

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540263

研究課題名(和文) 中性子星・ブラックホール連星の合体に対する数値的研究

研究課題名(英文) Numerical study for merger of black hole-neutron star binaries

研究代表者

柴田 大 (SHIBATA MASARU)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号(80252576)

研究成果の概要：完全に一般相対論的なシミュレーションを系統的に実行して、ブラックホールと中性子星からなる連星の合体前の状態、中性子星が合体前に潮汐破壊される条件、合体過程、合体後誕生する天体の特徴、放射される重力波の波形、合体後に誕生するブラックホール周りの降着円盤の性質などを明らかにした。特に、合体後にブラックホールと降着円盤からなる系が誕生する条件を明らかにし、また中性子星が潮汐破壊される場合には、破壊時に放射される重力波の波形から中性子星の半径に対して制限を与えることが可能であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：宇宙物理(理論)

## 1. 研究開始当初の背景

中性子星とブラックホールからなる連星の合体は、現在稼働中の大型重力波検出器(例えば、LIGO)に対する有望な重力波源である。重力波を検出し、波源を特定するには、あらかじめ波形を理論的に予想して

おこなうてはならない。合体直前以後の波形を予想するには、数値相対論に基づくシミュレーションが不可欠である。2006年以前は、中性子星・ブラックホール連星の合体に対する数値相対論的シミュレーションは皆無

であり、放射される重力波の波形も詳しく分かっていなかった。

中性子星 - ブラックホール連星の合体はまた、ガンマ線バーストの中心エンジンを形成させる母天体としても注目されている。中性子星がブラックホールによって潮汐破壊され、ブラックホール周りに高温高密度の円盤が誕生すれば、ガンマ線バーストが発生するかもしれないからである。しかし、実際にどのような場合に潮汐破壊が起こり、また潮汐破壊後に本当に円盤が誕生するのかについては全く分かっていなかった。

## 2. 研究の目的

中性子星 - ブラックホール連星の合体に対する数値相対論的シミュレーションを世界で初めて実行し、(1)合体前の状態、中性子星が合体前に潮汐破壊される条件を明らかにすること、(2)合体の様相を解明すること、(3)潮汐破壊が起こる条件を導出すること、(4)潮汐破壊後にブラックホール周りに円盤が誕生する条件を明らかにすること、そして(5)合体時の重力波の波形を求めることを目的とした。

また、シミュレーションのためのより効率的かつより高精度の計算が可能なコードの開発や、シミュレーションに必要な初期条件の計算用コードの開発も同時並行で進めた。

## 3. 研究の方法

完全に一般相対論的な数値コードを用いて、ブラックホールと中性子星からなる連星の合体過程をシミュレーションで明らかにする。

(1)合体直前にある中性子星 - ブラックホール連星の平衡状態を求め、潮汐破壊の条件を導出する。コンパクト星からなる連星は重力放射のため、現実的には完全な平衡状態にはあり得ないが、合体直前でも重力放射の時間スケールは軌道秋季よりも長い。よって、系は回転系で見ればほぼ平衡状態にあると考えることができる。そこで、一般相対論的平衡状態を数値計算で求める。定式化として、3次元計量が共形平坦とする仮定のものを採用する。中性子星の状態方程式としては、法則の状態方程式を用いる。ただし、 $\gamma$  を 2 から 3 の範囲で変化させる。ブラックホールと中性子星の質量をそれぞれ太陽質量の 3 - 6 倍と 1.2 - 1.6 倍の間に選ぶ。ブラックホールのスピンに関して、幅広い値を考慮する。以上の問題設定で、平衡状態の系列をサーベ

イ的に求め、潮汐破壊の起こる条件の状態方程式、質量比およびスピン依存性などを調べる。

(2)潮汐破壊が起こった後にブラックホール周りに誕生する降着円盤の性質を明らかにするために、完全に一般相対論の数値シミュレーションを実行する。初期条件としては、研究(1)で求めた平衡状態を採用する。具体的には、潮汐破壊の条件を満たす軌道角速度よりも少々小さめの角速度(つまり、大きめの軌道半径)を持つ平衡状態を採用し、シミュレーションを行う。

(3)同時に、求めた計量から重力波成分を抽出することによって、放射される重力波の波形も解明する。中性子星をモデル化するには、その速度場や状態方程式を仮定する必要があるが、速度場としては現実的な条件として、渦なしの速度場を仮定した。状態方程式としては、本研究では簡単のため、ポリトロップ型の状態方程式を採用し、断熱定数を 2 とおいた。

