

令和 2 年 4 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02183

研究課題名(和文)合体する中性子星連星からの重力波と電磁波放射に対する研究

研究課題名(英文) Gravitational waves and electromagnetic signals from the merger of neutron star binaries

研究代表者

柴田 大 (Shibata, Masaru)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：80252576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：現在稼働中の重力波検出器に対する有力な重力波源である中性子星からなる連星の合体過程を、最先端の一般相対論の数値計算で明らかにするとともに、放射される重力波、および放出される物質の量と物理的かつ化学的性質を系統的に調べた。さらには、放出物質から合成される元素組成を解き明かすと共に、放射性元素の崩壊により輝くとされる現象(キロノバ)を輻射輸送計算により定量的にかつ系統的に調べた。とりわけ強調すべき点は、構築した理論を用いて、2017年8月に観測された連星中性子星の合体現象の観測結果を理論的に説明した点である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2015年から重力波を用いた天文学が始まった。中性子星連星の合体は稼働中の重力波望遠鏡の最も有力な重力波源の1つだが、それが観測された場合に、どのような現象かを解釈するには、信頼性の高い理論モデルが必要である。具体的には、一般相対論の基本方程式であるアインシュタイン方程式や付随する物質場の方程式を正確に解いて現象を予言する必要がある。本研究では世界最先端の数値コードを構築しさらに用いて、中性子星連星の合体現象を予言し、さらに構築した理論モデルを観測結果に適用し、観測結果の解釈に成功した。そして重力波天文学を軸としてマルチメッセンジャー宇宙物理学の発展に大きく貢献した。

研究成果の概要(英文)：By radiation/magnetohydrodynamics/viscous hydrodynamics numerical simulations in general relativity, merger process of neutron star binaries, which are among the most promising sources of gravitational waves for currently operating gravitational-wave detectors, are explored to clarify the merger process, gravitational waves emitted, and mass ejection processes. Furthermore, using the results of the mass ejection, nucleosynthesis calculation is performed to derive the abundance pattern of the elements in the ejecta and also the lightcurves of kilonovae, which shine by the radioactive decay energy from the synthesized heavy elements. Particularly emphasized in our research achievement is that our theoretical calculations can reproduce the observational results of electromagnetic counterparts of GW170817.

研究分野：相対論的宇宙物理学

キーワード：重力波 中性子星 ブラックホール キロノバ 中性子星合体 元素合成 数値相対論 輻射輸送計算

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

この課題を開始した2016年4月は、2015年9月に重力波望遠鏡 Advanced LIGO が連星ブラックホールからの重力波を初めて検出した直後に相当し、重力波天文学がまさに始まった時期であった。連星ブラックホールの次の最も重要な観測ターゲットは、中性子星からなる連星の合体であり、それは2016—2017年に行われた Advanced LIGO と Advanced VIRGO の二度目の観測(O2)や2019—2020年に行われた三度目の観測(O3)で複数発見されることが期待されていた。これらの来たる観測に備え、予想される重力波の波形や電磁波対応天体を正確に予言することが、この課題期間中の急務であった。また、重力波や電磁波対応天体が観測された場合には、観測結果を解釈する作業が不可欠であり、そのためにも信頼性の高い理論モデルを構築することが強く望まれていた。

2. 研究の目的

2015年9月から本格稼働を開始した重力波望遠鏡の確実な重力波源の1つは、中性子星からなる連星の合体である。それらに対する重力波観測から新発見を効率的に導くには、重力波波形の正確な理論予想やデータ解析新手法の開発が急務であった。また、重力波に付随して放射される電磁波の観測が重力波の検出効率を高めると同時に合体過程の詳細をもたらすので、放射される電磁波の特徴の正確な理論予想も不可欠であった。本課題ではこれまでの我々の研究を発展させ、①合体する中性子星連星からの重力波波形の高精度予言、②中性子星の性質を抽出するための重力波データ解析新手法の開発、③重力波放射に付随して放射される電磁波の定量的予言、④中性子星連星合体に付随して発生するとされるガンマ線バースト発生機構の予言などを行い、世界的に進む重力波天文学創成事業に大きく貢献することを目的とした。なお、研究課題遂行中に、advanced LIGO が中性子星連星からの重力波を検出するとともに、その電磁波対応天体を多数の光学望遠鏡が観測するようになった。そこで、観測結果を説明しかつ合体现象を解釈する作業も研究目的とした。

