

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)

個人研究

2018年度研究成果報告書

研究代表者	所属部局・職	氏名
	理学部・教授	原田 知広 印
研究課題	原始ブラックホールのスピン	
研究期間	2018年度	
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 411,497円 / (採択金額) 499,000円	

研究の概要(200~300字で記入、図・グラフは使用しないこと)

本研究は物理学領域の研究である。特に宇宙物理学・宇宙論・一般相対論の学問分野に該当する。原始ブラックホールとは初期宇宙起源のブラックホールである。2015年に人類が初めてとらえた重力波イベントGW150914などの重力波発生源は30倍の太陽質量程度の二つのブラックホールからなる連星であるが、それらのブラックホールが原始ブラックホールである可能性が指摘されている。宇宙物理学的に観測可能なブラックホール自身の性質は質量とスピン(自転)だけである。したがって、ブラックホールの起源を考えるにはそのスピンの鍵を握っている。本研究では、これまでの原始ブラックホールの形成理論に回転の効果を取り込むことによって原始ブラックホールのスピンを理論的に導出する。

キーワード(研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[ ブラックホール ] [ スピン ] [ 一般相対論 ]

**研究成果の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)

本研究の成果の概要として以下の5つのものを挙げる。番号は「研究発表①雑誌論文」の論文一覧の番号である。

## 1) Gauss 分布に従う曲率揺らぎからの原始ブラックホール生成

本研究では、原始ブラックホールの自転であるスピンの分布の導出を目標としていた。この目標に向かってスピンの統計的分布を理論的に導出することを考えていたところ、原始ブラックホールの形成要因である宇宙論的なゆらぎの統計とそれがどのように原始ブラックホールの質量分布関数やスピン分布関数に結び付くかを理解することをまず優先して行わなければならないという認識に至った。

宇宙論的なゆらぎは宇宙初期のインフレーション期に生成され、それは Einstein 方程式の長波長解として実現する。なかでも曲率揺らぎと呼ばれる、計量のスカラー的な摂動量 $\zeta$ が本質的な役割を示す。なぜなら $\zeta$ が非線形に大きいときにだけ、インフレーション後の輻射優勢期での原始ブラックホール形成が可能になるからである。Einstein-Hilbert 作用の2次の摂動からは、 $\zeta$ は線形領域で曲がった時空の場の量子論的な効果により Gauss 分布に従った確率分布をすることが導かれる。さらに $\zeta$ は物理的に負の無限大から正の無限大までの値をとることが可能である。このことから $\zeta$ が非線形領域を含めて Gauss 分布またはそれに近い確率分布をするという仮定が合理的であると考えられる。私は、柳哲文講師(名大)・郡和範准教授(KEK)・Jaume Garriga 教授(バルセロナ大)とともに、世界で初めて、この仮定を適用してピーク理論を用いて原始ブラックホールの生成量を計算する方法論を編み出し、単純なパワースペクトルの場合にそれを実際に数値的に計算することに成功した[4]。その結果、この新しい方法では、密度ゆらぎが Gauss 分布すると仮定する Press-Schechter 形式よりも数桁大きな存在量を予言することがわかった。この研究は今後原始ブラックホールのスピン分布を理論的に導出する際に重要になると考えられる。

## 2) 輻射の定常降着流の音速点と時空の光子球面の対応関係

輻射優勢期における原始ブラックホールの形成あるいは成長期には、ブラックホールによる輻射流体の降着という現象が起こる。この際にどれだけの質量を降着できるかが原始ブラックホールの質量関数を考えるうえで重要である。このようなことから、球対称時空における輻射流体の定常降着流の研究を行った。このような降着問題では流体の降着速度が音速と一致する点である音速点が降着流を決定する方程式の臨界点になるなど重要な役割を果たす。我々は、過年度において、輻射流体の球対称降着流及び回転降着円盤において音速点が一般に時空の光子球面上にあることを示した。ここで光子球面とは、光が円軌道をする面のことである。輻射流体の定常降着流の音速点と時空の光子球面とのこのような対応関係は非常に非自明なものである。現在この関係の本質的な理解に向けて、球対称性やその他の仮定を弱めた場合に、光子球面の一般化である光子面と音速点との関係を、古賀泰敬氏(立教大)や柳哲文講師・榎谷将隆氏・加藤祐矢氏(名大)らと継続して研究している。

