

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03864

研究課題名（和文）連星ブラックホールの自転から迫る原始ブラックホールの検証

研究課題名（英文）Testing primordial black hole scenario from their rotations

研究代表者

須山 輝明（Suyama, Teruaki）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：20456198

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：原始ブラックホール形成に必要な原始密度揺らぎの大きさの閾値を求めました。閾値は角運動量の2次のオーダーで増加し、回転速度が大きい原始ブラックホールほど形成しにくいという結果が得られました。このことは、原始ブラックホールの形成時における角運動量分布を主に決めるのは、閾値ではなく揺らぎの分布関数であることを示すものです。この結果を踏まえ、合体率分布に基づいて原始ブラックホールを重力波観測から検証するための方法論を構築し、LIGO-Virgoの03観測による実データに適用しました。そして、現在のデータ数では不十分で、将来観測によるデータ蓄積が必要であることを示しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LIGOによるブラックホール(BH)連星の発見以降、原始BHが注目を集めています。原始BHが本当に宇宙に存在するかどうかを明らかにすることで、初期宇宙の解明が一段と進みます。原始BHは、重力波だけでなく他にも遠方の星を重力レンズで増光させたり、宇宙マイクロ波背景放射を歪めたりと、様々な電磁的観測シグナルを生み出します。これまでもそのような電磁観測から原始BHの存在量に制限が与えられてきましたが、LIGO以降、重力波を用いた原始BHの検証という新しい潮流が生まれています。本研究は原始BHの新しい検証方法を構築し、原始BHの存在可能性に対する知見を拡げるものです。

研究成果の概要（英文）：I determined the threshold for the size of primordial density fluctuations required for the formation of primordial black holes. The threshold increases with the square of the angular momentum, indicating that primordial black holes with higher rotation speeds are less likely to form. Consequently, it was found that the distribution function of fluctuations, rather than the threshold, primarily determines the angular momentum distribution of primordial black holes, at least for Gaussian-type primordial fluctuations. Based on these results, a methodology was developed to verify primordial black hole scenarios through gravitational wave observations using merger rate distributions, which was then applied to actual data from the LIGO-Virgo 03 observations. It was demonstrated that the current data volume is insufficient, highlighting the need for data accumulation through future observations.

研究分野：宇宙論

キーワード：原始ブラックホール 重力波

1. 研究開始当初の背景

2015年、米国のLIGO観測所が重力波を初めて捉えました(2017年ノーベル物理学賞)。この成果に加え、LIGOによるもう一つの歴史的発見は、重力波源が連星を成す2つのブラックホール(以降BHと省略する)の合体だということです。研究を開始した時期には5例のBH連星合体がLIGOで見つけられており、BH連星合体は宇宙でありふれたものだという認識が広まりつつある状況でした。そのような状況において、そのようなBHがいつどこで生まれ、どのように連星を作り、合体に至ったのかという新たな謎が宇宙物理学の重要な問題として出てきました。観測された重力波の波形から、BHの質量や自転を推定できます。それらの観測データによると、BHの質量は、これまでの電磁波観測で間接的に示唆されていたBH(20例ほど)と比べて、重い方に分布していること、連星を構成する個々のBHの自転軸と連星の軌道角運動量が揃っておらず、且つ個々のBHの自転速度もあまり大きくないように見えること、という少なくとも2点において、非自明な特徴を示しています。これらの観測結果は全く新しい種族のBHの可能性を示すものです。このようにLIGOのBHの謎は、重力波天文学がもたらした最初の謎であり、今後の観測で解明が実現すると期待される謎でもあります。

LIGOによる重力波初検出の発表直後、応募者が主体となり共同研究者と「LIGOで見つかった重力波は、原始BH連星の合体から生じたもので説明できる」ことを論文発表しました。原始BHとは、宇宙誕生後1秒も経たない宇宙初期に、ランダムな密度濃淡(原始密度揺らぎ)の極めて稀に実現する(約 10^{-5} レベル)非常に高密度の領域が直接重力崩壊してできるBHのことであり、存在可能性の理論予言は60年代にまで遡ります。原始BHシナリオでは、宇宙がまだ放射優勢の熱い時代にBH連星が自然に作られ、宇宙年齢の時間スケールで合体します。その合体に伴って強烈に放射された重力波をLIGOはとらえたというのが、原始BHシナリオでのLIGOの観測結果の説明です。原始BHの質量には理論的な制約はなく、LIGOで見つかった重いBHである30倍太陽質量も理論的に可能です。また自転する原始BHは、遠心力に打ち勝って重力崩壊を起こさなければならず、自転しないBHよりさらに稀なより高密度の領域から形成します。そのため大きな自転速度を持つ原始BHは実質上できないことが期待され、さらに自転軸は連星の軌道角運動量と無相関であるので、これらの点も現在までの観測結果と矛盾しません。

