

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 7 月 2 日現在

機関番号：54502

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06813

研究課題名(和文) Constraining the Equation of State of Neutron Stars via Accurate Gravitational Waveforms from Binary Neutron Stars

研究課題名(英文) Constraining the Equation of State of Neutron Stars via Accurate Gravitational Waveforms from Binary Neutron Stars

研究代表者

高見 健太郎 (Takami, Kentaro)

神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・講師

研究者番号：70758002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：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世界で始めて観測された。アインシュタインが重力波の存在を理論的に予言してから約100年後の出来事である。これにより、重力波天文学に対する研究が益々重要になってきている。本研究は、連星ブラックホール合体に引き続いて観測が期待されている連星中性子星合体からの重力波を用いて、中性子星の様々な情報を引き出すことを主眼に行われた。得られた成果の一例を紹介する：数値相対論を用いて、得られる重力波の特徴的振動数と中性子星の物理量との普遍的相関関係を発見した。さらにそれを用いて、観測される重力波から中性子星の半径や状態方程式を決める方法を構築した。

研究成果の概要(英文)：The first direct gravitational wave (GW) signal, which has been interpreted as from a binary black hole, were observed in 14 September 2015. Therefore it is urgently necessary to theoretically understand "nature" related to GW for new era of GW astronomy. The main purpose in this study had been to extract information of neutron stars (NSs) from GW of binary NS mergers. Then we had obtained many important results. For example, the universal relations between the characteristic frequencies of GW and the physical quantities of NSs, have been found. By using the relations, in addition, we have constructed the powerful methods to decide the radii and an equation of state of NSs.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：宇宙物理 計算物理 理論天文学 重力波 連星中性子星 数値相対論 状態方程式 大質量星

1. 研究開始当初の背景

重力波の存在が予言されてから約 100 年が経過した今日においても、未だその直接的観測には成功していない(注 1)。しかし、advanced LIGO、advanced VIRGO、KAGRA といった次世代型地上重力波検出装置が数年以内に稼働することから、重力波の直接検出が 5 年以内に行われると考えられている。

連星中性子星からの重力波は、もっとも観測可能性が高い重力波源のひとつであり、特に、インスパイラルの最後の数秒(合体直前)・合体・それに続く大質量中性子星からの重力波は、重力波天文学の時代を切り開く大きな一歩となる(注 2)。

このような状況により、観測される重力波から膨大な情報を引き出して物理現象を理解するために連星中性子星の衝突合体過程の詳細を理論的に解明することが重要かつ急務である。

注 1 : 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世界で始めて観測された。

注 2 : 2017 年 3 月 31 日現在、連星中性子星からの重力波は未だに直接観測されたことはない。

2. 研究の目的

population-synthesis モデルに基づいた研究によると、連星中性子星合体からの重力波は年間 40 イベント程度観測される[Abadie et al. 2010]。これは、連星系の特徴を統計的に研究することを可能にするだけでなく、合体前の個々の中性子星の質量や半径、そして中性子星を構成している高密度物質の状態方程式に関する情報を引き出すことも可能にする。特に、中性子星が大きく潮汐変形したインスパイラルの最終段階(合体直前)と合体後におけるダイナミクス及びそこから放射される重力波は、状態方程式の影響を大きく受けると考えられているので、詳細な理論研究が精力的に行われている(e.g., [Read et al. 2013])。

現在までのところ、中性子星固有の物理量などが重力波の波形に影響するなどの定性的な議論は多くされているものの、「何がどのよう」、「何がどの程度」影響されるかなどの定量的な研究は少ない。

本研究において、連星中性子星合体からの重力波が、中性子星の状態方程式・質量・質量

比によってどのように影響されるかを定量的に明らかにする。さらには、この結果を利用して、実際に観測されるであろう重力波から、重力波源である連星中性子星の「高密度な状態方程式」、「質量」や「半径」などを決定する手法を開発する。

3. 研究の方法

連星中性子星の合体過程全体(インスパイラル・潮汐変形・合体・大質量中性子星・ブラックホール形成)を統一的に考えるためには、数 KeV から 100MeV に達する幅広い温度及び核飽和密度の数十倍に達する高密度を取り扱える状態方程式、ニュートリノ輻射などの微視物理学、高速の数十パーセントに達する相対論的ダイナミクス、強い重力によって大きく曲がった時空などを同時に取り扱う必要があり、このような非常に複雑な現象とそれによって生成・観測される重力波の両方を精度よくモデル化するためには、非常に大きな計算機パワーを必要とする数値相対論が唯一の研究手法である。

