

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：32661

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17706

研究課題名(和文) 重元素の起源とコンパクト天体連星合体

研究課題名(英文) Coalescence of compact binary and the origin of heavy elements

研究代表者

関口 雄一郎 (SEKIGUCHI, Yuichiro)

東邦大学・理学部・准教授

研究者番号：50531779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：中性子星連星の合体の一般相対論的シミュレーションを行い、合体のダイナミクスおよび合体後に形成される系の進化を明らかにするとともに、放出される物質の総量、熱力学的・化学的特性を定量的に評価した。得られたシミュレーションデータに基づく元素合成計算を行い、中性子星連星の合体において生成される重元素の組成を明らかにした。その結果、中性子星連星の合体は宇宙における重元素の有望な起源天体であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1950年代の理論的研究の後、約半世紀にわたって、宇宙における重元素の起源天体は超新星爆発であると考えられてきた。2000年代に超新星爆発の研究が進み、超新星爆発では重元素を効率的に生成することが難しいことが明らかとなり、代わって注目をされたのが中性子星連星の合体である。本研究結果は、重元素の起源が中性子星連星の合体であるとするこの仮説を強く支持するものである。今後のさらなる研究によって、半世紀以上にわたるこの謎に決着がつく可能性がある。

研究成果の概要(英文)：By performing numerical-relativity simulations of the coalescence of binary neutron stars, we clarified the dynamics of the merger and the subsequent evolution of the system. We also clarified quantitatively the total amount of ejected materials as well as the thermodynamical and chemical properties of them. Using these data obtained, we performed nucleosynthesis calculations that proceed in the ejecta. As a main result, we concluded that the coalescence of binary neutron stars is the promising astrophysical origin of heavy element in the universe.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：元素合成 中性子星 重力波 一般相対性理論

1. 研究開始当初の背景

1950年代後半に、金やウランなどの重元素が r 過程 (速い中性子捕獲による元素合成) によりつくられることが示されたが、r 過程が宇宙のどのような天体で起こっているかについては明らかになっていなかった。2010年代初頭までは、大質量星が進化の最期に起こす重力崩壊型の超新星爆発が、これら r 過程元素の起源である可能性が高いと考えられていたが、元素合成の理論研究の進展により、超新星爆発が r 過程元素の起源である可能性は極めて低いことが示された。爆発機構として最有力視されているニュートリノ加熱機構では、r 過程の進行に必要な中性子過剰な環境を保つことが非常に難しいためである。

それに代わるシナリオの一つとして、中性子星 中性子星連星の合体が r 過程元素の起源となる可能性がドイツ、スイス、イギリスなどの研究グループにより示唆されていたが、この場合には逆に、中性子星合体からの放出物質の中性子過剰率が高すぎるために、質量数 130 以上の重い r 過程元素の合成しか説明ができず、観測事実と矛盾するという問題があった。

これに対し、我々は、一般相対論およびニュートリノと物質の相互作用を考慮した中性子星連星合体の数値相対論シミュレーションを実行し、得られた結果に基づいて重元素合成計算を行った。その結果、中性子星 中性子星連星の合体によって質量数 80~130 の r 過程元素が合成され、観測事実を説明できることを明らかにした。しかしより確固たる結論を導くためには、さらなる研究の遂行が必要であった。

2. 研究の目的

上述の研究背景に基づき、本研究では、これまでの研究結果に基づき、「中性子星 中性子星連星の合体を r 過程元素の起源とする仮説」を採用し、この仮説に基づき重元素の起源天体の解明を目指すことを目的とした。この仮説の成立の可否を調べるためには、(1) 中性子星 中性子星連星合体についてより詳細に調べるとともに、(2) 他のシナリオ (中性子星 ブラックホール連星合体) における r 過程元素合成に関する観測事実の説明可能性と、中性子星 中性子星合体仮説との違いについても調べる必要がある。

そこで、本研究では、中性子星 中性子星連星合体および中性子星 ブラックホール連星合体の数値相対論シミュレーションを遂行し、上記 (1), (2) について調べ、中性子星 中性子星連星の合体が重元素の起源であるという仮説の検証を行った。

