

平成 30 年 4 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05077

研究課題名(和文) 数値相対論 - 磁気輻射流体コードの開発とショートガンマ線バースト中心動力源への応用

研究課題名(英文) Development of Numerical Relativity neutrino Radiation MagnetoHydroDynamics code and its application to a central engine of short gamma-ray bursts

研究代表者

木内 建太 (Kiuchi, Kenta)

京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授

研究者番号：40514196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：連星中性子星合体がショートガンマ線バーストの中心動力源となりえるかという問いは高エネルギー天体物理学の未解決課題の一つである。連星合体では一般相対論的重力、ニュートリノ放射、強磁場、核密度状態方程式すべてが本質的なるため、数値シミュレーションが唯一の手立てとなる。2017年8月17日に人類史上はじめて観測された連星中性子星合体からの重力波イベントにはガンマ線バーストが付随していたと結論付けられているが、どのような物理過程でガンマ線バーストが駆動されているかはいまだに良く分かっていない。本課題では数値相対論 磁気流体ニュートリノ輻射流体コードの開発と最適化を重点的に行った。

研究成果の概要(英文)：Revealing a relation between a binary neutron star merger and a short-hard gamma-ray burst is one of the unresolved issues in the high energy astrophysics. During a merger process, all the fundamental interactions such as a relativistic gravity, weak interaction, electromagnetic interaction, and strong interaction play essential role. Therefore, numerical simulation is a unique method to explore the merger process theoretically.

Indeed, a first direction detection of gravitational waves from a binary neutron star merger on August 17th 2017, GW170817, was associated with a short gamma-ray burst GRB170817A. However, it is still under debate how to generate a gamma-ray burst in a binary neutron star merger. In this project, we mainly developed a numerical relativity neutrino radiation magnetohydrodynamics code to explore a central engine of short gamma-ray bursts and preformed a test simulation.

研究分野：数値相対論

キーワード：重力波 連星中性子星 数値相対論 ガンマ線バースト

## 1. 研究開始当初の背景

1974年にハルスとテイラーにより発見された連星中性子星PSRB1913+16の軌道周期の減少は重力波の間接的存在証明と認識され、重力波直接検出に向けた機運が高まっていた。特に研究開始当初の2015年からAdvanced LIGOによる本格観測の開始が予定されていたため、重力波の直接観測が遠くない未来に実現するものと考えられていた。特にブラックホールや中性子星を含むコンパクト連星の合体に対しては宇宙物理学に留まらず原子核物理、天文学といった分野に関係する科学的成果が期待されていた。以下に2015年以前に期待されていた科学的成果を列挙する。

**真の重力理論：**太陽系近傍や連星中性子星の観測により重力理論のテストは行われてきたが、コンパクト連星が合体するような動的かつ重力の非線形性が顕著になる状況で一般相対性理論が正しいかは良く分かっていなかった。

**核密度状態方程式：**中性子星内部の高密度状態を地上実験で再現することは不可能であるため、高密度低温状態での強い相互作用の完全な理解には至っていない。一方、中性子星を含む連星の合体を巨大な原子核の衝突実験ととらえ、重力波をプローブとして原子核物理の知見を得るアイデアは古くより提唱されてきた。特に中性子星の潮汐変形率と呼ばれる物理量を重力波観測から決定できれば真の状態方程式に迫ることができる期待されていた。

**ショートガンマ線バーストの正体：**ショートガンマ線バーストは天球の一点からガンマ線が短時間に降り注ぐ突発的高エネルギー天体現象であるが、その駆動源は長年にわたる未解決問題である。中性子星を少なくとも一つ含む連星合体はショートガンマ線バーストの駆動源の有力候補であるが、重力波とガンマ線の同時観測が合体仮説のスモッキングガンになると考えられていた。

**宇宙における重元素の起原：**鉄より重い元素のうち約半分は原子核による速い中性子捕獲反応によって合成されることが分かっているが、その合成現場は良く分かっていない。一方、理論シミュレーションの進展により中性子星を含む連星合体からは中性子過剰物質が大量に放出され、重元素が合成される可能性が指摘され始めた。特に一度重元素が合成されると、元素が放射性崩壊を起こす。その崩壊熱を熱源として可視光から近赤外帯域で電磁波放射が起こる理論モデルが提唱されていて、重力波源の電磁波対応天体として注目されていた。重力波と電磁波の同時観測は重力波観測の信頼性を向上させるものとして2010年頃から研究が盛んにおこなわれている。

以上が研究開始当初の背景であったが、2015年9月14日に連星ブラックホール合体からの重力波が直接観測されたのを皮切り

に現在まで5つの連星ブラックホール合体が重力波で観測されている。また、2017年8月17日には連星中性子星合体からの重力波が観測され、同時にガンマ線、X線、紫外-可視-近赤外線、電波の各帯域で電磁波放射が観測された。上述した期待されていた科学的成果がほぼ実証された。

## 2. 研究の目的

本研究では連星中性子星合体がショートガンマ線バーストの中心動力源となりえるのかという点に焦点を絞り、シミュレーションを用いて連星合体の過程を精査する。究極的には相対論的なジェット駆動が可能なのかという問いに答えることを目標とする。本研究ではシミュレーションに必要な数値コードの開発と最適化をまず重点的に行い、テスト計算を行う。

## 3. 研究の方法

**数値相対論 ニュートリノ輻射磁気流体コードを開発する。**ブラックホールや球対称中性子星の最大質量を大きく超えるような状況ではニュートン重力は破綻し重力場は一般相対論で記述される。合体の過程では高温高密度状態になるため、強い相互作用(高密度状態方程式)と弱い相互作用(ニュートリノ輸送)が系のダイナミクスを決める上で本質的になる。また、合体の過程で宇宙最大規模の磁場が生成される可能性があるため、電磁相互作用も重要である。また、ブラックホールや中性子星の空間スケールを解像すると同時に光速の数十パーセントで動くエジェクタの運動を追跡しなければならないためダイナミックレンジが大きな問題となっている。この問題を解決するために、解像度の異なる格子を組み合わせる多層格子法の実装が必要不可欠となる。また、大規模シミュレーションを実行するために、コードの最適化も重要である。

## 4. 研究成果

各年度の準備研究により以下のことが分かってきた。合体後の連星中性子星の残存物としては主に二つの可能性がある。合体後、長時間高速回転中性子星が生き残る場合と比較的短命でブラックホールに崩壊する場合である。一般に合体後に過渡的に誕生する高速回転中性子星は微分回転を持ち、星の寿命は角運動量輸送/喪失のプロセスで決定される。どの時点でブラックホールに崩壊するかは球対称中性子星の最大質量で決定される。GW170817では潮汐変形率が800以下である半径の小さな中性子星を预言する核密度状態方程式が示唆される。

角運動量輸送は合体過程でケルビン-ヘルムホルツ不安定性および磁気回転不安定性によって実現される磁気乱流を起源とした実行的な粘性で駆動されるが、この実行粘性がある程度大きくなると仮定すると、合体後の残存物から質量放出が起こることが分かった。

そこでまず数値相対論 ニュートリノ磁

気流体コードの開発を行った。2014年度までに開発された数値相対論 ニュートリノ輻射流体コード、数値相対論 磁気流体コードをベースに開発を行った。特にニュートリノ輻射場については M1-closure 法を実装し、またニュートリノ加熱の効果を取り入れてある。磁気流体については磁束の保存とモノポールなし条件を両立させる Balsara 法を実装している。

多層格子法を実装した場合、MPI 通信が煩雑になるため一般にスケールが悪くなるが、本コードでは使用ノードの数と1ノードが持つグリッド数が偶数となるという制約のもとに通信ルールを明示化している。この処方によりスケールが改善した。また、ニュートリノ輻射流体を実装する場合、テーブル型状態方程式を読み込む必要がある。相対論的流体を保存形式スキームで解く場合、各ステップでローレンツ因子及び相対論的エンタルピーを求めるために非線形代数方程式を反復的に解く必要がある。この反復の過程で状態方程式テーブルを呼び出す、一般にそのサイズが大きいためキャッシュミスが頻発する。この問題を軽減すべく、本コードでは各ノードが担当する密度、温度、電子存在比の範囲を各ステップでサーチした上でテーブル状態方程式をブロック分割する方法を実装した。これによりキャッシュミスが軽減された。本コードを使用してスーパーコンピュータ京でベンチマークテストを行った結果、約 32,000 コアまでストロングスケールリング 75%程度というパフォーマンスであることが分かった。

