

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32660

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05811

研究課題名（和文）超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究

研究課題名（英文）Theoretical research on supernova neutrinos in connection with nuclear physics and cosmic chemical evolution

研究代表者

鈴木 英之（Suzuki, Hideyuki）

東京理科大学・創域理工学部先端物理学科・教授

研究者番号：90211987

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 37,800,000円

研究成果の概要（和文）：超新星ニュートリノに関するボルツマン方程式を直接解く世界最先端の数値計算コードを用いた超新星爆発の多次元シミュレーションによって、ニュートリノ運動量空間の角度分布などを求め、ニュートリノ集団振動や対流の起こる領域などを明らかにした。また球対称シミュレーションをベースに、超新星ニュートリノの観測から核物質の状態方程式など中性子星に絡む物理を探る手法を開発した。その他、状態方程式と無矛盾な核子制動輻射ニュートリノ反応率の計算と、化学進化の観点から星のコアの重力崩壊でブラックホールが形成されるケースの評価を行い、後者に基づく超新星背景ニュートリノのエネルギースペクトルを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力崩壊型超新星爆発の爆発機構と放出される超新星ニュートリノの理解のためには、ニュートリノ輸送を正しく扱った数値シミュレーションと、ニュートリノ反応率や核物質の状態方程式・ニュートリノ振動の理解が必要である。本研究では、世界最先端のニュートリノ輸送計算コードの開発と実際の数値シミュレーションを行い、ニュートリノ集団振動や対流領域に関する新たな知見を得ることができた。また、将来の超新星ニュートリノの観測に向けて、観測データから誕生した中性子星に関する物理を探る手法を開発した。状態方程式と無矛盾なニュートリノ反応率と、化学進化の研究と連動した超新星背景ニュートリノの評価に向けた研究も進展した。

研究成果の概要（英文）：We explored the neutrino angular distributions in supernova cores with multidimensional simulations using the state-of-the-art Boltzmann solver for neutrino transfer. We studied in detail the conditions in which neutrino collective oscillations occur and the regions with convective instabilities. As for the supernova neutrino observation, we explored useful strategies to know important properties of the neutron star just born with systematic 1D simulations of the supernova explosion and proto-neutron star cooling. Evaluation scheme of the neutrino emissivity by nucleon bremsstrahlung processes consistent with the nucleonic equation of state are also studied. The fraction of the black-hole forming events among the stellar core-collapse events are evaluated from the point of view of chemical evolution and the resultant energy spectra of the diffuse supernova background are also argued.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：超新星ニュートリノ 超新星爆発 原始中性子星 状態方程式 化学進化 ニュートリノ反応率 超新星背景ニュートリノ 数値シミュレーション

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙を理解するためには、宇宙に存在する物質や天体の起源と進化を知る必要がある。宇宙初期のビッグバンでは水素とヘリウムといった軽元素が合成され、その後宇宙の大きさが現在の1/20の頃に重元素を含まない種族 III の星が生まれたと考えられている。星の中では、核融合により炭素・酸素・鉄などの重元素が合成され、それらが超新星爆発などで宇宙空間にまき散らされることが繰り返され、現在の宇宙の元素分布が実現している(化学進化)。これらの超新星爆発の中でも、重い星のコアの重力崩壊に起因する重力崩壊型の場合は、大量の超新星ニュートリノが放出され、その観測が本領域の低バックグラウンドニュートリノ検出実験の主要なターゲットとなっている。大規模数値シミュレーションを駆使した爆発機構の研究が続く中、近傍で超新星が爆発すればニュートリノによって超新星コアの状態を直接見ることができ、天体物理学だけでなく、高密度状態にかかわる原子核物理学、ニュートリノ振動といった素粒子物理学の知見が得られることが期待されている。そのために、近傍の超新星からのニュートリノが観測されたときに、どのような解析を行えばどのような知見が得られるかを系統的に理解しておくことが重要となっていた。さらに宇宙開闢以来蓄積されてきた超新星背景ニュートリノの観測に向けた SK-Gd 実験の実現と改良が本領域の重要なミッションの一つであるが、その量・エネルギー分布は、宇宙における星形成史・重元素量の進化(化学進化)・星の初期質量や金属量などによって異なるニュートリノ放出を反映したものであり、その理論予測は宇宙化学進化も考慮して行う必要がある。さらに、超新星爆発の後に残る中性子星が互いに連星系をなす場合に、合体

