

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13558

研究課題名（和文）次世代マイクロ波望遠鏡群で探るインフレーション起源重力波と宇宙の暗黒成分

研究課題名（英文）Searching for primordial gravitational waves and dark matter/energy with next-generation CMB experiments

研究代表者

茅根 裕司（Chinone, Yuji）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・量子場計測システム国際拠点・特任助教

研究者番号：90649675

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ビッグバン宇宙論が確かになった現在、「その先」を説明するインフレーション理論の検証が現代宇宙論に於ける最大の課題の一つである。私の研究の目的は、インフレーションの際に生成される原始重力波を検出することである。これを実現する最善の方法は、原始重力波による時空の歪みによって宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光分布に刻まれる特殊な渦パターン、「Bモード」を測定することである。本研究では、私のこれまでの研究実績をもとに、将来Bモードの検出の可能性の最も高い実験の一つである次世代実験「Simons Observatory」に向けた解析パイプラインの開発をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代実験であるSimons Observatoryは2023年から観測を始めるため、本研究で解析パイプラインを適応、さらに改善していくのに最適なタイミングである。将来、このパイプラインを使用して原始重力波が観測できれば、インフレーションの証拠、ひいては宇宙開闢の瞬間を観測することと同義であるため、その学術的・社会的インパクトは計り知れないと言える。

研究成果の概要（英文）：To find direct evidence of the cosmic inflation at the beginning of the universe is one of the main topics in Cosmology. My research is focused on detecting Primordial Gravitational Waves from the cosmic inflation via B-mode signals imprinted in CMB. In this research project, I developed a data analysis pipeline of the Simons Observatory, which will be one of the most sensitive CMB experiments.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：宇宙論 観測 宇宙マイクロ波背景放射 偏光 データ解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

ビッグバン宇宙論が確かになった現在、「その先」を説明するインフレーション理論の検証が現代宇宙論に於ける最大の課題の一つである。私の研究の目的は、インフレーションの際に生成される原始重力波を検出することである。これを実現する最善の方法は、原始重力波による時空の歪みによって宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光分布に刻まれる特殊な渦パターン、「Bモード」を測定することである。

現在数多くの地上 CMB 実験が、観測中又は開発・建設中である。この様な状況の中、

1. **Simons Array** を始め、**AdvACT**, **SPT-3G**, **Keck Array/BICEP3** といった第 3 世代 CMB 実験が、次の数年、世界をリードしていくことが期待されている。
2. 一方で、全ての標準的なインフレーションモデルを検証するためには、感度が足りない。**Keck Array/BICEP3** が先行しているが、小口径望遠鏡のため **delensing** を行うことが出来ず、それ以上感度を上げることが出来ない。
3. また、**Simons Array**, **AdvACT**, **SPT-3G** は大口径望遠鏡であるため **delensing** が可能であるが、そもそも検出器の感度が不足している。
4. この様な状況にあつて、**Simons Array** と **AdvACT** による **Simons Observatory** の実施は、研究分野で最も注目されており、「発見」の可能性が高いと考えられている。

**Simons Observatory** は 2020-2023 年ごろから観測を開始することから、この時期に間に合うために、データ解析パイプラインの開発が必要不可欠であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は **Simons Observatory** 実験の観測データを解析するパイプラインの準備・開発を行うことである。特に、インフレーションによって作り出された原始重力波起源の B モード測定するために建設されている **SO small aperture telescopes (SATs)** のデータを解析するパイプラインを開発する。その際、装置起源、解析起源の系統誤差を抑制する手法の実装が必要不可欠である。**SO** の観測データサイズが膨大になるため、**HTC** や **HPC** の利用を積極的に推進する。

## 3. 研究の方法

これまでの実験、例えば私が実際に解析をおこなってきた **QUIET** 実験や **POLARBEAR** 実験、**Simons Array** 実験で実装されてきた「**MASTER pipeline**」を元に、**SO** で実際に B モードを検出するのに必要な感度に於いて考慮すべき各種系統誤差を抑制するための各種の拡張を行う。

