

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21111002

研究課題名(和文)宇宙マイクロ波背景放射偏光測定で探る超高エネルギー物理

研究課題名(英文)Ultra high energy physics with measurements of cosmic microwave background polarization

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) 310,900,000円、(間接経費) 93,270,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光に着目し、その精査をおこなった。チリ・アタカマの標高5000メートルを超える観測サイトにおける観測実験QUIETとPOLARBEARを推進した。両方の実験から観測結果を発表することができた。特に、POLARBEARでは、CMB偏光のみを用いて重力レンズ効果を観測することに世界で初めて成功した。

さらに、究極の全天CMB偏光精密観測をおこなう将来の科学衛星LiteBIRDの設計と開発を様々な専門を持つ研究者が連携しつつ推進した。その結果、日本学術会議のマスタープラン2014への掲載が決定し、最重要とされる重点大型研究計画の一つに選ばれた。

研究成果の概要(英文)： We performed precision measurements of cosmic microwave background polarization with QUIET and POLARBEAR telescopes deployed in the Atacama desert of Chile at an altitude above 5000 m. We succeeded to publish results of measurements from both projects. In particular, we observed the effect of gravitational lensing with CMB polarization alone for the first time in history.

We also promoted design and R&D of a future satellite named LiteBIRD, which is designed to measure CMB polarization over the full sky with the ultimate precision. This work was done as the collaborative effort of researchers with various expertise. As a result, LiteBIRD was selected as one of the most important large-scale projects of all areas of research in Japan by the Science Council of Japan (SCJ), and was mentioned so in the Master Plan 2014 by SCJ.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙背景放射 インフレーション 重力波

1. 研究開始当初の背景

宇宙はどのように始まったのか？ どのような物理法則が宇宙を創り、進化させたのか？ 宇宙マイクロ波背景放射（以下 CMB と略す）観測はこれらの問いに答えるための最も重要な手段である。CMB 温度観測衛星 COBE や WMAP は晴れ上がり時の宇宙を観測し、素晴らしい成果をもたらした。しかし、晴れ上がり以前の宇宙は光に対し完全に不透明で、CMB の温度観測でそれより過去の宇宙を直接見ることはできない。このため、CMB の温度観測から超高エネルギー状態の初期宇宙について確実な情報を得ることは不可能に見える。例えば WMAP の観測はインフレーションのモデルにある程度の制限を課すことに成功したが、インフレーションがいつ終わったかさえ決定できなかった。

この限界を打ち破る最良の方法が、CMB の偏光 B モード測定である。インフレーションは量子ゆらぎを起源として、密度ゆらぎとともに原始重力波を生成する。この原始重力波は物質の影響をほとんど受けずに現在まで残り、我々に宇宙誕生時を直接見通す目を提供してくれる。原始重力波は微弱で直接検出は不可能だが、CMB の偏光空間分布に渦状の痕跡(電磁気学における磁場との対比から「B モード」と称す)を残す。多くのインフレーションモデルでこの成分が検出可能と予言されている。B モードの視野角ごとのパワースペクトルの発見・決定は、原始重力波の発見となり、種々の微視的理論に基づくインフレーションモデルの選別、ひいては超弦理論など背後にある究極理論の候補の直接検証を可能とする。さらに、CMB 偏光 B モードの小角度の揺らぎを見る事により、原始重力波とは異なる重力レンズ効果を観測でき、その情報からニュートリノ質量についての情報が得られる。

2. 研究の目的

- (1) 地上実験 (QUIET, POLARBEAR) を推進し WMAP の 10 倍の感度で B モード偏光成分測定を行い、重力レンズによる B モードを確実に発見し、原始重力波の探索を行う。
- (2) 10 年後に世界に先駆けて WMAP の 100 倍の感度で全天にわたる決定的な CMB 偏光観測をおこなう科学衛星を打ち上げるための基本設計を学際的な視点で推進する。

3. 研究の方法

- (1) チリ・アタカマ高地にて、QUIET 実験および POLARBEAR 実験を推進する。QUIET 実験は低い周波数(40GHz、90GHz)、POLARBEAR 実験は高い周波数(150GHz)を担当する。
- (2) 究極感度を達成する LiteBIRD 衛星のデザインを研究する。POLARBEAR 実験で使用する超伝導検出器アレイや新学

