

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18785

研究課題名（和文）高感度CMB望遠鏡で拓く宇宙背景放射観測の新たなチャンネル

研究課題名（英文）Development of Measurement Techniques for the Observation of the Circular Polarization of CMB

研究代表者

西野 玄記（Nishino, Haruki）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・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） 4,800,000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）の円偏光の測定感度の向上を目的としたものである。CMB直線偏光偏光実験のデータから円偏光の情報を引き出すために、直線偏光測定で使われる半波長板の特性理解に焦点を当てた研究を進めてきた。特に、半波長板の特性測定実験のデータを再解析し、直線偏光と円偏光が交わる成分の推定を行った。過去実験の再解析によりCMB円偏光の測定にこれまでにない感度での測定を実現できる見通しが立った。さらに、1/4波長板の開発を進めることにより、将来の実験計画のための基礎的な研究も行った。最初の試作品が完成し、想定通りの初期特性評価結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙マイクロ波背景放射は観測可能な宇宙最古の光であり、その観測はこれまでも宇宙の起源に関する情報を人類にもたらしてきた。しかしながら、これまで測定されてきたのはその光の持つ情報のうちの一つの側面でしかなく、これまで見ていなかった方の側面に全く予想もしなかった情報が隠れている可能性もある。本研究はそうした隠れた側面を解き明かすことに挑戦し、それを解き明かすことで人類がこの世界の成り立ちについて新たな知見を得ることを目指したものである。本研究の成果により、将来的にそうしたことを実現する最初の一步を踏み出すことができたと考えている。

研究成果の概要（英文）：This research project has been targeting an improvement of the sensitivity of the circular polarization of Cosmic Microwave Background (CMB). Several CMB polarization projects have been using half-wave plates as a polarization signal modulator. We have worked on the characterizations of a half-wave plate to extract circular polarization information from the experimental data of CMB (linear) polarization experiments. We have re-analyzed the half-wave plate measurement data in a lab and estimated the mixing term of linear and circular polarizations. Our study has shown that the reanalysis of the existing CMB linear polarization data should provide us new meaningful insights into the circular polarization of CMB.

Moreover, we have developed a quarter wave-plate for a future experimental project. We confirmed that the prototype had expected circular polarization performances.

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 円偏光

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は観測可能な宇宙最古の光であり、この観測により宇宙の始まりや進化の過程に我々人類は多くの手がかりを得てきた。近年においては、その偏光成分の中に B モードと呼ばれる奇パリティの微小なパターンを見つけ出すことに注目が集まっている。そのパターンを見つけ出すことにより、宇宙の始まりにあったとされるインフレーションの証拠の発見や宇宙論的なニュートリノ質量の測定を成し遂げようとして、数多くのプロジェクトが観測感度の向上を目指した研究を進めている。本研究が開始された当初、研究代表者が参加する POLARBEAR 実験も重力レンズ効果起源の B モード偏光観測で成果を上げ、さらなる感度向上を目指しているところであった。

これらの実験において主に測定対象とされていたのは、偏光状態のうちの「直線偏光」と呼ばれている状態である。一方で、その対を成す「円偏光」に対しては、それまで本格的な観測プロジェクトは殆どなく、数少ない測定結果の例についても、直線偏光実験と比べると著しく感度の劣るものであった。そうした背景において、CMB の円偏光に対する研究を始めしていくことは挑戦的な研究課題として相応しいと考え、本研究が開始された。

2. 研究の目的

上述の背景にある通り、本研究の目的はこれまでほぼ未開拓の領域として残されてきた CMB 円偏光成分に対する測定に挑戦することによって、新たな宇宙論観測の手法を開拓することである。そもそもトムソン散乱により偏光が生じるとされている CMB は標準宇宙論の範疇においては無視できるレベルの信号しかないとされている。ただし、仮定されている対称性が破られる未発見の物理・宇宙論的な現象があればその限りではない。したがって、CMB 円偏光測定は、宇宙の対称性や未発見な現象を探るためのクリーンな観測対象と考えられる。

CMB 円偏光が生じる過程としては、CMB の直線偏光が宇宙の進化の過程で円偏光へと変換される二次的過程と、宇宙の晴れ上がりの時代における相互作用による生じたものとの二通りが考えられる。前者の例としては代表的なものとしては、Pop III (最初の星) と呼ばれる宇宙原始の星の超新星残骸の作る磁場による影響が考えられている。後者の例としては、CMB より遙か以前、宇宙誕生から約 1 秒後の宇宙からやってきているとされている宇宙背景ニュートリノとの相互作用が考えられる。ニュートリノはすべて左向きであることから、円偏光が生成される。その他にも、宇宙の原始磁場やローレンツ不変性の破れによる影響の可能性も指摘されている。

