

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01083

研究課題名（和文）大質量星の進化から中性子星またはブラックホール形成に至る多次元進化の総合的研究

研究課題名（英文）Comprehensive studies on the multidimensional evolution of massive stars to neutron stars and black holes

研究代表者

山田 章一（Yamada, Shoichi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80251403

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,980,000円

研究成果の概要（和文）：大質量星は一般に高速で自転している。本研究では、その自転が自らの準静的進化と重力崩壊及びその結果として形成される中性子星やブラックホールにどのような影響を及ぼすかを定量的に研究することを目指し、そのために必要となる数値計算上のツール開発とその応用を行った。具体的には、進化計算に適した独自の新しい定式化に基づき、回転平衡形状の進化シーケンスを数値的に求めるコードを構築し、白色矮星の進化計算に応用した。またそれとは別に、流体力学コード、ニュートリノ輸送コード、アインシュタイン方程式を解くコードを統合し、原始中性子星の冷却計算に応用し、対流と自転の影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、自転する恒星の進化計算は角度方向に平均をとった球対称モデルに基づいて行われてきた。しかし、基礎方程式が非線形であるため、平均の進化は進化の平均と一致しない。このため、平均を取らずに進化計算をすることが必要である。本研究では独自の定式化を行い、自転する恒星の進化計算を可能とするための基盤を確立した。また、大質量星が進化の最後に起こす重力崩壊と中性子星またはブラックホールの形成を人為的な仮定やモデルを用いることなく計算するための数値シミュレーションコードも開発し、原始中性子星の冷却段階等に応用し、対流と自転がニュートリノや重力波放射に与える影響を調べることに成功した。

研究成果の概要（英文）：Massive stars are rotating rapidly in general. We aim to investigate the effects of the rotation on the quasisteady evolutions as well as on the dynamics of gravitational collapse and formation of compact objects such as neutron stars and black holes. In this project we have developed some numerical tools needed to achieve this goal and applied them to some particular problems. More concretely, we have established an original formulation to numerically construct evolutionary sequences of rotational-equilibrium configurations and applied it to the evolution of rotational white dwarfs. On the other hand, we have integrated the general relativistic hydrodynamics code, neutrino transport code and Einstein-equation solver that we had built over the years for dynamical simulations and employed them for the studies of the roles of convection and rotation in the proto-neutron stars.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：超新星 中性子星 ブラックホール ニュートリノ 重力波 自転 対流 シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発は、太陽の約10倍以上の質量をもった大質量星がその進化の最後に起こす爆発現象である。コアの重力崩壊により始まり、外層の爆発と中性子星またはブラックホールの形成で終わる。長年の研究にもかかわらず、崩壊から爆発に至る機構の詳細は未だ完全には理解されていない。実際、計算機能力の向上を受け、世界の複数のグループがニュートリノ加熱機構により超新星爆発を得ることに成功したとする軸対称2次元あるいは3次元のシミュレーション結果を発表するようになったが、これらの計算にはニュートリノ輸送部分に正当化の困難な近似が残ったままになっていた。我々は世界で唯一ニュートリノ輸送計算の厳密化を選んだグループであった。