## 3) 物質優勢期の原始ブラックホール形成における非一様性の効果

我々は過年度において物質優勢期における原始ブラックホール生成を考え、その重力崩壊過程の非球対称性が本質的であることに注目して、重力崩壊の非等方性と回転の効果を考慮することによって、原始ブラックホールの生成率とスピン分布関数の導出に成功した。その成果を踏まえ、本研究では、私は、國分隆文博士(立教大)・久徳浩太郎助教(KEK)・郡和範准教授(KEK)とともに、重力崩壊が球対称であっても非一様であることによってブラックホール形成が阻害されるという効果を解析した[3]。この効果は物質の性質に関する仮定に依存するので、それが最も効くような物質モデルを仮定して原始ブラックホールの生成率の評価を行った。この効果は約40年前に指摘されて計算されていたが、その際には情報の伝達速度が無限大であるという物理的に誤った計算が行われていた。今回、我々は、情報の伝達速度が光速を超えないという物理的に正しい仮定を行って解析をやり直し、約40年前の誤った仮定による評価より一桁大きい生成率を得た。この非一様性の効果が原始ブラックホールのスピン分布にどのような効果を与えるかを調べることは今後の課題となる。

**研究成果の概要 (つづき)**

## 4) 地平面のないコンパクト天体への重力崩壊からの粒子生成

Hawking はブラックホールがその質量に反比例する温度の熱的粒子生成を行うことを曲がった時空の場の量子論に基づいて示した。原始ブラックホールの最も重要な性質は、その質量が 10 億トンより小さい場合には、Hawking 輻射によって宇宙年齢内に蒸発し、またその放射の温度も 10 兆度程度にも達することで、観測可能な現象を引き起こすということである。恒星質量のブラックホールや銀河中心の超大質量ブラックホールでも極低温の粒子生成は起こるが、あまりにもその温度が低くまたそのためブラックホールが蒸発するのに要する時間があまりにも長すぎるため現実的な観測対象にはならない。

このように、ブラックホール自体は光を発しないものの、ブラックホールは熱的な放射を引き起こす。これは、もしある天体から熱的放射が観測され、その放射の温度と放射源の質量とスピンの Hawking による温度の公式を満たしていれば、その天体がブラックホールであることを観測的に証明できる可能性を示唆する。一方ブラックホールが事象の地平線によって定義される以上、ブラックホールはその外にいる観測者には観測できないはずのものである。ここに一見すると矛盾がある。そこで私は、Vitor Cardoso 教授 (リスボン大)・宮田大輝氏 (立教大) とともに、重力崩壊によってブラックホールではないが重力半径よりわずかに大きい半径のコンパクトな天体ができるときの粒子生成について、ごく簡単なモデルを構築して解析した[2]。その結果、重力により物質が加速されて重力半径に近くまで収縮する過程では一時的な熱的放射が起こることがわかった。さらに重力崩壊がある時点で減速されると、一時的な熱的放射は止み、その際バーストの放射が起こることがわかった。またその後かなり長時間経過した後で第二のバースト放射が起こることもわかった。このバーストの強さは減速の詳細に依存するが、一般には Hawking 輻射と同程度かそれよりずっと強いことがわかった。現在、國分隆文博士 (立教大) も加わってこの研究をさらに発展させて行っている。

## 5) gravastar 形成

重力波による連星ブラックホールの発見を受けて、ブラックホールとは何であるのか、非常にコンパクトで光を発さない星とブラックホールとの差異は何であるのか、という疑問に関心もたれている。もちろんこれは、暗黒物質として原始ブラックホールのようなものが見つかった場合でも、それが本当にブラックホールなのか検証するためにも重要な問いである。その中で、面白い可能性として提案されたのが gravastar という天体である。これは重力半径よりわずかに大きな半径をもつ星でその内部は正の真空エネルギーに満たされ、非常に薄い表面殻をもって、外部の真空領域と接している。このような天体は、その表面殻の状態方程式によっては可能であり、また安定にもなれることが知られている。しかし、安定な gravastar がどのように形成されるのかその具体的な機構はこれまで誰も提示していなかった。