3. 研究の方法

世界最先端の物理的モデル化を備え、かつ高精度の一般相対論的な数値シミュレーションを多数実行し、合体现象のモデル化、合体後の進化のモデル化、および合体前後に放射される信号(重力波や電磁波)のモデル化を行った。具体的には、以下の研究を、代表者、分担者、連携・協力研究者が協働で遂行した。

- ① 中性子星に対する多様な状態方程式と質量、およびブラックホールに対する多様な質量と自転角運動量を採用しながら、中性子星連星に対する高解像度の数値相対論的シミュレーションを実行し、精度の高い重力波波形を系統的に導出した。さらにそれらを用いて、連星中性子星に対する重力波波形の解析的モデルを導出した。
- ② 数値相対論的輻射流体および輻射粘性流体シミュレーションを行ない、中性子星連星の合体现象の総合的な描像を確立すると共に、合体に伴って放出される物質の総量、速度、温度、組成など物理的かつ化学的特徴を明らかにした。またそれらの特徴の連星パラメータ(質量、スピン角運動量、状態方程式)依存性についても明確にした。
- ③ ②の結果をベースに、元素合成計算および輻射輸送シミュレーションを行ない、放出物質から放射される電磁波の光度曲線やスペクトルを求めた。
- ④ 中性子星連星の合体现象が発見された際には、その観測結果を解釈するための数値シミュレーションを実行した。特に輻射輸送シミュレーションを行い、キロノバに対する観測結果を数値相対論の研究成果を取り入れながら解釈した。

4. 研究成果

以下に挙げる成果を得た。各々に対してまとめる。

- ① 合体に至る中性子星連星に対する高精度数値相対論的シミュレーション: 特に、合体直前の連星中性子星に対する高精度数値シミュレーションを行い、重力波の波形をかつてない精度で導出した。具体的には、合体直前15—16周に対してシミュレーションを行い、30—32サイクルの重力波波形を求めたが、その際、多数の解像度でシミュレーションを行い、最高解像度の場合には、重力波波形の位相誤差が0.5radian以下であることを確認した。この研究では、連星中性子星の全質量を2.50—2.75太陽質量、質量比を0.75—1と変化させながら研究を行った。また、中性子星の状態方程式を6通り採用し、重力波波形の状態方程式依存性を調べ、これまでに指摘されてきたように、重力波波形は中性子星の質量と潮汐変形度に主に依存することを確認した (Phys. Rev. D **96**, 084060 (2017), Phys. Rev. D **101**, 084006 (2020))。

さらに導出した波形を用いて、フリー空間における重力波波形モデルを構築した。このモデルでは、重力波の波形が連星の全質量、質量比、および中性子星の潮汐変形度で解析的な形で表現されており、重力波のデータ解析において容易に使用可能である。

② 中性子星連星の合体に対する輻射流体シミュレーション: ニュートリノ輻射輸送の効果を取り入れたシミュレーションを、連星中性子星およびブラックホール・中性子星連星の合体両方に対して行った。連星中性子星に対しては、全質量を 2.7—2.9 太陽質量に、また質量比を約 0.75—1 に変化させて合計 10 程度のシミュレーションを行い、ブラックホール・中性子星に対しては、ブラックホールと中性子星の質量をそれぞれ 5.40, 1.35 太陽質量でかつブラックホールのスピンの場合限定してシミュレーションを行った。どちらの場合も 2、3 通りの状態方程式を中性子星に対して採用した。この研究では特に、合体時にどの程度物質が放出されるか、またその物質はどのような性質を持つのかに着目した。

連星中性子星の場合には、合体時に太陽質量の 0.1% から 1% 程度の量の物質が、平均で光速の 15% から 20% の速度で放出されることが確認された。質量放出は、合体時に誕生する天体の非軸対称性による潮汐力と合体時に 2 つの中性子星が衝突することで生じる衝撃波加熱の両方の効果で起きる。また中心に大質量中性子星が誕生する場合には、そこから放射されるニュートリノを放出物質が一部吸収する影響、および合体時の衝撃波加熱により温度が上がる影響で、放出物質の中性子過剰度に多様性が生まれることも再確認された。ただし、連星が非等質量の場合には、潮汐力が質量放出機構により重要になるため、中性子過剰度の変化がより小さくなり、中性子過剰度が高い(電子濃度が低い)物質がより多く放出されることも確認された。しかしいずれの場合にも、放出物質の中性子過剰度は幅広い分布を持つため、幅広い質量数の重元素を速い中性子捕獲反応(r 過程)で合成するには都合が良い現象であることがわかった(Phys. Rev. D **93**, 124046 (2016); Phys. Rev. D **96**, 123012 (2017))。