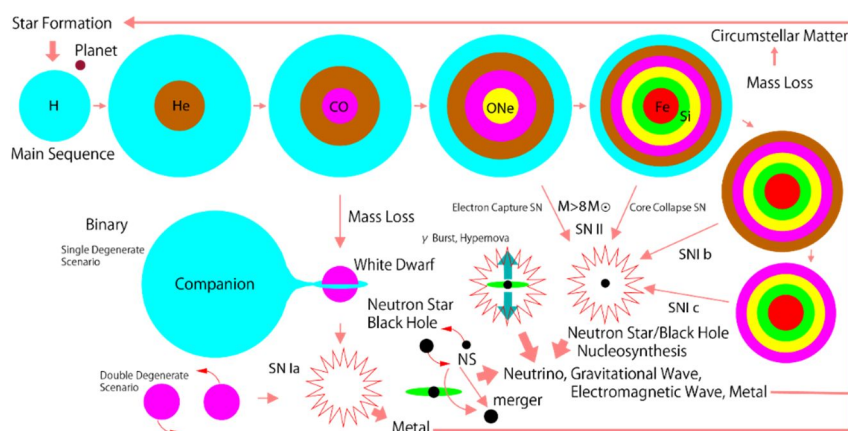


図 1 星形成、恒星進化、超新星爆発と重元素・ニュートリノ放出

時に重力波を放出するとともに r 過程元素の起源となる。地球ニュートリノ源のウランやトリウムもこのように合成されたものであり、超新星背景ニュートリノと超新星由来の重元素、連星中性子星起源の重元素は、相互に深く関係している(図1)が、総合的な研究はじゅうぶんとはいえない状況であった。

また、超新星爆発と超新星ニュートリノの数値シミュレーションに関しては、ニュートリノのボルツマン方程式を直接解く世界最先端の計算コードを山田らが開発してきた。これによって運動量空間におけるニュートリノの角度分布を計算することができ、近似式を用いた先行研究の問題点の洗い出しや、角度分布の影響が大きいニュートリノ集団振動に関する研究などをすすめる準備ができていた。また、超新星ニュートリノの後半にあたる原始中性子星の冷却段階については、核物質の状態方程式の影響が大きい、我々は過去の共同研究によってさまざまな実験・観測結果と矛盾のない状態方程式数値テーブル(Togashi EOS)を発表することができた。しかし、重要なニュートリノ反応率を状態方程式に合わせて評価する手法は未開発であった。

### 2. 研究の目的

大質量星がその進化の最終段階に重力崩壊して中性子星やブラックホールが形成される際には超新星ニュートリノが放出されると同時に種々の元素がまき散らされる。また形成された中性子星が連星系をなしている場合には、それらが合体する際にウランやトリウムなど地球ニュートリノの源が合成される。宇宙に蓄積された超新星背景ニュートリノと宇宙の化学進化・地球ニュートリノの相互関係はまだ十分に研究されていないので、本研究ではそのような総合的な研究の開拓を目指して、関係する研究を推進する。具体的には、重力崩壊や爆発などの動的段階の多次元数値シミュレーション、残された原始中性子星の冷却シミュレーションを行い、いまだ不定性のある核物質の状態方程式とニュートリノ反応率の影響を詳しく調べる。また、宇宙化学進化との関係を考慮しながら超新星背景ニュートリノの計算も精密化し、近い将来の観測に備える。その際、太陽系の元素組成を説明する化学進化モデルも議論し、地球ニュートリノの観測と矛盾しないモデルの選別を行いたい。またニュートリノのボルツマン方程式を直接解く世界最先端の計算コードを用いて、ニュートリノ同士の相互作用に起因するニュートリノ集団振動についても線形解析などの研究を進め、爆発や観測への影響の理解を深める。

