膨張の存在を観測的に明らかにする、宇宙マイクロ波(CMB)偏光観測計画(POLARBEAR)の装置開発及びそれを用いた CMB 観測を計画したプロジェクトである。現代科学のグランドチャレンジと言うべき計画であるが、米国チーム担当の検出器製作の遅れから、全体計画が遅れている。それを挽回すべく一層の努力が必要と思われる。

今後、国内での装置組み上げ・調整・試験などを進めることで、計画の終了時までには観測が開始できる見込みであるが、観測時間は短縮される可能性がある。

### (2) (研究代表者のみに通知するコメント)

装置開発完了後、チリ現地での観測時間が、当初の計画より短縮される可能性がある。観測計画の再検討が必要ではないか。

これを受けて、高エネ研における総合試験の加速、最適化を行なった。具体的には、検出器システムの試験の一部は、チリで望遠鏡に設置した後に行うこととした。これにより、高エネ研での試験期間を短縮できる。例えば、全 TES ボロメータの試験を想定していたフーリエ分光計による試験は、高エネ研ではサンプリング試験とする。期間の短縮とそれにより増えるリスクを評価し、最適解を求めて実行する方法を取った。また、日本での試験を加速するために、当初予定より多くの人員が米国から派遣された。

## 4. 研究成果

(1) POLARBEAR-2検出器システムの開発に成功した。高エネ研におけるシステム試験を経て、2018年秋にチリへ移設し、2019年初頭にファーストライトを得た。現在試験観測を続けながらその性能評価が進展している。図1は高エネ研での試験完了直後のPOLARBEAR-2 検出器システムである。なお、POLARBEAR-2 用に本研究で技術開発に成功した装置(例としてはアルミナを用いた赤外線フィルター)は、他の宇宙背景放射観測実験にも用いられており、事実上の世界業界標準の一つになりつつある。

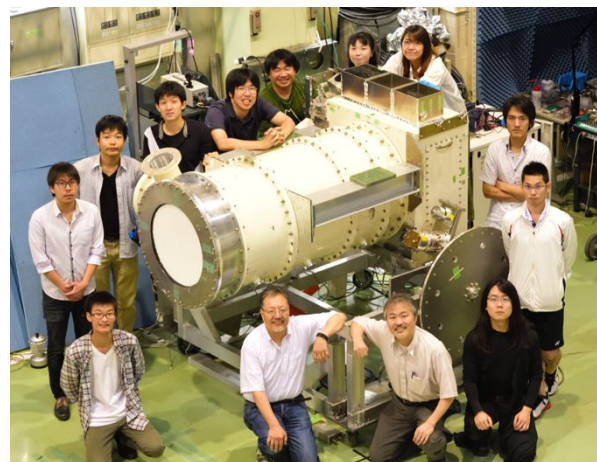
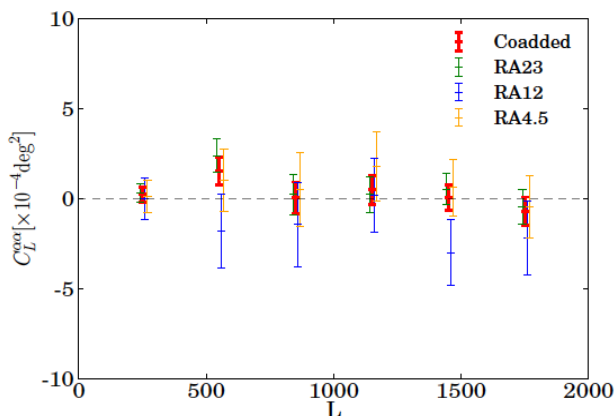


図 1 : POLARBEAR-2 検出器システム

(2) POLARBEAR-1では2015年9月にパリティを破る新しい物理による宇宙論的複屈折効果の探索結果を発表した。光子と相互作用する新しい擬スカラー粒子などがあると、偏光が回転する効果（複屈折効果）が生まれ、相関がないはずのCMB偏光Bモード（パリティが負のモード）とEモード（パリティが正のモード）の間に相関が生じる。POLARBEAR-1で得られたCMB偏光データを用いて偏光の回転角を測定し、その相関を求めた。観測結果を図2に示す。得られた制



限は従来の結果を約15倍改善する世界最高の結果である。宇宙背景放射を用いて素粒子物理へ貢献ができる良い例を示したと言える、今後の新しい流れを作ったPOLARBEAR-1では、このように、主たる科学目標以外の新しい物理の探索もおこなっている。