原始BHの素である原始密度揺らぎは、宇宙創生に伴うインフレーションから作られます。そのため、もし原始BHの存在が今後観測的に確立すると、インフレーションモデルは原始BHを作るものに絞り込まれ、従来の宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの観測とは全く独立に強力な制限が課されることとなります。逆に、原始BHの存在を観測から棄却できれば、原始BHを予言するインフレーションモデルが排除されるので、原始BHが宇宙に存在しないという情報も初期宇宙の解明に有益な制限です。さらに原始BHは暗黒物質として振る舞うため、原始BHの検証は暗黒物質の正体解明の観点からも非常に興味深い課題です。

このように、重力波観測を契機として、LIGOによって見つかった恒星質量域のBHだけでなく、それ以外の質量域にまで亘って原始BHの存在可能性を調べる研究が大いに盛り上がりを見せつつありました。

2. 研究の目的

原始 BH の存在可能性が宇宙論における重要な問題となりつつある状況において、解明すべき自然な問いは、「原始 BH の存在可能性を検証するためにはどのような観測量を見るべきか？」です。特に、恒星の重力崩壊を起源とする宇宙物理学的シナリオも複数提唱されているため、原始 BH シナリオを検証するにあたって、宇宙物理的シナリオと如何に区別するかが主要な問題となります。本研究では、代表的な原始 BH 生成のシナリオの範囲において、角運動量を含む様々な原始 BH に関する観測量の理論予言を行ない、さらにそれを実際の観測データと照らし合わせることで、原始 BH シナリオの検証可能性に向けた基礎研究を展開することを目的とします。

3 . 研究の方法

自転のない原始 BH 形成、即ち球対称な密度分布の重力崩壊によって生じる原始 BH については、解析計算・数値計算双方で完成度の高い研究結果があります。そこで、本研究は先行研究の描像を採用し、自転に伴う効果を正曲率の一様等方宇宙を背景とする摂動として扱います。そして、自転がある場合の原始 BH 形成のために必要な閾値を求め、原始 BH の角運動量分布を導きます。実際の重力波観測では、自転速度が大きい BH ほど強い重力波を出し遠くまで見える、という効果により、直接観測で得られる自転分布にはバイアスが掛かります。このバイアスと自転分布を考慮し、連星合体率を求め、重力波観測から原始 BH 検証の有効性を明らかにします。

また、原始密度揺らぎの確率分布から、原始 BH のクラスターの度合いを表す原始 BH 2 点相関関数を汎関数積分法に基づいて導出します。導かれた 2 点相関関数を観測データと比較することで、原始 BH の生成シナリオに制限を課します。

4 . 研究成果

放射優勢期において原始 BH が形成されるための原始密度揺らぎの振幅の閾値を、原始ブラックホールの角運動量の関数として求めました。閾値は角運動量の 2 次のオーダーで増加し、回転速度が大きい原始 BH ほど形成しにくいという物理的直観にも合致する結果が得られました。一方、ガウス型原始揺らぎの場合、他の研究により原始 BH の角運動量の大きさは、無次元 Kerr パラメータにして高々 0.01 程度であることが示されており、この程度の回転の大きさに対しては閾値の角運動量依存性の効果は準優位であると分かりました。このことから、少なくともガウス型原始揺らぎにおいては、原始 BH の形成時における角運動量分布を主に決めるのは、閾値ではなく揺らぎの分布関数であることが分かりました。

原始 BH の形成時の質量分布や角運動量分布を計算する新しい理論手法を提案しました。これはあるハッブル領域から原始 BH が形成する確率をそのまま確率分布関数に置き換えていた先行研究の問題点を、揺らぎの空間スケールという自由度を導入することで解決するものです。この自由度を汎関数積分に取り入れることで、原理的には任意の原始揺らぎの統計分布に対して計算可能な定式化を与えることができました。また揺らぎがガウス統計分布に従う場合に具体的に計算をして、定式化の実証を行いました。

汎関数積分法に基づいて、与えられた原始密度揺らぎの確率分布関数から、原始 BH の 2 点相関関数を求めるための理論定式化を与えました。この定式化に基づいて、確率分布がガウス分布の場合、原始 BH はポアソン分布に従い 2 点相関関数はゼロになることを明確に示しました。そして、局所型非ガウス分布である場合、クラスター状で空間分布することを示し、原始 BH 2 点相関関数は原始密度揺らぎの 4 点相関関数の大きさで決まることを明