一方、ブラックホール・中性子星連星の合体の場合には、異なる結果が得られた。今回考えた比較的ブラックホールの質量が小さくスピンの大きい連星の合体では、太陽質量の数% に及ぶ物質が放出されることがわかった。また合体時に衝撃波加熱の影響がないこと、合体後に大質量中性子星が存在せず強いニュートリノ照射源が存在しないことを反映して、放出物質の中性子過剰度は元の中性子星の高い中性子過剰状態を維持することがわかった。したがって、ブラックホールと中性子星の合体時に放出される物質の中では、質量数の大きな元素が主に合成されることがわかった。

③ 連星中性子星に対する一般相対論的磁気流体シミュレーション: 低質量連星中性子星の合体に対する高解像度磁気流体シミュレーションを実行した(Phys. Rev. D **97**, 124039 (2018))。目的は、合体時に磁気強度がどの程度増幅されるのかを知ること、および増幅された磁場が合体後の進化に果たす役割を理解することである。このシミュレーションの最高解像度領域では 12.5m のグリッド幅で採用された。これは、中性子星の半径を約 1000 グリッドでカバーすることを意味し、これまでに行われてきたシミュレーションの中で最も解像度が高い。

合体時とその後に重要になる磁気流体不安定性は 2 つある。1 つはケルビン・ヘルムホルツ不安定性であり、もう 1 つが磁気回転不安定性である。前者は合体時に中性子星同士が反対向きの速度場を持つことに起因するシア運動のために起き、後者は合体後に誕生する大質量中性子星や降着円盤が差動回転し、かつ磁場を保持しているために起きる。どちらの不安定性でも、磁気強度は指数関数的に増大する。ケルビン・ヘルムホルツ不安定性は、合体直後に多数の小さな渦を発生させ、その渦運動によって磁気強度が巻き込みのため増大する。この不安定性は、ごく短時間に多数の渦を発生させ磁場を成長させるため、最初の数ミリ秒以内に、電磁気学的エネルギーは系の運動エネルギーの 1% ほどにまで増大すると予想されてきた。また多数の渦を発生させるため、乱流運動が同時に活性化される。その結果、中性子星内部は、実効的に粘性流体のように振る舞うと考えられる。磁気回転不安定性は、合体後に大質量中性子星の外側に誕生する降着円盤の中で磁場を成長させると予想されてきた。これも降着円盤を実効的に粘性流体のように変化させると考えられている。我々の研究では、(1)ケルビン・ヘルムホルツ不安定性が磁場強度を指数関数的に増大させ、最終的に磁気強度が 10^{16} G にまで増えること、(2)磁場が十分に成長した後は乱流が発生し、流体が粘性流体のように振る舞うこと、(3)さらに実効的な粘性係数(アルファパラメータ)が 0.01—0.02 程度になることを第一原理的に示した。しかし同時に、未だに解像度が十分ではないため、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性がもたらす影響を十分には理解できないこともわかった。

④ 一般相対論的粘性流体コードの開発: 上で述べたように、中性子星連星の合体後に誕生する大質量中性子星や中心天体周りの降着円盤は、粘性流体のように実効的に振る舞うと考えられる。実効的な粘性の起源は磁気流体不安定性だが、それを完全に取り入れた磁気流体シミュレーションを実行するには極めて高い解像度のシミュレーションが必要であり、現在の計算機資源では実行は非常に難しい。そこで現象論的に理解を進める次善の手段として、粘性流体シミュレーションが有効になる。しかしながら、一般相対論的な粘性流体の定式化は非自明である。しばしば使われる非相対論的な定式化をそのまま拡張すると、因果律が破れてしまうことが知

