

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00158

研究課題名(和文) 中性子星連星の合体からの電磁波と重力波の迅速な計算

研究課題名(英文) Computing electromagnetic and gravitational-wave signals from neutron star mergers

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) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：数値相対論などの数値計算を駆使して、重力波源として最も期待される中性子星合体の詳細を明らかにするのが本研究の目的であったが、概ね期待通りの成果を得た。具体的には、(i)中性子星連星が合体し、その後進化する一連の過程でどのように質量放出が起き、どのような性質を持つ物質が放出されるのか、理解した。(ii)放出される中性子過剰物質から重元素が生成される過程を理解した。(iii)放出される物質がキロノバとしてどのように光るのかおおよそその理解を得た。(iv)輻射磁気流体、輻射粘性流体計算に必要な数値相対論コードの開発が進み、今後中性子星合体が観測された際に、その解釈を迅速に進める準備が整った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子星合体は最も有力な重力波源であるとともに、ウランや金など重元素の起源、継続時間の短いガンマ線バーストの起源と考えられている。しかしこれらは仮説であり、今後観測的に証明されなくてはならない。観測的に証明するには、観測を解釈するための理論が不可欠だが、本研究課題ではその理論モデルの確立を目的とした。この研究を世界的に見ても最も高いレベルで我々を行うことができ、日本の研究力の高さを世界に示すことができる。また重元素やガンマ線バーストの起源や発生機構を解き明かすのは半世紀前からの課題だが、これらの難問を解決に導き、教科書や百科事典に新たな知見を提供することで社会的に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project was to clarify the details of neutron star mergers, which are the most promising sources of gravitational waves, by making full use of numerical calculations including numerical relativity, and the results were generally as expected. Specifically, we have: (i) understood how mass ejection occurs and what the properties of the ejected material is during the series of processes of neutron star binary mergers and subsequent evolution; (ii) understood how heavy elements are produced from the ejected neutron-rich material; (iii) gained an approximate understanding of how the ejected material shines as kilonovae. (iv) We have made progress in the development of the numerical-relativity codes necessary for calculating radiative magnetohydrodynamics and radiative viscous fluids, and are now ready to proceed quickly with their interpretation when neutron star mergers are observed in the future.

研究分野：宇宙物理学(理論)

キーワード：重力波 対論 中性子星 ブラックホール 中性子星合体 キロノバ 元素合成 ガンマ線バースト 数値相

## 1. 研究開始当初の背景

2017年8月に重力波望遠鏡 Advanced LIGO と Virgo が、連星中性子星の合体による重力波を初めて観測した。引き続き、ガンマ線から電波に至る幅広い波長で、その電磁波対応天体が観測され、中性子星合体に付随する継続時間の短いガンマ線バースト説の検証、r-process 重元素合成仮説の検証、キロノバの観測など、画期的な成果が記録された。本研究計画時点においては、LIGO-Virgo による第3回重力波観測(O3)が進んでおり、さらに第4回重力波観測(O4)が2023年上半期から予定されていた。中性子星合体による重力波やその電磁波対応天体が観測された際には、それを物理的に解釈し、新たな知見を得るための理論モデルが必要不可欠である。中性子星合体は、一般相対論的重力、強い相互作用に基づく状態方程式、ニュートリノ放射、磁気流体効果など様々な物理的効果が重要になる現象であり、精度の高い数値シミュレーションによってのみ、その全貌を明らかにできる。したがって、それに対応したシミュレーション研究が必要になる。我々の日本のグループは、そのような研究において世界をリードしてきた。過去の研究を発展させ、重力波天文学、マルチメッセンジャー宇宙物理学の発展に貢献するのは、極めて自然な流れであった。

## 2. 研究の目的

本研究では、世界最先端の数値相対論的シミュレーションを実行し、中性子星合体の様相を第一原理的に明らかにすることを第一の目的にした。中性子星合体と一言と言っても、合体前後のダイナミクスに重要になる物理過程と合体後長時間進化で重要になる物理過程は全く異なる。合体前後は一般相対論的流体効果のみが、合体後は一般相対論、磁気流体過程(あるいは実効的な粘性効果)、ニュートリノ放射などが重要になる。本研究では、場合に応じた数値コードを複数整備し、効率的に中性子星合体過程を明らかにする研究を推進した。さらに、シミュレーションで得られたデータを用いて、r-process 元素合成、キロノバ放射、ガンマ線バーストなどの過程を明らかにし、来る観測結果を解釈する際のモデル構築を進めることも目的とした。加えて2022年度からは、開発したコードを、中性子星連星に限らず、回転する大質量星のブラックホールへの重力崩壊とその後の爆発現象に応用することも視野に入れた。

