

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05478

研究課題名（和文）長波長原始重力波検出の数値的研究

研究課題名（英文）Numerical study for detection of long-wavelength primordial gravitational waves

研究代表者

永田 竜（Nagata, Ryo）

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・研究員

研究者番号：00571209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,100,000円

研究成果の概要（和文）：原始背景重力波の検出を目的とした次世代のマイクロ波背景輻射偏光観測において重要な役割を果たす重力レンズ効果除去（delensing）解析について、包括的な数値シミュレーションを行い、観測的な系統誤差の影響を明らかにした。  
装置特性を適切に反映できるソフトウェアの開発を行い、シミュレーションに必要な数値的基盤を整備した。  
諸々の系統誤差がレンズ解析へ伝搬する際の振る舞いを詳らかにし、実験計画を構築するに際して、系統誤差抑制の具体的な指針を持つことができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究開始当初は未開拓の状況であったdelensing解析に対する系統誤差の影響を明らかにしたことで、次世代観測におけるdelensing解析の有効性をより高めることになった。  
世界各所の研究機関で競って推進している諸々の実験はdelensing解析がプロジェクト成功の鍵になっており、本研究の成果によって、原始重力波の検出による宇宙の起源の理解に進展がもたらされると期待できる。

研究成果の概要（英文）：We performed a complete suite of numerical simulations of delensing analysis, which was expected to play an important role in next generation observations of the cosmic microwave background polarization for detection of the primordial gravitational wave background, and clarified how systematic errors affect the analysis.  
To establish numerical environment, we developed softwares which properly incorporated instrumental characteristics into the simulations. Detailed knowledge about propagation of various systematics to lensing analysis given by this study will provide concrete guides for designing experiments.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力波 宇宙マイクロ波背景放射 インフレーション データ解析 偏光 系統誤差

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の地平線サイズに匹敵する長大な波長を持った原始背景重力波の存在はインフレーション理論が共通して予言する所であり、波の振幅を測定することで「インフレーションが何時起こったか」を知ることができる。マイクロ波背景輻射偏光の奇パリティパターンに埋め込まれた原始重力波の信号を検出することで、インフレーション理論のモデル選別など、初期宇宙の理解に大きな進展があると期待される。

マイクロ波背景輻射偏光の観測分野では、集積化された検出器アレイの実現によって測定感度が急速に向上している。そのため、原始重力波信号の検出を制限する最大の要因は、宇宙の大規模密度構造に由来する光路の屈折現象になると見込まれている。そのような重力レンズ効果がもたらす擾乱を取り除く delensing 解析は将来の高感度観測において必携のツールであるが、研究開始当初の時点では、観測に付随する系統誤差の伝搬の検討が未開拓の状況であった。

## 2. 研究の目的

本課題は、マイクロ波背景輻射の偏光観測を通じた原始重力波信号検出の研究である。delensing 解析のシミュレーションを行い、波長数 Gpc 近辺での原始重力波信号の検出可能性について議論することを目的とする。

疑似偏光信号・重力レンズ効果・系統誤差を包括する一貫した標本生成を行い、観測の実際に則した delensing 解析のシミュレーションを実現する。偏光地図を汚染する諸々の系統誤差が delensing による誤差低減効果に与える影響を評価し、原始重力波信号の検出において系統誤差が果たす役割を明確にすることで、将来の観測計画の適切な立案に寄与することを期待したものである。

## 3. 研究の方法

本課題で取り扱う delensing 解析のシミュレーションは、疑似偏光地図の作成、重力レンズ効果による偏光パターンの変調印加、系統誤差の印加、レンズポテンシャルの再構築、delensing の実行、原始重力波検出への影響評価の6つの手続きから構成される。

市井のオープンソースソフトウェア等で対応できない要素に関しては、新規にソフトウェアの開発を行った。なかんずく、系統誤差の印加を行うシミュレーションは、本研究における主要なソフトウェアの開発要素として、作業時間の多くがこれに充てられた。

また、モンテカルロ的なアプローチによる統計評価を行うために、一連のシミュレーションを異なるリアライゼーションに対して繰り返し実行した。標本収集にあたっては、専用の計算機環境を準備し、約2年間の運用・管理を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 数値的基盤の整備

