

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800154

研究課題名(和文)ブラックホール摂動法に基づく相対論的連星の研究

研究課題名(英文)Study of relativistic binaries by black hole perturbation approach

研究代表者

佐合 紀親 (SAGO, Norichika)

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号：50540291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、有望な重力波源である相対論的連星の運動とそれに伴う重力場変動を明かにするため、ブラックホール摂動法を用いた研究を行った。

ブラックホール摂動法では、連星をブラックホール時空中を運動する質点でモデル化し、質点による重力場摂動を計算することで、軌道進化や重力波波形を評価する。しかし、摂動計算の数値コード化の際に、単極子、双極子成分が非物理的モードを含んでしまうことが問題となった。これを解決する方法として、適切な初期条件を与えることを提案した。

また、作用-角変数を用いた正準形式の拡張や、ポストニュートン法の結果との比較等、重力場摂動を考慮した軌道を記述する方法について研究を行った。

研究成果の概要(英文)：I investigated the dynamics of compact binaries and the gravitational perturbation by using black hole perturbation theory.

In this theory, a binary system is treated as a system consisting of a point mass orbiting a black hole. The orbital evolution and the gravitational wave emitted from the system can be evaluated from the gravitational perturbation of the background spacetime induced by the point mass. In numerical calculations of the perturbation, unphysical, problematic modes appear in the monopole and dipole components and hinder obtaining the physical solution. I investigated these problematic modes and suggested preparing appropriate initial conditions to solve the problem.

I also studied methods of describing the orbital evolution of the point mass by extending the canonical formulation with the action-angle variables, or by combining the other approaches, for example, the post-Newtonian method.

研究分野：数物系科学

キーワード：ブラックホール摂動法 重力波

1. 研究開始当初の背景

近年、重力波の直接観測を目指して、世界の様々な研究機関が競って重力波検出器の建設計画を進めている。我が国においても、2010年度から大型低温重力波望遠鏡KAGRAの建設が始まっており、重力波観測を推し進める機運が高まっている。

重力波検出を実現するためには、検出器の感度向上と共に、効率的で信頼性の高いデータ解析法の構築が必要となる。このような解析法の一つに、事前に予測した重力波理論波形と観測データの相関をとる手法がある。「マッチドフィルター法」と呼ばれるこの手法は、主要な重力波源である相対論的連星に対する強力なデータ解析法であり、検出効率を高めるだけでなく、観測される信号から重力波源の物理情報を精度良く引き出すことを可能にする。重力波の理論波形はマッチドフィルター法の要であり、その精密な予測を行うために、連星の運動とそれに伴う重力場変動を一般相対性理論の枠組みで正しく理解することが求められている。

2. 研究の目的

連星の運動の問題、いわゆる二体問題は、天体力学において最も基礎的な問題である。ニュートンの重力理論では、二体問題は厳密に解くことができる。しかし、一般相対性理論においては、二体問題の厳密解を得ることは難しい。これは、重力波放射によるエネルギーや角運動量の損失に伴って、軌道が常に変化し、定常状態が存在しないためである。「重力波放射の反作用問題」として知られるこの問題は、一般相対性理論における重要課題の一つである。

本研究では、ブラックホール摂動法を基にして、重力波放射の反作用問題に取り組み、相対論的連星の運動と放出される重力波を予測することを目的とする。

3. 研究の方法

ブラックホール摂動法では、連星をブラックホール時空中を運動する質点でモデル化し、質点の運動と背景時空中に生じる重力場摂動を取り扱う。この枠組みの中で最終的な目

的である精密な重力波理論波形の予測を実現するため、以下の課題に取り組むことで研究を進めた。(1)ブラックホール時空中において、質点が引き起こす重力場摂動と重力的反作用力の計算手法の構築し、その数値コードを開発する。(2)重力的反作用力と非線形効果を正しく取り入れた軌道を定式化する。(3)重力的反作用力の計算結果を基に、連星の運動を記述する解析的モデルを構築する。

4. 研究成果

(1)質点による重力場摂動の計算

カー時空中における質点の運動を記述する有用な手法として、ブラックホール摂動法に基づく自己力描像が知られている。この描像では、質点自身が引き起こす重力場摂動の反作用力で軌道発展が表現される。そのため、摂動の計算が必要となるが、この際に質点の位置に現れる発散が問題となる。本研究では、この発散問題を解決するために「パンクチャー法」と呼ばれる手法を採用し、重力場摂動計算の研究・開発を進めた。

重力場をスカラー場に置き換える、背景時空中を球対称に制限する等、単純化したモデルについて予備計算を行った結果、パンクチャー法の実用化における二つの問題を確認した。一つは、パンクチャー法で必要となる、場の方程式の有効源項が非常に煩雑であり、計算量が膨大になる点である。もう一点は、重力場摂動の計算において、単純な時間発展ではうまく解が得られない成分(単極子及び双極子成分)が存在することである。特に、単極子、双極子成分の計算は原理的な問題を含んでおり、重力場摂動計算の大きな支障になる。