大質量星は一般に高速で自転しており、超新星爆発のダイナミクスとニュートリノ放射のいずれもがそれにより影響を受けることは明らかである。自転星の進化計算は超新星爆発の初期条件を与える重要なものであるが、恒星進化の計算は長年角度平均をとった1次元モデルに基づいて行われてきた。そこでは対流と自転は現象論的にしか扱われておらず、最大の不定要素であり続けていたが、対流については近年の3次元計算で較正が可能となりつつある。一方、自転の扱いについては大きな進展がなかった。ここにブレイクスルーをもたらすには、新たな発想に基づいた問題の再定式化が必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、形成時の質量が太陽の約10倍以上であるような大質量星が、準静的進化の後にコアの重力崩壊により超新星爆発を起こすかあるいはそれに失敗し、中性子星またはブラックホールを形成するに至るまでの一連の進化を、第一原理的計算と、それにより較正された物理モデルを組み込んだ現象論的計算とを組み合わせる事によって定量的に明らかにすることを目指す。まずはそのために必要な数値計算のための道具を、定式化も含めて整備・実装し、現実的な計算に適用する。特に、親星の進化においては、自転の影響を正しく考慮するため、従来の角度平均をとった1次元モデルにとってかわる、軸対称2次元力学平衡形状に基づく進化シークエンスの構築のための方法論を確立する。同じ手法は一般相対論化し、超新星爆発後の原始中性子星の冷却段階にも適用し、高速自転する原始中性子星の永年進化を計算できるようにする。それによりこの段階におけるニュートリノ放出の非等方性やニュートリノが放出するメモリーをもったデシヘルツ帯重力波についても定量的な評価を行い、将来実際にニュートリノや重力波の検出があった場合に核物質の状態方程式や親星の角運動量などに定量的な制限がつけられるようにする。

上述のように、多次元のシミュレーションにおけるニュートリノ輸送計算においては例外なく何らかの人為的な近似がなされている。我々のみがこれを取り除く方向に努力を行ってきた。本研究において、これまでに開発してきた流体力学コードおよび時空の一般相対論的進化を解くアインシュタインソルバーとの統合を一層進め、ブラックホール形成も含めた定量的計算ができるように改良を進める。これにより我々が以前球対称モデルで行ったブラックホール形成時のニュートリノ放射の定量的な計算を回転モデルに拡張し、ニュートリノ光度、エネルギースペクトルの時間変化と空間的非等方性などを明らかにすることを最終目標とする。

具体的には、上で述べたことに基づき主として以下の3課題に同時並行的に取り組んだ。研究課題1：自転を考慮した大質量星の準静的進化の計算を行うための数値計算法の確立、研究

課題2：コアの重力崩壊と超新星爆発における自転と一般相対論の影響の研究、研究課題3：自転する原始中性子星の準静的冷却。

### 3. 研究の方法

研究は我々が独自に開発を進めている数値コードを駆使して行った。上述の3つの主課題について用いた手法が異なるため、以下一つ一つ個別に説明する。

研究課題1：自転を考慮した大質量星の準静的進化の計算を行うための数値計算法の確立  
恒星進化は極めて長いタイムスケールでゆっくりと起こる。したがって、各瞬間には極めてよい近似で力学平衡にあるとしてよい。そこで、この永年の進化を、少しずつ変わる回転平衡形状のシーケンスで表すことが基本的なアイデアである。各平衡形状は数値的に求めることで行う。また、進化に伴う形状変化を正しく扱うため、我々が独自に開発したラグランジュ的定式化を用いる。そこでは、従来のようにあらかじめ与えられた座標上の定点で密度や温度を計算するのではなく、質量、(粒子あたりの)エントロピーと角運動量が与えられた流体素片が空間のどの位置で力学平衡に達するかを計算する。これらの物理量が流体素片に付随した保存量であることを用いるのである。恒星進化はエントロピーや角運動量が核融合や輸送現象によってゆっくりと変化することによって起こる。これらは本計算にとっては独立な外的要素であり、別途解くことを想定している。流体素片の位置を与える方程式は極めて非線形性が強く、通常のニュートン法では全く収束しない。そこで本研究には、我々がW4法と名付け過去数年間開発を続けてきた新たな多変数連立非線形代数方程式ソルバーを適用する。テスト計算では、エントロピーあるいは角運動量またはその両方を手で変えることにより、回転平衡形状の擬似進化シーケンスを求める。既に述べたように、恒星進化を引き起こす核融合と輻射及び対流によるエネルギーと角運動量の輸送は、ネットワーク方程式と各物理量の移流拡散方程式とを、上で求めた回転平衡形状を背景として数値的に解くことで別途計算することを想定している。輸送係数についても、混合長理論を盲目的に使うのではなく、3次元の流体力学シミュレーションをダイナミカルタイムスケールで行い、その結果に基づき校正したものをを用いる予定である。

