

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244028

研究課題名(和文) 数値相対論による重力波源の研究

研究課題名(英文) Exploring gravitational-wave sources by numerical relativity

研究代表者

柴田 大 (Shibata, Masaru)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：80252576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：数値相対論により中性子星連星の合体過程を調べ、以下の成果を得た。連星中性子星合体後に誕生する大質量中性子星の性質の状態方程式依存性を詳しく分類した。連星中性子星合体時に太陽質量の0.1~1%の物質が光速の約20%の速度で放出されることを示した。さらに放出される中性子過剰物質から太陽組成に一致する重元素が生成されうること示した。中性子星・ブラックホール連星合体において中性子星が潮汐破壊されると一部の物質が非等方的に放出され、特徴的な重力波や電磁波が放射されることを示した。高解像度磁気流体計算を行い、連星中性子星合体時には磁気流体不安定性で磁場強度が短時間で増大することを示した。

研究成果の概要(英文)：By numerical relativity simulations, the following facts on the merger of neutron-star binaries are found: (i) Massive neutron stars (MNS) formed typically after the merger of binary neutron stars depend strongly on neutron-star equations of state. (ii) During the merger of binary neutron stars, neutron-rich matter with mass about 0.1-1% of the solar mass is ejected and it could produce a variety of heavy elements via the so-called r-process nucleosynthesis. We indicate that the abundance pattern of the heavy elements could agree with the solar abundance pattern. (iii) During tidal disruption of neutron stars in black hole-neutron star binaries, a fraction of matter is ejected in an anisotropic manner and associated with this, characteristic signals of gravitational waves and electromagnetic waves would be emitted. (iv) By high-resolution magnetohydrodynamics simulations, we show that after the merger of binary neutron stars, magnetic-field strength the formed MNS is highly amplified.

研究分野：宇宙物理学、一般相対論、重力波、数値相対論、中性子星連星

キーワード：重力波 数値相対論 中性子星 中性子星連星 ブラックホール マクロノバ 重元素合成 磁気流体

1. 研究開始当初の背景

Advanced LIGO、Advanced VIRGO、KAGRA(当時は LCGT)などの高感度地上重力波検出器が、2015年頃から順次本格稼働する。来たる重力波観測に備えて、予想される主要な重力波源(連星中性子星やブラックホール・中性子星連星の合体、および大質量星の重力崩壊)から放射される重力波の波形や電磁波対応天体を予言することが急務であった。

2. 研究の目的

一般相対論的な数値シミュレーション(数値相対論)により重力波源の運動状態を解き明かし、放出される重力波の波形を正確に求めることが第一の目的である。さらに得られる理論波形を模擬信号とし、重力波データ解析の手法を用いて抽出可能な重力波源の物理的情報を調べるとともに、重力波に付随して放射されると推測される電磁波やニュートリノの放射量を見積もり、重力波発生源の対応天体探査に役立てるのも目的である。また重力波源は一般的に動的な高エネルギー天体現象なので、線バーストの中心源の形成可能性やバーストの発生過程に関する研究も同時に進めることも目的とした。

3. 研究の方法

現実的な問題設定のもとで一般相対論的な数値シミュレーションを行い、もっとも有望な重力波源である中性子星連星の合体過程を定量的に調べ、重力波の波形や電磁波放射過程を求めた。また重力波源は全て高エネルギー天体現象なので、重力波の放射量に加えて電磁波やニュートリノの放射量も評価した。より具体的には、連星の合体に対しては、(i) 比較的単純な状態方程式を用いるものの、そのモデルパラメータを系統的に広範囲に変化させることで、数百~千程度のモデルに対して重力波波形を導出する、一方で(ii)有限温度の状態方程式やニュートリノ放射過程、磁場を考慮したより詳細な設定のもとで数値計算を実行し、ニュートリノや電磁波の放射量を求めた。後者のタイプの計算は約 20~30 のモデルに対して実行した。連星の合体は線バースト源の有力候補でもあるので、その発生可能性も考察した。さらに得られた重力波波形を模擬波形として用いて重力波データ解析を行い、波形から抽出可能な物理的情報を解析した。

