

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400282

研究課題名(和文) 初期宇宙物質優勢期における原始ブラックホール形成

研究課題名(英文) Formation of Primordial Black Holes in the Matter-Dominated Era of the Universe

研究代表者

原田 知広 (HARADA, Tomohiro)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：60402773

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：物質優勢期における原始ブラックホール形成では、非球対称性の効果が最も重要である。本研究の主な成果としては、圧力のない流体の非球対称な動力学を記述するアインシュタイン方程式の厳密な時空解によって原始ブラックホール形成を記述した。重力崩壊の非等方性による抑制を考慮してブラックホール生成率を定量的に評価した。重力崩壊の非等方性と角運動量の両方の効果による抑制を考慮して原始ブラックホールの生成率と生成される原始ブラックホールのスピン分布を定量的に評価した。これらの成果により、物質優勢期の原始ブラックホールの定量的議論をこれまでよりずっと精密にかつ高い信頼性をもって行うことができるようになった。

研究成果の概要(英文)：In the formation of primordial black holes in the matter-dominated era of the Universe, it is nonspherical effects that play most important roles. The main results of this project are the following: (1) We have constructed the model of nonspherical formation of primordial black hole with pressure-free fluid using the exact spacetime solution of the Einstein equation. (2) We have estimated the production probability of primordial black holes in the matter-dominated era under the suppression due to anisotropy in gravitational collapse. (3) We have estimated the production probability of primordial black holes in the matter-dominated era and the spin distribution of formed primordial black holes under the suppression due to anisotropy and angular momentum in gravitational collapse. With these results, we can now discuss primordial black holes formed in the matter-dominated era qualitatively with more accuracy and more reliability.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：原始ブラックホール 初期宇宙 一般相対論 インフレーション理論 ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

現在の初期宇宙論の標準的なシナリオでは、宇宙誕生直後にインフレーションと呼ばれる加速膨張が起こり、その後宇宙再加熱によって高密度・高エネルギーの熱平衡状態となったと考えられている。

初期宇宙シナリオにおいて決定的に重要なのは、宇宙の構造を作る種としての密度揺らぎを生成する機構を内包することである。インフレーション理論では宇宙の加速膨張期に量子論的な揺らぎが生成され、これが加速膨張で引き伸ばされて古典化する。その後減速膨張に転じると各々の摂動のスケールは徐々に地平線長より小さくなる。すると因果関係が回復し、摂動の重力不安定性の成長が可能になり、構造形成につながる。

宇宙の原始揺らぎを観測することは初期宇宙の姿を特定するうえで極めて重要である。よく知られているのは、宇宙背景マイクロ波放射の非等方性の観測であり、これは宇宙初期の非常に振幅の小さな摂動を観測するものである。一方、初期宇宙にはごくまれに非線形的に大きな振幅をもつ摂動が生成され、そのスケールが地平線長より小さくなると重力崩壊して当時の宇宙地平線内の質量程度のブラックホールになる。こうしたブラックホールは原始ブラックホールと呼ばれ、Zeldovich と Novikov (1966) および Hawking (1971) によって提唱された。

その後、Hawking (1974) は $10^{15}g$ 程度より軽い原始ブラックホールは宇宙誕生から現在までの間にガンマ線などを放射して蒸発することを示した。Carr (1975) は、現在の観測的事実から原始ブラックホールの存在量がどのように制限され、それが原始密度揺らぎに対してどのように制限を加えるかを明らかにした。このように、原始ブラックホールは初期宇宙を知る上で重要な手掛かりを与える「初期宇宙の化石」としての役割をもつ。

初期の原始ブラックホール研究は、インフレーション理論の確立以前に行われたこともあり、輻射優勢宇宙に限定されていたり、形成条件も曖昧であったりして、現在の観点からみると著しく不十分である。その後、Khlopov と Polnarev (1980) が大統一理論相転移における物質優勢期における原始ブラックホール形成を研究した。最近ではインフレーション終了直後の物質優勢期における原始ブラックホール形成が注目されている。