### 3. 研究の方法

(1) ニュートリノに関するボルツマン方程式を直接解く世界最先端の多次元超新星爆発シミュレーションに関しては、これまで京コンピューターを用いて行ってきた系統的 2 次元シミュレーションを、新しい計算資源に移行して続けた。また、超新星爆発に続いて起こる原始中性子星冷却を同じコードを用いて計算できるように開発を進めた。さらに、スーパーコンピューター富岳などで 3 次元計算をより長い時間の計算ができるようにチューニングを続け、一般相対論の取り込みも行った。また、ニュートリノ反応率の精密化を進めるため、ミュオンとの寄与や核子散乱時のエネルギー交換の影響を調べた。本科研費で岩上を博士研究員として雇用し、これらの多次元数値シミュレーションによる研究を推進した。

(2) 球対称の超新星ニュートリノシミュレーションをベースにした超新星ニュートリノの観測に関する系統的な研究については、核物質状態方程式としてより現実的なモデルを採用し、early phase (重力崩壊・物質降着期) と late phase (原始中性子星の冷却期) のニュートリノ放出の数値計算をおこない、状態方程式由来する不定性の程度を評価した。さらに実際に、近傍で超新星爆発が起こった時にスーパーカミオカンデなどで検出されるイベント予測を行い、観測後すぐに使える解析手法を検討した。状態方程式の不定性や、重力崩壊型超新星爆発に対するブラックホール形成イベントの発生割合の不定性、残される中性子星の質量の不定性なども考慮した超新星背景ニュートリノのスペクトル計算も進めた。

(3) 現実的な核力モデルを用いた状態方程式と自己無矛盾なニュートリノ反応率の計算については、先行研究の LOCV 法を参考に中心力的相関関数とスピン・軌道力的相関関数の healing distance を共通に選んでいたが、これにより変分の自由度が制限され、修正 URCA 過程のニュートリノ放射率が小さく抑えられている可能性があるため、中心力的相関関数、テンソル力的相関関数、スピン軌道力的相関関数の healing distance の全てを独立なパラメータとして扱うことなどの改良を試した。その結果を参考に、超新星ニュートリノの放出過程としてより重要な核子制動放射過程の反応率の計算方法について検討を重ね、One Pion Exchange モデルを採用した Friman-Maxwell の先行研究の手法に、新たな状態方程式の性質を反映させることとした。その際、状態方程式の開発を行った富樫を研究協力者に迎えて、鷹野との共同研究を推進した。

(4) 超新星背景ニュートリノと化学進化の総合的な研究に関しては、研究体制を強化するため、2020 年度より化学進化の専門家である国立天文台の辻本を研究分担者に迎えた。そして、地球に内在するウランとトリウム量が銀河の化学進化の過程の中でいかにして決まるか詳細に検討し、その内在量が銀河(宇宙)スケールでの普遍性があるのか、さらにその主要な起源が中性子星合体なのかあるいは特異な超新星なのかを明らかにしていくこととした。さらに、新学術領域「冥王代生命学」の丸山・戎崎との共同研究として、彼らの提唱する地球の大陸三層モデルから予想される世界各地の地球ニュートリノフラックスの計算をすすめ、計画研究 A01 の KamLAND における地球ニュートリノ観測との関係だけでなく、海洋での地球ニュートリノ観測計画との関係も議論した。さらに、化学進化と超新星背景ニュートリノの総合的研究のため、種族合成計算に超新星ニュートリノの放出量の評価を組み込む準備を進め、その完成を目指した。その際、ベースとして用いる種族合成計算コード SSE/BSE では、CO コアの情報が不足しているケースがあり、これを補うため新たなフィッティング式の開発を進めた。またコアの重力崩壊に関する Mueller の一次元モデルによるニュートリノ放出量の評価方法の開発も進めた。