マイクロ波背景輻射偏光観測の delensing 解析について、走査観測シミュレーションにはじまる疑似観測データ標本の生成からその事後解析にいたる、一連の処理を取り扱える包括的な数値シミュレーション基盤を整備した。

一連のシミュレーションは、疑似偏光地図の作成、重力レンズ効果による偏光パターンの変調印加、系統誤差の印加、レンズポテンシャルの再構築、delensing の実行、原始重力波検出への影響評価から構成される。これらの手続きを、市井のオープンソースソフトウェア、過去の研究で開発済のレガシーソフトウェア、および新規開発のソフトウェアを組み合わせることで実現した。

観測の実際に則した標本を生成する際の要となる系統誤差の印加シミュレーションにあたっては、走査観測のサンプリングシミュレーションにおいて装置特性の畳み込み計算を行うソフトウェアを新規に開発した。畳み込みには、近似計算によらない数値積分を効率的に実行する手法を構築し、不規則な装置特性を直接的に取り込んで、その影響を厳密に評価することができるようになった。疑似観測データに光学特性の非一様性や前景放射による擾乱などの諸々の系統誤差を統一的に組み込むことができるようになったため、複数の系統誤差による複合汚染の効果も含めて、偏光地図に印加された系統誤差による偏光パターンの汚染を実際的に評価することが可能になった。

これら数値的基盤の整備により、系統誤差に汚染された偏光地図における delensing 解析の end-to-end なシミュレーションを行うための準備が完了した。

### (2) レンズ解析における系統誤差伝搬の理解

シミュレーションを実行して取得した標本データに事後解析処理を適用し、諸々の系統誤差がレンズ解析に与える影響、とりわけ delensing 解析への誤差伝搬について評価を行った。

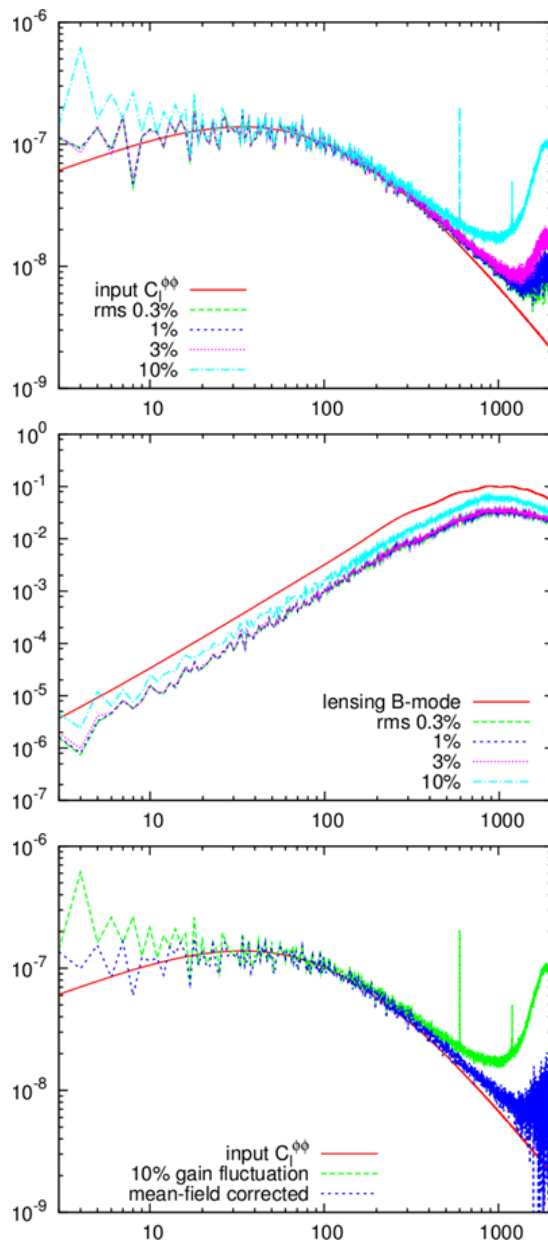
本研究を取り巻く状況について、マイクロ波背景輻射の偏光観測の分野では差分偏光測定による偽偏光の生成が大きな汚染源と従来考えられてきたが、偏光変調による信号分離の技術に進展があったことで、偏光信号そのものに付随する系統誤差の重要性がより強く認識されるようになった。情勢の推移を受けて、利得や角度、指向の揺らぎなどの偏光信号の空間パターンを変調させる類の系統誤差に焦点をあて、系統誤差がレンズ解析に伝搬する有様を明らかにした。

