

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21740190

研究課題名（和文） 量子重力における重力崩壊と時空特異点に関する研究

研究課題名（英文） Gravitational collapse and spacetime singularities in quantum gravity

研究代表者

原田 知広 (HARADA TOMOHIRO)

立教大学・理学部・准教授

研究者番号：60402773

研究成果の概要（和文）：量子宇宙論における量子化の不定性と時空特異点回避の関係を明らかにし、量子重力的な効果によって超臨界高速回転 Kerr 時空が実現したりワームホール構造が実現したりした場合の宇宙観測的帰結を導き、近臨界高速回転ブラックホールの地平線付近での粒子衝突が量子重力のエネルギースケールに達する可能性を指摘した。

研究成果の概要（英文）：We have revealed the relationship between quantisation ambiguities in quantum cosmology and the absence of spacetime singularity, deduced the astrophysical observational implications of superextremal Kerr spacetimes and wormhole structures, both of which may be possible under significant quantum gravity effects, and indicated the possibility of particle collision near the horizon of near-extremal rotating black holes of which the centre-of-mass energy might reach the Planck scale.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	1,000,000	300,000	1,300,000
平成22年度	800,000	240,000	1,040,000
平成23年度	900,000	270,000	1,170,000
平成24年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：相対論・重力（理論）

1. 研究開始当初の背景

時空特異点のような強い時空曲率をもつ領域では重力の量子論的效果が重要になる。量子重力は未完成の理論であるが、統一理論からのアプローチと正準量子化からのアプローチがあり、前者では弦理論が、後者ではループ量子重力が最も有力な理論である。ループ量子重力の手法を宇宙論に適用したループ量子宇宙論では、時空特異点の回避の可能性が示唆されている。

2. 研究の目的

- (1) 古典的な重力崩壊で不可避免的に起こる時空特異点の形成がループ量子重力理論の非摂動効果によってどのように変更を受けるのかを明らかにする。
- (2) 量子重力的な効果が宇宙論・宇宙物理学にもたらす帰結について明らか

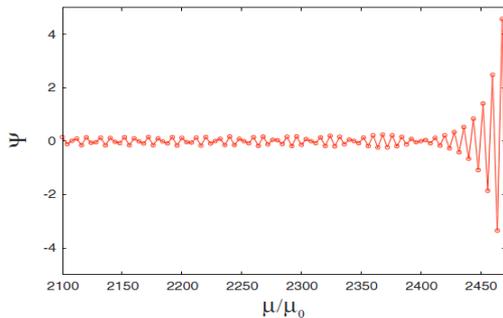
にする。

3. 研究の方法

一般相対論とループ量子重力効果を定式化したものによって、解析的な手法・数値的な手法を併用して研究を進める。また、一般相対論に量子重力効果を有効的に取り入れたものについても同様の手法で解析する。

4. 研究成果

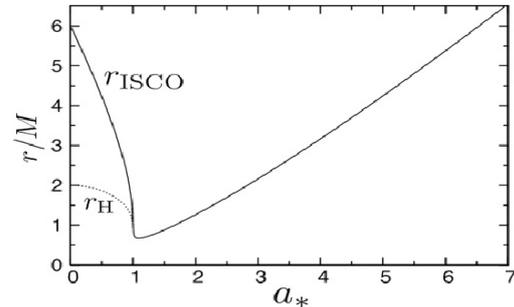
- (1) ループ量子重力の手法を宇宙論に適用したループ量子宇宙論において、特に宇宙項存在下において、古典理論を量子化する際の演算順序や離散化における不定性がどのように初期特異点の回避や古典連続極限の回復に影響するのかについて、詳細に調べた。図は離散化によって得られた差分方程式の解が古典連続極限に一致しない例である。その結果、初



期特異点の回避と古典極限の回復という望ましい性質を実現するためには、演算順序と離散化に強い制限が加わることを示し、実際に望ましい組み合わせを構成した。また、ループ量子宇宙論において自然に予言される超インフレーションシナリオと宇宙背景マイクロ波放射ゆらぎのWMAPによる観測データとの整合性について調べた。