2. 研究の目的

宇宙初期に生成される摂動のうちのある部分は重力崩壊してブラックホールになる。原始ブラックホールと呼ばれるこのようなブラックホールの存在量は、現在の宇宙物理学的な観測によって強く制限されている。したがって、原始ブラックホールは初期宇宙の姿を我々に伝える貴重な「化石」と言える。これまで輻射優勢期における原始ブラックホール形成のみが注目され

てきたが、物質優勢期における原始ブラックホール形成の重要性がインフレーション理論の文脈から近年注目されている。本研究では、物質優勢期における原始ブラックホールの形成条件と形成率とを決定することによって、現在の観測から初期宇宙モデルを制限するための理論的基盤を与えることを目的とする。

本研究で取り上げるのは、以下の問題である。輻射優勢期では、圧力勾配と重力との相互関係が重要であり、摂動の非球対称性や非一様性は無視することができた。しかし物質優勢期には、圧力勾配が存在しない代わりに、重力崩壊において非球対称性・非一様性が顕著に成長してブラックホールの形成を阻害するもっとも重要な要因になると考えられる。そこで非球対称性・非一様性の効果を考慮した、物質優勢期の原始ブラックホール形成条件・形成率を与えたい。

3. 研究の方法

研究の方法は原始ブラックホール形成過程のモデル化と解析計算と数値計算を組み合わせ実行して物理的な結果を引き出すことである。

物質優勢期の原始ブラックホール形成理論としては、Khlopov と Polnarev (1980) が非球対称性と非一様性を考慮して、初めて、しかし極めて大雑把な評価を与えた。

本研究では、まず平成26年度に、現代の宇宙論研究の成果であるインフレーション宇宙論および現代の重力物理学研究の知見であるフープ仮説と具体的な非球対称・非一様重力崩壊モデルに基づいて、Khlopov と Polnarev (1980) の形成理論を再検証し、物質優勢期における原始ブラックホール形成条件と形成率を決定する。さらに平成27年度以降に、一般相対論的かつ宇宙論的な一貫した新しい手法の確立によって、形成条件と形成率の新しいより正確な評価を与える。

4. 研究成果

- (1) 原始ブラックホールの形成条件として長年の課題となっている分離宇宙条件について、最近の指摘も取り込んで新たな知見を得て、さらに加速膨張宇宙における分離宇宙条件についても考察した。この研究は B. J. Carr 教授(ロンドン大)と共同で行い、Physical Review 誌に論文を発表した。
- (2) 物質の状態方程式を一般的にしたときに、宇宙論的初期密度摂動として宇宙論的長波長解の構成を対称性を仮定せずに行った。そして、得られた長波長解を球対称系に適用して、それを初期条件とする宇宙論的な一般相対論の数値シミュレーションを行なって、原始ブラックホール形成臨界を、様々な摂動の分布に応じて計算した。そして、既存の研究結果を統一して一貫した説明を与え、地平線突入時の密度摂動の臨界値を与える解析公式が数値計算結果と良い精度で一致することを示した。これらの

