

立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）
大学院学生研究
2018年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院 理学 研究科 物理学 専攻		
研究代表者 (2019年3月現在のものを入記)	在籍課程・学年・学生番号		氏名
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年	■ 博士後期課程 1年・18RA005B	中司 桂輔 印
指導教員	所属・職名		氏名
	理学部 教授		原田 知広 印
自然・人文・社会の別	自然	個人・共同の別	共同 2名
研究課題	Regular ブラックホール内部の時空構造とその安定性の解析		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2019年3月現在のものを入記	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏名
	研究代表者 理学研究科・物理学専攻・博士課程後期課程・1年		中司 桂輔
	共同研究者 理学研究科・物理学専攻・博士課程前期課程・2年		片桐 拓弥
研究期間	2018 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 300,000円 / (採択金額) 300,000円		

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

研究代表者は、Regular ブラックホールの蒸発に関して研究を行った。また、静的な連星ブラックホール時空中での粒子の運動の解析を行い、これまでに言及されていなかった2つのブラックホール間の特徴的な距離が存在することを明らかにし、また、このような時空中で起こる特徴的な現象として、降着円盤が2重になる可能性があることを示した。

共同研究者は、反ド・ジッター(AdS)時空に漸近するブラックホールの安定性に関して研究を行った。本研究では、ブラックホールが電場を伴う場合を考え、中性または電荷を持つ線形摂動に対する安定性を考えた。時空の境界において摂動に対して課す境界条件を変化させた場合における安定性または不安定性のタイムスケールの変化を数値的、解析的に明らかにした。

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。)

[Regular ブラックホール] [安定周回軌道] [安定性解析]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)**研究代表者**

研究代表者は、**Regular** ブラックホールの蒸発問題に関する先行研究の再現を行なった。これは、**Regular** ブラックホールは内部に曲率特異点が存在せず、ブラックホールの形成から蒸発しきるまでの過程を全て記述できることが予想されるため、近年盛んに研究が行われているという背景から研究に取り組み、先行研究の結果を再現した。

しかし、**Regular** ブラックホール自体の不安定性が指摘され、その問題を解決しようと試みたが、現時点では解決に至っていない。

研究代表者はまた、2つのブラックホールが関係して起こる現象を明らかにすることを目的として、アインシュタイン-マックスウェル理論の厳密解である、**Majumdar - Papapetrou (MP) dihole** 時空中における、粒子の周回軌道についての研究を行なった。

2015年にLIGOにより、連星ブラックホールからの重力波が観測されて以降、これまでに連星ブラックホールからの重力波は10回観測されている。また、この観測数は今後も増加して行くことが期待される。このような背景により、宇宙に存在するブラックホールの多くは、2つあるいはそれ以上の数で連星系をなして存在していることが予想される。これまで、ブラックホールの周りでの現象については、孤立系のブラックホールに関して数多くの研究がなされてきた。しかし、我々は以上に述べたような背景から、2つあるいはそれ以上のブラックホールが互いに影響し合っているような系において起こる特徴的な現象を解析するために、そのような時空中での粒子の運動を調べるという研究を行なった。

宇宙に存在する連星ブラックホールは、互いの周りを軌道角運動量を持って回転しており、重力波を放出しながら次第に近づいていき、最終的には合体して、1つのブラックホールになるという非常に動的な系をなしている。このような現実存在する連星ブラックホールのような動的な系を表した計量は数値的なものしか存在せず、さらにその動的な系の周りでの粒子の運動を解析的に予言することは難しい。そこで、我々は連星ブラックホールをアインシュタイン-マックスウェル理論の厳密解である、静的な**MP dihole**時空中でモデル化し、2つのブラックホール間の距離を変化させた場合における周りの粒子の運動を解析した。

この解析の結果、我々はブラックホール間の距離に対して、安定周回軌道のシークエンスに関連したこれまでに言及されていなかった臨界値があることを示した。また、我々は**MP dihole**時空中では、安定周回軌道のシークエンスが2つに分離することを発見した。これは、孤立系のブラックホール時空中においてはみられない振る舞いで、2つのブラックホールが存在することに起因する振る舞いである。さらに、この安定周回軌道が2つに分離するという特徴的な振る舞いは、このような系への降着問題を考えた場合、降着円盤が2重になる可能性があることを示しており、我々の目的であった、**dihole**系の周りでの起こる特徴的な現象を明らかにしたことを意味する。

研究成果の概要 つづき

共同研究者は、AdS 時空に漸近する球対称ブラックホールのスカラー型線形摂動に対する安定性について、さらにそのタイムスケールと境界条件の関係について研究を行った。AdS 時空の場合、時空全体における摂動のダイナミクスを一意に決定するためには初期条件に加えて時空の境界において境界条件を課す必要があり、摂動のダイナミクスと境界条件は密接に関連している。したがって、時空の安定性と境界条件の関係を調べることは、意義深いものである。