研究課題2：コアの重力崩壊と超新星爆発における自転と一般相対論の影響の研究

この課題では、これまでに開発してきたボルツマンソルバー、アインシュタインソルバー、流体力学ソルバーを統合し、軸対称2次元の第1原理計算を行い、すでにニュートン近似で行った計算の結果と比較する。まず、アインシュタインソルバーと流体力学コードを統合し、中性子星が最大質量を超えてブラックホールに重力崩壊していく計算を行い、先行研究との比較を行い、(見かけの)事象の地平面の形成などが正しく追えていること、ハミルトニアンコンストレイントおよびモーメンタムコンストレイントが破れていないことなどを定量的に確認する。その後ボルツマンソルバーを統合し、40太陽質量の親星のコアの重力崩壊を我々の以前の計算と定量的に比較する。また、フルに一般相対論的重力を扱う代わりとなる手法として、物質分布の角度平均を取り球対称化したものに対して、共形平坦な球対称計量を求める方法の開発も同時に行う。これは、世界の他のグループが行なっている擬似ポテンシャルの方法を改良するもので、球対称の場合時空計量が厳密に共形平坦になることを利用している。一方、原始中性子星冷却段階に注目し、そこでの時空の変化が緩やかであることを用い、時空の発展は固定した上で、流体力学コードとボルツマンソルバーを統合したコードを用いて、原始中性子星内の対流の発達とニュートリノ放出への影響も定量的に調べる。さらに回転平衡状態にある原始中性子星に対するボルツマンソルバーだけを用いた計算も行い、自転がニュートリノ放出に及ぼす影響にも応用する。

研究課題3：自転する原始中性子星の準静的冷却

超新星爆発が成功した後、原始中性子星は1分間程度かけてニュートリノ放出により冷却し、通常の中性子星になる。この段階の研究はこれまで球対称を仮定したものに限られていた。ダイナミカルタイムスケールを大きく超えた計算が困難だったからである。この課題では、自転を考慮できるようにすることを目指し、ダイナミカルな計算ではなく、課題1同様に回転平衡解の系列を生成する方法をとる。ただし、この場合は一般相対論的重力を正しく扱うことが重要である。そのため、課題1のコードを一般相対論化する。基本的アイデアは同じだが、基礎方程式は大きく異なる。アインシュタイン方程式を同時に解くことが要求されるだけでなく、進化にそったシーケンスを求める必要があるからで、一般相対論的線形摂動理論を応用する。結果はより複雑な非線形方程式となるため、W4法の改良も行ない、ヤコビアン行列が収束計算中に特異になる場合にもその収束性が損なわれないような工夫を施す。また、計算時間を短縮するための工夫も行い、一連の進化シーケンスをリーズナブルな時間で計算できるようにする。

#### 4. 研究成果

ここでも各主課題ごとに成果を述べる。

##### 研究課題 1：自転を考慮した大質量星の準静的進化の計算を行うための数値計算法の確立

本課題は、恒星進化のタイムスケールでゆっくりと移り変わる回転平衡形状のシーケンスを数値的に求めることを目指している。解くべき方程式は、軸対称下での力の釣り合いの方程式と重力ポテンシャルを与えるポアソン方程式であるが、我々の定式化では与えられた質量および（粒子あたりの）エントロピーと角運動量をもった流体素片が空間のどこで力学平衡に達するかを全ての流体素片にわたって同時にこれらの式から数値的に決定する。具体的には、適当なレファレンス形状から、流体素片（数値計算ではラグランジュメッシュのセル）を繰り返し動かす、平衡形状に寄せていく(図 1)。ニュートン法では収束を得られないため、独自に開発した W4 法を用いた。その結果、ポリトロプ状態方程式を仮定したモデルで平衡形状を得ることに成功した(図 2)。この図では、無回転球対称から高速回転して大きく歪んだ構造に至る一連のシーケンスから取り出した代表例を 2 つ示しているが、実際にはその途中の形状が全て求まっていることに注意されたい。