そこで GW170817 から示唆される状態方程式として SFHo をまず採用した。連星質量が太陽質量の 2.68 倍のモデルを考えた場合、約 10-15 ミリ秒程度でブラックホールへ崩壊する。崩壊後中心ブラックホールの周りに形成された降着円盤内では磁気回転不安定性が乱流を駆動すると予想されるが、テスト計算で調べた結果、本コードを使用すれば磁気回転不安定性を数値的に解像しつつ現実的な時間内で粘性タイムスケールの進化を追跡できることが分かった。今後はいよいよ本格的なシミュレーションを実行する。

#### 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 15 件)

1. "Frequency domain gravitational waveform models for inspiraling binary neutron stars", Kyohei Kawaguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi, PRD 97, no. 4, 044044 (2018)
2. "Mass Ejection from the Remnant of Binary Neutron Star Merger: Viscous-Radiation Hydrodynamics Study", Sho Fujibayashi, Kenta Kiuchi,

- Nobuya Nishimura, Yuichiro Sekiguchi, and Masaru Shibata, ApJ in press
3. "GW170817: Modeling based on numerical relativity and its implications", Masaru Shibata, Sho Fujibayashi, Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, and Masaomi Tanaka, PRD, 96, no. 12, 123012 (2017)
4. "Repeating and non-repeating fast radio bursts from binary neutron star mergers", Shotaro Yamasaki, Tomonori Totani and Kenta Kiuchi PASJ in press
5. "Neutrino transport in black-hole neutron star binaries: neutrino emission and dynamical mass ejection", Koutarou Kyutoku, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi and Masaru Shibata, PRD, 97, no. 2, 023009 (2018)
6. "High-Energy Neutrino Emission from Short Gamma-Ray Bursts: Prospects for Coincident Detection with Gravitational Wave", Shigeo, S. Kimura, Khota Murase, Peter Meszaros and Kenta Kiuchi, Astrophys.J. 848 (2017) no.1, L4
7. "Sub-radian-accuracy gravitational waveforms of coalescing binary neutron stars in numerical relativity," Kenta Kiuchi, Kyohei Kawaguchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, and Keisuke Taniguchi, PRD 96 (2017) no.8, 084060
8. "Gravitational waves from remnant massive neutron stars of binary neutron star merger: Viscous hydrodynamics effects", Masaru Shibata, Kenta Kiuchi, PRD, 95, no. 12, 123003 (2017)
9. "Properties of Neutrino-driven Ejecta from the Remnant of Binary Neutron Star Merger: Purely Radiation Hydrodynamics Case", Sho Fujibayashi, Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Masaru Shibata, Astrophys. J, 846, 114 (2017)
10. "General relativistic viscous hydrodynamics of differentially rotating neutron stars", Masaru Shibata, Kenta Kiuchi, Yu-ichiro Sekiguchi, PRD, 95, 083005 (2017)
11. "Dynamical mass ejection from the merger of asymmetric binary neutron stars: Radiation-hydrodynamics study in general relativity", Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, and Keisuke Taniguchi, PRD, 93, 124046 (2016)
12. "Multi-messenger search for rapidly-rotating strongly-magnetized

newborn neutron stars in striped-envelope supernovae”, Kazumi Kashiyama, Kohta Murase, Imre Bartos, Kenta Kiuchi, Raffaella Margutti, *Astrophys J.* 818, 94 (2016)

13. “Efficient magnetic-field amplification due to the Kelvin-Helmholtz instability in binary neutron star mergers”, Kenta Kiuchi, Pablo Cerda-Duran, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, *PRD*, 92, no. 12, 124034 (2015) (December 2015, Kaleidoscope)

14. “High-resolution magnetohydrodynamics simulation of black hole-neutron star merger: Mass ejection and short gamma-ray burst”, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, Keisuke Taniguchi, Tomohide Wada, *Phys.Rev.D* 92, 064034-1 064034-8 (2015) (Sep. 2015, Kaleidoscope)

