

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03622

研究課題名（和文）Exploring magnetic properties of neutron-star matter through gravitational waves

研究課題名（英文）Exploring magnetic properties of neutron-star matter through gravitational waves

研究代表者

Baiotti Luca (Baiotti, Luca)

大阪大学・インターナショナルカレッジ・准教授

研究者番号：00574047

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙で最も謎の多い天体の一つである中性子星を研究した。中性子星は、宇宙で最も密度が高く、最も磁場が強い天体である。その密度は核密度の数倍にも達し、クォークがハドロンに結合していない状態（フリークォーク物質）である可能性がある。これらの密度により、地上の研究所では再現不可能な物理を研究することができる。本研究は、この超高密度物理を、連星中性子星から放出される重力波の観測と結びつけた。中性子星にフリークォークが存在することを推測する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、本プロジェクトは中性子星の中でクロスオーバーによって生じるフリークォーク物質について、重力波の観測を用いた実用的な研究への道を開いた。社会的には、人類の特権である知的充足感の源の一つである宇宙への理解を広げる努力に少しは貢献できたと思う。

研究成果の概要（英文）：We have investigated one of the most mysterious objects in the universe: neutron stars. They are the highest-density objects in the universe and those with the highest magnetic fields. Their density reaches up to several times the nuclear density, where quarks are probably non-confined into hadrons (free quark matter). These densities allow us to study physics that is not reproducible in any terrestrial lab. Our research connected this ultra-high-density physics to observations of gravitational waves emitted by binary systems of neutron stars. We proposed ways to infer the presence of free quarks in neutron stars

研究分野：宇宙物理

キーワード：Neutron stars Binary mergers Equations of state Gravitational waves Magnetic fields

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

重力波観測の時代は、2015年に連星ブラックホールの合体の検出と測定から始まり、2017年の夏には連星中性子星系の合体による重力波信号も初めて観測された。連星中性子星系は、重力波、電磁波、ニュートリノを含むマルチメッセンジャー観測によって、ショートガンマ線バーストの起源、キロノバ、重元素合成、超高密度物質の状態方程式といったさまざまな物理現象を把握することができるだろう。

連星中性子星の合体のダイナミクスは、主に重力と流体力学によって駆動されるが、特にガンマ線バーストの発生に関連して、ある局面では磁場も重要な役割を果たす(ニュートリノもある局面に役割を演じる可能性がある)。それぞれの中性子星に存在すると考えられている 10^8 - 10^{10} G の磁場は、磁気圧縮、乱流増幅、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性、差回転による磁気巻き上げ、磁気回転不安定性などによって合体時および合体後の 10^{12} - 10^{15} G に達するまで増幅されると考えられている。インスパイラル時に磁場の影響は小さいが、このような強い磁場は、合体後の物質のダイナミクスに大きな影響を与えて、観測できる電磁放射(特にガンマ線バースト)を生み出すメカニズムにも直接関係していると考えられている。

連星中性子星の合体の複雑な非線形性を、特に合体中と合体後に十分現実的かつ正確に研究するためには、完全な 3 次元数値シミュレーションが必要である。それは少なくともアインシュタイン方程式、相対論的流体力学方程式、相対論的理想磁気流体力学方程式を解く必要があるが、プラズマの不安定性や磁気リコネクションによる大量のエネルギーの放出を起こしうするため、そのような抵抗効果を取り入れることも重要である。

抵抗性電磁流体力学コードは、方程式が複雑であること、数値解法がハードであること、抵抗率の現実的な値がわかっていない(実験や現在の天体観測で、連星中性子星の合体で現れる温度、質量密度、磁場に厳しい制限がない)ことから、構築や使用がきわめて難しいである。

多くのシミュレーションでは抵抗率の逆数である導電率がパラメータとして使用される。一般に、導電率はテンソルであり、質量密度、内部エネルギー密度、磁場などに依存する。しかし、衝突の時間スケールが電子サイクロトロン周期よりはるかに小さい場合、電子が本質的に磁力線に沿って動く近似が有効で、抵抗テンソルは計量テンソルに比例すると仮定することができる。事実上、シミュレーションでは、導電率は定数か質量密度だけに依存する仮定が多い。

2. 研究の目的

目的は、連星中性子星系の合体時および合体後の重力波観測と数値シミュレーション結果を比較することで、中性子星とその周辺の物質の抵抗率に関する情報を得ることである。連星中性子星合体のための相対論的抵抗性磁気流体力学の正確なシミュレーションを複雑さを克服するため、かつ十分な数の連星中性子星合体の正確な観測を得るための時間が長いので、これは長期的なプロジェクトである。とりわけ、磁場がダイナミクスに与える影響を測定できるように、合体後の重力波形を十分に詳細に検出することは、アインシュタイン望遠鏡など第 3 世代の検出機を使う必要がある。

