

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400267

研究課題名(和文)コンパクト連星の相対論的準平衡解に関する数値的研究

研究課題名(英文)A numerical study of relativistic compact binaries in quasi-equilibrium

研究代表者

谷口 敬介 (TANIGUCHI, Keisuke)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号：70586528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：コンパクト連星は軌道運動を行うことで重力波を放出し、徐々に連星間距離を縮め、最終的には合体する。その連星進化の過程には、重力波放出による軌道収縮時間が軌道周期よりも十分長く、準平衡とみなせる段階が存在する。本研究では、その様な段階で今までよりも精度の良い結果を得ることができる数値計算コードの開発をスペクトル法を使って行った。まず、スペクトル展開を行うコードを開発し、その精度を確認した後、コンパクト連星の準平衡解を求めるのに必要不可欠な部分であるポアソン型の方程式を解くコードの実装を、双球座標を用いて行った。

研究成果の概要(英文)：Compact binary systems gradually decrease their orbital separations and eventually merge due to the emission of gravitational waves. There, however, exists a state which can be regarded as quasi-equilibrium in the evolutionary sequence of the binaries, because the time-scale of the orbital decay is much longer than the orbital period. In this research program, we have developed a numerical code to accurately solve Poisson-like equations by using a spectral method. First, we developed a code to perform spectral expansion and confirmed its accuracy. Then, we implemented a numerical code to solve Poisson-like equations, an essential part to obtain quasi-equilibrium figures of compact binaries, using the bi-spherical coordinates.

研究分野：数物系科学

キーワード：宇宙物理 一般相対論 ブラックホール 中性子星 連星系 準平衡解 スペクトル法 数値計算

1. 研究開始当初の背景

(1) 合体するコンパクト連星(連星中性子星、連星ブラックホール、ブラックホール-中性子星連星)は、地上に建設された重力波観測用レーザー干渉計の重要なターゲットの一つである。また、連星中性子星やブラックホール-中性子星連星の合体後に形成されるブラックホールとそれを取り巻く降着円盤というシステムは、継続時間の短いガンマ線バースト源の候補天体の一つとみなされており、活発に研究されている。

(2) コンパクト連星は非常に重力が強く、一般相対論を用いて研究しなくてはならない。その場合、アインシュタイン方程式や相対論的流体力学の方程式を連立させて解くのであるが、手段として最適なものは数値相対論によるシミュレーションであると考えられている。ただしそのシミュレーションは、アインシュタイン方程式に含まれている拘束条件式を満たし、かつ、物理的にもっともらしい準定常的な初期データから開始しなくてはならない。

(3) 今までこの様な準平衡解を数値的に求める研究を行ってきたが、本研究以前の研究で設定していた条件は、連星系については円軌道を描き、中性子星内部の流体の流れについては軌道回転と同期しているか、もしくは慣性系からみて無回転(渦なし)になっているかのどちらか、というものであった。また、本研究以前に開発した数値計算コードでは連星ブラックホールを取り扱うことができなかった。つまり、ここで言及した条件設定と数値計算コードは、合体直前のコンパクト連星をより詳細に研究し物理過程を理解するためには十分とは言えない。今後の重力波観測に向けて、今までよりも精密に数値シミュレーションを行うときの初期データを、より多くの物理的状況で考慮することが求められている。

2. 研究の目的

(1) 現在までに開発した数値計算コードは二つの問題を抱えている。一つは連星間距離が大きく離れている場合に精度が上がらないことである。これは、それぞれの星の中心に球座標の原点を置いているため、連星間距離が大きくなると伴星の角度分解能が相対的に下がるからである。二つ目の問題は連星ブラックホールを扱えないことである。現在までに開発した数値計算コードでは、連星系内のそれぞれの星の中心に原点をもつ二つの球座標系を取り、別々に解いたあとで重ね合わせている。またブラックホールはその事象の地平面でくり貫き、そこに境界条件を課して解いている。この様にすると、二つのブラックホールが存在する場合は、くり貫いた

