

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540299

研究課題名(和文) 超弦理論における高次元ブラックホールの時空構造

研究課題名(英文) Higher Dimensional Black Holes in String Theory

研究代表者

石橋 明浩 (ISHIBASHI, Akihiro)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：10469877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：重力を含む全ての相互作用の統一理論候補である超弦理論について、重力と時空構造の観点から系統的に理解することを目的とし、その鍵となるソリトンの物体である高次元ブラックホールの様々な基本性質を調べ、12編の論文を発表した。主な成果は、高次元真空ブラックホール解の対称性とトポロジーへの制限、一意性定理の拡張に必要な大域的・局所的情報の整理、高次元からの有効理論におけるブラックホールの安定性解析、AdS・CFT(重力・ゲージ理論)双対性およびその物性理論への応用における非一様な高次元ブラックホール解の構築などである。

研究成果の概要(英文)：In order to understand non-perturbative aspects of super string theory, we have studied basic properties of higher dimensional black holes, which are naturally involved in string theory as its non-perturbative solitonic solution. In the course of this study, we have published 12 papers. The main achievements are finding some restrictions on possible topology of higher dimensional black holes from the black hole rigidity, identifying a set of sufficient conditions to completely specify higher dimensional stationary, vacuum black hole solutions, the stability analysis of rotating black holes in some effective theory from higher dimensional gravity, in particular, its superradiant instability by massive vector field numerically demonstrated with discussion on possible applications to astrophysical consequences, constructing higher dimensional black holes with lattices in the context of some applications of AdS/CFT duality to condensed matter physics.

研究分野：数物系科学

キーワード：相対論 超弦理論 素粒子 数理物理 宇宙物理

1. 研究開始当初の背景

自然界の全ての相互作用を含む究極理論として超弦理論が最有力候補であるが、未だ摂動論を越えた定式化をもたない。超弦理論の全貌を理解するための基礎研究において、Dブレーンと呼ばれる新しい膜状の非摂動的ソリトン物体の存在と、それを通して重力相互作用とゲージ相互作用の間にある双対性が明らかになってきた。この双対性の重力側にあるものが高次元ブラックホールであり、例えば5次元におけるリング状の位相構造をもつブラックリング解など、高次元のブラックホールは4次元時空とは本質的に異なる性質を持ち得ることが明らかとなり、重力理論と超弦理論の観点からも興味深い、多種多様な新しい解空間構造が見出された。その一方で、加速器実験によりある種の高次元ブラックホールが生成される可能性が指摘され、実験・観測による現実的な探査目標としても高次元時空への関心が高まりつつあった。しかしながらその基礎研究は、まだ緒についたばかりという状況であった。

2. 研究の目的

本研究計画は、超弦理論の非摂動的側面の理解に向けて重力理論から新たな知見を得るために、高次元ブラックホールの対称性と動的安定性、位相構造といった数理的基本性質を系統的に明らかにすることを目標とするものである。

3. 研究の方法

高次元一般相対論におけるブラックホールとして最も単純な真空解の持ち得る基本性質として、特に等長対称性、ホライズンのトポロジー、ブラックホール外部領域のトポロジー、ブラックホールの動的安定性を数理的解析的方法および数値的手法を用いて調査する。私自身のこれまでの高次元一般相対論における定常ブラックホールの剛性定理の結果と、高次元静的ブラックホールのゲージ不変摂動論の研究を、超弦理論の文脈における高次元ブラックホールの「対称性」と「動的安定性」の研究に拡張・一般化する方法で遂行する。

また、超弦理論の示す双対性である「重力・ゲージ理論対応」を具現化する漸近反ドジッター(AdS)時空におけるブラックホールの安定性、漸近AdSとなる新しいブラックホール解の構成も行う。

4. 研究成果

先ず、一般の高次元ブラックホールの内、真空解のトポロジー、対称性、ブラックホール解の分類問題、および静的ブラックホールのゲージ不変摂動論と安定性解析に関して、現時点までに解明できたことを総括的にまとめて2本のレビュー論文として発表した。

