

令和 3 年 5 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23435

研究課題名（和文）超新星の一般相対論的ボルツマン輻射流体計算によるマルチメッセンジャー天文学

研究課題名（英文）The multi-messenger astronomy with the core-collapse supernova simulations by the general relativistic Boltzmann-radiation-hydrodynamics code

研究代表者

原田 了 (Harada, Akira)

東京大学・宇宙線研究所・特任研究員

研究者番号：80844795

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においては、一般相対論的ボルツマン輻射流体コードの重要な部品であるボルツマンモジュールと流体力学モジュールの一般相対論化に成功した。ボルツマンモジュールは一般相対論的效果を考慮したニュートリノ輸送が正しく解けていることを確認し論文として発表し、流体力学モジュールは基本的なテストに関しては正しく解けていることを確認した。定式化に難航したが、一般相対論的超新星計算の準備までは整えたことになる。一般相対論的計算の比較のための非相対論的計算も進め、高密度物質の性質の理論モデルの違いが爆発にもたらす影響について新しい観点を提案したほか、星の自転がニュートリノ輸送におよぼす影響についても議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は世界で最も洗練された超新星爆発シミュレーションを行うものであり、超新星爆発のメカニズムに大きく迫る準備を整えた。さらに、比較のために実行していたシミュレーションから得られた知見も他の研究グループでは得ることが難しいものであり、原子核分野や素粒子分野の観点からも興味深い学際的なものである。加えて本研究で得られるデータは莫大なもので、これを解析する技術は現代のビッグデータ社会を支える技術、例えば機械学習技術等にも貢献する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The general relativistic (GR) version of the Boltzmann and hydrodynamics modules which are essential components of the GR Boltzmann-radiation-hydrodynamics code has been successfully developed. The GR Boltzmann module proved to be able to solve GR transport of neutrinos, and this is reported in a published paper. The GR hydrodynamics module proved to be able to solve some basic problems. Although it took time to choose the appropriate formulations, the preparation for the GR Boltzmann-radiation-hydrodynamics simulation is almost completed. The non-relativistic simulations for the comparison are also conducted. I pointed out a new point of view to understand the influence of the theoretical models of very-high-density matter. I also discussed the effects of the stellar rotation on neutrino transport.

研究分野：高エネルギー宇宙物理理論

キーワード：重力崩壊型超新星爆発 ニュートリノ 輻射流体計算 一般相対論

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発とは、大質量星の最期の爆発現象である。大質量星の鉄コアは進化の最後に重力崩壊を起こし、それで解放された重力エネルギーによって外層が吹き飛ばされる。その具体的なメカニズムは長年の謎である。重力崩壊後、中心が核密度になると核力の反発で外向きに進む衝撃波が形成され、これが星表面に到達することで外層が吹き飛ばされる。しかし、この衝撃波は途中でエネルギーを失い停滞する。その伝搬を復活させるメカニズムは長年解明されていない。現在の主流仮説は、中心に形成される原始中性子星から放射されるニュートリノが衝撃波にエネルギーを与えて復活させる、というニュートリノ加熱メカニズムである。しかしながら、超新星をモデル化するには核物質状態方程式やその他の理論的な不定性がある。多くの研究者が各自のモデルで数値シミュレーションを行っているが、誰も観測された爆発を再現できていない。加えて、ほぼ全ての研究者はニュートリノ輸送や一般相対論的重力という理論的な不定性のない部分も、計算コスト削減のために精度が不明な近似を課しており、それが爆発に与える影響も不明である。

また、近年ニュートリノ検出器や重力波検出器が稼働し始め、電磁波以外の信号から天体現象を調べるマルチメッセンジャー天文学が興隆している。重力崩壊型超新星爆発はニュートリノと重力波の両方を放射するため、この新たな天文学の格好のターゲットである。特に、これらの信号は衝撃波復活の要となる星の中心から放射されるため、爆発メカニズムを調べる上で有力な手がかりとなる。

2. 研究の目的

超新星からのニュートリノ・重力波信号はこれまでも調べられてきたが、そうした研究の中でニュートリノ輸送・重力は方程式レベルの近似を施している。この近似は爆発メカニズムのみならず信号にも影響を与える可能性がある。それゆえ、本研究の目的は、ニュートリノ輸送・重力ともに近似を用いない一般相対論的ボルツマン輻射流体コードを開発し、そこから信頼できるニュートリノ・重力波信号の理論予測を得ることである。

