様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　６ 月　７ 日現在

機関番号：１４５０１
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2017～2020
課題番号：１７Ｋ１８７７８

研究課題名（和文）量子情報理論から迫る原始重力波の量子性

研究課題名（英文）Probing quantumness of primordial gravitational waves with quantum information theory

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）　　4,800,000円

研究成果の概要（和文）：　インフレーションの予言する揺らぎの量子性を特徴付けるマーミンの不等式とグラビトン分布の統計性の重要性を明らかにした。
　インフレーションは、現在のグラビトンの量子状態がスクゥイーズド状態になることを予言している。スクゥイーズド状態におけるグラビトンの量子揺らぎが比較的重い物体に与える影響を研究し、グラビトンの量子揺らぎが、物体の量子デコヒーレンスを引き起こすことを示した。この成果をもとに、グラビトンを検出する具体的方法を提案した。この論文はPhys.Rev.Dに掲載され、Editors' suggestion に選ばれた。これは我々の研究成果が世界的に高く評価されている証しである。

研究成果の学術的意義や社会的意義
　揺らぎの量子性を直接検証することにより、インフレーション理論を確立することは宇宙論の最重要課題となっている。また、グラビトンの発見は量子重力理論研究にとって最重要課題となっている。
　本研究では、量子情報理論を用いたインフレーションの完全な証明の可能性を明確に示した。特に、マーミンの不等式とグラビトンの統計性の宇宙論的な意義を見出した点は重要な成果である。また、グラビトンの量子揺らぎによる重い物体のデコヒーレンスの研究を基礎として、未だその存在が証明されていないグラビトンの検出方法を発見したことは、量子重力理論研究への大きな貢献とみなせる。

研究成果の概要（英文）：　We clarified the importance of Mermin's inequality and the staticis of gravitons for characterizing non-classicality of fluctuations generated during inflation.
　Inflation predicts that the quantum state of gravitons is a squeezed state. We studied the effect of quantum fluctuations on a heavy particle and showed that the gravitons induce decoherence of the quantum coherence of the particle. Based on our results, we proposed a concrete experimental setup for detecting gravitons. The paper is selected as Editors' suggestion of Phsical Review D. This clearly shows our work is recognized by the community in the world.

研究分野：宇宙論

キーワード：原始重力波　量子性　量子情報　インフレーション　グラビトン

※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。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

2015年9月14日、重力波干渉計検出器 LIGO によって、ブラックホール連星系からの重力波が観測された。重力波の直接観測は、重力波天文学の幕を開け、初期宇宙で生成された原始重力波の観測へ向けた観測計画を大きく前進させた。原始重力波が観測され、その量子性かが証明されれば、未発見の素粒子であるグラビトン（重力子）の発見をも意味し、量子重力理論研究にブレークスルーが生み出されることが期待される。

宇宙背景放射衛星 WMAP や Planck で得られた数々の証拠から、銀河や銀河団などでつくられる宇宙の大規模構造の起源がインフレーション中に生成された量子揺らぎであることは、もはや間違いないと信じられている。ミクロな量子揺らぎがマクロな宇宙の構造の直接の原因であるというこの結論は、物理学のあらゆる帰結のなかで最も衝撃的なものである。この揺らぎの量子性を直接検証することにより、インフレーション理論を確立することは宇宙論の最重要課題となっている。

２．研究の目的

近年の量子情報理論の著しい発展は、原始重力波の量子性の研究を現実的なものとしている。量子情報理論の方法は実験的に検証可能であり､原始重力波の量子性を判定するために それら量子情報理論の方法が使えるということは大きな利点である。

本研究の目的は、量子情報理論の最近の急速な発展を応用して、インフレーション中に生成される原始重力波の量子性を証明する方法を提案することにある。

本研究が成功すれば、インフレーションの完全な証明が確立する。また、重力波の量子性の証明は未だその存在が証明されていないグラビトンの発見をも意味し、量子重力理論研究への波及効果が期待できる。

３．研究の方法

インフレーション中に生成された原始重力波の量子性の観測的検証を行うという目的のために、以下の研究方法をとった。

- 揺らぎの量子性を特徴付ける方法の研究

揺らぎの量子性の証明の手段としてベルの不等式、および、ベルの不等式を多体に拡張したマーミンの不等式を用いる｡インフレーション中の揺らぎに対してマーミンの不等式の破れの大きさを評価する。他の有効な方法も研究する。

- 具体的な観測方法の提案

現在でも重力波の量子性の証拠が残っている可能性が高い。重力波干渉計検出器による観測方法を研究する。 また、最新の量子情報の見地を取り入れ、重力子の発見に向けた研究も遂行する。