シミュレーションのためには、初期条件が必要であるが、研究(1)で求めた平衡状態を幅広いパラメータに対して採用する。具体的には、合体 4 周前程度に在る平衡形状を与え、シミュレーションを実行する。これについてもわれわれの研究グループでコードを独自に開発し(大学院生久徳が担当)、そのコードを用いて得られた結果を用いる。

## 4. 研究成果

特に平成 19 年度後半から 20 年度にかけて飛躍的發展があったので、その成果を中心に述べる。

19 年度後半から大学院生山本を中心に、適合多層格子を用いた新しいコード SACRA の開発を進めた。そして 20 年度前半に第一版が完成した。その結果、これまでよりも格段に少ないコンピュータ資源でこれまで以上に高分解能の計算が可能になった。具体的には、20 - 30 万円程度で購入可能なパソコンで合体のシミュレーションが可能になった。SACRA コードの性能についてまとめた論文はすでに発表済みである

(Yamamoto et al., 2008)。

その後、SACRA コードを用いて中性子星 - ブラックホール連星の合体の高分解能シミュレーションを系統的に実行した。その結果、以下のようなことが明らかになった。中性子星が合体前に潮汐破壊される条件は中性子星の半径に強く依存するが、一般的にはブラックホールの質量が軽い場合に限られ

る。例えば、太陽の 1.35 倍の質量を持つ中性子星を考える場合、その半径が 14km なら、ブラックホールの質量が太陽の約 4 倍以下の場合にのみ潮汐破壊が起こる。半径が 12.5km であれば、この閾値が太陽質量の 3 倍程度までさらに下がる。潮汐破壊後、中性子星の物質はブラックホール周りにばら撒かれるが、大部分は最終的にはブラックホールに飲み込まれる。太陽の 0.01 倍以上の降着円盤がブラックホール周りに誕生する条件は非常に厳しく、例えば、質量が太陽の 1.35 倍、半径が 14km の中性子星を想定する場合、ブラックホールの質量が太陽の約 3 倍以下でないと円盤は形成されない。仮に中性子星の半径が 11km 程度であれば、このような円盤は、ブラックホールの質量が太陽の 2.7 倍でも誕生しない。潮汐破壊が起こる場合、放射される重力波の振幅は急激に減衰する。潮汐破壊時の重力波の周波数は、中性子星の半径に強く依存するので、質量の小さいブラックホールと中性子星の合体時の重力波を観測することが出来れば、中性子星の半径に制限を与えることが可能である。

以上の結果をまとめた論文を平成 20 年 12 月に投稿し (M. Shibata, K. Kyutoku, T. Yamamoto, and K. Taniguchi, Physical Review D in submission)、現在査読中である。

その他にも、久徳らと、ブラックホール・中性子星の平衡形状に関する研究を行い、これに関しては、現在論文作成中である。

## 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 4 件)

M. Shibata, H. Okawa, and T. Yamamoto, "High-velocity collision of two black holes", Phys. Rev. D 査読有り、**78**, 101501-1—5, 2008.

T. Yamamoto, M. Shibata, and K. Taniguchi, "Simulating coalescing compact binaries by a new code (SACRA)", Phys. Rev. D 査読有り、**78**, 064054-1—38, 2008.

M. Shibata and K. Taniguchi, "Merger of black hole and neutron star in general relativity: Tidal disruption, torus mass, and gravitational waves", Phys. Rev. D 査読有り、**77**, 084015-1—22, 2008.

M. Shibata and K. Uryu, "Merger of black hole-neutron star binaries in full general relativity", Classical and Quantum gravity, 査読有り、**24**, S125—S137, 2007.

[学会発表](計 5 件)

木内 健太、柴田 大、谷口 敬介 「中性子星連星の合体と重力波」、日本物理学会 2008 年秋季大会 (9 月 20 日~23 日) 山形大学

久徳 浩太郎、柴田 大、谷口 敬介 「ブラックホール・中性子星連星の準平衡形状」、日本物理学会 2008 年秋季大会 (9 月 20 日~23 日) 山形大学

M. Shibata, "Simulating coalescing compact binaries in GR", in Numerical modeling of astrophysical sources of gravitational radiation, Valencia, Spain, September 8—12, 2008

柴田 大、瓜生康史「ブラックホールと中性子星の連星の合体」、日本物理学会 2007 年秋季年会 (9 月 20 日~24 日) 北海道大学

M. Shibata, "Merger of black hole and neutron star", in Astrophysics of compact objects, Huangshan, China, July 1—7, 2007

6 . 研究組織

(1)研究代表者

柴田 大 (SHIBATA MASARU)  
東京大学・大学院総合文化研究科・准教授  
研究者番号 80252576

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし