

令和 5 年 4 月 28 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17H02894

研究課題名（和文）自発的対称性の破れで解明するCMBアノマリーの起源

研究課題名（英文）Exploring the origin of CMB anomaly with spontaneous symmetry breaking

研究代表者

早田 次郎（Soda, Jiro）

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：00222076

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙マイクロ波背景放射観測衛星WMAPによって、CMB温度揺らぎに統計的非等方性などの異常な性質であるCMBアノマリーが発見された。そのような中、我々は非等方性の生成機構を発見し、CMBアノマリーの理解に貢献した。本研究では、自発的対称性の破れという観点から、多様なCMBアノマリーの物理的機構を明らかにする研究を行った。特に、有効場の理論の観点から、アノマリー発現の機構を明らかにすることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙論的な観測の精密化に伴い、CMBアノマリーが発見された。CMBアノマリーを説明するために理論的な精密化が要求されるようになった。我々は、対称性の自発的な破れという観点からCMBアノマリーの解明に挑み、有効場の量子論を駆使することで、統計的な非等方性の生成機構の理解に成功した。また、他のCMBアノマリーの理解のための場の理論的な枠組みの構築にも成功した。これらの成果は、精密宇宙論の物理的な理解に貢献した。

研究成果の概要（英文）： The so-called CMB anomaly such as the statistical anisotropy in the CMB temperature fluctuations has been found by the cosmic microwave explorer satellite WMAP. Given this situation, we have contributed to the understanding of CMB anomaly by finding the mechanism for generating the statistical anisotropy. In this project, we have systematically studied the CMB anomaly from the point of view of the spontaneous symmetry breakdown. In particular, we have revealed the physical mechanism for generating the CMB anomaly from the point of view of the effective field theory.

研究分野：宇宙論

キーワード：自発的対称性の破れ インフレーション 統計的非等方性 ゲージ場 CMBアノマリー

## 1. 研究開始当初の背景

インフレーション理論は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度揺らぎの起源を解明した。しかし、2003年、観測衛星WMAPは、温度揺らぎ分布の統計的な方向依存性 (非等方性) などを発見し、新たな謎を生み出した。これらは、CMBアノマリーと呼ばれている。さらに、2008年、Groeneboom と Eriksen は、WMAPのデータに、四重極的非等方性を見いだした。CMB観測で示唆された統計的非等方性を理論的に解明することは、英国のDavid Lythや米国のMarco Peloso等、世界中の多くの人々の努力にも関わらず、困難を極めていた。そのような中、2009年、渡辺、菅野、早田 (本課題代表) は、これまでの宇宙論の常識を覆して、超重力理論においては、ゲージ場がインフレーション中に生き残り、非等方的に膨張する非等方インフレーションが起きることを世界で初めて発見した。さらに2010年には、そのゲージ場が、四重極的非等方性を生み出すことを発見した。統計的非等方性の解明に成功したことは、第21回日本物理学会論文賞を受賞するなど、世界的に高く評価されている。ところが、2013年、観測衛星Planckチームは、新たなCMBアノマリーである双極的非等方性の発見を報じた。このようなCMBアノマリーの背後には、非等方インフレーションのような新しいシナリオやそれを支配する新たな物理法則が隠されているはずであり、CMBアノマリーの解明は初期宇宙を支配する究極理論へつながる重要な研究課題となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、自発的対称性の破れという観点から、さらにこの研究を発展させ、多様なCMBアノマリーの物理的機構を明らかにする。その研究成果をもとに新たな現象を予測し、観測の将来計画に指針を与える。さらに、CMBアノマリーの背後にある初期宇宙を支配する究極理論を探求する。

## 3. 研究の方法

- 自発的回転対称性の破れに伴う南部・ゴールドストーンモードの低エネルギー有効理論を構築し、四重極的非等方性の破れが再現可能であることを証明する。
- Planckで発見された双極的非等方性の物理的機構を明らかにするために、低エネルギー有効理論を自発的並進対称性の破れを取り入れた理論に拡張する。
- 低エネルギー有効理論をローレンツブーストや離散対称性が破れた場合に拡張し、未解明のCMBアノマリーの物理的機構を明らかにする。
- 低エネルギー有効理論の予測から観測の将来計画に指針を与える。また、理論予測と観測データの比較を行い、低エネルギー有効理論に現れるモデルパラメータを制限する。
- 得られた低エネルギー有効理論を手がかりに、CMBアノマリーの背後にある究極理論を探求する。

