

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24年 5月30日現在

機関番号：34406
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21740195
 研究課題名（和文） LHC 実験による一般相対性理論の検証と究極理論へ向けて
 研究課題名（英文） Verification of General Relativity and towards the ultimate theory by LHC experiment
 研究代表者
 鳥居 隆（TORII TAKASHI）
 大阪工業大学・工学部・准教授
 研究者番号：00360199

研究成果の概要（和文）：
 大型ハドロン衝突型加速器実験におけるブラックホールの形成から、一般相対性理論における強重力場の検証と超弦理論の証拠をつかむために、Einstein-Gauss-Bonnet-Maxwell-dilaton 系でのブラックホール解の性質を系統的に解析した。解の存在性、時空構造、熱力学的性質を明らかにした。また、数値シミュレーションのために(n+1)分解を行い、実際に球対称時空で時間発展を追った。

研究成果の概要（英文）：
 In order to verify the strong gravitational field in General Relativity and to find some evidences of the superstring/M-theory from black hole formation in Large Hadron Collider, we analyze black hole solution systematically in Einstein-Gauss-Bonnet-Maxwell-dilaton system. The existence of the solution, spacetime structures, thermodynamical properties are investigated. Furthermore, we formulate the (n+1) decomposition for the numerical simulation and examine time evolution of the spacetime under the spherically symmetric ansatz.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

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：宇宙物理・加速器・素粒子論

1. 研究開始当初の背景

超弦理論では、私たちの宇宙は時間1次元と空間3次元を合わせた4次元よりも高い次元を持つと考えられている。そして、4次元

以外の次元（余剰次元）はプランク長（ $\sim 10^{33}$ cm）程度にコンパクト化され、観測できないとされてきた。ところが十数年ほど前から、余剰次元空間がずっと大きい（ ~ 0.1 mm）、さら

に無限に広がっている可能性が指摘されてきた。こうしたモデルでは、素粒子標準モデルの粒子は「ブレイン」と呼ばれる4次元的な膜内に閉じ込められ、重力のみが余剰次元方向に伝搬できる。また、基本的なエネルギースケールがTeV領域となっているために、系のエネルギーがTeV程度になるとその影響が現れ始め、高次元時空中の重力理論で記述されるようになる。

欧州原子核研究機構の巨大な加速器を用いた大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider : LHCと略) 実験では、素粒子標準モデルの検証、超対称性粒子の発見と並んで、ブラックホールの形成がターゲットになっている。また、高次元時空理論では宇宙項問題やインフレーションなどの宇宙物理学の未解決問題を解く研究が活発に行われるようになってきている。こうして、アインシュタインのミラクル・イヤーから100年が経過した今、再び時空に関する新たな展開が「高次元」という形で訪れようとしている。

2. 研究の目的

自然界に存在する4つの相互作用と全ての物質を統一する理論の最有力候補に超弦理論があげられる。超弦理論は未完成であるが、「すべてのものの理論」と呼ばれ、素粒子の究極理論としてその完成が物理学の一つの夢となっている。この理論に基づくと、LHCを用いた加速器実験でブラックホールが形成される。本研究ではブラックホール形成と蒸発段階でのシグナルを理論的に詳細に解析することによって、実験・理論の両方からブラックホールの性質を調べ、一般相対性理論を検証し、さらに超弦理論の手がかりを初めてつかむことを目的としている。

3. 研究の方法

LHC 実験におけるブラックホールの進化は時間順に、事象の地平面形成相、情報喪失相、蒸発相、プランク相の4つの過程で構築される。本研究では実験の結果を用いて高次元時空の証拠を掴むだけでなく、強重力場における一般相対性理論の検証、さらに超弦理論の直接的検証を目的に以下の項目を調べた。解析は解析的アプローチと数値的アプローチを相補的に用いながら行った。

(1) 超弦理論の補正を考慮した静的ブラックホール解 (解析的アプローチ)

加速器では互いに飛来する粒子が衝突してブラックホールが形成される。その後、ブラックホールは蒸発の最終段階でプランク長程度にまで小さくなり、量子重力の効果が顕著になる。これがプランク相である。しか

し、過去の研究で超弦理論の効果を入れるとプランク相まで蒸発しない可能性が単純なモデルを用いた解析で示されている。そこで、まず超弦理論の曲率補正 (ガウスボンネ項) を入れた静的ブラックホール解を求めた。以前から一般相対性理論では新たな解を構成する方法があったが、この方法を拡張して解の構成法を確立し、蒸発相後期段階における超弦理論ブラックホール解を導出した。そして、これらのブラックホール解を用いて再解析を行なった。

