

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03556

研究課題名（和文）磁場と内部構造を持つ連星中性子星の一般相対論的準平衡解

研究課題名（英文）Quasi-equilibrium binary neutron stars with magnetic fields and internal structure in general relativity

研究代表者

谷口 敬介（TANIGUCHI, Keisuke）

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：70586528

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：連星中性子星は軌道運動を行うことで重力波を放出し、徐々に連星間距離を縮め、最終的には合体する。本研究では、内部構造を考慮に入れた中性子星で構成された連星中性子星について、合体前の準平衡段階に関する一般相対論を用いた数値的研究を行った。まず、中性子星内部に流体成分が二つ（中性子と陽子を想定）存在すると仮定し、定式化を行った。その定式化に基づき、連星中性子星の準平衡解を構成する数値計算コード開発に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、日本・アメリカ・ヨーロッパでレーザー干渉計を使った重力波観測が行われている。連星中性子星が合体直前に放出する重力波を観測した場合、その波形を用いて潮汐作用による中性子星の変形度を推定し、それを元に中性子星核物質の状態方程式の情報を得ることが可能である。本研究では、合体後の質量放出等に影響を与える中性子星の構成成分を2流体にすることで、中性子星核物質の状態方程式を解明するための基礎研究に寄与した。

研究成果の概要（英文）：Binary neutron stars gradually decrease their orbital separations and eventually merge due to the emission of gravitational waves. In this research program, we have tackled a numerical study of binary neutron stars including neutron stars with internal structure in quasi-equilibrium before merger, using general relativity. First, we formulate a solution method in the case of two fluids in a neutron star. Then, we try to develop a numerical code to construct binary neutron stars in quasi-equilibrium, based on the formulation.

研究分野：数物系科学

キーワード：宇宙物理 一般相対論 中性子星 連星系 準平衡解 数値計算

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 2017年8月17日、連星中性子星の合体時に放出された重力波が、アメリカの重力波観測用レーザー干渉計LIGOによって初めて直接観測された。この合体イベントは、重力波源の電磁波対応天体から放出された、近赤外線からガンマ線に至る幅広い波長領域の電磁波も同時に観測されるという画期的な出来事であった。日本でも大型低温重力波望遠鏡KAGRAが2020年2月から稼働し、重力波観測の期待が高まっている。

(2) 中性子星とは、太陽の8倍から20倍程度の質量を持つ恒星が、その進化の最終段階に起こす超新星爆発の後に残す天体である。質量が太陽の1.4倍程度であるにも関わらず、半径が10キロメートル程度と、非常にコンパクトで重力が強く、中心密度は原子核密度を超える。また、その多くが 10^{12} ガウスという強い表面磁場を伴っており、それらの中には 10^{15} ガウスに達するものもある。中性子星の中心付近は特に高密度であるため、地上では極低温でしか起こらない超流動状態が10億度以下で実現している。そのため、超流体中性子と超伝導陽子で構成されたコアを持っていると考えられている。しかし、中性子星はあまりに高密度かつ強重力場であるため、密度と圧力、温度などの関係式である状態方程式はいまだに解明されておらず、モデルがいくつもある。

(3) 上記の連星中性子星合体による重力波イベントGW170817と、その重力波源の電磁波対応天体の多波長観測の意義の一つが、得られたデータを用いて、中性子星の潮汐変形度に上限が与えられたことである。それを中性子星の半径に換算すると約13キロメートル以下になり、重力波のデータ解析から得られた質量(それぞれの中性子星が太陽質量の1.36倍前後)と合わせ、状態方程式に制限が与えられた。しかしながら、この制限ではまだ中性子星の状態方程式モデルを絞り込むには至っていない。

(4) 現在までの連星中性子星の研究では、中性子星の潮汐変形度や最大質量に大きな影響を与える内部構造や磁場構造が取り入れられていなかった。それらを詳細に研究し、近年の重力波観測によって得られた知見と比較可能なモデルを構築することで、中性子星のより深い理解につながるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

(1) 中性子星は半径10キロメートル程度で、その表面から深さ1キロメートルほどはクラストと呼ばれる原子核の結晶状態になっている。そしてクラストよりもさらに内部の中心部分はコアと呼ばれている。コアのクラストに近い部分はアウターコア(外核)と呼ばれ、そこでは原子核から漏れ出し超流動状態で自由に動くようになった中性子に加え、陽子や電子などの荷電粒子も存在する。これらを流体として近似した場合別々の振る舞いをするので、これら二つの流体を分けて取り扱う必要がある。単独の中性子星について、コアの2流体モデルを一般相対論的に取り扱う研究は行われつつあるが【例えば、引用文献、】、連星中性子星についてはまだ研究されていない。また、磁場も連星中性子星の潮汐変形を考える上で非常に重要な要素であるが、2流体モデルの場合で、一般相対論的連星中性子星の磁場構造を求めた研究は存在しない。

