

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05093

研究課題名（和文）6次元ボルツマン方程式により探る多次元超新星爆発メカニズム

研究課題名（英文）Study of multi-dimensional supernova explosions by 6D Boltzmann equation

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） 3,600,000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を世界で初めて実現して、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けるマイクロ物理が及ぼす影響を探ることに成功した。

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計算コードを開発して、多次元的な爆発におけるニュートリノ反応と輸送を厳密に解くことが可能となった。これは世界初の快挙であり、工学的な輻射輸送計算の応用にも繋がる独創的な研究成果となった。

研究成果の概要（英文）：Core-collapse supernovae are the explosive phenomena at the end of life of massive stars. In order 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 enabled the first-principle calculations of neutrino transfer by our new method for the first time in the world, successfully performed numerical simulations of multi-dimensional explosions through neutrino heating, and clarified the influence of neutrino and nuclear physics.

研究分野：原子核宇宙物理学

キーワード：超新星 ニュートリノ 爆発 理論天文学 理論核物理 輻射輸送 計算科学 スーパーコンピュータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超新星は、大質量星の進化の最期に起きる天体現象であり、超新星ニュートリノ放出や中性子星誕生の現場でもある。重力崩壊から始まり爆発へ至る現象の解明には、極限状況における原子核物理、ニュートリノ輻射輸送と流体力学、を組み合わせた数値シミュレーションが不可欠である。研究開始当時までに空間2・3次元での流体不安定性の役割が判明していたが、同時に働くニュートリノ加熱過程との競合があり、多次元爆発メカニズムの引き金は何かを特定できず、爆発可否の閾値付近での複合問題を解明する上で、ニュートリノ輻射輸送計算に残された近似的手法が大きな障害であった。

この困難を突破するため、研究代表者らは新たに6次元ボルツマン方程式を解く計算コードを開発して、世界初の3次元空間ニュートリノ輻射輸送計算が実現された。さらに多次元ニュートリノ輻射流体を扱うために完成させた統合計算コードにより最先端の数値シミュレーションを行う段階にあった。輻射輸送の近似を取り除いた第一原理的な計算のもとで多次元の超新星シミュレーションを行い、爆発メカニズムの主要な原因を確立することが、研究の動機であった。未知の爆発メカニズムを探り、標準的な爆発モデルを構築するためには、多次元輻射輸送における近似を取り除くことが不可欠であり、そのうえで多次元爆発における原子核物理の影響を定める必要があった。

2. 研究の目的

研究代表者による以前の研究も含めて、球対称下では大質量星が重力崩壊したのち、コアバウンスで打ち上げられた衝撃波は、停滞して爆発しないことが確実である。近年の研究では、多次元における流体不安定性(対流効果・衝撃波の歪み等)とニュートリノ加熱過程の組み合わせにより爆発が起きる例が多く示されている。しかし、ニュートリノ輻射輸送計算における近似のためニュートリノ発生・伝播・加熱量に不定性があり、爆発の主たる要因を特定できていない。問題解決には6次元ボルツマン方程式を用いて、拡散から自由伝播まで全領域をカバーする3次元空間ニュートリノ輻射輸送を解く必要がある。

さらに、超新星内の高温高密度での物理過程の不定性は、爆発の可否を確定する上での課題である。研究代表者は、球対称下でニュートリノ輻射流体計算の第一原理計算を行い、原子核物理の不定性を考慮しても、球対称では爆発が起きないことを結論づけた。しかし、2・3次元においては、ニュートリノ・原子核物理による影響は未だ明確になっていない。6次元ボルツマン方程式ソルバーを用いた第一原理的な計算のもとで影響を定量的に定めて、多次元爆発での原子核物理の役割を改めて明らかにすることが急務となっている。

このように、超新星の爆発メカニズムでは、流体・ニュートリノ輻射輸送・原子核物理の効果が互いに関連しており、各々の役割を注意深く定めることが肝要である。これらの事柄を念頭においた本研究の目的は、6次元ボルツマン方程式を解く厳密計算により、3次元ニュートリノ輻射輸送の特性を解明して超新星シミュレーションの揺るぎない基礎を築き、多次元爆発における原子核物理の影響を定量的に求めて爆発を左右する不定要素を確定していくことにある。その上で多次元爆発メカニズムの全容を明らかにするため信頼できる爆発モデルを構築する。