#### 4. 研究成果

まず、インフレーション中の回転対称性の破れに起因する統計的非等方性を調べるために、回転対称性の破れに付随する Nambu-Goldstone ボソンと原始密度揺らぎの有効作用を構成した。その後、それをもとに四重極的非等方性の普遍性を明らかにした。また、観測に対する予測とデータの比較検討を行うことで低エネルギー有効理論にどのような制限が得られるのかを検討した。さらに、研究協力者である大学院生の伊藤とともに、定数非等方性を持った厳密解を発見した。これは、有効理論の構築の際、指針を与える重要な成果であった。

研究代表者の早田は、自発的に対称性の破れた背景での原始重力波の統計を調べ、高周波数モードの場合サブポアソン統計分布を示す可能性があることを示した。古典論的な重力波生成であればサブポアソン分布は生じないことが分かっているので、これは重力子の観測可能性を示すものであり、画期的な成果である。また、時空のパリティー対称性の破れを重力波の伝搬を通して検証できることを明らかにした。

インフレーション中の宇宙はハッブルスケール程度の温度を持った様々な粒子で満たされている。原始ゆらぎがこれらの熱浴と相互作用していると、粒子生成の効果に伴い非ガウス性などの観測量に影響が現れると期待される。分担者の野海は、時間並進対称性の自発的破れに基づく「原始ゆらぎの有効場理論」にこのような粒子生成の効果を取り込むことに成功した。構成した有効理論はインフレーションだけでなく時間結晶や同期現象などの物性系への応用も期待される。

早田は、非等方インフレーションのアイデアを高次元宇宙モデルに拡張することで、内部空間を保ったまま、加速膨張宇宙を実現することに成功した。さらに、重力波を観測することで対称性の破れを特徴付けるために、重力波の偏極を表すストークスパラメーターを、インフレーション中に生成される原始重力波の初期状態においてどのように取り入れるのかを明らかにした。これは、様々な対称性の破れの研究に有用となると思われる。研究代表者の早田と分担者の野海は、時空対称性の自発的破れの視点をを用いることで、非等方インフレーションを記述する有効理論を構成し、「時空の非等方性」と「原始揺らぎの統計的非等方性」の関係を明らかにした。この論文の作成にはかなりの時間を要したが、本科研費で雇用した研究員の貢献により完成した。また、野海は、インフレーションモデルが満たすべき整合性条件を与える「弱い重力予想」の理論的検証を行った。

本研究は、対称性の破れと低エネルギー有効理論との関係を広く研究し、他分野との交流を推進することも目的としていた。東工大の山口教授をお招きして、低エネルギー有効理論に関連する講義をしていただいた。

早田は、非等方インフレーションのアイデアをダークマターに応用することで、ベクトルダークマターが存在する可能性に着目した。パルサータイミング観測に特徴的なシグナルが現れることを明らかにし、他のダークマター候補と区別が可能であることを示した。さらに、重力波がアクシオンダークマター中を伝搬するときにパリティー対称性の破れが現れる可能性と共鳴による振幅の増大の観測可能性を指摘した。また、アクシオンの振動によるゲージ場の不安定増幅によってパルサータイミングによって観測可能な重力波が生成されることを明らかにした。研究代表者の早田と科研費雇用研究員の吉野はブラックホールの光子球から高周波重力波が放射されることを明らかにした。分担者の野海は「弱い重力予想」の定式化に関する研究を行い、予想の証明に迫る成果をあげた。また、弦の場の理論の立場からCMB温度揺らぎのアノマリーに迫るような研究も行った。

インフレーション中の自発的対称性の破れを広い観点から捉え、通常インフレーションの不安定化として非等方インフレーションを再定式化した。さらに、1形式場と2形式場を含む場合についても系統的に研究した。また、対称性の破れをアーベルゲージ場からSU(3)非アーベルゲージ場へと拡張することに成功した。特に、ゲージ場の有効ポテンシャルの平坦方向が重要な役割を果たすことを明らかにした。