3. 研究の方法

本研究ではコードを開発して複数の核物質状態方程式を用いたシミュレーションを行うことで、ニュートリノ・重力波信号の特徴と状態方程式の特性の関係を明らかにする。具体的には、コード開発と実際の計算に分けて以下のように研究を進める。

コードの開発に関して、一般相対論的でないボルツマン輻射流体コードは既に開発済みであり、ニュートリノ輸送のボルツマンモジュールと流体力学モジュールからなっている。さらに重力部分である数値相対論モジュールも独立した部品として開発済みである。本研究では、これらの部分を整備・結合していくことで開発する。まずはボルツマンモジュールを一般相対論に対応するよう改造し、次に流体力学モジュールを一般相対論化する。続けて数値相対論モジュールを並列化し、これらを結合する。最後に完成したコードを高効率に並列計算できるようチューニングを行う。

完成した一般相対論的ボルツマン輻射流体コードを用いて、軸対称超新星爆発シミュレーションを実行する。複数の核物質状態方程式を用いたシミュレーションを行い、それぞれの結果から観測されるニュートリノ信号や重力波信号を予言する。さらにそれらの信号の比較から、状態方程式の特性が信号のどの特徴に反映されるかを同定する。

4. 研究成果

本研究を通じて、まずボルツマンモジュールの一般相対論化に成功した。この一般相対論化に関しては定式化の方法を複数考案し、それぞれの利点と欠点を比較検討した結果、計算精度は多少落ちつつも並列化効率と他のモジュールと結合する際の拡張性に秀でる定式化を採用した。実際、これで犠牲となる計算精度は微々たるものであり、事実上問題はないことを確認した。

開発した一般相対論的ボルツマンモジュールをテストするために、まず運動量空間の移流テストを行った。一般相対論においては、強重力の効果でニュートリノのエネルギーが低下する赤方偏移と運動方向が変化する重力レンズ効果が発生する。図1に示したのはそれらを調べた結果である。ここでは中心にブラックホールを配置した球対称問題を考えた。半径20 kmの地点からニュートリノを放射すると、半径40 kmの地点での運動量分布は常微分方程式により十分高精度に求められる。これとシミュレーション結果を比較すると、真の解を精度良く再現できていた。

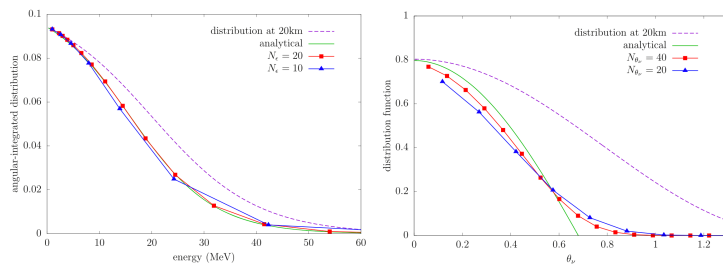


図1 一般相対論的ボルツマンモジュールの運動量移流テスト
紫破線がニュートリノ放射地点での分布、緑実線が測定地点での分布、赤及び青のシンボルと実線は解像度を変えた2つのシミュレーション結果を表す。左図は赤方偏移、右図は重力レンズ効果のテストであり、両者真の解をよく再現している。Akaho et al. (2021) Figure 9より引用。

また、図2にあるように、重力レンズ効果によって実際にニュートリノの光線が曲げられる様子も確認できた。ここでは軸対称二次元問題を考えた。再び中心にブラックホールを配置し、ある地点から動径方向とは垂直にニュートリノの光線を発射したところ、重力レンズ効果によって測地線にそって曲げられている。数値的な原因による拡散もここでは見られるが、実際の超新星シミュレーションに応用する際にはこの拡散は大きな問題にはならない。

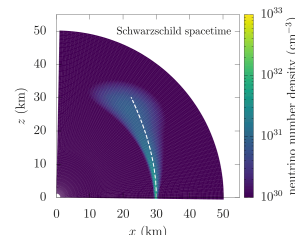


図2 重力レンズ効果のテスト
色でニュートリノの数密度を表し、白破線でニュートリノが沿うべき測地線を示す。数値的な拡散はあるが、ニュートリノは測地線に正しく従っている。Akaho et al. (2021) Figure 10より引用。

以上のように、一般相対論的ボルツマンモジュールの開発に成功し、精度良くニュートリノ輸送を解けることを確認した。この結果は論文としてまとめ、Astrophysical Journal誌にて掲載されている。