## 4. 研究成果

**SO** は世界規模の国際共同実験であり、建設はチリで行われている。そのため、世界規模のコロナ禍は **SO** の開発・建設全体に少なからず影響を与えている。そんな中にあつても、B モード測定に向け、**SAT BB pipeline** の開発を中心とした解析準備を進めてきた(図 1)。

私も **co-leader** の一人を担っている **SO** 内の **Pipeline working group (PWG)**、および **Analysis working group (AWG)** の各メンバーと連携し、開発を進めてきた。特に、これまでに"**filter-bin map-making**"を使用した際に生じる「時系列プロセスで生じてしまう E モードから B モードへの漏れこみ」を除去する手法の開発および検証を行ってきた。私は「観測行列を使った一般化固有値問題の解を使った除去手法」(図 2)をチリで観測を行う実験としては初めて開発し、パイプラインに実装した。シミュレーションを用いた精度の確認により、目標とする感度を達成し得ることを確認した。

この手法は、計算機コストの高いコンポーネントである。これらの効率化のために、ローレンスバークレー国立研究所に設置されたスーパーコンピュータや自前の GPU を活用した実装・検証を進めた。その結果、限られた解像度の場合ではあるが、CPU に比べて GPU を使った場合、10 倍近く計算速度を実現できることを確認した。

この検証を終えたパイプラインを元に、今後は実際の観測データをプロセスするための準備をすすめていく予定である。このパイプラインを使い、早ければ数年以内に世界最高感度を実現する見込みである。

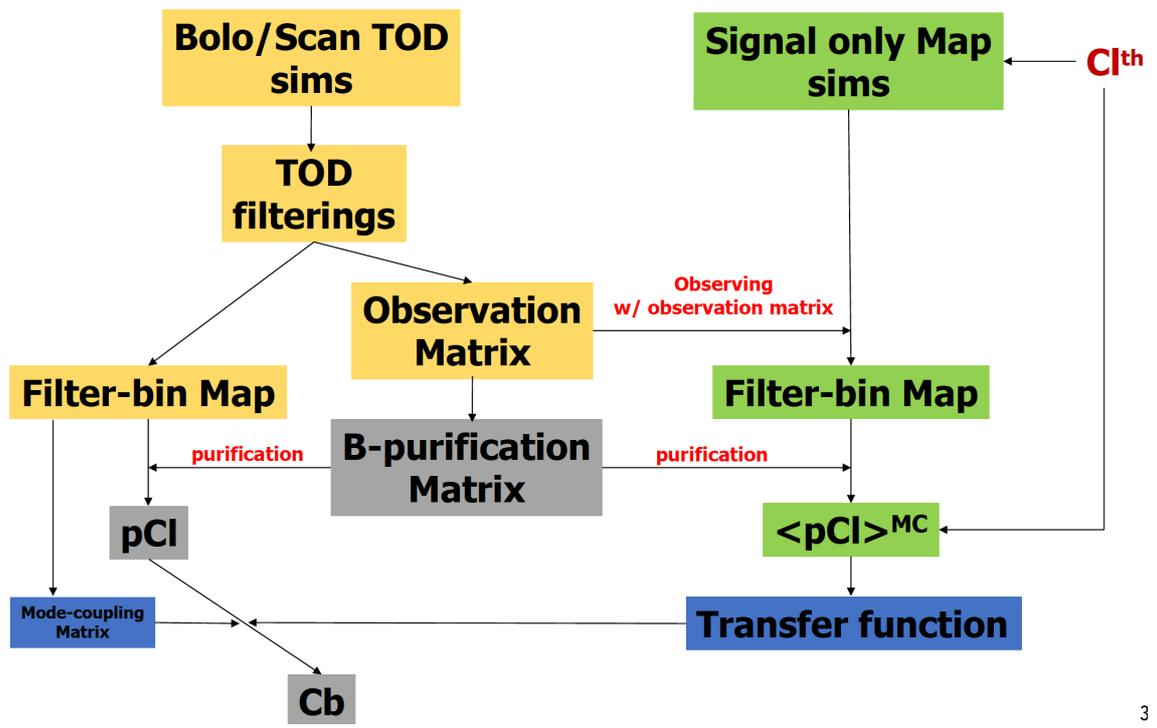


図1. "SAT BB pipeline"の概要。

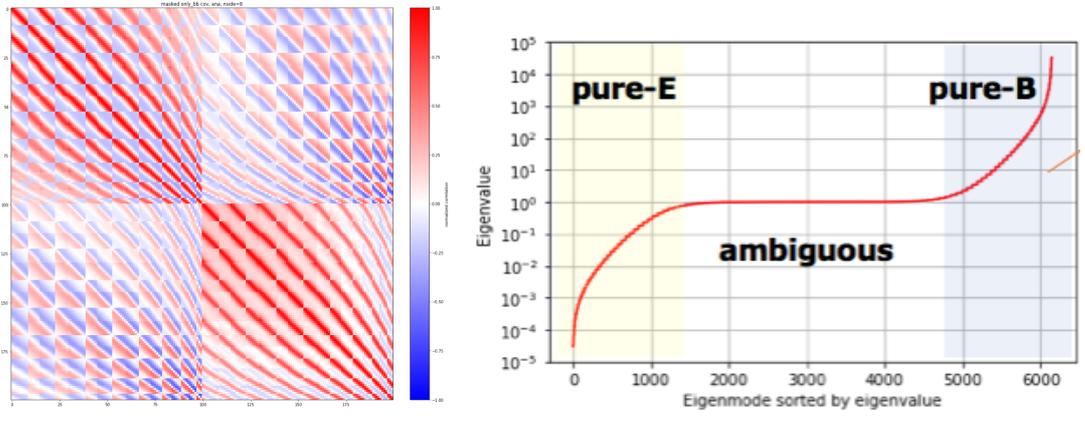


図2. CMB 共分散行列と、その一般化固有値問題の解を固有値の大きさに並べたもの。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Abitbol Maximilian H. et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 The Simons Observatory: gain, 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 032 ~ 032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/05/032	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
1. 著者名 Namikawa Toshiya et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 Simons Observatory: Constraining inflationary gravitational waves with multitracer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.105.023511	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
1. 著者名 Abazajian Kevork et al.	4. 巻 926
2. 論文標題 CMB-S4: Forecasting Constraints on Primordial Gravitational Waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 54 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Segawa Yuuko et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Method for rapid performance validation of large TES bolometer array for POLARBEAR-2A using a coherent millimeter-wave source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	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) 10.1063/5.0038197	査読の有無 無
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

1. 著者名 Barron Darcy et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Integrated Electrical Properties of the Frequency Multiplexed Cryogenic Readout System for POLARBEAR/Simons Array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3067190	査読の有無 無
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

1. 著者名 Kiuchi Kenji et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 The Simons Observatory Small Aperture Telescope overview	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE	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) 10.1117/12.2562016	査読の有無 無
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

1. 著者名 Ito Jennifer et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Detector and readout characterization for POLARBEAR-2b	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE	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) 10.1117/12.2562766	査読の有無 無
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

1. 著者名 Nishino Haruki et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Data acquisition and management system for the CMB polarization experiment: Simons Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE	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) 10.1117/12.2560616	査読の有無 無
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

1. 著者名 Ali Aamir M. et al.	4. 巻 200
2. 論文標題 Small Aperture Telescopes for the Simons Observatory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 461 ~ 471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02430-5	査読の有無 無
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