これらの成果は、CMBの統計的非等方性を理解するうえで重要な指針を与えるものである。最近では、エネルギー散逸によって生じるインフレーションの不安定性と非等方インフレーションの関係について研究し、自発的対称性の破れと散逸の関係について深い知見を得ることができた。今後の観測の発展によって、統計的非等方性が発見されれば、本研究計画の成果が大いに役に立つことになる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計43件（うち査読付論文 43件 / うち国際共著 18件 / うちオープンアクセス 38件）

1. 著者名 Gong Jinn-Ouk, Noumi Toshifumi, Shiu Gary, Soda Jiro, Takahashi Kazufumi, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2020
2. 論文標題 Effective field theory of anisotropic inflation and beyond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 027 ~ 027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/08/027	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 Nomura Kimihiro, Ito Asuka, Soda Jiro	4. 巻 80
2. 論文標題 Pulsar timing residual induced by ultralight vector dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7990-y	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 -
1. 著者名 Chu Chong-Sun, Soda Jiro, Yoshida Daisuke	4. 巻 6
2. 論文標題 Gravitational Waves in Axion Dark Matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 89 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe6070089	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 Jung Sunghoon, Kim TaeHun, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 102
2. 論文標題 Constraining the gravitational coupling of axion dark matter at LIGO	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 55013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.055013	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Polarized Initial States of Primordial Gravitational Waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 672 ~ 672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12040672	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 -

1. 著者名 Ito Asuka, Soda Jiro	4. 巻 80
2. 論文標題 A formalism for magnon gravitational wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-8092-6	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 -

1. 著者名 Nomura Kimihiro, Yoshida Daisuke, Soda Jiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Stability of magnetic black holes in general nonlinear electrodynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.124026	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 -

1. 著者名 Noumi Toshifumi, Saito Kaishu, Soda Jiro, Yoshida Daisuke	4. 巻 103
2. 論文標題 O(d,d;Z) invariant Fierz-Pauli massive gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 46011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.046011	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 -

1. 著者名 Kitajima Naoya, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 126
2. 論文標題 Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 121301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.121301	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro, Tokuda Junsei	4. 巻 103
2. 論文標題 Noise and decoherence induced by gravitons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.044017	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 -

1. 著者名 Andriolo Stefano, Huang Tzu-Chen, Noumi Toshifumi, Ooguri Hiroshi, Shiu Gary	4. 巻 102
2. 論文標題 Duality and axionic weak gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 46008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.046008	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 Loges Gregory J., Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 2020
2. 論文標題 Duality and supersymmetry constraints on the weak gravity conjecture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2020)008	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 Ito Asuka, Lyonaga Aya, Kim Suro, Soda Jiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Dressed power-law inflation with a cuscuton	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.083502	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 -

1. 著者名 Ito Asuka, Ikeda Tomonori, Miuchi Kentaro, Soda Jiro	4. 巻 80
2. 論文標題 Probing GHz gravitational waves with graviton?magnon resonance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7735-y	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 -

1. 著者名 Ito Asuka, Sakakihara Yuki, Soda Jiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Accelerating universe with a stable extra dimension in cuscuton gravity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.063531	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 -

1. 著者名 Yoshida Daisuke, Soda Jiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Birth of de Sitter universe from a time crystal universe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.123531	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 -

1. 著者名 Masaki Emi, Aoki Arata, Soda Jiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Stability of axion dark matter-photon conversion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.043505	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 -

1. 著者名 Kanno Sugumi, Soda Jiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Detecting nonclassical primordial gravitational waves with Hanbury-Brown-Twiss interferometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.084010	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 -

1. 著者名 Isono Hiroshi, Noumi Toshifumi, Takeuchi Toshiaki	4. 巻 2019
2. 論文標題 Momentum space conformal three-point functions of conserved currents and a general spinning operator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2019)057	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 Isono Hiroshi, Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 2019
2. 論文標題 Momentum space approach to crossing symmetric CFT correlators. Part II. General spacetime dimension	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2019)183	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 Kim Suro, Noumi Toshifumi, Takeuchi Keito, Zhou Siyi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Heavy spinning particles from signs of primordial non-gaussianities: beyond the positivity bounds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2019)107	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 Chen Wei-Ming, Huang Yu-tin, Noumi Toshifumi, Wen Congkao	4. 巻 100
2. 論文標題 Unitarity bounds on charged/neutral state mass ratios	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 25016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.025016	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 Hamada Yuta, Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 123
2. 論文標題 Weak Gravity Conjecture from Unitarity and Causality	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 51601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.051601	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 Abe Yugo, Inami Takeo, Izumi Keisuke, Kitamura Tomotaka, Noumi Toshifumi	4. 巻 2019
2. 論文標題 S-matrix unitarity and renormalizability in higher-derivative theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz084	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 -