このコードにおいて重要だと分かったことが 2 点ある。第一は、流体素片の移動に伴い生じるグリッド構造の歪みを適切に直す必要があることである。これはラグランジュ法の宿命で最初からわかっていたことであるが、グリッドの歪みに対処しないとそれが数値誤差を生み、結果としておかしな振動を伴うグリッドを生じてしまう(図 3)。また、保存則を破らないようにグリッドの補正を行うことが重要である。第二の重要な点は、重力ポテンシャルをできるだけ精度良く解くことが必要だという点である。そのため、重力計算はラグランジュメッシュではなく空間に固定されたオイラーメッシュを用い、その上でスペクトル法を用いるのが最もよいことを見出した。通常の計算と違い、仮に重力ポテンシャルの空間分布が同じでも、流体素片が移動するとそれが感じる重力は異なることにも注意が必要である。スペクトル法はメッシュ点での重力ポテンシャルの値を与えるのではなく、関数自体を与えるため、流体素片がいる場所での重力の値を計算するのにも適している。これらの改良を加えたところ、平衡形状への収束が得られるようになった。また得られた形状は、ポリトロプのようにバロトロピックな状態方程式では、角速度が回転軸からの距離だけに依存するいわゆる円柱状回転になること、またバロクリニックな場合には Bjerknes-Rosseland 則に従っていることも確認した。これらはラグランジュ法では極めて非自明なことである。完成したコードの最初の応用例として、高速自転する白色矮星の擬似的冷却計算を行なった。その際、(この場合は問題なく収束したので)グリッドの補正をわざと行わず、冷却に伴い白色矮星が収縮するにつれ流体素片がどのように移動しているかを明らかにした(図 4)。現在はより現実的な状態方程式と冷却率に基づいた計算を行なっている。また、計算精度を上げるため、星を多層に分けて計算するようコードを改良中である。

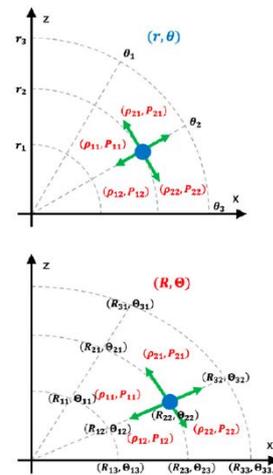


図 1. レファレンス形状と平衡形状

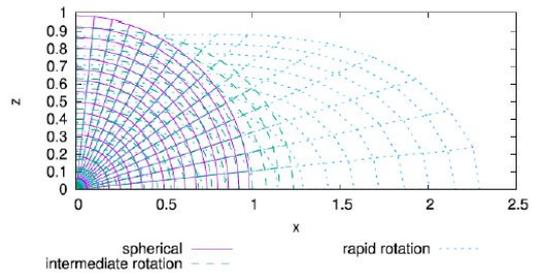


図 2. 回転形状の例

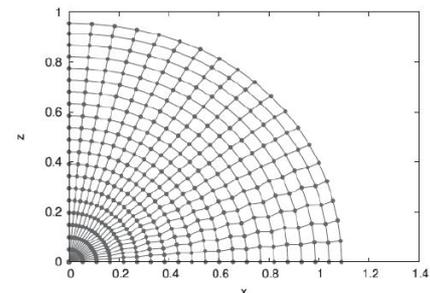


図 3. グリッド補正を行わなかった場合の結果

##### 研究課題 2：コアの重力崩壊と超新星爆発における自転と一般相対論の影響の研究

本課題は、軸対称 2 次元の第 1 原理計算を行い、超新星爆発のダイナミクスに対する一般相対論的重力と自転の影響を定量的に明らかにすることを目指している。まず、これまでに開発してきたボルツマンソルバー、アインシュタインソルバー、流体力学ソルバーを順次結合し、球対称を仮定した計算との比較を含むテストを行う予定であったが、結合したコードのテストを行なった際に当初予想しなかった不安定が正しその対処に予算の繰越を必要とする対処を行なった。初期条件の準備の仕方、星の外側に計算の都合上つける低密度のガスの扱い、計算メッシュの張り方など複合的な要因で起きた不安定であったが幸い解決を見た。

