

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：82401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2020～2023

課題番号：19KK0354

研究課題名（和文）超新星爆発重力波の解明と原始中性子星での星震学の確立

研究課題名（英文）Understanding supernova gravitational waves and establishing protoneutron star asteroseismology

研究代表者

祖谷 元（Sotani, Hajime）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：70386720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,400,000円

渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：超新星爆発は、コンパクト連星系合体に次いで期待される重力波源である。数値シミュレーションにより、重力波シグナルの存在が指摘されていたが、その物理的な背景はよく理解されていなかった。これに対して、超新星爆発により生まれる原始中性子星における線形解析を通して、超新星重力波の起源は原始中性子星の基本振動に伴う重力波であることを示した。また、状態方程式や親星の質量といった超新星モデルに依存しない形で、超新星重力波振動数を原始中性子星の平均密度で普遍的に表せることも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超新星爆発後に生じる原始中性子星は、地上では実現困難な極限的な環境となっている。そのため、原始中性子星の物理を知ることは、極限的な環境下における物理の片鱗を掴むことになる。重力波源として有望な超新星爆発からの重力波に関わる物理を理解することで、将来、重力波が観測された際に逆問題として原始中性子星の物理量を引き出せるかもしれない。この結果、超高密度領域における物理にこれまでにない制限を与えることができる。と期待される。

研究成果の概要（英文）：Supernova explosions are the second most expected source of gravitational waves after compact binary mergers. Up to now, the existence of gravitational wave signals is found via numerical simulations, but their physical background has not been well understood. Through linear analysis of proto-neutron stars produced after supernova explosions, we showed that the origin of supernova gravitational waves is gravitational waves associated with the fundamental oscillations of proto-neutron stars. We also found that the supernova gravitational wave frequency can be universally expressed in terms of the average density of proto-neutron stars, independent of supernova models such as the equation of state and the progenitor mass.

研究分野：宇宙物理

キーワード：中性子星 超新星爆発 重力波 星震学 状態方程式

1. 研究開始当初の背景

コンパクト連星系の合体時からの重力波の直接観測に成功したことにより、重力波が電磁波、ニュートリノに次ぐ、天体観測のための新たなシグナルとなった。いよいよ、マルチメッセンジャー天文学の幕開けである。超新星爆発は、コンパクト連星系の合体に次ぐ、最も有力な重力波源として期待されている。重力波干渉系の感度がますます上がっていく中、実際に超新星爆発からの重力波が受かった場合、物理的に何がわかるのかという点を議論する時期となっている。しかしながら、超新星爆発からの重力波は連星系合体に比べると弱いため、現行の重力波干渉計での観測は、天の川銀河内でのイベントに限られるかもしれない。天の川銀河におけるイベント頻度は、100年に1度程度と言われているため、超新星爆発が起こった際に備えて、万全の体制で臨む必要がある。

2. 研究の目的

重い星は最期に超新星爆発を起こして散る。しかし、コア部分は中性子星として残る場合もある。中性子星は、地上では実現困難な極限的な状態となるため、中性子星を観測することで、そのような極限状態における物理の片鱗を知ることができるかもしれない。特に、中性子星からの振動や放出重力波は、内部の物理量に応じたものとなるため、このようなシグナルを観測することで、逆問題として中性子星の物理量を知ることができると期待される。この手法は、地上における地震学や太陽における日震学と同様で、星震学と呼ばれている。

本研究では、特に重力崩壊型超新星爆発により生まれる原始中性子星からの重力波に着目する。超新星爆発時に放出される重力波は、これまで主に数値シミュレーションにより議論されてきた。この結果、多くのシミュレーションにおいて、重力波シグナルの時間進化が指摘されてきたが、一方でその物理的な背景はよく理解されていなかった。そこで、線形解析である星震学的なアプローチを、超新星爆発により生まれる原始中性子星において適用することで、放出重力波と原始中性子星の物理量の関係を明らかにするとともに、超新星重力波の起源に迫る。また、放出される重力波の観測を通して、原始中性子星における物質の特性を明らかにすることを目指す。宇宙物理学と原子核物理学の両分野に資する研究であり、非常にユニークな研究内容と言える。