られている。因果律を破らない定式化として、イスラエルとスチュワートが提案したものがあるが、それを採用した一般相対論的コードはこれまで存在しなかった。そこで我々は、この定式化を(必要最小限のレベルで)採用した一般相対論的粘性流体コードを開発した(Phys. Rev. D **95**, 083005 (2017))。さらにこのコードを、連星中性子星合体後の多くの場合に誕生すると考えられる大質量中性子星の進化に適用した。そして項目③の研究で示唆されるような実効粘性が存在する場合には、合体後の大質量中性子星の差動回転が速やかに剛体回転に変化すること、またその結果、大質量中性子星の非軸対称度が急速に減衰するため、放射される重力波の振幅を速やかに減衰させることがわかった(Phys. Rev. D **95**, 123003 (2017))。現実的には、粘性係数は磁気流体過程で決まるはずだが、この値がどの程度になるかを明らかにすることが、大質量中性子星からの重力波を検出する計画を策定する上で重要なことをこの研究は示した。

⑤ 中性子星連星合体後に対する一般相対論的輻射粘性流体計算: 項目④で開発した粘性流体コードをさらにニュートリノ輻射粘性流体コードに拡張し、中性子星連星の合体後に誕生する大質量中性子星と降着円盤からなる系やブラックホールと降着円盤からなる系の進化、質量放出過程、および元素合成過程を調べるためのシミュレーションを行った(Astrophys. J. **860**, 64 (2018); Phys. Rev. D **101**, 083029 (2020))。その結果、以下の知見を得た。

大質量中性子星と降着円盤の場合には、粘性効果が重要になるフェーズが2回あることがわかった。最初は、大質量中性子星の差動回転が粘性効果により剛体回転に変化するフェーズである。このフェーズで粘性効果が働く時間スケールは、典型的な粘性係数(アルファパラメータで 0.01—0.02)を用いると 10 ミリ秒ほどである。粘性効果により回転角速度プロファイルが変化するに従い、大質量中性子星や降着円盤の内縁部の密度や圧力構造も変化する。それに伴い、密度波が外に伝わるが、回転則の変化によって解放されるエネルギーが莫大なため(10^{52} erg 程度)、密度波のエネルギーも巨大になる。その結果、降着円盤の外縁部や合体時にすでに遠方まで吹き飛ばされていた物質が系から放出される。その総質量は太陽質量の 1%程度である。その後は降着円盤で粘性効果が働き、主に粘性加熱の影響で質量放出が起きる。この際の粘性進化の特徴的な時間スケールは、典型的な粘性係数を用いた場合、数百ミリ秒である。したがって、大質量中性子星のダイナミカルな時間スケールに比べると、ゆっくり物質が放出される。放出される総質量は降着円盤の初期質量の 30—50%にも達するので、太陽質量の 5%—10%にも及ぶ。したがって、大質量中性子星が合体後に誕生する場合には、降着円盤からの質量放出が主な質量放出チャンネルになることがわかった。

2つのフェーズでは、放出される物質の中性子過剰度が大きく異なることも明らかになった。大質量中性子星内での粘性効果で放出される物質の中性子過剰度は、合体時に放出される物質の場合と同様、非常に高い。これは、合体時にすでに遠方まで飛ばされていた中性子過剰物質の放出が大きな割合を占めるからである。一方、降着円盤から放出される物質の中性子過剰度は低めになる。これは中心に存在する大質量中性子星からのニュートリノ照射による効果、およびゆっくりと放出されるために弱い相互作用の影響で中性子過剰度が変化する効果のためである。前者の放出物質の電子濃度は、典型的には 0.2—0.3 だが、後者は 0.3—0.4 程度になる。

ブラックホールと降着円盤の系では、降着円盤からの質量放出だけが起きる。この場合円盤初期質量の 15—20%程度が放出されることがわかった。特筆すべきは、放出物質の性質が粘性係数に強く依存することを発見した点である。仮に粘性係数が大きく、質量放出が 300 ms 程度以内に進めば、中性子過剰度が大きい(電子濃度が 0.2 以下の)物質がある程度放出される。一方、放出時間スケールが長い(0.5—1 秒)と、弱い相互作用の影響で、降着円盤が粘性加熱と角運動量輸送のため膨張する間に中性子過剰度が下がってしまうので、放出物質の中性子過剰度も下がってしまう(電子濃度が 0.25 以上になる)。その結果、粘性係数が大きいと、放出物質内で質量数が 130 以上の重元素合成が進むが、それが小さいと放出物質内では重元素合成が起きないことが明らかになった。項目⑥、⑦で述べるように、質量数が 130 以上の重元素が合成されると、ランタノイド族元素が大量に合成され、その結果、放出物質の光の吸収係数が大幅に増加する。そのため、ランタノイド族元素の合成量は観測的特徴を大きく左右する。粘性係数は、より根本的には磁気流体過程で決まると考えられているので、それを正確に解かない限り、正確な観測的な予言はできない。磁気流体過程を正確に解明することが今後の課題になった。