#### 4. 研究成果

(1) 山田・岩上を中心に、ボルツマン方程式を直接解く大規模シミュレーションによって超新星コア内部のニュートリノ分布関数を計算した。この計算コードは運動量空間におけるニュートリノと反ニュートリノの角度分布を計算できる(図2、文献 ) ため、ニュートリノ集団振動、特に fast conversion mode の起こる領域を詳しく調べた。計算コードの一般相対論化も進め、重力的な赤方偏移、測地線の曲がり、慣性系の引きずりといった一般相対論的效果が定量的に正しく計算できることを示した。ニュートリノ輸送だけでなく、最終的な一般相対論的輻射流体計算にむけて、アインシュタインソルバーと流体力学ソルバーの結合も行い、テスト計算を進めた。また、3次元化したコードを用いて、コア反跳後数 10ms に起こる即時対流の計算を行い、球対称や軸対称の時と比較した。3次元コードの球座標特異性を避けるための新たな計算手法を開発し、実装した。一方、原始中性子星の冷却段階は3次元性が小さくなると見込まれるため、軸対称を仮定した2次元シミュレーションによる対流の解析を行い、ニュートリノ光度や平均エネルギーにどのような影響があるかを定量的に調べるとともに、原子核物質の対称エネルギーが対流安定性へ与える影響を

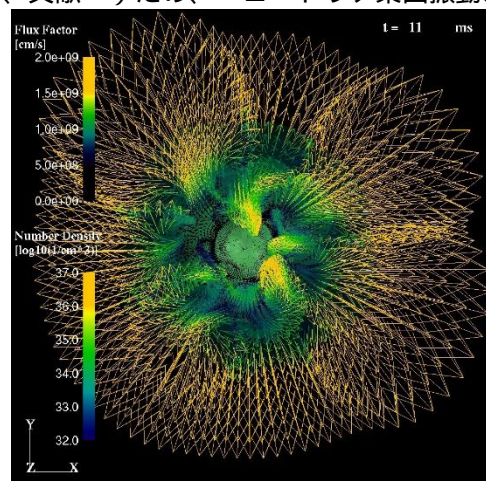


図 2: ボルツマンソルバーによって得られた複雑なニュートリノの角度分布

系統的に調べた。自転の効果についても、さまざまな冷却段階にある高速回転する原始中性子星のモデルを作成し、ボルツマン輻射輸送コードで非等方なニュートリノ放出を定量的に計算した。さらに、ニュートリノの反応率をより正確に扱うための研究として、 $\mu$  粒子の存在が与える影響を調べるとともに、モンテカルロ法を用い、ニュートリノとの散乱における核子の微小な反跳の効果も定量的に調べた。これらの研究は、一般相対論的な3次元時空計算、流体計算、ニュートリノ輸送計算を開発・結合し、重力崩壊型超新星爆発とそれに伴うニュートリノ放出を精度よく計算する最終的なコード開発に向けた取り組みの一環であり、大きな進展があったと言える。

(2) 中里・鈴木は原始中性子星冷却期におけるニュートリノ減光の時間スケールについて、現象論的な状態方程式を用いてさまざまな質量や半径を持つ中性子星に対して数値計算をおこない、得られた結果が解析的に導かれた表式と一致することを見出した。さらに、この結果を応用してニュートリノ観測から中性子星の質量・半径に制限をつける手法を提唱した。また中里らは、崩壊前の親星の質量や形成される中性子星の質量の異なるケースの数値計算を複数おこない、ニュートリノシグナルにおける状態方程式の不定性(図3)の程度を評価して、計画研究C01による実際の観測量にどの程度の違いをもたらすかを調べた(文献)。スーパーカミオカンデを念頭に、実際に銀河系内で超新星爆発が起こった場合に期待されるイベントレートの評価を行ない、イベント数の少ない場合でもニュートリノシグナルから原始中性子星内部の核物質の状態を効果的に診断する手法を見出すことにも成功した。また、原子核が現れる原始中性子星表面近傍の構造についての詳細な解析も行った。