図2：偏光回転角のパワースペクトル測定結果

(3) POLARBEAR-1実験では2014年から、偏光変調器という新しい装置を導入した観測を行っている。偏光変調器の導入により、より広域の天空を観測し、より波数の小さいゆらぎ（つまり大角度相関によるゆらぎ）の観測を行う。それにより波数80程度で最大となる原始重力波の信号を検出することを目指している。2014年の観測データを用いて、確かに波数の小さい領域でも1/fノイズを小さくできることなどを示した論文を2017年に発表した。図3（左）はPOLARBEAR望遠鏡の側面図で、Prime focusと書かれた位置に偏光変調器を導入した。複屈折するサファイアを2Hzで連続回転させる装置であり、これにより回転の周波数の4倍の周波数で空からくる偏光信号が回転させることができる。図3（右）は観測結果の一例であり、一番下の赤い線が偏光変調器を用いた測定結果である。1/fノイズによるノイズスペクトルの屈曲点は32mHzであり、これは波数に換算すると39に相当する。原始重力波によるBモード信号のピークが波数およそ80のところにあるので、ノイズを十分に抑えることができたと言える。POLARBEARのような大きな口径を持つ望遠鏡でこの波数に到達したのは世界初めてであり、今後の観測へ向けた大きな技術的成果と言える。

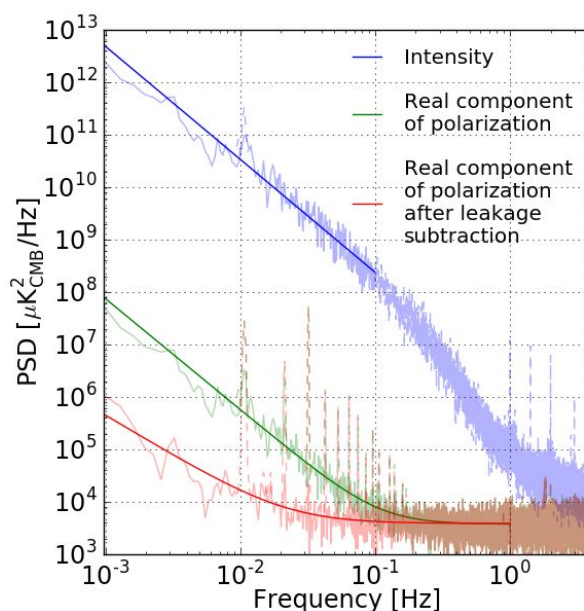
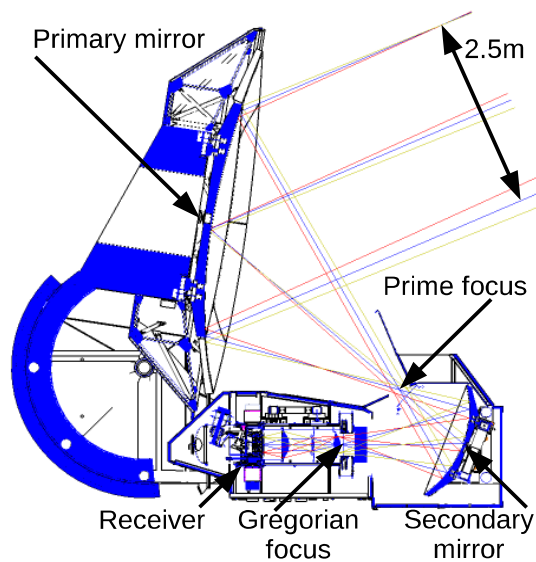


図3：(左)POLARBEARの望遠鏡側面図。Prime focusと書かれている場所に偏光変調機を置いて観測を行なっている。(右)広天域の観測結果の一例。一番下の赤い線が偏光変調器を用いた場合のノイズ測定結果を示す。

(4) POLARBEAR-1 による B-mode 観測を実施し、結果を論文発表した。重力レンズ B モードの強度に関する新しい測定結果を得た。POLARBEAR-1 単独で、統計誤差と系統誤差の両者を考慮して 3.1 シグマの有意度で信号を捉えた。図 4 に測定結果を示す。系統誤差が非常に小さいことも確かめ、将来のより高統計の測定における礎を築いた。

(5) POLARBEAR のデータ解析から、地上実験で克服する必要がある新しい効果を発見した。それは、氷雲が地上からの放射を反射することによりできる偏光の効果である。この効果は、POLARBEAR で導入しているような偏光変調器では取り除けないため、将来のより高統計の観測においては、何らかの手段で影響を十分小さく抑える必要がある。