これらの研究の結果、中性子星連星の合体による質量放出過程の概要が明らかになった。図 1 にそれをまとめる。a) には連星中性子星の合体後に大質量中性子星が誕生する場合のシナリオを、b) にはブラックホールと降着円盤が誕生する場合のシナリオを示した。

⑥ 観測された連星中性子星の合体現象(GW170817)の解釈: 2017年8月17日、日本時間午後9時41分ごろ、アメリカの重力波望遠鏡 advanced LIGO が、合体する連星中性子星から放射される重力波(GW170817)の観測に初めて成功した(Abbott et al., Physical Review Letters **119**, 161101 (2017))。重力波観測直後からは、世界中の多くのグループによって光学望遠鏡を用いた電磁波

対応天体の追観測も行われ、重力波の発見に勝るとも劣らない貴重な情報がもたらされた。我々は、これらの観測結果の解釈を即座に行って発表した(Phys. Rev. D **96**, 123012 (2017))。具体的には、重力波観測から得られた連星の質量の情報と数値相対論研究に基づき、合体過程を図2のように推測し、電磁波対応天体の観測結果を矛盾なく説明した。具体的には、連星中性子星の合体の結果0.03太陽質量程度の物質放出が起き、さらにその10—20%は質量数が130を超える重元素であると推測される。

⑦ キロノバの光度曲線の導出：GW170817の観測事例で示されたように、キロノバの光度曲線を理論的に予言することは、今後観測結果が出されるたびに極めて重要になる。それを想定して、数値相対論の計算結果から放出物質モデル(質量、速度、中性子過剰度をモデル化)を構築し、そのモデルに対して輻射輸送計算を行い、キロノバの光度曲線を予言する作業を進めた(Astrophys. J. **889**, 171 (2020))。項目⑤で述べたように、中性子星連星の合体と質量放出過程には多様性があるので、様々なケースに対応する光度曲線を理論的に予言した。

また数値相対論による質量放出の予言は、GW170817の観測結果と整合的であることをAstrophys. J. **865** L21 (2018)において示した。特に、合体時に中性子過剰な物質が比較的少量ほぼ等方的に放出され、さらに合体後に降着円盤から太陽質量の2—3%の中性子過剰度の低い物質が放出されていれば、光学観測結果をうまく説明できることを示した。

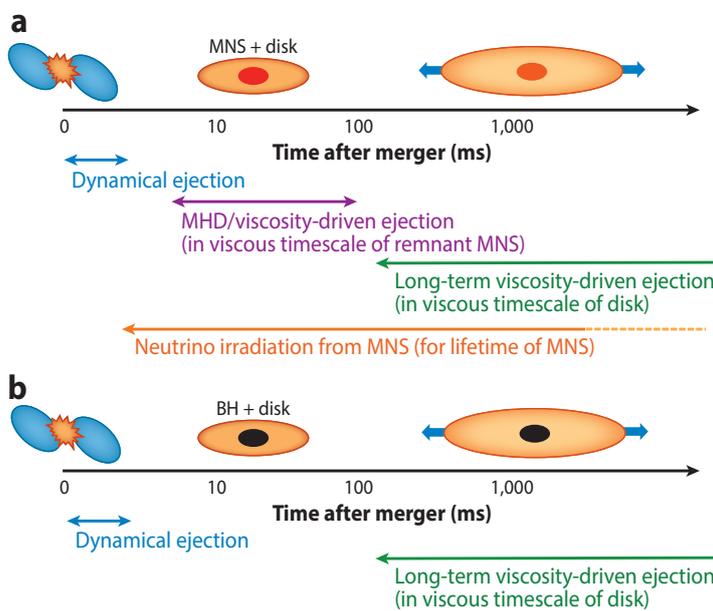


図1：中性子星連星の合体による物質放出のまとめ。連星中性子星の合体後に大質量中性子星が誕生する場合には、合体時、大質量中性子星の粘性過程、降着円盤の粘性過程の3つのステップで質量放出が起きる(上段)。中性子星連星の合体後ブラックホールが即座に誕生する場合には、合体時と降着円盤の粘性過程の2つのステップで質量放出が起きる。大質量中性子星が存在する場合には、そこからのニュートリノ照射が、放出物質の性質を決めるのに重要な役割を果たす。Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **69**, 41 (2019)より抜粋。