その後、まず一般相対論的流体力学コードとボルツマンソルバーを結合したコードのパフォーマンス

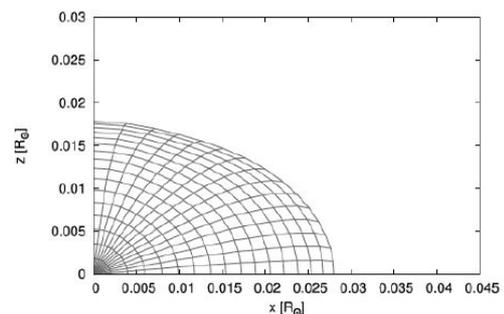


図 4. 高速自転する白色矮星の冷却

のテストも兼ねて、原始中性子星の冷却段階における対流の発達とそれがニュートリノ放射に与える影響を定量的に調べた。その結果、線形安定性解析が与える対流不安定領域に対流が生じ、非線形レジームに成長すると 100ms 程度で準定常状態に達することを見出した(図 5)。対流は主に electron fraction  $Y_e$  の負勾配によって引き起こされ、その負勾配はニュートリノ放出により維持されることが分かった。また、この準定常状態におけるニュートリノ放出は、光度・平均エネルギーとともに球対称のそれらよりかなり高くなることが分かった。また、我々のボルツマンソルバーは位相空間におけるニュートリノの分布関数を求めるので、運動量空間におけるニュートリノの角度分布を空間各点で時々刻々と得ることができる。その結果、昨今多くの興味をひいているニュートリノ自身によるニュートリノフレーバーの高速変換が起こるかどうかが、近似モデルなしに判定することが可能である。そうした解析を本計算に適用した結果、高速変換が赤道面付近を除いた広い領域で起こりうることを定量的に示した。

近年この高速フレーバー変換に加え、相互作用に起因するフレーバー変換(collisional flavor conversion)も多くの興味を集めている。我々のボルツマン輻射流体コード(このケースでは一般相対論は無視している)による軸対称 2 次元の超新星シミュレーションは高速変換と衝突によるフレーバー変換を同時に調べるのに適している。そこで、これを 11.2 太陽質量親星モデルを用いたシミュレーション結果に行った。その結果、どちらのモードのフレーバー変換もコア内の広い領域で起こる可能性を示した。ただし衝突起源のフレーバー変換の方がコアの深部、すなわちニュートリノ球に近い領域で起こり、高速変換はより外部で起こることがわかった(図 6)。一方、衝突起源のフレーバー変換には共鳴現象があることが分かっているが、2 次元モデルではこれが起こる可能性もあることも示した。

この他、物質分布を球対称化して共形平坦な近似時空計量を用いた 2 次元および 3 次元シミュレーションを現在進めている。また、アインシュタインソルバーを結合した完全一般相対論シミュレーションを 40 太陽質量の親星に対して行い、我々が有する球対称コードによる計算結果との定量的比較も鋭意進めているところである。

### 研究課題 3 : 自転する原始中性子星の準静的冷却

この課題では原始中性子星が 1 分間程度かけてニュートリノ放出により冷却し、通常の中性子星になるまでの進化を、自転を考慮して計算することを目指している。基本的に課題 1 と同じアイデアの計算手法だが、アインシュタイン方程式も解く点が大きく異なる点である。当初収束が極めて困難であったが、ヤコビアン行列が特異になっても問題を起こさないような独自の改良を W4 法に施したところ、収束が改善され平衡形状が得られるようになった。また、演算量を劇的に減らす工夫も行い、現実的に使いものになる速さで計算ができるコードが完成した。テスト計算では、原始中性子星が冷却するだけでなく、物質降着で質量が減るシーケンスや逆に星風で質量を減らしていくようなシーケンスも得ることに成功した。現在は、ニュートリノ放出による冷却をより現実的に扱うため、M1-closure による打ち切りモーメント法を用いた近似的ニュートリノ輸送コードの開発とテスト計算を進めている。

