

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01905

研究課題名（和文）第一原理計算で探る重力崩壊型超新星の非球対称爆発メカニズムと核物理の役割

研究課題名（英文）Study of non-spherical core-collapse supernovae by the first principle calculation and nuclear physics

研究代表者

住吉 光介（Sumiyoshi, Kohsuke）

沼津工業高等専門学校・教養科・教授

研究者番号：30280720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：超新星爆発は、重い星が進化を遂げた最期に起きる華々しい天体現象である。宇宙・原子核物理上の大きな謎となっている爆発に至るメカニズムを解明するには、極限環境における物質の流体力学とニュートリノ反応と輸送を扱う必要がある。本研究では、ニュートリノ輻射輸送を厳密に解く独自の計算手法により、ニュートリノ加熱による多次元的な爆発メカニズムにおいて原子核物理が及ぼす影響を探ることを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超新星爆発の解明するためには大規模な数値シミュレーションが必要であり、これまでの研究ではニュートリノ反応と輸送を記述する際に、近似的な手法が用いられていた。本研究では基本方程式となる6次元ボルツマン方程式を解く手法を一般相対論に拡張して、一般相対論的ニュートリノ輻射流体力学の数値シミュレーションが可能となった。これは世界的に最先端の計算手法による成果であり、超新星分野においてニュートリノおよび原子核物理の役割を解明することに大きく貢献している。

研究成果の概要（英文）：Core-collapse supernovae are the explosive phenomena at the end of life of massive stars. To clarify the mechanism of explosion, which has been elusive in nuclear astrophysics for decades, it is essential to solve the neutrino-radiation hydrodynamics at extreme conditions. In this research project, we developed the first-principles calculations of neutrino-radiation hydrodynamics in general relativity and explored the role of neutrino and nuclear physics in multi-dimensional explosions by adopting the latest data sets of nuclear physics.

研究分野：宇宙・原子核物理学

キーワード：超新星 爆発メカニズム ニュートリノ 原子核 高温高密度物質

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星は太陽の10倍以上の質量を持つ大質量星の最期におこる爆発現象である。1987年の超新星ではニュートリノバーストが検出され、超新星では高温高密度天体誕生とニュートリノが関与することがわかっている。この高温高密度物質におけるニュートリノの振舞いが超新星爆発における鍵である。解明で難しいのは、衝撃波を伴う流体力学現象におけるニュートリノ加熱の効果を扱うことである。重力崩壊で発生したニュートリノがエネルギーを運び、物質に吸収されて加熱に寄与し爆発を助ける効果を精密計算することが長年の課題である。その記述に必要な第一原理計算とは、ニュートリノ輻射を扱うボルツマン方程式と物質の流体方程式を一般相対論の形式で解くことである。球対称の第一原理計算では爆発しないことが確定して、2次元軸対称・3次元計算では対流などの重要な効果が判明しているが、近似的な手法による不定性のため、爆発メカニズムの最終的な答えは出ておらず、核物理の影響も明確にはなっていない。この状況を打破するには、ニュートリノ輻射輸送を厳密に解く手法に基づいて包括的に数値シミュレーションを行い、爆発メカニズムに残された疑問点に答えることが必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究のメンバーは、ニュートリノ反応・伝播を扱うニュートリノ輻射輸送を厳密に解く手法を独自に開発・応用した実績を持ち、世界で初めて3次元空間でのニュートリノ輻射流体計算を行うことが可能となっている。この計算手法を本格的に活用し、最新の核物理を組み込んだ爆発シミュレーションを包括的に行い、爆発メカニズムの本質的な要因を探り、不定要素が残る原子核物理が爆発ダイナミクスへ与える影響を確定する。

具体的には、最新の核物理データ(状態方程式およびニュートリノ反応率)を組み込み、ボルツマン方程式を用いた多次元ニュートリノ輻射流体計算を行い、非球対称な超新星爆発における衝撃波ダイナミクスの行方を明らかにする。並行して、一般相対論を扱う計算コードの整備を行って、一般相対論的な効果を含めた爆発ダイナミクスを決定する。また、系統的に状態方程式とニュートリノ反応率を整備して、高温高密度物質の性質や反応率が異なる場合に爆発ダイナミクスに現れる影響を取り出して、非球対称な爆発ダイナミクスにおいて核物理が果たす役割を定める。

### 3. 研究の方法

超新星の爆発計算および核物理データの構築を組み合わせ、爆発メカニズムを解明すると共に核物理の影響を明らかにするため、重たい星の中心の鉄コアが重力崩壊を起こして、高密度ではね返って(コアバウンス)発生した衝撃波が、外層から降り積もる物質の障害を乗り越えて爆発に至るかどうかを数値シミュレーション計算で探る。衝撃波は途中で停滞するが、そののち復活して爆発に至るかが焦点である。この際に流体不安定性による対流や衝撃波の歪みが生じたなかでニュートリノ輻射輸送が行われる。中心に誕生する原始中性子星から放射されるニュートリノが効率よく物質に吸収されると爆発を助ける。このニュートリノ加熱が十分でなければ不発となる。さらに重力波観測の制限を受けて状態方程式の研究に進展があるため、高温高密度物質の影響による爆発の可否、旧来の状態方程式との差異を探る。

爆発に至る過程を段階的に解明するため、最新の状態方程式・ニュートリノ反応率での爆発の可否を探る。星の重力崩壊から衝撃波伝播までを空間軸対称のもとでニュートリノ輻射流体計算を行って爆発に至るか否かを定める。また、状態方程式の影響は、物質の組成を通じてニュートリノ反応や原子核の電子捕獲の違いにも現れて爆発の可否につながる。核子多体理論や組成記述の違いに応じた状態方程式データテーブルを構築して、各要素の影響を数値シミュレーションで検証する。さらに、超新星爆発の長時間発展では原始中性子星の誕生など一般相対論的な効果が本質的となる。一般相対論的な枠組みのもとで爆発メカニズムを探るため計算コード拡張を行って超新星爆発の問題へ適用する。

### 4. 研究成果

2020年度は、2次元軸対称計算によるコアバウンス後の衝撃波伝播において2つの状態方程式データテーブルにより爆発・不発の違いが現れる原因について明らかにした。バウンス直後におこるプロンプト対流の引き金はエントロピー勾配の形成であるが、その出現は高温高密度物質中の原子核組成の違いによるものであり、衝撃波通過時のエネルギー損失が異なることにより引き起こされることを突き止めた。この組成の違いによる影響の普遍性を追求するため、原子核組成モデルが異なる状態方程式データテーブルを用いた2次元軸対称計算を新たにスタートすることができた。また、多次元ボルツマン方程式を解く計算コードの一般相対論化を進めて、固定した時空メトリックにおけるニュートリノ輻射輸送のコード検証を行って、一般相対論化したコードを完成させた。さらに、限定的な時間範囲であるが、軸対称の制限を外した3次元空間におけるニュートリノ輻射流体計算にも成功して、バウンス直後のニュートリノ輻射流体の様子を世界で初めて明らかにした。

2021年度は、高温高密度物質における原子核組成の違いがバウンス直後に起きる対流の発生

へ与える影響が普遍的であるかを検証する研究を主に行った。整備済みである状態方程式データテーブルの活用により、一様核物質は同一であるが、原子核の混合組成の取り扱いが異なるセットを用いて、組成の違いに焦点をあてた。また、初期条件における擾乱の設定による違い、質量が異なる親星モデルによる差異を探るための追加モデル計算を行った。いずれも大規模な計算であるが、年度内に概ねの目標時刻までの計算を行ない、計算結果データの解析を行なった。この他、新たに構築した状態方程式データテーブルを用いた球対称計算により重力崩壊・バウンス・衝撃波伝播の影響を先行して探ることを行い、2次元軸対称計算の準備を行った。さらに、大質量星の重力崩壊や原始中性子星冷却シミュレーション計算のデータ解析により、非相対論的核子多体理論による状態方程式の影響についての分析、重力波の固有振動の特徴の解明、超新星ニュートリノの観測シグナルにおける状態方程式による違いの予測を行った。

2022年度は、2次元軸対称の爆発シミュレーション計算モデル系列を増やして、高温高密度物質における組成の違いの影響を調べた。このとき、状態方程式の固さの違いによる影響と切り分けるためにモデル群を設定して、原子核組成の違いがバウンス直後に起きる対流の発生や衝撃波伝播の歪みへ与える影響を探った。親星の違い・初期擾乱の違いについて着目して新たなシミュレーションによりバウンス後の時間発展を得ることができた。一方、一般相対論におけるボルツマン方程式を用いたニュートリノ輻射輸送と流体力学を解く計算コードの開発が進み原始中性子星における対流の様相とニュートリノシグナルへの影響を明らかにした。また球対称における一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算により高密度核物質と原子核組成の違いによる影響を分別して明らかにすることができた。また、実行済みのシミュレーション計算のデータ解析をもとにしてニュートリノ観測イベント予測をおこなって、その特性から内部情報を引き出す道筋を構築した。

2023年度は、状態方程式の影響について調べるための2次元軸対称の爆発シミュレーション計算モデルの分析を行い、高温高密度物質における組成の違いによる影響について調査をおこなった。影響の普遍性を見出すために親星・初期擾乱が違う場合についてもシミュレーション計算を行なって、コアバウンス直後における対流不安定性の尺度や速度分布による対流の度合いを定量的に求めて、相互の比較を行った。この結果、原子核組成の違いは予想したよりも小さく、違う親星についても同様の傾向が見られた。一方で、初期擾乱による違いは予想よりも大きい結果となった。一般相対論のもとでニュートリノ輻射輸送と流体力学を組み合わせた計算コードにより、重力崩壊によるコアバウンスと中心天体誕生の計算を開始して、物質分布を球対称化したもとの時空メトリックの場合について長時間計算が可能となった。さらに、アインシュタイン方程式を解く計算コードを組み入れた一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算の統合コードを完成して、大質量星の重力崩壊計算をスタートした。また、シミュレーションにより得られるニュートリノ放射の特徴をもとに、ニュートリノ検出実験施設で得られるバーストシグナルから中心天体の情報を引き出すツールを作成して世界へ向けて公開した。

#### 国内外における位置付けとインパクト

ニュートリノ輻射輸送を厳密に解く、第一原理的なシミュレーション計算は国内外において他に例がなく、独創的な成果を生み出している。特に、原子核物理のデータライブラリ構築を行うとともに、その影響を探ることができることは強みである。これらのことから、爆発メカニズムにおけるニュートリノ輻射輸送や状態方程式の影響について、これまでと異なる視点からの研究成果を生み出すことができている。さらに、一般相対論のもとでボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算を行うことにより、世界的に最先端のシミュレーション成果を創出することができた。また、ニュートリノ観測から中心天体の情報を引き出すツール群の整備も行われて、超新星分野全体の研究分野の進展に寄与することができた。

#### 今後の展望

ボルツマン方程式を直接解く一般相対論的なニュートリノ輻射流体計算コードの開発により、今後は完全な第一原理計算を行うことが可能となる。これにより大質量星の最期が爆発か不発か、中性子星あるいはブラックホールが誕生するかの最終的な答えを導くことが可能となる見込みである。今後は連星中性子星合体などの一般相対論的な計算におけるニュートリノ輻射輸送現象への応用も可能となり、重力波や元素合成の研究にも寄与することが期待されている。

#### 当初予期していなかった得られた新たな知見

超新星爆発における原子核物理の影響については、高温高密度における一様な核物質が及ぼす影響が主な議論的的となってきたが、本研究において、原子核の混合組成が初めに考えていたよりも重要であることが明らかになってきている。特に、中心部が跳ね返ってすぐにおける対流の振舞いが核物理の影響を受けうることや、超新星ニュートリノの放出の時間スケールが大きく変わりうることは、理論・観測と共に我々に新たな課題を投げかけている。ニュートリノ輻射輸送の厳密計算は連星中性子星合体への応用で成果をあげており、ニュートリノ集団振動などの量子的な現象についての基礎的な情報を与えることにも大いに役立つことが判明しており、さまざまな天体現象や物理過程の問題において厳密計算の価値が高まっている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 31件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 18件）

1. 著者名 Harada Akira, Suwa Yudai, Harada Masayuki, Koshio Yusuke, Mori Masamitsu, Nakanishi Fumi, Nakazato Ken'ichiro, Sumiyoshi Kohsuke, Wendell Roger A.	4. 巻 954
2. 論文標題 Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. IV. Development of SPECIAL BLEND: A New Public Analysis Code for Supernova Neutrinos	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 52 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace52e	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 YAMADA Shoichi, NAGAKURA Hiroki, AKAHO Ryuichiro, HARADA Akira, FURUSAWA Shun, IWAKAMI Wakana, OKAWA Hirotada, MATSUFURU Hideo, SUMIYOSHI Kohsuke	4. 巻 100
2. 論文標題 Physical mechanism of core-collapse supernovae that neutrinos drive	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the Japan Academy, Series B	6. 最初と最後の頁 190 ~ 233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2183/pjab.100.015	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 Akaho Ryuichiro, Harada Akira, Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Okawa Hirotada, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 944
2. 論文標題 Protoneutron Star Convection Simulated with a New General Relativistic Boltzmann Neutrino Radiation Hydrodynamics Code	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 60 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acad76	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 Sumiyoshi Kohsuke, Furusawa Shun, Nagakura Hiroki, Harada Akira, Togashi Hajime, Nakazato Ken'ichiro, Suzuki Hideyuki	4. 巻 2023
2. 論文標題 Effects of nuclear matter and composition in core-collapse supernovae and long-term proto-neutron star cooling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 32 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac167	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 Suwa Yudai, Harada Akira, Harada Masayuki, Koshio Yusuke, Mori Masamitsu, Nakanishi Fumi, Nakazato Ken' ichiro, Sumiyoshi Kohsuke, Wendell Roger A.	4. 巻 934
2. 論文標題 Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. III. Extraction of Mass and Radius of Neutron Stars from Synthetic Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 15 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac795e	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 Iwakami Wakana, Harada Akira, Nagakura Hiroki, Akaho Ryuichiro, Okawa Hirotada, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 933
2. 論文標題 Principal-axis Analysis of the Eddington Tensor for the Early Post-bounce Phase of Rotational Core-collapse Supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 91 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac714b	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 Ekanger Nick, Horiuchi Shunsaku, Kotake Kei, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 106
2. 論文標題 Impact of late-time neutrino emission on the diffuse supernova neutrino background	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.043026	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 Nagele Chris, Umeda Hideyuki, Takahashi Koh, Yoshida Takashi, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 517
2. 論文標題 Stability analysis of supermassive primordial stars: a new mass range for general relativistic instability supernovae	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 1584 ~ 1600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2495	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 Sugiura Ken'ichi, Furusawa Shun, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Leptonic and semi-leptonic neutrino interactions with muons in proto-neutron star cooling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 51 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac118	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 Kaneda Yuka, Furusawa Shun	4. 巻 91
2. 論文標題 Dark Matter Capture by Neutron Stars with Modern Nuclear Equations of State	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 2 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.91.065003	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 Furusawa S., Nagakura H.	4. 巻 129
2. 論文標題 Nuclei in core-collapse supernovae engine	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 104018 ~ 104018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnnp.2022.104018	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 Nakazato Ken'ichiro, Sumiyoshi Kohsuke, Togashi Hajime	4. 巻 73
2. 論文標題 Numerical study of stellar core collapse and neutrino emission using the nuclear equation of state obtained by the variational method	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 639 ~ 651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab026	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 Arimoto Makoto et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gravitational wave physics and astronomy in the nascent era	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 0000, p83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab042	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, 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 Nagele Chris, Umeda Hideyuki, Takahashi Koh, Yoshida Takashi, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 508
2. 論文標題 Neutrino emission from the collapse of $\sim 10^4 M_{\odot}$ Population III supermassive stars	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 828 ~ 841
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2592	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 Nakazato Ken'ichiro, Nakanishi Fumi, Harada Masayuki, Koshio Yusuke, Suwa Yudai, Sumiyoshi Kohsuke, Harada Akira, Mori Masamitsu, Wendell Roger A.	4. 巻 925
2. 論文標題 Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. II. Impact of the Nuclear Equation of State	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 98 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac3ae2	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 Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 57
2. 論文標題 Equation of state and neutrino transfer in supernovae and neutron stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 331, 12p
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-021-00644-z	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 Harada Akira, Nagakura Hiroki	4. 巻 924
2. 論文標題 Prospects of Fast Flavor Neutrino Conversion in Rotating Core-collapse Supernovae	5. 発行年 2022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/ac38a0	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 Harada Akira, Nishikawa Shota, Yamada Shoichi	4. 巻 925
2. 論文標題 Deep Learning of the Eddington Tensor in Core-collapse Supernova Simulation	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/ac3998	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 Kato Masaki, Furusawa Shun, Suzuki Katsuhiko	4. 巻 90
2. 論文標題 Electron In-Medium Effects on Electron Captures of Neutron-Rich Nuclei in Stellar Core Collapse	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 105001 ~ 105001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.105001	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 Hu Jinniu, Bao Shishao, Zhang Ying, Nakazato Ken' ichiro, Sumiyoshi Kohsuke, Shen Hong	4. 巻 2020
2. 論文標題 Effects of symmetry energy on the radius and tidal deformability of neutron stars in the relativistic mean-field model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa016	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 Nagele Chris, Umeda Hideyuki, Takahashi Koh, Yoshida Takashi, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 496
2. 論文標題 The final fate of supermassive $M \sim 5 \times 10^4 M_{\odot}$ Pop III stars: explosion or collapse?	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 1224 ~ 1231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1636	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 Harada Akira, Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Okawa Hirotada, Furusawa Shun, Sumiyoshi Kohsuke, Matsufuru Hideo, Yamada Shoichi	4. 巻 902
2. 論文標題 The Boltzmann-radiation-hydrodynamics Simulations of Core-collapse Supernovae with Different Equations of State: The Role of Nuclear Composition and the Behavior of Neutrinos	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 150 ~ 150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb5a9	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 Iwakami Wakana, Okawa Hirotada, Nagakura Hiroki, Harada Akira, Furusawa Shun, Sumiyoshi Kohsuke, Matsufuru Hideo, Yamada Shoichi	4. 巻 903
2. 論文標題 Simulations of the Early Postbounce Phase of Core-collapse Supernovae in Three-dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 82 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb8cf	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 Suwa Yudai, Harada Akira, Nakazato Ken' ichiro, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 Analytic solutions for neutrino-light curves of core-collapse supernovae	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa154	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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mori Masamitsu, Suwa Yudai, Nakazato Ken' ichiro, Sumiyoshi Kohsuke, Harada Masayuki, Harada Akira, Koshio Yusuke, Wendell Roger A.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Developing an end-to-end simulation framework of supernova neutrino detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa185	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 Akaho Ryuichiro, Harada Akira, Nagakura Hiroki, Sumiyoshi Kohsuke, Iwakami Wakana, Okawa Hirotada, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Yamada Shoichi	4. 巻 909
2. 論文標題 Multidimensional Boltzmann Neutrino Transport Code in Full General Relativity for Core-collapse Simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 210 ~ 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe1bf	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 Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 12253
2. 論文標題 Acceleration of Boltzmann Equation for Core-Collapse Supernova Simulations on PEZY-SC Processors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 177 ~ 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-58814-4_13	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 Furusawa Shun	4. 巻 95
2. 論文標題 Nuclei in central engine of core-collapse supernovae	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 074002 ~ 074002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1402-4896/ab8c15	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 Furusawa Shun, Mishustin Igor	4. 巻 1002
2. 論文標題 Degeneracy effects and Bose condensation in warm nuclear matter with light and heavy clusters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 121991 ~ 121991
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2020.121991	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 -

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 高温高密度物質を探る 大西さんの思い出
3. 学会等名 大西さん追悼研究会「クォーク・ハドロン・原子核物理の潮流と展望」(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Neutrino and nuclear physics in core-collapse supernovae
3. 学会等名 KiPAS international workshop "From particle physics to supernovae and early Universe" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shun Furusawa
2. 発表標題 Nuclear equation-of-state and Nuclei in Core-Collapse Supernovae
3. 学会等名 NuSym23, XIth International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星ニュートリノ解析コードSPECIAL BLENDによるSN1987Aの解析
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Machine Learning for supernova simulations
3. 学会等名 Workshop: Astro AI with Fugaku
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星SN1987Aからのニュートリノ信号再解析による中性子星NS1987Aのパラメータ推定
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 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Progress of supernova simulations with Boltzmann neutrino transport: C02 theory
3. 学会等名 Symposium on Gravitational wave physics and astronomy: Genesis (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 住吉光介、古澤峻、原田了、富樫甫、長倉洋樹、中里健一郎、鈴木英之
2. 発表標題 状態方程式テーブルでの原子核組成の違いによる超新星・原始中性子星への影響
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 超新星における状態方程式の影響と残された課題
3. 学会等名 研究会「重力波天文学時代における超新星研究」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 住吉光介, 藤林翔, 長倉洋樹
2. 発表標題 連星中性子星合体後の長期進化におけるニュートリノ輻射輸送
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 古澤峻
2. 発表標題 重力崩壊型超新星爆発中心エンジンにおける衝撃波加熱物質の原子核組成
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古澤峻
2. 発表標題 超新星爆発中心の原子核、重力波天文学時代における超新星研究
3. 学会等名 研究会「重力波天文学時代における超新星研究」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古澤峻
2. 発表標題 原始中性子星と中性子星クラストの状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星ダイナミクスとニュートリノ運動量分布
3. 学会等名 研究会「重力波天文学時代における超新星研究」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 星の重力崩壊計算のための一般相対論的ポルツマン輻射流体コードの開発
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Rotation-induced collective neutrino oscillation in a core-collapse supernova
3. 学会等名 NEUTRINO 2022 XXX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 住吉光介、古澤峻、長倉洋樹、中里健一郎、鈴木英之
2. 発表標題 Dirac-Brueckner-Hartree-Fock計算に基づいた状態方程式テーブルによる超新星および原始中性子星の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Influences of Nuclear EOS on Core-collapse Supernova Simulations by the Boltzmann-radiation-hydrodynamics
3. 学会等名 Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (SNeGWv2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Possible collective neutrino oscillation induced by rotation in a core-collapse supernova simulation with the Boltzmann neutrino transport
3. 学会等名 INT Electronic Workshop 21-79W New Directions in Neutrino Flavor Evolution in Astrophysical Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 核物質状態方程式を考慮した超新星ニュートリノ観測テンプレートの開発
3. 学会等名 令和3年度東京大学宇宙線研共同利用研究成果発表会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 富岳における3次元重力崩壊型超新星計算の進捗状況
3. 学会等名 「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星爆発における回転誘起型ニュートリノ集団振動
3. 学会等名 第8回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星爆発におけるニュートリノ集団振動
3. 学会等名 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性I
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 ボルツマン輻射流体計算で探る超新星爆発における原子核組成の影響
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 ボルツマン輻射流体シミュレーションで探る超新星爆発での核物質状態方程式の役割
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2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shun Furusawa
2. 発表標題 Nuclei in Core-Collapse Supernovae
3. 学会等名 N3AS Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Recent progress of neutrino transfer and equation of state
3. 学会等名 PHAROS WG1+WG2 Workshop: neutron star equation of state and transport (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーションによる研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 連星中性子星合体後の高密度天体におけるニュートリノ輻射輸送の性質
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Matsufuru
2. 発表標題 Acceleration of Boltzmann Equation for Core-Collapse Supernova Simulations on PEZY-SC Processors
3. 学会等名 The 20th International Conference on Computational Science and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Harada
2. 発表標題 Progress of the Boltzmann-radiation-hydrodynamics Simulations for Core-collapse Supernovae (C02 theory report)
3. 学会等名 The Fourth Annual Area Symposium Online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Harada
2. 発表標題 Core-collapse Supernova Simulations with the Boltzmann-neutrino transport using the SN method
3. 学会等名 CHALLENGES AND INNOVATIONS IN COMPUTATIONAL ASTROPHYSICS - II (ChaICA - II) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 SN法を用いたボルツマン輻射流体コードによる高速回転星の重力崩壊シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 スーパーカミオカンデによる超新星ニュートリノの観測テンプレートの開発
3. 学会等名 令和2年度東京大学宇宙線研共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Harada
2. 発表標題 Core-collapse simulations of rapidly rotating progenitors by Boltzmann-radiation-hydrodynamics code
3. 学会等名 Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 高速回転星重力崩壊のボルツマン-ニュートリノ輻射流体シミュレーション
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」第7回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 ボルツマン輻射流体コードによる高速回転星の重力崩壊シミュレーション
3. 学会等名 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 Boltzmann-radiation-hydrodynamics simulations of the core collapse of rapidly rotating stars
3. 学会等名 第33回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学のブレイクスルー」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 高速回転星重力崩壊のボルツマン輻射流体シミュレーション
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Furusawa
2. 発表標題 Neutrino-Nucleus Interactions in Central Engine of Core-Collapse Supernovae
3. 学会等名 Neutrino 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Kohsuke Sumiyoshi, Toru Kojo, Shun Furusawa	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 51
3. 書名 Handbook of Nuclear Physics, Chapter "Equation of State in Neutron Stars and Supernovae"	

〔産業財産権〕

[ その他 ]

Supernova Neutrino Light Curves  
[https://zenodo.org/record/5778224#.YnTYJi\\_3JmC](https://zenodo.org/record/5778224#.YnTYJi_3JmC)

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	原田 了  (Akira Harada)  (80844795)	国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・基礎科学特別研究員    (82401)	
研究分担者	古澤 峻  (Shun Furusawa)  (40737251)	関東学院大学・理工学部・講師    (32704)	
研究分担者	松古 栄夫  (Hideo Matsufuru)  (10373185)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・助教    (82118)	

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1件

国際研究集会	開催年
Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (SNeGWv2021)	2021年 ~ 2021年

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