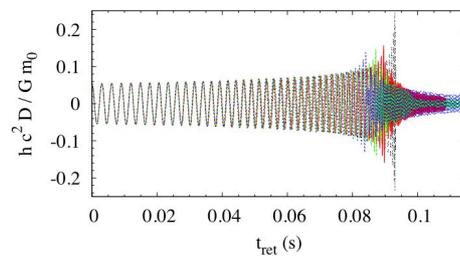
4. 研究成果

以下のような成果を得た。

piece-wise ポリトロープ状態方程式を用

いて連星中性子星合体に対する多数のシミュレーションを実行し、合体後誕生する大質量中性子星の状態方程式依存性を分類した。また合体後誕生する大質量中性子星から放射される重力波の特徴的周波数が中性子星の状態方程式と相関関係を持つことを示した。

高精度の数値シミュレーションを実効することにより、合体直前の連星中性子星から放射される重力波の波形にも状態方程式の情報が色濃く反映されることを示した。仮に advanced LIGO が design 感度を達成し、実効的距離 200Mpc の距離からの重力波を観測できた場合、2 レベルで中性子星の半径を 1km 程度の誤差で測定できることを示した。(下図は波形の例)



連星中性子星合体時に、典型的には太陽質量の 0.1~1% の物質が、光速の 20% 程度の速度で放出されることを示した。また放出される中性子過剰物質は重元素合成を起こすが、その元素組成が太陽組成や低金属量を持つ恒星の組成に一致していることを初めて示した。さらにそのとき合成される不安定重元素の崩壊により熱が発生し、電磁波放射が起こるが、電磁波信号が subaru 望遠鏡の hyper supreme カメラを用いれば十分に観測可能であることを示した。

ブラックホールの自転角運動量と軌道角運動量が傾いた場合の中性子星・ブラックホールの合体を初めて系統的に調べ、重力波の波形に対する包括的理解を初めて得た。

中性子星・ブラックホール連星の合体において中性子星が潮汐破壊される場合には、一部の物質が非等方的に放出されるが、それに伴った重力波および電磁波信号の特徴を示した。

高解像度の磁気流体計算により、連星中性子星合体時には、磁気流体不安定性のため、磁場強度が 10^{16} G 程度まで短時間で増大することを初めて一般相対論的に示した。

適合多層格子法を実装している数値相対論コード SACRA の並列化、高速化を久徳らと進め、高性能パーソナルコンピュータを用いて多数の高精度重力波波形を導出することを可能にした。

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 31 件)

S. Yoshida, K. Kiuchi, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* 86, 044012-1--16 (2012) “Stably stratified magnetized stars in general relativity” DOI: 10.1103/PhysRevD.86.044012

K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* 86, 064008-1--18 (2012) “Three dimensional evolution of differentially rotating magnetized neutron stars” DOI: 10.1103/PhysRevD.86.064008

K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, H. Okawa, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi, *Phys. Rev. D* 87, 024001-1--27 (2013) “The mass ejection from the merger of binary neutron stars” DOI: 10.1103/PhysRevD.87.024001

K. Hotokezaka, K. Kyutoku, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* 87, 044001-1--15 (2013) “Exploring tidal effects of coalescing binary neutron stars in numerical relativity” DOI: 10.1103/PhysRevD.87.044001

M. Shibata and K. Kawaguchi, *Phys. Rev. D* 87, 104031-1--12 (2013) “Virial relation and first law in scalar-tensor theories of gravity” DOI: 10.1103/PhysRevD.87.104031

K. Kyutoku, K. Ioka, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* 88, 041503(R)-1--6 (2013) “Anisotropic mass ejection from black hole-neutron star binaries: Diversity of electromagnetic counterpart” DOI: 10.1103/PhysRevD.88.041503

K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, T. Muranushi, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi, *Phys. Rev. D* 88, 044026-1--30 (2013) “Remnant massive neutron stars of binary neutron star mergers: Evolution process and gravitational waveform” DOI: 10.1103/PhysRevD.88.044026

J. S. Read, L. Baiotti, J. D. E. Creighton, J. L. Friedman, B. Giacomazzo, K. Kyutoku, C. Markakis, L. Rezzolla, M. Shibata, and K. Taniguchi, *Phys. Rev. D* 88, 044042-1--21 (2013) “Matter effect on binary neutron star waveforms” DOI: 10.1103/PhysRevD.88.044042

F. Pannarale, E. Berti, K. Kyutoku, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* 88, 084011-1--21 (2013) “Nonspinning black hole-neutron star mergers: a model for the amplitude of gravitational waveforms” DOI: 10.1103/PhysRevD.88.084011