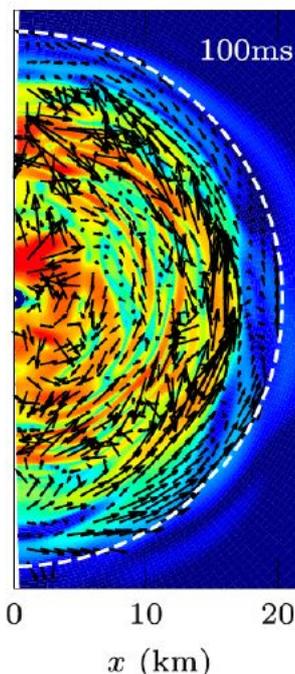


図 5. 原始中性子星内の対流

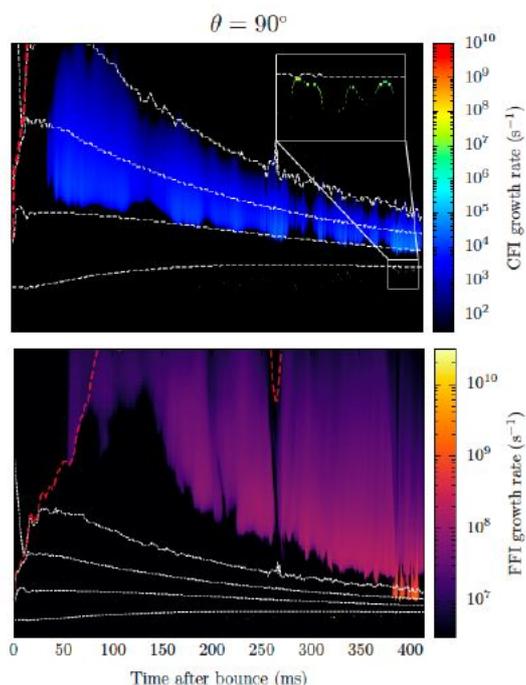


図 6. 衝突起源(上)と高速(下)フレーバー変換

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Iwakami Wakana, Harada Akira, Nagakura Hiroki, Akaho Ryuichiro, Okawa Hirotda, 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 Fu Lei, Yamada Shoichi	4. 巻 105
2. 論文標題 Gravitational wave signals in the deci-Hz range from neutrinos during the protoneutron star cooling phase	5. 発行年 2022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.105.123028	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 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 -
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 Okawa Hirotda, Fujisawa Kotaro, Yamamoto Yu, Hirai Ryosuke, Yasutake Nobutoshi, Nagakura Hiroki, Yamada Shoichi	4. 巻 183
2. 論文標題 The W4 method: A new multi-dimensional root-finding scheme for nonlinear systems of equations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Numerical Mathematics	6. 最初と最後の頁 157 ~ 172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apnum.2022.08.019	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 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 Okawa Hirotada, Fujisawa Kotaro, Yasutake Nobutoshi, Ogata Misa, Yamamoto Yu, Yamada Shoichi	4. 巻 520
2. 論文標題 A novel Lagrangian formulation to construct relativistic rotating stars: towards its application to their evolution calculations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 24 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad075	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 Ogata Misa, Okawa Hirotada, Fujisawa Kotaro, Yasutake Nobutoshi, Yamamoto Yu, Yamada Shoichi	4. 巻 521
2. 論文標題 A Lagrangian construction of rotating star models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2561 ~ 2576
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad647	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 YAMADA Shoichi, NAGAKURA Hiroki, AKAHO Ryuichiro, HARADA Akira, FURUSAWA Shun, IWAKAMI Wakana, OKAWA Hirotda, 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, Liu Jiabao, Nagakura Hiroki, Zaizen Masamichi, Yamada Shoichi	4. 巻 109
2. 論文標題 Collisional and fast neutrino flavor instabilities in two-dimensional core-collapse supernova simulation with Boltzmann neutrino transport	5. 発行年 2024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.109.023012	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 Liu Jiabao, Akaho Ryuichiro, Ito Akira, Nagakura Hiroki, Zaizen Masamichi, Yamada Shoichi	4. 巻 108
2. 論文標題 Universality of the neutrino collisional flavor instability in core-collapse supernovae	5. 発行年 2023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.108.123024	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 Liu Jiabao, Zaizen Masamichi, Yamada Shoichi	4. 巻 107
2. 論文標題 Systematic study of the resonancelike structure in the collisional flavor instability of neutrinos	5. 発行年 2023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.107.123011	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 Tomoda Hiroko, Yamada Shoichi	4. 巻 2023
2. 論文標題 Quantum mechanical calculations of synchro-curvature radiations: maser possibility	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	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) 10.1093/ptep/ptad056	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33件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Akira Harada, Hiroki Nagakura, Ryuichiro Akaho, Shun Furusawa, Hideo Matsufuru, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada,
2. 発表標題 "A Simulation of Core-collapse Supernovae in Three-dimensional Space with Full Boltzmann Neutrino Transport on the Supercomputer FUGAKU",