3. 研究の方法

超新星爆発の解明には、流体力学とニュートリノ反応・輸送を同時に解く、ニュートリノ輻射流体計算の数値シミュレーションが必須である。3次元空間におけるニュートリノ輻射流体計算により、多次元爆発メカニズムを確立して、信頼できる爆発モデルを構築するためには、ニュートリノ輻射輸送と原子核物理を検証していくこと、爆発シナリオの部分ごとに焦点を絞り現象を解明することが重要である。このため、まず、検証のための数値シミュレーションを段階的に行って基礎を固める。次に、不定要素を確定するための比較のための数値シミュレーションを行い、ニュートリノ輻射・原子核物理の爆発への影響を確定していく。最終段階においては、得られた知見の全てをつぎ込んだ大規模数値シミュレーションを行い、2次元(軸対称)における爆発モデルを構築すると共に、3次元における爆発メカニズムの探求を行う。以下のように、総合的に多次元爆発メカニズムの解明を行っていく。

多次元爆発におけるニュートリノ輻射輸送を解明する：6次元ボルツマン方程式ソルバーにより、ニュートリノ輻射輸送の近似計算を定量的に評価して、先行研究の爆発例に含まれる問題点を洗い出すと共に、3次元ニュートリノ輻射輸送の普遍的な特徴を解明する。近年の研究で標準的に用いられている拡散近似や光線近似は十分に検証がされておらず、多次元ニュートリノ輻射における変動や非等方性が爆発を過大に助けている可能性がある。爆発メカニズム探求における最大級の不定要素を取り除き、超新星研究分野全体の進歩に貢献する。

多次元爆発における原子核物理の影響を定める：3次元ニュートリノ輻射輸送を近似無しで解く事により、原子核物理の不定性が爆発シミュレーションに及ぼす影響を定量的に求めることが可能となる。初めての第一原理的な多次元計算により、爆発の可否について影響の方向と大きさを確定する。流体不安定性と連動して起きる爆発メカニズムの中で原子核物理過程が果たす役割は何かを明らかにする。例えば、高温高密度物質の性質(状態方程式)の違いが、多次元

爆発のどこに影響を与えるのかを解明する。

空間2次元・3次元における爆発モデルを構築する：上記の評価を踏まえ、多次元ニュートリノ輻射流体数値シミュレーションを行い、既存の近似計算の検証を行うと共に、第一原理的な計算による爆発の可否を確定する。2次元（軸対称）においては、最も信頼できる核物理を用いた標準的な爆発モデルを構築して、超新星ニュートリノ予測データを提供する。3次元ではグラントチャレンジ計算を実現して、空間対称性を課さない状況で爆発が実現されるかを探索すると共に、次世代スーパーコンピュータにおける究極の計算への橋渡しを行う。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

2015年度の研究では、多次元ニュートリノ輻射輸送現象の解明を行なうと共に、多次元ニュートリノ輻射流体計算による重力崩壊計算を初めて実現した。6次元ボルツマン方程式ソルバーを用いて、物質分布を固定して多次元ニュートリノ輻射輸送の系統的な計算を行い、ニュートリノの角度分布の特性を近似手法（モーメント法）と比較して検証したほか、角度解像度の収束性を調べた。京コンピュータにおいて6次元ボルツマン方程式ソルバーを組み込んだニュートリノ輻射流体計算コードによる軸対称大規模シミュレーションを行い、太陽質量11、15倍の星の鉄コア初期条件からの重力崩壊・バウンスによる衝撃波伝播の様子を追う事に成功した。400ミリ秒を越える長時間発展においても衝撃波が復活せず、どちらのケースも爆発を起こさないことが明らかとなった。これは近似手法による既存の計算結果とは異なるものである。

