

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654082

研究課題名(和文)ワームホールの観測的検証

研究課題名(英文)Observational tests of wormholes

研究代表者

阿部 文雄(Abe, Fumio)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：80184224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来仮想的な理論研究の対象でしかなかったワームホールを観測的に検証する手段の研究を行い、さらに実際に探索を実施してその存在量に制限を付けることを目指した。さらに、こうした探索の理論的意義や存在可能性など、ワームホール検証を前提とした研究を前進させることを目指した。このため、2回の研究会を実施し、さらに学会などの場を利用して理論・観測の研究者間の交流を深め、議論を行った。その結果、複数の方法が考案され、実際に存在量の上限を求めることに成功した。また、ワームホールの安定性など関連した研究も進展した。一般の人の関心も高く、講演会などを通じて一般社会人との交流ができたことも大きな成果である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to find methods of observational tests of wormholes. Until recently, wormholes are purely hypothetical objects introduced by the General Theory of Relativity. There was no restriction on the abundance. We have held two workshops to discuss the methods and meaning of the tests of wormholes. There have been amazing progress. Several new methods have been proposed. The n three attempts have been done to search wormholes. Until now, no candidate has been found. The limits have been imposed on the cm size wormholes and galactic scale wormholes. A preliminary limit has been imposed on the planet size wormhole. These results implies wormholes are not abundant as stars. There were several activities on the stabilities of wormholes. These studies show the wormholes are unstable and hard to survive cosmological age.

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 相対論 重力 宇宙論

### 1. 研究開始当初の背景

ワームホールは、一般相対性理論から導かれる、遠く離れた時空間をつなぐトンネルの様な解である。しかし、ワームホールは不安定なものと考えられ、放っておけばつぶれて行くと考えられている。1988年の Morris & Thorne による有名な論文により、負の圧力を持つエキゾチック物質があればワームホールがつぶれて行くのを妨げることができることとされ、さらにある種のワームホールは人間が通過可能であることが示された。このため、タイムマシンやスペーストラベルなどの可能性が議論され、カール・セーガンのコンタクトなどの SF の題材としても利用されている。また、マルチバース宇宙論では、枝分かれした子宇宙と親宇宙が最初はワームホールを通じて連結されるとされている(佐藤勝彦、「インフレーション宇宙論」ブルーバックス、講談社(2010))。一方、最近の宇宙論で大きな問題となっている暗黒エネルギーとエキゾチック物質は、同じ性質を持っていると考えられ、関連が議論されている。

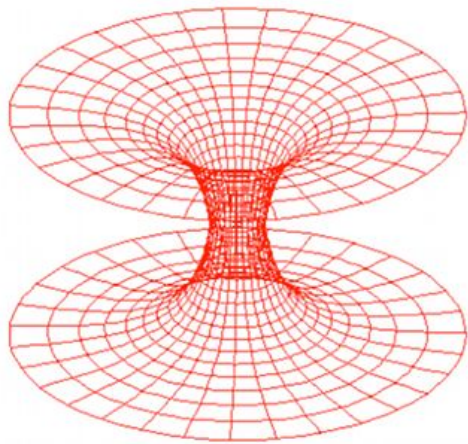


図1 ワームホールのイメージ図。図中上と下は遠く離れた時空を表し、ワームホールはスロートと呼ばれるくびれた部分を通してこの間を連結する。

しかし、実際にこうしたワームホールが存在するかどうか、検証する手段があるのかもわかっていなかった。1995年に Cramer らによって、ある種のワームホールは負の質量の重力レンズ効果を示す可能性が示唆され、重力マイクロレンズ効果を用いた探索法が提案された。しかし負の質量とワームホールの関係は明らかでは無かった。エリスワームホールの重力マイクロレンズ効果(Abe, 2010)は、通常の重力レンズ効果と異なり減光することが判明し、これを使った探索法が提案され、観測的検証の可能性が議論されるようになった。

### 2. 研究の目的

上記の様に、最近までワームホールをめぐる議論は、あくまで理論的なものに限られ

ていた。タイムマシンやエキゾチック物質など理論的な論争は加熱する一方、実験・観測による研究は行われず、実証科学としては不健全なままの状態が続いていた。こうした状況を受けて、ワームホール検証の手法を検討し、実際に探索を実施して存在量に制限を付けることを目的として本研究を開始した。また、安定性など存在の可能性を含めた検証の意義も検討することにした。