1. 著者名 Yoshida Daiske, Soda Jiro	4. 巻 27
2. 論文標題 Exploring the string axiverse and parity violation in gravity with gravitational waves	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 1850096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271818500967	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 -

1. 著者名 Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 78
2. 論文標題 Cosmological imprints of string axions in plateau	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-018-6246-6	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 -

1. 著者名 Yoshida Daiske, Soda Jiro	4. 巻 2018
2. 論文標題 Electromagnetic waves propagating in the string axiverse	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty029	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 -

1. 著者名 Ito Asuka, Soda Jiro	4. 巻 78
2. 論文標題 Anisotropic constant-roll Inflation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-018-5534-5	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 -

1. 著者名 Masaki Emi, Soda Jiro	4. 巻 98
2. 論文標題 Conversion of gravitons into dark photons in cosmological dark magnetic fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23540
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.023540	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 -

1. 著者名 Kitajima Naoya, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 2018
2. 論文標題 Gravitational wave forest from string axiverse	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/10/008	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 -

1. 著者名 Tsuneto Makoto, Ito Asuka, Noumi Toshifumi, Soda Jiro	4. 巻 1903
2. 論文標題 Searching for Bispectrum of Stochastic Gravitational Waves with Pulsar Timing Arrays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/03/032	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 -

1. 著者名 Yoshida Daisuke, Soda Jiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Quasinormal modes of p-forms in spherical black holes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.044054	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 -

1. 著者名 Hashi Manami Noumi, Isono Hiroshi, Noumi Toshifumi, Shiu Gary, Soler Pablo	4. 巻 1808
2. 論文標題 Higgs mechanism in nonlocal field theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2018)064	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 Hongo Masaru, Kim Suro, Noumi Toshifumi, Ota Atsuhisa	4. 巻 1902
2. 論文標題 Effective field theory of time-translational symmetry breaking in nonequilibrium open system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2019)131	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 Isono Hiroshi, Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 1807
2. 論文標題 Momentum space approach to crossing symmetric CFT correlators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2018)136	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 Andriolo Stefano, Junghans Daniel, Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 66
2. 論文標題 A Tower Weak Gravity Conjecture from Infrared Consistency	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fortschritte der Physik	6. 最初と最後の頁 1800020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/prop.201800020	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 Ito Asuka, Soda Jiro	4. 巻 78
2. 論文標題 Anisotropic constant-roll Inflation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Eur.Phys.J. C	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-018-5534-5	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 -

1. 著者名 Geng Jia-Jia, Li Bao-Fei, Soda Jiro, Wang Anzhong, Wu Qiang, Zhu Tao	4. 巻 2018
2. 論文標題 Schwinger pair production by electric field coupled to inflaton	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 018 ~ 018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/02/018	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Infinite violation of Bell inequalities in inflation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.083501	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 Yoshida Daisuke, Soda Jiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Electromagnetic memory effect induced by axion dark matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.064005	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 -

1. 著者名 Aoki Arata, Soda Jiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Nonlinear resonant oscillation of gravitational potential induced by ultralight axion in $f(R)$ gravity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.023534	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 -

1. 著者名 Masaki Emi, Aoki Arata, Soda Jiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Photon-axion conversion, magnetic field configuration, and polarization of photons	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.043519	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 -

1. 著者名 Andriolo, Stefano, Junghans Daniel, Noumi Toshifumi and Shiu Gary	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 A Tower Weak Gravity Conjecture from Infrared Consistency	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fortschritte der Physik - Progress of Physics	6. 最初と最後の頁 印刷中
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36件 (うち招待講演 26件 / うち国際学会 26件)

