

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740163

研究課題名(和文)大質量星重力崩壊とブラックホール形成に対する数値的研究

研究課題名(英文) Numerical simulations of gravitational collapse of the massive stellar core

研究代表者

木内 建太 (Kiuchi, Kenta)

京都大学・基礎物理学研究所・研究員

研究者番号：40514196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：一般相対論的重力、核密度状態方程式、理想磁気流体、ニュートリノ輻射輸送を実装した数値相対論コードを作成した。具体的には数値相対論-磁気流体コード、数値相対論-ニュートリノ輻射コードを連星中性子星合体及びブラックホール-中性子星合体へ転用した。これは、磁気流体不安定性を解像するには研究開始当初より遥かに高い解像度が必要であることが判明したため、物理時間にして重力崩壊より短い時間で済むコンパクト連星にコードを転用した。連星合体における磁場増幅、磁気乱流粘性、ニュートリノ輻射輸送の効果と元素合成をまとめた論文を3年間で13遍出版した。また、多数の国際会議/国内会議において招待講演を依頼された。

研究成果の概要(英文)：We have constructed a numerical relativity code in which the Einstein solver, the nuclear equation of states, the magnetohydrodynamics, and neutrino radiation transport are implemented in self-consistent way. Specifically, we developed a numerical relativity-magnetohydrodynamics code and numerical relativity-neutrino radiation transport code. Because we have realized a much finer resolution than that we set when we started this program is necessary, we shift to a project of compact binary merger simulations. In this case, the timescale is shorter than that for the gravitational collapse of the massive stellar core and it is feasible to obtain a scientific result with the current affordable computational resources.

We have revealed the magnetic-field amplification, the magnetohydrodynamical turbulence, and the effect of neutrino radiation in compact binary mergers.

研究分野：数値相対論

キーワード：重力波 中性子星 ガンマ線バースト

1. 研究開始当初の背景

重力波はアインシュタインによって約 100 年前に提唱された時空を伝える漣である。電磁相互作用に比べ重力相互作用は弱いいため透過性が高く、電磁波に代表される既存の観測手段とは質的に異なる情報をもたらされると期待されている。重力波の振幅は典型的に(水素原子)/(地球-太陽間距離)に相当し、非常に微弱な信号であることから直接観測は困難である。しかし、現在建設中であるアメリカの advanced LIGO、日本の KAGRA、イタリアの advanced VIRGO は有望な重力波源からの重力波を直接観測可能なよう設計されていて、2017 年ごろを目途に本格的観測を開始する。

このように重力波天文学の開闢は目前であり、重力波源の特性を明らかにし、到来する重力波の波形を理論予測することが喫緊の課題である。

2. 研究の目的

本研究では、有力な重力波源の一つである大質量星の重力崩壊によるブラックホール形成に焦点を充てた。この現象においては、重力相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用全てが本質的となる。また、ガンマ線バーストと呼ばれる宇宙最大の高エネルギー現象の駆動源の有力候補である。仮にガンマ線バーストと重力崩壊からの重力波が同時観測された場合、宇宙物理学における重要な未解決問題であるガンマ線バーストの中心動力源が解明される可能性が高い。

3. 研究の方法

4 つの基本相互作用を首尾一貫して取り扱うために、一般相対論的重力、原子核理論に基づく核密度状態方程式、磁気流体近似に基づく相対論的磁気流体、ニュートリノの輻射輸送を実装した数値相対論コードを作成する。このコードを用いて大規模シミュレーションを行う。

4. 研究成果

2012 年度から 2014 年度に挙げた具体的な研究成果は、数値相対論 磁気流体コードと数値相対論 ニュートリノ輻射コードの作成である。さらに、スーパーコンピューター京の使用を念頭に最適化を行った。関連する研究課題を遂行する中で、研究開始当初の設定より遥かに高い解像度が必要であることが判明した。これは、磁気流体に本質的である磁気流体不安定性を正しく再現する為である。計算コストが高くなったため、現実的な計算機資源で科学的な結果を出すために、作成した数値コードをコンパクト連星の合体に転用した。重力崩壊に比べ、連星合体で追跡すべきタイムスケールは短いので、利用可能な計算機資源で実行可能な課題である。