- 研究は、柳助教、中間智弘氏(東大)、古賀泰敬氏(立教大)と共同で行った。その結果は論文としてまとめ、Physical Review 誌に掲載された。
- (3) 宇宙の物質優勢期の原始ブラックホールの非球対称的な形成について研究を行った。具体的には S. Jhingan 教授(JMI)とともに完全に一般相対論的な取り扱いに向けての研究に着手し、非球対称ダストの厳密解である Szekeres 解に基づいて原始ブラックホール形成を議論するための数学的な枠組みに関する研究を行った。この研究結果は論文としてまとめ Progress of Theoretical and Experimental Physics 誌に発表した。
- (4) 柳哲文助教(名大)・郡和範准教授(KEK)・中尾憲一教授(大阪市大)・S. Jhingan 教授(JMI、山梨学院大)とともに、物質優勢期の原始ブラックホール形成について、その生成率の導出をおこなった。具体的には、非球対称摂動の進化を Zeldovich 近似を用いて解析的に記述し、膨張していた摂動が収縮に転じて2次元的な特異点が生じる際に箍予想が与えるブラックホールの地平線形成条件を満たすかどうかを考え、その確率を Doroshkevich の確率密度分布関数を用いて評価した。その結果、原始ブラックホールの生成率を密度揺らぎの関数として与えることに成功し、さらに密度揺らぎが小さいときには生成率に対する準解析的な表式を与えることに成功した。この論文は Astrophysical Journal 誌に掲載された。
- (5) 柳哲文助教(名大)・大川博督研究員(京大)とともに物質優勢期の原始ブラックホールと関連してダストの非球対称重力崩壊を数値相対論シミュレーションによって調べた。この問題については、Shapiro と Teukolsky (1991)によって軸対称重力崩壊では見かけの地平線に覆われない時空特異点ができるという示唆がなされている。我々はこの問題に再び光を当て、対称性を仮定しない3次元の無衝突粒子系の数値相対論コードによって、ほぼ軸対称的なダストの重力崩壊のシミュレーションを行なった。その結果、時空曲率が最大値を取った後の時空の時間発展も計算することができ、この時空特異点は本質的にダストを構成する粒子の火点に対応していることを発見した。この結果に関する論文を Classical and Quantum Gravity 誌に発表した。
- (6) 輻射優勢期には原始ブラックホールは輻射を降着して質量を増加すると考えられるが、私は古賀泰敬氏(立教大)とともに一般の球対称静的な系における輻射の球対称定常降着流の音速点が背景時空の光子点と一致することを4次元およびより高い次元において世界で初めて発見しこれを定理として証明した。この論文は Physical Review 誌に掲載された。
- (7) 私は柳哲文助教(名大)・郡和範准教授(KEK)・中尾憲一教授(大阪市大)とともに、

- 物質優勢期の原始ブラックホール形成について、その非等方性の効果と角運動量の効果を考慮して、生成率と生成されたブラックホールのスピン分布の導出をおこなった。具体的には、箍予想が与えるブラックホールの地平線形成条件と2次的に成長する角運動量を評価して Kerr 限界を適用した。その結果、特に密度ゆらぎが小さい場合には角運動量の効果によって生成が抑制されることおよび生成されるブラックホールは臨界付近まで高速に回転することを示した。この論文は Physical Review 誌に掲載された。
- (8) 私は B. J. Carr 教授(ロンドン大)・伊形尚久博士(立教大)とともに、Einstein 方程式の FLRW 解について線形な状態方程式からなる物質場の場合の時空構造の完全分類を行った。特に、ダークエネルギーを記述する大きな負の圧力を持つ場合やエネルギー密度そのものが負の場合に、これまで知られていなかった FLRW 解の共形的時空構造を明らかにした。この結果は、一般の状況における原始ブラックホール形成模型構築の際に非常に有用となるものである。この論文は Classical and Quantum Gravity 誌に掲載された。
- (9) その他、原始ブラックホールと関連して以下のような研究を行って論文を発表した。小笠原康太氏(立教大)らと高速回転ブラックホールからのエネルギー引き抜きに関する研究、中尾憲一教授・P. S. Joshi 教授(タタ基礎研究所)らと超高速回転体の安定性に関する研究、國分隆文博士(KEK)・S. Jhingan 教授(山梨学院大)と重力崩壊等による放射現象に関する研究、M. Patil 博士(立教大)らと超高速回転する裸の特異点による粒子加速に関する研究、國分隆文氏(立教大院生)らとともに安定なワームホールの可能性についてに関する研究、塚本直樹博士(華中科技大学)とワームホールによる重力レンズの研究、伊形尚久博士(立教大)らと自己相似的ストリングに関する研究、宮本雲平准教授(秋田県大)らとワームホールの量子効果に関する研究、中尾憲一教授(大阪市大)らと回転体の最小半径に関する研究をおこなった。また、木村匡志博士(ケンブリッジ大)と回転ブラックホールの粒子加速に関するレビュー論文を発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 24 件)