3. 研究の方法

2016年の研究開始当初は、連星合体時に放出される中性子過剰の物質が元素合成にとって主たるものであると考えられていたので、3次元数値相対論ニュートリノ輻射流体シミュレーションによって中性子星 中性子星連星および中性子星 ブラックホール連星の合体過程と合体における放出物質の総量や熱力学・化学的性質を明らかにするとともに、その状態方程式、連星パラメータ依存性を調べた。

しかし、2017年8月17日に、中性子星 中性子星連星合体からの重力波 GW170817 が史上初めて検出されたことによって状況が大きく変わる事となった。重力波の観測に伴って、世界中の望遠鏡および天文観測衛星による電磁波の追観測が行われ、ガンマ線から電波にわたる波長域でその対応天体が見つかり、合体に関する豊富な知見がもたらされたのである。特に、紫外線 可視光線 赤外線領域では、本研究の主要テーマである「r 過程元素合成」の際に生成される核反応崩壊熱をエネルギー源とする「キロノバ」と呼ばれる電磁波現象が観測され、それに伴って、重元素の起源に関する情報がフィードバックされたのである。

その結果は、中性子星 中性子星連星合体によって (a) r 過程元素が合成された可能性が高いが、(b) 従来想定していた「合体時」の質量放出では観測を説明するのが難しい、というものであった。

そこで、2018年度の研究からは「合体後」に形成される天体 (中性子星 降着円盤、ブラックホール 降着円盤) からの質量放出過程に着眼し、そこでの r 過程元素合成について調べることが目的として研究方法の変更を行った。すなわち、2016年度における中性子星 中性子星連星および中性子星 ブラックホール連星の合体の 3次元数値相対論シミュレーションの結果を初期条件として、「合体後」の系の 2次元数値相対論シミュレーションを行い、系の長時間進化を明らかにするとともに、放出物質の総量や熱力学・化学的性質を明らかにすることを目的として研究を行った。

降着円盤からの質量放出過程では、粘性加熱が重要な役割を果たすと考えられるので、一般相対論的粘性流体シミュレーションのための数値相対論コードを作成し、これを既存の一般相対

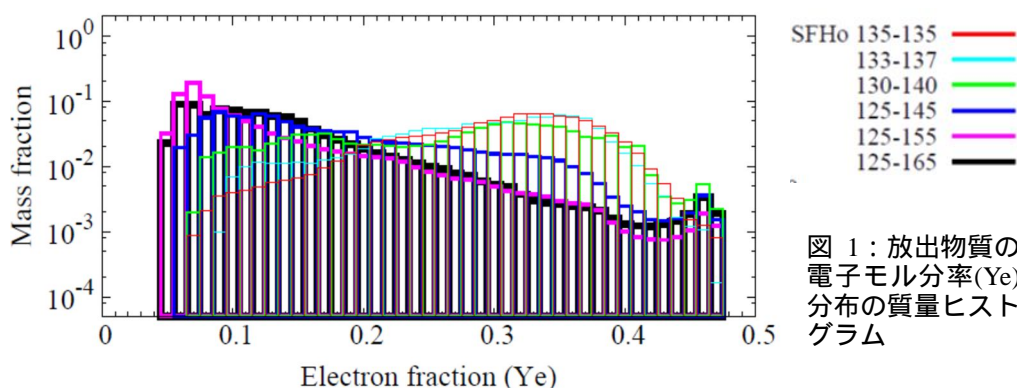
論的ニュートリノ輻射流体シミュレーションコードと組み合わせた数値相対論コードを作成した。

さらに、中性子星 中性子星連星合体からの重力波 GW170817 では、それまで未解明であった中性子星の状態方程式に関するかなり強い制限も得られたため、状態方程式依存性を広くサーベイするという研究開始当初の研究方法を変更し、GW170817 と整合的な状態方程式のみを採用することとした。

4. 研究成果

本研究の主要な成果は、物理的に首尾一貫した方法によって、中性子星 中性子星連星および中性子星 ブラックホール連星の合体ダイナミクスおよび合体後の系の進化を明らかにし、中性子星 中性子星連星合体が重元素の起源として有望な天体であることを示したことである。本課題の研究テーマである「r過程元素（金やプラチナ、ウランなどの重元素）の起源」は、半世紀以上にもわたる宇宙物理学の問題であり、その解明に大きく貢献する本研究課題の持つ意義は大きいといえる。主要な研究成果の詳細について、以下にまとめる。