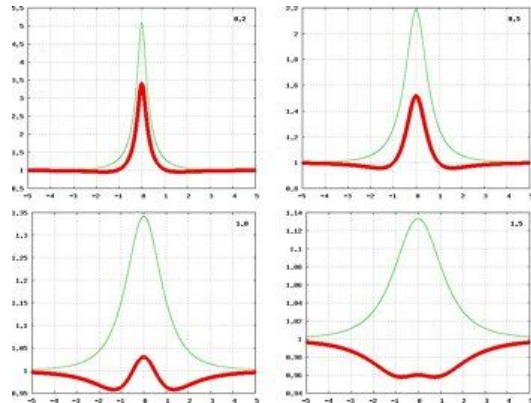


図2 エリスワームホールの光度曲線(Abe, ApJ 725, 787, 2010)。ピークの前後でわずかに減光する。

### 3. 研究の方法

従来研究者の多くは、ワームホールは純粋に理論的な研究対象であり観測的な研究の対象とは考えていなかった。このため、ワームホールの理論研究者や相対性理論の研究者、観測研究者との研究交流を行い、可能性について議論する必要があった。本研究では、国内外のワームホール研究者や観測に従事している研究者、観測データの解析を行っている研究者などを集めた研究会を2回実施した。外国からは、ワームホール研究者として有名なビクトリア大学・Matt Visser 教授、上海普通大学・Sean Hayward 教授、安定なワームホール解を発見した Jutta Kunz 教授、さらにワームホールと同様なエキゾチックな宇宙論的天体である原始ブラックホール研究者 Ilia Musco 博士、観測データから原始ブラックホールの存在量に制限を求めた A. M. Cieplack 博士が参加した。また、学会や国内外の研究集会で講演を行い、ワームホール検出の可能性やその可能性・意義などについて議論した。また、すでに取得済みのマゼラン雲方向の重力マイクロレンズ観測のデータ解析を実施し、実際にワームホール探索を行った。

### 4. 研究成果

一旦こうした検出の可能性が示されると、これまであまり検討されていなかっただけに、次々と新しいアイデアが生まれた。まず、Toki 他によりアストロメトリー(位置天文)法による検出法が考案された。星のイメージの中心位置を精密に測定して、その動きを求めるものであり、GAIA や JASMIN などの

位置天文衛星の観測が期待される Tsukamoto 他によりエリスワームホールのアインシュタインリングシステムの直接撮像による検出法が提案された。通常のアインシュタインリングと相対論的リングの大きさの比がブラックホールとワームホールで異なることを利用する。近い将来、射手座 A\* などのブラックホールの陰 (Black Hole Shadow) を地球スケールの VLBI で撮像する計画があり、これらによる観測が期待される。さらに、エリス以外のワームホールの重力レンズ効果の研究も行われ、Kitamura らによってこうしたエキゾチックな重力レンズでは減光が普遍的に存在することが明らかとなった (図 3)。

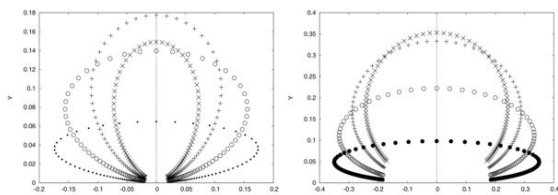


図 2 アstrometry による位置のずれ。左がエリスワームホール、右が通常重力レンズ。

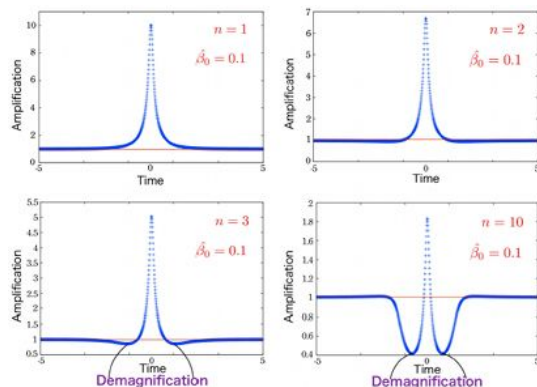
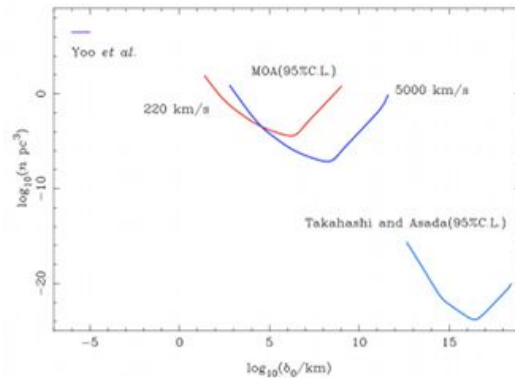