3. 学会等名 Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩上わかな, 滝脇知也, 中村航, 諏訪雄大, 固武慶, 原田了, 大川博督, 長倉洋樹, 赤穂龍一郎, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一,
2. 発表標題 "重力崩壊型超新星の三次元数値計算の現状",
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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryuichiro Akaho, Akira Harada, Hiroki Nagakura, Wakana Iwakami, Hirotada Okawa, Shun Furusawa, Hideo Matsufuru, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada
2. 発表標題 "Core-collapse Supernova Simulation with Boltzmann Neutrino Transport "
3. 学会等名 Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2022) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小形美沙、大川博督、藤澤幸太郎、安武伸俊、山田章一
2. 発表標題 「回転する白色矮星の擬似的進化計算」
3. 学会等名 天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田了、山田章一、大川博督、岩上わかな、赤穂龍一郎、長倉洋樹、住吉光介、古澤峻、松 古栄夫
2. 発表標題 「星の重力崩壊計算のための一般相対論的ボ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 Harada, A., Nagakura, H., Yamada, S.
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 Hirotada Okawa, Kotaro Fujisawa, Nobutoshi Yasutake, Misa Ogata, Yu Yamamoto, Shoichi Yamada
2. 発表標題 "A novel formulation for the evolution of relativistic rotating stars"
3. 学会等名 23rd International Conference on General Relativity and Gravitation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤澤幸太郎、大川博督、安武伸俊、小形美沙、山田章一、
2. 発表標題 「任意の角速度分布を持つ一般相対論的回転星の新しい平衡形状」
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 Kotaro Fujisawa, Shota Kisaka, Yasufumi Kojima, Hirotada Okawa, Misa Ogata, Nobutoshi Yasutake, Shoichi Yamada
2. 発表標題 "A magnetically confined mountain on a neutron star with multipole magnetic fields & GR rotating star with arbitrary rotation law"
3. 学会等名 Symposium on Gravitational wave physics and astronomy (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤侃、山田章一
2. 発表標題 "ニュートリノ核子散乱を考慮した熱化に対する影響 "
3. 学会等名 第9回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤侃、山田章一
2. 発表標題 "ニュートリノ核子散乱の熱化に対する影響について"
3. 学会等名 研究会「中性子星・超新星におけるニュートリノ・原子核物理」, Remaining issues of neutrino, nuclear physics in neutron star & supernovae,
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田章一
2. 発表標題 " (my personal) Assessment of the Current Status of CCSN Research and Challenges Ahead "
3. 学会等名 第34回理論懇シンポジウム「挑戦的アイデアで広げる宇宙物理の可能性」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大川博督、藤澤幸太郎、安武伸俊、小形美沙、山本佑、山田章一
2. 発表標題 " ラグランジュ描像における相対論的回転星の進化 "
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryuichiro Akaho, Akira Harada, Hiroki Nagakura, Laura Barrio, Shoichi Yamada
2. 発表標題 "Protoneutron Star Cooling with Boltzmann Neutrino Transport"
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤穂龍一郎、原田了、長倉洋樹、岩上わかな、大川博督、古澤峻、松古 栄夫、住吉光介、山田章一
2. 発表標題 「ボルツマンニュートリノ輻射流体コードによる原始中性子星冷却計算及び今後 のコード開発の展望」
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」第8回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩上わかな, 原田了, 長倉洋樹, 大川博督, 赤穂龍一郎, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一,
2. 発表標題 "重力崩壊型超新星のボルツマン方程式によるニュートリノ輻射流体計算"
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」2021年領域研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩上わかな, 大川博督, 長倉洋樹, 原田了, 赤穂龍一郎, 古澤峻, 松古栄夫, 住吉光介, 山田章一,
2. 発表標題 "Core-Collapse Supernovae Simulations by Boltzmann-Hydro Code",
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021, 計算科学が拓く宇宙の構造形成・進化から惑星表層環境変動まで
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Harada, A., Nagakura, H., Iwakami, W., Okawa, H., Yamada, S., Furusawa, S., Matsufuru, H., and Sumiyoshi, K.,
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 原田 了、長倉 洋樹、山田 章一、岩上 わかな、大川 博督、古澤 峻、松古 栄夫、住吉 光介、
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 2021年

