

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887033

研究課題名(和文) 宇宙マイクロ波背景輻射の弱い重力レンズ測定から探る宇宙論

研究課題名(英文) Cosmology from weak gravitational lensing of Cosmic Microwave Background

研究代表者

並河 俊弥 (Namikawa, Toshiya)

京都大学・基礎物理学研究所・研究員

研究者番号：80708511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：ここ数年で検出が可能となった宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)の重力レンズ効果は、今後の宇宙論を進展させる上で世界的に注目されている観測量である。本プロジェクトでは、将来的な宇宙論への応用を視野に入れつつ、この効果の測定手法の開発に焦点を当てた研究を行った。初年度は、今後CMB実験で主力となる偏光測定における重力レンズ効果の測定方法の開発を行った。また、初年度から次年度にかけては、LiteBIRDなどのCMB観測から重力波の検証を行う上で重要となる、重力レンズによる寄与の除去の可能性についても調査を行った。また、超高感度CMB実験では、重力波による重力レンズ効果の測定が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Weak lensing effect on the cosmic microwave background (CMB), which has been recently detected from multiple experiments, will be one of the important cosmological probes in the near future. In this research project, we develop the method of measuring the weak lensing of CMB. We first improve the lensing estimator constructed from CMB polarization. From the first to the second year, we focus on the application of the CMB lensing analysis to the measurement of the inflationary gravitational wave. In our first step, we explore whether we can detect the lensing signals from a patchwork of polarization maps observed from ground-based CMB experiments, and then, using this lensing signals, we show the effectiveness of the delensing for LiteBIRD observation. In addition, we explore future detectability of the gravitational-wave induced lensing from high-sensitivity CMB experiments.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：宇宙マイクロ波背景輻射 重力レンズ

1. 研究開始当初の背景

今後の宇宙論は、これまで宇宙論的観測から得られた知見を基に、より根本的な課題に取り組む方向へと向かっている。このさい、現在計画あるいは実行されている宇宙論的観測の一つである弱い重力レンズ効果は、今後の宇宙論を進展させる上で極めて重要と考えられている。

2. 研究の目的

本研究では、弱い重力レンズのうち、特に近年になって検出が可能となった、宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)の弱い重力レンズ効果に着目する。

CMBの弱い重力レンズ効果は、研究開始当初では温度揺らぎの観測からすでに検出が行われていた。今後のCMB観測では重力レンズ効果の推定精度が飛躍的に向上し、種々の宇宙論的課題への応用が期待される。本研究では、実際の観測を念頭に置いた実用的な推定法の確立を目指す。

3. 研究の方法

CMBの弱い重力レンズ効果の測定では、重力レンズによる曲り角、あるいはその勾配成分、および回転成分であるカール成分(まとめてレンズ場と呼ぶことにする)を、天球面上、あるいは観測領域の範囲で推定する。この推定されたレンズ場をもとに、その統計量である角度パワースペクトルなどを測り、宇宙論への応用を行っている。

本研究では、宇宙論への応用を念頭に、レンズ場の推定法を確立するため、初年度は、本研究プロジェクト開始前に研究代表者が中心となって発展させてきた方法論(以下BHEと呼ぶことにする)を偏光データに対しても適用可能なように拡張する。これにより、偏光観測からの弱い重力レンズ推定において、従来と比べより信頼性の高い手法を提案する。次に、インフレーション理論が预言する原始重力波探査において必要となる、CMBの弱い重力レンズ解析について研究を行う。さらに、将来的にはどの程度のCMB実験を想定すれば、重力波による重力レンズ効果の観測が可能かどうかについても調べる。

4. 研究成果

1) CMBの弱い重力レンズ測定における新たな推定法の提唱

偏光データに基づいて弱い重力レンズを推定するさい、系統誤差の影響を取り除く手法を考案する必要がある。まず研究代表者は、研究代表者が中心となって開発していたBHEを偏光マップへ拡張した。

温度揺らぎの場合と同様に、観測した偏光揺らぎに掛け合わせるフィルター関数(あるいは重み関数)を変形することで系統誤差の影響を取り除く推定量を導出した。

次にこの導出した推定量をもとに、我々は数値シミュレーションを走らせて実際にどの程度有効なのか確認を行った。シミュレーションでは、共同研究者が作成したN体シミュレーションに基づく偏光地図を利用した。このシミュレーションによって、研究開始当初は予想していなかったが、放射状、および渦状の偏光パターンであるEモードとBモードを掛け合わせて重力レンズ効果を推定する場合には、マスクなどによって生じるバイアスはそもそも非常に小さいことが分かった。一方で、Eモードどうし、Bモードどうしを掛け合わせて推定する場合にはやはりバイアスが大きいので、我々の方法が有効になることを確かめた。さらに、マスク以外のバイアスとして、今回は新たに点光源、非等方ビームについても調べた。これらの場合には、EモードとBモードの掛け合わせた推定量においてもバイアスが存在するため、我々の方法を用いることが有効であることを示した。

2) 重力波探査に向けた、地上観測による重力レンズの広域地図の作製可能性

宇宙の初期段階で起こったとされるインフレーションは、銀河・銀河団などの構造の種となる密度揺らぎを生成すると同時に、重力波(原始重力波)の生成を预言する。この原始重力波を捉えることで、インフレーション理論の直接検証ができ、新たな観測的視点から初期宇宙に迫ることができる。原始重力波はCMBの偏光度分布にBモード偏光を残すため、このBモード偏光の観測は原始重力波を検証する方法として世界的に注目を浴びている。現在、原始重力波由来のBモード偏光は未検出であり、この信号の検出は今後の宇宙論における最大の目標の一つである。