図 3 様々なワームホールのモデルの光度曲線。減光 (Demagnification) は普遍的に存在する (Kitamura, Nakajima, Asada, PRD 87, 027501, 2013)。

また、Yoo らの研究によりワームホールの重力レンズ効果によりガンマ線バーストのスペクトルに干渉を生じる (femto lensing) ことが明らかとなり、実際にガンマ線バーストのデータを使って cm サイズのエリスワームホールの存在量に制限が付けられた。さらに、Takahashi らによりスローンデジタルスカイサーベイの画像データに異常なレンズ効果が見られないことから、銀河サイズのワームホールの存在量に制限が付けられた。また、最終結果ではないがマゼラン雲のマイクロレンズ観測から惑星サイズのワームホール存在量に制限が得られた。結論には早い、これまでの結果からはワームホールの存在量は太陽近傍の星密度ほど高くは無さそうである。

また、ワームホールの安定性に関する研究も進み、Torii, Shinkai らにより高次元のワームホール安定性の研究から、これらのワームホールが不安定であることが示された。仮に、宇宙初期に生成していたとしても現在まで生き残っていることは困難と考えられ



る。

図 4 ワームホール存在量の制限 (鶴見、名古屋大学 2013 年度修士論文)

ワームホールは、タイムマシンやスペーストラベルなどの可能性が議論され、一般の人にも関心が高い。本研究期間中、一般の人向けの講演会を行い、一般向け科学雑誌ニュートンの記事での研究紹介など研究成果の発信ができたことは、特に意義深いことだったと言える。

## 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 8 件、全 47 件)

1) Tomohiro Harada, Chul-Moon Yoo and Kazunori Kohri, 'Threshold of primordial black hole formation', Phys. Rev. D 88(8), 084051 (10/2013) (10pp). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.88.084051

2) Chul-Moon Yoo, Tomohiro Harada and Naoki Tsukamoto, 'Wave Effect in Gravitational Lensing by the Ellis Wormhole', Phys. Rev. D 87(8), 084045 (4/2013) (9pp). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.084045

3) Naoki Tsukamoto and Tomohiro Harada, 'Signed magnification sums for general spherical lenses', Phys. Rev. D 87(2), 024024 (1/2013) (6pp). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.024024

4) Naoki Tsukamoto, Tomohiro Harada and Kohji Yajima, 'Can we distinguish between black holes and wormholes by their Einstein ring systems?', Phys. Rev. D 86(10), 104062 (11/2012) (6pp). 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.86.104062

5) Sumi, T., Abe, F. 他, 'The Microlensing Event Rate and Optical Depth toward the

Galactic Bulge from MOA-II, ApJ, 778, 150, 1-15, 2013. 査読有

DOI:10.1088/0004-637X/778/2/150

6) Abe, Fumio 他, Extending the planetary mass function to Earth mass by microlensing at moderately high magnification, MNRAS, 431, 2975-2985, 2013. 査読有

DOI:10.1093/mnras/stt318

7) Toki, Yukiharu, Kitamura, Takao, Asada, Hideki, Abe, Fumio, Astrometric Image Centroid Displacements due to Gravitational Microlensing by the Ellis Wormhole, ApJ, 740, 121, 1-8, 2011. 査読有

DOI:10.1088/0004-637X/740/2/121

8) Sumi, T., Abe, F. 他, Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing, Nature, 473, 7347, 349-352, 2011. 査読有

DOI:10.1038/nature10092

〔学会発表〕(計 14 件、全 41 件)

1) 阿部文雄(名古屋大学), 重力マイクロレンズによる原始ブラックホール探索法, 日本天文学会 2012 年秋季年会, 大分大学, 2012 年 9 月 20 日

2) 阿部文雄, 他 MOA 共同研究, 重力マイクロレンズを利用した原始ブラックホールの探索, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学, 2013 年 9 月 22 日

3) 阿部文雄, ワームホールの観測的検証法とその問題点, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 13 日

4) Fumio Abe, Wormhole hunting: methods and problems, The Workshop on Theories and Possibilities of Observations of Wormholes, Rikkyo University, 28 October 2012.