K. Hotokezaka, K. Kyutoku, M. Tanaka, K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and S. Wanajo, *Astrophys. J. Lett.* 778, L16-1--5 (2013) “Progenitor Models of the Electromagnetic Transient Associated with the Short GRB 130603B” doi:10.1088/2041-8205/778/1/L16

K. Kyutoku, K. Ioka, and M. Shibata, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 437, L6-1--5 (2014) “Ultra-Relativistic Counterparts to Binary Neutron Star Mergers in Every Direction, X-ray-to-Radio Bands and Second-to-Day Timescales” doi:10.1093/mnras/slt128

M. Tanaka, K. Hotokezaka, K. Kyutoku, S. Wanajo, K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, and M. Shibata, *Astrophys. J.* 780, 31-1--9 (2014) “Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers 130603B” doi:10.1088/0004-637X/780/1/31

B. D. Lackey, K. Kyutoku, M. Shibata, P. R. Brady, and J. L. Friedman, *Phys. Rev. D* 89, 043009-1--25 (2014) “Extracting equation of state parameters from black hole-neutron star mergers: aligned-spin black holes and a preliminary waveform model” DOI: 10.1103/PhysRevD.89.043009

M. Shibata, K. Taniguchi, H. Okawa, and A. Buonanno, *Phys. Rev. D* 89, 084005-1--19 (2014) “Coalescence of binary neutron stars in a scalar-tensor theory of gravity” DOI: 10.1103/PhysRevD.89.084005

H. Nagakura, K. Hotokezaka, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Ioka, *Astrophys. J. Lett.* 784, L28-1--5 (2014) “Jet Collimation in the Ejecta of Double Neutron Star Merger: New Canonical Picture of Short Gamma-ray Bursts” doi:10.1088/2041-8205/784/2/L28

M. Shibata, H. Nagakura, Y. Sekiguchi, and S. Yamada, *Phys. Rev. D* 89, 084073-1--12 (2014) “A conservative form of Boltzmann's equation in general relativity” DOI: 10.1103/PhysRevD.89.084073

S. Wanajo, Y. Sekiguchi, N. Nishimura, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, *Astrophys. J. Lett.* 789, L39-1--6 (2014)

“Production of all the r-process nuclides in the dynamical ejecta of neutron star mergers”
doi:10.1088/2041-8205/789/2/L39

K. Kiuchi, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and T. Wada, *Phys. Rev. D* **90**, 041502(R)-1–5 (2014)

“High-resolution numerical-relativity simulations for the merger of binary magnetized neutron stars” DOI: 10.1103/PhysRevD.90.041502

K. Kyutoku, M. Shibata, and K. Taniguchi, *Phys. Rev. D* **90**, 064006-1--20, (2014)

“Reducing orbital eccentricity in initial data of binary neutron stars” DOI: 10.1103/PhysRevD.90.064006

K. Taniguchi, M. Shibata, and A. Buonanno, *Phys. Rev. D* **91**, 024033-1--17 (2015)

“Quasi-equilibrium sequences of binary neutron stars undergoing dynamical scalarization” DOI: 10.1103/PhysRevD.91.024033

Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* **91**, 064059-1--7 (2015)

“Dynamical mass ejection from binary neutron star mergers: Radiation-hydrodynamics study in general relativity”
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.064059

K. Hotokezaka, K. Kyutoku, H. Okawa, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* **91**, 064060-1--12 (2015)

“Exploring tidal effects of coalescing binary neutron stars in numerical relativity II: Longterm simulations”
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.064060

K. Kawaguchi, K. Kyutoku, H. Nakano, H. Okawa, M. Shibata, and K. Taniguchi, *Phys. Rev. D* **92**, 024014-1--25 (2015)

“Black hole-neutron star binary merger: dependence on black hole spin orientation and equation of state”
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.024014

K. Kyutoku, K. Ioka, H. Okawa, M. Shibata, and K. Taniguchi, *Phys. Rev. D* **92**, 044028-1--37 (2015)

“Dynamical mass ejection from black hole-neutron star binaries”
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.044028

K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, K. Kyutoku, M. Shibata, K. Taniguchi, and T. Wada, *Phys. Rev. D* **92**, 064034-1--8 (2015)

“High-resolution magnetohydrodynamics simulations for black hole-neutron star merger: Mass ejection and short gamma-ray burst”
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.024014

Y. Suwa, T. Yoshida, M. Shibata, H. Umeda, and K. Takahashi, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **454**, 3073--3081 (2015)