(2) シグナルの定量的評価と相対性理論の検証 (解析的アプローチ)

蒸発相は準定常状態に落ち着いたブラックホールがホーキング放射や超放射現象で質量と角運動量を失っていく過程で、初期段階では曲率が比較的小さいので高次元の一般相対性理論で記述されると考えられている。この際の粒子生成が実験での主なシグナルとなるので、実験的見地からは最も重要な段階である。現在、標準素粒子モデルとは異なる等方的な粒子散乱がブラックホールの証拠と考えられている。しかし、これだけではブラックホールの性質、および理論の整合性までは捉えられない。そこで、余剰次元方向に抜ける重力子とブレイン方向に放射される標準粒子の定量的な計算を行ない、LHC実験でどのようなシグナルが得られるのか、詳しい評価を試みた。しかし、実際にはそのマスター方程式が複雑な偏微分方程式であり、変数分離しないことが判明したので、数値的アプローチを利用した。

(3) 高次元一般相対性理論、および超弦理論におけるブラックホール形成の解析 (数値的アプローチ)

ブラックホール進化の最初の2つの過程はブラックホールが準定常状態に落ち着くまでの非常に複雑な過程で、解析的な取り扱いが難しい。そのためにこの過程の解析には数値的なアプローチをとった。まず初めに、高次元相対論での定式化と数値解析コードの開発を行なった。その後、超弦理論の補正として、曲率高次項 (ガウスボンネ項) とディラトン場を順に導入して同様の解析を行なった。この際にブレインの効果を取り入れるのは非常に複雑なことと、取り扱いに困難が生じることが分かったので、ブレインの無い場合を考察した。数値計算コードの開発は研究協力者である真貝寿明准教授 (大阪工業大学情報科学部、現教授) と行ない、実際に数値シミュレーションを行った。これらの研究により、ブレインの存在しないシステムであるが、LHCのブラックホールの生成から消滅

まで、全プロセスを迫ることになる。

4. 研究成果

研究の方法（項目3）にしたがって研究を行ない、以下の結果を得ることができた。

(1) Einstein-Gauss-Bonnet-Maxwell-dilaton 系での静的ブラックホール解の解析

Einstein-Gauss-Bonnet-Maxwell-dilaton 系は究極理論の最有力候補である超弦理論の低エネルギー有効理論で、いまだに困難な full theory での解析の代わりに多くの研究で用いられるものである。一般相対性理論と異なる特徴として、ディラトンと呼ばれる実スカラー場の存在が上げられる。このために解析は複雑になり、以下のようにブラックホールが真空の場合と異なる性質を持つことがわかった。解の構成、時空構造、熱力学的性質などに注目し、4次元と様々な高次元の時空で調べた。得られた特徴的な結果は以下の通りである。

①電気的に中性の場合

- ・ 宇宙項の値が正、ゼロ、負の場合を調べた。それぞれ、無限遠では漸近的に拡張されたドジッター、拡張された平坦、拡張された反ドジッターになる。
- ・ ホライズンの形状が正、ゼロ、負の曲率を持つ場合を調べた。
- ・ ある有限の大きさでブラックホール解が存在しなくなる。
- ・ ディラトン場が無い場合は2つの解系列が現れ、一つが一般相対性理論の極限を持ち、他方はガウスボンネ項を入れたことによる新しいタイプの解である。しかし、ディラトン場を導入すると、一般相対性理論の極限を持つ解のみが存在する。
- ・ ブラックホールの大きさがある臨界半径を超えると中心に存在していた特異点がゼロでない有限の半径のところに現れる。これを「fat singularity（太った特異点）」と名付けた。
- ・ fat singularity は通常の特異点よりも特異性が弱く、超弦理論の効果を取り入れることにより、特異性の少ない時空に近づく傾向にあることがわかった。

②電気的に帯電した場合

- ・ 中性の場合と同様に次元、宇宙項など様々なパラメータを用いてブラックホール解を調べた。ただし、ホライズンの形状は曲率が正のものだけを調べた。
- ・ 真空の場合と異なり、2つのホライズンが縮退した極限ブラックホール解は存在しなかった。これはディラトン場を入れたことによる特徴の一つである。