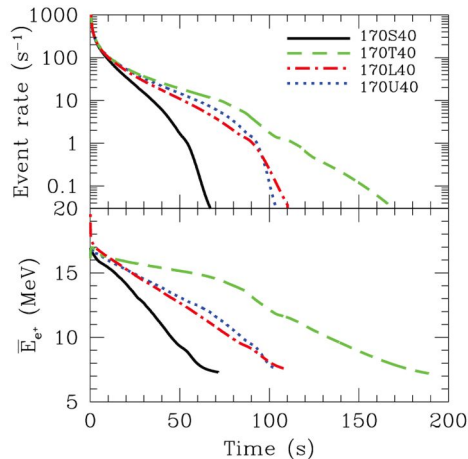


図3: 状態方程式のニュートリノ観測への影響

さらに中里らは大質量星の重力崩壊を起源とする背景ニュートリノスペクトルの評価を行なった。その際、核物質状態方程式による不定性だけでなく、ブラックホールを形成する重力崩壊の割合や超新星爆発により残される中性子星の質量の違いが検出感度に与える影響も調べた。結果として、SK-Gdで10年間観測を続けることにより検出の有無から上記の不定性についてある程度の制限が得られることが分かった。また、辻本・中里らは辻本が導出した宇宙全体における超新星及びブラックホール形成の赤方偏移に対する頻度史と、中里が構築した様々な核物質状態方程式に基づく超新星及びブラックホール形成に伴うニュートリノ放出量のモデルを用いて、超新星背景ニュートリノの理論計算を行った。結果として得られたエネルギースペクトル(図4、文献)は、従来の典型的なスペクトルと比較して、低エネルギー領域と高エネルギー領域にそれぞれモデルの特徴を反映する超過が見られた。さらに、化学進化の観点から存在が強く示唆されるブラックホール形成と超新星爆発を同時に起こすタイプの天体による背景ニュートリノへの寄与の検討を開始した。

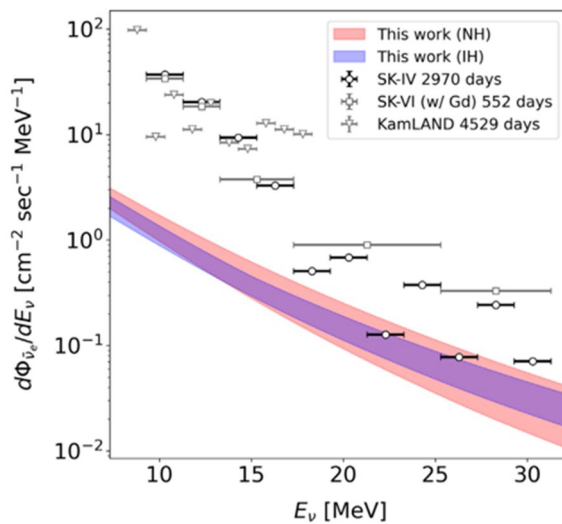


図4: 新たな超新星背景ニュートリノの理論予測と観測実験によって得られている上限値

(3) 超新星シミュレーション用に現実的な核力をベースにした状態方程式(Togashi EOS)を開発した鷹野・富樫は、状態方程式と自己無矛盾なニュートリノ反応率の計算を進めた。修正URCA過程ニュートリノ放射率の計算法に関しては、相関関数の範囲を広げるとともに三体力を取り入れる改良を行うことで、先行研究との差異が小さくなることを確認した。さらに、Lowest Order Constrained Variational (LOCV)法において用いられている相関関数への境界条件を採用するように、理論の拡張を行なった。一方で、LOCV法を用いたニュートリノ放射率計算を核子制動放

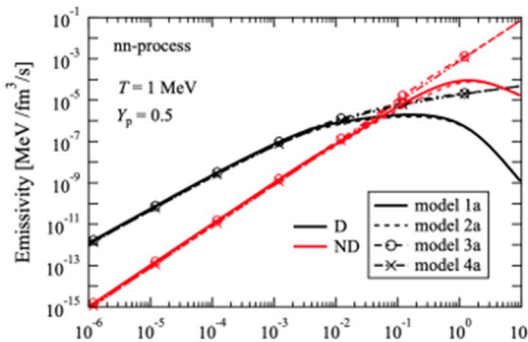


図5: 状態方程式と無矛盾な核子制動放射率の計算

射過程に適用すると、標準的な温度依存性が得られないことが判明した。そのため、方針を変更し、Friman-Maxwell の One-pion exchange potential を用いた摂動論的方法に Togashi EOS の情報を反映させることで、Togashi EOS と自己無矛盾な核子制動放射過程でのニュートリノ放射率を計算した。その際、核物質の縮退が強い場合と弱い場合のそれぞれにつき、one-pion exchange レベルでの摂動計算による放射率に対して、核子間相関の影響を考慮するようにパイ中間子の質量と結合定数を修正し、さらに核子の有効質量の効果を考慮した。その結果、高密度核物質においては、核子の有効質量の影響が大きいことが判明した(図 5)。このため、今後は、既存の超新星シミュレーションコードの核子制動放射ニュートリノ反応率に、各状態方程式から得られる核子の有効質量を反映する必要があることがわかった。