3. 研究の方法

コンパクト連星系の合体に比べると、超新星爆発はかなり球対称に近いので、放出重力波は非常に小さくなる。そこで、数値シミュレーションの結果から、背景時空からの計量のズレとして重力波を直接引き抜くのは非常に困難である。通常は、流体に対する四重極公式を用いて、放出重力波を見積もっている。一方、摂動解析である星震学的なアプローチは、球対称からの摂動的なズレという量を見積もるのには適している。そこで、数値シミュレーションのデータを用いて、各時刻における球対称な原始中性子星モデルを用意する。数値シミュレーションを2次元以上の多次元計算で行っている場合は、角度方向を平均化することで球対称モデルを用意することになる。用意された各時刻における原始中性子星モデルに対して、線形解析を行い、固有振動数を求める。原始中性子星の時間進化とともに進化していく固有振動数の時間発展を、数値シミュレーションから得られた重力波シグナルと比較することで、超新星重力波を原始中性子星の固有振動と同定する。また、いくつかの超新星モデルに対して、同様の解析を行うことで、超新星モデルに依存しない形で、超新星重力波を原始中性子星の物理量で表すことを試みる。仮に、このような普遍則が見つかれば、将来観測される重力波スペクトラムから、超新星モデルが具体的に分からずとも、原始中性子星の物理量を引き出すことができることになる。

また、本研究では、原始中性子星の自転の効果を取り込んだ解析にも着手する。そのために、まずは、自転を伴う冷たい中性子星における星震学をうまく解く必要がある。星が高速回転する場合、2次元の摂動方程式の時間発展を解き、得られた波動関数から固有振動数を求めることになる。そこで、まずは、剛体高速回転する中性子星モデルを構築し、そこにおける線形解析をすることから始める。

4. 研究成果

本研究課題を通して、主に以下のような研究成果をあげた。

- (1) 超新星爆発直後の原始中性子星は、冷たい中性子星と異なり、周囲に物質が存在するため、明確な表面は存在しない。そこで、表面密度を適当に決め、その内側の密度が特に高い領域を原始中性子星と考えた。このようなモデルに対して、原始中性子星からの重力波振動数を系統的に調べた。その結果、数値シミュレーションに現れる重力波シグナルは、原始中性子星の基本振動数(コアバウンス後の初期は第1重力モード)に対応することを示した。また、基本振動数の時間進化は、原始中性子星の表面密度の取り方には基本的には依存しないこと、およびこれは基本振動数に対応する振動エネルギー密度が星の内部で優位になるということから説明できることを示した。また、同様に第1重力モードの振動数が時間とともに減少する過程が一般的に見られるが、これも重力モードの振動エネルギー密度の分布と、重力モードと物理的に関連するブラント・パイサラ振動数との関係から理解できることがわかった。

- (2) 原始中性子星における星震学に関する先行研究では、計量の摂動を無視した線形解析（カウリング近似）を用いた計算のみだった。しかし、今回、計量の摂動を取り入れた解析を行い、カウリング近似による結果と比較することで、これまでの計算が定性的には正しいことを確認した。さらに、近似の精度に関して定量的に評価した。実際、原始中性子星からの基本振動数は、カウリング近似により、20%近く過大評価している可能性を指摘した。
- (3) 様々な状態方程式と親星の質量に対して、原始中性子星における重力波星震学を系統的に行い、放出重力波と原始中性子星の物理量との関係を調べた。その結果、超新星モデルに依らず、超新星重力波振動数は原始中性子星の平均密度（質量を半径の3乗で割ったもの）にてうまく表せることを発見した。この経験則を用いることで、将来超新星重力波の直接観測が成功した暁には、状態方程式や親星の質量がわからないとしても、生成された原始中性子星の平均密度に関する時間発展の情報を得ることができることを示した。一方、同様に超新星重力波を原始中性子星の物理量で表そうという試みは他のグループでも行われている。特に、スペインのグループは、表面重力（質量を半径の2乗で割った量）で普遍的に表せると指摘しているが、少なくとも我々の結果では、表面重力よりも平均密度を用いた方が、より普遍的に表せそうであることも指摘した。
- (4) 自転の効果を取り込んだ星震学を行うための準備として、冷たい中性子星における星震学の研究を開始した。まずは背景モデルを用意するために、剛体高速回転する中性姿勢を構築する数値コードを作成した。さらに、この星モデルを用いて、2次元摂動方程式の時間発展を解く数値コードを作成した。残念ながら、時間発展は数値的な不安定性を含んでいるようで、長時間の時間発展は未だ追えていない。一方、中性子星のクラストにおける線形解析も実行した。特に、非線型結合の効果を取り入れた解析であるが、数値的不安定性もなく長時間発展が可能であることがわかった。そのため、数値不安定性を除去する鍵は中性子星中心部であると考えられる。