術領域研究「宇宙創成の物理」の他計画研究で開発する超伝導検出器デバイスなどを想定して、成り立ちを検討していく。

4. 研究成果

(1) POLARBEAR の初期観測結果
チリ・アタカマ高地(標高 5150m)に設置した POLARBEAR 望遠鏡を用いて 2012 年から 2013 年まで観測を行った。検出器の雑音レベルとして $23\mu\text{K}\sqrt{\text{s}}$ を達成した。データ解析結果を 2013 年 12 月と 2014 年 3 月に発表した。合計三本の論文のうち二本はすでに Physical Review Letters に掲載が決定(関係論文リスト番号 1,2)され、どちらも Editors' Suggestion に選ばれた。これらの論文の成果のうち、特筆すべきこととしては、世界ではじめて CMB 偏光のみを用いて重力レンズ効果の観測に成功したこと(トータルで 4.7 シグマの有意度)が挙げられる(図 1)。

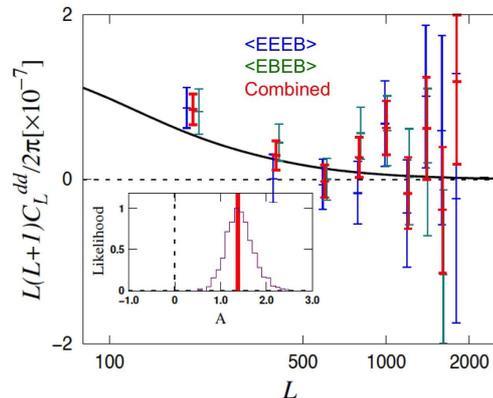


図 1: POLARBEAR の観測により得られた重力レンズパワースペクトル

(2) LiteBIRD 衛星のデザイン

代表的なインフレーションモデルの予言を全て検証することができる究極感度の衛星計画 LiteBIRD を提案した。宇宙物理学委員会の承認を受けたワーキンググループが結成され、領域の総力をあげて基本設計を進めた。衛星のミッション要求の設定から概念設計の完成に至る一連の検討を、JAXA のシステムズ・エンジニアリング推進室、ミッション・デザイン・サポートグループ、衛星機器メーカーなどと共同で進め、実現性の高い概念設計へ発展させることに成功した(図 2)。



図 2: LiteBIRD 外観図

(3) QUIETの観測結果

チリ・アタカマ高地(標高 5080m)に設置した QUIET 望遠鏡を用いて 2008 年から 2010 年まで観測した Q (43GHz) および W バンド (95GHz) のデータを解析し、世界で初めて CMB 偏光 E モードの第 3 ピークまで観測に成功した(図 3)。原始重力波の強度パラメータ r に関しては、Q バンド観測より $r = 0.35 (+1.06 -0.87)$, W バンド観測より $r = 1.1 (+0.9 -0.8)$, という結果を得た。特筆すべきこととして、系統誤差のレベルを $r=0.01$ のときに期待される信号レベルより小さく抑えることに世界で初めて成功したことが挙げられる。

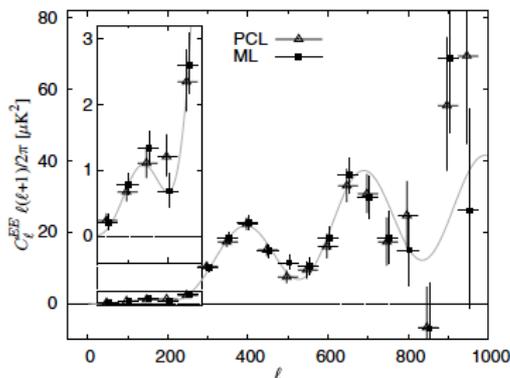


図 3: QUIET の CMB 偏光 E モードパワースペクトル観測結果 (W バンド)