(4) 化学進化に関して辻本らは、現在の地球ニュートリノ量を決めているウランとトリウムの含有量が銀河系での平均的な値と比べおよそ 20-30%程度少ない原因について、太陽系が現在の場所ではなく銀河中心近くで生まれ、その場所での銀河系の化学進化を反映した結果であることを明らかにした。また、ウランやトリウムなどの r 過程元素の起源天体候補は中性子星合体と重力崩壊型超新星に絞られるが、この両者の存在が不可欠であり、それらがほぼ等しい割合で太陽系(地球)に内在する r 過程元素を生み出したことを明らかにした。銀河系の異なる銀河構造成分における化学進化計算に基づき星形成環境に依存した超新星頻度とブラックホール形成頻度の評価を行い、グローバルな宇宙化学進化、宇宙星形成史の計算へと駒を進め、宇宙全体における超新星及びブラックホール形成の頻度史を解明した。これらの結果が、前述の超新星背景ニュートリノの理論予測に応用されたものである。地球ニュートリノに関しては、鈴木が新学術領域「冥王代生命学」の丸山・戎崎らと議論を進め、地球の大陸三層モデルに基づいて、さまざまなウラン・トリウム分布を想定して各地の地球ニュートリノ量を計算し、KamLAND などの観測結果との整合性を調べた。さらに鈴木らは、種族合成計算を用いて、化学進化と超新星背景ニュートリノを統一的に議論するプラットフォームの開発を進めた。具体的には Hurley らの種族合成計算コード SSE/BSE に、CO コアの情報とコアの重力崩壊や超新星爆発を関連付けるルーチンの開発・追加などを進めた。その際、大質量星コアの重力崩壊に関する Mueller モデルを用いて、放出される超新星ニュートリノの量や形成される中性子星やブラックホールの質量を見積もった。

#### <引用文献>

Shoichi Yamada, Hiroki Nagakura, Ryuichiro Akaho, Akira Harada, Shun Furusawa, Wakana Iwakami, Hirotsada Okawa, Hideo Matsufuru, Kohsuke Sumiyoshi, Physical mechanism of core-collapse supernovae that neutrinos drive, Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and biological sciences 100(3), 2024, 190-233.

Ken'ichiro Nakazato, Fumi Nakanishi, Masayuki Harada, Yusuke Koshio, Yudai Suwa, Kohsuke Sumiyoshi, Akira Harada, Masamitsu Mori, Roger A. Wendell, Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. II. Impact of the Nuclear Equation of State, The Astrophysical Journal, 925, 2022, 98.

Ashida Yosuke, Nakazato Ken'ichiro, Tsujimoto Takuji, Diffuse Neutrino Flux Based on the Rates of Core-collapse Supernovae and Black Hole Formation Deduced from a Novel Galactic Chemical Evolution Model", The Astrophysical Journal 953, 2023, 151.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計52件（うち査読付論文 52件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 35件）

