

令和 6 年 5 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03585

研究課題名（和文）最先端マイクロ波観測で探る原始重力波と新たな時間軸天文学の開拓

研究課題名（英文）Searching for PGWs with CMB exoeriments and their application for time-domain astronomy

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・特任准教授

研究者番号：90649675

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：Simons ArrayによるCMB観測を実施し、データ解析を進めた。現時点では原始重力波起源Bモードの観測を実現できておらず、更なる高感度実験での観測が必要不可欠である。POLARBEAR実験の観測データを使用することで、POLARBEARが報告していた上限を更新した。また時間変化する偏光角からアクシオン類似粒子への制限する解析手法を構築し、POLARBEARで観測したCMBとTauA（蟹星雲）データを解析した。その結果、同種の手法では最も厳しい制限を実現した（TauAによる制限で、アクシオン類似粒子の質量が $10^{-22}$ - $10^{-18}$  eVの範囲）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Simons Arrayではインフレーション起源信号を検出する感度を実現できなかったが、半波長板による偏光変調の実証に有効だった。これまで注目されていなかった宇宙マイクロ波背景放射（CMB）観測実験によるマイクロ波観測データの時間軸の情報を使うことで、アクシオン類似粒子を探索できることを示した。特にCMBおよびTauA（蟹星雲）のデータを解析したの本研究が初めてである。

研究成果の概要（英文）：Observations of the Cosmic Microwave Background (CMB) were taken using the Simons Array, and data analysis was performed. At present, detection of B-modes from primordial gravitational waves have not been achieved, and further high-sensitivity experiments are essential. By using the observational data from the POLARBEAR experiment, we updated the upper limits of the tensor-to-scalar ratio that POLARBEAR had reported. In addition, we constructed an analytical method to limit axion-like particles from the time-varying polarization angle and analyzed the CMB data observed by POLARBEAR and TauA (Crab Nebula) data. As a result, we achieved the most stringent limits with this type of method (limiting the mass of axion-like particles to the range of  $10^{-22}$ - $10^{-18}$ ) eV, based on the limits from TauA).

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：観測的宇宙論 観測 データ解析 マイクロ波観測 電波

### 1. 研究開始当初の背景

20世紀後半から急速に進んだ宇宙観測の成果、特に宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測成果により宇宙のビッグバンが解明された。現在、その「先」で起こったとされる宇宙の開闢とその後の急速膨張「インフレーション」の検証が宇宙論研究の課題の一つである。インフレーションの全貌が解明されれば宇宙開闢時の超高エネルギー物理の理解はもとより、宇宙の創生という何千年にもわたる人類共通の疑問に答えを与えることが出来る。更に最近では、このCMB観測の新たな応用として、マイクロ波による時間軸天文学の開拓が注目されている。宇宙を見渡せば、超新星爆発、ガンマ線バースト(GRB)、中性子星の合体といった、高エネルギー天体が関わると考えられている様々な「突発的天体現象」が知られている。この突発的天体現象の多波長に渡るフォローアップ観測は、未解決の高エネルギー天体現象の理解に重要な役割を担っている。今後は更に電磁波に留まらず、重力波・ニュートリノまでを含んだ多周波・マルチメッセンジャーによる時間軸天文学の発展が期待されている。

### 2. 研究の目的

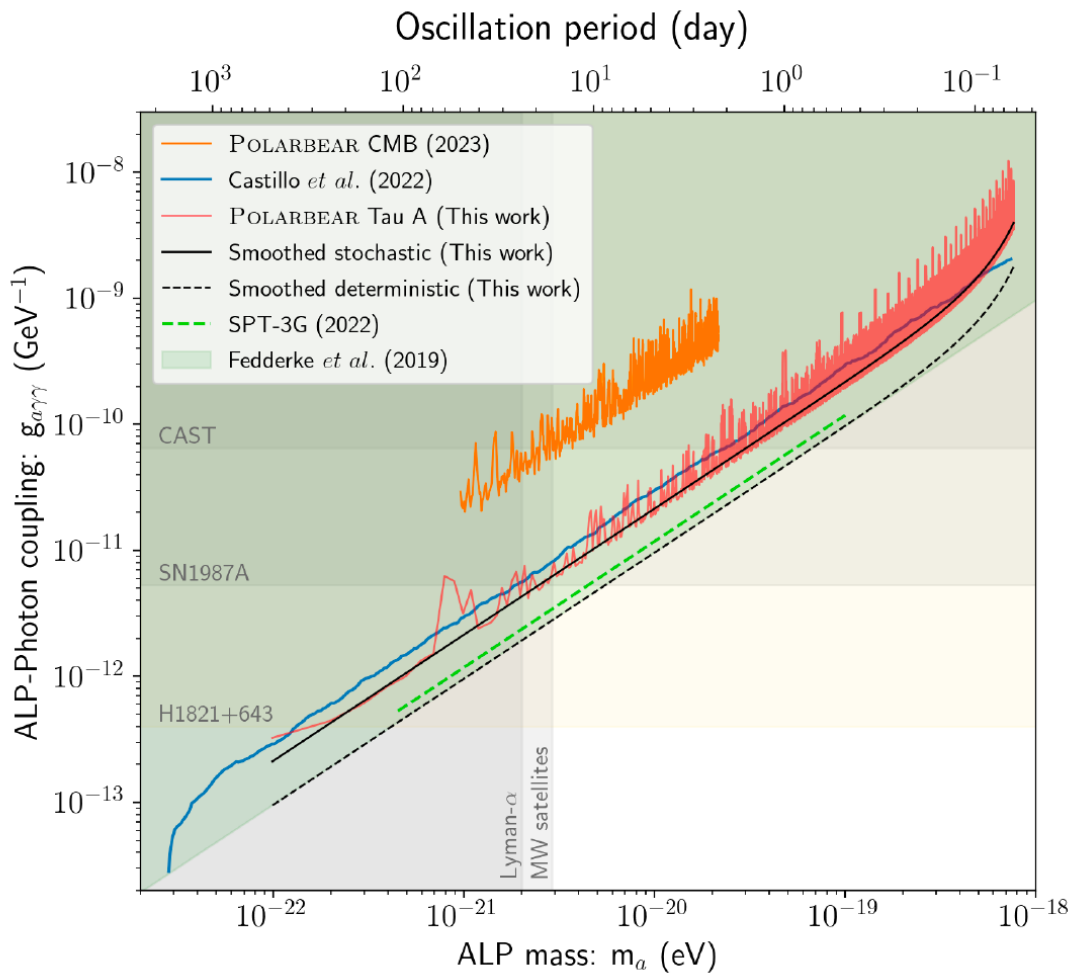
本研究の第一の目的は、インフレーションの際に生成される時空のさざ波である原始重力波を、CMBに刻まれる特殊な渦状の偏光パターン「Bモード」によって精密に観測することである。特に原始重力波の振幅が最も大きくなる約2度角以上の大角度スケールでの精密観測が不可欠である。この大角度スケールのBモードが観測できれば原始重力波の直接的な証拠となり、ひいては宇宙の「はじまり」の解明につながる。また、インフレーション時のエネルギースケールは $10^{16}$  GeV程度であると期待されている。これは最高エネルギー加速器LHCで達成できるエネルギーの一兆倍にもなることから、Bモードによる原始重力波の観測が実現できれば、加速器実験では不可能な大統一理論スケールの超高エネルギー物理の検証につながると考えられている。第二の目的は高精度のCMB観測データを活用し、マイクロ波帯での時間軸天文学を開拓することである。宇宙の果てからの一定な信号を対象とするCMB観測と突発的天体現象を対象とする時間軸天文学の連携は、その性質や分野の違いから今までなされてこなかった。一方で見方を変えれば、CMB観測は広い天域を、長時間にわたり、高い頻度で、多数のマイクロ波帯で観測するものであり、これは時間軸天文学の要求と完全にマッチする。