5) Fumio Abe, Wormhole and Primordial Black hole searches in MOA II, The workshop on wormholes and primordial black holes: theories and observations, 25 November, 2013.

6) Fumio Abe, New calculation method of multiple gravitational lensing system, 18th International Conference on Gravitational Microlensing, Santa Barbara, 21 January, 2014

7) Fumio Abe, New LMC observation strategy by MOA, 1st Doha International Astronomy Conference - Gravitational Microlensing -, 11 February, 2013

8) Fumio Abe, MOA II gravitational microlensing survey, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics, 27 July 2011

9) Fumio Abe, Wormhole hunting : methods and problems, The workshop on theories and possibilities of observations of wormholes, 28 October, 2012

10) Fumio Abe, Wormhole and Primordial Black hole searches in MOA II, WH and PBH Workshop at Nagoya University, 25 November, 2013

11) Fumio Abe, MOA II 1.8 m telescope and future GW follow-up observation, 2nd Symposium - New Development in Astrophysics through Multimessenger Observations of Gravitational Wave Sources, Tokyo Tech, Tokyo, 14 Jan 2014

12) Tomohiro Harada, ``High-velocity collision of particles around a rapidly rotating black hole'', J. Phys.: Conf. Ser. 484 (2014) 012016, as a contribution to ``Vishva Mimansa: An Interpretative Exposition of the Universe'', the Proceedings of the 7th International Conference on Gravitation and Cosmology 14-19 December 2011, Goa, India, ed. B. S. Sathyaprakash and Tejinder Singh (refereed)

13) Tomohiro Harada, ``High-velocity collision of particles around a Kerr black hole'', in the Proceedings of the 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 5-8 Nov, 2013, Hirosaki University, Hirosaki, Japan, <http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/jgrg/proc/JGRG23>

14) Tomohiro Harada, ``High-velocity collision of particles around a Kerr black hole'', in the Proceedings of the 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 26-29 Sep, 2011, Tohoku University, Sendai, Japan, pp. 84-87, <http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/jgrg/proc/JGRG21.pdf>

〔その他〕

一般向け解説

協力: 阿部文雄, 原田知広, 福江純, 「時間とは何か」(監修: 福江純, ニュートンムック Newton 別冊), (ニュートンプレス、東京、2013 年 5 月), 98 頁-101 頁

協力: 阿部文雄, 原田知広, 福江純, 「ブラックホールとタイムトラベル「時空の穴」をめぐる最新理論」(監修: 福江純, ニュートンムック Newton 別冊), (ニュートンプレス、東京、2011 年 5 月), 124 頁-129 頁  
原田知広、木村匡志, 「ブラックホールは天然の粒子加速器になるか?」, 日本物理学会誌第 68 巻第 2 号 102 頁, (日本物理学会、東京、2013 年 2 月)

協力: 嶺重慎、原田知広、三好真, 「ブラックホールって本当にあるの? 確証なき「黒い穴」その観測史と最新観測法」, ニュートン 2012 年 5 月号 (ニュートンプレス、東京、2012 年 5 月)

協力: 阿部文雄、原田知広、福江純, 「時空のトンネル」は実在するか?」, ニュートン

ン 2011 年 4 月号 18 頁 (ニュートンプレス、  
東京、2011 年 4 月)

一般向け講演会

阿部文雄, 「宇宙のトンネルを検証し、“光速”を越える！」, 豊田市商工会議所、2012 年 2 月 3 日

阿部文雄, 「宇宙のトンネルを検証し、“光速”を越える！」, 豊川市商工会議所、2012 年 8 月 6 日

阿部文雄, 「解説: ワームホールの見つけ方」, 立教大学、2012 年 10 月 27 日

阿部文雄, 「『時空の抜け道』ワームホールは実在するか？」

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阿部 文雄 (Abe Fumio)

名古屋大学太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号: 80184224

### (2) 研究分担者

原田 知広 (Harada Tomohiro)

立教大学理学部・准教授

研究者番号: 60402773