[査読無]と明記のないものはすべて査読有

- (1) Takafumi Kokubu, Sanjay Jhingan and Tomohiro Harada, "Energy emission from high curvature region and its backreaction," arXiv:1712.05502 [gr-qc], KEK-TH-2022,

- RUP-17-25, KEK-COSMO-218, accepted for publication in Physical Review D (2018).
- (2) Tomohiro Harada, Bernard J. Carr and Takahisa Igata, "Complete conformal classification of the Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker solutions with a linear equation of state," *Class. Quant. Grav.* 35 (4/2018) no.10, 105011 doi:10.1088/1361-6382/aab99f [arXiv:1801.01966 [gr-qc]].
 - (3) Ken-ichi Nakao, Pankaj S. Joshi, Jun-Qi Guo, Prashant Kocherlakota, Hideyuki Tagoshi, Tomohiro Harada, Mandar Patil, Andrzej Krolak, "On the stability of a superspinar", *Phys. Lett. B* 780 (3/2018) 410 doi:10.1016/j.physletb.2018.03.014 [arXiv:1707.07242 [gr-qc]].
 - (4) Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri and Ken-Ichi Nakao, "Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe," *Phys. Rev. D* 96 (10/2017), 083517 doi:10.1103/PhysRevD.96.083517 [arXiv:1707.03595 [gr-qc]].
 - (5) Kota Ogasawara, Tomohiro Harada, Umpei Miyamoto and Takahisa Igata "Escape probability of the super-Penrose process," *Phys. Rev. D* 95 (6/2017) no.12, 124019 doi:10.1103/PhysRevD.95.124019 [arXiv:1609.03022 [gr-qc]].
 - (6) Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada and Hirotada Okawa, "3D Simulation of Spindle Gravitational Collapse of a Collisionless Particle System," *Class. Quant. Grav.* 34 (4/2017), 105010 (17pp), doi:10.1088/1361-6382/aa6ad5 [arXiv:1611.07906 [gr-qc]].
 - (7) Naoki Tsukamoto and Tomohiro Harada, "Light curves of light rays passing through a wormhole," *Phys. Rev. D* 95 (1/2017) no.2, 024030 (14 pp) doi:10.1103/PhysRevD.95.024030 [arXiv:1607.01120 [gr-qc]].
 - (8) Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Kazunori Kohri, Ken-ichi Nakao and Sanjay Jhingan, "Primordial black hole formation in the matter-dominated phase of the Universe," *Astrophys. J.* 833 (12/2016) no.1, 61 (8 pp), doi:10.3847/1538-4357/833/1/61 [arXiv:1609.01588 [astro-ph.CO]].
 - (9) Takahisa Igata, Tsuyoshi Houri and Tomohiro Harada, "Self-similar motion of a Nambu-Goto string," *Phys. Rev. D* 94 (9/2016) no.6, 064029 (10pp) doi:10.1103/PhysRevD.94.064029 [arXiv:1608.03698 [gr-qc]].
