

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800125

研究課題名(和文)CMB偏光観測のための高精度偏光キャリブレーションの研究

研究課題名(英文)Precise polarization angle calibration for CMB polarization experiments

研究代表者

西野 玄記(Nishino, Haruki)

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・特任助教

研究者番号：80706804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測によって宇宙誕生時の急激な加速膨張をもたらすとされるインフレーションの証拠を渦状の偏光パターン「Bモード」として見つけるために必要な偏光角度校正の精度向上である。そのために、強く偏光した天体について偏光特性理解を深めることにより、次世代実験の校正基準とすることを目指した。大量の測定データから高い統計精度の偏光マップが得られ、論文として出版されたが、無視できない系統誤差があることも判明し、それを低減していくことが今後必要である。さらに、次世代多波長Tau A観測のための準備研究も進め、近く観測が実現される見込みである。

研究成果の概要(英文)：Polarization measurements of the Cosmic Microwave Background (CMB) is a unique tool to probe the beginning of the universe. The inflation theory predicts that the primordial gravitational wave from the inflationary universe created polarization patterns called B-mode in the CMB polarization. To mitigate possible systematic errors from miscalibrations of polarization angles, this research has been performed to improve angle calibrations for CMB experiments. I have been focusing on the bright polarized celestial source, called Tau A (a.k.a. the Crab Nebula). We published the Tau A polarization measurement result from the POLARBEAR observation data. Although it achieved 0.2-degree statistical error, the systematic error was not negligibly small. Also, another study for a new multi-frequency Tau A measurement system is conducted. We are planning to start observations with the new system in the coming year.

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 インフレーション宇宙論 偏光

1. 研究開始当初の背景

宇宙初期、誕生から約 38 万年後の宇宙から発せられたとされる宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測は、宇宙の始まりが超高温・高密度の「火の玉」であったとするビッグバン理論を確かなものにするなど現代宇宙論の発展の礎となってきた。さらに、WMAP や Planck といった衛星観測に代表される CMB の温度揺らぎの測定は、この宇宙の組成などが Λ CDM と呼ばれるモデルで驚くべき精度で記述されることを示してきた。そうしたこれまでの経緯をもとに、初期宇宙論の分野で現在関心が集まっているのは、ビッグバンを引き起こす種となったとされる「宇宙のインフレーション」を観測的に実証することである。

これまでの観測的事実を説明するために宇宙誕生時にインフレーションと呼ばれる宇宙の急激な加速膨張があったことが提唱されている。インフレーションがあったとすると、原始重力波と呼ばれる特徴的な現象があったことが予言され、さらに、その原始重力波は CMB 偏光パターンに渦状の特徴的な奇パリティのパターン「B モード」を作るとされていることから、このパターンを見つけることでインフレーション理論を検証しようとする試みが世界中で繰り返されている。

しかしながら、その B モードパターンの大きさは非常に微かなものであると予想されている。一方、CMB 偏光パターンについては既に DASI と呼ばれる実験による発見 (引用文献①) を皮切りに多くの実験で測定が進んでいる。そこで測定されているのは「E モード」と呼ばれる偶パリティの偏光パターンである。したがって、この大きさの全く異なる E モードと B モードが混在する CMB の偏光マップの中から B モードを間違いなく見つけ出す必要があるが、そのために重要となるのが偏光角度の較正である。

装置の偏光角度較正を誤った場合、この E モードと B モードが互いに混ざり合ってしまう。ただし、E モードのほうが桁違いで大きい信号であるとされるため、問題となるのは、E モードから B モードへ漏れ込む成分である。多くの CMB 偏光観測ではその感度を上げるべく、日夜研究が進められているが、統計感度が上がれば上がるほど、この偏光角度較正精度が重要になってくる。次世代の CMB 偏光観測では 0.1 度を上回る精度で偏光角度を較正する必要があるが、本研究開始時点においてそのための決定打は無い状況であった。そのため、偏光角度較正精度向上のための基礎研究を開始することが求められていた。

2. 研究の目的

以上で述べたように、CMB 偏光観測実験における B モード探索のために、偏光角度較正は最も重要な装置較正の一つであるが、次

世代実験の求める精度で偏光角度較正を実現できた例はこれまでにない。

現在一つの有力な方法として提案されているのは、CMB のデータ自身を使った角度較正 (引用文献②) である。例えば、偏光角度較正を $\Delta\phi$ 誤ったとすると、標準宇宙論では 0 であるべき E モードと B モードの相関パワースペクトルが次の式のように有限な値を持つことになる。