### 3. 研究の方法

既に観測を終えているがこれまでに高精度のCMB観測を実施してきたPOLARBEAR実験の観測データと、最先端のCMB観測実験Simons Arrayによる観測データを解析する。またマイクロ波観測データの時間軸方向に注目したこれまでにない新しい物理解析を実現する。

### 4. 研究成果

Simons ArrayによるCMB観測を実施し、データ解析を進めた。現時点では原始重力波起源Bモードの観測を実現できておらず、更なる高感度実験での観測が必要不可欠である。一方、POLARBEAR実験の観測データを使用することで、過去にPOLARBEARが報告していた上限を更新した。さらに時間変化する偏光角からアクシオン類似粒子への制限する解析手法を構築し、POLARBEARで観測したCMBとTauA(蟹星雲)データを解析した。その結果、同種の手法では最も厳しい制限を実現した(TauAによる制限で、アクシオン類似粒子の質量が $10^{-22}$ - $10^{-18}$  eVの範囲、図参照) [1, 2]。



図： POLARBEAR 実験によるアクシオン類似粒子の制限。CMB および TauA を用いた二つの制限を実現した。TauA による制限は同種の手法による結果では最も厳しいものである [1, 2]。

引用

[1] <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.043017>

[2] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.02096>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 The POLARBEAR collaboration, and Y. Chinone et al.	4. 巻 931
2. 論文標題 Improved Upper Limit on Degree-scale CMB B-mode Polarization Power from the 670 Square-degree POLARBEAR Survey	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 101 ~ 101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac6809	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, Addison Graeme E., Adshead Peter, 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 The POLARBEAR collaboration, and Y. Chinone et al.	4. 巻 108
2. 論文標題 Constraints on axionlike polarization oscillations in the cosmic microwave background with POLARBEAR	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.108.043017	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9件（うち招待講演 6件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 Polarbear実験によるCMB 偏光の振動を用いたAxionへの制限
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 Polarbear実験によるCMB偏光を用いたAxion探査の現状
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 宇宙論的観測の現状と将来II -CMB-, 高精度・大統計の宇宙論データで探る重力理論
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 最新・次世代マイクロ波望遠鏡群による広天域・高精度・高頻度偏光観測と素粒子・宇宙論
3. 学会等名 大型サブミリ波望遠LSTセミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 The past, present, and future of the search for primordial gravitational waves from cosmic inflation with CMB experiments in the Atacama desert and space
3. 学会等名 The 9th Korea-Japan Workshop on Dark Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 Synergies between ALMA/LST and wide-field high-cadence CMB surveys
3. 学会等名 Synergies between ALMA and wide-field high-cadence multi-wavelength surveys (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 インフレーション起源Bモード検出に向けたE/Bモード分手法の開発
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Chinone
2. 発表標題 Synergies between ALMA/LST and wide-field high-cadence CMB surveys
3. 学会等名 Synergies between ALMA and wide-field high-cadence multi-wavelength surveys (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茅根裕司
2. 発表標題 次世代地上実験による広天域・高精度・高頻度CMB 偏光観測と将来の素粒子・宇宙論解析
3. 学会等名 Upcoming CMB Observations & Cosmology (招待講演)
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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	UCB	UCSD	LBNL	他5機関
フランス	APC			
イタリア	SISSA			
米国	UC Berkeley	UCSD	LBNL	他5機関
フランス	パリ・デイドロ大学	CNRS		
イタリア	SISSA	INFN		