2016年度の研究では、2次元軸対称におけるニュートリノ輻射流体計算コードによる大質量星の重力崩壊シミュレーションを異なる設定について行うことを中心として、核物理による影響、3次元への拡張、多次元輻射輸送に関する研究を行った。6次元ボルツマン方程式ソルバーを用いて、物質分布を固定して多次元ニュートリノ輻射輸送の計算を行い、超新星コアだけでなく、中性子星合体により誕生する超大質量中性子星でのニュートリノ加熱について近似法との比較研究を行った。京コンピュータにおける6次元ボルツマン方程式ソルバーを組み込んだニュートリノ輻射流体計算コードによる軸対称大規模シミュレーションでは、異なる状態方程式の計算モデルについて実行し、状態方程式の影響を探ることを行った。新たに柔らかい状態方程式(LS-EOS)を採用して太陽質量11倍の星の鉄コア初期条件からの重力崩壊・バウンスによる衝撃波伝播の様子を追うことにより、衝撃波が復活して爆発へ向かう兆候を示すことを明らかにした。

2017年度の研究では、ボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算コードを多様な超新星コアの数値シミュレーションへ応用することで、計算法と近似方法の検証、状態方程式の影響、親星の違いによる観測シグナルに関する研究を行った。6次元ボルツマン方程式ソルバーを組み込んだニュートリノ輻射流体計算コードを用いた、京コンピュータにおける軸対称大規模シミュレーションにより、2つの状態方程式を用いた際の違いの詳細を探ることを行った。同一の親星（初期条件）からの重力崩壊ののち、爆発に至る場合と不発に終わる場合に結果が分かれること、バウンス直後におきる相違点が重要であることを明らかにした。また、6次元ボルツマン方程式ソルバーによる計算およびモンテカルロ法による計算により、超新星コアにおける多次元ニュートリノ輻射輸送の振る舞いを比較して、ボルツマン方程式による計算法が正しく振舞うことを検証して、近似計算法における問題点を指摘した。様々な質量の親星における超新星ニュートリノの予測計算を行い、コンパクトネスの違いにより、爆発に至り中性子星、不発によりブラックホール、が誕生する場合をわけて、ニュートリノ放出の特徴を導き出して、超新星背景ニュートリノ観測により両者の境目を導き出すことを提案した。

2018年度の研究では、ボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算コードを回転超新星コアの数値シミュレーションに応用することで、回転する親星における多次元爆発ダイナミクスとニュートリノ輻射の解明を行ったほか、爆発におけるニュートリノ反応の影響、大質量星の重力崩壊現象からのニュートリノ放射の分析に関する研究を行った。京コンピュータにおいては、回転する星の重力崩壊におけるコアバウンスから衝撃波発展へ至るダイナミクスを明らかにするため、6次元ボルツマン方程式ソルバーを組み込んだニュートリノ輻射流体計算コードによる軸対称大規模シミュレーションを実行した。この研究において、初めてニュートリノエネルギー・角度分布の非対称性が明らかになり、モーメント法において用いられている近似公式の問題点を指摘した。また、球対称シミュレーションを実行して、大質量星の重力崩壊・コアバウンス・衝撃波伝播・ニュートリノ放出においてニュートリノ反応の違いが及ぼす影響について定量的に明らかにした。

2019年度の研究では、ニュートリノ輻射流体計算コードによる超新星コアの数値シミュレーションの応用を進めて、高密度天体の反跳現象を発見した。計算コードの一般相対論的な拡張を行い、ニュートリノ放射の非対称性のもとで起こる流体力学的不安定性により、バウンス直後に誕生したばかりの原始中性子星が反跳を受けて早期に移動を始める現象を明らかにした。さらに、超新星ニュートリノバーストの検出イベント数および重力波の基準振動の予測を行い、観測から中心天体の情報を引き出す方法について提案を行った。また、我々の計算で初めて得られた多次元ニュートリノ輻射データの解析により、超新星ニュートリノにおいて集団ニュートリノ

振動が起きることを世界で初めて発見して、その出現条件を明らかにした。並行して、超新星爆発シミュレーションにおいて必要な高温高密度核物質の状態方程式データテーブルを最新の理論・観測・実験データに基づいたものに改良を行って全世界に公開し、超新星爆発・ニュートリノ放出への影響を明らかにした。本研究の最終段階となる3次元空間における超新星コアバウンス計算を実現して、6次元空間でのニュートリノ輻射流体の振る舞いを初めて明らかにした。全体として、コアバウンス直後から核物理・ニュートリノ輻射の多次元的な影響が出現し、その初期の違いがのちの爆発の可否に影響を及ぼしていることを新たな知見として得た。

