

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540252

研究課題名（和文） 重力理論の宇宙論的テストのための定式化および検証

研究課題名（英文） Formulation for a cosmological test of gravity theories

研究代表者

浅田 秀樹 (ASADA HIDEKI)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50301023

研究成果の概要（和文）：

- 1) 正確な重力波観測は、重力理論の検証にとって有用と考えられている。本当に、重力波観測における理論予測からのずれは、一般相対性理論の綻びといえるのか？これに対して、標準的な理論モデルからの波形と似ているが、微小なずれを与える天体現象があり得ることを数値的と解析的な方法の両方で示した (Torigoe, Hattori, Asada, PRL 2009, Asada PRD 2009)。つまり、話はそう単純ではなく、注意深い解析を行わなければ、修正重力理論の探索とは言えないことが明らかとなった。
- 2) 重力マイクロレンズを用いた修正重力理論検証のための定式化を行い、簡単な理論モデルでの数値的検証を行ない、その有用性を示した (Asada, PTP 2011)。
- 3) 重力理論の観測的なプローブとして多体系における相対論的効果を検討する過程で、相対論的な3体系の特殊解ならびに興味深い性質を発見した (Yamada, Asada, PRD 2010, 2011, Ichita, Yamada, Asada, PRD 2011)。
- 4) 相対論的な重力理論は「非自明なトポロジー」をもつ時空を許す。代表例のひとつが、エリスワームホール（いわゆる時空トンネル）であり、それを観測的に発見もしくは存在確率に制限を課す天体物理的な方法を提案した (Toki, Kitamura, Asada, Abe, ApJ 2011)。

研究成果の概要（英文）：

- 1) Gravitational wave observations are absolutely useful for tests of gravitational theories. Can any deviation from theoretical predictions be really an experimental evidence? The answer is yes and no. We showed both numerically and analytically that some astrophysical sources produce waveforms quite similar to the standard form but with a small difference (Torigoe, Hattori, Asada, PRL 2009, Asada PRD 2009). We should note that a very careful data analysis is thus needed to probe modified gravity theories via gravitational wave observations.
- 2) A formulation for gravitational microlensing by modified gravity theories was presented with numerical tests about a simple model (Asada, PTP 2011).
- 3) On the way of studying many-body interactions in relativistic gravity, we found particular solutions and their interesting properties for the relativistic three-body problem (Yamada, Asada, PRD 2010, 2011, Ichita, Yamada, Asada, PRD 2011).
- 4) General relativity admits a non-trivial topology of a spacetime. We proposed an observational method of detecting (or placing an upper bound on) an Ellis wormhole that represents a traversable wormhole (Toki, Kitamura, Asada, Abe, ApJ 2011).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	600,000	180,000	780,000

2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

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：相対論・重力（理論）

1. 研究開始当初の背景

宇宙物理学における3大問題は、(1)「宇宙初期（インフレーション）」(2)「現在の宇宙の加速度的膨張（ダークエネルギー）」(3)「超高エネルギー宇宙線」であり、古典重力理論としての一般相対性理論の修正を考える必然性が高まっている。

2. 研究の目的

重力・宇宙モデルの近似的な表現法の分析および検討を行なう。観測への応用を試みる。

3. 研究の方法

小スケール（太陽系など）での弱場での近似と、大スケール（宇宙論）への拡張を検討する。そして、宇宙観測への応用を考える。

4. 研究成果

主な研究成果は以下の4点である。

1) 正確な重力波観測は、重力理論の検証にとって有用と考えられている。本当に、重力波観測における理論予測からのずれは、一般相対性理論の綻びといえるのか？これに対して、標準的な理論模型からの波形と似ているが、微小なずれを与える天体現象があり得ることを数値的と解析的な方法の両方で示した (Torigoe, Hattori, Asada, PRL 2009, Asada PRD 2009)。つまり、話はそう単純ではなく、注意深い解析を行わなければ、修正重力理論の探査とは言えないことが明らかとなった。具体的には、質点3個が正三角の頂点に位置する、いわゆるラグランジュ解を考察した。数値的と解析的の両方の手法で、発生する重力波の波形が連星からのものとほとんど同じ形であることを示した。さらに興味深い点は、重力波観測での重要量であるチャープ質量の推定では、両者を区別できないことである。重力波天文学における両者の縮退を解くには、高精度の観測（つまり多重極モーメントを含む）が必要であることが判明した。なお、前者の論文では、ラグランジュ解以外の3体問題の特解も用意して、数値的に重力波の波形を計算した。それによれば、ラグランジュ解以外の波形は明らかに異

なる特徴を示すので、観測的に識別することが容易であることも指摘した。

2) 重力マイクロレンズを用いた修正重力理論検証のための定式化を行い、簡単な理論モデルでの数値的検証を行ない、その有用性を示した (Asada, PTP 2011)。特に、通常のシュバルツシルト型（つまり、距離の逆数）の重力ポテンシャルに対する微小な補正は、逆2乗の場合を除いて、必ず増光率に変化をもたらすことを示した。逆に、逆2乗型の補正の場合のみ、増光率に変化が生じないことを証明した。ひとつの例は、ライスナー・ノルドシュツルム解（電荷入りのブラックホール）である。