高次元ブラックホールの安定性に関しては、高次元重力理論から導出される4次元有

効理論における回転ブラックホールの不安定性として、特に有質量ベクトル場による超放射不安定性を、スロー回転近似と数値計算を用いて示した。これによりブラックホールの回転パラメータの観測という天文学的方法によって光の質量上限を与えることもできることを示した。

また重力・ゲージ理論対応の具体例である漸近的反ドジッター時空に関して、その様な時空における乱流不安定性の結果、時空特異点が発生するかどうかの問題に対して、大域的微分幾何学的方法の適用限界を示すと共に、特異点発生に関する解析的な基準を与えた。

超弦理論の双対性の応用として興味深いのは漸近反ドジッター的ブラックホールを用いて超伝導現象を理解する試み：ホログラフィック超伝導である。この文脈で重要となるのは、より現実的な格子構造をもつ物質内での超伝導現象と対応させるべく、並進対称性を破るブラックホール解を構築することである。静的ブラックホールのゲージ不変摂動論の手法を用いて格子構造をもつブラックホールを摂動論的に構築し、その上でブラックホールの持つ運動量が散逸するかどうかを調べた。その結果、ブラックホールのゼロ温度極限においてもエントロピー生成が起こることを示すことができた。

超弦理論の理解において大きな洞察を与えてきたのがホーキング温度がゼロである臨界高次元ブラックホールであるが、その安定性解析の方法として、初期値に対する正準エネルギーによる方法を考案した。またホログラフィック超伝導の文脈で格子構造をもつ高次元ブラックホールの一つとして、ピアンキVII型という特殊な3次元等質空間を用いて格子構造をもつ新しい高次元ブラックホール解を構成した。

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12件内10件査読有, 2件(下記11. 12. 番目の論文)査読なし)

1. “Can a stationary Bianchi black brane have momentum along the direction with no translational symmetry?”
Norihiro Iizuka, Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda: JHEP 1406 (2014) 064.
DOI: 10.1007/JHEP06(2014)064
2. “Persistent Superconductor Currents in Holographic Lattices”
Norihiro Iizuka, Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda: Phys.Rev.Lett. 113 (2014) 011601.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.011601