利得の揺らぎが偏光地図の奇パリティパターンにもたらす系統誤差は、その振幅が重力レンズ効果と同程度（自乗平均平方根にして約10%）に到達するレベルまでレンズ解析に顕著な影響を与えることは無かった。レンズポテンシャルの再構築には数十度角スケールに入力信号からの定性的なバイアスがみられた。また利得揺らぎに対応したスケールでは、孤立したスパイク状のバイアスが同定された。これらの再構築バイアスに関して、理論的なアプローチでその起源を調査した結果、偏光の空間パターンが非一様に変調された際に生じる mean-field bias として理解できることを確認した。delensing の解析結果は概ね再構築の精度に準じたものであった。（右図の角度スペクトルは上から順に、レンズポテンシャルの再構築、delensing 後の奇パリティパターン、mean-field 補正された再構築。）

偏光角、指向の揺らぎについても概ね同様の結論を得た。偏光角の揺らぎには、奇パリティパターンに生じる系統誤差が大角度スケールの角度揺らぎほど顕著であるという特徴が見られ、レンズ解析結果のスケール依存性が他のケースとは反転しているという事実を認めた。一方、指向の揺らぎは偏光信号の空間変化率に結合しているため、揺らぎのスケールによって解析結果が激しく変動することを発見した。また、指向の揺らぎが偏光地図の奇パリティパターンにもたらす系統誤差は、その性質が重力レンズ効果と縮退しており、レンズポテンシャルの再構築においては、指向誤差が同時に再構築されるという振る舞いが見られた。

delensing への影響としては、上記の要因に加えて、奇パリティパターンに生じる系統誤差が雑音の嵩上げとして寄与してしまう効果も認められた。

これら系統誤差がレンズ解析へ伝搬する性質を理解できたことで、実験計画を構築するに際して系統誤差抑制の具体的な指針を持つことができるようになった。



### (3) 将来観測への展望

系統誤差による偏光地図の変調によって偽の奇パリティパターンが生じるものの、重力レンズ効果に匹敵する信号レベルに達するまで delensing 解析への影響は非常に軽微なものであった。これは将来の偏光観測実験について得られた端的な示唆と言える。

定量的な言及としては、delensing 解析がプロジェクト成功の要因に組み込まれている実験計画の立案段階において、レンズ解析の観点から、必要な測定精度の諸元に目安を付けることができるようになった。現在世界各所の研究機関で競って推進している諸々の実験は、まさにその様な計画に相当している。

定性的には、将来観測で凡そ期待されている誤差水準に照らして、主要な系統誤差では delensing 解析への影響が軽微なものに留まるということである。即ち、次世代観測における delensing 解析の有効性について従来よりも強い確信を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永田竜 ほか LiteBIRD Phase-A1 team
2. 発表標題 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD における系統誤差の研究 X
3. 学会等名 日本天文学会 2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永田竜
2. 発表標題 LiteBIRD 衛星の光学系特性評価
3. 学会等名 CfCA 平成29年度ユ－ザ－ズミーティング
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永田竜、今田大皓、金井啓晃 ほか LiteBIRD Phase-A1 team
2. 発表標題 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD における系統誤差の研究 XI
3. 学会等名 日本天文学会 2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永田竜、今田大皓 ほか LiteBIRD Phase-A1 team
2. 発表標題 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD における系統誤差の研究 XII
3. 学会等名 日本天文学会 2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永田竜、高倉隼人、関本裕太郎 ほか LiteBIRD team
2. 発表標題 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD における系統誤差の研究 XIII
3. 学会等名 日本天文学会 2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永田竜、並河俊弥
2. 発表標題 CMB レンズング解析における観測誤差の伝搬
3. 学会等名 日本天文学会 2020年春季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 実験的宇宙物理研究グループ ウェブページ <a href="http://cmb.kek.jp/">http://cmb.kek.jp/</a> LiteBIRD ウェブページ <a href="http://litebird.jp/">http://litebird.jp/</a>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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