(疑似 EB 相関パワースペクトル)

$\sim 2\Delta\phi$ (EE パワースペクトル)

したがって、EB 相関パワースペクトルが 0 であるという仮定を置くと、偏光角度の誤差 $\Delta\phi$ が得られるのである。この方法では CMB データ自身を使うことで、様々な系統誤差をキャンセルすることができる。しかしながら、この方法では標準宇宙論を仮定してしまうために、パリティの破れをもたらし E モード B モード相関を作るようなモデルに対して、それを判別する力を持たない。そのため、宇宙論を仮定しない偏光角度較正方法を持つことは非常に重要である。

CMB のデータ自身を用いる以外の較正方法としては既知の偏光天体を用いる方法も考えられる。本研究において、注目したのは Tau A (かに星雲) と呼ばれる強く偏光した超新星残骸である (図 1 参照)。南米・チリのアタカマ高地で CMB 偏光観測を行っている POLARBEAR 実験においては既に大量の Tau A 観測データが蓄積されており、単純に統計誤差だけで言えば 0.1 程度に到達できることが期待されるようなデータが存在していた。これは、それまでの CMB 偏光実験で実現されてきた偏光角度較正精度を優に上回る精度を実現できるポテンシャルを持つことを意味している。そこで、本研究では、POLARBEAR 実験で既に取得された偏光天体 Tau A のデータを精度よく解析し、偏光角度較正に関する系統誤差の理解を進めることにより、これまでにない精度の偏光参照データをもたらし、将来の CMB 偏光観測実験における高精度 B モード探索を実現することを目的とした。

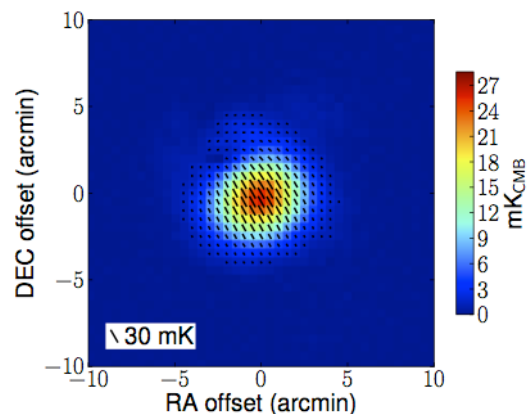


図 1. POLARBEAR 実験最初の観測シーズンのデータを用いた Tau A の偏光強度マップ (引用文献③)

3. 研究の方法

偏光天体 Tau A の高精度データを取得するために、本研究では具体的には以下の二つの研究方法を軸に研究を進めた。

(1) 南米・チリ POLARBEAR 実験による観測データを使った Tau A の偏光特性理解

POLARBEARは2012年から本格的にCMB観測を開始した南米チリ、アタカマ砂漠におけるCMB偏光観測実験である。現行の観測装置では、150 GHz帯で観測を行っている。

本研究の研究代表者がPOLARBEAR実験の共同研究者のうちの一人であることを活かしてTau Aの観測計画を策定し、日本から遠隔で観測を監視・制御し、取得された観測データを使って研究を進めた。

本研究開始時点でも既に100日以上のデータを有しており、そのデータをさらに詳細に解析した。既に大量のデータが存在していたことから、系統誤差を突き詰めていくことが実際の研究上では極めて重要となった。

(2) 多波長観測実現のための準備研究

CMBのBモード偏光発見競争において、研究期間中には大きな状況の変化があった。2014年に南極のBICEP2と呼ばれるCMB実験が原始重力波起源のBモードの発見を主張したのである。後に、その結果は我々の銀河系内のダストにより説明できるということが分かった。この一連の出来事により、今後のCMB偏光観測においては、CMB以外の成分、いわゆる前景放射の選別・除去性能が極めて重要であることが認識された。そのための鍵となるのが、多波長帯での観測である。