3. “Thermalization of boosted charged AdS black holes by an ionic Lattice”
Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda:
Phys.Rev. D88 (2013) 6, 066009.
DOI: 10.1103/PhysRevD.88.066009
4. “Superradiant instabilities in astrophysical systems”
Helvi Witek, Vitor Cardoso, Akihiro Ishibashi, and Ulrich Sperhake:
Phys.Rev. D87 (2013) 4, 043513.
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.043513
5. “High frequency limit for gravitational perturbations of cosmological models in modified gravity theories”
Keiki Saito, Akihiro Ishibashi: PTEP 2013 (2013) 013E04.
DOI: 10.1093/ptep/pts061
6. “Perturbations of slowly rotating black holes: massive vector fields in the Kerr metric”
Paolo Pani, Vitor Cardoso, Leonardo Gualtieri, Emanuele Berti, Akihiro Ishibashi: Phys.Rev. D86 (2012) 104017.
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.104017
7. “Black hole bombs and photon mass bounds”
Paolo Pani, Vitor Cardoso, Leonardo Gualtieri, Emanuele Berti, Akihiro Ishibashi: Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 131102.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.131102
8. “Singularities in asymptotically anti-de Sitter spacetimes”
Akihiro Ishibashi, Kengo Maeda:
Phys.Rev. D86 (2012) 104012.
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.104012
9. “Black hole uniqueness theorems in higher dimensional spacetimes”
Stefan Hollands, Akihiro Ishibashi:
Class.Quant.Grav. 29 (2012) 163001.
DOI: 10.1088/0264-9381/29/16/163001
10. “NR/HEP: roadmap for the future”
Vitor Cardoso, Akihiro Ishibashi, et. al.: Class.Quant.Grav. 29 (2012) 244001.
DOI: 10.1088/0264-9381/29/24/244001
11. “Topology and Uniqueness of Higher Dimensional Black Holes”
Daisuke Ida, Akihiro Ishibashi, Tetsuya Shiromizu:
Prog.Theor.Phys.Suppl. 189 (2011) 52-92.
DOI: 10.1143/PTPS.189.52
12. “Perturbations and Stability of Static Black Holes in Higher Dimensions”
Akihiro Ishibashi, Hideo Kodama:
Prog.Theor.Phys.Suppl. 189 (2011) 165-209
DOI: 10.1143/PTPS.189.165
- 〔学会発表〕(計 14 件)
1. 石橋明浩:「高次元臨界回転ブラックホールの不安定性」日本物理学会 2015 年 3 月 24 日 早稲田大学, 東京都新宿区
2. Akihiro Ishibashi: “Instabilities of extremal black holes in higher dimensions” 国際研究会「VII Black Holes Workshop」, 2014 年 12 月 19 日, アヴェイロ大学, ポルトガル共和国
3. Akihiro Ishibashi: “Instabilities of extremal black holes in higher dimensions” JGRG 国際研究会, 2014 年 11 月 14 日 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構, 千葉県柏市
4. Akihiro Ishibashi: “Turbulence in AdS” (招待講演), 研究会「AdS/CFT における乱流とカオス」2014 年 9 月 8 日, 大阪大学, 大阪府豊中市
5. Akihiro Ishibashi: “Symmetry and Momentum of Bianchi Black Holes” (招待講演) 国際研究会「New frontiers in dynamical gravity」2014 年 3 月 24 日, University of Cambridge 英国ケンブリッジ市
6. Akihiro Ishibashi: “Black Hole Predictability, Classical and Quantum” (招待講演) 国際研究「Summer Workshop on Physics, Mathematics, and All That Quantum Jazz」2013 年 8 月 8 日, 近畿大学, 大阪府東大阪市
7. Akihiro Ishibashi: “General Relativity in AdS” (招待講演) 国際研究会「KIAS-YITP joint workshop 2013 String Theory, Black Holes and Holography」2013 年 7 月 3 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市

8. Akihiro Ishibashi: “AdS Singularities”
(招待講演) 国際研究会「2nd
Mediterranean Conference on Classical
and Quantum Gravity」2013年6月14
日, ロシニ, クロアチア共和国

(2)研究分担者: 該当者なし
()

研究者番号:

9. 石橋明浩:「回転ブラックホールでのベク
トル場の増幅反射不安定性」日本物理学
学会年次大会, 2013年3月28日 広島大
学, 東広島市

(3)連携研究者: 該当者なし
()

研究者番号:

10. Akihiro Ishibashi: “Singularities in
Anti-de Sitter spaces”(招待講演)国際研
究会「Strong Gravity beyond GR」2013
年3月8日 Lisbon ポルトガル共和国

11. Akihiro Ishibashi: “Horizons in de
Sitter and Singularities in Anti-de
Sitter space”(招待講演) 国際研究会
「International workshop on String
theory and cosmology」2012年6月16
日 Pusan 大韓民国

12. Akihiro Ishibashi: “Black Holes in
Higher Dimensions 1, 2”(招待講演)
国際研究会「Asia Pacific
School/Workshop on Cosmology and
Gravitation,」2013年3月3日(講演1)
2013年3月4日(講演2), 京都大学基
礎物理学研究所, 京都市

13. Akihiro Ishibashi: “Black Holes in de
Sitter space” 国際研究会「Black Holes:
New Horizons, BRIS」2011年11月12
日, Banff International Research
Station, カナダ

14. Akihiro Ishibashi: “Perturbation
Theory of Black Holes”(招待講演)国際
研究会「Numerical Relativity and High
Energy Physics」2011年9月3日,
Madeira, ポルトガル共和国

〔その他〕

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

石橋 明浩 (ISHIBASHI, Akihiro)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 10469877