本研究の成果の2つ目は、流体力学モジュールの一般相対論化である。こちらでも定式化の方法は複数存在するが、試行錯誤の結果、超新星計算に適した定式化を見出した。先行研究において数値相対論モジュールには通常直交座標系が使われるため、対応して一般相対論的流体力学モジュールも直交座標系を使うことが多い。一方で本研究の超新星シミュレーションではボルツマンモジュールも数値相対論モジュールも球座標系を用いるため、一般相対論的流体力学モジュールも揃える必要があった。本研究を通して球座標系一般相対論的流体力学モジュールを開発することに成功し、基本的な問題を精度良く解けることを確認した。

本研究ではコード開発の段階で計画当初では想定できなかった問題が多く発生し、その対処に時間がかかった。実際の一般相対論的超新星計算にまでは進まなかったが、発生した問題に丁寧に対処することはシミュレーションを行う上では最も効率がよい進め方であるため、進展としては十分なものであった。本研究終了後も、これら一般相対論化したボルツマンモジュールと流体力学モジュールの結合作業を続けて一般相対論的な超新星爆発シミュレーションを行い、超新星ニュートリノ信号や重力波信号を計算する予定である。

本研究においては、一般相対論の影響を浮き彫りにするために、比較用の非相対論的な超新星シミュレーションも平行して進めた。その成果は二つあり、一つは、核物質状態方程式の影響の調査、もう一つは回転の影響の調査である。

核物質状態方程式の影響の調査に関しては、先行研究による定説とは異なる観点の重要性を見出した。ここでは、核力と組成の取り扱いに異なるモデルを用いる2つの核物質状態方程式を使ったシミュレーションの結果を比較・解析した。先行研究では、核力の取り扱いの違いが超新星爆発には大きく影響すると言われていたが、本研究ではむしろ組成の違いが大きな影響を与えている可能性を指摘した。さらに、これらのシミュレーションで放射されるニュートリノの性質、すなわちニュートリノ光度と平均エネルギーを調べた。これらはSuper-Kamiokande等のニュートリノ検出器での模擬観測データの生成等に利用することで、マルチメッセンジャー天文学の進展に寄与できる。この結果は論文にまとめ、Astrophysical Journal誌に掲載されている。今後、一般相対論的な強重力のもとではこれらの振る舞いがどう変わるかを調べる予定である。

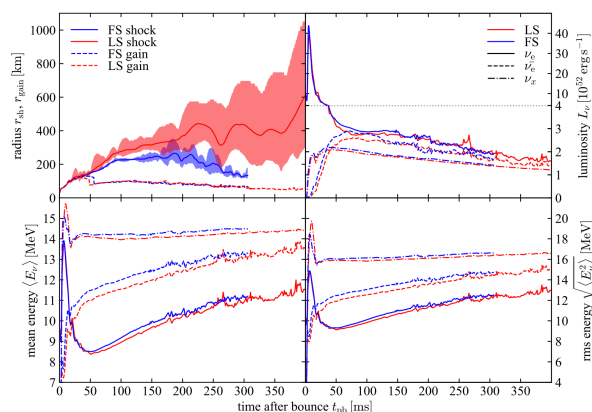


図3 核物質状態方程式の違う超新星シミュレーションにおける爆発の様子とニュートリノ信号
 左上図が衝撃波半径、右上図がニュートリノ光度、左下図がニュートリノ平均エネルギー、そして右下図がニュートリノエネルギーの自乗平均平方根の、それぞれ時間発展を表す。赤線と青線の違いは用いた状態方程式モデルの違いであり、赤のLSモデルは爆発したが青のFSモデルでは爆発しなかった。Harada et al. (2020) Figure 1 より引用。

回転の影響の調査に関しては、回転によって誘起されるニュートリノ集団振動不安定性を発見した。ここでは、親星に人工的に自転速度を加えて重力崩壊からコアバウンスを経て数百ミリ秒間の計算を進めた。図4にはバウンス後170ミリ秒における、ニュートリノ集団振動不安定性の線形成長率の空間分布を示している。ニュートリノ集団振動とは、ニュートリノ同士の相互作用によってニュートリノ振動が引き起こされる現象であり、振動の程度が小さいものとなれば支配方程式を線形化し、安定性解析の問題に帰着できる。このとき、線形不安定であれば振動の程度が指数関数的に成長し、顕著な集団振動現象が見られることになる。この線形成長率の計算にはニュートリノの運動量分布が必要なため、現状ボルツマンソルバーを用いる本研究でしか正確に取り扱うことができない。本研究では、回転の遠心力で物質が赤道方向に広がった構造になるため、そちらに進むニュートリノは物質と長時間相互作用することで、不安定な状況が実現することを見出した。この結果は現在論文にまとめており、近く論文誌に投稿予定である。一般相対論効果である重力レンズはニュートリノ集団振動の不安定性に影響する可能性があること、及び集団振動が起こるとニュートリノ信号にも影響することから、今後の一般相対論的超新星シミュレーション、およびそこからニュートリノ信号の計算で本シミュレーションとの比較を重点的に行う予定である。