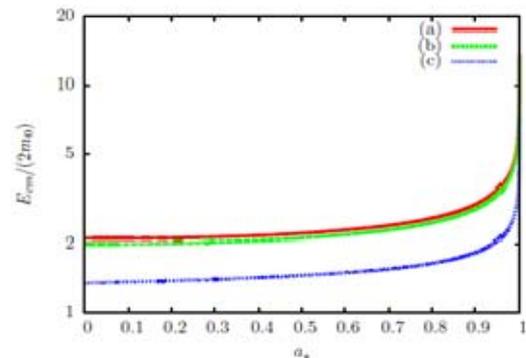
- (2) 超臨界高速回転のKerr時空は裸の特異点をもっており、宇宙検閲仮説に反する。しかし、裸の特異点付近では弦理論的な効果が顕著になって正則な時空が実現することが示唆されている。このような正則な天体はsuperspinarと言われている。Superspinarまで考慮すると最内安定軌道はスピンパラメータの一意関数にはならず、極小に達した後増加に転じあとは単調増加する(図)。我々はsuperspinarも含めたKerr時空の定常的な降着円盤からの熱放射を詳細に調べた。その結果、ブラッ

クホールをsuperspinarから区別するのは困難である一方、あるスピンパラメータの範囲の場合にはsuperspinarをブラックホールから



区別することは可能であることが分かった。また、非定常な降着流の場合には、赤道面に物質が蓄積してできる輪が現れたり、赤道面外向きの間欠的な噴出現象がおこることを数値シミュレーションにより明らかにした。

- (3) 近臨界高速回転ブラックホールの地平線付近で衝突する二粒子の重心系エネルギーが量子重力のエネルギースケールに達する可能性を吟味した。この現象は当初赤道面だけで解析され、二粒子のうち片方の粒子の角運動量を微調整する必要があった。我々は、赤道面から離れた所でも起こること、そして角運動量の微調整は最内安定円軌道を考慮することによって自然に実現されることを具体的な計算によって示した(図)。さらに、重力波放射反作用の効果がエネルギースケールの上限を与える可能性を考慮したが、それでも量子重力のエネルギースケールに達しうるパラメータ領域が存在することを示した。また、ブラックホール付近の磁



場の存在はこのような粒子加速能力を促進することを示した。一方、そのような衝突によって生成される粒子を遠方で観測した場合には、その

粒子が強い赤方偏移を受けるため、観測される粒子エネルギーは大きくなれず関係する粒子の数倍の上限がつくことを示した。

- (4) 曲がった時空中での場の量子論的効果は、半古典的な取り扱いの範囲では、古典的な Einstein 方程式にエネルギー条件を破る物質場として有効的に取り込まれる。このような状況ではワームホールという非自明なトポロジーをもつ時空が現実的な可能性としてとらえられる。我々は、膨張宇宙におけるワームホール構造では負のエネルギーが必要ないことを示した。またワームホールとブラックホールを観測的に識別する手段として重力レンズ効果による Einstein 環と相対論的 Einstein 環の有用性を指摘した。
- (5) 古典的な重力理論における時空特異点では量子重力的な効果が重要になってくる。一般的な球対称重力崩壊は時空特異点形成時には自己相似的になるという予想がなされていた。我々はこの予想を円筒対称重力波に拡張し、円筒対称自己相似真空解を厳密に構成し、その安定性を数値計算と繰り込み群的手法によって解析した。その結果、ある境界条件においては拡散する円筒対称重力波は自己相似的になっていくという示唆を得たが、重力崩壊についてはそのような示唆は得られなかった。

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 29 件)

1. Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada and Naoki Tsukamoto, ‘Wave Effect in Gravitational Lensing by the Ellis Wormhole,’’, accepted for publication in Physical Review D, YITP-13-15, RUP-13-3, arXiv:1302.7170 [gr-qc] <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.87.084045> (査読有) .
2. Umpei Miyamoto, Sanjay Jhingan and Tomohiro Harada, ‘Weak cosmic censorship in gravitational collapse with astrophysical parameter values,’’, accepted for publication in Progress of Theoretical and Experimental Physics, arXiv:1108.0248 [gr-qc], <http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptt027> (査読有) .
3. Tomohiro Harada and Sanjay Jhingan, ‘Renormalization group approach to Einstein-Rosen waves,’ Phys. Rev. D87(6), 064043 (3/2013) (7pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.87.064043> (査読有) .
4. 原田知広、木村匡志、 「ブラックホールは天然の粒子加速器になるか?」、日本物理学会誌第 68 巻第 2 号 102 頁、2013 年 2 月 (査読無)
5. Naoki Tsukamoto and Tomohiro Harada, ‘Signed magnification sums for general spherical lenses,’ Phys. Rev. D 87(2), 024024 (1/2013) (6pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.87.024024> (査読有) .
6. Naoki Tsukamoto, Tomohiro Harada and Kohji Yajima, ‘Can we distinguish between black holes and wormholes by their Einstein ring systems?,’ Phys. Rev. D 86(10), 104062 (11/2012) (6pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.104062> (査読有) .
7. Tomohiro Harada, Hiroya Nemoto and Umpei Miyamoto, ‘Upper limits of particle emission from high-energy collision and reaction near a maximally rotating Kerr black hole’, Phys. Rev. D86(2), 024027 (7/2012) (10 pp), Erratum-ibid. D 86, 069902 (9/2012) (1 p) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.069902>, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.024027> (査読有) .
8. Takahisa Igata, Tomohiro Harada and Masashi Kimura, ‘Effect of a weak electromagnetic field on particle acceleration by a rotating black hole’, Phys. Rev. D85(10), 104028 (5/2012) (11 pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.85.104028> (査読有) .
9. Tomohiro Harada and Masashi Kimura, ‘Collision of an object in the transition from adiabatic inspiral to plunge around a Kerr black hole’, Phys. Rev. D84(12), 124032 (12/2011) (8 pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.84.124032> (査読有) .
10. Tomohiro Harada and Rohta Takahashi, ‘Black hole candidates and the Kerr bound’, J. Phys.: Conf. Ser. 314

- 012084 (2011), as a contribution to the Proceedings of Spanish Relativity Meeting (ERE 2010): Gravity as a Crossroad in Physics, 6–10 Sep 2010, Palacio de Exposiciones y Congresos de Granada, Granada, Spain, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/314/1/012084> (査読有) .
11. Tomohiro Harada, Umpei Miyamoto and Naoki Tsukamoto, ‘‘Uniqueness of static spherically symmetric vacuum solutions in the IR limit of nonrelativistic quantum gravity’’, *J. Phys.: Conf. Ser.* 314 012120 (2011), as a contribution to the Proceedings of Spanish Relativity Meeting (ERE 2010): Gravity as a Crossroad in Physics, 6–10 Sep 2010, Palacio de Exposiciones y Congresos de Granada, Granada, Spain, <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/314/1/012120> (査読有) .
 12. Tomo Tanaka, Fumitoshi Amemiya, Masahiro Shimano, Tomohiro Harada and Takashi Tamaki, ‘‘Discretisation parameter and operator ordering in loop quantum cosmology with the cosmological constant’’, *Phys. Rev. D* 83(10), 104049 (5/2011) (14pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.83.104049> (査読有) .
 13. Seiji Kawamura et al. (31th among 145 authors), ‘‘The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO’’, *Class. Quantum Grav.* 28(9), 094011 (4/2011) (12pp), <http://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/28/9/094011> (査読有) .
 14. Tomohiro Harada and Masashi Kimura, ‘‘Collision of two general geodesic particles around a Kerr black hole’’, *Phys. Rev. D* 83(8), 084041 (4/2011) (9pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.83.084041> (査読有) .
 15. Tomohiro Harada and Masashi Kimura, ‘‘Collision of an innermost stable circular orbit particle around a Kerr black hole’’, *Phys. Rev. D* 83(2), 024002 (1/2011) (11pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.83.024002> (査読有) .
 16. Tomohiro Harada, Umpei Miyamoto and Naoki Tsukamoto, ‘‘Uniqueness of static spherically symmetric vacuum solutions in the IR limit of Horava-Lifshitz gravity’’, *Int. J. Mod. Phys. D* 20(1), 111–118 (1/2011) (8pp) <http://dx.doi.org/10.1142/S0218271811018652> (査読有) .
 17. Ken-ichi Nakao, Tomohiro Harada and Umpei Miyamoto, ‘‘Visible borders of spacetime generated by high-energy collisions’’, *Phys. Rev. D* 82(12), 121501(R) (12/2010) (4pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.82.121501> (査読有) .
 18. B. J. Carr, Tomohiro Harada and Hideki Maeda, ‘‘Can a primordial black hole or wormhole grow as fast as the universe?’’, *Class. Quant. Grav.* 27(18), 183101 (8/2010) (28pp) <http://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/27/18/183101> (査読有) .
 19. Cosimo Bambi, Tomohiro Harada, Rohta Takahashi and Naoki Yoshida, ‘‘Outflows from accreting super-spinars’’, *Phys. Rev. D* 81(10), 104004 (5/2010) (12pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.81.104004> (査読有) .
 20. Masaki Ando et al. (28th among 140 authors), ‘‘DECIGO and DECIGO pathfinder’’, *Class. Quant. Grav.* 27(8), 084010 (4/2010) (10pp) <http://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/27/8/084010> (査読有) .
 21. Rohta Takahashi and Tomohiro Harada, ‘‘Observational Testability of Kerr bound in X-ray Spectrum of Black-Hole Candidates’’, *Class. Quant. Grav.* 27(7), 075003 (3/2010) (21pp) <http://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/27/7/075003> (査読有) .
 22. Cosimo Bambi, Katherine Freese, Tomohiro Harada, Rohta Takahashi and Naoki Yoshida, ‘‘Accretion process onto super-spinning objects’’, *Phys. Rev. D* 80(10), 104023 (11/2009) (10pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.80.104023> (査読有) .
 23. Masahiro Shimano and Tomohiro Harada, ‘‘Observational constraints on a power spectrum from super-inflation in Loop Quantum Cosmology’’, *Phys. Rev. D* 80(6), 063538 (9/2009) (17pp) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.80.063538> (査読有) .
 24. Ken-ichi Nakao, Tomohiro Harada, Yasunari Kurita and Yoshiyuki Morisawa, ‘‘Relativistic Gravitational Collapse of a Cylindrical Shell of Dust II: Settling

