

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00694

研究課題名（和文）新しい精密重元素原子データで読み解く中性子星合体の元素合成

研究課題名（英文）Decoding nucleosynthesis in neutron star mergers through accurate atomic data of the heavy elements

研究代表者

田中 雅臣（Tanaka, Masaomi）

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：70586429

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,500,000円

研究成果の概要（和文）：中性子星合体で合成される重元素に対して網羅的な原子構造計算を行い、キロノバの電磁波放射の理解の基盤となる原子データを構築することができた。また、原子構造計算のベンチマークとすべく、重元素のレーザー誘起ブレイクダウン分光実験を行い、遷移確率の測定を行った。これらの結果を用いて完全性の高く、かつ正確な原子データを構築し、キロノバの輻射輸送シミュレーションを実施し、キロノバの可視光・赤外線スペクトルに重元素の特徴を同定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、中性子星合体からの電磁波シグナル（キロノバ）の解釈のために必要不可欠な重元素の原子データを構築することに成功した。その結果、キロノバのスペクトルの解釈が可能となり、中性子星合体でストロンチウム、セリウム、ランタンといった元素が合成されたことを初めて分光学的に明らかにすることができた。本研究の成果は、宇宙における重元素の起源の理解を大きく進めるものである。また、構築した原子データは全世界に向けて公開されており、本研究の成果は広く研究コミュニティに貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：By performing systematic atomic calculations for heavy elements synthesized in neutron star mergers, we have constructed fundamental atomic data for the interpretation of kilonova signal. Also, we performed laser induced breakdown spectroscopy to measure transition probabilities of heavy elements, which serve as benchmark for theoretical atomic calculations. By using these results, we constructed complete and accurate atomic data for the application to kilonova. We have performed radiative transfer simulations using the new atomic data and succeeded in identifying heavy element features in optical and near-infrared spectra of kilonova.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：中性子星合体 原子データ 重力波 重元素

1. 研究開始当初の背景

2017年に中性子星合体からの重力波が検出され (GW170817)、その速報を受けて世界中の電磁波望遠鏡が追観測を行った結果、GW170817の電磁波対応天体が様々な波長で同定された。中性子星が合体すると、強い重力波放射が起きるとともに、 10^{-2} 太陽質量程度の物質が宇宙空間に放出される。放出物質中では金やプラチナ、ウランなどを合成する速い中性子捕獲反応 (rプロセス) が起きるため、中性子星合体は宇宙におけるrプロセス元素の起源としても期待されてきた。さらに、新しく合成された原子核が放射性崩壊を起こすことでエネルギーを供給し、可視光・赤外線が放射されると考えられてきた (このような放射は「キロノバ」呼ばれている)。実際にGW170817の電磁波対応天体では、予想されていたキロノバの性質が可視光・赤外線観測され、中性子星合体でrプロセス元素合成が起きていることが観測的に検証された。

しかし、キロノバの観測データから「どのような元素がどれだけ合成されたのか」という具体的な情報を引き出すことはできていなかった。それは、キロノバの放射に寄与する鉄よりも重い元素の束縛遷移データが大きく不足していたためである。rプロセスでは原子番号が約30から90-100程度までの多くの元素が合成されるが、本研究開始時点で、網羅的な原子データが揃っているのはわずか13元素にとどまっていた。そのため、GW170817では可視光・赤外線領域の詳細な分光観測はなされていたが、スペクトルの詳細な特徴から元素組成の情報を引き出すことは不可能であった。

2. 研究の目的

そこで本研究は、中性子星合体の分光データを読み解き、合成された元素の種類を明らかにすること、将来の観測から中性子星合体の元素放出量、元素組成比を導出する手法を確立することを目的として行った。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究では天文学研究者と原子物理学研究者が連携して、原子構造計算とイオン分光実験によって精密な重元素の束縛遷移データを網羅的に構築し、輻射輸送シミュレーションによって中性子星合体からの電磁波放射の正確な計算を行った。