そこで、私は中尾憲一教授 (大阪市大)・柳哲文講師 (名大) とともに、安定な gravastar の形成モデルを世界で初めて提案した[1]。これは真空中のダスト殻が重力崩壊してその半径が重力半径に非常に近づくと内向きと外向きに次々に光的な殻を放射するとともに、ダスト内部の真空が相転移して偽真空へと遷移し、ダスト殻もその状態方程式を変えて gravastar の表面殻として要請されるようなもの遷移するというものである。これは単純化され人工的な玩具モデルではあるが、より物理的な過程による形成機構を理想化したものになっているかもしれない。また、この玩具モデルを提案したことにより、ある天体から離れたところにいる観測者が観測データに基づいてその天体がブラックホールであることを証明することは原理的にできないことがはっきりした。その意義は非常に大きい。この研究成果は Physical Review に掲載され、Editor's suggestion に選ばれた。

**研究発表** (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

①雑誌論文【すべて査読を経て学術論文誌に掲載された論文である】

- [1] Ken-ichi Nakao, Chul-Moon Yoo and Tomohiro Harada, ``Gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?``, Phys. Rev. D 99 (2019) no. 4, 044027 doi:10.1103/PhysRevD.99.044027 [arXiv:1809.00124 [gr-qc]].
- [2] Tomohiro Harada, Vitor Cardoso and Daiki Miyata, ``Particle creation in gravitational collapse to a horizonless compact object``, Phys. Rev. D 99 (4/2019) no. 4, 044039 doi:10.1103/PhysRevD.99.044039 [arXiv:1811.05179 [gr-qc]].
- [3] Takafumi Kokubu, Koutaro Kyutoku, Kazunori Kohri and Tomohiro Harada, ``Effect of Inhomogeneity on Primordial Black Hole Formation in the Matter Dominated Era``, Phys. Rev. D 98 (12/2018) no. 12, 123024 doi:10.1103/PhysRevD.98.123024 [arXiv:1810.03490 [astro-ph.CO]].
- [4] Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada, Jaume Garriga and Kazunori Kohri, ``Primordial black hole abundance from random Gaussian curvature perturbations and a local density threshold``, PTEP 2018 (12/2018) no. 12, 123 doi:10.1093/ptep/pty120 [arXiv:1805.03946 [astro-ph.CO]].

②図書

なし。

③シンポジウム・公開講演会等の開催

なし。

④その他

(i) 国際会議・国際研究会発表

Tomohiro Harada, ``Primordial black hole formation``, as a seminar for International KEK-Cosmo and APCosPA Winter School 2019 ``Primordial Black Hole``, 22nd - 24th January 2019, KEK, Tsukuba, Japan (Invited)

Tomohiro harada, ``Complete conformal classification of the FLRW solutions with a linear equation of state``, YITP International Molecule-type Workshop ``Dynamics in Strong Gravity Universe``, 1-14 Sep 2018, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan

Tomohiro Harada, ``Formation of primordial black holes``, as invited lectures for International KEK-Cosmo and APCosPA Winter School 2019 ``Primordial Black Hole``, 22nd - 24th January 2019, KEK, Tsukuba, Japan

(ii) 国内学会発表

原田知広 (立教大理・教授)、Vitor Cardoso (リスボン大・教授)、宮田大輝 (立教大・D1)、 「地平面のない天体への重力崩壊における粒子生成」、日本物理学会 2019 年年次大会、九州大学、2019 年 3 月 17 日

原田知広 (立教大理・教授)、宮田大輝 (立教大・D1)、Vitor Cardoso (リスボン大・教授)、 「地平面のない時空による粒子生成」、日本物理学会 2018 年秋季大会、信州大学、2018 年 9 月 16 日

(iii) 国内研究会発表

原田知広、「ブラックホールと地平線のないコンパクト天体からの量子放射」、ブラックホール磁気圏研究会 2019、愛知教育大学、2019 年 3 月 2 日-4 日

原田知広、「地平線のないコンパクト天体の形成による粒子生成」、第 20 回特異点研究会、九州大学、2019 年 1 月 12 日-14 日

(iv) 国際会議集録

Tomohiro Harada, ``Uniqueness of static, isotropic low-pressure solutions of the Einstein-Vlasov system``, to appear in the Proceedings of the 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 5-9 Nov, Rikkyo University, Tokyo, Japan, <http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/jgrg/pastjgrg.html>