

令和 元年 5 月 21 日現在

機関番号：37111

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0173

研究課題名（和文）マルチメッセンジャー天文学から迫る高密度爆発天体現象の理論的解明（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Investigation of explosive stellar phenomena via multi-messenger observations (Fostering Joint International Research)

研究代表者

固武 慶 (Kotake, Kei)

福岡大学・理学部・教授

研究者番号：20435506

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,700,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：超新星を始めとする爆発天体現象からのマルチメッセンジャーシグナルの定量的予測に向け、シミュレーションコードにおけるニュートリノ反応のアップデートを行うことが喫緊の課題である。本国際共同研究を通して、ニュートリノ・核子反応における反跳の効果、ストレンジネスの効果、原子核への電子捕獲率などを始めとする最新のニュートリノ反応率を取り込むことが出来るようになった。さらに、このアップデートを行った多次元超新星シミュレーションを実行して、対流・衝撃波不安定性等の解析を行い、その成果を査読論文として出版することが出来た。さらに、世界の主たる超新星研究グループ間の数値コードの詳細比較を行うことが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、超新星爆発メカニズムの研究・並びにマルチメッセンジャー研究において、それぞれの研究グループが独立的にコード開発を行い、得られた結果の詳細な相互比較が行われることが極めて稀であった。本国際共同研究の受け入れ先であるマックスプランク研究所、更には他の超新星研究グループとも国際共同研究を行い、同じ初期条件を用いて、ショックの時間発展、ニュートリノ光度・平均エネルギーなど、爆発に影響にある物理量について比較検討を行い、良く一致する結果を得た。今回行った数値コードの比較は、今後の更なる多次元計算における比較へ向けた礎を与えるもので、学術的意義の高い成果である。

研究成果の概要（英文）：It has been a topic of major undertaking to update neutrino opacities in neutrino-radiation hydrodynamics code for understanding the explosion mechanism of massive stars via the multi-messenger prediction from such explosive stellar phenomena. Through the fostering joint project, I have succeeded in updating the neutrino opacities in the supernova code including recoil and weak magnetism, in-medium and strangeness contribution to neutrino-nucleon scattering, and electron capture rate on nuclei based on state-of-the-art shell model Monte-Carlo calculations. By performing multi-D supernova simulations with these updated neutrino opacities, I have investigated how these updates affect the explodability of massive stars based on the analysis of neutrino-driven convection and standing-accretion-shock instability, the result of which has been published. Furthermore, detailed comparison of the supernova code with ones from other international supernova research groups has been also conducted.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：超新星爆発 中性子星 ニュートリノ反応 重力波 輻射流体計算 スーパーコンピューティング 原子核反応 一般相対論

1. 研究開始当初の背景

大質量星の進化の最期に最も一般的に起こると考えられている(重力崩壊型)超新星は、宇宙の化学組成進化に重要な役割を果たすとともに、重力波・ニュートリノを用いた新たな天文学(マルチメッセンジャー天文学)の重要な観測対象になっている。しかし、その重力崩壊から爆発に至るメカニズムは、長きにわたる理論宇宙物理学の大きな謎である。

この謎を解明すべく、申請者らはこれまで超新星の空間3次元(3D)のニュートリノ輻射流体シミュレーションを先駆けて行いニュートリノ加熱爆発の開始の再現に成功している。海外の超新星研究グループも次々と3D超新星モデルを発表する中、「爆発を起こすシミュレーションモデルが作れない」という長年の問題は確実に解決に向かいつつある。一方で、国際的に各超新星研究グループ間で、同じ初期条件(親星など)を用いた数値シミュレーションを行いながらも、爆発の成否(爆発するか・しないか)や、爆発の開始時刻などが各シミュレーション結果に大きな相違があることが明らかになってきた。そのような状況の中、超新星研究グループ間の数値計算結果の詳細な比較を行う必要性・気運が高まってきた。

2. 研究の目的

上に述べた研究潮流の中、本研究課題の主たる目的は以下の3点であった。

- (1) 本課題で世界をリードするマックスプランク天体研究所の研究グループと国際共同研究を行うと同時に、他の超新星研究グループ(プリンストン大学、ストックホルム大・ミシガン州立大など)とも連携を取りながら、超新星シミュレーションコードの詳細な比較を行うこと。
- (2) 従来の超新星数値コードで単純化されていたニュートリノ反応率を最新の原子核・素粒子理論に基づくものにアップデートを行うこと。
- (3) これらのシミュレーションコードの洗練化と並行して、多次元シミュレーションによるマルチメッセンジャーシグナルの定量的予測を行うこと。

3. 研究の方法

上記の3点の研究目的のそれぞれに対して以下の研究方法を取った。

- (1) 同じ初期条件(20太陽質量モデル)、同じ状態方程式(SFH₀)、同じニュートリノ反応率セットを用いながら、ニュートリノ輻射流体コードは各グループで独立のものを用い、星の一次元球対称を仮定しながら、ニュートリノの平均エネルギー・光度、衝撃波の時間発展等、各超新星グループで得られた結果を詳細に比較する。
- (2) 原子核への電子捕獲率について簡略化されたモデルに基づくものが使われてきたが、最新のシェルモデル・モンテカルロ計算に基づく電子捕獲率(Juodagalivis et al. (2010), Nuclear Physics A)を用いるようアップデートする。結果、コアバウンス後から爆発開始に至るまでの動的進化において本質的な役割を果たす原始中性子星内のレプトン分率を定量的に決めることが可能になった。またニュートリノ荷電反応や、ニュートリノ・核子散乱における核子多体効果、反跳の効果等(Buras et al. (2006), A & A)は、ニュートリノ光度・平均エネルギーの定量的評価のために、取り入れることが必須である。特にこれらの反応では、散乱振幅の計算の際に、運動量移行に関する角度・エネルギーに関する多重積分が発生するため、計算コストが著しく増加する。これを回避するために、これらの反応をテーブル化することで計算の高速化に成功した。
- (3) 空間3次元の超新星シミュレーション結果に基づき、マルチメッセンジャーシグナルの定量的予測と観測可能性を精査すること。