(2) 得られた成果のインパクト

本研究で得られた成果は、国内外において大きな影響力を持っており、研究分野において大きなインパクトを与えるものとなった。輻射流体方程式を第一原理的に解くことは難しく、宇宙物理分野において広く重要な成果でもある。ニュートリノ輻射輸送問題を6次元ボルツマン方程式により直接解くことができるのは本研究による独自のものであり、流体力学と組み合わせると2次元軸対称、3次元におけるニュートリノ輻射流体力学のシミュレーション計算を実現したことは世界の超新星分野において注目を浴びるものとなった。世界の他のグループにおいては近似的な手法を用いたシミュレーション計算しかなく、厳密計算の方法による本研究成果は他の追随を許さないものになっている。本研究の厳密計算により近似手法による計算を検証することが可能になったことは研究分野にとって大きな貢献となっている。国内においては、超新星爆発による元素合成などを扱うための大規模な空間領域、長時間計算、系統的な計算を行うための基礎となり、近似手法による研究と相補的な関係を築き上げた。拡散近似法、モーメント法など近年の研究で用いられる計算法の基準を作ることができた意義は大きい。また、この計算技術は物理だけでなく工学分野にも注目されるようになり、原子力における中性子輸送計算分野との交流にも繋がった。また研究成果に基づいた原子核・ハドロン・ニュートリノ物理との共同研究も活発となった。計算科学分野においても京コンピュータによる大規模シミュレーション計算の実施により研究成果をあげて高い評価をえている。

(3) 得られた新たな知見

本研究では、ニュートリノ輻射輸送を厳密に計算することにより、既存の近似計算による結果では明確に探ることができなかった疑問点について、解明を進めることが可能となった点大きい。特にニュートリノ・原子核物理を調べるうえで、ニュートリノ輻射輸送の近似による不定性は障害の一つであった。本研究での計算手法により、高温高密度物質やニュートリノ反応率の影響を明確に取り出すことができたことは、研究分野における大きな進展である。当初の予想に近い形で、爆発に至る度合いが弱くなったことも興味深い。当初予想していなかった時間領域、星がつぶれてはね返るコアバウンス直後から対流が起き始めており、これが爆発に繋がっている点は新しい発見である。特に、物質の組成が影響を及ぼしており、原子核が分解される度合いが後の爆発につながるという点は、独自の視点となっており今後の研究の発展につながる。また、ニュートリノ輻射輸送の精密計算を実現したことの波及効果が様々な形で現れている。標準的な超新星だけでなく、さらに大質量で回転している星によるコラプサー、中性子星合体により誕生する超大質量中性子星におけるニュートリノ輻射輸送計算も可能であることがわかり、様々な環境におけるニュートリノ輻射輸送計算による研究へと発展しはじめている。さらに、ボルツマン方程式を解いて得られるニュートリノの6次元位相空間分布(空間3次元、運動量空間3次元)はニュートリノ物理の研究においても貴重なデータとなっており、集団ニュートリノ振動の研究における実際の超新星ニュートリノデータとして、その角度・エネルギー・空間分布が用いられて、超新星コアにおいて集団ニュートリノ振動が起きている世界で初めての実証例となり、素粒子物理にも波及効果を持つ成果となった。

(4) 今後の展望

本研究による研究成果は、超新星をはじめとする極限状態における爆発的現象の解明に寄与するものであり、その研究の発展形により様々な成果が期待されている。重力崩壊型超新星爆発の解明において、2次元軸対称の厳密計算を行えるようになったことで、残された不定性の原子核物理などを明確に定めることが可能となっている。計算コードは現在一般相対論の拡張を行っており、2次元軸対称における第一原理計算の実現が近いところにある。また本研究で実現した3次元計算は、近く稼働を始める富岳スーパーコンピュータにおいて、本格的な計算を行なう予定であり、完全な第一原理計算による爆発メカニズムの解明が可能となる。また、本研究で開発した最新の状態方程式データテーブル、組成取り扱いの精密化、ニュートリノ反応の扱いなどは第一原理計算による最終的な答えを導く際に重要となる。得られる計算結果は、スーパーカミオカンデ(および計画されているハイパーカミオカンデ)によるニュートリノ検出実験による超新星背景ニュートリノ、超新星バースト観測へ向けた信頼度の高いニュートリノ予測データとして活用が期待されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 29件 / うち国際共著 19件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Delfan Azari Milad, Yamada Shoichi, Morinaga Taiki, Iwakami Wakana, Okawa Hirotsada, Nagakura Hiroki, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 99
2. 論文標題 Linear analysis of fast-pairwise collective neutrino oscillations in core-collapse supernovae based on the results of Boltzmann simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103011-103011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.103011	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 Nagakura Hiroki, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 878
2. 論文標題 Three-dimensional Boltzmann-hydro Code for Core-collapse in Massive Stars. III. A New Method for Momentum Feedback from Neutrino to Matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 160 ~ 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2189	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 Suwa Yudai, Sumiyoshi Kohsuke, Nakazato Ken'ichiro, Takahira Yasufumi, Koshio Yusuke, Mori Masamitsu, Wendell Roger A.	4. 巻 881
2. 論文標題 Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande: Expected Event Number over 10 s	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 139 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2e05	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 Abbar Sajad, Duan Huaiyu, Sumiyoshi Kohsuke, Takiwaki Tomoya, Volpe Maria Cristina	4. 巻 100
2. 論文標題 On the occurrence of fast neutrino flavor conversions in multidimensional supernova models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 043004-043004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.043004	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 Nagakura Hiroki, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 880
2. 論文標題 Possible Early Linear Acceleration of Proto-neutron Stars via Asymmetric Neutrino Emission in Core-collapse Supernovae	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L28 ~ L28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab30ca	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 100
2. 論文標題 Determination of properties of protoneutron stars toward black hole formation via gravitational wave observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083008-083008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.083008	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, Nakazato Ken'ichiro, Suzuki Hideyuki, Hu Jinniu, Shen Hong	4. 巻 887
2. 論文標題 Influence of Density Dependence of Symmetry Energy in Hot and Dense Matter for Supernova Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 110 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab5443	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, Togashi Hajime, Sumiyoshi Kohsuke, Saito Koichi, Yamada Shoichi, Suzuki Hideyuki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Nuclear statistical equilibrium equation of state with a parametrized Dirac-Hartree-Fock calculation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013D05-013D05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz135	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 Delfan Azari Milad, Yamada Shoichi, Morinaga Taiki, Nagakura Hiroki, Furusawa Shun, Harada Akira, Okawa Hirotada, Iwakami Wakana, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 101
2. 論文標題 Fast collective neutrino oscillations inside the neutrino sphere in core-collapse supernovae	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 023018-023018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.023018	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 Abbar Sajad, Duan Huaiyu, Sumiyoshi Kohsuke, Takiwaki Tomoya, Volpe Maria Cristina	4. 巻 101
2. 論文標題 Fast neutrino flavor conversion modes in multidimensional core-collapse supernova models: The role of the asymmetric neutrino distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 043016-043016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.043016	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 Shen Hong, Ji Fan, Hu Jinniu, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 891
2. 論文標題 Effects of Symmetry Energy on the Equation of State for Simulations of Core-collapse Supernovae and Neutron-star Mergers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 148 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab72fd	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 Zaizen Masamichi, Yoshida Takashi, Sumiyoshi Kohsuke, Umeda Hideyuki	4. 巻 98
2. 論文標題 Collective neutrino oscillations and detectabilities in failed supernovae	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.103020	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 Takahashi Koh, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi, Umeda Hideyuki, Yoshida Takashi	4. 巻 871
2. 論文標題 The evolution towards electron capture supernovae: the flame propagation in collapsing oxygen-neon cores	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf8a8	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 Nagakura Hiroki, Furusawa Shun, Togashi Hajime, Richers Sherwood, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 240