- Down Boundary Condition'', Prog. Theor. Phys. 122(2), 521-541 (8/2009) <http://dx.doi.org/10.1143/PTP.122.521> (査読有) .
25. Tomohiro Harada, Ken-ichi Nakao and Brien C. Nolan, 'Einstein-Rosen waves and the self-similarity hypothesis in cylindrical symmetry'', Phys. Rev. D80(2), 024025 (7/2009) (15pp), Erratum-ibid. D80(10), 109903 (7/2009) (1 p) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.80.109903>, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.80.024025> (査読有) .
 26. Tomohiro Harada, 'Singularities and self-similarity in gravitational collapse'', a plenary talk given at the Hayashibara Forum at IHES on Singularities, 20-23 Nov 2006, Bures-sur-Yvette, France, Advanced Studies in Pure Mathematics 55 (2009) 15-30 <http://arxiv.org/abs/arXiv:0904.4770> (査読有) .
 27. Tomohiro Harada, 'Self-similar black holes in an accelerated universe'', in "Physics and Mathematics of Gravitation: the Proceedings of the Spanish Relativity Meeting 2008, 15 - 19 Sep 2008, Salamanca, Spain", ed. K.E. Kunze, M. Mars and M. A. Vazquez-Mozo, (American Institute of Physics, New York, 2009), AIP Conf. Proc. 1122, 288-291 (2009) <http://dx.doi.org/10.1063/1.3141296> (査読有) .
 28. Shuichi Sato et al. (31st among 135 authors), 'DECIGO: The Japanese space gravitational wave antenna'', J. Phys. Conf. Ser. 154, 012040 (2009) <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/154/1/012040> (査読有) .
 29. Masaki Ando et al. (33rd among 137 authors), "DECIGO pathfinder", Class. Quantum Grav. 26, 094019 (4/2009) <http://dx.doi.org/10.1088/0264-9381/26/9/094019> (査読有) .
- [学会発表] (計 21 件)
1. 原田知広 (立教大理・准教授)、Bernard J. Carr (ロンドン大クインメア校)、「分離宇宙条件の一般化へ向けて」日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 29 日
 2. Tomohiro Harada, 'High-velocity collision of particles around a Kerr black hole and its implication'', Nishinomiya Yukawa Symposium: New Waves in Gravity and Cosmology, 4-6 Dec 2012, Kyoto University, Kyoto, Japan. (poster and short talk)
 3. Tomohiro Harada, 'High-velocity collision of particles around a Kerr black hole and its implication'', Gravity and Cosmology 2012, 18 Nov-21 Dec 2012, Kyoto University, Kyoto, Japan.
 4. Tomohiro Harada, 'Upper limits of particle emission from high-energy collision and reaction near a maximally rotating Kerr black hole'', the RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION 'JGRG22'', 12-16 Nov 2012, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
 5. 原田知広 (立教大理・准教授)、宗像裕也 (立教大理 D3)、宮本雲平 (立教大・先端科学計測センターPD)、「高速回転ブラックホール付近の高エネルギー粒子衝突による粒子放射に対する上限について」、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 12 日
 6. Tomohiro Harada and Masashi Kimura, 'High-velocity collision of two general geodesic particles around a Kerr black hole'', the 13th Marcel Grossmann Meeting on recent developments in theoretical and experimental general relativity, gravitation, relativistic field theories, 1-7 Jul 2012, Stockholm University, Stockholm, Sweden.
 7. Tomohiro Harada and Masashi Kimura, 'High-velocity collision of an ISCO particle around a Kerr black hole'', the 13th Marcel Grossmann Meeting on recent developments in theoretical and experimental general relativity, gravitation, relativistic field theories, 1-7 Jul 2012, Stockholm University, Stockholm, Sweden.
 8. 原田知広 (立教大理・准教授)、木村匡志 (京大基研・学振特別研究員 PD)、「重力波放射反作用を考慮したときの天体加速器としての Kerr ブラックホール」、日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 27 日
 9. Tomohiro Harada, 'High-velocity collision of particles around a rapidly rotating black hole'', The 7th International Conference on