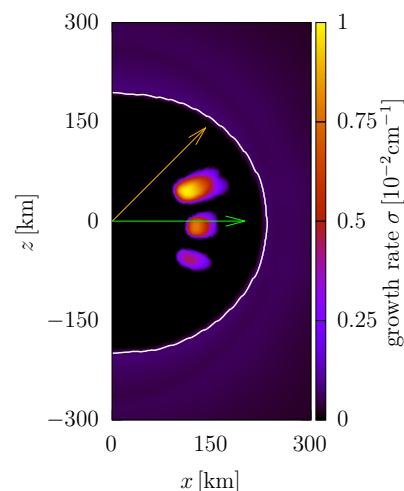


図4 ニュートリノ集団振動不安定性の線形成長率分布
 バウンス後170ミリ秒の時点での分布で、白線は衝撃波の位置、色が線形成長率を表している。緑矢印の赤道周辺方向では集団振動が起こるが、オレンジ矢印の赤道から離れた方向では集団振動が起こらない。

<引用文献>

Akaho et al., 2021, ApJ, 909, 210
 Harada et al., 2020, ApJ, 902, 150

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

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 無
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, 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 無
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, Iwakami Wakana, Okawa Hirotada, Furusawa Shun, Matsufuru Hideo, Sumiyoshi Kohsuke, Yamada Shoichi	4. 巻 31
2. 論文標題 Stellar Core-collapse Simulations with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics Code under Axisymmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011025 ~ 011025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.31.011025	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	4. 巻 1468
2. 論文標題 Neutrino distributions for a rotating core-collapse supernova with a Boltzmann-neutrino-transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012098 ~ 012098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012098	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23件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

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 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 Akira Harada
2. 発表標題 Recent Progress of the Core-collapse Supernova Simulations under axisymmetry with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics code
3. 学会等名 The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Supernova simulations with the Boltzmann Neutrino Transport (C02 theory report)
3. 学会等名 Joint symposium of MEXT innovative area x KONAN GAKUEN 100th Anniversary International Scientific Symposium Series Sponsored by The Hirao Taro Foundation of KONAN GAKUEN for Academic Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Boltzmann-radiation-hydrodynamics simulations of the stellar core-collapse under axisymmetry - status report of group C02 of GW-genesis- (part 2)
3. 学会等名 Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (4M-COCOS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Neutrino Distributions for a Rotating Core-collapse Supernova with a Boltzmann-neutrino-transport
3. 学会等名 TAUP2019 - 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Multi-dimensional core-collapse supernova simulations with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics code
3. 学会等名 MICRA2019 - Microphysics In Computational Relativistic Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Stellar core-collapse simulations with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics code under axisymmetry
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Harada
2. 発表標題 Neutrino Distributions for a Rotating Core-collapse Supernova with a Boltzmann-neutrino-transport
3. 学会等名 F.O.E. Fifty-One Erg 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星のボルツマン輻射流体計算で探る核物質状態方程式の影響
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星爆発のニュートリノ加熱メカニズム
3. 学会等名 第一回地下宇宙若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星爆発の軸対称ボルツマン輻射流体シミュレーション
3. 学会等名 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019)
4. 発表年 2019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軸対称超新星爆発シミュレーション
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 Core-collapse Supernova Simulations with the Boltzmann-radiation-hydrodynamics
3. 学会等名 宇宙線研究所共同利用小研究会「高エネルギー突発現象の多波長・多粒子観測と理論」
4. 発表年 2019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軸対称超新星爆発シミュレーション
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」第6回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田了
2. 発表標題 超新星のボルツマン輻射流体シミュレーションにおけるニュートリノ分布
3. 学会等名 第32回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム「天文学・宇宙物理学の変遷と新時代の幕開」
4. 発表年 2019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を用いた回転大質量星の重力崩壊計算 (hp180111)
3. 学会等名 第6回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会 優秀成果賞受賞課題による成果発表 (招待講演)
4. 発表年 2019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			
米国	Princeton University			