

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：54502
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2023
課題番号：17K14305
研究課題名(和文) Accurate Modelling to Extract the Variety of Information from the Imminent Detection of Gravitational Waves from Binary Neutron Stars
研究課題名(英文) Accurate Modelling to Extract the Variety of Information from the Imminent Detection of Gravitational Waves 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・准教授
研究者番号：70758002
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：2015年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、2017年には連星中性子星合体からの重力波とそれに付随したショートガンマ線バーストの観測にも成功しました。このような状況から、重力波を通して極限的な状況である連星中性子星合体における様々な物理現象の理解が深まると考えられ、その研究の重要性が高まっています。

本研究では、理想流体による熱的寄与を考慮したハイブリッド状態方程式の手法を用いることで、クォーク物質を含む最先端の様々な状態方程式を利用した連星中性子星合体のシミュレーションを実行し、状態方程式や質量の重力波への影響などを系統的に調べ、その性質などを明らかにしました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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年が経ち、遂に私達は重力波を観測することができるようになりました。これは、既存の電磁波などを用いた観測とは全く異なる新しい「目」を手に入れたことになり、重力波天文学の発展が期待されています。この新しい目は、例えば、極限環境である連星中性子星合体を見ることを可能にします。本研究成果は、この目を使って、地球上では再現することが出来ない核密度を超える高密度状態の性質などを連星中性子星合体を通して調べる方法を提供し、人類の知見を広げるのに役立ちます。

研究成果の概要(英文)：In 2015, gravitational waves from the coalescence of binary black holes were observed for the first time in the world, and in 2017, the observation of gravitational waves from the coalescence of binary neutron stars and the accompanying short gamma-ray bursts was also successfully done. Therefore, it is time to understand the various physical phenomena in coalescences of binary neutron stars through gravitational waves.

In this study, we have used a hybrid equation of state which takes into account the thermal contribution by an ideal fluids to compute binary neutron star mergers. Thanks to the treatment of the equation of state, we are allowed to use various cutting edge equation of states, including quark matter. We have investigated the dynamics for and the gravitational waves from binary neutron star mergers, which depend on the equation of states and masses.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：重力波 連星中性子星 数値相対論 高密度状態方程式 クォーク物質

1. 研究開始当初の背景

2015年9月、連星ブラックホール合体からの重力波が世界で初めて観測され、2017年のノーベル物理学賞はこの業績に対して行われました。その後も、数例の連星ブラックホールからの重力波が観測されていました。それに加えて、まだたった1例でしたが、2017年に連星中性子星合体からの重力波も観測することに成功しました。その上、幸いにしてこのイベントは同時にショートガンマ線バーストも観測することに成功し、重力波以外でのフォローアップに成功し多くの物理情報を取り出すことに成功しました。

このような状況から、今後多くの連星中性子星合体からの重力波が観測されることが期待されていました。それにより、重力波を通して、極限的な状況である連星中性子星合体における様々な物理現象の理解が深まると考えられ、連星中性子星合体の理論研究の重要性が高まっていました。

2. 研究の目的

連星中性子星合体に付随して起こると考えられているガンマ線バーストなどは電磁波を通して観測できる一方、連星中性子星合体自身のダイナミクスや超高密度状態の物質に関する情報は重力波を通してしか知ることができません。そこで、本研究では、観測される連星中性子星合体からの重力波から様々な物理情報(例えば、中性子星の状態方程式・質量・質量比など)を引き出すことを目的としました。特に放射される重力波の状態方程式依存性に重点を置いていました。

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す。

核密度を超える中性子星の状態方程式は、精力的に研究が行われており、幾つもの状態方程式が提案されています。しかし、有限温度を考慮した状態方程式はまだ少ないことから、本研究では、様々な冷たい物質の状態方程式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)を統一的に取り扱うことにしました。この状態方程式の取り扱い、クオーク物質を含む最先端の状態方程式を利用することを可能とします。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いました。

これらの計算を、多数のモデル(様々な状態方程式や質量など)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いました。

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ます：

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ます。そこで、様々な質量・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ました。

その中で得られた様々な連星中性子星合体後に形成される高速回転する大質量中性子星の差動回転則を詳しく調べることで、現実的な差動回転則を世界で初めて提案しました。

また、より現実に近いと考えられている状態方程式である quark-hadron crossover (QHC) を用いた連星中性子星合体のシミュレーションも世界で初めて行い、そこから放射される重力波の特徴的振動数の一つ(f_2)の分析から、異なるタイプの QHC 状態方程式自身の特徴と連星中性子星合体から放射される重力波の特徴との関連性を示しました。

