

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

2019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 (2020年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号			氏名	
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 2年 (学生番号: 18ra005b)			中司 桂輔 印	
指導教員	所属部局・職			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	個人	
研究課題	超高速回転天体への降着問題の解析				
研究組織 (研究代表者 ・共同研究者) ※2020年3月現 在のものを記入	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・ 博士後期課程・2年			中司 桂輔	
研究期間	2019 年度				
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 278,084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。)

本研究では超高速回転天体の周辺での粒子運動に関して研究を行い、先行研究の結果を再現することができた。また、静的な2つのブラックホール周辺での粒子運動を2つのブラックホールの質量が異なる場合も含めて網羅的に解析し、安定周回軌道の系列が2つに分離することを示した。さらに、回転しているブラックホールの事象の地平面周辺からの光子の脱出確率を解析し、ブラックホールが事象の地平面をもてる最大の回転速度の極限における脱出確率が有限の値を取ることを示した。

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。)

{ 一般相対性理論 } { ブラックホール } { 宇宙論 }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

アインシュタインにより提唱された一般相対性理論(相対論)は、惑星の運動から宇宙の膨張に至るまで、様々な観測的事実と整合的な理論であり最も広く受け入れられている重力理論である。相対論で記述されるものとして特に特徴的なものとしては、ブラックホールに代表されるようなコンパクト天体が伴う強重力場が挙げられる。近年では連星ブラックホール由来の重力波が直接観測されたり、M87 銀河中心の超巨大ブラックホール影の撮像に成功したりとブラックホールなどの強重力を伴う天体が関与する現象が観測可能となった。こういった観測的な進展はこれまでになされていなかった強い重力場の性質をより詳細に調べられるようになったことを意味する。

一般相対性理論で存在が予言される強重力を伴うコンパクト天体はブラックホールだけではない。ブラックホールの他にも超高速回転天体もアインシュタイン方程式の解として得られる。ブラックホールと超高速回転天体などのブラックホール以外のコンパクト天体を重力波や電磁波観測などで見分けられるかという問題は近年の急速な観測的進展を背景に非常に精力的に研究がなされている。

ブラックホールと超高速回転天体とを見分けるためには、これら2つの天体周辺で起こる現象に異なる性質がないかを調べる必要がある。我々は超高速回転天体周辺で起こる特徴的な現象を理論的に予言するために超高速回転天体周りでの粒子の運動に注目した。研究代表者は超高速回転体の赤道面状の粒子運動を解析した[Pugliese, et al. (2013)]の結果を再現し、周回軌道を取る粒子の角運動量とエネルギーの単調性を調べた。

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、以下の研究を行った。(研究業績①-1, 2)

2015年にLIGOによって連星ブラックホールからの重力波が直接観測されて以降、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。さらにこの数は今後、加速的に増加すると考えられている。このような背景から、宇宙に存在するブラックホールの多くは2つ以上の連星系をなしていることが自然に期待される。我々は2つ以上のブラックホールが関連して起こる特徴的な現象を予言することを目的としてそのような系の周りでのテスト粒子の運動を解析した。現実の連星ブラックホールは、2つブラックホールが軌道回転しながら重力波を放出し、これに伴いエネルギーを失うことで互いの距離が近づいていき、最後には合体して1つのブラックホールになるという非常に動的な系として存在している。これまでは連星ブラックホール時空を表す解析な表式は得られていないため、その周りで起こる現象を予言するには高度な数値計算が必要となりその定性的特徴を抜き出すのは難しかった。我々は、動的な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、静的なマルチブラックホールでモデル化し、2つのブラックホールが関連した現象を定性的に理解することを目指した。

ブラックホール周りでの現象には、テスト粒子の周回軌道が非常に重要な役割を果たす。例えば、有質量粒子の安定周回軌道のうち最も内側のものは、降着円盤の内端と考えられている。我々はまず、等質量マルチブラックホール時空中での有質量粒子の安定周回軌道を解析し、この時空では安定周回軌道の系列が2つ存在することに起因した特徴的な現象として、2つのブラックホール間の距離がある範囲のとき、この系への降着円盤が2重になる可能性があることを発見した。このような現象は孤立系のブラックホールでは見られなかった現象である。さらに我々は2つのブラックホールが異なる質量を持つ場合も解析し、マルチブラックホール時空の安定周回軌道の系列がブラックホール間の距離と質量比にどのように依存するかを網羅的に調べた。

この研究で用いた厳密解の周りの粒子の有効ポテンシャルはW型を示す。この有効ポテンシャルの形は超高速回転天体でも同様に見られる特徴で、本研究で得られた降着円盤が2重になる可能性は超高速回転天体でも見られる可能性がある。

研究成果の概要 つづき

さらに、次の研究も行った。(研究業績①-3)

ブラックホールが回転している場合そのブラックホールが事象の地平面を持つという条件から、ブラックホールの角運動量上限値(Kerr バウンド)が存在する事が知られている。つまり、ブラックホールはある値より高速では回転できないということである。これまでのクェーサーの観測や M87 銀河中心に存在する超巨大ブラックホールのジェットを観測から Kerr バウンドに近い角運動量を持つブラックホールの存在が示唆されている。我々はこの Kerr バウンドに極めて近い角運動量で回転しているブラックホール時空において、その事象の地平面付近からどれくらい光子が無限遠に到達できるか、つまりブラックホール近傍からの光子の脱出確率を計算した。

本研究では、当局的に光を放ちながらブラックホール周りで円軌道を描きながら周回しているテスト粒子を光源として考えた。テスト粒子が安定に円軌道を取れる範囲には内端が存在し ISCO と呼ばれている。この ISCO 半径はブラックホールの角運動量が Kerr バウンドに近づくにつれて事象の地平面に近づいていき、Kerr バウンドでは ISCO 半径が事象の地平面に一致する。つまり、光源として ISCO 半径を周回している光源を考え、Kerr バウンドに近い角運動量のブラックホールを考えると、事象の地平面付近を周回できるということになる。これは、Kerr バウンドに近い角運動量のブラックホールに対しては事象の地平面付近の情報にアクセスできる可能性があることを示唆している。しかし、単純に考えると事象の地平面付近から光子が無限遠まで到達できるとは考えにくい。本研究で我々は、この直感的な予想に反して極めて Kerr バウンドに近いブラックホールに対して、およそ 55%の光子が無限遠まで到達できることを示した。これは、光源の固有運動に起因した相対論的ビーミングの効果で光源の進行方向に発せられた光子は大きいガンマ因子を持つことの帰結であると考えられる。

本研究で用いた手法を超高速回転天体にも適用することで超高速回転天体の周辺からの脱出確率もブラックホールの場合と同様に計算することができる。ブラックホールの場合の振る舞いは今回の研究で得られているので、この結果と比較することで超高速回転天体の場合の特徴的な振る舞いを解析することも可能できると予想できる。

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

1. K. Nakashi and T. Igata, "Innermost stable circular orbits in the Majumdar-Papapetrou dihole spacetime", Phys. Rev. D **99**, 124033 (2019).
2. K. Nakashi and T. Igata, "Effect of a second compact object on stable circular orbits", Phys. Rev. D **100**, 104006 (2019).
3. T. Igata, K. Nakashi, and K. Ogasawara, "Observability of the innermost stable circular orbit in a near-extremal Kerr black hole", Phys. Rev. D **101**, 044044 (2020).

② 図書 該当なし

③ シンポジウム・公開聴講会の開催なし

④ その他

(1) 他大学におけるセミナー等

1. 京都大学におけるセミナー発表 (京都大学, 2020 年 1 月)
2. 大阪市立大学におけるセミナー発表 (大阪市立大学, 2020 年 1 月)

(2) 国内学会での発表

1. 中司桂輔, サマースクール「コンパクト天体基礎講座」, 福山市生涯学習プラザ, 2019 年 8 月 (ポスター発表, 査読なし)
2. 中司桂輔, 第 21 回「特異点と時空、およびそれに関連する物理」研究会, カレッジプラザ講堂秋田, 2019 年 12 月 (口頭発表, 査読なし)