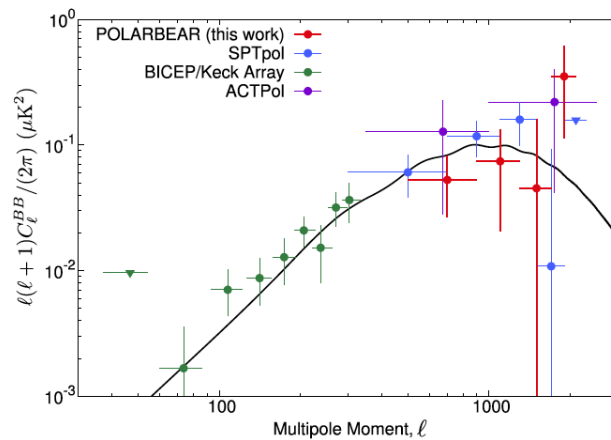


図 4 : B-mode パワースペクトルの測定結果。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 17 件)

(査読あり) "Measurements of tropospheric ice clouds with a ground-based CMB polarization experiment, POLARBEAR", POLARBEAR Collaboration, S. Takakura, Y. Chinone (12 番目), M. Hasegawa (19 番目), M. Hazumi (20 番目), N. Katayama (23 番目), H. Nishino (35 番目), O. Tajima (44 番目), (他 41 名、総著者 48 名), *Astrophys.J.* 870 (2019) no.2, 102.

(査読有) "A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-Mode Polarization Power Spectrum at Sub-Degree Scales from 2 years of POLARBEAR Data", POLARBEAR Collaboration (P.A.R. Ade et al.). May 8, 2017. 16 pp., *Astrophys.J.* 848 (2017) no.2, 121, DOI: 10.3847/1538-4357/aa8e9f.

(査読有) "Performance of a continuously rotating half-wave plate on the POLARBEAR telescope", S. Takakura, Y. Chinone (11 番目), M. Hasegawa (21 番目), M. Hazumi (23 番目), N. Katayama (30 番目), H. Nishino (42 番目), O. Tajima (51 番目), 他 45 名, *JCAP* 05(2017)008. 査読有り, (2017), doi:10.1088/1475-7516/2017/05/008

(査読なし) "POLARBEAR-2: an instrument for CMB polarization measurements", POLARBEAR Collaboration, Y. Inoue (1 番目), Y. Chinone (13 番目), M. Hasegawa (31 番目), M. Hazumi (33 番目), N. Katayama (42 番目), H. Nishino (62 番目), O. Tajima (80 番目), T. Tomaru (85 番目), 他 81 名, *Proc.SPIE Int.Soc.Opt.Eng.* 9914 (2016) 991411.

(査読なし) "Design and development of an ambient-temperature continuously-rotating achromatic half-wave plate for CMB polarization modulation on the POLARBEAR-2 experiment", C. A. Hill, S. Beckman, Y. Chinone, N. Goecker-Wald, M. Hazumi, B. Keating, A. Kusaka, A. T. Lee, F. Matsuda, R. Plambeck, A. Suzuki, S. Takakura, *Proc.SPIE* 9914 (2016) 99142U.

(査読あり) "Making maps of cosmic microwave background polarization for B-mode studies: The POLARBEAR example", D. Poletti, G. Fabbian, M. Le Jeune, J. Peloton, Y. Chinone (11 番目), M. Hasegawa (20 番目), M. Hazumi (21 番目), N. Katayama (27 番目), O. Tajima (47 番目), 他 40 名, *A&A* (2016) DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629467>.

(査読あり) "Development of readout electronics for POLARBEAR-2 Cosmic Microwave Background experiment", K. Hattori, M. Hasegawa (10 番目), M. Hazumi (11 番目), 他

19名, J.Low.Temp.Phys. 184 (2016) 512.  
 (査読あり) “The Polarbear-2 and the Simons Array Experiments”, A. Suzuki, Y. Chinone(13番目), M. Hasegawa (32番目) M. Hazumi (34番目), N. Katayama(44番目), H. Nishino(63番目), O. Tajima (80番目), T. Tomaru(85番目), 他82名, J.Low.Temp.Phys. 184 (2016) 805.  
 (査読あり) “Two-layer anti-reflection coating with mullite and polyimide foam for large-diameter cryogenic infrared filters”, Y. Inoue, T. Hamada, M. Hasegawa, M. Hazumi, Y. Hori, A. Suzuki, T. Tomaru, T. Matsumura, T. Sakata, T. Minamoto, T. Hirai, Applied optics Vol. 55, Issue 34, pp. D22-D28 (2016).  
 (査読あり) “POLARBEAR constraints on cosmic birefringence and primordial magnetic fields”, POLARBEAR Collaboration, P. A. R. Ade, Y. Chinone(9番目), M. Hasegawa (24番目) M. Hazumi(26番目), N. Katayama(35番目), H. Nishino(55番目), O. Tajima (78番目), T. Tomaru(81番目), 他78名, Phys. Rev. D92 (2015) 123509.  
 (査読あり) “MODELING ATMOSPHERIC EMISSION FOR CMB GROUND-BASED OBSERVATIONS”, POLARBEAR Collaboration, J. Errard, Y. Chinone(11番目), M. Hasegawa (23番目), M. Hazumi (25番目), N. Katayama(33番目), H. Nishino(49番目), O. Tajima (69番目), T. Tomaru(72番目), 他68名, Astrophys. J. 809 (2015) 63.  
 (査読あり) “Development of readout electronics for POLARBEAR-2 Cosmic Microwave Background experiment”, K. Hattori, M. Hasegawa(10番目), M. Hazumi(11番目) 他18名, J. Low. Temp. Phys. 184, no.1-2, 512-518 (2016) 10.1007/s10909-015-1448-x [arXiv:1512.07663].