 - (10) Tomohiro Harada and Sanjay Jhingan, "Spherical and nonspherical models of primordial black hole formation: exact solutions," *Prog. Theor. Exp. Phys.* (9/2016) 093E04 (27pp) doi:10.1093/ptep/ptw123 [arXiv:1512.08639 [gr-qc]].
 - (11) Yasutaka Koga and Tomohiro Harada, "Correspondence between sonic points of ideal photon gas accretion and photon spheres," *Phys. Rev. D* 94 (8/2016) no.4, 044053 (6pp) doi:10.1103/PhysRevD.94.044053 [arXiv:1601.07290 [gr-qc]].
 - (12) Tomohiro Harada, Kota Ogasawara and Umpei Miyamoto, "Consistent analytic approach to the efficiency of collisional Penrose process," *Phys. Rev. D* 94(2) (7/2016) 024038 (5pp), doi:10.1103/PhysRevD.94.024038 [arXiv:1606.08107 [gr-qc]].
 - (13) Tomohiro Harada, Shunichiro Kinoshita and Umpei Miyamoto, "Vacuum excitation by sudden appearance and disappearance of a Dirichlet wall in a cavity," *Phys. Rev. D* 94 (7/2016) no.2, 025006 (17pp), doi:10.1103/PhysRevD.94.025006 [arXiv:1601.01172 [hep-th]].
 - (14) Mandar Patil, Tomohiro Harada, Ken-Ichi Nakao, Pankaj S. Joshi and Masashi Kimura, "Infinite efficiency of the collisional Penrose process: Can an overspinning Kerr geometry be the source of ultrahigh-energy cosmic rays and neutrinos?," *Phys. Rev. D* 93 (5/2016) no.10, 104015 (28pp), doi:10.1103/PhysRevD.93.104015 [arXiv:1510.08205 [gr-qc]].
 - (15) Kota Ogasawara, Tomohiro Harada and Umpei Miyamoto, "High efficiency of collisional Penrose process requires heavy particle production," *Phys. Rev. D* 93 (2/2016) no.4, 044054 (9pp), doi:10.1103/PhysRevD.93.044054 [arXiv:1511.00110 [gr-qc]].
 - (16) Takafumi Kokubu, Hideki Maeda and Tomohiro Harada, "Does the Gauss-Bonnet term stabilize wormholes?," *Class. Quant. Grav.* 32 (11/2015) 23, 235021 (30pp), doi:10.1088/0264-9381/32/23/235021 [arXiv:1506.08550 [gr-qc]].
 - (17) Takafumi Kokubu and Tomohiro Harada, "Negative tension branes as stable thin shell wormholes," *Class. Quant. Grav.* 32 (9/2015) no.20, 205001 (20pp), doi:10.1088/0264-9381/32/20/205001 [arXiv:1411.5454 [gr-qc]].
 - (18) Mandar Patil, Pankaj S. Joshi, Ken-ichi Nakao, Masashi Kimura and Tomohiro Harada, "Timescale for trans-Planckian collisions in Kerr spacetime," *Europhys. Lett.* 110 (5/2015) no.3, 30004 (6pp), doi:10.1209/0295-5075/110/30004 [arXiv:1503.08331 [gr-qc]].