- (1) 中性子星 中性子星連星合体の 3 次元数値相対論シミュレーション： 図 1 に GW170817 と整合的な中性子星状態方程式を採用した場合における、連星「合体時」の放出物質中の電子モル分率 (Electron fraction Y_e : 1 - 中性子過剰度) の分布を示す。弱い相互作用の効果によって中性子過剰度が減少することが示されている。その結果、観測と整合的な元素合成パターンが得られることが分かった。



- (2) 中性子星 ブラックホール連星合体の 3 次元数値相対論シミュレーション： 図 2 に合体時に放出される物質の軌道面と子午面における電子モル分率(Y_e)およびバリオン当たりのエントロピーのプロファイルを示す。中性子星 ブラックホール連星合体では、主として潮汐相互作用による質量放出が起こるため、弱い相互作用による中性子過剰度の減少が働かず、極めて中性子過剰の物質が放出されることが分かった。

中性子星 ブラックホール合体が主要な重元素の起源であるとする、素朴には観測と相いれない可能性が高いが、米国の重力波望遠鏡LIGOらの研究グループによる重力波観測の結果からは、中性子星 ブラックホール連星合体は極めてまれな現象であることが示唆されており、宇宙における主要な重元素の起源としてはあまり有望でないことが示唆された。

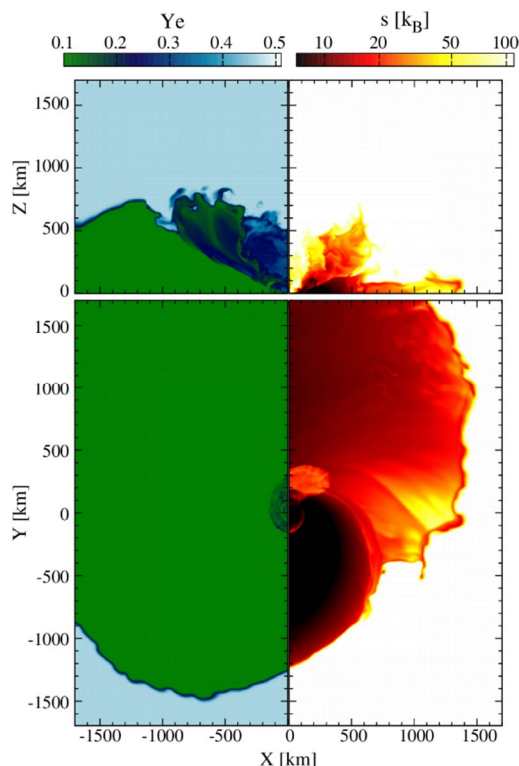


図 2: 中性子星 ブラックホール連星合体における放出物質のプロファイル

- (3) 数値相対論シミュレーションによる重力波イベント GW170817 のモデル化：2017 年に初めて観測された中性子星 中性子星連星合体からの重力波イベントとそれに付随した重力波放出現象について、数値相対論シミュレーションに基づくモデル化を行った。その結果、特にパラメータの微調整などを行うことなく、数値相対論シミュレーションによる理論予測によって GW170817 の観測をよく説明できることを明らかにした。
- (4) 「合体後」の系からの質量放出とそれにおける元素合成：一般相対論的粘性流体シミュレーションのための数値相対論コードを用いて、「合体後」に形成される中性子星 降着円盤系およびブラックホール 降着円盤系の数値相対論シミュレーションを行い、放出物質の熱力学的・化学的組成を明らかにするとともに、r 過程によって合成される重元素の組成費を明らかにした。その結果、上述の (1), (2) における「合体時」の質量放出と組み合わせることで、観測結果を説明可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|----------------------|
| 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 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 Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru | 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 |
| 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 Fujibayashi Sho, Kiuchi Kenta, Nishimura Nobuya, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru | 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 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 64 |
| 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 Shibata Masaru, Fujibayashi Sho, Hotokezaka Kenta, Kiuchi Kenta, Kyutoku Koutarou, Sekiguchi Yuichiro, Tanaka Masaomi | 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 |
| 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 Kyutoku Koutarou, Kiuchi Kenta, Sekiguchi Yuichiro, Shibata Masaru, Taniguchi Keisuke | 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 23009 |
| 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 Fujibayashi Sho, Sekiguchi Yuichiro, Kiuchi Kenta, Shibata Masaru | 4. 巻 846 |
| 2. 論文標題 Properties of Neutrino-driven Ejecta from the Remnant of a Binary Neutron Star Merger: Pure Radiation Hydrodynamics Case | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 114-1, 114-15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/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 Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas, Rynkun Pavel, Rad?i?t? Laima, Wanajo Shinya, Sekiguchi Yuichiro, Nakamura Nobuyuki, Tanuma Hajime, Murakami Izumi, Sakaue Hiroyuki A. | 4. 巻 852 |
| 2. 論文標題 Properties of Kilonovae from Dynamical and Post-merger Ejecta of Neutron Star Mergers | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 109 ~ 109 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa0cb | 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 Sekiguchi Yuichiro | 4. 巻 20 |
| 2. 論文標題 Exploring Physics of Neutron Star Matter by Gravitational Waves | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 11045 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.20.011045 | 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 Yuichiro Sekiguchi, Kenta Kiuchi, Koutarou Kyutoku, Masaru Shibata, and Keisuke 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 |
| 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 Masaru Shibata, Yuichiro Sekiguchi, Haruki Uchida, and Hideyuki 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(R) |
| 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 - |