また、当初の研究計画にはなかったが、以下のような成果も得られた。

- (5) 低質量中性子星における星震学も行なった。低質量中性子星は、中心密度も低いため、原子核飽和密度パラメータが、星の構造を決める上でも重要となる。実際、これまで我々は、低質量中性子星の質量や重力赤方偏移が、原子核飽和パラメータの上手い組み合わせ（eta）と、星中心密度で記述できることを発見している。今回は、このような低質量中性子星からの重力波振動数をetaにて表すことを試みた。その結果、ある種の経験則を見つけることに成功した。
- (6) ガンマ線バーストにおいて、複数のkHz準周期的振動が発見された。これは、マグネターフレアに伴うものであると考えられている。中性子星の動的時間を考慮すると、kHz帯の固有振動数はいくつか候補があるが、一方で、従来の研究でマグネターフレアからの準周期的振動は中性子星におけるクラスト振動と密接に関わっていると考えられている。そのため、今回のkHz準周期的振動も、クラスト振動と同様の枠組みで説明できないか系統的に調べた。特に、kHz帯ということから、クラスト振動の高調波に対応すると考えられる。実際、様々な星モデルに対して、クラスト振動を観測された振動数と比較することで、中性子星のモデルにある程度の制限を与えた。さらに、地上実験から得られた原子核飽和パラメータに対する制限を用いることで、中性子星の質量と半径に対するより強い制限を与えることに成功した。今後、kHz振動数と共に低周波数も伴うマグネターフレアが観測された際には、今回のモデルの妥当性を検証できるかもしれない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Sotani Hajime | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Shear and interface modes in neutron stars with pasta structures | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 123025-1, -12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.123025 | 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 Sotani H., Kokkotas K. D., Stergioulas N. | 4. 巻 676 |
| 2. 論文標題 Neutron star mass-radius constraints using the high-frequency quasi-periodic oscillations of GRB 200415A | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics | 6. 最初と最後の頁 A65 ~ A65 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202346360 | 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 Sotani Hajime, Kojo Toru | 4. 巻 108 |
| 2. 論文標題 Universality in quasinormal modes of neutron stars with quark-hadron crossover | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 063004-1, -8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.063004 | 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 - |
| 1. 著者名 Sotani Hajime | 4. 巻 109 |
| 2. 論文標題 Shear oscillations in neutron stars and the nuclear symmetry energy | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 023030-1, -12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.109.023030 | 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 Sotani Hajime, Nishimura Nobuya, Naito Tomoya | 4. 巻 2022 |
| 2. 論文標題 New constraints on the neutron-star mass and radius relation from terrestrial nuclear experiments | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 041D01-1, -9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac055 | 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 Sotani Hajime | 4. 巻 82 |
| 2. 論文標題 Accuracy of one-dimensional approximation in neutron star quasi-normal modes | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal C | 6. 最初と最後の頁 477-1, -7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-022-10439-1 | 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 Dohi A., Nishimura N., Sotani H., Noda T., Liu He-Lei, Nagataki S., Hashimoto M. | 4. 巻 937 |
| 2. 論文標題 Impacts of the Direct Urca and Superfluidity inside a Neutron Star on Type I X-Ray Bursts and X-Ray Superbursts | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 124 ~ 124 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac8dfe | 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 Sotani Hajime, Togashi Hajime, Takano Masatoshi | 4. 巻 516 |
| 2. 論文標題 Effects of finite sizes of atomic nuclei on shear modulus and torsional oscillations in neutron stars | 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 5440 ~ 5445 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2615 | 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 Huang Yong-Jia, Baiotti Luca, Kojo Toru, Takami Kentaro, Sotani Hajime, Togashi Hajime, Hatsuda Tetsuo, Nagataki Shigehiro, Fan Yi-Zhong | 4. 巻 129 |
| 2. 論文標題 Merger and Postmerger of Binary Neutron Stars with a Quark-Hadron Crossover Equation of State | 5. 発行年 2022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.129.181101 | 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 Sotani Hajime, Ota Shinsuke | 4. 巻 106 |
| 2. 論文標題 Neutron star mass formula with nuclear saturation parameters for asymmetric nuclear matter | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 103005-1, -9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.103005 | 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 Sotani Hajime, Naito Tomoya | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Empirical neutron star mass formula based on experimental observables | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 035802-1, -12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.035802 | 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 Sotani Hajime | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Neutron star asteroseismology and nuclear saturation parameter | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 123015-1 ~ -16 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.123015 | 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 Sotani Hajime, Sumiyoshi Kohsuke | 4. 巻 507 |
| 2. 論文標題 Stability of the protoneutron stars towards black hole formation | 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 2766 ~ 2776 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2301 | 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 Sotani Hajime, Takiwaki Tomoya, Togashi Hajime | 4. 巻 104 |
| 2. 論文標題 Universal relation for supernova gravitational waves | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 123009-1 ~ -10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.123009 | 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 Sotani Hajime, Kumar Bharat | 4. 巻 104 |
| 2. 論文標題 Universal relations between the quasinormal modes of neutron star and tidal deformability | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 123002-1 ~ -7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.123002 | 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 Sotani Hajime, Dohi Akira | 4. 巻 105 |
| 2. 論文標題 Gravitational wave asteroseismology on cooling neutron stars | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 023007-1 ~ -10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.023007 | 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 Sotani Hajime、Togashi Hajime | 4. 巻 105 |
| 2. 論文標題 Neutron star mass formula with nuclear saturation parameters | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 063010-1 ~ -12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.063010 | 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 Sotani Hajime、Takiwaki Tomoya | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Dimension dependence of numerical simulations on gravitational waves from protoneutron stars | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 023028-1 ~ -10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.023028 | 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 Sotani Hajime、Takiwaki Tomoya | 4. 巻 498 |
| 2. 論文標題 Avoided crossing in gravitational wave spectra from protoneutron star | 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 3503 ~ 3512 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2597 | 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 Sotani Hajime | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Gravitational wave asteroseismology for low-mass neutron stars | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 063023-1 ~ -9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.063023 | 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 Sotani Hajime, Takiwaki Tomoya | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Accuracy of the relativistic Cowling approximation in protoneutron star asteroseismology | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 063025-1 ~ 13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.063025 | 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 Sotani Hajime | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Estimating the nuclear saturation parameter via low-mass neutron star asteroseismology | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 103021-1 ~ 11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.103021 | 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19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件)