- ・ どの次元でもホライズン半径に下限が存在し、そこでは解がディラトン場の微分が発散して、時空が特異になることがわかった。

このように超弦理論におけるブラックホール解の特有の性質が明らかになった。

(2) ブラックホール蒸発相の解析

まず、研究成果(1)で求めた静的ブラックホール解の蒸発相での振る舞いを調べた。その結果、電気的に中性の場合にはブラックホールのホライズン半径が小さくなっていくと温度が発散する場合があった。帯電した場合には温度が非常に低くなるが、極限ブラックホールまでは進化せずに、特異性が現れることがわかった。蒸発の最終段階（プランク相）近くなると、時空の曲率が大きくなるので、輻射率が一般相対性理論と比べて定量的に大きくずれることが明らかになった。これらの結果は、LHC で生成されるブラックホールが蒸発相に入ったときに出すシグナルから超弦理論の証拠が得られる可能性が出てきたことを示している。

また、帯電した場合には一般相対性理論ではブラックホールの回りで超放射現象が起きることが知られているが、これを超弦理論のブラックホールでも解析してみた。しかしながら、基本となる方程式系が非常に複雑なために、どれくらいの効率でエネルギーが引き出せるかなど定量的な結果を得るに至らなかった。そのために、数値的に解析を行なうためにフォーマリズムの構築を行ない、数値コードの開発の前段階まで進めた。

(3) ブラックホール形成シミュレーションのためのコード開発

静的な解のみでなく、動的なブラックホール形成の解析のために、ADM 形式による定式化を行い、数値計算に載せる準備を行なった。

①真空の場合の定式化

まずは真空の Einstein-Gauss-Bonnet 系で一般の $(n+1)$ 次元の場合に $(n+1)$ 分解を行い、さらに初期値問題を解くための方法を開発した。

このフォーマリズムを用いて真空の場合に実際に動的なシミュレーションを行なった。5次元時空で物質場が重力崩壊して、その後、事象の地平面が形成されブラックホールになるというシナリオである。静的な解に2つの解系列があるために不安定な部分が現れ、最終段階まで計算を進めることはできなかったが、ホライズン形成の直前までは時間発展を追うことができた。

②ディラトンを含んだ系での定式化

さらにディラトン場を含んだ系におけるADM形式での定式化に着手した。方程式が非常に煩雑なものになるが、実際に(n+1)分解した式を得ることができた。コード開発までには至らなかったが、方程式の形から真空の場合と同様なシミュレーションが可能であると予想される。

(4) 問題点など

以上の研究の結果、いくつかの問題点も見つかった。

- ・ ブレインの導入の仕方
- ・ 蒸発相におけるホーキング輻射と超放射現象のシミュレーション
- ・ 回転した系での解析などである。

本研究の一つの特色としてディラトン場を考慮したことがあげられる。これまでに曲率高次項であるガウスボンネ項とディラトンを含んだ系でのブラックホール時空の解析はごくわずかしがなく、本研究のように宇宙項やホライズンの曲率、次元数などのパラメータを系統的に取り扱った解析は世界的にも類を見ない。LHCにおけるブラックホール生成の研究に限らず、AdS/CFT（反ドジッター/共形場理論対応）や様々なブラックホール物理学への応用へも今回の結果を利用することができる。

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3件)

- ① 太田信義、鳥居隆、Global Structure of Black Holes in String Theory with Gauss-Bonnet Correction in Various Dimensions, Progress of Theoretical Physics, 査読有、Vol.124, 2010, pp. 207-225, DOI: 10.1143/PTP.124.207.
- ② 太田信義、鳥居隆、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions. IV, Progress of Theoretical Physics, 査読有、Vol. 122, 2009, pp. 1477-1500, DOI: 10.1143/PTP.122.1477.
- ③ 太田信義、鳥居隆、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions. III, Progress of Theoretical Physics, 査読有、Vol. 121, 2009, pp. 959-981, DOI: 10.1143/PTP.121.959.

[学会発表] (計2件)

① 鳥居隆、Effects of the higher order term of the dilaton field and the charge to the stringy black holes、日本物理学会2010年秋季大会、2010年9月11日、九州工業大学.

② 鳥居隆、Einstein-Gauss-Bonnet-dilaton系におけるブラックホール解の大域的構造、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥居 隆 (TORII TAKASHI)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号：00360199

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし