

氏名	おおがみ たかゆき 大神 隆幸
授与学位	博士(理学)
学位記番号	理工博甲第733号
学位授与年月日	平成30年3月16日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) 自然科学基盤系専攻
学位論文題目	ブラックホールとブラックホール擬似天体の観測的検証に対する理論研究 (Theoretical study for observational tests of black holes and quasi-black hole objects)
論文審査委員	主査 山口大学 教授 坂井 伸之 山口大学 教授 白石 清 山口大学 教授 藤澤 健太 山口大学 助教 元木 業人 山口大学 助教 齊藤 遼

【学位論文内容の要旨】

現在、アインシュタインの提唱した一般相対性理論から予言されたブラックホールを多くの研究者があらゆる手段を使って観測しようとしている。しかしブラックホール自身は光をも飲み込む天体であるため、直接観測することが難しい。そこでブラックホール周辺の歪んだ時空によって引き起こされる物理現象を利用する方法が用いられている。例えば一般相対性理論では時空が波のように伝わる重力波の存在が予言されていたが、2015年9月14日にアメリカのLIGOがブラックホール連星合体による重力波の検出を発表した。他には電磁波を用いた観測にマイクロレンズ効果による増光現象を捉える手法がある。現在では暗くて直接観測が難しい天体の探査にこの現象が応用されている。また、強重力下での光学的な現象としてブラックホールの影(シャドウ)ができることが予言されている。現在はこの影を直接撮像することを目的としたサブミリ波VLBIプロジェクトである Event Horizon Telescope が進行中である。

これらの現象はブラックホール以外の天体でも引き起こされるということが理論的に示されており、そのような天体を我々はブラックホール擬似天体と呼んでいる。私はその中でもグラバスター、エリスワームホールそしてブレーンワールドブラックホールの三つに焦点を当て、これらの天体によるマイクロレンズとシャドウを研究した。ブラックホール擬似天体による観測的帰結を理論的に予測しておくことで、観測結果がブラックホール由来のものかまたは擬似天体由来のものかを判断する基準の一つになる。そこで、本論文ではブラックホール擬似天体とブラックホールにおけるマイクロレンズとシャドウのそれぞれの特徴を発見することを目的とし、それらが観測的に判別可能であるのかどうかを議論した。

まず、球対称摂動に対して安定で光の不安定円軌道を持つようなグラバスターモデルを仮定した。この天体の周囲で光を放ちながら落下するダストを考え、相対論的な流体力学方程式の球対称・定常解を得た。さらに、このダストの分布と運動を用いて光の輸送方程式を数値的に解くことで、直接撮像で得られるであろう強度分布を得た。特に、光の不安定円軌道を持つモデルでは、像に明るいリング状構造が現れた。また、グラバスターに十分な量のダストが降り積もった場合は、リング状の像の内側が明るくなり、シュバルツシルトブラックホールとの判別が可能になることを示した。

次に、観測者側の世界にある星間物質がエリスワームホールを通過してあちらの世界にわたる状況を仮定した。まず本研究ではトイモデルとして、球対称・定常に落下するダストを考えた。グラバスターの時と同様の手順で像を描いたところ、ワームホールの向こう側の世界からのダストの放射も観測者に届くため、明るいリング状の像の内側が外側よりも明るくなった。さらに、ダストの運動に軸対称を仮定し、球対称からの摂動解を得た。この解を用いて得られた像は、回転の効果によるリング状構造の形の変化だけでなく、内側の領域に複雑な模様を示した。その模様はワームホールの向こう側の世界のダ

ストの密度分布を反映していた。球対称モデルでリングの内側が明るくなることや、軸対称モデルで複雑な模様が現れることは、どちらもあちらの世界の光源からの放射によるものである。ブラックホールに落下した物体からの放射は観測者に届くことはないため、この結果はワームホール特有の現象を示したものだと言える。

【論文審査結果の要旨】

ブラックホールなど光を発しない天体の存在を確認するために、どのような観測をすればどのような結果が得られるか、理論的に明らかにする必要がある。本研究では、アインシュタイン方程式の解として理論的に許される未発見天体のうち、ワームホール、5次元ブラックホール及びグラバスター（内側が真空のエネルギーのコンパクト天体）という、観測的にブラックホールと区別しにくい3種類の天体を観測的に検証する方法を論じた。

一般に、光を発しない天体の観測方法としては、後方に別の天体が通過する時に起こる増光現象（マイクロレンズ現象）と、光を発する星間ガスが周囲にある時の像（シャドウ）がある。観測手法としてはこの2つを想定した。

まず、通り抜け可能なワームホールの1つであるエリスワームホールについて、星間ダストモデルとして球対称及び回転軸対称の定常解を求め、そのシャドウを計算した。その結果、明るいリングが現れるという標準的ブラックホールと共通の特徴が得られる一方で、内側が明るくなることや回転による特徴的な模様が現れるという固有の特徴が示された。この計算は発表者が一人で行った。なお、この研究成果のうちの球対称ダストモデルに関する部分は博士前期課程に行ったものである。

次に、5次元ブラックホールについては、マイクロレンズ現象とシャドウの両方の解析を行った。その結果、マイクロレンズについては増光の前後に小さい減光が起こるというワームホールに近い特徴が、シャドウには標準的ブラックホールに近い特徴が現れた。したがって、マイクロレンズとシャドウの両方の観測によって初めて、5次元ブラックホールの存在が確認できるという結論に至る。この計算は主にM2の南里君、卒業生の福重君、高村君が行い、発表者は計算方法を指導するという形で貢献した。

最後に、グラバスターのシャドウについて解析を行った。その結果はワームホールと類似した特徴を示した。したがって、シャドウ観測によってブラックホールと識別ができる一方で、ワームホールとの識別は難しいことになる。ただし、グラバスターとワームホールの識別はマイクロレンズによって可能である。この計算は発表者が一人で行った。

関連する先行研究に対する本研究の主な特徴は以下の通りである。

- 1) シャドウに関する先行研究は輪郭のみであるのに対し、本研究では強度分布を計算して示した。
- 2) 1つの天体の1つの観測手法を想定した研究に留まらず、標準的ブラックホールを含む4種類の天体について、2つの観測手法による識別可能性とそれに基づいた検証方法を総括的に論じた。

本研究成果は今後、ブラックホールと思われる天体が確かにブラックホールであるか、或いは新天体の発見であるかを検討する上で重要な役割を果たすと思われる。

公聴会での発表は非専門家にもわかるように工夫され、その結果、学生から多数の質問が出された。主な質問内容は、用語の意味、状況設定（仮定）とその適用範囲、解析結果の詳細とその解釈、今後の研究課題に関するものであった。いずれの質問に対しても、発表者からの的確な回答がなされた。

以上により本研究は、十分な独創性と学術的意義があり、博士（理学）の論文に値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、関連論文の発表状況は以下の通りである。（関連論文 2編、参考論文 0編）

1) Takayuki Ohgami and Nobuyuki Sakai, Wormhole shadows, PHYSICAL REVIEW D 91, 124020 (2015)

2) Takayuki Ohgami and Nobuyuki Sakai, Wormhole shadows in rotating dust, PHYSICAL REVIEW D 94, 064071 (2016)