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Fun with a cuscuton
3. 学会等名 International workshop for String Theory and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Inflation with broken rotational symmetry and graviton statistics
3. 学会等名 Symmetry 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Effective Field Theory of Anisotropic Inflation
3. 学会等名 6th Korea-Japan workshop on dark energy at KMI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Beyond anisotropic inflation
3. 学会等名 ACGRG 10 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Probing ultralight vector dark matter
3. 学会等名 Dark Odyssey 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Cosmic inflation as a very high energy particle detector
3. 学会等名 44th Vietnam Conference on Theoretical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Weak Gravity Conjecture and Cosmological Implications
3. 学会等名 3rd Korea-Japan bilateral workshop on String Axion Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Enlarging the Scope of the Cosmological Collider: Beyond the Positivity Bounds
3. 学会等名 Dutch Theoretical Cosmology Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 String Regge trajectory on de Sitter space and implications for inflation
3. 学会等名 4th Korea-Japan bilateral workshop on String Axion Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Introduction to AdS Witten diagram and dS wave functions
3. 学会等名 Cosmology Meets CFT Correlators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Swampland conjectures from IR consistency
3. 学会等名 The String Swampland and Quantum Gravity Constraints on Effective Theories (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早田次郎
2. 発表標題 原始重力波の量子コヒーレンス
3. 学会等名 研究会「量子情報と宇宙」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Cosmological Bell Inequality and Entangled Quantum Vacuum
3. 学会等名 International workshop for String Theory and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Glauber in the Sky
3. 学会等名 The first NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Gravitational wave forest from the string axiverse
3. 学会等名 SUSY 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 String Axions, Flapping resonance, and GW forest
3. 学会等名 5th Korea-Japan workshop on dark energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Primordial Gravitational Waves
3. 学会等名 String axion workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Nonclassicality of Primordial Gravitational Waves
3. 学会等名 2nd annual area symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早田次郎
2. 発表標題 物理学は宇宙大規模構造の起源を明らかにできるか？
3. 学会等名 理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Parity Violation in Gravity: probing with gravitational waves
3. 学会等名 Area workshop 2019 winter (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Detectability of gravitons with HBT interferometers
3. 学会等名 新学術「加速宇宙」シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野海俊文
2. 発表標題 アクシオンと量子重力
3. 学会等名 日韓共同 1 day ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野海俊文
2. 発表標題 弱い重力予想と現象論
3. 学会等名 素粒子物理学の進展 2 0 1 8 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野海俊文
2. 発表標題 加速膨張宇宙と非平衡系の場の理論
3. 学会等名 非平衡系の物理学 - 階層性と普遍性 - (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 A Tower Weak Gravity Conjecture from Infrared Consistency
3. 学会等名 Simons Summer Workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Primordial non-Gaussianities as a particle collider
3. 学会等名 KEK ph 2018 winter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早田次郎
2. 発表標題 ベルの不等式関連の話
3. 学会等名 曲がった時空上の場の量子論と量子情報 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Exploring string axiverse with gravitational wave physics
3. 学会等名 IV Cosmology and the Quantum Vacuum 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 早田次郎、菅野優美
2. 発表標題 Infinite violation of Bell inequalities
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 Gravitational waves in the string axiverse
3. 学会等名 NCTS Annual meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 String moduli, string axiverse, and gravitational waves
3. 学会等名 7th Bangkok Workshop on High-Energy Theory (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Soda
2. 発表標題 String axions in Chern-Simons gravity
3. 学会等名 新学術「加速宇宙」シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早田次郎
2. 発表標題 String Axions in the Sky
3. 学会等名 重力・宇宙論研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早田次郎、菅野優美
2. 発表標題 原始重力波の量子コヒーレンス
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Inflation and String Theory
3. 学会等名 13rd Recontres du Vietnam Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野海俊文
2. 発表標題 Cosmic Inflation as a Probe of High Energy Physics
3. 学会等名 駒場研究会「弦・場・素粒子」(招待講演)
4. 発表年 2017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
研究分担者	野海 俊文  (Noumi Toshifumi)  (30709308)	神戸大学・理学研究科・助教    (14501)	

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			
韓国	KASI			
韓国	ソウル国立大学			
その他の国・地域（台湾）	清華国立大学			
ドイツ	Bielefeld 大学			
米国	ウィスコンシン大学			
米国	ウィスコンシン大学			
韓国	KASI			
スペイン	バスク大学			
アメリカ	ベイラー大学	ウィスコンシン大学		
中国	浙江大学	香港科技大学		
ドイツ	ハイデルベルグ大学			