CMBの多波長観測という要請に応じて、偏光角度較正についても、多波長帯の観測データが必要となる。しかしながら、現行のPOLARBEAR実験は150 GHz帯のみの観測であるために、その観測性能を拡張する必要があった。したがって、本研究では、多波長観測のための観測システムのアップグレードを実現するための準備研究も行った。特に、研究開始時点で問題となっていた較正装置のデータ収集系の構築及びそこから実験全体に関わる観測制御システム・データ収集・検出器読み出し系の拡張・刷新に関する研究まで展開することで、Tau Aの多波長観測の実現を目指した。

4. 研究成果

本研究期間中には、2012年から2014年までの間に取得したTau Aの観測データを解析した。その結果は、POLARBEAR実験のBモード偏光測定の結果とともに、発表論文①の中で公表された。

当初は第三の偏光較正源を用いた実験も行うことを予定していたが、装置開発の問題により本研究期間中にデータを取得することはできなかった。そこで、今回の解析では、

まず、CMB自身を用いた偏光角度較正とTau Aの偏光角度の相対関係を精度良く求めることを目指した解析を行った(図2参照)。その結果、150 GHz帯において、0.2度の統計精度で互いの偏光角度の関係を出すことができた。しかしながら、系統誤差の詳細な見積もりを進めた結果、今回の解析では0.8度の系統的な不定性があるということも判明し、その点を改善する必要があるという知見が得られた。系統誤差の中で重要なものは無偏光成分から偏光成分への漏れこみである。一つの問題点は、南半球から見えるTau Aは短い時間しか地平線に昇らない、すなわち、見かけの角度が大きく変わらないことで、漏れ込みによる系統誤差が打ち消し合わないということが考えられる。今後の方策としては、連続回転半波長板を用いることによって、そうした系統誤差の入る余地を無くし、さらなる低系統誤差観測を目指すことができると考えており、その解析は既に進行中である。

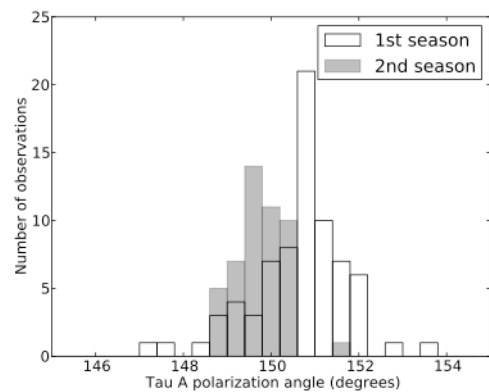


図 2. 本研究により測定・解析された Tau A の偏光角度 (発表論文①)

多波長観測実現のための研究においては、実験室における拡張観測システムの統合試験が始まるという進展があった。また、多波長観測のための新観測制御システムは既にチリの観測サイトにインストールされ、初期実地試験に成功している。

多波長観測システムは引き続き日本において統合試験中であり、そのためのデータ収集系・検出器読み出し系の構築を進め、その他のシステムと統合した試験が完了しつつある。試験は順調に進行し、来年度には新システムによる多波長 Tau A 観測が実現する見込みである。

<引用文献>

- ① J. M. Kovac, et. al., “Measurement of polarization with the Degree Angular Scale Interferometer”, Nature, 420, 772, 2002
- ② Keating, B. G., Shimon, M., & Yadav, “SELF-CALIBRATION OF Cosmic Microwave Background Polarization Experiments”, ApJL, 762, L23, 2013
- ③ The POLARBEAR Collaboration, “A

Measurement of the Cosmic Microwave Background B-mode Polarization Power Spectrum at Sub-degree Scales with POLARBEAR”、ApJ、794、171、2014

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 1 件)