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Akaho Ryuichiro, Liu Jiabao, Nagakura Hiroki, Zaizen Masamichi, Yamada Shoichi  | 4. 巻<br>109                 |
| 2. 論文標題<br>Collisional and fast neutrino flavor instabilities in two-dimensional core-collapse supernova simulation with Boltzmann neutrino transport | 5. 発行年<br>2024年             |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D   | 6. 最初と最後の頁<br>023012-1 ~ 14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevD.109.023012   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>YAMADA Shoichi, NAGAKURA Hiroki, AKAHO Ryuichiro, HARADA Akira, FURUSAWA Shun, IWAKAMI Wakana, OKAWA Hirotada, MATSUFURU Hideo, SUMIYOSHI Kohsuke | 4. 巻<br>100             |
| 2. 論文標題<br>Physical mechanism of core-collapse supernovae that neutrinos drive  | 5. 発行年<br>2024年         |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the Japan Academy, Series B  | 6. 最初と最後の頁<br>190 ~ 233 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2183/pjab.100.015  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Ashida Yosuke, Nakazato Ken'ichiro, Tsujimoto Takuji  | 4. 巻<br>953             |
| 2. 論文標題<br>Diffuse Neutrino Flux Based on the Rates of Core-collapse Supernovae and Black Hole Formation Deduced from a Novel Galactic Chemical Evolution Model | 5. 発行年<br>2023年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>151-1 ~ 9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ace3ba  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Iwakami Wakana, Harada Akira, Nagakura Hiroki, Akaho Ryuichiro, Okawa Hirotada, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi | 4. 巻<br>933                |
| 2. 論文標題<br>Principal-axis Analysis of the Eddington Tensor for the Early Post-bounce Phase of Rotational Core-collapse Supernovae                           | 5. 発行年<br>2022年            |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>91-1 ~ 91-21 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ac714b  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Sugiura Ken'ichi, Furusawa Shun, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi                         | 4. 巻<br>2022              |
| 2. 論文標題<br>Leptonic and semi-leptonic neutrino interactions with muons in proto-neutron star cooling | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>Progress of Theoretical and Experimental Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>113E01-1~51 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/ptep/ptac118   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Akaho Ryuichiro, Harada Akira, Nagakura Hiroki, Iwakami Wakana, Okawa Hirota, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi | 4. 巻<br>944           |
| 2. 論文標題<br>Protoneutron Star Convection Simulated with a New General Relativistic Boltzmann Neutrino Radiation Hydrodynamics Code                         | 5. 発行年<br>2023年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal   | 6. 最初と最後の頁<br>60-1~18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/acad76  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Tsujimoto T  | 4. 巻<br>518             |
| 2. 論文標題<br>From Galactic chemical evolution to cosmic supernova rates synchronized with core-collapse supernovae limited to the narrow progenitor mass range | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society  | 6. 最初と最後の頁<br>3475~3481 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1093/mnras/stac3351   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Nakazato Ken'ichiro, Nakanishi Fumi, Harada Masayuki, Koshio Yusuke, Suwa Yudai, Sumiyoshi Kohsuke, Harada Akira, Mori Masamitsu, Wendell Roger A. | 4. 巻<br>925           |
| 2. 論文標題<br>Observing Supernova Neutrino Light Curves with Super-Kamiokande. II. Impact of the Nuclear Equation of State                                      | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>98-1~16 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ac3ae2   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                        |
|--|------------------------|
| 1. 著者名<br>Akaho Ryuichiro, Harada Akira, Nagakura Hiroki, Sumiyoshi Kohsuke, Iwakami Wakana, Okawa Hirotda, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Yamada Shoichi | 4. 巻<br>909            |
| 2. 論文標題<br>Multidimensional Boltzmann Neutrino Transport Code in Full General Relativity for Core-collapse Simulations                                     | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>210-1~17 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/abe1bf   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する           |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Iwakami Wakana, Okawa Hirotda, Nagakura Hiroki, Harada Akira, Furusawa Shun, Sumiyoshi Kosuke, Matsufuru Hideo, Yamada Shoichi           | 4. 巻<br>903           |
| 2. 論文標題<br>Simulations of the Early Postbounce Phase of Core-collapse Supernovae in Three-dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>82-1~24 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/abb8cf   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Delfan Azari Milad, Yamada Shoichi, Morinaga Taiki, Iwakami Wakana, Okawa Hirotda, Nagakura Hiroki, Sumiyoshi Kohsuke                        | 4. 巻<br>99                |
| 2. 論文標題<br>Linear analysis of fast-pairwise collective neutrino oscillations in core-collapse supernovae based on the results of Boltzmann simulations | 5. 発行年<br>2019年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review D  | 6. 最初と最後の頁<br>103011-1~25 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevD.99.103011   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Nakazato Ken'ichiro, Suzuki Hideyuki   | 4. 巻<br>891           |
| 2. 論文標題<br>A New Approach to the Mass and Radius of Neutron Stars with Supernova Neutrinos | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>156-1~5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ab7456                                       | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |



[学会発表] 計163件(うち招待講演 12件/うち国際学会 38件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>S. Yamada   |
| 2. 発表標題<br>Boltzmann Simulations of CCSNe and their Applications to Neutrino-induced Flavor Conversions  |
| 3. 学会等名<br>International workshop "Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics" (UGAP2024) (招待講演)(国際学会) |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ken'ichiro Nakazato   |
| 2. 発表標題<br>Burst and Cosmic Background Neutrinos from Core-Collapse Supernovae   |
| 3. 学会等名<br>International workshop "Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics" (UGAP2024) (招待講演)(国際学会) |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Tsujimoto  |
| 2. 発表標題<br>Galactic and cosmic chemical evolutions, and their connection to neutrino astronomy   |
| 3. 学会等名<br>International workshop "Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics" (UGAP2024) (招待講演)(国際学会) |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鷹野正利, 富樫甫, 住吉光介                      |
| 2. 発表標題<br>核子間相関を考慮した核子制動放射による超新星物質からのニュートリノ放出率 |
| 3. 学会等名<br>物理学会2024春季大会                         |
| 4. 発表年<br>2024年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>岩上わかな                         |
| 2. 発表標題<br>三次元空間における重力崩壊型超新星のボルツマン輻射流体計算 |
| 3. 学会等名<br>天文学会2024年春季年会                 |
| 4. 発表年<br>2024年                          |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Liao Jinkun, 加藤ちなみ, 鈴木英之    |
| 2. 発表標題<br>原始中性子星外層における各ニュートリノ反応の影響の解析 |
| 3. 学会等名<br>天文学会2023年秋季年会               |
| 4. 発表年<br>2023年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ken'ichiro Nakazato  |
| 2. 発表標題<br>Long term behavior of supernova neutrino light curves  |
| 3. 学会等名<br>Workshop on Neutrino Interaction Measurements for Supernova Neutrino Detection (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>辻本拓司                          |
| 2. 発表標題<br>太陽系近傍データから迫るr過程元素の起源と進化       |
| 3. 学会等名<br>「中性子捕獲反応で迫る宇宙の元素合成」研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2023年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ken'ichiro Nakazato  |
| 2. 発表標題<br>Long term behavior of supernova neutrino light curves  |
| 3. 学会等名<br>Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (SNeGWv2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中里健一郎                           |
| 2. 発表標題<br>スーパーカミオカンデで見る超新星ニュートリノバーストの時間変動 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2021年秋季大会 (招待講演)          |
| 4. 発表年<br>2021年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shoichi Yamada  |
| 2. 発表標題<br>Fast Neutrino-Flavor Conversions in Core-Collapse Supernovae  |
| 3. 学会等名<br>International workshop "Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                                 |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名<br>中里健一郎, 鈴木英之          |
| 2. 発表標題<br>超新星ニュートリノと中性子星の質量・半径 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年秋季大会      |
| 4. 発表年<br>2019年                 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Supernova Neutrino Database  
<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>  
Supernova Relic Neutrino Background  
<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/srn/>

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                             | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                     | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 山田 章一<br><br>(Yamada Shoichi)<br><br>(80251403)       | 早稲田大学・理工学術院・教授<br><br><br>(32689)         |    |
| 研究分担者 | 鷹野 正利<br><br>(Takano Masatoshi)<br><br>(00257198)     | 早稲田大学・理工学術院・教授<br><br><br>(32689)         |    |
| 研究分担者 | 中里 健一郎<br><br>(Nakazato Ken'ichiro)<br><br>(80609347) | 九州大学・基幹教育院・准教授<br><br><br>(17102)         |    |
| 研究分担者 | 辻本 拓司<br><br>(Tsujimoto Takuji)<br><br>(10270456)     | 国立天文台・JASMINEプロジェクト・助教<br><br><br>(62616) |    |

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-------|--------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 富樫 甫<br><br>(Togashi Hajime)   |                       |    |
| 研究協力者 | 岩上 わかな<br><br>(Iwakami Wakana) |                       |    |

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2件

|   |                    |
|---|--------------------|
| 国際研究集会<br>"Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics" (UGAP2022) | 開催年<br>2022年～2022年 |
| 国際研究集会<br>The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave       | 開催年<br>2020年～2020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           |  |  |  |
|---------|-------------------|--|--|--|
| オーストラリア | 西オーストラリア大学        |  |  |  |
| 米国      | プリンストン大学          |  |  |  |
| 中国      | Nankai University |  |  |  |