1. 発表者名 原田 了、長倉 洋樹、岩上 わかな、大川 博督、山田 章一、古澤 峻、松古 栄夫、住吉 光介
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 Harada, A., Nagakura, H., Yamada, S.
2. 発表標題 “Possible collective neutrino oscillation in a rotating supernova ”
3. 学会等名 nuclear burning in massive stars -- towards the formation of binary black holes --, (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田 了、長倉 洋樹、山田 章一、岩上 わかな、大川 博督、古澤 峻、松古 栄夫、住吉 光介、
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34回 理論懇シンポジウム「挑戦的アイデアで広げる宇宙物理の可能性」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田 了、長倉 洋樹、山田 章一、岩上 わかな、大川 博督、古澤 峻、松古 栄夫、住吉 光介、
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 高エネルギー宇宙物理学研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田章一
2. 発表標題 Boltzmann Simulations of CCSNe and their Applications to Neutrino-induced Flavor Conversions
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」領域国際会議（招待講演）（国際学会）（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Fan Wu
2. 発表標題 Linear stability of astrophysical jets meant for magnetized core-collapse supernovae
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小形美沙
2. 発表標題 2次元平衡形状モデルを使用した高速回転する白色矮星の冷却進化
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 岩上わかな
2. 発表標題 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 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤侃
2. 発表標題 超新星爆発におけるニュートリノ核子散乱の影響
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 伊藤侃
2. 発表標題 反跳を考慮したニュートリノ核子散乱を計算するコードの開発
3. 学会等名 第十回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤侃
2. 発表標題 Neutrino Nucleon Scattering for the Boltzmann neutrino transfer
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」領域国際会議（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 赤穂龍一郎
2. 発表標題 超新星のボルツマン輻射輸送計算におけるニュートリノ集団振動の系統的解析
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤穂龍一郎
2. 発表標題 一般相対論的ボルツマン輻射流体コードによる超新星爆発計算
3. 学会等名 第十回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 赤穂龍一郎
2. 発表標題 General Relativistic Boltzmann Neutrino Transport Simulation of Core-collapse Supernova
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」領域国際会議（国際学会）
4. 発表年 2024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
---------------------------	-----------------------	----

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