- ① The POLARBEAR Collaboration: P. A. R. Ade, M. Aguilar, Y. Akiba, K. Arnold, C. Baccigalupi, D. Barron, D. Beck, F. Bianchini, D. Boettger, J. Borrill, S. Chapman, Y. Chinone, K. Crowley, A. Cukierman, M. Dobbs, A. Ducout, R. Dünner, T. Elleflot, J. Errard, G. Fabbian, S. M. Feeney, C. Feng, T. Fujino, N. Galitzki, A. Gilbert, N. Goeckner-Wald, J. Groh, T. Hamada, G. Hall, N. W. Halverson, M. Hasegawa, M. Hazumi, C. Hill, L. Howe, Y. Inoue, G. C. Jaehnig, A. H. Jaffe, O. Jeong, D. Kaneko, N. Katayama, B. Keating, R. Keskitalo, T. Kisner, N. Krachmalnicoff, A. Kusaka, M. Le Jeune, A. T. Lee, E. M. Leitch, D. Leon, E. Linder, L. Lowry, F. Matsuda, T. Matsumura, Y. Minami, J. Montgomery, M. Navaroli, H. Nishino, H. Paar, J. Peloton, A. T. P. Pham, D. Poletti, G. Puglisi, C. L. Reichardt, P. L. Richards, C. Ross, Y. Segawa, B. D. Sherwin, M. Silva, P. Siritanasak, N. Stebor, R. Stompor, A. Suzuki, O. Tajima, S. Takakura, S. Takatori, D. Tanabe, G. P. Teply, T. Tomaru, C. Tucker, N. Whitehorn, A. Zahn, “A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-Mode Polarization Power Spectrum at Sub-Degree Scales from 2 years of POLARBEAR Data”、arXiv.org、査読無、arXiv:1705.02907、2017、<https://arxiv.org/abs/1705.02907>

[学会発表] (計 9 件)

- ① 西野玄記, 秋葉祥希, 井上優貴, 片山伸彦, 金子大輔, 鈴木有春, 鈴木純一, 瀬川優子, 高倉理, 高取沙悠理, 高田卓, 田邊大樹, 茅根裕司, 都丸隆行, 羽澄昌史, 長谷川雅也, 服部香里, 濱田崇穂, 松村知岳, 他 POLARBEAR-2 コラボレーション、「POLARBEAR-2 統合試験に向けた検出器読み出し・データ収集系の構築」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日～2017 年 3 月 20 日、大阪大学(大阪府豊中市)
- ② 西野玄記, 秋葉祥希, 井上優貴, 片山伸彦, 鈴木有春, 鈴木純一, 瀬川優子, 高倉理, 高取沙悠理, 高田卓, 茅根裕司,

都丸隆行, 羽澄昌史, 長谷川雅也, 服部香里, 濱田崇穂, 松村知岳, 他 POLARBEAR-2 コラボレーション、「POLARBEAR-2 のための検出器読み出し・望遠鏡制御システム試験」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 21 日～2016 年 9 月 24 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)

- ③ 西野玄記, 秋葉祥希, 井上優貴, 片山伸彦, 鈴木有春, 鈴木純一, 瀬川優子, 高倉理, 高取沙悠理, 高田卓, 茅根裕司, 都丸隆行, 羽澄昌史, 長谷川雅也, 服部香里, 濱田崇穂, 堀泰斗, 松村知岳, 他 POLARBEAR-2 コラボレーション、「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」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 14 日～2016 年 9 月 16 日、愛媛大学(愛媛県松山市)
- ④ 西野玄記, 秋葉祥希, 井上優貴, 片山伸彦, 鈴木有春, 鈴木純一, 瀬川優子, 高倉理, 高取沙悠理, 高田卓, 茅根裕司, 都丸隆行, 羽澄昌史, 長谷川雅也, 服部香里, 濱田崇穂, 堀泰斗, 松村知岳, 他 POLARBEAR-2 コラボレーション、「POLARBEAR-2 のための新データ収集システムの試験」、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日～2016 年 3 月 22 日、東北学院大学(宮城県仙台市)
- ⑤ Haruki Nishino, “POLARBEAR and Simons Array: Results and Future Prospects for CMB Polarization Measurements” 12th International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics、2015 年 10 月 12 日～2015 年 10 月 16 日、Daejeon (Korea)
- ⑥ 西野玄記, 秋葉祥希, 井上優貴, 片山伸彦, 鈴木有春, 鈴木純一, 瀬川優子, 高倉理, 高取沙悠理, 高田卓, 茅根裕司, 都丸隆行, 羽澄昌史, 長谷川雅也, 服部香里, 堀泰斗, 松村知岳, 他 POLARBEAR-2 コラボレーション、「POLARBEAR-2 におけるデータ収集系の構築」、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 25 日～2015 年 9 月 28 日、大阪市立大学(大阪府大阪市)
- ⑦ 西野玄記, Peter Ade, 秋葉祥希, Christopher Aleman, Kam Arnold, Matt Atlas, Carlo Baccigalupi, Brian Barch, Darcy Barron, Amy Bender, David Boettger, Julian Borrill, Scott Chapman, 茅根裕司, Ari Cukierman, Tijman de Haan, Matt A. Dobbs, Anne Ducout, Rolando Dunner, Tucker Elleflot, Josquin Errard, Giulio Fabbian, Stephen Feeney, Chang Feng, George Fuller, Neil Goeckner-Wald, Adam Gilbert, Nils Halverson, 長谷川雅也, 服部香里, 羽澄昌史, Charles Hill, William L. Holzappel, Logan Howe, 堀泰斗, 井上優貴, 入江郁也, Gregory