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 11件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Lectures on Physics of Gravitational Waves from Neutron Star Merger |
| 3. 学会等名 The 8th Huada School on QCD (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 関口雄一郎 |
| 2. 発表標題 連星中性子星合体とrプロセス元素合成 |
| 3. 学会等名 原子核物理でつむぐrプロセス (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Compact binary coalescence physics |
| 3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physic (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 関口雄一郎 |
| 2. 発表標題 数値相対論：数値流体計算と比較して |
| 3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Constraining EOS of NS : achievements in GW170817 and future prospects |
| 3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 GW170817: Observations and Modelling |
| 3. 学会等名 The international workshop on nuclear physics for astrophysical phenomena (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 関口雄一郎 |
| 2. 発表標題 GW170817: Multi-messenger Observations and Modelling |
| 3. 学会等名 高エネルギー突発現象の多波長・多粒子観測と理論 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 GW170817: Observations and Modelling |
| 3. 学会等名 Origin of Elements and Cosmic Evolution: From Big-Bang to Supernovae and Mergers (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Impact of GW170817 on the NS-matter equation of state |
| 3. 学会等名 YKIS2018b Symposium : Recent Developments in Quark-Hadron Sciences (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Numerical relativity: generating space-time on computers |
| 3. 学会等名 The 11th Mathematical Society of Japan (MSJ) Seasonal Institute (SI) (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 関口雄一郎 |
| 2. 発表標題 連星合体からの重力波で探る高密度天体 |
| 3. 学会等名 第31回 理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論：未来へ向けての再考」(招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Properties of the dynamical ejecta in binary neutron star merger and r-process nucleosynthesis |
| 3. 学会等名 The Eighth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2018) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 関口雄一郎 |
| 2. 発表標題 連星中性子星合体と現実的な数値相対論 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Numerical Relativity simulations of neutron-star binaries in Kyoto group |
| 3. 学会等名 Hot Topics in General Relativity and Gravitation (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 関口雄一郎 |
| 2. 発表標題 連星中性子星の質量分布に基づく合体時放出物質の平均的性質 |
| 3. 学会等名 天文学会2017年秋季年会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Dynamical Mass Ejection from BNS Mergers and r-Process Nucleosynthesis |
| 3. 学会等名 Neutron Star Mergers and Galactic Chemical Evolution (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 GW170817: A Modelling Based on Numerical Relativity |
| 3. 学会等名 Hadron and Nuclear physics workshop 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 GW170817 : Observations and Theoretical modelling |
| 3. 学会等名 Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 関口雄一郎, 柴田大, 打田 晴輝, 梅田秀之 |
| 2. 発表標題 超大質量星の重力崩壊に伴う重力波放射 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Gravitational waves and the nuclear equation of state |
| 3. 学会等名 Quark Matter 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichiro Sekiguchi |
| 2. 発表標題 Exploring physics of neutron star matter by gravitational waves |
| 3. 学会等名 Quarks and Compact Stars 2017 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|