- (19) Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo, Tomohiro Nakama and Yasutaka Koga, “Cosmological long-wavelength solutions and primordial black hole formation,” *Phys. Rev. D* 91 (4/2015) 8, 084057 (25pp).
- (20) B. J. Carr and Tomohiro Harada, “The separate universe problem: 40 years on”, *Phys. Rev. D* 91 (4/2015) 8, 084048 (16pp).
- (21) Tomohiro Harada, “Primordial black hole formation from cosmological fluctuations,” to appear in the proceedings of the conference Hot Topics in General Relativity and Gravitation - 2 (Quy Nhon, Vietnam, 2015), arXiv:1601.06235 [astro-ph.CO]. [査読無]
- (22) Ken-Ichi Nakao, Masashi Kimura, Tomohiro Harada, Mandar Patil and Pankaj S. Joshi, “How small can an over-spinning body be in general relativity?,” *Phys. Rev. D* 90 (12/2014) 12, 124079 (15pp). [arXiv:1406.6798 [gr-qc]].
- (23) Tomohiro Harada and Masashi Kimura, “Black holes as particle accelerators: a brief review,” *Class. Quant. Grav.* 31 (11/2014) 243001 (invited, 17pp). [arXiv:1409.7502 [gr-qc]].
- [学会発表] (計 17 件)
- (1) 原田知広 (立教大理・教授)、Bernard J. Carr (ロンドン大クインメアリ校・教授)、伊形尚久 (立教大先端研・教育研究コーディネーター) 「FLRW 解の共形構造の完全分類: 線形状態方程式の場合」、日本物理学会 2018 年年次大会、東京理科大学、2018 年 3 月 22 日
- (2) Tomohiro Harada, “Primordial black holes formed in the matter-dominated era”, International Workshop “Gravity and Cosmology 2018”, 29 Jan 2018 - 9 Mar 2018, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan
- (3) Tomohiro Harada, “Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated era”, International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics “CosPA 2017”, 11-15 Dec 2017, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan
- (4) Tomohiro Harada, “Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated era”, The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 27 Nov-1 Dec 2017, Higashi Hiroshima Arts and Culture Hall Kurara, Higashihiroshima, Japan
- (5) Tomohiro Harada, “Formation of primordial black holes from primordial fluctuations”, Focus Week on Primordial Black Holes, 13-17 Nov 2017, Kavli IPMU, Kashiwa, Japan (Invited)
- (6) Tomohiro Harada, “Spins of primordial black holes formed in the matter-dominated phase of the Universe”, Workshop on “Gravitational Dynamics and Black Holes”, 26-27 Sep 2017, Nagoya University, Japan (Invited)
- (7) 原田知広 (立教大理・教授)、柳哲文 (名大院理・助教)、郡和範 (KEK 素核研・准教授)、中尾憲一 (大阪市大院理・教授)、Sanjay Jhingan (山梨学院大・教授)、「物質優勢期における原始ブラックホール形成」、日本物理学会 2017 年年次大会、大阪大学、2017 年 3 月 17 日
- (8) Tomohiro Harada, “Primordial black hole formation in a matter-dominated universe”, The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 24-28 Oct 2016, Osaka City University, Japan
- (9) 原田知広 (立教大理・教授)、Sanjay Jhingan (山梨学院大・教授)、郡和範 (KEK 素核研・准教授)、中尾憲一 (大阪市大院理・教授)、柳哲文 (名大院理・助教)、「楕円体の重力崩壊のブラックホール形成条件」、日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎大学、2016 年 9 月 23 日
- (10) Tomohiro Harada, “Correspondence between sonic points of ideal photon gas accretion and photon spheres”, the 21st International Meeting on General Relativity and Gravitation, 10-15 July 2016, Columbia University, New York, USA.
- (11) 原田知広 (立教大理・教授)、Sanjay Jhingan (Jamia Millia Islamia・教授)、「原始ブラックホールの非球対称形成モデル: 厳密解」、日本物理学会 2016 年年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月 19 日
- (12) 原田知広 (立教大理・教授)、Sanjay Jhingan (Jamia Millia Islamia・教授)、「Szekeres 解の宇宙物理学への応用」、日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、2015 年 9 月 25 日
- (13) Tomohiro Harada, “Primordial black hole formation from cosmological fluctuations”, the international conference “Hot Topics in General Relativity and Gravitation 2”, 9-15 Aug 2015, Quy Nhon, Vietnam. (Invited)
- (14) Tomohiro Harada, “High energy particle collision and collisional Penrose process near a Kerr black hole”, the workshop “One Hundred Years of Strong Gravity”, 10-12 Jun 2015, Instituto Superior Técnico in Lisbon, Lisbon, Portugal. (Invited)
- (15) 原田知広 (立教大理・准教授)、柳哲文 (名大院理・助教)、中間智弘 (東大 ビッグバン・D2)、古賀恭敬 (立教大院理・M1)、「宇宙論的非線形ゆらぎと原始ブラックホール形成」、日本物理学会 2015 年年次大会、早稲田大学、2015 年 3 月 24 日
- (16) Tomohiro Harada, “Black holes as particle accelerators: a brief review”, The 24th

Workshop on General Relativity and
Gravitation in Japan, 10-14 Nov 2014, Kavli
IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Japan.
(17) 原田知広(立教大理・准教授)、柳哲文(名
大・助教)、「漸近的準一様解について」、
日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学、
2014 年 9 月 21 日

[その他]

ホームページ等

[http://www2.rikkyo.ac.jp/web/harada/pbh_kak
en/index.html](http://www2.rikkyo.ac.jp/web/harada/pbh_kak
en/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 知広 (HARADA, Tomohiro)

立教大学・理学部・教授

研究者番号: 60402773