先行研究によって、AdS 時空において中性である有質量の線形摂動に対して課す境界条件には自由度が存在し、境界条件の選び方に起因して AdS 時空は不安定となることが示されていた。また、AdS 時空に漸近するブラックホールが電場を伴う場合に起こる、超放射と呼ばれる現象に起因して電荷を持つスカラー型線形摂動に対して不安定となりうることが知られている。これに関する先行研究では、摂動が無質量の場合に限定しており、それに伴って境界条件についても限定的なものであった。また、一般に時空の安定性の議論において用いられる準固有振動数と呼ばれる複素数の実部は、AdS 時空の場合と等しいと仮定をしていた。

本研究では、ブラックホールが電場を伴う場合に注目した。先行研究で用いられた準固有振動数に関する仮定をすることなく、解析を Newton-Raphson 法によって数値的に行った。また、摂動は有質量のものを考えた。それに伴って生じる境界条件の自由度を 1 パラメーターで表し、パラメーターを変化させることで、境界条件と安定性または不安定性のタイムスケールの関係を調べた。このパラメーターは、初期に与える摂動のエネルギーの自由度である。そして、主に以下の 3 つの成果を得た。

1. 境界条件のパラメーターに、時空が不安定となるパラメーター領域が存在することを明らかにした。この領域では、パラメーターを増加させるにつれてタイムスケールは短くなる。また、その閾値は、ブラックホールの半径に強く依存するものではない。この結果は、摂動が電荷を持つ場合と中性の場合に共通するものである。さらに、摂動の電荷とブラックホールの電荷の積の絶対値を増大させると、閾値は増加することを示した。特に、この時空の中性な線形摂動に対する不安定性は現在までに知られたものではなく、AdS/CFT 対応を通して双対な理論の新たな相転移を示唆するものであると考えられる。また、相対論的ダイナミクスの観点では、この不安定性の終状態として示唆される一般相対論の解は興味深いものである。

2. 境界条件のパラメーターが閾値を下回るとき、摂動の電荷とブラックホールの電荷の積が正でない場合に必ず時空は安定であることを明らかにした。また、パラメーターが閾値に近づくにつれて、安定性のタイムスケールが短くなることを示した。一方で、摂動の電荷とブラックホールの電荷の積が正であるとき、その値を増加させると時空が不安定となる場合があり、不安定性のタイムスケールは短くなり、安定性のタイムスケールは長くなることを示した。そして、パラメーターが閾値に近づくにつれて、不安定となりやすい傾向にあることを明らかにした。また、このパラメーター領域における不安定性のタイムスケールは、閾値を超えたときの不安定性の場合と比較して、十分小さいことを示した。さらに、この領域における全ての不安定モードは、超放射に起因することを明らかにした。

3. 境界条件のパラメーターが閾値を下回るとき、ブラックホールの半径を大きくするにつれて、安定性のタイムスケールは短くなり不安定性のタイムスケールは長くなることを明らかにした。この結果は、ブラックホールは大きい方がより安定であることを示すものである。また、ブラックホールの半径を大きくした場合、先行研究が用いた仮定は有効では無くなることを明らかにした。

※この(様式 2)に記入の成果の公表を見合わせる必要がある場合は、その理由及び差し控え期間等を記入した調書(A 4 縦型横書き 1 枚・自由様式)を添付すること。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した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。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて提出してください。)

- 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 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

なし

② 図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)

なし

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)

なし

④ その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

1. 中司桂輔、「Majumdar-Papapetrou 時空における ISCO の挙動」、第 20 回「特異点と時空、および関連する物理」研究会、九州大学西新プラザ、2019 年 1 月 12 日-14 日 (口頭、査読なし)
2. 中司桂輔、「Majumdar-Papapetrou 時空中における粒子の周回軌道」、第 3 回 若手による重力・宇宙論研究会、京都大学基礎物理学研究所、2019 年 2 月 27 日-3 月 1 日 (ポスター、査読なし)
3. 中司桂輔、「Majumdar-Papapetrou 時空中における timelike 粒子の周回軌道」、ブラックホール磁気圏研究会、愛知教育大学、2019 年 3 月 2 日-4 日 (口頭、査読なし)
4. 中司桂輔、伊形尚久、「静的な連星ブラックホール時空における ISCO の挙動」、日本物理学会第 74 回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019 年 3 月 14 日-17 日
5. 片桐拓弥、「一般化された境界条件を用いた反ドジッター時空の不安定性解析」、第 48 回 天文・天体物理若手夏の学校 2018、ロワジュールホテル豊橋、2018 年 7 月 22 日-25 日 (ポスター、査読なし)
6. 片桐拓弥、原田知広、「The instability of small charged AdS black hole」、The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan
立教大学池袋キャンパス、2018 年 11 月 5 日-9 日 (ポスター、査読なし)
7. 片桐拓弥、「Instability of small charged AdS Black hole」、第 20 回「特異点と時空、および関連する物理」研究会、九州大学西新プラザ、2019 年 1 月 12 日-14 日 (口頭、査読なし)
8. 片桐拓弥、原田知広、「Instability of small charged AdS Black hole」、日本物理学会第 74 回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019 年 3 月 14 日-17 日 (口頭、査読なし)