

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17688

研究課題名（和文）非球対称原始ブラックホール形成

研究課題名（英文）Nonspherical primordial black hole formation

研究代表者

柳 哲文（Yoo, Chulmoon）

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：60467404

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の主な目的である非球対称原始ブラックホール形成シミュレーションに関する基礎的な研究を終え、2020年初めの世界で初めての非球対称原始ブラックホール形成シミュレーションにつなげた。また原始ブラックホール量の見積もり方法について、これまでの簡易な手法を大幅に改善し、より正確な手法を提案することで、原始ブラックホール量の見積もりの研究をより高いレベルに押し上げることに貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始ブラックホールは宇宙初期の非線形な非一様性の痕跡で、初期宇宙の状況についての情報が得られる可能性があり、非常に注目されています。本研究における成果は、原始ブラックホールの形成過程と原始ブラックホール量の見積もり方法についての基礎的な事柄についての物であり、原始ブラックホールを用いた様々な研究についてしっかりとした土台を提供する物です。

研究成果の概要（英文）：Basic research for simulation of non-spherical primordial black hole formation has been performed, and the development led to the success in the simulation starting from a non-spherical realistic initial data for primordial black hole formation in the beginning of 2020 fiscal year.

The procedure of calculating primordial black hole abundance has been improved much, and it contributed to the progress in estimation of primordial black hole abundance.

研究分野：相対論・宇宙論

キーワード：原始ブラックホール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

原始ブラックホールは初期宇宙における非線形な非一様性の痕跡であり、初期宇宙の比較的小スケールの揺らぎの情報が得られる可能性があり、古くから注目されている。例えば、標準的な形成シナリオではインフレーションモデルに依存した原始ブラックホール量が期待されるため、原始ブラックホール量に対する制限から、インフレーションモデルに対する制限が得られる。また近年、原始ブラックホールが暗黒物質の多くの部分を担う可能性と重力波によって発見されたブラックホール連星の起源となり得る可能性から、より多くの注目を集め、盛んに研究されるようになった。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は原始ブラックホール形成とその総量の見積もりにおける基礎的な性質の理解と問題の解決を通して、原始ブラックホールの持つ質量、角運動量空間での分布をより正確に評価する方法を与え、観測との比較につなげることである。特に、数値計算法の確立により、原始ブラックホール形成に対して非球対称性が与える影響を明らかにすることと、非線形性を考慮した原始ブラックホール量の統計的見積もり方法の確立を主な目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では物質優勢期、及び輻射優勢期の原始ブラックホール形成を念頭に以下のような方法を軸に研究を進める

(1) 無衝突粒子系の非球対称重力崩壊のコードを作成し、ブラックホール形成が阻害される楕円率の値を定量的に明らかにする。また物質優勢期の原始ブラックホール形成に対して摂動的取り扱いを用いた解析的手法を用いて非球対称性、角運動量の影響を調べる。

(2) 相対論的流体の時間発展を解く数値コードを組み入れ、輻射優勢期の原始ブラックホール形成シミュレーションを行い、非球対称性の影響を明らかにする。

(3) 原始ブラックホール形成における初期密度分布を与えるパラメータとインフレーション起源の曲率揺らぎとの関係を明らかにし、密度揺らぎに対する形成条件と統計的性質から、PBHの質量、角運動量、個数分布を正確に求める手法を確立する。

### 4. 研究成果

(1) 無衝突粒子系の相対論的な3次元数値計算コードを開発し、スピンドル重力崩壊の数値計算を実行した( )。同様の計算が1980年代に軸対称を仮定した2+1次元計算で実行されている。初期形状が十分等方な場合、重力崩壊の結果、最終的にブラックホールが形成されることが確認できた。一方で初期形状が十分細長い場合、ブラックホールの形成の前に曲率が非常に大きくなる領域が現れ、数値計算の信頼性が落ちることが確認された。曲率の大きさは精度を上げる程大きくなることからブラックホール形成の前に物質分布の極付近で曲率が発散する特異点が形成されることが示唆される。これらの結果は2+1次元の先行研究の結果と整合的であるが、一方で以下の違いが確認された。先行研究では特異点の位置は物質が分布する領域の外側、つまり真空領域にあると結論付けられていたが、我々の結果では物質分布の中で、物質密度の発散に伴って現れることが確認された。これらの違いの原因については未だ未解明であり、今後の詳細な解析を必要とする。

(2) 物質優勢期の原始ブラックホール形成において初期の密度揺らぎの楕円率がブラックホール形成に与える影響についてゼルドヴィッチ近似という手法を用いて半解析的に評価した( )。物質優勢期における原始ブラックホール形成では輻射優勢期と異なり、圧力が効かないため、重力崩壊は比較的起きやすいものの、その過程で増幅される非球対称性によってブラックホール形成が阻害される可能性があることがわかっている。我々は初期揺らぎをガウス揺らぎと仮定し、初期条件において非球対称性を担うパラメータの確率分布と、慣用的に用いられる非球対称な場合についてのブラックホール形成条件を基に、原始ブラックホール生成量を初期密度揺らぎの標準偏差の関数として表現することに成功した。現在では物質優勢期の原始ブラックホール形成を考える上での基礎的な土台となる結果として評価され、引用、使用されている。

(3) 物質優勢期の原始ブラックホール形成において潮汐トルクの影響による角運動量の獲得とそれに伴うブラックホール生成量への影響、形成される原始ブラックホールのスピンの見積もりを、宇宙論的ニュートン摂動の2次までの効果を取り入れて、解析的に行った( )。

獲得する角運動量の影響で重力崩壊が阻害されることが確認され、の非球対称性の影響と重ね合わせることで、予想される原始ブラックホール量の見積もりを与えた。また、初期揺らぎの標準偏差が小さい場合は角運動量による影響が主要な阻害要素となり、その場合は形成される原始ブラックホールのスピンの典型的に最大回転(回転エネルギー~質量エネルギー)に近い値をとることを示した。

(4)原始ブラックホール形成シミュレーションにおける一つの大きな課題は宇宙論的背景の膨張と中心部での重力崩壊を同時に追う必要があり、スケールの乖離を取り扱う手法が必要となる点である。この問題点の解決手法の開発と膨張宇宙背景における重力崩壊において起こり得る問題点を洗い出すために、膨張宇宙背景における無質量スカラー場の重力崩壊のシミュレーションを行った( )。計算は周期境界条件を課した立方体の1/8領域を切り出して行われ、非一様グリッドを張ることで、境界部分よりも中心部分の解像度が高くなるような工夫を行った。初期のスカラー場の振幅が小さい場合はスカラー場が分散し平均的に輻射成分として働くため、全体として輻射優勢宇宙の膨張則が実現されることが実際に確認された。また、初期振幅が十分大きい場合、ブラックホールが形成されるが、この場合は輻射優勢宇宙でなく物質優勢宇宙の膨張側に漸近することが確認された。ブラックホールの地平面だけでなく、宇宙論的な地平面の存在と位置を特定することによって、この系の時空構造を詳しく解析することに成功した。

(5)原始ブラックホールが関連する研究において、その理論的な生成量の見積もりは非常に重要となる。一方で、過去の手法には複数の問題点が存在した。一つは系の非線形性が考慮に入られていない事であり、もう一つは原始ブラックホールの形成条件についての検証が不十分であることである。さらに個々の慣用的な手法では揺らぎのスペクトルに対して必ず窓関数を導入する必要があり、どのような窓関数を使用するかで結果が著しく異なることが指摘されている。我々は、少なくとも一つのスケールだけで与えられる狭い揺らぎスペクトルに対してはこれらの問題を全て解決する手法を提案した( )。我々の手法は正攻法で、揺らぎのピーク理論にのっとなって統計性を扱うことを基本とし、揺らぎの統計的性質、非線型な方程式を丹念につなぎ合わせ、信頼できる原始ブラックホール形成条件と比較することでより信頼性の高い原始ブラックホール量の見積もり方法を提案した。

#### <引用文献>

Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada, Hirotada Okawa, 3D Simulation of Spindle Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System, Classical and Quantum Gravity,34, 2017, 105010

Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri, Ken-ichi Nakao, Sanjay Jhingan, Primordial black hole formation in the matter-dominated phase of the Universe, Astrophysical Journal, 833, 2016, 61

Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe, Physical Review D, 96, 2017, 83517

Chul-Moon Yoo, Taishi Ikeda, Hirotada Okawa, Gravitational collapse of a massless scalar field in a periodic box, Classical and Quantum Gravity, 36,2019, 075004

Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada, Jaume Garriga, Kazunori Kohri, Primordial black hole abundance from random Gaussian curvature perturbations and a local density threshold, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 12, 2018, 1230

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Vitor Cardoso, Taishi Ikeda, Christopher J. Moore, Chul-Moon Yoo	4. 巻 97
2. 論文標題 Remarks on the maximum luminosity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.97.084013	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 Tomohiro Nakamura, Taishi Ikeda, Ryo Saito, Chul-Moon Yoo	4. 巻 99
2. 論文標題 Chameleon field in a spherical shell system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.044024	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 Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada, Jaume Garriga, Kazunori Kohri	4. 巻 12
2. 論文標題 Primordial black hole abundance from random Gaussian curvature perturbations and a local density threshold	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1230
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/pty120	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 Takahisa Igata, Hideki Ishihara, Masataka Tsuchiya, Chul-Moon Yoo	4. 巻 98
2. 論文標題 Rigidly rotating string sticking in a Kerr black hole	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.98.064021	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 Ken-ichi Nakao, Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada	4. 巻 99
2. 論文標題 Gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.044027	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 Chul-Moon Yoo, Taishi Ikeda, Hirotada Okawa	4. 巻 36
2. 論文標題 Gravitational collapse of a massless scalar field in a periodic box	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 075004 ~ 075004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab06e2	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 Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri, Ken-ichi Nakao	4. 巻 96
2. 論文標題 Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.083517	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 Taishi Ikeda, Chul-Moon Yoo, Vitor Cardoso	4. 巻 96
2. 論文標題 Self-gravitating oscillons and new critical behavior	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.064047	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 Masato Tokutake, Kiyotomo Ichiki, Chul-Moon Yoo	4. 巻 1803
2. 論文標題 Observational Constraint on Spherical Inhomogeneity with CMB and Local Hubble Parameter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/03/033	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 Masato Tokutake, Chul-Moon Yoo	4. 巻 1610
2. 論文標題 Inverse Construction of the LTB Model from a Distance-Redshift Relation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2016/10/009	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 Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri, Ken-ichi Nakao, Sanjay Jhingan	4. 巻 833
2. 論文標題 Primordial black hole formation in the matter-dominated phase of the Universe	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/833/1/61	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 Taishi Ikeda, Chul-Moon Yoo	4. 巻 D94
2. 論文標題 Critical behavior of a spherically symmetric domain wall collapse	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.124032	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 Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada, Hirotada Okawa	4. 巻 34
2. 論文標題 3D Simulation of Spindle Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 105010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa6ad5	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 Chul-Moon Yoo, Ken-ichi Nakao	4. 巻 51
2. 論文標題 Constant-mean-curvature Slicing of the Swiss-cheese Universe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 General Relativity and Gravitation	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10714-019-2596-0	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 Atsushi Naruko, Chul-Moon Yoo, Misao Sasaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Resolving a spacetime singularity with field transformation	5. 発行年 2020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/ptaa028	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 -

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Estimation of PBH abundance
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 柳哲文
2. 発表標題 Gravitational Collapse of a Massless Scalar Field in a Periodic Box
3. 学会等名 "YITP International Molecule-type Workshop "Dynamics in Strong Gravity Universe"" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 PBH abundance from the random Gaussian curvature perturbation and a local density threshold
3. 学会等名 The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 周期境界条件下での重力崩壊シミュレーション
3. 学会等名 第20回特異点研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 On estimation of PBH abundance
3. 学会等名 The 2nd NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 On estimation of PBH abundance
3. 学会等名 The 2nd 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 柳哲文
2. 発表標題 Gravitational Collapse of a Massless Scalar Field in a Periodic Box
3. 学会等名 物理学会(春)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Possible resolution of a spacetime singularity with field transformations
3. 学会等名 The 2nd Workshop on "Mathematics and Physics in General Relativity"
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Gravitational Collapse of Gravitational Waves
3. 学会等名 The origin and Evolution of the Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Gravitational Collapse of Massless Fields in an Expanding Universe
3. 学会等名 International Conference on Gravitation: Joint Conference ICGAC-XIII and IK15 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 膨張宇宙背景におけるスカラー場の重力崩壊
3. 学会等名 相対論宇宙論東北研究会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Gravitational Collapse of Massless fields in an Expanding Universe
3. 学会等名 物理学会(秋)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Rigidly Rotating Co-homogeneity-1 Strings in the Kerr Spacetime
3. 学会等名 Gravitational Dynamics and Black Holes (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 PBH abundance from the random Gaussian curvature perturbation and a local density threshold
3. 学会等名 The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 PBH abundance from the random Gaussian curvature perturbation and a local density threshold
3. 学会等名 第19回特異点研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 PBH abundance from the random Gaussian curvature perturbation and a local density threshold
3. 学会等名 Gravity and Cosmology 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 PBH abundance from the random Gaussian curvature perturbation and a local density threshold
3. 学会等名 YKIS2018a Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 PBH abundance from the random Gaussian curvature perturbation and a local density threshold
3. 学会等名 山口大学重力宇宙論研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Rigidly Rotating Co-homogeneity-1 Strings in the Kerr Spacetime
3. 学会等名 物理学会(春)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Towards Simulation of Non-spherical PBH Formation
3. 学会等名 Miniworkshop on Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 無衝突粒子系のスピンドル重力崩壊
3. 学会等名 五色浜相対論研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 無衝突粒子系のスピンドル重力崩壊
3. 学会等名 物理学会(秋)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Non-spherical Gravitational Collapse of a Collisionless
3. 学会等名 Workshop on Particle Physics, Cosmology, and Gravitation(国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Non-spherical Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System
3. 学会等名 The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan(国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 3D Simulation of Non-Spherical Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System
3. 学会等名 IX Black Hole Workshop(国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Gravitational Collapse of Nonlinear Gravitational Waves in an Expanding Universe
3. 学会等名 第18回特異点研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 膨張宇宙背景における非線形重力波の重力崩壊
3. 学会等名 新学術領域A05班合宿
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 3D Simulation of Non-Spherical Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System
3. 学会等名 Geometric Transport Equations in General Relativity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 無衝突粒子系のスピンドル重力崩壊
3. 学会等名 若手による重力・宇宙論研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 膨張宇宙背景における非線形重力波の重力崩壊
3. 学会等名 物理学会(春)
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
研究協力者	原田 知広  (Harada Tomohiro)		
研究協力者	大川 博督  (Okawa Hirotada)		