4. 研究成果

(1) 原子構造計算による中性子星合体における不透明度データの構築

原子番号26から88までの重元素に対して、中性元素、一階から三階電離イオンまでを対象に網羅的な原子構造計算を行った。図1(上)は一階電離イオンのエネルギー準位を表しており、基底状態でf殻に電子が入るランタノイドでエネルギー準位が多く、密になっていることが分かる (エネルギー順位が密なほど赤色で表示している)。また、d殻の元素では、電子数が増えるほどエネルギー準位が高くなる傾向があることが分かる。

この結果を用いて、キロノバにおける不透明度を計算し (図1下)、初めて全元素を対象にしたキロノバにおける不透明度のデータを構築することができた (Tanaka et al. 2020, MNRAS, 496, 1369)。原子構造から予想される通り、ランタノイドで不透明度が高いことが見て取れる。また、d殻元素ではそのエネルギー準位の分布を反映して、電子数が増えるほど不透明度が低くなることが分かった。これらの結果は、キロノバの光度曲線から元

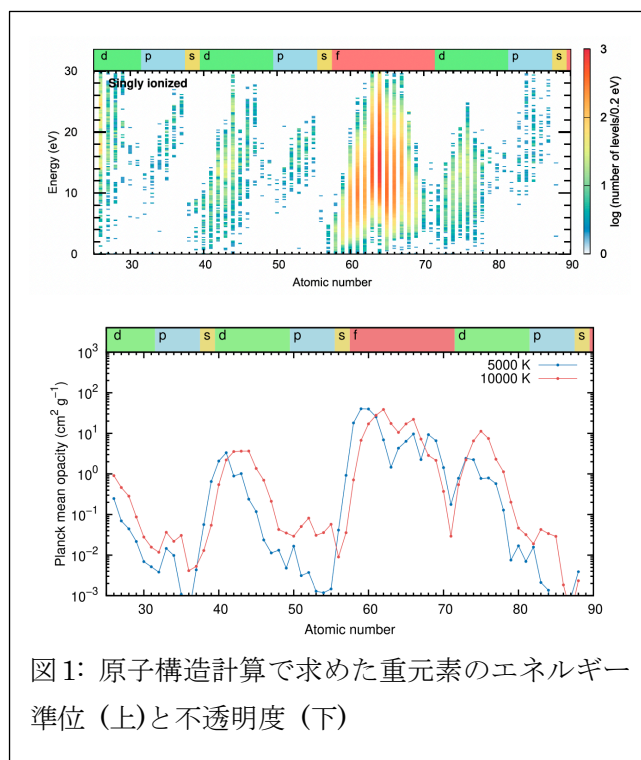


図1: 原子構造計算で求めた重元素のエネルギー準位 (上)と不透明度 (下)

素合成の情報を引き出すための基盤となるものである。この結果はデータベース化して全世界に向けて公開されており、世界中の研究者によって使われている。

(2) 分光実験による重元素の遷移確率の測定
 キロノバで重要となる重元素の遷移確率測定のため、電気通信大学で新たにレーザー誘起ブレイクダウン分光実験装置を立ち上げた。新しく立ち上げた装置を用いて、エルビウム（原子番号 68）の発光スペクトルを取得することに成功した（図 2）。

これまでに遷移確率が測定されていた輝線と、遷移確率が未測定の輝線を同時に観測し、その強度比を測定し、プラズマの温度を推定することで、一階電離エルビウム（Er II）の遷移確率を新たに測定することができた(Naoi et al. 2021, Applied Sciences, 12, 2219)。