部分の内部の物理量を正しく求めることができないので、問題となるのである。そこで本研究では、双球座標を導入し、一つに統一した座標系でコード開発を行う。

(2) 二つ目の目的は、連星系を構成する星の動径方向の落ち込み速度を取り入れることである。重力波放出の反作用で連星間距離は徐々に減少しているが、円軌道を解いている限りこの効果を入れることができない。この様な準平衡解を初期データとして使った数値シミュレーションでは、軌道に非物理的な離心率が発生してしまうという問題が起こる。この問題を解決するために、準平衡解の段階で動径方向への落ち込み速度を入れた解を構成する。

(3) 三つ目の目的は、中性子星の自転速度をより一般的にすることである。合体直前には、中性子星の自転の速さは軌道回転よりも十分遅く、かつ、中性子星の持つ粘性は潮汐トルクを受けて軌道回転と同期できるほど大きくない、という考察から、中性子星内部の流体の流れは慣性系から見て無回転(渦なし)であるとされてきた。しかし中性子星の自転周期がミリ秒よりも十分遅いという保証はない。最近、他の研究グループによって中性子星が一般的な自転を持つ連星中性子星の準平衡解が構成されるようになってきたが、まだ自転軸の向きと公転軸の向きが平行の場合のみで、十分一般的ではない。中性子星の自転軸の向きを公転軸方向から傾け、その準平衡解を数値シミュレーションの初期データとして提供することで、中性子星の歳差運動が重力波に与える影響を調べることができる様に、初期データの整備を行う。

3. 研究の方法

(1) 最初に、双球座標を用いた数値計算コードを開発する。数値計算法には、現在までに行ってきた研究と同様、スペクトル法を採用する。また、微分方程式などは反復法によって解くことにする。具体的な開発は、
座標系の張り方
座標系とスペクトル展開に使う変数との間の写像
スペクトル展開に関する部分
について行い、本研究以前に開発した数値計算コードよりも精度の良いコードを開発する。その後、メトリックの空間成分が共形の平坦であると仮定し、連星ブラックホールの準平衡解を構成する。ブラックホールは事象の地平面でくり貫き、そこに境界条件を課して解くことで、中心に存在する特異点を計算領域から取り除いて計算する。

(2) 次に、動径方向への落ち込み速度の入った準平衡解を求める。本研究以前に求めた準平衡解は円軌道回転系に乗った時に定常

になるように構成されていたが、本研究では動径方向への動きを入れても定常になるようにする。これは、3.5 次のポスト・ニュートン近似を用いて質点の運動に対して求められた重力波放出の反作用によって、動径方向への落ち込み速度が発生すると設定することで実現する。もちろん厳密に言えば、そのような動径方向への運動があると平衡状態にはならないが、今考えている状況では、重力波放出による軌道収縮時間が軌道回転周期よりもずっと長いので、準平衡解として求めることができる。

(3) 最後に、中性子星に任意の自転速度を入れることができるように数値計算コードを改良する。最初の時点では、自転軸の向きは公転軸の向きと同じにする。中性子星に任意の自転速度を持たせることができるようになったら、次に中性子星の自転軸の向きを公転軸の向きから傾ける。方法は、左右二つの中性子星で構成された連星中性子星の場合を例にとって説明すると以下のようになる。

左右の中性子星ともに公転軸方向に自転速度の向きを設定し、解をある程度収束させる。

右の中性子星の中心は公転面内に固定し、自転軸の向きを公転軸と中性子星の中心を含む面内で傾ける。

左の中性子星の自転軸の向きは固定したままにする。

右の中性子星の自転軸を傾けたため、連星系の公転面の上下にあった軸対称性が破れ、左の中性子星の中心が連星系の公転面内から離れる方向に動くので、その動きを抑えるように中性子星を動かし、星の中心が常に公転面内に留まるようにする。

上記の方法では、もちろん完全な平衡状態にはならないが、歳差運動の時間スケールが公転周期よりも十分長い場合には準平衡状態であるとみなすことができる。

4. 研究成果

(1) 初年度は、コンパクト連星の準平衡解の高精度計算を実現するための基礎研究に取り組んだ。具体的には、数値計算法としてスペクトル法を採用し、数値的なスペクトル展開について、コード開発に取り組んだ。この開発が終了したのち、その数値計算コードを用いて解析解が存在する微分方程式を解き、計算精度が十分出ているかどうか、テスト計算を行った。その結果、求める精度が正しく得られていることを確認することができた。本研究以前は、開発者の一人として参加している国際共同研究で開発され、一般にも公開されている数値計算コードライブラリーを使用して研究を行ってきたが、今回、自分自身のコードを基礎段階とはいえ開発したことは意義がある。