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 2 2 件) 全て査読付き

1. "Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum with the POLARBEAR experiment", POLARBEAR Collaboration, P.A.R. Ade, Y. Akiba, A.E. Anthony, K. Arnold, M. Atlas, D. Barron, D. Boettger, J. Borrill, S. Chapman, Y. Chinone, M. Dobbs, T. Elleflot, J. Errard, G. Fabbian, C. Feng, D. Flanigan, A. Gilbert, W. Grainger, N.W. Halverson, M. Hasegawa, K. Hattori, M. Hazumi, W.L. Holzapfel, Y. Hori, J. Howard, P. Hyland, Y. Inoue, G.C. Jaehnig, A. Jaffe, B. Keating, Z. Kermish, R. Keskitalo, T. Kisner, M. Le Jeune, A.T. Lee, E.M. Leitch, E. Linder, M. Lungu, F. Matsuda, T. Matsumura, X. Meng, N.J. Miller, H. Morii, S. Moyerman, M.J. Myers, M. Navaroli, H. Nishino, H. Paar, J. Peloton, E. Quealy, G. Rebeiz, C.L. Reichardt, P.L. Richards, C. Ross, I. Schanning, D.E. Schenck, B.D. Sherwin, A. Shimizu, C. Shimmin, M. Shimon, P. Siritanasak, G. Smecher, H. Spieler, N. Stebor, B. Steinbach, R. Stompor, A. Suzuki, S. Takakura, A. Tikhomirov, T. Tomaru, B. Wilson, A. Yadav, O. Zahn Phys. Rev. Lett. 112, 131302 (2014). DOI:10.1103/PhysRevLett.112.131302
2. "Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-correlation with the Cosmic Infrared Background", POLARBEAR Collaboration, P.A.R. Ade, Y. Akiba, A.E. Anthony, K. Arnold, M. Atlas, D. Barron, D. Boettger, J. Borrill, C. Borys, S. Chapman, Y. Chinone, M. Dobbs, T. Elleflot, J. Errard, G. Fabbian, C. Feng, D. Flanigan, A. Gilbert, W. Grainger, N.W. Halverson, M. Hasegawa, K. Hattori, M. Hazumi, W.L. Holzapfel, Y. Hori, J. Howard, P. Hyland, Y. Inoue, G.C. Jaehnig, A. Jaffe, B. Keating, Z. Kermish, R. Keskitalo, T. Kisner, M. Le Jeune, A.T. Lee, E.M. Leitch, E. Linder, M. Lungu, F. Matsuda, T. Matsumura, X. Meng, N.J. Miller, H. Morii, S. Moyerman, M.J. Myers, M. Navaroli, H. Nishino, H. Paar, J. Peloton, E. Quealy, G. Rebeiz, C.L. Reichardt, P.L. Richards, C. Ross, K. Rotermund, I. Schanning, D.E. Schenck, B.D. Sherwin, A. Shimizu, C. Shimmin, M. Shimon, P. Siritanasak, G. Smecher, H. Spieler, N. Stebor, B. Steinbach, R. Stompor, A. Suzuki, S. Takakura, A. Tikhomirov, T. Tomaru, B. Wilson, A. Yadav, O. Zahn Phys. Rev. Lett. 112, 131302 (2014). DOI:10.1103/PhysRevLett.112.131302
3. "Mission Design of LiteBIRD", (69 名) T. Matsumura, M. Hazumi et al., J. Low Temp. Phys., Published online, 1-8, (2014). DOI:10.1007/s10909-013-0996-1
4. "The POLARBEAR Cosmic Microwave Background Polarization Experiment", (62 名) Y. Chinone (8 番目), M. Hasegawa (18 番目), K. Hattori (19 番目), M. Hazumi (20 番目), T. Matsumura (35 番目), H. Morii (38 番目), H. Nishino (41 番目), A. Shimizu (49 番目), T. Tomaru (59 番目) et al., J. Low Temp. Phys., Published online, 1-7 (2014). DOI:10.1007/s10909-013-1065-5