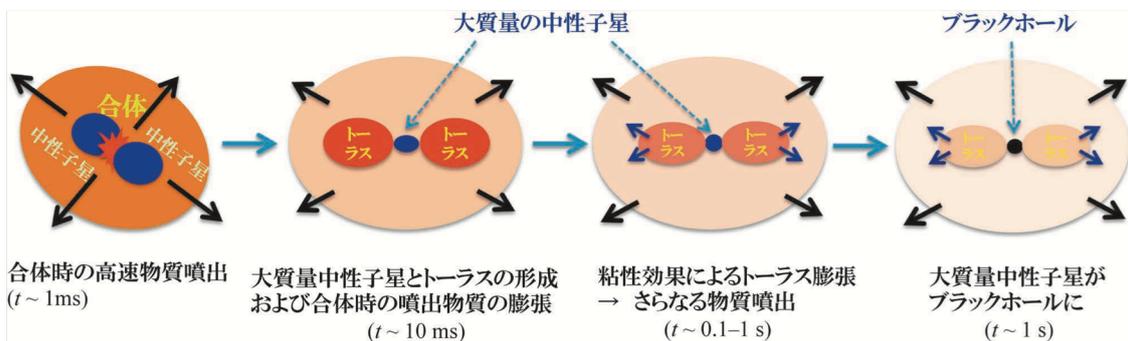


図2：GW170817の合体现象の想像図。中性子星同士の合体によって、大質量中性子星が誕生する。その後その周りには、トーラスが誕生する。合体時、大質量中性子星の磁気流体進化過程、およびトーラスの粘性進化過程のいずれによっても、中性子過剰物質が飛び散るが(項目⑤参照)、中心に大質量中性子星が存在するため、その中性子過剰度は適度に抑えられる。大質量中性子星は誕生後1秒程度でブラックホールに重力崩壊したと推測される。物理学会誌2018年9月号より抜粋。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 32件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sho Fujibayashi, Kenta Kiuchi, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata, Shinya Nishimura	4. 巻 860
2. 論文標題 Mass Ejection from the Remnant of a Binary Neutron Star Merger: Viscous-radiation Hydrodynamics Study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 64-1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aabafd	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 -
1. 著者名 Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Yuichiro Sekiguchi, Masaru Shibata	4. 巻 97
2. 論文標題 Global simulations of strongly magnetized remnant massive neutron stars formed in binary neutron star mergers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124039-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.97.124039	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 -
1. 著者名 Kyohei Kawaguchi, Masaru Shibata, Masaomi Tanaka	4. 巻 865
2. 論文標題 Radiative Transfer Simulation for the Optical and Near-infrared Electromagnetic Counterparts to GW170817	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L21-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/aade02	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 -
1. 著者名 Kenta Hotokezaka, Kenta Kiuchi, Masaru Shibata, Ehud Nakar, Tsvi Piran	4. 巻 867
2. 論文標題 Synchrotron Radiation from the Fast Tail of Dynamical Ejecta of Neutron Star Mergers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aadf92	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 Yudai Suwa, Takashi Yoshida, Masaru Shibata, Hideyuki Umeda, Koh Takahashi	4. 巻 481
2. 論文標題 On the minimum mass of neutron stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notice Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3305-3312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1093/mnras/sty2460	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 -

1. 著者名 Haruki Uchida, Masaru Shibata, Koh Takahashi, Takashi Yoshida	4. 巻 870
2. 論文標題 Black Hole Formation and Explosion from Rapidly Rotating Very Massive Stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 98-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf39e	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 -

1. 著者名 Haruki Uchida, Masaru Shibata, Koh Takahashi, Takashi Yoshida	4. 巻 99
2. 論文標題 Gravitational waves from very massive stars collapsing to a black hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 41302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.041302	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 -

1. 著者名 Masaru Shibata and Kenta Kiuchi	4. 巻 95
2. 論文標題 Gravitational waves from remnant massive neutron stars of binary neutron star merger: Viscous hydrodynamics effects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123003-1,9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.123003	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 -

1. 著者名 T. Yoshida, Y. Suwa, H. Umeda, M. Shibata, and K. Takahashi	4. 巻 471
2. 論文標題 Explosive nucleosynthesis of ultra-stripped Type Ic supernovae	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notice Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4275, 4285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1738	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 -

