

## 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 6月 4日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840010

研究課題名（和文） ブラックホール - 中性子星連星における一般相対論的準平衡解の数値的研究

研究課題名（英文） A numerical study of quasi-equilibrium black hole-neutron star binaries in general relativity

## 研究代表者

谷口 敬介 (TANIGUCHI KEISUKE)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：70586528

研究成果の概要（和文）：ブラックホールと中性子星で構成された連星系は、ブラックホールと中性子星が互いの周りを回る軌道運動を行なうことで重力波を放出し、定常状態を保つことができない。しかし、重力波放出による軌道収縮時間が軌道周期よりもずっと長く、準平衡とみなせる状態が存在する。本研究では、その様な一般相対論的準平衡解を求めるための数値計算コードを開発した。特に、ブラックホール - 中性子星連星内でブラックホールの高速自転を実現する手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：Binary systems composed of a black hole and a neutron star cannot be in stationary state due to the emission of gravitational waves. There, however, exists a state which can be regarded as quasi-equilibrium, 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 construct relativistic black hole-neutron star binaries in quasi-equilibrium. In particular, we have found a method to include a rapidly spinning black hole in a black hole-neutron star binary.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011年度	1,150,000	345,000	1,495,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理、一般相対論、重力波、ブラックホール、中性子星、連星

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 合体するブラックホール - 中性子星連星は、現在稼働中の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、合体後に形成される、ブラックホールとそれを取り巻くディスク、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でもあり、ブラックホール - 中性子星連星は大変興味深い

天体である。

(2) この連星系は、ブラックホールと中性子星という非常に重力が強いコンパクトな天体で構成されている。更に連星間距離が中性子星半径の5倍程度という近接したものを想定しているため、その連星系自体がコンパクトである。従って一般相対論を用いて研究しなくてはならない。

(3) 一般相対論の枠組みでブラックホール-中性子星連星の合体を研究するためには、アインシュタイン方程式と相対論的流体力学の方程式を連立させて解く必要がある。これは連立非線形偏微分方程式を解くということであり、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。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の拘束条件式を満たし、且つ、物理的にできるだけ正しい、準定常的な初期データから始めなくてはならない。

(4) その様な準平衡解の研究は、2006年頃から開始されたが、現在までのところ、ブラックホールの自転に関しては、無回転かまたはゆっくり回転している場合が主として研究されている。しかしブラックホールの自転は、合体運動と合体後に形成されるディスクの質量に大きな影響を与える。従って、ブラックホール-中性子星連星の合体シミュレーションの初期データとして、高速自転するブラックホールを含むブラックホール-中性子星連星の準平衡解を求めることが急務となっていた。

## 2. 研究の目的

(1) 今までの研究では、ブラックホール-中性子星連星の準平衡解を求めるためにアインシュタイン方程式を解くとき、空間背景メトリックを共形平坦であると仮定することがほとんどであった。一般相対論では、連星系を成す星が公転運動を行なうと重力波を放出するので、定常的ではあり得ない。しかし連星間距離が十分大きい場合は、重力波放出に伴う軌道収縮時間が軌道周期よりも十分長く、準定常的であるとみなすことができる。この様な準平衡解を得る一つの方法として、重力波の自由度を落とす、つまり、空間背景メトリックが共形平坦であるという仮定がされてきたのである。しかしながら、自転するブラックホールは共形平坦な空間背景メトリックを取ることができない。従って、共形平坦という仮定のもとブラックホールを自転させると、高速自転させることができないという問題が発生する。

(2) アメリカのコーネル大学とカリフォルニア工科大学の共同研究グループは、ブラックホールの自転をより正確に取り入れるために、ブラックホール近傍ではカー・ブラックホールの空間背景メトリックを使い、離れるに従って急速に共形平坦に近付くというハイブリッド的な空間背景メトリックを導入することで解決しようとしている。確かにこの方法では高速自転するブラックホールを得ることができるが、そこで与えられた空間背景メトリックは共形平坦であると仮定した場合と同様、重力波の自由度が入っていない。ブラックホール-中性子星連星の合体シミュレーションを行なうときに問題となることの一つに、開始から約1軌道回転の間は重力波の波形が不正確ということがある。この原因の一つは、初期データを構成するときに、重力波の自由度を含む、幾つかのメトリック成分を解いていないことだと考えられている。

(3) 本研究では、空間背景メトリックを共形平坦であると仮定せず、アインシュタイン方程式の全ての式を解き、時空メトリックの全ての成分を得ることを目的としている。従って、ブラックホール-中性子星連星の準平衡解に重力波の自由度を取り入れることができるだけでなく、ブラックホールの自転についてもより正確に取り入れることができる。空間背景メトリックに重力波の自由度を取り入れることと、ブラックホールを高速自転させること、の両方を一挙に解決し、ブラックホール-中性子星連星の一般相対論的準平衡解を構成することを目指した。

