

氏 名 塚本 直樹

学位の種類 博士(理学)

報告番号 甲第352号

学位授与年月日 2013年9月30日

学位授与の要件 学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)  
第4条第1項該当

学位論文題目 Search for exotic gravitating objects with gravitational lensing  
(重力レンズを用いたエキゾチックな天体の探索)

審査委員 (主査) 小林 努  
原田 知広  
亀田 真吾

# 1. 論文内容の要旨

一般相対論は、水星の近日点移動、太陽による光の曲がりなど多くの実験・観測事実と整合的な、最も成功した重力理論である。一般相対論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式の解として、ブラックホールやワームホールなどの特異な天体を表すものが存在し、これらは非常に興味深い研究対象となっている。このような特異な天体はアインシュタイン方程式の単なる数学的な解であるというだけでなく、現実の宇宙に本当に存在するのだろうか。ブラックホールに関しては、さまざまな観測事実から現実中存在することが強く示唆されている。一方、ワームホールに関しては、その存在を観測的に検証する手段さえこれまで満足に議論されていなかった。申請者らは、重力レンズ観測によりワームホールを他の天体と区別し同定する方法を理論的に検討し、その結果を本論文において提示した。

論文では、導入のあとに重力レンズの基礎方程式が紹介される。天体などの重力源により時空が歪むと、その周辺を通過する光線が曲げられるが、この現象を重力レンズという。球対称ブラックホールや通常为天体が重力レンズを引き起こす場合の光の曲がり角など、これまでに知られている基礎的事項が要約されている。次に、ワームホールについての説明がなされる。ワームホールとは、端的に、ふたつの漸近的平坦な領域をつなぐような時空構造のことである。まず **Morris-Thorne** クラスと呼ばれる一般的な球対称ワームホール時空についての解説がなされたのち、その中でも最もシンプルな厳密解である **Ellis** ワームホール解が提示される。そして、**Ellis** ワームホール周辺を通過する光線の曲がり角が計算される。以上の準備がなされたあと、重力が弱いという近似のもとで、ブラックホールや **Ellis** ワームホールを含む一般的な球対称天体による重力レンズ現象が、特に像の個数と増光率に力点を置きながら精査される。続いて、逆に重力が強い極限において、光線が大きく曲げられる場合の調査がなされる。そして、これらの解析を総合し、重力レンズを利用してブラックホールや通常为天体と **Ellis** ワームホールを観測的にどのように区別しワームホールを同定するのか、という議論がおこなわれる。最後に本論文全体の結論が与えられる。

申請者は本論文によって次のような成果を得た。申請者らは、ワームホールの存在をどのような宇宙物理学的観測によって検証可能か、という問題意識のもと、重力レンズ現象に着目し、ブラックホールや通常为天体とワームホールとを観測的に区別する新しい手段を以下のようにふたつ提唱した。

第一に、申請者らは一般的な球対称時空に適用可能な重力レンズ方程式の定式化をおこなった。一般的な定式化により、質点近似可能な天体、特異等温球と呼ばれる種類の天体に加えて、Ellis ワームホールが引き起こす重力レンズ現象をも包括的に取り扱うことが可能となった。この重力レンズ方程式は代数方程式であり、その実数解を求めることで、像の個数と各々の増光率を計算することができる。増光率を符号付きで足し合わせた量は、質点近似可能な天体がレンズ源の場合にはレンズ系の配置に依らず常に 1 となるが、申請者らは、ワームホールがレンズ源の場合には、この量が必ず 1 より小さくなることを発見した。そして、符号付き増光率の和の値は、通常为天体やブラックホールとワームホールとを区別することを可能にする有用な観測量である、という結論を導いた。

第二に、申請者らは、光線が天体近傍の強重力場領域を通過して大きく曲げられる状況の解析をおこなった。特に、光源、レンズ源、観測者が同一直線上に並んだ場合にできるリング状の多重像に着目した。そして、いちばん外側の像とその内側にできる像とを観測することができれば、そのサイズによりレンズ源がブラックホールなのかワームホールなのかを区別可能であることを示した。

## 2. 審査結果の要旨

近年の宇宙論的・天文学的観測技術の進歩は著しく、精細な観測成果を利用して宇宙物理学の理論を検証することが可能になっている。このような観測にもとづいて、例えば一般相対論がその存在を予言するブラックホールは、実際に銀河中心に存在することが確実視されている。また、宇宙の構成要素の大半が、ダークマター・ダークエネルギーという未知の(「エキゾチックな」)物質からなることも判明している。提出論文の主題であるワームホールは、一般相対論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式の解として知られており、ふたつの漸近的平坦な領域をつなぐような時空構造を表している。ワームホールは、現在までのところ実在しているか否かは不明であるが、ある種のダークエネルギーのような「エキゾチックな」物質により形成されると考えられている。提出論文では、このようなワームホールを観測的に他の天体と区別、同定するための理論的基盤が提示され、将来観測による検証可能性が議論されている。上で述べたような近年の状況から判断して、本研究の内容は非常に重要でかつ時宜にかなったものであると言える。

提出論文では、これまでほとんど議論されてこなかったワームホールの観測的検証に関して、重力レンズ現象を利用したふたつの新たな手法が提案されている。申請者はまず、レンズ源の作る弱い重力場で光線が曲げられ、二重像ができる場合を考えて、各々の像の符号付き増光率の和に注目した。そして、質点近似可能な通常为天体がレンズ源のときにはレンズ系の配置に依らずこの符号付き増光率の和が常に 1 であるのに対して、ワームホールがレンズ源のときにはこれが 1 より小さくなることを示し、その事実により他の天体とワームホールとを区別可能であることを指摘した。続いて申請者は、光源、レンズ源、観測者が同一直線上にある場合に強い重力場により光線が大きく曲げられるとできる、リング状の多重像の解析をおこなった。そして、リング状の多重像のサイズにより通常为天体とワームホールとを区別可能であることを発見した。このような明確な違いの現れる観測量を見出したのは、申請者の独自性・先見性の顕れであり、高く評価される。実際の観測に関しては観測技術のさらなる進歩が待たれるが、申請者を中心とする理論研究グループは、観測グループとの連携を常に意識しており、今後は理論・観測が両輪となってワームホール探査の研究が進展することが大いに期待される。

この様に、申請者はワームホール探査の理論的側面に関して重要な貢献をおこなった。これは、申請者の一般相対論ならびに宇宙物理学の知識のみならず、幅広い物理学の知識の蓄積、他の研究者と協力して研究を進めたり観測グループと議論をおこなったりすることのできるコミュニケーション能力、問題を処理する技術的な能力および優れた分析力と洞察力によるところが大きい。提出論文は、申請者を筆頭著者とする二編の論文にもとづいて新たに書き下されたものである。もともになったこれらの論文はいずれも査読を経て国際的な学術誌にすでに掲載されている。提出論文では、現在の当該分野の研究状況を正確に把握した上で、独自の着眼点にもとづいた計算・解析を実行し、それが明快で興味深い結論に結実している。しかも、その一連の過程すべてを主導的におこなっている。こうした点は申請者が研究者として十分な研究能力を備えていることを示している。また、本研究において申請者が立教大学研究活動行動規範を遵守してきたことを確認した。

2013年7月5日13時30分より、本論文に関する公聴会が開かれた。申請者は論文内容を明解に説明し、その後の質疑に対する応答も満足すべきものであった。