- Jaehnig, Andrew Jaffe, Oliver Jeong, 片山伸彦, Jon Kaufman, Kavon Kazemzadeh, Brian Keating, Zigmund Kermish, Reijo Keskitalo, Theodore Kisner, Akito Kusaka, Maude Le Jeune, Adrian T. Lee, David Leon, Eric Linder, Lindsay Lowry, Frederick Matsuda, 松村知岳, Nathan Miller, 水上邦義, Michael Myers, Martin Navaroli, 岡村崇宏, Hans Paar, Julien Peloton, Davide Poletti, Giuseppe Puglisi, Christopher Raum, Gabriel Rebeiz, Christian Reichardt, Paul L. Richards, Colin Ross, 瀬川優子, Kaja Rotermund, David Schenck, Blake Sherwin, Ian Shirley, Mike Sholl, Praween Siritanasak, Graeme Smecher, Nathan Stebor, Bryan Steinbach, Radek Stompor, Aritoki Suzuki, 鈴木純一, 田島治, 高田卓, 高倉理, 都丸隆行, Brandon Wilson, Amit Yadav, Oliver Zahn、「CMB 偏光観測実験 POLARBEAR の現状」、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月21日～2015年3月24日、早稲田大学(東京都新宿区)
- ⑧ 西野玄記, Peter Ade, 秋葉祥希, Aubra Anthony, Kam Arnold, Darcy Barron, David Boettger, Julian Borrill, Scott Chapman, 茅根裕司, Matt A. Dobbs, Tucker Elleflot, Josquin Errard, Giulio Fabbian, Chang Feng, Daniel Flanigan, Adam Gilbert, William Grainger, Nils Halverson, 長谷川雅也, 服部香里, 羽澄昌史, William. Holzappel, 堀泰斗, Jacob Howard, Peter Hyland, 井上優貴, Gregory Jaehnig, Andrew Jaffe, 片山伸彦, Brian Keating, Zigmund Kermish, Reijo Keskitalo, Theodore Kisner, Maude Le Jeune, Adrian T. Lee, Erik Leitch, Eric Linder, Marius Lungu, Frederick Matsuda, 松村知岳, Xiao Fan Meng, Nathan Miller, 水上邦義, 森井秀樹, Stephanie Moyerman, Michael Myers, Martin Navaroli, Hans Paar, Julien Peloton, Davide Poletti, Erin Quealy, Gabriel Rebeiz, Christian Reichardt, Paul L. Richards, Colin Ross, Ian Schanning, David Schenck, Blake Sherwin, 清水景絵, Chase Shimmin, Meir Shimon, Praween Siritanasak, Graeme Smecher, Helmuth Spieler, Nathan Stebor, Bryan Steinbach, Radek Stompor, Aritoki Suzuki, Huan T. Tran, 高倉理, 都丸隆行, Brandon Wilson, Amit Yadav, Oliver Zahn、「CMB 偏光観測実験 POLARBEAR の観測と解析の現状」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 18 日～2014 年 9 月 21 日、佐賀大学 (佐賀県佐賀市)
- ⑨ Haruki Nishino、「First Result from POLARBEAR CMB Polarization Experiment」、37th International Conference on High Energy Physics、2014 年 7 月 2 日～2014 年 7 月 9 日、Valencia

(Spain)

[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]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西野 玄記 (NISHINO, Haruki)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特任助教

研究者番号：80706804

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

藤野 琢朗 (FUJINO, Takuro)

横浜国立大学・大学院工学府・大学院生

Greg Jaehnig

University of Colorado, Boulder・Physics

Department・大学院生