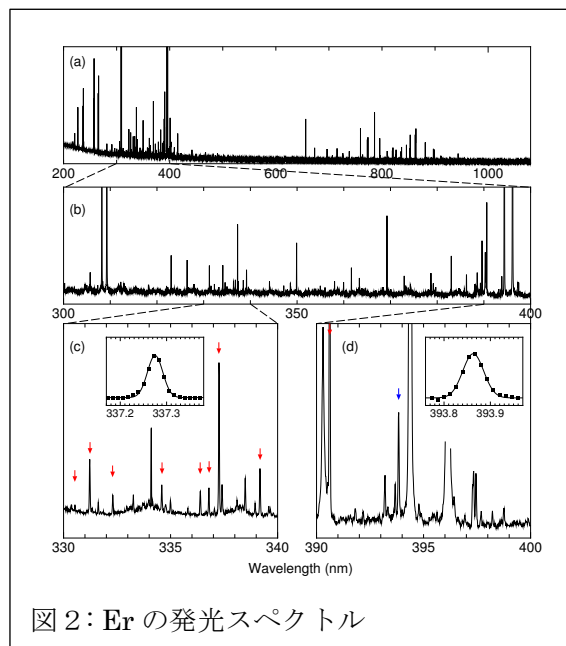


図 2: Er の発光スペクトル

(3) キロノバスペクトルによる重元素の特徴の同定

正確な原子データを構築することで、キロノバのスペクトルの特徴を解読すべく研究を行った。まず、これまで天文学で使われてきた正確な重元素の原子データを用いて、キロノバの輻射輸送シミュレーションを行い、可視光領域にカルシウムとストロンチウムの吸収特徴が現れることを明らかにした(Domoto et al. 2021, ApJ, 913, 26)。実際に、2017年に観測されたキロノバのスペクトルではストロンチウムの特徴が見える一方、カルシウムの特徴は見えておらず、このことから重元素合成の物理状況を推定できることを初めて提案した。

次に、キロノバの赤外線スペクトルの特徴に関する研究を行った。赤外線領域では天文学で使われるデータが非常に限られることから、上記で構築した理論的な原子データと、実験室における分光実験でわかっている遷移波長の情報を組み合わせることで、完全性の高く、かつ重要な元素に関しては正確な原子データを構築することができた。この新しく構築した正確な原子データを用いて輻射輸送シミュレーションを行い、キロノバの赤外線スペクトルにランタンとセリウムの特徴を同定することに成功した(Domoto et al. 2022, ApJ, 939, 8)。この成果に対しては東北大学・核融合科学研究所からプレスリリースを行った。

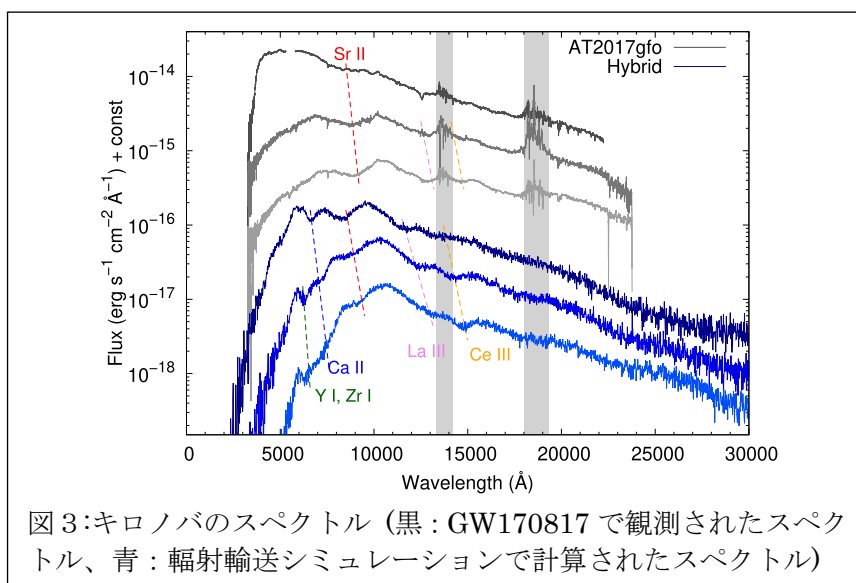


図 3: キロノバのスペクトル (黒: GW170817 で観測されたスペクトル、青: 輻射輸送シミュレーションで計算されたスペクトル)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 16件／うちオープンアクセス 23件）