こうした物理的な現象の存在を明らかにすることが本研究を推進する目的である。本研究は萌芽的なものであるため、将来計画における円偏光測定の実現性を高めるための基礎的な開発を目的とした研究に重点を置いた研究を進めてきた。

3. 研究の方法

CMB 直線偏光の観測における低周波雑音・系統誤差の除去の手法として半波長板がしばしば用いられている。半波長板とは、サファイアの単結晶のような複屈折を持つ物質で作られており、直線偏光の向きを回転する効果を持つ光学素子である。この素子を図 1 の POLARBEAR 実験の受信機のように、光学経路上に置き、回転させることにより、偏光信号を低周波の雑音より高い周波数領域へと変調させることができる。

半波長板はその名の通り、光軸の違いによって半波長分の位相差をもたらしものであるが、最もシンプルなものではその関係は単一の周波数でしか成り立たない。最適な周波数からずれると非理想的な効果が直線偏光から円偏光への漏れ込み、もしくは、その逆として現れる。それが次式における s の項である。

$$M = \begin{pmatrix} t & r & 0 & 0 \\ r & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & -s \\ 0 & 0 & s & c \end{pmatrix}$$

通常はその効果は直線偏光測定における系統誤差として望ましくないものと考えられるのであるが、本研究は、それを逆に利用して CMB 直線偏光の測定データから円偏光の信号を測定す

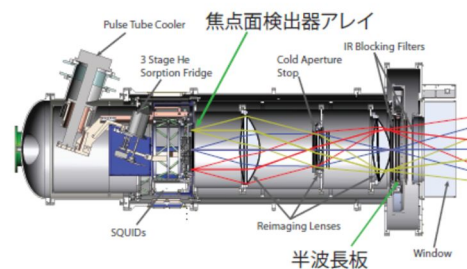


図 1 POLARBEAR 実験の受信機の断面図。図右側から光が入射し、半波長板は窓の近くに設置されている。

ることに用いる、という手法の研究開発である。

具体的な研究の方法としては大きく分けて二つの研究を進めてきた。一つは既存の実験において用いられている半波長板の特性をよく理解することにより、過去の CMB 観測実験において既に取得されたデータから円偏光成分の情報を引き出すこと、もう一点は新たに円偏光成分を直接観測するための光学素子の開発と評価により、将来的にさらに高い感度での測定を行うための基礎技術の開発を進めることである。

4. 研究成果

(1) POLARBEAR 実験で用いられた半波長板の研究

既存の実験データとして本研究で念頭に置いたのは、研究代表者が参加している CMB 偏光実験 POLARBEAR である。POLARBEAR 実験は、CMB 偏光データのみを用いた解析としては初めて重力レンズ効果の検出を成し遂げるなど、CMB 偏光観測における先駆的な役割を果たしている実験である。POLARBEAR では半波長板を用いた測定が行われていたことから、その特性を理解することにより CMB 円偏光の情報を得ることができないかと考えた。本研究では実験室において行われた偏光測定データを再解析し、円偏光と直線偏光の混合パラメータ s の推定を行った。

図 2 が、測定結果の再解析から得られたパラメータ s の推定値の周波数依存性である。POLARBEAR 実験では 150 GHz 帯に最適化されたサファイア単結晶の板を用いているため、150 GHz 付近を 0 としてほぼ線型に変化する様子が見て取れる。実際には、反射防止膜の効果により最も単純な形からのずれがある。この周波数依存性と POLARBEAR 実験の周波数バンドを掛け合わせて積分することにより、円偏光に対する検出効率が計算できる。さらに、その検出効率と POLARBEAR の B モード偏光に対する感度を掛け合わせることで CMB 円偏光測定の感度を見積もった。POLARBEAR の感度のある角度領域においては、世界最高レベルの感度を得る見通しが立ったものの、本研究期間内においてはその結果を発表するまでには至っていない。

(2) 1/4 波長板の開発研究

既存の実験のデータの再解析と並行して新たな 1/4 波長板の開発研究も進めた。研究協力者が開発してきた反射防止膜の研究が成功し実用化に見通しが立ったことにより、その協力を得て 1/4 波長板の開発が進行した。

図 3 が開発された 1/4 波長板とその試験用に用意された円偏光試験用セットアップである。このセットアップでは光源として円偏光を出し、1/4 波長板において円偏光が直線偏光へと変換されたのちの直線偏光を図右側の光検出器で検出する。