(2) 上記のように、連星中性子星について本来考慮すべきであるが、簡単化のため除外されている要素が存在する。それらの要素を一つ一つ取り上げて連星中性子星モデルに組み込み、合体直前の連星中性子星の物理過程を詳細に理解すること、そして重力波観測データと対応天体の電磁波観測データを使って中性子星の内部構造や磁場構造の情報を得ることが、本研究の目的である。この研究を通して、連星系内での中性子星の潮汐変形への理解を深め、さらに、構成した準平衡解を連星中性子星合体シミュレーションの初期データとして提供することで、合体直前の磁場の相互作用を調べ、電磁波の前駆放射の可能性を探ることも可能であると考えている。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、内部構造を取り入れた中性子星モデルを構築し、連星中性子星の合体よりも前の準平衡段階について数値的に研究を行う。具体的には、中性子星全体を中性子と陽子で構成された2流体の完全流体として扱い、それらの中性子星による連星中性子星の準平衡解について、一般相対論を用いて研究する。ただし、陽子の電荷は考慮しないこととした。

(2) この研究は、定式化を行う部分と数値計算コード開発を行う部分に分けることができる。そこで、最初に定式化に取り組み、その後、数値計算コード開発を行うことにする。数値計算法は現在までの研究と同様、スペクトル法を採用する。また、数値計算コードは、一般相対論に基づ

いた重力を扱う部分と、2流体に関する方程式を解く部分に分け、その順番に開発に取り組んでいくことにした。

4. 研究成果

(1) 初年度は、磁場は考慮に入れず、中性子星全体を中性子と陽子で構成された2流体の完全流体として扱い、連星中性子星の一般相対論的平衡解を数値的に求めることを目指した。この計画を遂行するため、まず定式化を行った。先行研究【引用文献、】を参考にし、連星中性子星に適した定式化を行い、完成させた。この研究と並行して、ブラックホール-中性子星連星の数値的研究に関する総説を共同執筆し、国際専門誌に掲載された。

(2) 2年目は、初年度完成させた定式化を用いて、中性子星を2流体として扱った連星中性子星の一般相対論的準平衡解を求めるための数値計算コード開発を行い、完成させることを目指した。コード開発は重力場の方程式を解く部分と流体の方程式を解く部分に分かれるが、この年度には、重力場の方程式を解く部分について完成させることができた。また磁場を伴った場合の定式化については、ニュートン重力を用いて概要を掴む段階まで到達し、研究会で発表を行ったが、一般相対論を用いた完全な定式化までは完成させることができなかった。

(3) 3年目は、中性子星全体を2流体として扱った連星中性子星の準平衡解を求める数値計算コード開発を継続し、2年目に完成させた重力場の方程式を解く部分に加え、流体の方程式を解く部分も完成させた。数値計算コードの最初のテストとして、単独の中性子星の球形の平衡解を求めた。そして、引用文献のTABLE 1.の「 $\nu_{\text{r}}/2 = 0 \text{ Hz}$ 」の列に掲載されているデータと比較し、5桁の精度で一致することを確認した。

(4) 次に、2流体共に軌道運動と同期している場合について、全く同じ中性子星で構成された連星系のモデルを採用し、連星間距離が離れているところから合体前までの系列を求めた。中性子星の重力質量とコンパクトさがこのモデルと同じ場合の1流体モデル【引用文献で開発した数値計算コードを用いて計算】との比較を行った結果、同じ軌道角速度に対して、2流体の場合の連星系の結合エネルギーがやや小さくなっているが、その差は極めて小さいことが分かった。また、2流体のうち一つの流体(中性子を想定)を、軌道運動に対して渦なしの状態と仮定し、もう一つの流体(陽子を想定)を軌道運動に対して同期していると仮定した場合、および、2流体共に軌道運動に対して渦なしの状態と仮定した場合についても、数値計算コードを書き上げた。現在は、渦なしの状態を含む場合について、計算途中で発生する不具合を取り除く作業に力を入れている。解決したらすぐにデータ取得を行い、論文執筆に入る予定である。

<引用文献>

- R. Prix, J. Novak, & G. L. Comer, Phys. Rev. D **71**, 043005 (2005).
- A. Sourie, M. Oertel, & J. Novak, Phys. Rev. D **93**, 083004 (2016).
- K. Taniguchi & M. Shibata, Astrophys. J. Suppl. Ser. **188**, 187 (2010).

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Kyutoku Koutarou, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 24
2. 論文標題 Coalescence of black hole-neutron star binaries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Living Reviews in Relativity	6. 最初と最後の頁 1-182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41114-021-00033-4	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

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷口敬介
2. 発表標題 半解析的磁場星
3. 学会等名 コンパクト星研究会2023
4. 発表年 2023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
---------	---------