〔学会発表〕(計 54 件)

(招待講演)M. Hazumi, “Future constraints on inflation”, Oct. 11, 2018, IPA 2018: Interplay between Particle and Astroparticle physics, Cincinnati, OH, USA.  
 (招待講演)M. Hazumi, “CMB, cosmology, other astroparticle physics”, July 11, 2018, ICHEP 2018, Seoul, Korea.  
 “Cosmology and Particle physics with POLARBEAR and Simons Array”, M. Hasegawa, ICHEP2016 : 38th International Conference on High Energy Physics, 2016年8月  
 “POLARBEAR and Simons Array: Results and Future Prospects for CMB Polarization Measurements”, H. Nishino, CosPA2015: 12th International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics, 2015年10月  
 (招待講演) “A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-Mode Polarization with POLARBEAR”, Y. Chinone, Asia-Pacific Regional IAU Meeting 2014 (APRIM 2014), 2015年8月  
 “Cosmic Inflation and Neutrino Masses at POLARBEAR CMB Polarization Experiment”, M. Hasegawa, 25th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2015), 2015年6月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

1 報道関連情報

- 雑誌Newton平成29年4月号
- 産経新聞、平成28年1月11日
- 雑誌パリティ平成27年1月号
- しんぶん赤旗、平成26年10月24日
- 読売新聞、平成26年8月24日

2 アウトリーチ活動情報

- 集英社新書『宇宙背景放射「ビッグバン以前」の痕跡を探る』羽澄昌史著、2015年10月、10000部
- 研究代表者が、以下の講演等を行った。
  - 羽澄昌史、平成基礎科学財団主催・楽しむ科学教室おける講演「ビッグバン以前の宇宙を探る」、平成28年5月22日
  - 羽澄昌史、科学と音楽の饗宴シンポジウム(高エネ研・つくば市共同実施)に

- おける講演「宇宙のビッグバンとそれ以前」、平成27年11月15日
- 羽澄昌史、日本科学未来館における講演「宇宙誕生の光をとらえる」、平成27年2月28日
  - 羽澄昌史、カブリIPMU一般公開における講演「宇宙のはじまりを探る」、平成26年10月24日
  - 羽澄昌史、朝日カルチャーセンター講演「ビッグバン以前の宇宙からの重力波実験の現場から」、平成26年8月23日
  - 羽澄昌史、読売テクノフォーラムシンポジウム「宇宙と時空の謎に挑む」における講演、平成26年7月26日、参加者約360人

3 ホームページ等：<http://cmb.kek.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：長谷川 雅也  
ローマ字氏名：(HASEGAWA, Masaya)  
所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構  
部局名：素粒子原子核研究所  
職名：研究機関講師  
研究者番号(8桁)：60435617

研究分担者氏名：片山 伸彦  
ローマ字氏名：(KATAYAMA, Nobuhiko)  
所属研究機関名：東京大学  
部局名：カブリ数物連携宇宙研究機構  
職名：教授  
研究者番号(8桁)：50290854

研究分担者氏名：田島 治  
ローマ字氏名：(TAJIMA, Osamu)  
所属研究機関名：京都大学  
部局名：理学部  
職名：准教授  
研究者番号(8桁)：80391704

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：都丸 隆行  
ローマ字氏名：(TOMARU, Takayuki)  
所属研究機関名：自然科学研究機構  
部局名：国立天文台  
職名：教授  
研究者番号(8桁)：80391712

研究協力者氏名：茅根 裕司  
ローマ字氏名：(CHINONE, Yuji)  
所属研究機関名：カリフォルニア大学  
部局名：バークレー校  
職名：アシスタントプロジェクトサイエンティスト  
研究者番号(8桁)：80391704

研究協力者氏名：西野 玄記  
ローマ字氏名：(NISHINO, Haruki)  
所属研究機関名：東京大学  
部局名：ビッグバン宇宙国際研究センター  
職名：特任助教  
研究者番号(8桁)：80706804