核密度を超える中性子星の状態方程式は未だに未知であるため、現実的な中性子星を効率的にモデリングするために、piecewise polytropic 状態方程式(区分ごとに異なる係数を持つ polytropic 状態方程式を複数組み合わせたもの)に理想流体状態方程式による熱的寄与を考慮したハイブリッド状態方程式を用いて、連星中性子星の合体過程全体(inspiral-merger-ringdown 過程)を統一的に取り扱った。そして、そのダイナミクス、及びそこから放射される重力波を、数値相対論を用いて高精度に求めることを行った。

これらの計算を、膨大な数のモデル(様々な状態方程式・質量・質量比)に対して行い、重力波への影響を系統的に調べることを行った。

4. 研究成果

本研究を通して得られた主な成果を以下のように簡潔にまとめる。

連星中性子星合体から放射される重力波には多くの情報が含まれており、例えば、そのパワースペクトル密度には、複数の特徴的なピークが存在していることが知られていた。本研究において、質量・質量比・状態方程式に対する合体後の状態やそこから出てくる重力波の依存性を系統的に明らかにした。特に、軽い中性子星から重い中性子星まで幅広

い質量に対して連星中性子星合体を考えたことは重要であり、他のグループから指摘されていた質量に対するセレクション・エフェクトを払拭し、多くの重要な相関関係を確かなものとした。とりわけ、状態方程式に依存しない普遍的な相関関係の発見や再確認は非常に重要なことである。

さらに、これらの相関関係を利用することで、観測される重力波から高密度な状態方程式・中性子星の半径や質量を制限する新しい方法を開発した。この方法では、遠方のイベントなどで重力波の信号が十分弱くても、観測数が増えるに従って精度が向上していく。例えば、100-300Mpc に位置する連星中性子星合体からの重力波であっても、100 イベント観測することで、10%以内の精度で中性子星の半径を決定することができる。

また、連星中性子星合体のダイナミクスを分析することで、合体後に形成される大質量中性子星における角速度分布の依存性や現実的な差動回転則の発見を行った。

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 4 件)

Sukanta Bose, Kabir Chakravarti, Luciano Rezzolla, B. S. Sathyaprakash, Kentaro Takami,
Neutron-star Radius from a Population of Binary Neutron Star Mergers",
submitted to Phys. Rev. Lett..

Matthias Hanauskem, Kentaro Takami,
Luke Bovard, Luciano Rezzolla, Jose A. Font, Filippo Galeazzi and Horst Stocker,
Rotational properties of hypermassive neutron stars from binary mergers",
submitted to Phys. Rev. D.

Ariadna Murguia-Berthier, Enrico Ramirez-Ruiz, Gabriela Montes, Fabio De Colle, Luciano Rezzolla, Stephan Rosswog, Kentaro Takami, Albino Perego and William H. Lee,
The Properties of Short gamma-ray burst Jets Triggered by neutron star mergers",
Astrophys. J. Lett., 835, L34, 2017.

Luciano Rezzolla and Kentaro Takami,
Gravitational-wave signal from binary neutron stars: a systematic analysis

of the spectral properties",
Phys. Rev. D, 93, 124051, 2016.

[学会発表](計 5 件)

Kentaro Takami,
Status Update and Future on Simulations of Binary Neutron Stars",
Physics and Astrophysics at the eXtreme (PAX) workshop, Pennsylvania (USA), Dec 1-3, 2016.

Kentaro Takami and Luciano Rezzolla,
Gravitational-wave signal from binary neutron stars: a systematic analysis of the spectral properties",
Nuclear Physics, Compact Stars, and Compact Star Mergers 2016, Kyoto (Japan), October 31 - November 4, 2016.

Kentaro Takami, Matthias Hanauske and Luciano Rezzolla,
Rotational Properties of Hypermassive Neutron Stars from Binary Mergers",
1st CORE-U Conference: Intense Fields and Extreme Universe, Hiroshima (Japan), March 7-8, 2016.

Kentaro Takami, Matthias Hanauske and Luciano Rezzolla,
Rotational Properties of Hypermassive Neutron Stars from Binary Mergers",
THE TWENTY-FIFTH WORKSHOP ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION in JAPAN, Kyoto (Japan), December 7-11, 2015.

Kentaro Takami, Matthias Hanauske, Luciano Rezzolla, Filippo Galeazzi, Bruno Mundim, Luke Bovard and Jose A. Font,
Structural Properties of Hypermassive Neutron Stars",
14th Marcel Grossmann Meeting, Rome (Italy), July 12-18, 2015.

[図書](計 0 件)

[産業財産権](計 0 件)

[その他]

ホームページ等

Gravitational-Waveform Catalog :
http://www.kobe-kosen.ac.jp/~takami/KTakami/contents/research/public_d

6 . 研究組織

(1)研究代表者

高見 健太郎 (TAKAMI, Kentaro)
神戸市立工業高等専門学校・講師
研究者番号： 70758002

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

Luciano Rezzolla (Rezzolla, Luciano)
Goethe University Frankfurt, Institute
for Theoretical Physics・教授