一方、実際に宇宙で起こる連星中性子星合体の発生確率は低いと考えられるため、遠方で発生した合体からの重力波も重要な情報源となります。そこで、遠方から伝わってくる重力波をシミュレーションし、その波形を統計的に解析する手法を開発しました。これは、非常に弱い重力波波形であっても、観測数を増やすことで精度良く中性子星の半径を決めることを可能にします。

ところで、実際に連星中性子星合体からの重力波を観測するためには、その観測の難しさから、上記で行ったシミュレーションから得られる重力波波形の理論予測（重力波波形のテンプレート）を多く必要とします。しかし、そのシミュレーションは非常に膨大な計算コストを必要とするため、多くのテンプレートを準備することは容易ではありません。そこで、シミュレーションで得た様々なケースの波形を機械学習させることで、シミュレーションを実行することなく擬似的に波形を予測する手法を開発し、今後の重力波観測に備えたテンプレートを低コストで作成する手法を考案し、その実用可能性を示しました。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Huang Yong-Jia, Baiotti Luca, Kojo Toru, Takami Kentaro, Sotani Hajime, Togashi Hajime, Hatsuda Tetsuo, Nagataki Shigehiro, Fan Yi-Zhong	4. 巻 129
2. 論文標題 Merger and Postmerger of Binary Neutron Stars with a Quark-Hadron Crossover Equation of State	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 181101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.129.181101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Easter Paul J., Lasky Paul D., Casey Andrew R., Rezzolla Luciano, Takami Kentaro	4. 巻 100
2. 論文標題 Computing fast and reliable gravitational waveforms of binary neutron star merger remnants	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.100.043005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Paul J. Easter, Paul D. Lasky, Andrew R. Casey, Luciano Rezzolla, Kentaro Takami	4. 巻 0
2. 論文標題 Computing Fast and Reliable Gravitational Waveforms of Binary Neutron Star Merger Remnants	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D（投稿中）	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 10.1103/PhysRevLett.120.031102	4. 巻 120
2. 論文標題 Sukanta Bose, Kabir Chakravarti, Luciano Rezzolla, B. S. Sathyaprakash, Kentaro Takami	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 31102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.120.031102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matthias Hanauskem, Kentaro Takami, Luke Bovard, Luciano Rezzolla, Jos ^{ph} A. Font, Filippo Galeazzi, Horst St ^{efan} o	4. 巻 96
2. 論文標題 Rotational properties of hypermassive neutron stars from binary mergers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.043004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matthias Hanauskem, Jan Steinheimer, Luke Bovard, Ayon Mukherjee, Stefan Schramm, Kentaro Takami, Jens Papanfort, Natascha Wechselberger, Luciano Rezzolla, Horst St ^{efan} o	4. 巻 878
2. 論文標題 Including Remarks: Connecting Relativistic Heavy Ion Collisions and Neutron Star Mergers by the Equation of State of Dense Hadron- and Quark Matter as signalled by Gravitational Waves	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics Conference Series	6. 最初と最後の頁 12031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/878/1/012031	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Kentaro TAKAMI
2. 発表標題 NR Waveforms from BNS Mergers and the Utilizations
3. 学会等名 Workshop to bring together experts on High Energy Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高見健太郎
2. 発表標題 今話題の「重力波」ってなあに?
3. 学会等名 ナレッジキャピタル大学校 (後援:総務省など) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高見健太郎
2. 発表標題 相対論的天体現象に関する理論的研究
3. 学会等名 ナレッジキャピタル大学校 (後援:総務省など) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽生宏人,松本健,永崎将利,磯部洋明,高見健太郎
2. 発表標題 宇宙大討論会
3. 学会等名 ナレッジキャピタル大学校 (後援:総務省など) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高見健太郎
2. 発表標題 中性子星合体シミュレーションと状態方程式
3. 学会等名 iTHEMS-Kyushu WS - from particles and nuclei to cosmos- (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Takami
2. 発表標題 Neutron-star Radius from a Population of Binary Neutron Star Mergers
3. 学会等名 TWENTY-SEVENTH WORKSHOP ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION in JAPAN (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高見健太郎
2. 発表標題 連星中性子星合体からの重力波と状態方程式
3. 学会等名 X線天体と元素合成を中心とする宇宙核物理研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Gravitational-Waveform Catalog http://www.kobe-kosen.ac.jp/~takami/KTakami/contents/research/public_data/GW_Catalog/GW_Catalog_en.html

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	Goethe University Frankfurt	Frankfurt Institute for Advanced Studies		
中国	Chinese Academy of Science	University of Science and Technology		
オーストラリア	Monash University	ARC of Excellence for GW Discovery		
India	IUCAA			
United States of America	Washington State University	Pennsylvania State University		

共同研究相手国	相手方研究機関			
United Kingdom	Cardiff University			