## 3. 研究の方法

世界最先端の数値コードを用いて、中性子星合体に対する信頼性の高い一般相対論的数値シミュレーションを多数実行し、合体から合体後に至るまでの過程を解明し、さらに連星の質量などによる合体現象の依存性を明らかにすることをまず進めた。次に得られた数値データを利用して、合体前後に放射される電磁波信号の定量的な予言および元素合成の理解を進めた。さらには、回転する大質量星の重力崩壊によるブラックホール形成と付随した爆発現象に対しても研究を行った。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。

まず連星中性子星に対して数値相対論的輻射流体シミュレーションを行い、合体後に誕生する天体についての理解を進めた。さらに合体後の長時間進化を解明するために、合体計算で得られた結果を初期条件として軸対称の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・合体後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、化学組成などを明らかにした。

の計算では、粘性流体近似を用いて、合体後の進化を調べたが、実際のところ粘性は、実効的には磁気流体過程によって生み出される。そこで、軸対象の輻射磁気流体シミュレーション(resistive MHD シミュレーション)も並行して行った。

やの研究では、合体シミュレーションとその後のシミュレーションを分けて行うのだが、その場合、合体後のシミュレーションで用いる磁場の初期条件などに曖昧さが残る。そこで、合体から合体後に至るまで首尾一貫して連続的に長時間輻射磁気流体シミュレーションも行った。

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、キロノバの光度曲線やスペクトルのモデルを求めた。

と同様の軸対称シミュレーションを大質量星の重力崩壊およびその後の爆発現象の探求に対しても行った。

## 4. 研究成果：ページ数制限の都合上、特に重要な成果を3つに絞って説明する。

### Self-consistent simulation for neutron-star mergers and r-process nucleosynthesis

過去25年間にわたる数値相対論シミュレーションから分かったことは、連星中性子星の合体後には、ブラックホールまたは大質量の中性子星が形成されることである。また一般的には、それらの周りに降着円盤が形成される。ブラックホールが形成される場合には、形成されるまでの時間が長いほど降着円盤の質量も大きくなる。ブラックホール・中性子星連星が合体する場合には、ブラックホールの質量が極端に小さいかあるいはスピンの大きい場合に、中性子星が

潮汐破壊されるが、その場合にもブラックホール周りに降着円盤が形成される。降着円盤が誕生する場合には、合体時に幾ばくかの質量の物質が系外に放出される。これは dynamical ejecta と呼ばれる。これとは別に、降着円盤の長時間進化の過程で物質が放出されるが、これは post-merger ejecta と呼ばれる。したがって、系外に放出される ejecta の総量は 2 つの ejecta の和で決まる。Ejecta は、r-process 重元素合成やキロノバの源なので、これらの質量や性質を明らかにすることが、宇宙物理学的には極めて重要である。そこでこれを主目的に研究を進めた。特に我々の研究以前には正確には分かっていたいなかった post-merger ejecta の性質を決めるために、多数の長時間輻射粘性流体シミュレーションを行った(Fujibayashi et al., Phys. Rev. D. **101**, 083029; **102**, 123014 (2020); Astrophys. J. **901**, 122 (2020); Astrophys. J. **942**, 39 (2023))。

具体的には、まず合体のシミュレーションを合体後数十ミリ秒行った後に、それを、初期条件を作る参考データにして、輻射粘性流体シミュレーションを 10 秒程度実行した。その結果分かったことは、以下である。(i) 合体後にブラックホールが速やかに誕生して、ブラックホールと降着円盤からなる系が誕生した場合には、初期の降着円盤質量の 10% 程度が post-merger ejecta として放出される。連星中性子星の合体の場合、dynamical ejecta の量がせいぜい太陽質量の 1% 程度なのに対して、post-merger ejecta の量は太陽質量の 1—2% 程度になる。ブラックホール・中性子星連星において中性子星が潮汐破壊される場合には、dynamical ejecta が太陽質量の数% にもなる場合があるが、その場合には、post-merger ejecta は dynamical ejecta よりも少なくなる(Hayashi et al. Phys. Rev. D **106**, 023008 (2022))。(ii) 合体後に大質量中性子星が誕生し、それが 1 秒以上生き残るような場合には、post-merger ejecta の量は太陽質量の 5—10% にも及ぶ。一方このような系では dynamical ejecta の量は少なく、太陽質量の 0.1—0.2% 程度である(Fujibayashi et al. Astrophys. J. **942**, 39 (2023))。(iii) post-merger ejecta は次のような過程で放出される：形成直後の降着円盤は、最大温度が 5—7MeV 程度と高く、また最大密度も  $10^{12}\text{g/cm}^3$  程度である。このような系からは大量のニュートリノが放射され冷却機構として働く。降着円盤内では粘性過程により角運動量が輸送され、さらに粘性加熱で熱が生じる。ニュートリノ冷却が効く間は、発生した熱は短時間で失われ、質量放出に貢献しない。しかし、粘性角運動量輸送の結果、円盤が外側へ広がり、密度と温度が断熱膨張で下がると、ニュートリノ放射光度が下がる。ニュートリノの光度は温度の約 6 乗に比例するため、光度の減少は急激であり、降着円盤の最大温度が 3MeV 以下になると、ニュートリノ冷却の時間スケールが降着円盤内の粘性進化の時間スケールを上回る。すると、粘性加熱で発生した熱が質量放出に使われるようになり、post-merger ejecta が現れ出す。Post-merger ejecta が発生し始める時間は合体後数百ミリ秒後であり、dynamical ejecta が発生する時間である数ミリ秒に比べると圧倒的に長い。(iv) post-merger ejecta が発生する段階での降着円盤の密度は  $10^9\text{g/cm}^3$  程度である。この程度の密度であると、電子の縮退が弱く、中性子過剰度は極端に高くない。その結果、post-merger ejecta の電子濃度は平均的に 0.3 程度になり、これが 0.1 を下回るような成分は存在しない。一方 dynamical ejecta に関しては、0.05—0.1 の成分を多く含む。連星中性子星合体の場合には、電子濃度が 0.05 から 0.4 付近まで幅広く分布する。一方、ブラックホール・中性子星連星の合体では、0.05—0.1 におのみ電子濃度が分布する。これは、連星中性子星合体の場合には、合体時の衝撃波加熱が重要な効果を及ぼし、合体残存物の温度を上げ、弱い相互作用による電子濃度の上昇に寄与するが、ブラックホール・中性子星連星の場合には、衝撃波加熱の効果がなく、中性子星が持つ電子濃度が、dynamical ejecta の性質にそのまま反映されるためである。

以上の研究の重要な点をまとめる：連星中性子星合体で、寿命の長い大質量中性子星が誕生する場合には、post-merger ejecta が大量に発生する一方、dynamical ejecta の量が少ない。その結果、電子濃度の比較的高い成分が卓越してしまう。この結果を用いて元素合成計算を行うと、比較的质量数の小さい、つまり r-process 元素の言葉で言えば、第 2 ピーク以下の質量数を持つ元素が大量に合成され、第 3 ピーク付近の質量数を持つ元素の合成が少なくなる。この元素合成パターンは、太陽系における r-process 元素の分布と全く合わない(図 1 の右側のパネルを参照)。一方、連星中性子星合体後、比較的短時間でブラックホールが誕生する場合には、電子濃度の低い成分と高い成分が共に太陽の 1—2% ほど存在する。このような場合には、r-process 元素が太陽組成と似た割合で合成される(図 1 の左と中央のパネル参照)。つまり太陽組成を再現するには、合体後に寿命の長い大質量中性子星が大量に生成されるとまずいのである。

ブラックホール・中性子星が合体し、中性子星が潮汐破壊される場合についても研究を進めたが、質量比が 4:1 や 6:1 の場合には、dynamical ejecta と post-merger ejecta の量が雑には同程度であるため、太陽組成を近似的に再現する結果が得られる(Wanajo et al., Physical Review Lett. in submission)。

これらの結果、以下の結論が導かれる：仮に中性子星合体が、r-process 元素の主たる源だとすれば、連星中性子星合体の結果、大質量中性子星が形成されることは稀でなくてはならない。これは、連星中性子星の典型的な質量が比較的大きいのか、あるいは中性子星の状態方程式が比較的柔らかいために(それでも太陽質量の 2 倍の質量を持つ中性子星の存在は説明できなければならない)、ブラックホールが誕生しやすいかを暗示する。一方、ブラックホール・中性子星の合体は太陽組成を再現するのに都合がよさそうであり、合体頻度はさほど問題にならない。継続時間の短いガンマ線バーストに対しては、マグネター仮説が有力な説の一つである。この仮説では、連星中性子星の合体後に高強度の磁場を持つ大質量中性子星が誕生し、磁場を介して中性子星の回転運動エネルギーを抽出し、周りの物質にエネルギーを与え、ガンマ線バース

トなどの爆発現象を説明する。しかし、連星中性子星合体が r-process 元素合成の主過程だとすれば、マグネターによるガンマ線バーストは稀でなくてはならない。いずれにせよ、将来、中性子星合体が重力波観測により大量に見つかり、その質量や合体の様相が詳しく分かるようになれば、r-process 元素合成の中性子星合体仮説の可否が明らかになるはずである。

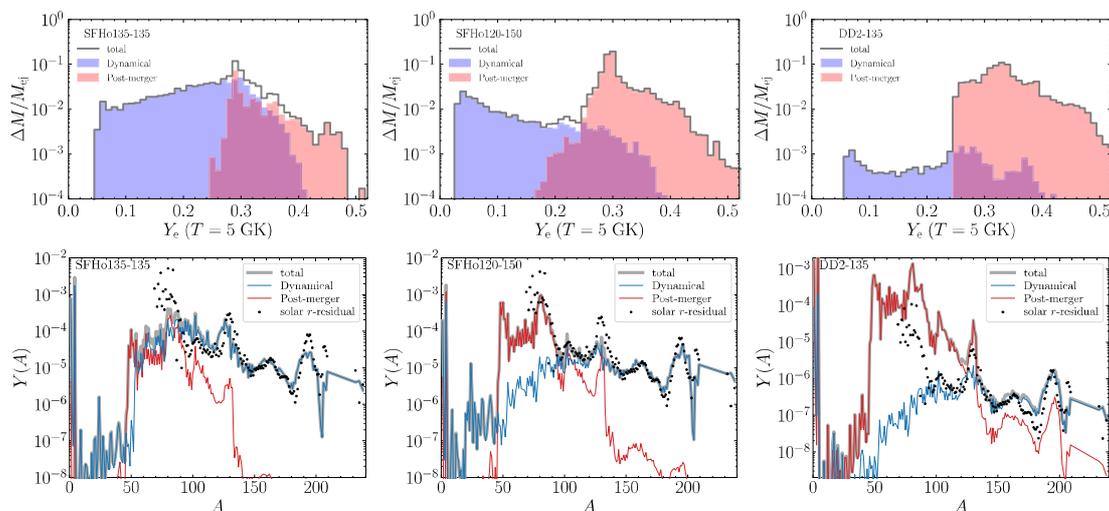


図 1：連星中性子星合体により放出される物質の電子濃度( $Y_e$ )の質量分布(上)と元素合成計算結果(下)。左が、ともに質量が 1.35 太陽質量の中性子星が合体し、合体後約 13 ミリ秒後にブラックホールが形成される場合、中央が、1.2-1.5 太陽質量の中性子星が合体し、合体後約 18 ミリ秒後にブラックホールが形成される場合、右が共に質量が 1.35 太陽質量の中性子星が合体し、大質量の中性子星が 1 秒以上生き残る場合。右の場合は、採用した状態方程式が硬いため、大質量中性子星が誕生する。大質量中性子星が誕生すると、電子濃度の低い成分が ejecta に少なく、比較的質量数の小さい重元素( $A < 120$ )が大量に合成される。図は Fujibayashi et al. *Astrophysical Journal* 942, 39 (2023)より転載。

#### Ultra-long numerical simulation of neutron-star mergers

前項で行った研究では、合体現象を調べるシミュレーションと合体後の進化を調べるシミュレーションを分けて行った。また合体後は、主に粘性流体近似を採用してシミュレーションを行った。ここで、粘性は実効的には、磁気流体効果として現れることがよく知られているので、より第一原理的に現象を調べるには、輻射磁気流体シミュレーションを行なわなくてはならない。しかも、粘性効果は、現実的には、回転磁気流体不安定性とそれに付随したダイナモのような 3 次元効果が本質的な現象によって生じると考えられるので、空間 3 次元のシミュレーションが不可欠である。さらに、磁場の形状の任意性をなくすには、合体前から合体後まで継続するシミュレーションが望ましい。

そこで、本研究では、ブラックホール・中性子星連星(Hayashi et al., *Phys. Rev. D* **106**, 023008 (2022); *Phys. Rev. D* **107**, 123001 (2023)), および連星中性子星(Kiuchi et al., *Phys. Rev. Lett.* **131**, 011401 (2023); *Nature Astronomy* **8**, 298 (2024))の両方に対して、実時間 1—5 秒に及ぶ超長時間シミュレーションを世界で初めて実行した。その結果、得た結果は定性的には正しいことが確認された。つまり、質量放出は 2 段階にわたって進むこと、post-merger ejecta は降着円盤の温度が下がった時に発生すること、dynamical ejecta が低い電子濃度を持ち、post-merger ejecta は比較的高い電子濃度を持つこと、などが確認された。

ブラックホール・中性子星連星の合体の場合には、さらに、合体後数百ミリ秒後にブラックホールを貫く極磁場が成長することを発見した。これは、降着円盤中で回転磁気流体不安定性によって成長した磁場が、ブラックホールへの物質降着に伴い落ちる際に、ブラックホールの回転によってさらに増幅されると形成される。一旦揃った極磁場が形成されると、Blandford-Znajek 機構により、ブラックホールの回転エネルギーが抜き取られ、ガンマ線バーストを説明するのに適した Poynting flux や outflow が発生することも発見した(図 2)。電子濃度の組成分布も、r-process 元素の太陽組成を説明するのに適したものであった。質量放出、r-process 元素合成、ガンマ線バーストなどを守備一貫して説明することのできる第一原理的なシミュレーションが実行できたことは非常に大きな成果である。

連星中性子星の場合に関しても、特に大質量中性子星が誕生する場合についての磁気流体効果の解明に大きな成果があった(Kiuchi et al. *Nature Astronomy* **8**, 298 (2024))。この場合、合体後に形成されるのは、中性子星とそれを取り巻くトーラスだが、中性子星の外縁部とトーラスはほぼケプラー速度の角速度を持つ。このような領域では効率的に回転磁気流体不安定性が進むた

め、磁場が増幅する。磁場の一部は中性子星に刺さっているため、一旦強磁場が発達すると次には、中性子星の回転による巻き込みで磁場はさらに増幅される。最終的には、磁気圧が十分に強くなるため、効率的に質量放出が起きる。これは dynamical ejecta とともに、これまで見てきた post-merger ejecta と異なる機構で起きる質量放出である。我々のシミュレーションでは、0.1 太陽質量にも及ぶ大きな質量放出が見られた。もしもこのような合体現象が現実に行きれば、キロノバとして非常に明るく輝くだろう。つまり、比較的軽い質量の連星中性子星が合体するとキロノバが非常に明るくなることが予言される。

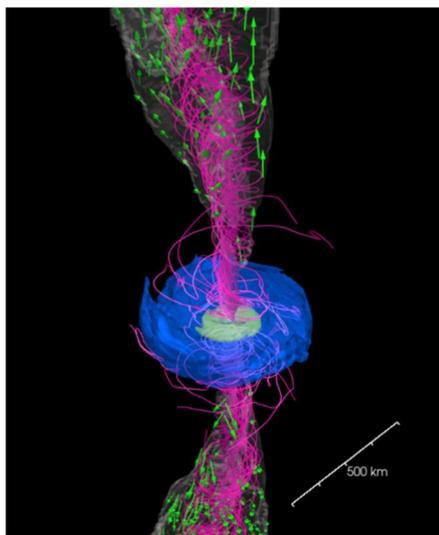


図2：ブラックホール・中性子星の合体後に誕生したブラックホール・降着円盤系での磁気圏構造と outflow の速度場。Hayashi et al. Phys. Rev. **106**, 023008 (2022)より転載。

#### Explosion for collapsar

他にも、回転する大質量星のブラックホールと降着円盤への重力崩壊のシミュレーションで、興味深い結果を得た(Fujibayashi et al. Astrophys. J. 956, 100 (2023); Phys. Rev. D **109**, 023031 (2024); Shibata et al. Phys. Rev. D **109**, 043051 (2024))。

十分に大きな角運動量を持つコンパクトな大質量星が重力崩壊すると、最終的にはブラックホールと降着円盤からなる系が誕生する。ブラックホール形成初期には落下物質の角運動量が小さいために降着円盤は誕生しないが、外縁部の角運動量が高い物質が降着し始めると、やがて降着円盤が誕生する。降着円盤内では回転磁気流体不安定性が発生し、また降着円盤の表面では落下物質が斜め衝撃波を形成させるので、実効的な粘性が生じると考えられる。そこで粘性流体近似を用いて降着円盤の進化をまず追った。すると粘性加熱の結果、降着円盤のブラックホール近傍の表面で十分な加熱が起きることがわかった。落下物質の密度が高く、ラム圧が高い段階では、outflow が発生することはないが、落下物質の密度が下がると最終的に outflow が発生し、それが星全体を爆発させることを見出した。特に、大質量星の質量が大きい場合には、外縁からの質量落下率も高い。その結果、粘性加熱効率も上がるため、爆発エネルギーが  $10^{52}$  erg にも達することを示した。また同時に爆発時の高温化のために、0.1 太陽質量を超えるニッケルを合成できることも同時に示した。これらの値は、極超新星爆発を説明するのに適した値であり、ブラックホール降着円盤が、極超新星爆発のモデルとして適していることが見出された。

その後、輻射磁気流体シミュレーションも行い(Shibata et al., Phys. Rev. D **109**, 043051 (2024))、特に極磁場がブラックホールを貫いている場合の影響を調べた。そして、極磁場が貫く場合には、Blandford-Znajek 効果によりブラックホール回転運動エネルギーが効率よく抜き取られるために、極超新星を超えるような爆発が容易に起きることがわかった。また、ガンマ線バーストを発生させるようなジェットも生成できることがわかった。しかしながら、初期磁場強度が強すぎると、爆発エネルギーが大きくなり過ぎて、現実的な値にならない。これはブラックホールが持つ回転運動エネルギーが、容易に  $10^{53}$  erg を超えてしまうためである。したがって、ある程度の強度が高い極磁場は、ブラックホール誕生時には存在しないであろうことが示された。最終的にガンマ線バーストを発生させるには、極磁場が生成されると考えられるが、それは降着円盤が十分に発達した結果、生成されるものだと考えられる。そして、星の重力崩壊が十分進み、ブラックホール周辺のガス圧が十分に下がった後は、極磁場は赤道方向に開き、やがて reconnection を起こし、磁気強度が減衰し、ブラックホールの回転エネルギーを抜き取り過ぎないと予想される。今後は、大質量星の重力崩壊の後に、ブラックホールを貫く極磁場がどのように生じるのか、また長時間進化の間にもどのように散逸するのか調べるのが課題である。

その他：キロノバ光度曲線モデルの導出、スカラーテンソル理論での中性子星合体、ブラックホール・中性子星連星合体直前の電磁波放射、など、様々な研究も行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計40件（うち査読付論文 40件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Hayashi Kota, Fujibayashi Sho, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 106
2. 論文標題 General-relativistic neutrino-radiation magnetohydrodynamic simulation of seconds-long black hole-neutron star mergers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.023008	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, Fujibayashi Sho, Hotokezaka Kenta, Shibata Masaru, Wanajo Shinya	4. 巻 933
2. 論文標題 Electromagnetic Counterparts of Binary-neutron-star Mergers Leading to a Strongly Magnetized Long-lived Remnant Neutron Star	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 22 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6ef7	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 Dudi Reetika, Adhikari Ananya, Br?gmann Bernd, Dietrich Tim, Hayashi Kota, Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Shibata Masaru, Tichy Wolfgang	4. 巻 106
2. 論文標題 Investigating GW190425 with numerical-relativity simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.084039	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 Fujibayashi Sho, Kiuchi Kenta, Wanajo Shinya, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 942
2. 論文標題 Comprehensive Study of Mass Ejection and Nucleosynthesis in Binary Neutron Star Mergers Leaving Short-lived Massive Neutron Stars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 39 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9ce0	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 Zhou Enping, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Tsokaros Antonios, Ury? K?ji	4. 巻 106
2. 論文標題 Evolution of equal mass binary bare quark stars in full general relativity: Could a supramassive merger remnant experience prompt collapse?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.103030	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 Kiuchi Kenta, Held Loren E., Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 106
2. 論文標題 Implementation of advanced Riemann solvers in a neutrino-radiation magnetohydrodynamics code in numerical relativity and its application to a binary neutron star merger	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.124041	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 Kawaguchi Kyohei, Fujibayashi Sho, Shibata Masaru	4. 巻 107
2. 論文標題 MonteCarlo?based relativistic radiation hydrodynamics code with a higher-order scheme	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.023026	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, Traykova Dina	4. 巻 107
2. 論文標題 Properties of scalar wave emission in a scalar-tensor theory with kinetic screening	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.044068	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 Lam Alan Tsz-Lok, Shibata Masaru, Kiuchi Kenta	4. 巻 107
2. 論文標題 Numerical-relativity simulation for tidal disruption of white dwarfs by a supermassive black hole	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.043033	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 Pais Matteo, Piran Tsvi, Lyubarsky Yuri, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru	4. 巻 946
2. 論文標題 The Collimation of Relativistic Jets in Post-Neutron Star Binary Merger Simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L9 ~ L9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acc2c5	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 Zhou Enping, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Tsokaros Antonios, Uryu Koji	4. 巻 103
2. 論文標題 Evolution of bare quark stars in full general relativity: Single star case	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.123011	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 Kawaguchi Kyohei, Fujibayashi Sho, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi, Wanajo Shinya	4. 巻 913
2. 論文標題 A Low-mass Binary Neutron Star: Long-term Ejecta Evolution and Kilonovae with Weak Blue Emission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 100 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf3bc	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, Takahashi Koh, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 919
2. 論文標題 Ultra-delayed Neutrino-driven Explosion of Rotating Massive-star Collapse	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac10cb	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, Reula Oscar	4. 巻 104
2. 論文標題 Magnetospheres of black hole-neutron star binaries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.063004	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, Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Long-term evolution of neutron-star merger remnants in general relativistic resistive magnetohydrodynamics with a mean-field dynamo term	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.063026	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 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 84006
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, Wanajo Shinya, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro	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 83029
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 -

1. 著者名 Kawaguchi Kyohei, Shibata Masaru, Tanaka Masaomi	4. 巻 893
2. 論文標題 Constraint on the Ejecta Mass for Black Hole?Neutron Star Merger Event Candidate S190814bv	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 153 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8309	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 Fujita Ryuichi, Shibata Masaru	4. 巻 102
2. 論文標題 Extreme mass ratio inspirals on the equatorial plane in the adiabatic order	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.064005	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 2
2. 論文標題 Reanalysis of the binary neutron star mergers GW170817 and GW190425 using numerical-relativity calibrated waveform models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043039	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, Wanajo Shinya, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 901
2. 論文標題 Postmerger Mass Ejection of Low-mass Binary Neutron Stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 122 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abafc2	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 Wada Tomoki, Shibata Masaru, Ioka Kunihiro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Analytic properties of the electromagnetic field of binary compact stars and electromagnetic precursors to gravitational waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa126	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, Wanajo Shinya, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Viscous evolution of a massive disk surrounding stellar-mass black holes 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 123014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.123014	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, Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke	4. 巻 103
2. 論文標題 Reducing orbital eccentricity in initial data of black hole?neutron star binaries in the puncture framework	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.023002	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 Hayashi Kota, Kawaguchi Kyohei, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Shibata Masaru	4. 巻 103
2. 論文標題 Properties of the remnant disk and the dynamical ejecta produced in low-mass black hole-neutron star mergers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.043007	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, Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Long-term evolution of a merger-remnant neutron star in general relativistic magnetohydrodynamics: Effect of magnetic winding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.043022	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, Kiuchi Kenta, Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Alternative possibility of GW190521: Gravitational waves from high-mass black hole-disk systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.063037	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 Sumiyoshi Kohsuke, Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 907
2. 論文標題 Properties of Neutrino Transfer in a Deformed Remnant of a Neutron Star Merger	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 92 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abce63	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 Hayashi Kota, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 107
2. 論文標題 General-relativistic neutrino-radiation magnetohydrodynamics simulation of seconds-long black hole-neutron star mergers: Dependence on the initial magnetic field strength, configuration, and neutron-star equation of state	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.123001	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 Kiuchi Kenta, Fujibayashi Sho, Hayashi Kota, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru	4. 巻 131
2. 論文標題 Self-Consistent Picture of the Mass Ejection from a One Second Long Binary Neutron Star Merger Leaving a Short-Lived Remnant in a General-Relativistic Neutrino-Radiation Magnetohydrodynamic Simulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 11401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.011401	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, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Wanajo Shinya	4. 巻 956
2. 論文標題 Collapse of Rotating Massive Stars Leading to Black Hole Formation and Energetic Supernovae	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 100 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acf5e5	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 Kuroda Takami, Shibata Masaru	4. 巻 107
2. 論文標題 Spontaneous scalarization as a new core-collapse supernova mechanism and its multimessenger signals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.103025	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 Kuan Hao-Jui, Lam Alan Tsz-Lok, Doneva Daniela D., Yazadjiev Stoytcho S., Shibata Masaru, Kiuchi Kenta	4. 巻 108
2. 論文標題 Dynamical scalarization during neutron star mergers in scalar-Gauss-Bonnet theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.063033	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 Kuan Hao-Jui, Van Aelst Karim, Lam Alan Tsz-Lok, Shibata Masaru	4. 巻 108
2. 論文標題 Binary neutron star mergers in massive scalar-tensor theory: Quasiequilibrium states and dynamical enhancement of the scalarization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.064057	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 Nedora Vsevolod, Dietrich Tim, Shibata Masaru	4. 巻 524
2. 論文標題 Synthetic radio images of structured GRB and kilonova afterglows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5514 ~ 5523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2128	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 Kawaguchi Kyohei, Fujibayashi Sho, Domoto Nanae, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru, Wanajo Shinya	4. 巻 525
2. 論文標題 Kilonovae of binary neutron star mergers leading to short-lived remnant neutron star formation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3384 ~ 3398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2430	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 Kuroda Takami, Shibata Masaru	4. 巻 526
2. 論文標題 Failed supernova simulations beyond black hole formation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 152 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2710	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, Lam Alan Tsz-Lok, Shibata Masaru, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 109
2. 論文標題 Supernovallike explosions of massive rotating stars from disks surrounding a black hole	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.109.023031	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, Reboul-Salze Alexis, Shibata Masaru, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 8
2. 論文標題 A large-scale magnetic field produced by a solar-like dynamo in binary neutron star mergers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 298 ~ 307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-024-02194-y	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, Fujibayashi Sho, Lam Alan Tsz-Lok, Ioka Kunihito, Sekiguchi Yuichiro	4. 巻 109
2. 論文標題 Outflow energy and black-hole spin evolution in collapsar scenarios	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.109.043051	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12件（うち招待講演 12件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 柴田 大
2. 発表標題 Neutron-star merger simulations
3. 学会等名 binary neutron stars workshop (zoom: Rochester University) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田 大
2. 発表標題 Predictive power of numerical relativity
3. 学会等名 9th ENNAM (Okinawa, online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田 大
2. 発表標題 Hydrodynamics modeling of neutron star mergers
3. 学会等名 Remnants of neutron-star mergers; Connecting hydrodynamics models to nuclear, neutrino, and kilonova physics 'GSI, Germany) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田 大
2. 発表標題 Modeling neutron-star mergers by long-term numerical-relativity simulation
3. 学会等名 Kilonova: Multimessenger and Multiphysics (Badhonnef, Germany) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Post-merger mass ejection from neutron-star merger
3. 学会等名 Computational Challenge in Multimessenger Astrophysics at UCLA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Merger and post-merger of neutron-star binaries
3. 学会等名 Binary neutron star workshop at Rochester University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Toward self-consistent picture of neutron-star mergers based on numerical relativity
3. 学会等名 IAU symposium 362 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaru Sibata
2. 発表標題 Merger of binary neutron stars based on numerical relativity
3. 学会等名 IAU symposium 363 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Predictive power of numerical relativity
3. 学会等名 YKIS2022a, Kyoto (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Multimessenger astronomy and numerical relativity
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Exploring collapsar scenarios in numerical relativity
3. 学会等名 Nishinomiya-Yukawa Symposium on General Relativity and Beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masaru Shibata
2. 発表標題 Exploring neutron-star mergers in numerical relativity
3. 学会等名 DPG spring meeting at Giessen (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 柴田 大	4. 発行年 2021年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 192
3. 書名 数値相対論と中性子星の合体	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/shiba1.html">http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/shiba1.html</a> Homepage of Masaru Shibata <a href="http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/indexj.html">http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/indexj.html</a> Shibata Masaru' home page <a href="http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/indexj.html">http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masaru.shibata/indexj.html</a>
--

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	久徳 浩太郎  (Kyutoku Koutarou)  (30757125)	京都大学・理学研究科・准教授    (14301)	
研究分担者	関口 雄一郎  (Sekiguchi Yuuichiro)  (50531779)	東邦大学・理学部・准教授    (32661)	
研究分担者	仏坂 健太  (Hotokezaka Kenta)  (50867033)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授    (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	田中 雅臣 (Tanaka Masaomi)  (70586429)	東北大学・理学研究科・准教授  (11301)	
研究分担者	井岡 邦仁 (Ioka Kunihito)  (80402759)	京都大学・基礎物理学研究所・教授  (14301)	
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)	2023年度よりドイツに移動したため、分担者から削除したが、共同研究者として貢献

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	Max Planck Institute (AEI)	Jena大学