1. 著者名 S. Fujibayashi, Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, and M. Shibata	4. 巻 846
2. 論文標題 Properties of neutrino-driven ejecta from the remnant of binary neutron star merger: Purely radiation hydrodynamics case	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 114 (15 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4537/aa8039	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 -

1. 著者名 H. Uchida, M. Shibata, T. Yoshida, Y. Sekiguchi, and H. Umeda	4. 巻 96
2. 論文標題 Gravitational collapse of rotating supermassive stars including nuclear burning effects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083016-1,24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.083016	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 -

1. 著者名 K. Kiuchi, K. Kawaguchi, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi	4. 巻 96
2. 論文標題 Sub-radian-accuracy gravitational waveforms of coalescing binary neutron stars in numerical relativity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 084060-1,13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.084060	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 -

1. 著者名 M. Shibata, S. Fujibayashi, K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, and M. Tanaka	4. 巻 96
2. 論文標題 Modeling GW170817 based on numerical relativity and its implications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123012-1,22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.123012	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 -

1. 著者名 K. Kyutoku, K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, M. Shibata, K. Taniguchi	4. 巻 97
2. 論文標題 Neutrino transport in black hole-neutron star binaries: neutrino emission and dynamical mass ejection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 023009-1,17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.023009	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 -

1. 著者名 K. Kawaguchi, K. Kyutoku, H. Nakano, and M. Shibata	4. 巻 97
2. 論文標題 Extracting the orbital axis from gravitational waves of precessing binary systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 024017-1,12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.024017	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 -

1. 著者名 K. Kawaguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, M. Shibata, K. Taniguchi	4. 巻 97
2. 論文標題 Frequency-domain gravitational waveform models for inspiraling binary neutron stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 044044-1,22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.044044	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 -

1. 著者名 Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, M. Shibata, and K. Taniguchi	4. 巻 93
2. 論文標題 Dynamical mass ejection from the merger of asymmetric binary neutron stars: Radiation-hydrodynamics study in general relativity	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124046-1,13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.124046	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 -

1. 著者名 M. Kaneyama, K. Oohara, H. Takahashi, Y. Sekiguchi, H. Tagoshi, and M. Shibata	4. 巻 93
2. 論文標題 Analysis of gravitational waves from binary neutron star merger by Hilbert-Huang transform	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123010-1,11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.123010	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 -

1. 著者名 M. Shibata, Y. Sekiguchi, H. Uchida, and H. Umeda	4. 巻 94
2. 論文標題 Gravitational waves from supermassive stars collapsing to a supermassive black hole	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 021501-1,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.021501	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 -

1. 著者名 M. Shibata, K. Kiuchi, and Y. Sekiguchi	4. 巻 95
2. 論文標題 General relativistic viscous hydrodynamics of differentially rotating neutron stars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083005-1,16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.083005	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 -

1. 著者名 T. Hinderer, A. Taracchini, F. Foucart, A. Buonanno, J. Steinhoff, M. Duez, L. E. Kidder, H. P. Pfeiffer, M. A. Scheel, B. Szilagy, K. Hotokezaka, K. Kyutoku, M. Shibata, C. W. Carpenter	4. 巻 116
2. 論文標題 Effects of neutron-star dynamic tides on gravitational waveforms within the effective-one-body approach	5. 発行年 2016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.116.181101	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 Zhou Enping, Tsokaros Antonios, Ury? K?ji, Xu Renxin, Shibata Masaru	4. 巻 100
2. 論文標題 Differentially rotating strange star in general relativity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 043015 (11pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.043015	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 Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 876
2. 論文標題 Revisiting the Lower Bound on Tidal Deformability Derived by AT 2017gfo	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L31 ~ L31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1e45	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 -

1. 著者名 Lamb G. P., Tanvir N. R., Levan A. J. et al.	4. 巻 883
2. 論文標題 Short GRB 160821B: A Reverse Shock, a Refreshed Shock, and a Well-sampled Kilonova	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab38bb	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 Shibata Masaru, Zhou Enping, Kiuchi Kenta, Fujibayashi Sho	4. 巻 100
2. 論文標題 Constraint on the maximum mass of neutron stars using GW170817 event	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 023015 (15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.023015	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 -

1. 著者名 Shibata Masaru, Hotokezaka Kenta	4. 巻 69
2. 論文標題 Merger and mass ejection of neutron-star binaries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annual review of Nuclear and Particle Science	6. 最初と最後の頁 41,64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1146/annurev-nucl-101918-023625	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 -

1. 著者名 Narikawa Tatsuya, Uchikata Nami, Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Shibata Masaru, Tagoshi Hideyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Discrepancy in tidal deformability of GW170817 between the Advanced LIGO twin detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033055 (7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.033055	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 -

1. 著者名 Kawaguchi Kyohei, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi	4. 巻 889
2. 論文標題 Diversity of Kilonova Light Curves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 171 ~ 171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab61f6	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 -

1. 著者名 Kyutoku Koutarou, Fujibayashi Sho, Hayashi Kota, Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi	4. 巻 890
2. 論文標題 On the Possibility of GW190425 Being a Black Hole? Neutron Star Binary Merger	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L4 ~ L4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab6e70	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 -

1. 著者名 Carrasco Federico, Shibata Masaru	4. 巻 101
2. 論文標題 Magnetosphere of an orbiting neutron star	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 063017 (16pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.063017	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 Kiuchi Kenta, Kawaguchi Kyohei, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 101
2. 論文標題 Sub-radian-accuracy gravitational waves from coalescing binary neutron stars in numerical relativity. II. Systematic study on the equation of state, binary mass, and mass ratio	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 084006 (25pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.084006	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 -

1. 著者名 Fujibayashi Sho, Shibata Masaru et al.	4. 巻 101
2. 論文標題 Mass ejection from disks surrounding a low-mass black hole: Viscous neutrino-radiation hydrodynamics simulation in full general relativity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083029 (27pp0)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.083029	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 16件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Mass ejection from neutron-star mergers in numerical relativity
3. 学会等名 EMMI rapid reaction task force: The physics of neutron star mergers at GSI/FAIR (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 GW170817 and neutron-star mergers
3. 学会等名 重力波観測時代のrプロセスと不安定核 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Variety of kilonovae of neutron-star mergers
3. 学会等名 PAX-V/MM19: multimessenger transients (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Gravitational waves from neutron-star mergers
3. 学会等名 Bridging nuclear and gravitational physics: the dense matter equation of state (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Mass ejection from binary neutron-star merger in numerical relativity
3. 学会等名 Conference on compact object mergers (in the physics of extreme-gravity stars) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Gravitational waves from neutron-star mergers
3. 学会等名 The era of gravitational-wave astronomy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Modeling mass ejection for GW170817 in numerical relativity
3. 学会等名 GW170817: The First Double Neutron Star Merger (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Merger and mass ejection of binary neutron stars in numerical relativity
3. 学会等名 Transient Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Neutron star mergers: Predictions by numerical relativity
3. 学会等名 The first observation of a binary black hole merger: Status and future prospects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Gravitational waves from neutron-star binaries
3. 学会等名 Workshop on Numerical Relativity in matter spacetimes for Gravitational Wave astronomy (NRmGW) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Status of numerical relativity for Astrophysical simulations
3. 学会等名 21th international conference on general relativity and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 kHz gravitational waves from numerical relativity
3. 学会等名 GWADW (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Merger of neutron-star binaries
3. 学会等名 Nuclear Physics in Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Merger and mass ejection of neutron-star binaries
3. 学会等名 6th conference of the Polish Society on Relativity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Merger of neutron stars as a laboratory of neutron-star matter and nucleosynthesis
3. 学会等名 Omeg 15 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Some of electromagnetic signals for third generation detectors
3. 学会等名 The science of third-generation gravitational wave detectors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 柴田大、久徳浩太郎	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 212
3. 書名 重力波の源	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Homege of Masaru Shibata http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/indexj.html</p>
--

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
研究分担者	田越 秀行 (Tagoshi Hideyuki) (30311765)	東京大学・宇宙線研究所・教授 (12601)	
研究分担者	関口 雄一郎 (Sekiguchi Yu-ichiro) (50531779)	東邦大学・理学部・准教授 (32661)	
研究分担者	川口 恭平 (Kawaguchi Kyohei) (60822210)	東京大学・宇宙線研究所・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 雅臣 (Tanaka Masaomi) (70586429)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	木内 建太 (Kiuchi Kenta) (40514196)	京都大学・基礎物理学研究所・特任准教授 (14301)	削除：2018年12月25日