- Gravitation and Cosmology, 14-19 Dec 2011, Holiday Inn Goa, Goa, India.
10. Tomohiro Harada, ‘ ‘High-velocity collision of particles around a rapidly rotating black hole’’, The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 26-29 Sep 2011, Tohoku University, Sendai, Japan.
 11. 原田知広 (立教大理・准教授)、木村匡志 (京大基研・学振特別研究員 PD)、 「Kerr ブラックホール周りでの一般の測地的二粒子の衝突」、日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学、2011 年 9 月 16 日
 12. 原田知広 (立教大理・准教授)、木村匡志 (大阪市大数学研究所・専任研究員)、 「高速回転ブラックホール付近での天体の高速衝突」、日本天文学会 2011 年春季年会予稿集 (東北関東大震災のための年会中止に伴う特例措置)、2011 年 3 月
 13. Tomohiro Harada, ‘ ‘Collision of geodesic particles around a Kerr black hole’’, IPMU Workshop on Black Holes, 21-25 Feb 2011, IPMU, Kashiwa, Japan. (invited talk)
 14. Tomohiro Harada, ‘ ‘Black hole candidates and the Kerr bound’’, The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 21-25 Sep 2010, YITP, Kyoto, Japan. (poster and short talk)
 15. 高橋芳太 (理研・基礎科学特別研究員)、原田知広 (立教大理・准教授)、 「ブラックホール候補天体と Kerr 限界」、日本物理学会秋季大会、九州工業大学、2010 年 9 月 14 日
 16. Tomohiro Harada, ‘ ‘Black hole candidates and the Kerr bound’’, Spanish Relativity Meeting 2010, 9 Sep 2010, Palacio de Exposiciones y Congresos de Granada, Granada, Spain.
 17. Tomohiro Harada, ‘ ‘Uniqueness of static spherically symmetric vacuum solutions in the IR limit of nonrelativistic quantum gravity’’, Spanish Relativity Meeting 2010, 6-10 Sep 2010, Palacio de Exposiciones y Congresos de Granada, Granada, Spain.
 18. 原田知広 (立教大理・准教授)、宮本雲平 (立教大理・ポストドクトラルフェロー)、塚本直樹 (立教大理・M2)、 「非相対論的量子重力の赤外極限における静的球対称解」、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山大学、2010 年 3 月 23 日
 19. Tomohiro Harada, ‘ ‘Einstein-Rosen

- waves and the self-similarity hypothesis in cylindrical symmetry’’, The 19th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 30 Nov - 4 Dec 2009, Rikkyo University, Tokyo, Japan
20. 原田知広 (立教大理・准教授)、中尾憲一 (大阪市立大・教授)、B. C. Nolan (ダブリン市立大・上級講師)、 「Einstein-Rosen 波と円筒対称時空における自己相似仮説 II」、日本物理学会秋季大会、甲南大学、2009 年 9 月 10 日
 21. Tomohiro Harada, Ken-ichi Nakao and Brien C. Nolan, ‘ ‘Einstein-Rosen waves and the self-similarity hypothesis in cylindrical symmetry’’, ‘The 12th Marcel Grossmann Meeting on recent developments in theoretical and experimental general relativity, gravitation, relativistic field theories, 12-18 Jul 2009, Unesco Headquarters, Paris, France.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.rikkyo.ac.jp/~harada/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 知広 (HARADA TOMOHIRO)
立教大学・理学部・准教授
研究者番号：60402773

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

なし。