らかにしました。

インフレーション中に質量を無視できるほどの軽いスカラー場のような所謂等曲率揺らぎの高シグマ領域のみで原始BHが形成する場合において、原始ブラックホールの二点相関関数を計算し、それが非常に大きくなることを示しました。これは、広範囲においてパワーを持つ等曲率揺らぎから原始ブラックホールを形成する初期宇宙のモデルに対する強い制限を与えるものです。

連星ブラックホール合体の統計的性質に基づいて、重力波観測から原始ブラックホールを検証するための方法論を構築しました。仮に宇宙に原始ブラックホールが実在したとしても、これまでに或いは今後見つかる連星ブラックホールが全て原始ブラックホールである必然性はなく、恒星起源のブラックホールの寄与も期待されることを踏まえ、一つの連星ブラックホールチャンネルが観測される合体事象を占めているか、それとも複数のチャンネルが同程度に寄与しているかを、ブラックホールの質量関数形をさらに仮定することなしに、識別する仮説検定の定式化を行ないました。そして、原始ブラックホールで予言される連星ブラックホール合体率に基づいてブラックホール連星合体の疑似データを作り、それに対して導いた定式化を適用し、合体の観測数が十分大きければ、この方法によって原始ブラックホールを重力波観測から検証可能なことを示しました。その後、LIGO-VirgoのO3観測による連星ブラックホール合体の実データに対して、今回導いた統計方法を適用しました。現データに対しては、干渉計の感度に起因するselection biasの影響が大きく効いてしまい、これまでに見つかった連星ブラックホールが原始BHかどうかを判定するほどの統計精度を達成するには、将来観測によるよりたくさんのデータの蓄積が必要であることを明らかにしました。

観測されたBH連星合体の質量・宇宙赤方偏移分布から、原始BHを生成する原始密度ゆらぎのパワースペクトルを再構築するための方法論を提唱しました。将来、原始BHと同定された重力波イベント数が十分に蓄積されれば、上記の方法論を用いて、原理的にはパワースペクトルを求めることが可能であることを実証するものです。

Subaru High-z Exploration of Low-Luminosity Quasarプロジェクトによって宇宙高赤方偏移で見つかった超巨大ブラックホールの実データからブラックホールの角度相関関数を導き、その観測結果を前年度に導いたインフレーションモデルにおける原始ブラックホールの二点相関関数と比較しました。そして、超巨大ブラックホールが原始ブラックホールである可能性が厳しく制限されることを示しました。

また、研究期間内に25本の論文発表(査読有)、34件の国内外の研究会・学会での口頭発表を行ない、研究結果の周知に努めました。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Teruaki Suyama, So Okano	4. 巻 368
2. 論文標題 Testing time evolution of mass distribution of black hole mergers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrophysics and Space Science	6. 最初と最後の頁 1,9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10509-022-04160-4	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 Motohashi Hayato, Suyama Teruaki	4. 巻 44
2. 論文標題 Physical effects of gravitational waves: pedagogical examples	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 1,10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6404/ac9ef1	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, Suyama Teruaki	4. 巻 107
2. 論文標題 Superluminal propagation from IR physics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1,6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.107.016011	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 Teruaki Suyama, Yuichiro Tada, Masahide Yamaguchi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Revisiting non-Gaussianity in non-attractor inflation models in the light of the cosmological soft theorem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1,20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab063	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 Rampei Kimura, Teruaki Suyama, Masahide Yamaguchi, Ying-li Zhang	4. 巻 2021
2. 論文標題 Reconstruction of primordial power spectrum of curvature perturbation from the merger rate of primordial black hole binaries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1,21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/04/031	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 Takumi Shinohara, Teruaki Suyama, Tomo Takahashi	4. 巻 104
2. 論文標題 Angular correlation as a novel probe of supermassive primordial black holes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1,14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.023526	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 Makoto Inamori, Teruaki Suyama	4. 巻 918
2. 論文標題 Universal Relation between the Variances of Distortions of Gravitational Waves owing to Gravitational Lensing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 1,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac2142	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 Arimoto Makoto et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gravitational wave physics and astronomy in the nascent era	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1,83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab042	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 Motohashi Hayato, Suyama Teruaki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Quantum Ostrogradsky theorem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1, 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2020)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 Suyama Teruaki	4. 巻 896
2. 論文標題 On Arrival Time Difference Between Lensed Gravitational Waves and Light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 46 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8d3f	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 Kapadia Shasvath J., Pandey Kanhaiya Lal, Suyama Teruaki, Ajith Parameswaran	4. 巻 101
2. 論文標題 Prospects for probing ultralight primordial black holes using the stochastic gravitational-wave background induced by primordial curvature perturbations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1, 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.123535	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 Suyama Teruaki, Tada Yuichiro, Yamaguchi Masahide	4. 巻 2020
2. 論文標題 Local observer effect on the cosmological soft theorem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1, 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa144	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 Kapadia Shasvath J., Lal Pandey Kanhaiya, Suyama Teruaki, Kandhasamy Shivaraj, Ajith Parameswaran	4. 巻 910
2. 論文標題 Search for the Stochastic Gravitational-wave Background Induced by Primordial Curvature Perturbations in LIGO 's Second Observing Run	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L4 ~ L4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abe86e	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 Ringeval Christophe, Suyama Teruaki, Yamaguchi Masahide	4. 巻 99
2. 論文標題 Large mass hierarchy from a small nonminimal coupling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.123524	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 Suyama Teruaki, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz105	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 He Minxi, Suyama Teruaki	4. 巻 100
2. 論文標題 Formation threshold of rotating primordial black holes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.063520	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 Suyama Teruaki、Yokoyama Shuichiro	4. 巻 2020
2. 論文標題 A novel formulation of the primordial black hole mass function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa011	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 -

[学会発表] 計33件(うち招待講演 20件/うち国際学会 25件)

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Limits for scalar field dark matter from gravitational wave detectors
3. 学会等名 Workshop on Fundamental Cosmology: from Beginning to End (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Gravitational lensing of gravitational waves as a probe of small scale matter fluctuations
3. 学会等名 Non-linear Nature of Cosmological Perturbations and its Observational Consequences (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 物質揺らぎによる重力レンズを受けた重力波の性質について
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Upper limit on the scalar field dark matter from LIGO third observation run
3. 学会等名 What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Gravitational lensing of gravitational waves as a probe of small scale matter fluctuations
3. 学会等名 Non-linear aspects of cosmological gravitational waves (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Universal relation of lensed gravitational waves
3. 学会等名 Gravitational wave physics and astronomy: Genesis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Revisiting non-Gaussianity in non-attractor inflation models in the light of the cosmological soft theorem
3. 学会等名 JGRG webinar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Search for the Stochastic Gravitational-wave Background Induced by Primordial Curvature Perturbations in LIGO 's Second Observing Run
3. 学会等名 AMALD114 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 重力レンズを受けた光と重力波の伝搬時間について
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Universal relation of lensed gravitational waves
3. 学会等名 8th Korea-Japan workshop on Dark Energy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 原始ブラックホール2021
3. 学会等名 第10回観測的宇宙論ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Testing time evolution of the mass distribution of the black hole mergers
3. 学会等名 1st International conference on holography and its applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Toward search for light scalar field dark matter by interferometers
3. 学会等名 Dark matter symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Formation of primordial black holes
3. 学会等名 Physics of the Early Universe, online precursor (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 非ガウス性の観測効果
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Stochastic gravitational waves as a probe of extremely small-scale primordial perturbations
3. 学会等名 Copernicus Webinar Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Search for the stochastic gravitational-wave background induced by primordial curvature perturbations in LIGO's second observing run
3. 学会等名 第9回観測的宇宙論ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Search for the stochastic gravitational-wave background induced by primordial curvature perturbations in LIGO's second observing run
3. 学会等名 Online JGRG (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Gravitational waves as a probe of primordial density perturbations
3. 学会等名 2nd IIT Guwahati and Tokyo Tech Joint workshop on Condensed Matter and High Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 LIGOデータを用いた小スケール原始密度揺らぎの制限
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Hidden universality in the merger rate distribution in the primordial black hole scenario
3. 学会等名 Mini workshop on Primordial Black Holes as Dark Matter, or not, Louvain University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Merger rate of primordial black hole binaries
3. 学会等名 The Dark Side of Black Holes, Solvay Institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Testing PBHs by gravitational-wave observations
3. 学会等名 Spring workshop on gravity and cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 A large mass hierarchy from a small nonminimal coupling
3. 学会等名 The third NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Primordial black holes and gravitational wave astronomy
3. 学会等名 Summer School on Gravitational Wave Astronomy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 原始ブラックホールは暗黒物質を説明できるか？
3. 学会等名 2019年度 天文・天体物理若手夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations
3. 学会等名 15th Recontres du Vietnam, Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 原始ブラックホール連星と重力波イベント
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations
3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations
3. 学会等名 Focus week on primordial black holes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 A review on primordial black holes
3. 学会等名 9th International conference on gravitation and cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Probing primordial perturbations from inflation
3. 学会等名 International Conference on the Emerging Issues in Cosmology and Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Computations of quantities characterizing PBHs formed from primordial perturbations
3. 学会等名 Cosmic acceleration (国際学会)
4. 発表年 2020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