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 祖谷元 |
| 2. 発表標題 超新星重力波における原始中性子星の普遍的な物理量 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hajime Sotani |
| 2. 発表標題 SN GWs and asteroseismology |
| 3. 学会等名 LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hajime Sotani |
| 2. 発表標題 Neutron star mass and radius constraints using the high-frequency QPOs of GRB 200415A |
| 3. 学会等名 4th Quarks and Compact Stars workshop (QCS2023) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hajime Sotani |
| 2. 発表標題 Constraint on the mass and radius of GRB 200415A using the high-frequency QPOs |
| 3. 学会等名 Hawaii 2023 (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hajime Sotani |
| 2. 発表標題 Asteroseismology of Neutron Stars |
| 3. 学会等名 Joint RIKEN/N3AS Workshop on Multi-Messenger Astrophysics (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 祖谷元 |
| 2. 発表標題 クラスト振動によるGRB 200415Aの質量半径の制限 |
| 3. 学会等名 ～中性子星の観測と理論～ 研究活性化ワークショップ 2023 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hajime SOTANI |
| 2. 発表標題 Empirical relation for supernova gravitational waves |
| 3. 学会等名 9th KAGRA International Workshop (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hajime SOTANI |
| 2. 発表標題 Empirical relation in supernova gravitational waves |
| 3. 学会等名 The 25th annual International Conference on Particle Physics and Cosmology (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hajime SOTANI |
| 2. 発表標題 Gravitational Waves Asteroseismology in Protoneutron Stars |
| 3. 学会等名 11th Aegean summer school, (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hajime SOTANI |
| 2. 発表標題 Constraint on the NS model using high-frequency QPOs in magnetar |
| 3. 学会等名 OMEG16 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hajime SOTANI |
| 2. 発表標題 Universal relation in supernova gravitational waves |
| 3. 学会等名 Testing Gravity 2023 (TG2023) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|----------------------------|
| 1. 発表者名 祖谷元 |
| 2. 発表標題 マグネターのクラスト振動 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hajime Sotani |
| 2. 発表標題 Gravitational wave asteroseismology in protoneutron stars |
| 3. 学会等名 NEB-19 Recent Developments in Gravity (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 祖谷元 |
| 2. 発表標題 重力波星震学を用いた中性子星質量と半径の推定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 祖谷元 |
| 2. 発表標題 冷却中性子星における重力波星震学 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hajime Sotani |
| 2. 発表標題 Gravitational wave asteroseismology and universal relations |
| 3. 学会等名 Workshop on "Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (SNeGWv2021)" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hajime Sotani |
| 2. 発表標題 Stability of collapsing protoneutron stars and gravitational waves |
| 3. 学会等名 YITP-OzGrav WS "Nuclear burning in massive stars" - towards formation of black-hole binaries- (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 祖谷元 |
| 2. 発表標題 原始中性子星からの重力波振動数における擬交差と固有振動の振る舞い |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 祖谷元 |
| 2. 発表標題 低質量中性子星震学を用いた原子核飽和パラメータの推定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2021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 |
|-------------------------------------|---------------------------------------|----|
| ココタス コスタス (Kokkotas Kostas) | チュービンゲン大学・THEORETICAL ASTROPHYSICS・教授 | |
| ヴェルティ エマヌエル (Berti Emanuele) | ジョンズホプキンス大学・Physics & Astronomy・教授 | |

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 | テュービンゲン大学 | | | |
| インド | NIT, Rourkela | | | |
| ギリシャ | テサロニキ大学 | | | |