

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 5 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740178

研究課題名（和文）連星中性子星合体とショートガンマ線バースト

研究課題名（英文）Binary neutron star mergers and 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・特定研究員

研究者番号：40514196

研究成果の概要（和文）：連星中性子星の合体過程を理論的に調べた。具体的には、核密度状態方程式、ニュートリノ冷却、磁場を実装した数値的相対論シミュレーションを実行した。1500 万光年以内で合体イベントが発生した場合、次世代重力波干渉計 KAGRA、Advanced LIGO で観測可能である事を定量的に示した。また、Hyper-Kamiokande を用いたニュートリノの同時観測も可能である。また重力波によるガンマ線バースト駆動源の検証が可能である事を示した。合体後の中性子星内で増幅された磁場によって駆動されるアウトフローがガンマ線バーストを起こし得る可能性を示唆した。

研究成果の概要（英文）：We theoretically investigated binary neutron star mergers by Numerical Relativity. We found that such an event could be detected by the gravitational wave observatory KAGRA and Advanced LIGO if it happened within the distance of about fifteen millions light years. We found that neutrinos from such a event could be simultaneously detected by the Hyper-Kamiokande as well. We quantitatively showed that the gravitational waves can assess the so-called merger hypothesis of gamma-ray bursts. If neutron stars have a magnetic field as large as that of magnetars, the amplified magnetic field by the magnetic winding can produce a poynting flux whose amplitude is as large as that of short-gamma ray burst.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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、重力波

1. 研究開始当初の背景

連星中性子星合体は地上型重力波干渉計 KAGRA, Advanced LIGO, Advanced VIRG の重要なターゲットの一つである。連星合体からの重力波を受ける事が出来れば、強重力場に

おける一般相対性理論の検証のみならず、高密度物質の性質を探る事ができる。また、連星中性子星合体はショートガンマ線バーストと呼ばれる宇宙最大規模の爆発現象を引き起こす駆動源であるという理論仮説が提

唱されている。仮に重力波とガンマ線バーストが同時観測されれば、この理論仮説の検証が可能かもしれない。

2. 研究の目的

1に述べた背景の下で、連星合体からの重力波を理論的に精査することは急務である。観測された波形から波源の持つ物理情報を抽出する為には、比較となる理論波形を準備する必要があるからだ。また、ガンマ線バーストと同時観測された場合を想定し、どのように駆動源を重力波で探るかを明確にする必要がある。

本研究の目的は、連星中性子星合体からの重力波を理論予測し、観測に先立った提言を与える事である。

3. 研究の方法

連星中性子星合体は、激しい時間変動を伴う現象であるため、解析的な手法は通用しない。そこで本研究では数値的相対論を研究手法として用いた。数値的相対論とは、アインシュタイン方程式と流体力学方程式、ニュートリノ輻射輸送等を連立させて数値的に同時に解き、強重力場中の高エネルギー天体现象の解明を目指す研究分野である。具体的には、数値的相対論の標準的定式化である

Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura 定式化に基づく一般相対論的重力場の時間発展、原子核理論に基づく核密度状態方程式、一般相対論的ニュートリノ漏れ出し法によるニュートリノ輸送、磁気流体近似に基づく磁場などを実装した数値コードを用いて、研究期間内に様々な数値シミュレーションを実行した。

4. 研究成果

(1) 微視的物理過程を組み込んだ連星合体シミュレーション及び核密度状態方程式に対する系統的サーチ：論文1, 2では核密度状態方程式とニュートリノ冷却を実装した数値相対論シミュレーションを実行し、1500万光年以内で合体现象が起これば、重力波とニュートリノによる同時観測が可能である事を世界で初めて定量的に示した。さらに中性子星が通常核物質/ハイペロン物質で構成される場合について調べた結果、重力波観測によりハイペロン物質の存在に制限を付ける事が可能である事を突き止めた。標準的な質量の連星中性子星の場合、合体後重い中性子星が形成され、その回転に付随する重力波が放射される。通常核物質の場合、この重力波振動数は一定であるのに対し、ハイペロン物質では振動数が時間とともに増加することが分かった。

また、論文4では核密度状態方程式及び連星質量に関する系統的サーチを行い、合体後

に高速回転中性子星が出来る条件を明確にした。PSR J1614-2230の観測により中性子星最大質量には2太陽質量という制限が付いている。この制限にかからない核密度状態方程式の場合、高速回転中性子星が少なくとも一時的に形成される可能性が高い事が分かった。

(2) ガンマ線バースト中心動力源：ガンマ線バーストの中心動力源は恒星サイズのブラックホールと降着円盤であるというマージャー仮説を重力波で検証可能かを調べた(論文3)。降着円盤中では古くより知られているPapaloizou-Pringle不安定性が成長し非軸対称な円盤構造が残される事が分かった。この構造に起因して、ブラックホール-降着円盤から成る系は有望な重力放射源に成り得ることを明らかにした。すなわち、重力波とガンマ線バーストが同時観測されたならばこのメカニズムによって重力波が放出された可能性が高く、マージャー仮説の検証となりえる。また相対論的ジェットが中心動力源より駆動されると仮定したジェットの伝搬シミュレーションを行い放射とジェットの関係を明らかにした(論文8)。