“Neutrino-driven explosions of ultra-stripped type Ic supernovae generating binary neutron stars”
doi:10.1093/mnras/stv2195

F. Pannarale, E. Berti, K. Kyutoku, B. Lackey and M. Shibata, *Phys. Rev. D* **92**, 81504(R)-1--6 (2015)

“Gravitational-wave cutoff frequencies of tidally disruptive neutron star-black hole binary mergers”
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.081504

F. Pannarale, E. Berti, K. Kyutoku, B. Lackey and M. Shibata, *Phys. Rev. D* **92**, 84050-1--16 (2015)

“Aligned spin neutron star-black hole mergers: a gravitational waveform amplitude model” DOI: 10.1103/PhysRevD.92.084050

K. Kiuchi, P. Cerda-Duran, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* **92**, 124034-1--11 (2015)

“Efficient magnetic-field amplification due to the Kelvin-Helmholtz instability in binary neutron star mergers”
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.124034

M. Shibata, H. Uchida, and Y. Sekiguchi, *Astrophys. J.* **818**, 157 (2016)

“Stability of rigidly rotating supermassive stars against gravitational collapse”
doi:10.3847/0004-637X/818/2/157

K. Hotokezaka, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, and M. Shibata, *Phys. Rev. D* **93**, 064082 (2016)

“Measurability of the tidal deformability by gravitational waves from coalescing binary neutron stars”
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.064082

〔学会発表〕(計13件)
代表者の国際会議における招待講演のみ記載

“Numerical simulations of gravitational waves with matter” in *“Gravitational Wave and Electromagnetic Studies of Compact Binary Mergers”*, Santa Barbara, July 30--Aug 3, 2012

“Virial relation and first law in scalar-tensor theories of gravity” in *“Strong gravity beyond GR”*, Lisbon, March 5--8, 2013

“Merger of binary neutron stars in numerical relativity: status and issues” in *“Gravitational Wave Tests of Alternative Theories of Gravity in the Advanced Detector Era”*, Bozeman, April 5--7, 2013

“Coalescence and explosion of compact neutron star binaries” in *“ICTS program on numerical relativity”, Bangalore, June 24--July 5, 2013*

“Binary neutron star mergers: Gravitational waves and electromagnetic counterparts” in *“Spanish relativity meeting”, Valencia, Sept 1--5, 2014*

“Binary neutron star mergers: Gravitational waves and electromagnetic counterparts” in *“NEB 16 - RECENT DEVELOPMENTS IN GRAVITY”, Mykonos, Sept 17--20, 2014*

“Merger of binary neutron stars in numerical relativity” in *“Advances and perspectives in computational nuclear physics”, Hawaii, October 5--7, 2014*

“Merger of binary neutron stars: Gravitational waves and electromagnetic counterpart” in *“Conclusion Workshop of SFB/TR7 “Gravitational Wave Astronomy””, Jena, Dec 1--5, 2014*

“Gravitational waves and dynamical mass ejection from binary neutron star merger” in *“WORKSHOP ON BINARY NEUTRON STAR MERGERS”, Thessaloniki, Greece, May 27-29, 2015*

“Merger of neutron-star binaries: gravitational waves and electromagnetic counterparts” in *“11th Amaldi conference on gravitational waves”, Kimdaejung Convention Center, Gwangju, Korea, Jun 21-26, 2015*

“Neutron star mergers, high density EoS, and gravitational waves” in *“Quark Matter 2015”, Kobe, Japan, Sept. 27--Oct.3, 2015*

“Perspective of numerical relativity in “Frontiers of Relativistic Astrophysics” in *“General Relativity and Gravitation: A Centennial Perspective”, Penn State, USA, June 7-12, 2015*

“Setting the stage: Status and issues of neutron-star binary merger in numerical relativity” in *“MICRA2015”, Stockholm, Sweden, August 17-21, 2015*

〔図書〕(計1件)

Numerical Relativity (2016年1月, World scientific, 844ページ) 著者 Masaru Shibata

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:

権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/indexj.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 大 (SHIBATA, Masaru)
京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号: 80252576

(2) 研究分担者

田越 秀行 (TAGOSHI, Hideyuki)
大阪市立大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 30311765

関口 雄一郎 (SEKIGUCHI, Yuichiro)
東邦大学・理学部・講師
研究者番号: 50531779

木内 建太 (KIUCHI, Kenta)
京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員
研究者番号: 40514196

(3) 連携研究者 なし