

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)

個人研究

2013年度研究成果報告書

研究代表者	所属・職名	氏名
	理学部・准教授	原田 知広 印
研究課題	高速回転ブラックホールの地平線現象	
研究期間	2013年度	
研究経費	(支出金額) 499,000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)

本研究がカバーする学問分野は物理学である。より具体的な学問領域としては、一般相対性理論、重力物理学、ブラックホール物理学、高エネルギー宇宙物理学である。

最近、観測的に宇宙物理学的ブラックホールの回転パラメータを決定することがある程度可能になってきた。一般相対論によってブラックホールの回転パラメータには上限があることが予言されているが、この上限に近い回転をしているブラックホールの存在が観測的に示唆されている。観測的には、回転パラメータがどれだけこの上限に近づけるのか、あるいはこの上限に一致したり、上限を超えたりできるのか、といった点が議論されている。このような宇宙物理学的観測の状況を踏まえて、本研究では、高速回転ブラックホールの地平線付近に特有な現象を明らかにし、観測的にブラックホールの回転を探る手段を与える理論を発展させる。

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。)

[宇宙物理学(理論)] [回転ブラックホール] [一般相対性理論]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

一般相対論の基礎方程式である Einstein 方程式の漸近的平坦な定常軸対称真空のブラックホールは Kerr ブラックホール解であることが知られており、この解は質量と回転の二つのパラメータで特定される。この回転パラメータにはある臨界値が存在し、その臨界値をとると極限ブラックホールになる。この臨界値に近い回転パラメータをとるとき、そのブラックホールは高速回転しているという。

高速回転ブラックホールの地平線現象として、近年粒子加速現象が注目されてきた。これは、近臨界回転するブラックホールの周りを軌道運動する粒子が、その角運動量が微調整されている場合、ブラックホールによる重力場によって加速されるという現象で、粒子が電荷をもっているかどうかにはよらない現象である。この現象の結果として、加速された粒子とそうでない粒子がブラックホールの地平線付近で高エネルギー衝突を起こす (Banados, Silk and West, 2009)。これを BSW 過程と呼ぼう。

ひとたびこのような高エネルギー粒子衝突がおこれば、その結果として高エネルギー粒子や超重量粒子が生成されることが予想される。ところが、我々は、既にこの高エネルギー粒子衝突によって高エネルギー粒子あるいは超重量粒子が生成されたとしても、そのような粒子は一般的に無限遠の観測者には直接到達できないことを、エネルギーと運動量の保存則という普遍的な物理学の法則のみによって示すことに成功していた (Harada, Nemoto and Miyamoto 2012)。

一方、回転ブラックホールの粒子加速現象と類似の現象として、荷電ブラックホールによる荷電粒子の加速現象も調べられている。ここでも、近臨界荷電しているブラックホールのまわりを軌道運動する荷電粒子が、その電荷が微調整されている場合、ブラックホールによる重力場と電磁場によって加速されるということが起こる。この現象の結果として、加速された荷電粒子とそうでない粒子がブラックホールの地平線付近で高エネルギー衝突を起こす (Zaslavskii 2010)。

我々は、この現象についても高エネルギー粒子衝突によって生成される高エネルギー粒子あるいは超重量粒子が無現遠まで到達できるかどうかを調べた。その結果、回転ブラックホールでの結果からの予想に反して、無限遠に到達できる粒子のエネルギーや質量には上限がなく、実際にいくらかでも大きな値をとれるような入射粒子のパラメータの組を与えることに成功した (Nemoto, Miyamoto, Harada and Kokubu 2013)。これと同様の結果は Zaslavskii (2012) によって提出されていたが、我々の結果はその結果をさらに補強するものである。我々の結果は、Physical Review に査読を経て brief report という形で掲載された。