3. 研究の方法

中性子星とその周辺の物質の抵抗率を探るために、連星中性子星の一般相対性理論的な抵抗性磁気電磁流体力学シミュレーションを走らせた。物質に囲まれた合体後の天体のダイナミクスをうまく記述するのに、低密度領域で電磁場が真空のように振る舞うことを保証するため、高導電性の中性子星内部を電気真空の外部に一致させるシミュレーションコードを利用した。コードはアインシュタインツールキットという計算ツールを利用して構築されてある。アインシュタインツールキットの中には、メッシュリファインメントを実装するドライバも含んでいる。最も細かいグリッドは、合体の前の各中性子星をカバーし、合体後、生成される超質量高速回転中性子星をカバーするより大きなものに統合される。外部境界は、重力波が計算できるような数千キロメートルである。シミュレーションでは、計算コストを削減するために赤道面全体にわたって鏡映対称を設定した。

4. 研究成果

まずは、合体時のケルビン・ヘルムホルツ不安定性に対する抵抗率の影響を調べ、あるケースには増幅が 1 桁程度に制限されることがわかった。

次に、合体後の中性子星が振動して重力波を出す時間は磁場の強度かつ抵抗率の影響を受けるので、シミュレーションの結果から得たその時間を今後観測される重力波と比較するために準備した。

このほか、強度と空間構造が異なる磁場を持つ中性子星合体のシミュレーションを行った。利用できた解像度の中で、シミュレーションの結果に観測できる大きな差がなかったという結果になった。

以上の取り組みに加えて、中性子星のコアの方程式を調べるためにも、私の中性子星連星の合体の正確なシミュレーションを使いました。とりわけ、クォーク物質への一次相転移ではなく、高密度になるとクォークとハドロンがクロスオーバーする(同時に存在する)新しいタイプの状態方程式の影響を調べた。

超高密度物質の研究における基本的な問題の一つは、クォーク・ハドロン相転移がどのように起こるかということである。最も研究されているのは、1次のクォーク・ハドロン相転移を含むシナリオである。この場合、相転移後に圧力支持力(したがって、合体によって生じる物質天体の半径)が急激に減少すると通常考えられている。このようなコンパクト性の変化は、合体した天体から放出される重力波の周波数の高い値へのシフトとして現れると考えられている。しかし、これは中性子星内部組成探査機(NICER)の観測と解析結果とよく一致していない。

一次相転移という現象に代わるものとして、ハドロン物質からクォーク物質への連続的なクロスオーバーがある。クロスオーバーを想定すると、状態方程式の音速がピークが必ずあることになる。音速のピークは、一次相転移を含む状態方程式やハドロンだけのモデルでは存在しない。クォーク・ハドロン・クロスオーバーを記述する状態方程式における音速のピークの存在はユニークであり、クォーク物質形成の開始を示すサインとみなすことができる。

我々は合体後に放出される重力放射と、上記のような状態方程式のいくつかの性質との関係について、興味深い結果を得た。主な発見は、一次相転移を含めた他のタイプの状態方程式とクロスオーバーした状態方程式を観測的に区別できる方法である。この方法に必要なのは、合体後の重力波の観察なので、おそらく第三世代の重力波検出器による観測を待たなければならない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Baiotti Luca	4. 巻 1
2. 論文標題 Gravitational waves from binary neutron stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Arabian Journal of Mathematics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40065-021-00357-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 BAIOTTI Luca	4. 巻 109
2. 論文標題 Gravitational waves from neutron star mergers and their relation to the nuclear equation of state	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 103714 1-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pnnp.2019.103714	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 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 1-6
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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Luca BAIOTTI
2. 発表標題 Gravitational waves from binary neutron stars
3. 学会等名 International Online Workshop on Relativistic Astrophysics and Gravitation, IWRAG-2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Luca Baiotti
2. 発表標題 Binary-compact-stars, gravitational waves and equation of state
3. 学会等名 Meeting on Nuclear Astrophysics, RIKEN, Wako (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Luca Baiotti
2. 発表標題 Gravitational waves and the equation of state of binary compact stars
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikoloa (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Luca BAIOTTI
2. 発表標題 Merger and Postmerger of Binary Neutron Stars with a Quark-Hadron Crossover Equation of State
3. 学会等名 KAGRA Face-to-face Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Luca BAIOTTI
2. 発表標題 Binary neutron stars: numerical simulations, gravitational waves, and equation of state
3. 学会等名 早稲田大学の高等研の講演 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------