コンパクト連星の準平衡解を具体的に求める場合、本研究では座標系として双球座標を使用することとしているので、上記のようにスペクトル展開を数値的に行うコード開発を行ったあと、引き続き、双球座標の座標系の張り方とその座標系とスペクトル展開に使った変数との間の写像についての研究に取り組んだ。具体的には、それら二つの座標系をどのように関係付けたいのかということを確認するため、先行研究を参考にしつつ解析的な導出を行った。

(2) 2年目は、双球座標の座標系の張り方とその座標系とスペクトル展開に使った変数との間の写像についての研究を完了した上で、双球座標を用いた数値計算コードの実装に取り組んだ。具体的には、本研究のような準平衡解の数値的研究で極めて重要となるポアソン型の方程式を解く数値計算コードの開発である。ポアソン型方程式は、その左辺にラプラス演算子を含んでいるので、それをスペクトル展開で使った変数を用いた表現になるように座標変換した。その後、ラプラス演算子を実装するための数値計算コード開発を行った。

(3) 最終年度は、2年目に引き続き準平衡解の数値的研究で重要なポアソン型方程式を解く数値計算コード開発に取り組み、ポアソン型方程式の左辺に含まれるラプラス演算子の実装を完了した。また、くり貫いたブラックホールの見かけの地平面で境界条件を課することもできるように改良した。コンパクト連星の一般相対論的準平衡解を求めるには、5本のポアソン型方程式を連立し、反復法を用いて解く数値計算コードの開発を行わなくてはならない。年度内にこの段階まで達することができなかったが、最終年度までに開発したポアソン型方程式を解く数値計算コードは、本研究にとって必要不可欠な部分であり、今後、準平衡解の研究を推進していく上で重要な役割を果たすことになる。

(4) 上記の研究と並行して、球座標を用いて作成したブラックホール-中性子星連星や連星中性子星の初期データを数値シミュレーショングループに提供し、合体シミュレーションの結果を得ている。

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7件)

K. Uryu, A. Tsokaros, L. Baiotti, F. Galeazzi, N. Sugiyama, K. Taniguchi, and S.i. Yoshida, Do triaxial supramassive compact stars exist?, *Physical Review D*, Vol.94, 2016, 101302, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.101302

Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, M. Shibata, and K. Taniguchi, Dynamical mass ejection from the merger of asymmetric binary neutron stars: Radiation-hydrodynamics study in general relativity, *Physical Review D*, Vol.93, 2016, 124046, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.124046

K. Uryu, A. Tsokaros, F. Galeazzi, H. Hotta, M. Sugiyama, K. Taniguchi, and S.i. Yoshida, New code for equilibriums and quasiequilibrium initial data of compact objects. III. Axisymmetric and triaxial rotating stars, *Physical Review D*, Vol.93, 2016, 044056, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.044056

K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, K. Kyutoku, M. Shibata, K. Taniguchi, and T. Wada, High resolution magnetohydrodynamic simulation of black hole-neutron star merger: Mass ejection and short gamma ray bursts, *Physical Review D*, Vol.92, 2015, 064034, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.064034

K. Kyutoku, K. Ioka, H. Okawa, M. Shibata, and K. Taniguchi, Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries, *Physical Review D*, Vol.92, 2015, 044028, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.044028

K. Kawaguchi, K. Kyutoku, H. Nakano, H. Okawa, M. Shibata, and K. Taniguchi, Black hole-neutron star binary merger: Dependence on black hole spin orientation and equation of state, *Physical Review D*, Vol.92, 2015, 024014, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.024014

K. Taniguchi, M. Shibata, and A. Buonanno, Quasiequilibrium sequences of binary neutron stars undergoing dynamical scalarization, *Physical Review D*, Vol.91, 2015, 024033, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.024033

6 . 研究組織

(1)研究代表者

谷口 敬介 (TANIGUCHI, Keisuke)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号 : 7 0 5 8 6 5 2 8