ただし、一つ大きな問題となるのが、重力レンズから生じるBモード偏光である。大角度スケール以外の大部分は重力レンズ効果に埋もれてしまう。現在の上限は $r = 0.1$ 程度に達しており、重力波検出感度を向上していくためには、前景放射の除去や系統誤差の抑制だけでなく、重力レンズの影響を引き去ること(delensing)も必要となる。しかし、原始重力波の測定と同時にdelensingも行うことは、原理的には可能であるが非現実的である。なぜなら、原始重力波は大角度スケールの観測を要する一方で、delensingは小角度スケールの偏光観測を行う必要があり、これらを同時に行うには、非常に大きな望遠鏡を衛星として打ち上げなければならない。

そこで研究代表者らは、高角度分解能をも

つ地上実験から得られる偏光地図をもとに、衛星観測で測定した偏光地図の delensing が可能かどうか調べた。このさい問題として、地上観測では一般に 観測装置や環境に由来する低周波の雑音が障害となって、得られる偏光地図の領域サイズが 限られることである。そこでまず、我々は、地上実験において個別に観測された小さな偏光地図を繋ぎ合わせて作る非一様な広域偏光地図からでも、大角度スケールの偏光モードをフィルタリングすることで重力レンズの広域地図を作成可能であることを示した。

次に、この広域な重力レンズ地図を使った宇宙論への応用についてデモンストレーションを行った。特に、もともとの研究動機でもある原始重力波由来の B モード偏光の測定可能性について調べた。この結果、LiteBIRD を利用した B モード観測では、地上 CMB 観測による継ぎ接ぎの偏光地図を使った delensing でも原始重力波の感度を向上させることができ、delensing は有効であることを示した。

3) 重力波が引き起こす重力レンズ効果の検出可能性

CMB の弱い重力レンズ効果は、二次元面上のベクトルである曲がり角により特徴づけられるが、この曲がり角はパリティに対して二成分に分解でき、すでに述べたように放射状のものを勾配成分 (偶パリティ)、渦上のをカール成分 (奇パリティ) とよぶ。カール成分は奇パリティをもつ重力場から生じるため、大規模構造が作る (線形の) 重力ポテンシャルのようなスカラー量からは生じない。一方、宇宙初期に生成された重力波、宇宙初期の相転移で生じ得る宇宙ひも、宇宙に存在する磁場などは、奇パリティをもつ重力場を生成し、それにより引き起こされる重力レンズでは、カール成分が生じる。従って、カール成分の観測は、重力波や宇宙ひも、磁場などを探る有効な手段だと考えることができる。

研究代表者らは、以前の研究においても、このカール成分の宇宙論への応用可能性、特に宇宙初期に生成され得る宇宙紐や原始重力波の検証可能性について研究を行っていた。このさいに導出した手法をさらに改良し、以前の研究では原理的に検出不可能であったが、今回導出した最尤法に基づいたアルゴリズムでは、将来の高感度実験において原理的に測定可能であることを示した。また、どの程度の実験感度が必要か調べた結果、重力波の consistency relation が検証される前に重力波による重力レンズ効果が検出されるという結果を得た。

我々は、さらにこれらの実験を想定した場合に、宇宙晴れ上がり以降に生成された重力波の検証可能性についても解析を行った。このような晴れ上がり以降の重力波を検証す

ることで、宇宙加速膨張の理論モデルとして精力的に研究が行われている修正重力理論、の検証などが可能になると期待される。我々の計算結果では、カール成分を測定することで、大角度スケールでの影響を調べることが可能になることを示した。これから、例えば重力波の伝搬速度を検証するうえで、カール成分は有力な観測量であることを明らかにした。

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 4 件)

1. Toshiya Namikawa, Ryuichi Takahashi, Bias-Hardened CMB Lensing with Polarization, 査読有, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 438, Issue 2, p.1507-1517, (2014), DOI:10.1093/mnras/stt2290
2. Toshiya Namikawa, Cosmology from weak lensing of CMB, 査読有, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2014, Issue 6, id.06B10823, (2014), DOI:10.1093/ptep/ptu044
3. Toshiya Namikawa & Ryo Nagata, Lensing reconstruction from a patchwork of polarization maps, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, Issue 09, article id. 009, (2014), DOI:10.1088/1475-7516/2014/09/009
4. Toshiya Namikawa, Daisuke Yamauchi & Atsushi Taruya, Future detectability of gravitational-wave induced lensing from high-sensitivity CMB experiments, Physical Review D, 査読有, Volume 91, Issue 4, id.043531, DOI: 10.1103/PhysRevD.91.043531

[学会発表] (計 5 件、発表者に)

1. 並河俊弥, 永田竜, Delensing the B-mode of LiteBIRD observation with ground based CMB experiments, 観測的宇宙論ワークショップ, 2013 年 12 月、国立天文台三鷹

2. 並河俊弥, Duncan Hanson, 高橋龍一, 不完全な偏光マップからの重力レンズ効果の推定法の開発, 日本天文学会 2013 年秋季年会, 2013 年 9 月、東北大学
3. 並河俊弥, 永田竜, Delensing B-mode of LiteBIRD observation with ground based CMB experiments, 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月、国際基督教大学
4. 並河俊弥, 永田竜, CMB 偏光地図のパッチワークを使った重力レンズ再構築, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 2014 年 9 月、山形大学
5. 並河俊弥, 山内大介, 樽家篤史, Future detectability of gravitational-wave induced lensing from high-sensitivity CMB experiments, 2015 年 3 月, 大阪大学

並河 俊弥 (Namikawa, Toshiya)
京都大学基礎物理学研究所・研究員

研究者番号 : 80708511

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者