連星中性子星合体では、合体時にケルビンヘルムホルツ不安定性、合体後に磁気回転不安定性により磁場が有意に増幅されることが判明した。磁場効果を限定的に扱っていた既存の研究に対して、この研究で得られた

結果は既存の連星中性子星合体の描像を定性的に変えた。

また、連星中性子星合体のニュートリノ輻射シミュレーションによって、放出物質のエントロピーや電子存在比を定量的に求めた。放出物質は、潮汐力によって駆動されるエントロピーが低く、電子存在比が小さい成分と合体時の衝撃波によってエントロピーが高くなり、さらに陽電子捕獲により電子存在比が大きくなる成分に大別される。この放出物質データを元に元素合成計算を行ったところ R 過程元素の太陽系組成を再現できる可能性が判明した。

さらに、ブラックホール 中性子星連星合体における磁場の役割を明確にした。潮汐破壊によって形成された降着円盤内部で磁気回転不安定性により磁場が増幅し、乱流粘性が生じる。この粘性により質量降着が増幅され、また重力エネルギーが熱エネルギーに効率よく転換される。このプロセスにより円盤表面から円盤風が駆動されることが判明した。円盤風により回転軸方向に揃った磁場が形成され、ブラックホール磁気圏が出来る。磁場を介したブラックホール回転エネルギーの引き抜きが効率よく起き、ガンマ線バーストの中心動力源と成り得ることを示した。

今回の研究機関で構築した数値コードをベースに、重力崩壊の長時間計算ができるようポスト京へむけた研究へつなげる予定である。

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 13 件)(全て査読あり)

1) “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)

[10.1088/0004-637X/805/1/82](https://doi.org/10.1088/0004-637X/805/1/82)

2) “The dynamical mass ejection from binary neutron star mergers: Radiation-hydrodynamics study in general relativity”, Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Kyutoku Koutarou, Masaru Shibata, *Phys.Rev.D* 91, 064059-1 064059-7 (2015)

[10.1103/PhysRevD.91.064059](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.064059)

3) “High resolution numerical-relativity simulations for the

merger of binary magnetized neutron stars ”, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Tomohide Wada, Phys.Rev.D 90, 041502-1 041502-4 (R) (2014) (August 2014, Kaleidoscope) [10.1103/PhysRevD.90.041502](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.041502)

4) “ Production of all the r-process nuclides in the dynamical ejecta of neutron star mergers ”, Shinya Wanajo, Yuichiro Sekiguchi, Nobuya Nishimura, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, Astrophys. J. 789, L39 (6pp) (2014) [10.1088/2041-8205/789/2/L39](https://doi.org/10.1088/2041-8205/789/2/L39)

5) “ The Influence of Thermal Pressure on Equilibrium Models of Hypermassive Neutron Star Merger Remnants ”, J. D. Kaplan, C. D. Ott, E. P. O'Connor, K. Kiuchi, L. Roberts and M. Duez, Astrophys. J. 790, 19 (20pp) (2014) [10.1088/0004-637X/790/1/19](https://doi.org/10.1088/0004-637X/790/1/19)

6) “ Radioactively Powered Emission from Black Hole-Neutron Star Mergers ”, Masaomi Tanaka, Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Shinya Wanajo, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Astrophys. J. 780, 31 (9pp) (2014) [10.1088/0004-637X/780/1/31](https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/31)

7) “ Progenitor Models of the Electromagnetic Transient Associated with the Short Gamma Ray Burst 130603B ”, Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Masaomi Tanaka, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Shinya Wanajo, Astrophys. J. 778, L16 (5pp) (2013) [10.1088/2041-8205/778/1/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/778/1/L16)

8) “ Remnant massive neutron stars of binary neutron star mergers: Evolution process and gravitational waveform ”, Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Takayuki Muranushi, Y.-ichiro