回転ブラックホールによる粒子加速とそれに伴う高エネルギー粒子衝突は何を意味するのだろうか？ BSW 過程では回転ブラックホール周りを軌道運動する二質点の衝突エネルギーが無限に大きくなれるので、これは摂動が破綻している、すなわちある種の不安定性を示唆しているように思われる。これとは独立に、Aretakis (2011) によって非常に重要な定理が証明された。それは、極限荷電ブラックホールの地平線上でスカラー場は不安定を生じるというものである。この命題は、こののち極限回転ブラックホールを含む様々なブラックホールへそして様々な場へと拡張され、現在のところかなり一般的な状況で極限ブラックホールの地平線には場の不安定性があるという認識が広まっている。この Aretakis の不安定性と BSW 過程はともに極限ブラックホールの地平線上におけるある種の不安定性に関するものであり、密接な結びつきが予想される。

研究成果の概要 (つづき)

Aretakis の不安定性は高次元ブラックホールに拡張されて議論されており (例えば, Murata 2013)、Aretakis 不安定性との関連を見るためには、BSW 過程についても高次元ブラックホールに拡張することが有益である。このような物理的な動機づけに基づいて、我々は BSW 過程の高次元ブラックホールへの拡張として最も自然な、高次元回転ブラックホールの Einstein 方程式の漸近的平坦な真空厳密解である Myers-Perry ブラックホールにおいて BSW 過程が存在するかどうかを研究した。その結果、4 以上の一般次元の臨界回転 Myers-Perry ブラックホールについて BSW 過程が存在することを具体的な計算によって示した。これは極限 Myers-Perry ブラックホールの Aretakis 不安定性の存在と符合するものである。この成果は、Physical Review に査読を経て掲載された (Tsukamoto, Kimura and Harada 2014)。

その他、本研究と関連した研究成果として、ワームホールを重力レンズの波動効果によって観測的に見分けることができることを示し、センチメートルスケールのワームホールの存在量に対して既にある観測データから厳しい上限を与えた研究 (Yoo, Harada and Tsukamoto 2013)、宇宙物理学的に動機付けされる恒星進化の最終段階としての重力崩壊の初期条件からは弱い宇宙検閲予想が成り立つことを示した研究 (Miyamoto, Jhingan and Harada 2013)、原始ブラックホールの形成の閾値に対する解析公式を導いた研究 (Harada, Yoo and Kohri 2013)、Horava-Lifshitz 重力理論における回転星の非存在を強く示唆する定理を証明した研究 (Tsukamoto and Harada 2013)、原始ブラックホールの形成条件に関する詳細な数値シミュレーションとその結果の解釈に関する研究 (Nakama, Harada, Polnarev and Yokoyama 2014) の成果を、査読を経た論文として国際的な学術論文誌に発表した。

本研究助成による助成金によって、研究関連図書を購入し、本研究を遂行するのに必要な知識や情報を得るのに使用した。また、国内旅費を用いて、名古屋大学・大阪市立大学へ出張し、また東海大学で行われた物理学学会年会へ参加し、本研究に関する議論を行い必要な情報を収集した。費目変更によって最新の数式処理ソフトを使用するに耐えるノートパソコンを購入し、本研究の遂行に必要な解析計算の実行を行った。その他、助成金は本研究の遂行に必要な用途に使用した。

参考文献

- M. Banados, J. Silk, and S. M. West, Phys. Rev. Lett. 103, 111102 (2009).
 Tomohiro Harada, Hiroya Nemoto and Umpei Miyamoto, Phys. Rev. D 86(2), 024027 (2012), Erratum-ibid. D 86, 069902 (2012).
 O. B. Zaslavskii, Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 92, 635 (2010) [JETP Lett. 92, 571 (2010)].
 Hiroya Nemoto, Umpei Miyamoto, Tomohiro Harada and Takafumi Kokubu, Phys. Rev. D 87(12), 127502 (2013).
 O. B. Zaslavskii, Phys. Rev. D 86, 124039 (2012).
 S. Aretakis, Commun. Math. Phys. 307, 17 (2011); Ann. Inst. Henri Poincaré 12, 1491 (2011); J. Funct. Anal. 263, 2770 (2012); arXiv:1206.6598; Classical Quantum Gravity 30, 095010 (2013); Phys. Rev. D 87, 084052 (2013).
 Keiju Murata, Classical Quantum Gravity 30, 075002 (2013).
 Naoki Tsukamoto, Masashi Kimura and Tomohiro Harada, Phys. Rev. D 89 (2014) 024020.
 Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada and Naoki Tsukamoto, Phys. Rev. D 87(8), 084045 (2013).
 Umpei Miyamoto, Sanjay Jhingan and Tomohiro Harada, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013(5), 053E1 (2013).
 Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo and Kazunori Kohri, Phys. Rev. D 88(8), 084051 (2013).
 Naoki Tsukamoto and Tomohiro Harada, Galaxies 2013(1), 261 (2013).
 Tomohiro Nakama, Tomohiro Harada, A. G. Polnarev and Jun'ichi Yokoyama, JCAP01(2014)037 (2014).

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 (すべて査読つき)

Tomohiro Nakama, Tomohiro Harada, A. G. Polnarev and Jun'ichi Yokoyama, ``Identifying the most crucial parameters of the initial curvature profile for primordial black hole formation,'` JCAP01(2014)037 (25pp) (1/2014).

Naoki Tsukamoto, Masashi Kimura and Tomohiro Harada, ``High Energy Collision of Particles in the Vicinity of Extremal Black Holes in Higher Dimensions: Banados-Silk-West Process as Linear Instability of Extremal Black Holes,'` Phys. Rev. D 89 (1/2014) 024020 (18pp).

Naoki Tsukamoto and Tomohiro Harada, ``A No-Go Theorem for Rotating Stars of a Perfect Fluid without Radial Motion in Projectable Horava-Lifshitz Gravity,'` Galaxies 2013(1), 261-274 (12/2013).

Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo and Kazunori Kohri, ``Threshold of primordial black hole formation,'` Phys. Rev. D88(8), 084051 (10/2013) (10pp).

Hiroya Nemoto, Umpei Miyamoto, Tomohiro Harada and Takafumi Kokubu, ``Escape of superheavy and highly energetic particles produced by particle collisions near maximally charged black holes,'` Phys. Rev. D87(12), 127502 (6/2013) (4pp).

Umpei Miyamoto, Sanjay Jhingan and Tomohiro Harada, ``Weak cosmic censorship in gravitational collapse with astrophysical parameter values,'` Prog. Theor. Exp. Phys. 2013(5), 053E1 (5/2013).

Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada and Naoki Tsukamoto, ``Wave Effect in Gravitational Lensing by the Ellis Wormhole,'` Phys. Rev. D87(8), 084045 (4/2013) (9pp).

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 (学会発表、研究報告書の印刷等)

Tomohiro Harada, ``High-velocity collision of particles around a rapidly rotating black hole,'` J. Phys. : Conf. Ser. 484 (2014) 012016, as a contribution to ``Vishva Mimansa: An Interpretative Exposition of the Universe,'` the Proceedings of the 7th International Conference on Gravitation and Cosmology 14- 19 December 2011, Goa, India, ed. B. S. Sathyaprakash and Tejinder Singh (refereed)

T. Nakama, T. Harada, A. G. Polnarev and J. 'i. Yokoyama, ``Investigating formation condition of primordial black holes for generalized initial perturbation profiles,'`, to appear in the proceedings of The 10th International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPA2013), RESCEU-4/14, RUP-14-2, arXiv:1401.7740 [gr-qc].

Tomohiro Harada, ``High-velocity collision of particles around a Kerr black hole,'` in the Proceedings of the 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 5-8 Nov, 2013, Hirosaki University, Hirosaki, Japan, <http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/jgrg/proc/JGRG23>

Tomohiro Harada and Masashi Kimura, ``High-velocity collision of an ISCO particle around a Kerr black hole,'`, submitted as a contribution paper in the Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, 1-7 July 2012, Stockholm University, Stockholm, Sweden, ed. K. Rosquist, R. Jantzen and R. Ruffini (World Scientific, Singapore, 2013).

Tomohiro Harada and Masashi Kimura, ``High-velocity collision of two general geodesic particles around a Kerr black hole,'`, submitted as a contribution paper in the Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, 1-7 July 2012, Stockholm University, Stockholm, Sweden, ed. K. Rosquist, R. Jantzen and R. Ruffini (World Scientific, Singapore, 2013).

協力: 阿部文雄, 原田知広, 福江純, 「時間とは何か」(監修: 福江純, ニュートンムック Newton 別冊), (ニュートンプレス, 東京, 2013年5月), 98頁-101頁