単極子、双極子成分の問題は、摂動方程式を解く際に非物理的な線型成長モードが卓越してしまうために起こる。したがって、適切な初期条件を与えて時間発展させれば、線型成長モードを抑えることができ、物理的な解が得られるはずである。これを確かめるために、厳密解が分かっているシュバルツシルト時空中の円軌道に対する単極子成分に注目し、厳密解と初期条件を変えた数値解との比較を行った。その結果、適切な初期条件を与えた数値計算では、線型成長モードは抑えられて、物理的な解が得られることを確認した。

この結果を踏まえて、束縛軌道と非束縛軌道の境界軌道である、marginally bounded zoom-whirl (MBZW) 軌道について同様の計算を試みた。MBZW 軌道は漸近的に円軌道に近づくため、初期条件として円軌道の解を利用することが可能であり、実際に非物理的モードの成長を抑えることに成功した。この結果から、束縛軌道か非束縛軌道かに関わらず、適切な初期条件により非物理的な成長モードを軽減できると推察される。

(2) 重力場摂動を考慮した軌道の定式化

カー時空中における測地線方程式は可積分系であり、作用-角変数を用いた正準形式によって、軌道を基本振動数と運動の定数で記述することができる。本研究では、作用-角変数による軌道の正準形式を重力場摂動がある場合に拡張することで、重力的反作用力と非線形効果を含めた軌道を定式化する方法について検討を行った。そのなかで、適切なゲージ条件を課すことにより、運動方程式を相互作用ハミルトン関数の長時間平均を用いて簡略化できる可能性を示した。このようなゲージは、特殊な場合を除いて一般に存在することが示される。

一方、軌道の回転振動数や秤動振動数が共鳴を起こすような特殊な場合については、その有無は自明ではない。この問題については、現在も検討中である。本研究期間は終了したが、今後も継続して検討する予定である。

また、本研究では、作用-角変数による定式化を利用した具体的計算に向けて、重力的反作用力の永年効果を解析的に導出した。軌道進化を計算するにあたり、重力波の散逸効果による永年変化は最も重要であり、その計算には高い数値精度が要求される。こうした計算の負担を軽減するために、永年変化の解析的公式は有効であると考えられる。

(3) ポストニュートン法との比較

本研究では、ゲージ不変量を用いたブラックホール摂動法とポストニュートン法の比較についても検討を行った。シュバルツシルト時空中の楕円軌道に注目し、ゲージ不変量の一つである赤方偏移関数をブラックホール摂動法で数値的に計算し、それがポストニュートン法の予言と良く一致することを確認した。さらに、高精度の数値計算の結果から、未知のポストニュートン係数の予測値を

評価した。これらの研究は、連星の運動の解析的モデル構築の足掛かりになると期待される。

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 3 件)

(1) Norichika Sago, Ryuichi Fujita, "Calculation of radiation reaction effect on orbital parameters in Kerr spacetime", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, Vol.2015, No.7, 2015 年, 073E03.

DOI: 10.1093/ptep/ptv092

(2) Sarp Akcay, Alexandre Le Tiec, Leor Barack, Norichika Sago, Niels Warburton, "Comparison Between Self-Force and Post-Newtonian Dynamics: Beyond Circular Orbits", Physical Review D, 査読有, Vol.91, 2015 年, 124014.

DOI: 10.1103/PhysRevD.91.124014

(3) Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, Takahiro Tanaka, "Evolution of the Carter constant for resonant inspirals into a Kerr black hole: I. The scalar case", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, Vol.2013, No.6, 2013 年, 063E01.

DOI: 10.1093/ptep/ptt034

[学会発表](計 4 件)

(1) 佐合紀親, "Calculation of radiation reaction effect on orbital parameters in Kerr spacetime", 18th Capra Meeting on Radiation Reaction in General Relativity, 2015 年 7 月 1 日, 京都大学(京都市)

(2) 佐合紀親, Leor Barack, 「ブラックホール摂動のモノポールモード問題について」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学(東京都)

(3) 佐合紀親, 磯山総一郎, 藤田龍一, 中野寛之, 田中貴浩, 「カー時空中における質点の運動のハミルトン形式による定式化」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 29 日, 東海大学(神奈川県平塚市)

(4) Norichika Sago, Soichiro Isoyama, Takahiro Tanaka, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano, "Modeling of the secular evolution of the inspiral orbit around a Kerr black hole", The 23rd Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2013年11月05日, 弘前大学(青森県弘前市)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

佐合 紀親 (SAGO, Norichika)

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号: 50540291