1. 著者名 Nishimura Yuki, Imaizumi Saki, Tanuma Hajime, Nakamura Nobuyuki, Sekiguchi Yuichiro, Wanajo Shinya, Sakaue Hiroyuki A., Kato Daiji, Murakami Izumi, Tanaka Masaomi, Gaigalas Gediminas	4. 巻 11
2. 論文標題 Charge Exchange Spectroscopy of Multiply Charged Erbium Ions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 40～40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/atoms11020040	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 Gaigalas G, Rynkun P, Banerjee S, Tanaka M, Kato D, Radiate, L	4. 巻 517
2. 論文標題 Theoretical investigation of energy levels and transitions for Pr IV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 281～293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stac2401	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 Domoto Nanae, Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Kawaguchi Kyohei, Hotokezaka Kenta, Wanajo Shinya	4. 巻 939
2. 論文標題 Lanthanide Features in Near-infrared Spectra of Kilonovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 8～8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac8c36	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 -
1. 著者名 Hotokezaka Kenta, Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas	4. 巻 515
2. 論文標題 Tungsten versus Selenium as a potential source of kilonova nebular emission observed by Spitzer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L89～L93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnrasl/slac071	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 Banerjee Smaranika, Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas, Kawaguchi Kyohei, Domoto Nanae	4. 巻 934
2. 論文標題 Opacity of the Highly Ionized Lanthanides and the Effect on the Early Kilonova	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 117 ~ 117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7565	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, 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 Ohgami Takayuki, Tominaga Nozomu, Utsumi Yousuke, Niino Yuu, Tanaka Masaomi, Banerjee Smaranika, Hamasaki Ryo, Yoshida Michitoshi, Terai Tsuyoshi, Takagi Yuhei, Morokuma Tomoki, Sasada Mahito, Akitaya Hiroshi, Yasuda Naoki, Yanagisawa Kenshi, Ohsawa Ryou	4. 巻 73
2. 論文標題 Optical follow-up observation for GW event S190510g using Subaru/Hyper Suprime-Cam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 350 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab002	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 -

1. 著者名 Matsuno Tadafumi, Hirai Yutaka, Tarumi Yuta, Hotokezaka Kenta, Tanaka Masaomi, Helmi Amina	4. 巻 650
2. 論文標題 r-process enhancements of Gaia-Enceladus in GALAH DR3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A110 ~ A110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202040227	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 Domoto Nanae, Tanaka Masaomi, Wanajo Shinya, Kawaguchi Kyohei	4. 巻 913
2. 論文標題 Signatures of r-process Elements in Kilonova Spectra	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 26 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf358	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 -

1. 著者名 Sasada Mahito, Utsumi Yousuke, Itoh Ryosuke, Tominaga Nozomu, Tanaka Masaomi, et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 J-GEM optical and near-infrared follow-up of gravitational wave events during LIGO 's and Virgo 's third observing run	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 05A104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab007	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 -