3) 重力理論の観測的なプローブとして多体系における相対論的效果を検討する過程で、相対論的な3体系の特殊解ならびに性質を発見した (Yamada, Asada, PRD 2010, 2011, Ichita, Yamada, Asada, PRD 2011)。これらの論文では、いわゆる「オイラー解」と「ラグランジュ解」の一般相対論的な拡張を与えた。ニュートンの万有引力における3体問題の特解のうち、3個の質点が常に直線上に並ぶものがオイラー解であり、常に正三角の頂点上に位置するものがラグランジュ解である。特に、うち1個の質点がゼロ質量である「制限三体問題」においては、ラグランジュ解はいわゆる「ラグランジュ点」を与える。これらは、天体力学だけでなく、実際の天文観測においても重要な役割をこれまで果たしてきた。我々が求めた、ポスト・ニュートン効果を含んだ直線解や正三角解は、今後の太陽系の精密観測や相対論的連星系の理解において、活用されることが期待される。そして、3体系の問題として、一般相対論的な近日点移動に、他の惑星のポスト・ニュートン効果がどれくらい影響するのか定量的に評価した。この際、数値シミュレーションではなく、解析的に調べる手法を開発した。結果として、今後2、30年のスケールでは、他の惑星のポスト・ニュートン重力からの影響は、近日点移動の観測においては測定限界

以下なので安全に無視できることを示した

(Yamada, Asada, MNRAS in press 2012)。

4) また、一般相対性理論のひとつの特長は、非自明なトポロジーをもつ時空構造を許す点である。そうした非自明な時空構造が実存するかどうかは、一般相対性理論自体というよりも、それにつながる初期条件 (あるいは形成条件) を許す物理機構があるのかどうかに依存していると考えられる。また、その時空の安定性には、通常の状態方程式に従わないエキゾチックなエネルギーの形態が要請されると考えられている。こうした非自明な時空構造のひとつが、エリスワームホールである。これを天文観測から制限もしくは検出するための方法をひとつ提案した。特に、天文学におけるアストロメトリとの関連を議論した。また、存在確率に制限を課す天体物理的な方法を議論した (Toki, Kitamura, Asada, Abe, ApJ 2011)。

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 12 件)

① K. Nakajima, H. Asada, “Deflection angle of light in an Ellis wormhole geometry”, Phys. Rev. D. 85, 107501 (2012)

② K. Izumi, H. Asada, “Perturbation theory of multi-plane lens effects in terms of mass ratios: Approximate expressions of lensed-image positions for two lens planes”, Prog. Theor. Phys. 127, 331 (2012)

③ Y. Toki, T. Kitamura, H. Asada, F. Abe, “Astrometric Image Centroid Displacements due to Gravitational Microlensing by the Ellis Wormhole”, Astrophys. J. 740, 121 (2011).

④ H. Asada, “Gravitational microlensing in modified gravity theories: Inverse-square theorem”, Prog. Theor. Phys. 125, 403 (2011)

⑤ T. Ichita, K. Yamada, H. Asada, “Post-Newtonian effects on Lagrange’s equilateral triangular solution for the three-body problem”, Phys. Rev. D 83, 084026 (2011)

⑥ K. Yamada, H. Asada, “Uniqueness of collinear solutions for the relativistic three-body problem”, Phys. Rev. D 83,

024040 (2011)

⑦ K. Yamada, H. Asada, “Collinear solution to the general relativistic three-body problem”, Phys. Rev. D 82, 104019 (2010)

⑧ M. Sato, H. Asada, “Transiting Extrasolar Planet with a Companion: Effects of Orbital Eccentricity and Inclination”, Publ. Astron. Soc. Jap. 62, 1203 (2010)

⑨ Y. Torigoe, K. Hattori, H. Asada, “Gravitational waveforms for 2- and 3-body gravitating systems”, Phys. Rev. Lett. 102, 251101 (2009)

⑩ H. Asada, “Gravitational wave forms for a three-body system in Lagrange’s orbit: parameter determinations and a binary source test”, Phys. Rev. D 80, 064021 (2009)

⑪ M. Sato, H. Asada, “Effects of Mutual Transits by Extrasolar Planet Companion Systems on Light Curves”, Publ. Astron. Soc. Jap. 61, L29 (2009)

⑫ H. Asada, “Five Point Mass Gravitational Lenses in a Rhombus as a Soluble Model Giving the Maximum Number of Images”, Prog. Theor. Phys. 121, 1381 (2009)

[学会発表] (計 5 件)

① 市田匠, 山田慧生, 浅田秀樹, 「一般相対論的三体問題に対する Lagrange の正三角解」、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学

② 浅田秀樹, 「修正重力理論における重力 マイクロレンズ」、2011 年 9 月 16 日、弘前大学

③ 山田慧生, 浅田秀樹, 「三体相互作用による一般相対論的な近日点移動」、2011 年 9 月 16 日、弘前大学

④ 浅田秀樹, 「ブラックホール候補天体」、日本物理学会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学

⑤ 浅田秀樹, 「2 体および 3 体からの重力波の波形と波源の識別」、日本物理学会、2009 年 9 月 12 日、甲南大学

〔図書〕（計1件）

①H. Asada, T. Futamase, P Hogan,
Oxford University Press,
“Equations of Motion in General
Relativity”, 2011年, 153 pages

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅田 秀樹 (ASADA HIDEKI)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50301023