４．研究成果

インフレーション中の原始重力波に応用するために、量子光学で使われている、光子数の偶奇をカウントする擬スピン演算子を導入した。これにより場の量子論においても、ベルの不等式を定義することができるようになり、インフレーション中のベルの不等式を計算することに成功した。ベルの不等式は2体の量子相関に関する不等式であるが、場の本質は多体の相関にある。ベルの不等式を多体に拡張したものはマーミンの不等式と呼ばれている。我々はインフレーション中の揺らぎに対してマーミンの不等式の破れの大きさを評価することに成功し、量子相関が指数関数的に発散していくことを明らかにした。これは、量子性の観測可能性が高いことを示しており、重要な知見を得たことになる。

インフレーション中の原始重力波の量子性を検証するためには、何らかの測度が必要である。これまでは、エンタングルメントに着目した研究を行ってきたが、その研究の過程で、量子論的干渉性に着目するようになった。特に、重力子の統計性は古典論では必ず、スーパーポアッソン分布になることに着目した。我々は、インフレーション中にゲージ場が存在するようなモデルでは、状態がコヒーレント・スクゥイーズド状態となり、高周波数領域でサブポアッソン統計が観測され得ることを示した。これは、重力波の統計性を見ることで重力子の存在を検証できることを意味している。我々の成果は原始重力波の量子性の検証に新たな方向性を示した画期的なものである。

インフレーション中にゲージ場が存在するようなモデルでは、高周波数領域でサブポアッソン分布が観測され得ることを示したが、実際に高周波重力波の観測の問題があった。そこで、マグノンを使った高周波重力波の観測方法を考案した。そして、これまでにアクシオン探索を目的として行われた観測データから、GHz帯の高周波重力波の振幅に対して世界最高感度で制限を与えることに成功した。これはGHz帯での世界最高感度の制限を与えている。さらに、重力波の偏極の自由度まで含めて新たな量子性の研究を行うための定式化も行った。

インフレーションは、現在のグラビトンの量子状態がスクゥイーズド状態になることを予言している。スクゥイーズド状態におけるグラビトンの量子揺らぎが比較的重い物体に与える影響を研究した。まず、重い物体が量子力学的な重ね合わせの状態にある場合を考察した。その結果、グラビトンの量子揺らぎがノイズとして働き、物体の量子デコヒーレンスを引き起こすことを示した。この成果をもとに、グラビトンを検出する方法を提案した。この論文はPhys.Rev.Dに掲載され、Editors' suggestion に選ばれた。これは我々の研究成果が世界的に高く評価されている証しである。

さらに、現実的に実験遂行可能なモデルとして重力波干渉計LIGOで使われている鏡を用いたセットアップを考案した。干渉計の両腕にそれぞれ40kgの鏡をとりつけ、その２つの鏡のエンタングル状態をつくる。現在の干渉計の腕の長さは4kmであるが、これを40kmに伸ばした場合、重力子によってデコヒーレンスが生じるまでの時間が約20秒であることが分かった。他のデコヒーレンスの原因としては、空気分子によるデコヒーレンスが主であるが、十分な真空状態にしておけば、空気分子によるデコヒーレンスは1200秒であることが分かった。つまり、２つの鏡のデコヒーレンスをモニターしておけば重力子の間接的発見が可能であることを示した。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計26件（うち査読付論文　26件／うち国際共著　10件／うちオープンアクセス　26件）

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 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 Ito Asuka、Soda Jiro、Yamaguchi Masahide	４．巻 2021
２．論文標題 Analytic formula for the dynamics around inflation end and implications on primordial gravitational waves	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	６．最初と最後の頁 033～033
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2021/03/033	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、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 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 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 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 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 Chu Chong-Sun、Soda Jiro、Yoshida Daiske	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 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 該当する

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 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 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 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 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 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	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 該当する

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 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 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 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 Kanno Sugumi、Soda Jiro	4．巻 5
2．論文標題 Bell Inequality and Its Application to Cosmology	5．発行年 2017年
3．雑誌名 Galaxies	6．最初と最後の頁 99～99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/galaxies5040099	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 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

〔学会発表〕　計21件（うち招待講演　12件／うち国際学会　16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 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 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 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

〔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			
スペイン	バスク大学			
韓国	ソウル大学	KASI		
ドイツ	ビーフェルト大学			
米国	ウィスコンシン大学	ベイラー大学		
中国	Zhejiang 大学			