## 3. 研究の方法

(1) ブラックホール-中性子星連星の一般相対論的準平衡解を、時空メトリックの全ての成分を取り入れて求めるためには、まず定式化を行わなくてはならない。この定式化は3つの部分に分かれている。一つ目は全体の時空に係わる部分、二つ目は中性子星に係わる部分(流体力学の方程式)、そして最後がブラックホールの係わる部分(特異点の扱い方)である。本研究では、連星を解くときに、ブラックホールと中性子星をそれぞれ別々の数値計算空間で解き、それらを足し合わせることで全体の連星系を構成する、という解法を採用している。従って、まず重要となってくるのが、方程式をブラックホールの数値計算空間で解く部分と、中性子星の数値計算空間で解く部分とに、どのように分割するかということである。本研究では、連星間

距離が無限大の極限で、孤立したブラックホールと孤立した中性子星を求める方程式系になるように分割を行なった。

(2) ブラックホールの取り扱いについては、その特異点を数値計算領域から除外する方法として、ブラックホールを見かけの地平線のすぐ内側でくり貫き、そこに境界条件を課して解く、という方法を採用した。具体的には、ブラックホールのカー解をカー・シルト座標で書き表したメトリックを境界条件に使った。この座標を採用すると、見かけの地平線でメトリックに特異な振る舞いが現れず、内部に滑らかに接続されるので、本研究にとって都合が良くなっている。また、境界条件にカー解を使っているが、伴星である中性子星が存在するので、見かけの地平線の位置はカー解の場合と異なる。従って、見かけの地平線の位置を決定する数値計算コードの組み込みも必要となる。

(3) 定式化が終わった後、数値計算コードの作成を行なった。本研究で採用した数値計算法は、スペクトル法である。スペクトル法は、扱う物理量が滑らかな関数であれば、高精度な計算を行なうことができる方法である。この方法を使って、ブラックホール側ではアインシュタイン方程式の10本の独立な方程式を全ての方程式を解く。また、中性子星側では、アインシュタイン方程式と相対論的流体力学の方程式（オイラー方程式と連続の方程式）を解く。このようにして解いたブラックホールと中性子星についての解を合わせ、更に軌道角速度の計算、連星系の重心の位置の決定、ブラックホールと中性子星のそれぞれの質量を設定した値へ固定、といった一通りの手順を行なう。この手順を何度も繰り返し、値が収束するまで行なう。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究では、まずブラックホール時空の解法に取り組んだ。最終的には連星系内でブラックホール時空を解く必要があるが、ブラックホールに係わる部分の定式化が正しく行われているか、その部分を正しく解くことができるか、そして、高速で自転させることができるかを調べるため、まずは孤立したブラックホールについての研究を行なった。ブラックホールの特異点を数値計算領域から除外するため、ブラックホールを見かけの地平線のすぐ内側で球状にくり貫き、そこに境界条件を課して解いた。その結果、最も興味がある物理量の一つであるブラックホールの自転角運動量については、ブラックホールが持つことのできる最大値付近まで増加

させることができた。

(2) 引き続き、ブラックホール - 中性子星連星のもう一方の星である中性子星に関するコードの開発を行なった。中性子星に係わる部分の定式化が正しく行われているか、その部分を十分な精度で解くことができるかを調べるため、まずは孤立した中性子星について研究を行なった。その結果、他の定式化ですでに求められている解と同等の精度で解くことができることを確認した。

(3) 孤立したブラックホールと孤立した中性子星それぞれについて、精度良く計算ができることを確認した後、最終的な、ブラックホール - 中性子星連星の準平衡解を得るための数値計算コード開発を目指した。現在までに、開発が終わったブラックホールに関する部分と中性子星に関する部分を合わせ、連星系を求める数値計算コードを完成させている。その連星系のコードを使ったテスト計算として、ブラックホールのみを十分な精度で解くことができることと、中性子星のみを精度良く解くことができることを確認した。現在は、ブラックホールと中性子星を両方含んだ連星系について、テスト計算を行なっている段階である。今後、テスト計算で問題が発生しないことが確認されたら、最終的な数値計算を行なって、データを取得することにしていく。

(4) 今の時点では、本研究は最終目標である、ブラックホール - 中性子星連星の一般相対論的準平衡解の物理過程を調べることと、数値シミュレーショングループに初期データを提供すること、には達していない。しかしながら、時空メトリックの空間成分のうち、今までのブラックホール - 中性子星連星の一般相対論的準平衡解の研究では考慮されていなかった成分を全て取り入れ、更にブラックホールの高速自転を実現する手法を開発することに成功した。

#### 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 久徳浩太郎、大川博督、柴田大、谷口敬介、Gravitational waves from spinning black hole-neutron star binaries: Dependence on black hole spins and on neutron star equations of state、Physical Review D、査読有、Vol. 84、2011、064018
- ② 川村拓夢、谷口敬介、吉田慎一郎、江里

口良治、New exact solutions of magnetic ellipsoidal figures of equilibrium、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、査読有、Vol. 416、2011、pp. L75-L79

- ③ 柴田大、谷口敬介、Coalescence of Black Hole-Neutron Star Binaries、Living Reviews in Relativity、査読有、Vol. 14、2011

[学会発表] (計 1 件)

- ① 谷口敬介、吉田慎一郎、江里口良治、磁場を伴った連星系の半解析解、日本物理学会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学 (青森県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷口 敬介 (TANIGUCHI KEISUKE)  
東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号：70586528