2. 論文標題 Comparing Treatments of Weak Reactions with Nuclei in Simulations of Core-collapse Supernovae	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/aafac9	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 Harada Akira, Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Okawa Hirotsada, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 872
2. 論文標題 On the Neutrino Distributions in Phase Space for the Rotating Core-collapse Supernova Simulated with a Boltzmann-neutrino-radiation-hydrodynamics Code	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0203	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 Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 10962
2. 論文標題 Simulation of Supernova Explosion Accelerated on GPU: Spherically Symmetric Neutrino-Radiation Hydrodynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science book series	6. 最初と最後の頁 440 ~ 455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-95168-3_30	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 Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 2018.00056
2. 論文標題 Accelerating Numerical Simulations of Supernovae with GPUs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Xplore and Computer Society Digital Libraries	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW.2018.00056	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 住吉光介・千葉敏	4. 巻 60
2. 論文標題 宇宙の大イベント超新星爆発とその鍵を握るニュートリノ ニュートリノ輸送計算が明かす物質創生の筋道	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本原子力学会誌「アトムス」	6. 最初と最後の頁 30～34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3327/jaesjb.60.12_754	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, Togashi H, Nagakura H, Sumiyoshi K, Yamada S, Suzuki H, Takano M	4. 巻 44
2. 論文標題 A new equation of state for core-collapse supernovae based on realistic nuclear forces and including a full nuclear ensemble	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 094001～094001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1088/1361-6471/aa7f35	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 Richers Sherwood, Nagakura Hiroki, Ott Christian D., Dolence Joshua, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 847
2. 論文標題 A Detailed Comparison of Multidimensional Boltzmann Neutrino Transport Methods in Core-collapse Supernovae	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 133～133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa8bb2	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 Horiuchi Shunsaku, Sumiyoshi Kohsuke, Nakamura Ko, Fischer Tobias, Summa Alexander, Takiwaki Tomoya, Janka Hans-Thomas, Kotake Kei	4. 巻 475
2. 論文標題 Diffuse supernova neutrino background from extensive core-collapse simulations of 8?100?M? progenitors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1363 ~ 1374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx3271	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 Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Furusawa Shun, Okawa Hirotada, Harada Akira, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi, Matsufuru Hideo, Imakura Akira	4. 巻 854
2. 論文標題 Simulations of Core-collapse Supernovae in Spatial Axisymmetry with Full Boltzmann Neutrino Transport	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 136 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aaac29	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 Sumiyoshi Kohsuke	4. 巻 861
2. 論文標題 Supernovae and neutron stars: playgrounds of dense matter and neutrinos	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012028 ~ 012028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/861/1/012028	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 H. Nagakura, W. Iwakami, S. Furusawa, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Matsufuru and A. Imakura	4. 巻 229
2. 論文標題 Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars II. Moving mesh for the neutron star oscillation and kick	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 42 (14 p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/aa69ea	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 S. Furusawa, K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki	4. 巻 A957
2. 論文標題 Supernova equations of state including full nuclear ensemble with in-medium effects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 188-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2016.09.002	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 S. Furusawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, C. Kato and S. Yamada	4. 巻 C95
2. 論文標題 Dependence of weak interaction rates on nuclear model in equation of state for stellar core collapse	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 25809
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.95.025809	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 S. Furusawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi and S. Yamada	4. 巻 665
2. 論文標題 Inelastic neutrino reactions with light nuclei and standing accretion shock instability in core-collapse supernovae	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012070 (6 p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/665/1/012070	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 K. Sumiyoshi, H. Nagakura, W. Iwakami, S. Furusawa, H. Matsufuru, A. Imakura and S. Yamada	4. 巻 14
2. 論文標題 Core-collapse supernovae explored by multi-D Boltzmann hydrodynamic simulations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 010606 (4 p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.14.010606	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 K. Takahashi, T. Yoshida, H. Umeda, K. Sumiyoshi and S. Yamada	4. 巻 14