Sekiguchi, Masaru Shibata and Keisuke Taniguchi, Phys.Rev.D 88, 044026-1, 044026-30 (2013) [10.1103/PhysRevD.88.044026](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.044026)

9) “ The mass ejection from the merger of binary neutron stars ”, Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Hirotsada Okawa, Yu-ichiro Sekiguchi, Masaru Shibata and Keisuke Taniguchi, Phys.Rev.D 87, 024001-1 024001-27 (2013) [10.1103/PhysRevD.87.024001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.024001)

10) “ Three dimensional evolution of differentially rotating magnetized neutron stars ”, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, Phys.Rev.D, 86, 064008-1 064008-18 (2012) [10.1103/PhysRevD.86.064008](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.064008)

11) “ Stably stratified magnetized stars in general relativity ”, Shijun Yoshida, Kenta Kiuchi, and Masaru Shibata, Phys.Rev.D, 86, 044012-1 044012-16 (2012) [10.1103/PhysRevD.86.044012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.044012)

12) “ Gravitational waves and neutrino emission and effects of hyperons in binary neutron star mergers ”, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, Class.Quan.Grav., 29, 124003 (8pp) (2012) [10.1088/0264-9381/29/12/124003](https://doi.org/10.1088/0264-9381/29/12/124003)

13) “ Current Status of Numerical-Relativity Simulations in Kyoto ”, Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, PTEP, 01A304 (49pp) (2012) [10.1093/ptep/pts011](https://doi.org/10.1093/ptep/pts011)

〔学会発表〕(計15件)

招待講演のみ掲載

国際会議(招待講演)

1)Kenta Kiuchi, Magnetic Reconnection 2014, “ Magnetized binary neutron star

merger simulations on K”, 20-24th, May, 2014, Tokyo University, Tokyo, Japan

国内会議（招待講演）

1) 木内建太、コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域、「ブラックホール-中性子星連星合体」、2015年2月12日-14日、京都大学基礎物理学研究所、京都

2) 木内建太、高エネルギー宇宙物理学研究会 2014、「連星中性子星合体における磁場増幅」、2014年11月23日 - 25日、九州大学西新プラザ、福岡

3) 木内建太、Plasma2014, Plasma Conference 2014、「京を用いた連星磁場中性子星の数値相対論シミュレーション」、2014年11月18日 - 21日、朱鷺メッセ、新潟

4) 木内建太、理論天文学研究会 2014、「ブラックホール 磁場中性子星連星合体」、2014年11月10日 - 12日、休暇村館山、千葉

5) 木内建太、コンパクト天体の活動性と磁氣的性質、「連星中性子星合体における磁場増幅」、2014年10月27日 - 29日、国立天文台、三鷹

6) 木内建太、JpGU2014年大会、プラズマ宇宙物理3学会合同セッション、「京を用いた磁場連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション」、2014年4月28日 - 5月2日、2014、横浜パシフィコ、横浜

7) 木内建太、第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理の新展開」、「数値相対論」、2012年、12月22 - 24日、つくば国際会議場、茨城

〔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：
出願年月日：
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/GWRC/>

解説記事

1. 数値的相対論シミュレーションで解き明かす連星中性子星合体の現実的描像、木内建太、天文月報 CfCA 特集(1)、2015年2月号

2. 連星中性子星合体からの重力波及びニュートリノ放射、木内建太 関口雄一郎、日本物理学会誌第67巻8号560ページ

アウトリーチ活動

1. Lecturer of the Summer School “2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves”, 3rd-10th, August, 2013, APCTP (Korea)

2. インタビュー(計算基礎科学連携拠点)
<http://www.jicfus.jp/jp/2014-1m/>

3. プレスリリース(京都大学)

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/140901_1.html

4. 取材協力

NHK BS コズミックフロント「アインシュタイン 最後の宿題 重力波を探せ」

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任助教

研究者番号：40514196

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：