(3) 磁場中性子星の時間発展：合体後に出来る高速回転中性子星は一般に強い微分回転をしている。中性子星に磁場が存在すれば、磁気流体力学的相互作用により磁場が増幅することが知られている。論文5では磁場中性子星からは磁場の巻き込みによりタワー型アウトフローが駆動され、大きな振幅を持ったポインティングフラックスが放射されることが分かった。磁場の巻き込みにより増幅された回転方向の磁場(トロイダル磁場)には様々な磁気流体不安定性が付随する。論文6では、この状況をトロイダル磁場を持った中性子星でモデル化し、数値シミュレーションを用いて星の安定性を調べた。

線形理論の予測通り、星表面付近でパーカー不安定性が成長し、磁場形状が非軸対称な構造に発展することを明らかにした。この磁気浮力不安定性は、回転の効果を考えても現れる事を突き止めた。中性子星内部で磁場が安定に存在するためには、成層の効果やポロイダル磁場が必要である事が分かった。

本申請課題では、連星中性子星合体における核密度状態方程式/ニュートリノ反応といった微視的物理過程と磁場の効果に関して、各々の方向からアプローチを行った。また、重力波を用いたマージャー仮説の検証を議論した。各研究項目の結果は査読付き論文として出版された事から当初の予定通りの結果が出たと言える。特に論文1-3はPhysical Review Lettersに掲載され、世界

的にも高く評価されていることが分かる。

今後は本申請課題で差別化を図った各要素を包括的に扱う研究を予定している。

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8件)

以下、全て査読付き

1. “Effects of hyperons in binary neutron star mergers”, Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, Phys.Rev.Lett., 107, 211101 (2011)

DOI:10.1103/PhysRevLett.107.211101

2. “Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars”, Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku and Masaru Shibata, Phys.Rev.Lett., 107, 051102 (2011)

DOI:10.1103/PhysRevLett.107.051102

3. “Gravitational waves from the Papaloizou-Pringle instability in black hole-torus systems”, Kenta Kiuchi, Masaru Shibata, Pedro J. Montero and Jose A. Font, Phys.Rev.Lett., 106, 251102 (2011)

DOI:10.1103/PhysRevLett.106.251102

4. “Binary Neutron Star Mergers: Dependence on the Nuclear Equation of State”, Kenta Hotokezaka, Koutarou Kyutoku, Hirotada Okawa, Masaru Shibata and Kenta Kiuchi, Phys.Rev.D., 83, 124008 (2011)

DOI:10.1103/PhysRevD.83.124008

5. “Afterglow of binary neutron star merger”, Masaru Shibata, Yudai Suwa, Kenta Kiuchi and Kunihiro Ioka, Astrophys. J. Lett., 734, L36 (2011)

DOI:10.1088/2041-8205/734/2/L36

6. “Non-axisymmetric instabilities of neutron star with toroidal magnetic fields”, Kenta Kiuchi, Shijun Yoshida and Masaru Shibata, Astron. Astrophys., 532, A30 (2011)

DOI:10.1051/004-6361/201016242

7. “Truncated Moment Formalism for Radiation Hydrodynamics in Numerical Relativity”, Masaru Shibata, Kenta

Kiuchi, Yu-ichirou Sekiguchi and Yudai Suwa, Prog.Theo.Phys., 125, 1255 (2011)

DOI:10.1143/PTP.125.1255

8. “Jet propagations, breakouts and photospheric emissions in collapsing massive progenitors of long duration gamma ray bursts”, Hiroki Nagakura, Hirotaka Ito, Kenta Kiuchi and Shoichi Yamada, Astrophys.J., 731, 80 (2011)

DOI:10.1088/004-637X/731/2/80

[学会発表] (計10件)

1. “Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars”, Kenta Kiuchi, NRDA (招待講演), 2011/7/10, Cardiff University(Wales)

2. “Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars”, Kenta Kiuchi, ASTRONUM2011, 2011/6/17, Valencia (Spain)

3. “Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars”, Kenta Kiuchi, JGRG21, 2011/9/25, Tohoku University (Sendai)

4. “ブラックホール円盤系における Papaloizou-Pringle 不安定性と重力波”、木内建太、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011/9/16、弘前大学 (青森)

5. “重力波で探るガンマ線バーストの中心動力源”、木内建太、日本天文学会 2011 年秋季年会、2011/9/19、鹿児島大学 (鹿児島)

6. “重力波によるガンマ線バースト中心エンジンの検証”、木内建太、超新星研究会 2011, 2011/3/1、国立天文台 (東京)

7. “数値的相対論で解き明かす一般相対論的天体現象”、木内建太、HPCS2011, 2011/1/18、産業技術総合研究所 (茨城)

8. “Recent research progress of Numerical Relativity group in Kyoto University”, Kenta Kiuchi, from Quark to Supernova, 2011/11/28, 熱川 (静岡)

9. “Non-axisymmetric instability of toroidal magnetic fields in neutron stars”, Kenta Kiuchi, EANAM2010, 2010/11/2, Taipei (Taiwan)

10.” Non-axisymmetric instability of toroidal magnetic fields in neutron stars”, Kenta Kiuchi, Spanish Relativity Meeting, 2010/9/6, Granada (Spain)

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・特定研究員
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 :