5. "Adaptation of frequency-domain readout for Transition Edge Sensor bolometers for the POLARBEAR-2 Cosmic Microwave Background experiment", K. Hattori, K. Arnold, D. Barron, M. Dobbs, T. de Haan, N. Harrington, M. Hasegawa, M. Hazumi, W. L. Holzapfel, B. Keating, A. T. Lee, H. Morri, M. J. Myers, G. Smecher, A. Suzuki, T. Tomaru, Nucl. Instrum. and Meth. A, 732, 299-302 (2013). DOI:10.1016/j.nima.2013.07.052
6. "The Q/U Imaging Experiment Instrument", QUIET Collaboration (54名), Y. Chinone(4番目), M. Hasegawa(24番目), M. Hazumi(25番目), O. Tajima(49番目) et al., Astrophys. J., 768, 9-1:28 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/768/1/9
7. "Second Season QUIET Observations: Measurements of the CMB Polarization Power Spectrum at 95 GHz", QUIET Collaboration (50名), Y. Chinone(5番目), M. Hasegawa(22番目), M. Hazumi(23番目), K. Ishidoshiro(25番目), M. Nagai(34番目), O. Tajima(47番目) et al., Astrophys. J., 760, 145-1:10 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/760/2/145
8. "Innovative Demodulation Scheme for Coherent Detectors in CMB Experiments", K. Ishidoshiro, Y. Chinone, M. Hasegawa, M. Hazumi, M. Nagai, O. Tajima, Rev. Sci. Instrum., 83, 56104 (2012). DOI:10.1063/1.4719922
9. "Ethernet-Based DAQ System for QUIET-II Detectors", M. Nagai, K. Ishidoshiro, T. Higuchi, M. Ikeno, M. Hasegawa, M. Hazumi, O. Tajima, M. Tanaka, T. Uchida, J Low Temp Phys, 167, 689-694 (2012). DOI:10.1007/s10909-012-0561-3
10. "Readout system with on-board demodulation for CMB polarization experiments using coherent polarimeter arrays", K. Ishidoshiro, M. Nagai, T. Higuchi, M. Hasegawa, M. Hazumi, M. Ikeno, O. Tajima, M. Tanaka and T. Uchida, Nuclear Science, IEEE Trans., 59, 647-655 (2012). DOI:10.1109/TNS.2012.2195029
11. "First Season QUIET Observations: Measurements of CMB Polarization Power Spectra at 43 GHz in the Multipole Range $25 \leq \ell \leq 475$ ", QUIET Collaboration (50名), Y. Chinone(4番目), M. Hasegawa(24番目), M. Hazumi(25番目), O. Tajima(46番目) et al., Astrophys. J., 741, 111-1:18 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/741/2/111
12. "Calibration System with Cryogenically-Cooled Loads for Cosmic Microwave Background Polarization Detectors", M. Hasegawa, O. Tajima, Y. Chinone, M. Hazumi, K. Ishidoshiro and M. Nagai, Rev. Sci. Instrum., 82, 5-054501 (2011). DOI:10.1063/1.3590931
- [学会発表](計268件)
以下に主な招待講演のみ列挙する.
1. "CMB polarization experiments", M. Hazumi, KIAS-NCTS Joint Workshop on Particle Physics, String theory and Cosmology, February 9 - 15, 2014, High1 resort, Korea.
 2. "LiteBIRD - a future satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection", M. Hazumi, 9th East Asian Meeting on Astronomy, October 14 - 18, 2013, NCU, Taiwan.
 3. "LiteBIRD - A Small Satellite for the Studies of B-mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection", M. Hazumi, Beyond CORE Workshop, June 25 - 29, 2012, Paris, France.
 4. "Search for B-Modes in CMB Polarization -QUIET and Other Experiments", O. Tajima, Rencontres de Moriond EW 2011, March 13 - 20, 2011, La Thuile, Italy.
 5. "Probing Inflation with CMB Polarization Measurements -QUIET, POLARBEAR and beyond", M. Hazumi, COSMO/CosPA 2010, September 27 - October 1, 2010, Tokyo, Japan.
- [その他]
ホームページ等
1. <http://cbr.kek.jp/>
 2. <http://cmb.kek.jp/>
 3. <http://quiet.kek.jp/>
 4. <http://cmb.kek.jp/polarbear/>
 5. <http://cmb.kek.jp/cmbcamera/>
 6. <http://litebird.jp/>
6. 研究組織
(1)研究代表者

羽澄 昌史 (HAZUMI, Masashi)
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

(2)研究分担者

吉田 哲也 (YOSHIDA, Tetsuya)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
教授
研究者番号：50222394

都丸 隆行 (TOMARU, Takayuki)
高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温
工学センター・准教授
研究者番号：80391712

田島 治 (TAJIMA, Osamu)
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

(3)連携研究者

松原 英雄 (MATSUHARA, Hideo)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
教授
研究者番号：30219464

満田 和久 (MITSUDA, Kazuhisa)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
教授
研究者番号：80183961

鈴木 敏一 (SUZUKI, Toshikazu)
高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温
工学センター・教授
研究者番号：20162977

住澤 一高 (SUMISAWA, Kazutaka)
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：40379293

長谷川 雅也 (HASEGAWA, Masaya)
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

佐藤 伸明 (SATO, Nobuaki)
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：10202095