15. “Gamma-ray and hard X-ray emission from pulsar-aided supernovae as a probe of particle acceleration in embryonic pulsar wind nebulae”, Kohta Murase, Kazumi Kashiyama, Kenta Kiuchi, Imre Bartos, *Astrophys. J.*, 805, 82 (2015)

[学会発表](計 16 件)

国際会議(招待講演)

1. Workshop/School on Recent Developments in Gravitational Waves and Astrophysics, “Introduction to a numerical modeling of binary neutron star mergers”, March 30-31th, 2018, Academia Sinica, Taiwan
2. Nuclear Astrophysics in the Gravitational Wave Astronomy Era, “High precision gravitational wave from binary neutron star mergers”, June 12<sup>th</sup>-16<sup>th</sup>, 2017, ECT\*, Italy
3. Hot topics in General Relativity and Gravitation 3, “Binary Neutron Star Merger simulation”, July. 31- Aug. 4<sup>th</sup>, 2017, Quy Nhon, Vietnam
4. International School, Aug. 14<sup>th</sup>-20<sup>th</sup>, 2017, Hong-Kong, China
5. Aspen workshop "Astrophysics of Gravitational Radiation Sources and Multimessenger Astronomy in the Era of LIGO Detections", July 9<sup>th</sup>-Aug. 6<sup>th</sup>, 2017, Aspen, USA
6. April Meeting 2017 of American Physical Society, “Simulations of binary neutron star mergers”, Jan. 28<sup>th</sup>-31th, 2017, Washington DC, USA
7. The Seventh Summer School on

Frontiers of Theoretical Physics – Gravitation and Cosmology (NSFC) / 2016 AP Summer School and Workshop on Gravitation and Cosmology (APCTP-ITP-NCTS-YITP Joint Program), Jun. 19-26<sup>th</sup>, 2016

8. Hot topics in General Relativity and Gravitation, “Recent progress of the compact binary merger simulations in Kyoto numerical relativity group”, Aug. 9-15<sup>th</sup>, 2015, Quy Nhon, Vietnam
9. International Conference on Gravitation and Cosmology, and the fourth Galileo-Xu Guangqi Meeting, “Recent progress of the binary neutron star merger simulations in numerical relativity”, May 4-8<sup>th</sup>, 2015, KITPC, Beijing, China

国内研究会(招待講演)

10. “Gravitational waves and electromagnetic signals from a binary neutron star merger GW170817”, Innovative area workshop “Why does the Universe accelerate? - Exhaustive study and challenge for the future”, Feb. 10-12<sup>th</sup>, 2018, Tohoku Univ., Sendai
11. “Numerical modeling of a central engine of short gamma-ray bursts”, 2017 Innovation of research of gamma-ray burst, Nov. 21-23th, 2017, ICRR, Tokyo
12. “Numerical modeling of binary neutron star mergers and gravitational waves”, The 25th Anniversary Memorial Symposium of CCS, Univ. Tsukuba “Progress and Future of Computational Sciences”, Oct.10-11<sup>th</sup>, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba
13. 2017 Ko-uren kenkyuukai, Mar. 9-11, 2017, Nagoya Univ. Nagoya
14. 2016 Rironkon symposium, Dec. 20-22th, 2016, Tohoku Univ. Sendai
15. JPS meeting symposium of Black holes probed by Gravitational Waves and Verification of Gravity Theories and General Relativity, Sep. 21-24<sup>th</sup> 2016, Miyazaki Univ. Miyazaki
16. ASJ special session of First detection of the gravitational waves and dawn of the gravitational wave astronomy, Sep. 14-16<sup>th</sup> 2016, Ehime Univ., Ehime

[図書](計 0 件)

[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/~kenta.kiuchi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者 木内建太 (KIUCHI, Kenta)  
京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授  
研究者番号：40514196

(2) 研究分担者 関口雄一郎 (SEKIGUCHI, Yuichiro)  
東邦大学・理学部・講師  
研究者番号：50531799

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：

(4) 研究協力者  
( )