1. 著者名 Hotokezaka Kenta, Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas	4. 巻 506
2. 論文標題 Nebular Emission from Lanthanide-rich Ejecta of Neutron Star Merger	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5863-5877
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1975	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 Radziute Laima, Gaigalas Gediminas, Kato Daiji, Rynkun Pavel, Tanaka Masaomi	4. 巻 257
2. 論文標題 Extended Calculations of Energy Levels and Transition Rates for Singly Ionized Lanthanide Elements. II. Tb-Yb	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac1ad2	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 Rynkun P., Banerjee S., Gaigalas G., Tanaka M., Radziute L., Kato D.	4. 巻 658
2. 論文標題 Theoretical investigation of energy levels and transition for Ce IV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A82 ~ A82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141513	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 Naoi Yuki, Iwata Masayuki, Yokota Daichi, Gaigalas Gediminas, Kato Daiji, Murakami Izumi, Sakaue Hiroyuki, Sekiguchi Yuichiro, Tanaka Masaomi, Tanuma Hajime, Wanajo Shinya, Nakamura Nobuyuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Laser Induced Breakdown Spectroscopy of Er II for Transition Probability Measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2219 ~ 2219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12042219	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 Tanaka Masaomi, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas, Kawaguchi Kyohei	4. 巻 496
2. 論文標題 Systematic opacity calculations for kilonovae	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1369 ~ 1392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1576	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 Bulla M, Kyutoku K, Tanaka M, Covino S, Bruten J R, Matsumoto T, Maund J R, Testa V, Wiersema K	4. 巻 501
2. 論文標題 Polarized kilonovae from black hole?neutron star mergers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1891 ~ 1899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3796	査読の有無 無
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 Banerjee Smaranika, Tanaka Masaomi, Kawaguchi Kyohei, Kato Daiji, Gaigalas Gediminas	4. 巻 901
2. 論文標題 Simulations of Early Kilonova Emission from Neutron Star Mergers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abae61	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 Radziute Laima, Gaigalas Gediminas, Kato Daiji, Rynkun Pavel, Tanaka Masaomi	4. 巻 248
2. 論文標題 Extended Calculations of Energy Levels and Transition Rates for Singly Ionized Lanthanide Elements. I. Pr-Gd	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 17 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab8312	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 Gaigalas Gediminas, Rynkun Pavel, Radziute Laima, Kato Daiji, Tanaka Masaomi, Jonsson P.	4. 巻 248
2. 論文標題 Energy Level Structure and Transition Data of Er ²⁺	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 13 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab881a	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, 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lamb G. P., et al. (including Tanaka, M.)	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20件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Heavy element opacity for multi-messenger observations of neutron star mergers
3. 学会等名 IAU Symposium 371 Honoring Charlotte Moore Sitterly: Astronomical spectroscopy in the 21st century (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Radiative transfer simulations for kilonovae
3. 学会等名 Kilonova: Multimessenger and Multiphysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Kilonovae: recent progress and future outlook
3. 学会等名 Exploring the Transient Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Neutron star merger and r-process nucleosynthesis
3. 学会等名 UKAKUREN-RCNP Conference on AstroNuclear Physics (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中雅臣
2. 発表標題 中性子星合体からの電磁波放射「キロノバ」における原子過程
3. 学会等名 原子分子データ応用フォーラムセミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中雅臣
2. 発表標題 マルチメッセンジャー天文学・時間領域天文学
3. 学会等名 第22回高宇連研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaomi Tanaka
2. 発表標題 Modeling Kilonova Emission from Neutron Star Mergers
3. 学会等名 IAU Symposium 363 Neutron Star Astrophysics at the Crossroads: Magnetars and the Multimessenger Revolution（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中雅臣
2. 発表標題 突発天体と可視光・赤外線観測
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会 シンポジウム「ニュートリノ・重力波時代のマルチメッセンジャー天文学の展望」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaomi Tanaka
2. 発表標題 Kilonova
3. 学会等名 Extreme Outflows in Astrophysical Transients（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaomi Tanaka
2. 発表標題 Multimessenger astronomy and the origin of heavy elements in the Universe
3. 学会等名 APCTP-KPS-JPS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Multimessenger signature of compact binary coalescence
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Kilonova: Electromagnetic signature of r-process nucleosynthesis
3. 学会等名 Nuclear Physics in Astrophysics IX (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Astrophysics of gravitational wave sources and atomic data for heavy elements
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中雅臣
2. 発表標題 Neutron star mergers and atomic data for heavy elements
3. 学会等名 宇宙における物質進化--原子核・原子・分子 第1回シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中雅臣
2. 発表標題 すばるとTMTによるマルチメッセンジャー天文学
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中雅臣
2. 発表標題 重力波天体のマルチメッセンジャー観測
3. 学会等名 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Atomic opacities for kilonova
3. 学会等名 Yukawa International Seminar 2019 Black Holes and Neutron Stars with Gravitational Waves (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Optical/infrared counterparts of gravitational wave sources
3. 学会等名 Subaru Telescope 20th Anniversary - Optical & Infrared Astronomy for the Next Decade - (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Neutron star mergers: r-process nucleosynthesis and kilonova
3. 学会等名 JINA-CEE IReNA/NAOJ Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, M.
2. 発表標題 Systematic Opacity Calculations for Kilonovae
3. 学会等名 Joint symposium of MEXT innovative area x KONAN GAKUEN 100th Anniversary International Scientific Symposium Series (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中 雅臣	4. 発行年 2021年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 274
3. 書名 マルチメッセンジャー天文学が捉えた新しい宇宙の姿 宇宙の物質の起源に迫る	

〔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
研究分担者	田沼 肇 (Tanuma Hajime) (30244411)	東京都立大学・理学研究科・教授 (22604)	
研究分担者	中村 信行 (Nakamura Nobuyuki) (50361837)	電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授 (12612)	
研究分担者	加藤 太治 (Kato Daiji) (60370136)	核融合科学研究所・研究部・教授 (63902)	

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