図 4 が測定された偏光強度と 1/4 波長板の回転角度の関係であり、期待される角度・周波数依存性が出る事が確かめられた。期待する性能を持つ、試験セットアップとプロトタイプの開発に成功したことにより、将来の円偏光実験計画のための開拓へ向けた第一歩を踏み出すことができたと考えている。

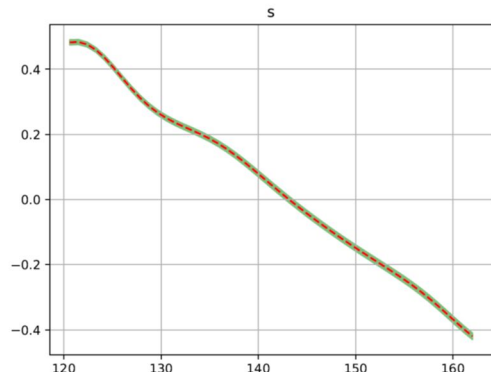


図 2 POLARBEAR 実験で用いられた半波長板のパラメータ s の推定値の周波数依存性

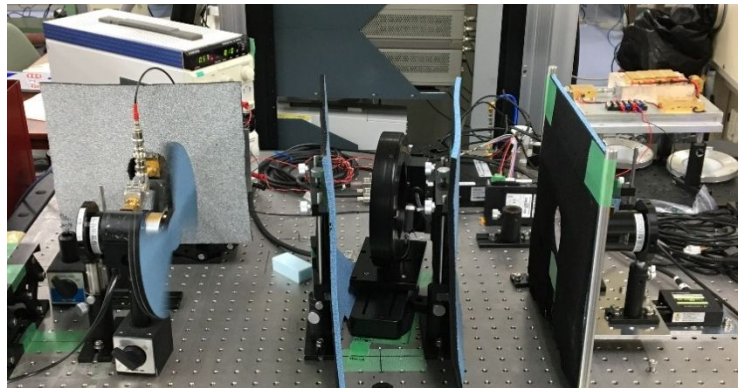


図 3 1/4 波長板試験のテストセットアップ。図の左側から円偏光源を出射し、図の中心部に 1/4 波長板が自動回転ステージにおさめられている。

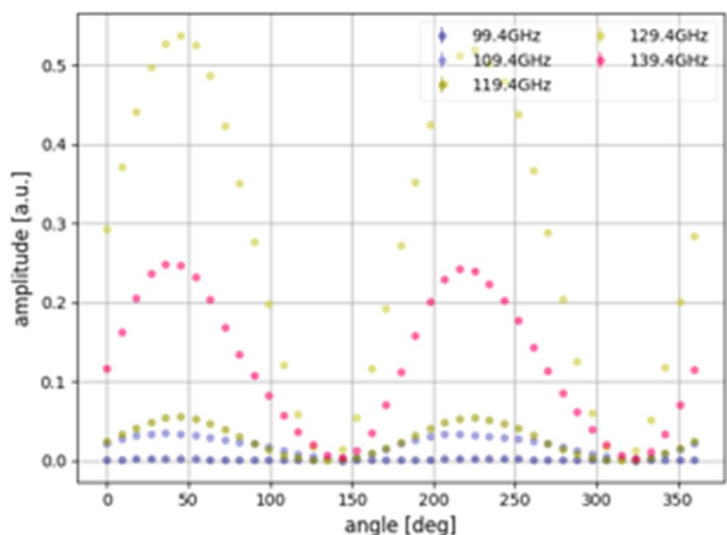


図 4 波長板の回転角度と検出された偏光強度の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Maximilian H. Abitbol, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 The Simons Observatory: Bandpass and polarization-angle calibration requirements for B-mode searches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤野琢郎、他POLARBEARコラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR実験によるCMB円偏光探索に向けた半波長板の評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤野琢郎、他POLARBEARコラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR実験によるCMB円偏光探索に向けた半波長板の評価 2
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野琢郎、片山伸彦、高倉理、茅根裕司、西野玄記、長谷川雅也、他POLARBEARコラボレーション
2. 発表標題 POLARBEAR実験によるCMB円偏光成分の探索
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	長谷川 雅也 (Hasegawa Masaya)		
研究協力者	高倉 理 (Takakura Satoru)		
研究協力者	藤野 琢朗 (Fujino Takuro)		
研究協力者	廣瀬 開陽 (Hirose Haruaki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	カリフォルニア大学バークレー校	ローレンス・バークレー国立研究所	カリフォルニア大学サンディエゴ校	他7機関
カナダ	マギル大学			
フランス	パリ大学			
イタリア	SISSA			
英国	カーディフ大学	マンチェスター大学	インペリアル・カレッジ・ロンドン	