1. 著者名 Adachi S. et al.	4. 巻 904
2. 論文標題 A Measurement of the CMB E-mode Angular Power Spectrum at Subdegree Scales from 670 Square Degrees of POLARBEAR Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbacd	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

1. 著者名 The Polarbear Collaboration et al.	4. 巻 897
2. 論文標題 A Measurement of the Degree-scale CMB B-mode Angular Power Spectrum with Polarbear	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 55 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8f24	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

1. 著者名 Nashimoto Masashi, Hattori Makoto, Chinone Yuji	4. 巻 895
2. 論文標題 CMB Shadows: The Effect of Interstellar Extinction on Cosmic Microwave Background Polarization and Temperature Anisotropy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L21 ~ L21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab9018	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

1. 著者名 Fandez M. Aguilar et al.	4. 巻 893
2. 論文標題 Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum from Two Years of POLARBEAR Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 85 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7e29	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

1. 著者名 Adachi S. et al.	4. 巻 124
2. 論文標題 Internal Delensing of Cosmic Microwave Background Polarization B-Modes with the POLARBEAR Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.124.131301	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

1. 著者名 茅根裕司	4. 巻 113
2. 論文標題 宇宙マイクロ波背景放射B-mode偏光観測の現在と未来: POLARBEAR実験と次の10年間の展望	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 天文月報	6. 最初と最後の頁 542-551
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 無
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 -

1. 著者名 Abazajian Kevork, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 CMB-S4 Decadal Survey APC White Paper	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Decadal Survey APC White Paper	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) 10.2172/1556957	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Maximilian H. Abitbol, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 The Simons Observatory: Astro2020 Decadal Project Whitepaper	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astro2020 Decadal Project Whitepaper	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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 The Simons Observatory collaboration: Y. Chinone et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 The Simons Observatory: science goals and forecasts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 056 ~ 056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/02/056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yuji Chinone
2. 発表標題 Systematics-POLARBEAR/Simons Array perspective
3. 学会等名 CMB-S4 Spring 2021 Collaboration meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Chinone
2. 発表標題 A Null test framework for B-mode measurements with POLARBEAR
3. 学会等名 CMB systematics and calibration focus workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Chinone
2. 発表標題 The results and achievements of the POLARBEAR experiment in the 2010s and its future in the 2020s
3. 学会等名 KEK Theory Seminar
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Chinone
2. 発表標題 The results and achievements of the POLARBEAR experiment in 2010s and its future
3. 学会等名 UTokyo UTAP/RESCEU Seminar
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 茅根裕司 他
2. 発表標題 POLARBEAR実験によるBモード偏光観測結果の総括と最新結果
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 茅根裕司 他
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射観測実験「POLARBEAR」によるBモード偏光観測結果の総括
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 CMB survey: S0, SA, CMB-S4
3. 学会等名 Testing Gravity THxOBS Japan kickoff meeting (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 CMBデータ解析 生データからパワースペクトル、宇宙論パラメータまで
3. 学会等名 京都大学高エネルギー物理学研究室セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茅根裕司、他POLARBEAR Collaboration
2. 発表標題 POLARBEAR実験による原始重力波起源Bモード偏光観測・解析の現状と将来計画
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 CMB Activities @ Berkeley: Data Analysis, Systematic Study, and Hardware Deployment of POLARBEAR, Simons Array, and Simons Observatory
2. 発表標題 CMB Activities @ Berkeley: Data Analysis, Systematic Study, and Hardware Deployment of POLARBEAR, Simons Array, and Simons Observatory
3. 学会等名 Accurate lensing in the era of precision Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

SIMONS OBSERVATORY  
<https://simonsobservatory.org/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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	UC Berkeley	LBNL	UCSD	他6機関
英国	University of Cambridge	Cardiff University	University of Oxford	
フランス	パリ・デイドロ大学	CNRS		
イタリア	SISSA	INFN		
チリ	Universidad de Chile	チリ・カトリック大学		
オーストラリア	メルボルン大学			