2. 論文標題 Systematic calculation of PISN explosion and nucleosynthesis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 010606 (4 p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.14.020205	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 K. Takahashi, T. Yoshida, H. Umeda, K. Sumiyoshi and S. Yamada	4. 巻 456
2. 論文標題 Exact and approximate expressions of energy generation rates and their impact on the explosion properties of pair instability supernovae	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1320-1331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.1093/mnras/stv2649	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27件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Neutrino emission and equation of state in core collapse supernovae
3. 学会等名 Microphysics In Computational Relativistic Astrophysics (MICRA) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Core collapse supernova simulations with full Boltzmann transport -status report of group C02 of GW-genesis- (part 1)
3. 学会等名 Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 超新星物質とニュートリノ
3. 学会等名 高塚さんを偲ぶ研究会 高密度ハドロン・クォーク物質の諸相と中性子星の構造・進化 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 原子核から超新星爆発の世界を探る
3. 学会等名 2019年度四国地区理論物理学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 超新星爆発の世界を探る ~原子核から星まで~
3. 学会等名 物理学の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 Explosion mechanism
3. 学会等名 Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures (SNeGWv2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 Hot dense matter in core-collapse supernovae and heavy ion collisions
3. 学会等名 The 52th Reimei Workshop “ Experimental and Theoretical Hadron Physics: Recent Exciting Developments ” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 ボルツマン方程式による超新星のシミュレーション計算
3. 学会等名 第1回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 Sn法によるニュートリノ粒子輸送と超新星
3. 学会等名 2018年度核データ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 対称エネルギーの違いによる超新星シミュレーションへの影響
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 Physics of core-collapse supernovae explored by nuclei
3. 学会等名 International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 2D/3D Core-collapse supernovae explored by 6D Boltzmann neutrino transport
3. 学会等名 Workshop on the Progenitor-Supernova-Remnant Connection (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 Core-collapse supernovae explored by neutrino transfer and nuclear data
3. 学会等名 6th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 Numerical studies of core-collapse supernovae: progress toward the first-principles calculations
3. 学会等名 International workshop on "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 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 Studying supernova explosions via their neutrino emission: theory
3. 学会等名 KICKOFF workshop on "Gravitational wave physics and astronomy: Genesis"
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 超新星爆発と状態方程式の現状と課題
3. 学会等名 研究会「中性子星核物質」2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohsuke Sumiyoshi
2. 発表標題 Studying supernova explosions via their neutrino emissions: C02 progress report from theory
3. 学会等名 The first annual area symposium of the innovative area "Gravitational wave physics and astronomy: Genesis" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 住吉光介; 松古栄夫
2. 発表標題 球対称ニュートリノ輻射流体計算による超新星研究の進展
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Supernovae and neutron stars as playgrounds of dense matter and neutrinos
3. 学会等名 Compact Stars in the QCD phase diagram V (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi, H. Nagakura, W. Iwakami, S. Furusawa, H. Matsufuru, A. Imakura, and S. Yamada
2. 発表標題 Core-collapse supernovae explored by multi-D Boltzmann hydrodynamic simulations
3. 学会等名 Nuclei in the Cosmos XIV (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Nuclear physics and neutrino transfer in supernovae and compact objects
3. 学会等名 YIPQS long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop (NPCSM 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 住吉光介
2. 発表標題 多次元ボルツマン輻射流体計算による重力崩壊型超新星の研究
3. 学会等名 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 滝脇知也, 古澤峻, 中村聡, 住吉光介
2. 発表標題 重陽子のニュートリノ放出・吸収反応を考慮した重力崩壊型超新星の2次元計算
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Numerical challenges in modeling supernova explosions by 6D Boltzmann equations
3. 学会等名 Vlasov-Poisson : towards numerical methods without particles (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 EOS and neutrinos in supernova explosions: from high to low density
3. 学会等名 Workshop on Science with SpiRIT TPC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 K. Sumiyoshi
2. 発表標題 Challenges of neutrino transport toward the full 3D supernova simulations: solving Boltzmann equations and neutrino processes
3. 学会等名 Workshop on Microphysics In Computational Relativistic Astrophysics (MICRA 2015) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 長倉洋樹, 岩上わかな, 住吉光介 (口頭発表者), 古澤峻, 松古栄夫, 今倉暁, 山田章一
2. 発表標題 6Dボルツマン・ニュートリノ輻射流体計算による2次元超新星シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 住吉 光介、須藤 彰三、岡 真	4. 発行年 2018年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 218
3. 書名 原子核から読み解く超新星爆発の世界	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Home Page of Relativistic EOS table for supernovae http://user.numazu-ct.ac.jp/~sumi/eos/index.html

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
---------	---------------------------	-----------------------	----