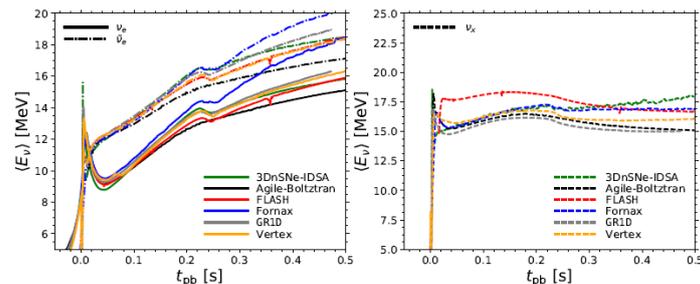
4. 研究成果

上記の3点の研究テーマ(1)-(3)について、それぞれ得られた研究成果を述べる。

(1) 超新星シミュレーションコードの詳細な比較

右図は、数値計算で超新星爆発を再現するときに鍵となる物理量の一つである、超新星

コアから放射されるニュートリノ平均エネルギーの時間発展を比較したものである(左パネルは電子型と反電子型ニュートリノ、右パネルはミュー、タウニュートリノを示す)。緑線(3DnSNe-IDSA)が申請者らの結果、Agile-Boltztran(黒線)がオークリッジグループの結果、FLASH(赤線)はシカゴ大、Fornax(青線)はプリンストン大、GR1D(黒線)はストックホルム大、Vertex(オレンジ)はマックスプランク研究所の計算結果である。一定の一定の分散はありつつ、3DnSNe-IDSAはボルツマン方程式を近似なしに解いた結果Agile-Boltztranと近い結果であり、更に、衝撃波の時間発展、ニュートリノ光度などでも各グループで良い一致をえて、その結果を国際共著・査読論



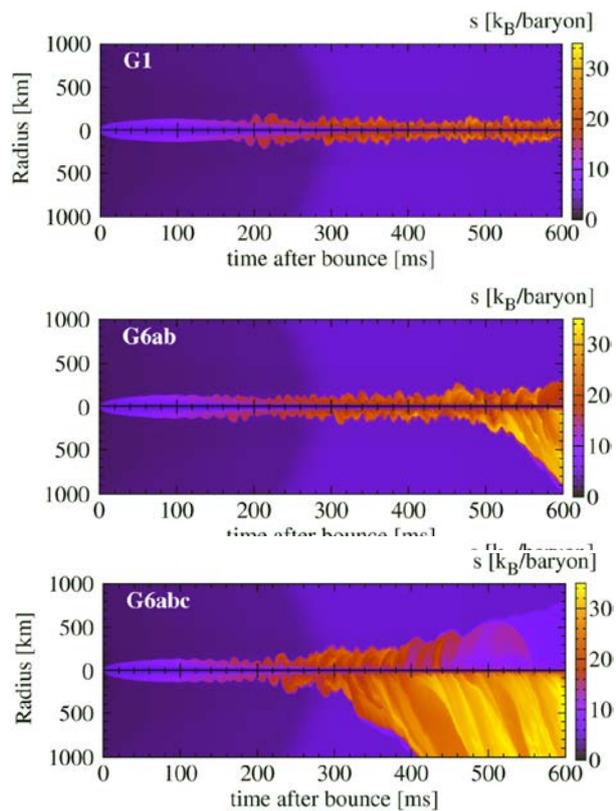
文として出版することが出来た (O' Connor et al. (2018), Journal of Physics G)。

(2) 超新星シミュレーションコードにおけるニュートリノ反応率の精緻化

右図の3つのパネルは、20太陽質量の星の超新星爆発のシミュレーションで、それぞれ衝撃波の星の南北方向への時間発展をエントロピーで色図けして表したものである。(北極方向が y 座標の正の方向、南極方向が負の方向、 x 座標がバウンス後の時間を示す)。上のパネルから、従来のニュートリノ反応率を使った場合 (G1 モデル)、ニュートリノ加熱反応に核子の相関を入れたもの (G6ab モデル)、一番下のパネルがストレンジネスの効果まですべて取り入れたフルセット (G6abc モデル) となっている。一般に核子・核子間の多体力やストレンジネスは、原始中性子星におけるニュートリノ透明度を下げるため、ニュートリノ光度が上がり、ニュートリノ加熱を助けるため、爆発 (パネル中の明るい部分) を助けるセンスに働くことを指摘することが出来た (Kotake et al. (2018), ApJ)。

(3) 超新星マルチメッセンジャーシグナルの定量的予測

超新星爆発のダイナミクスと重力波の放射機構を明らかにするために、スーパーコンピュータを駆使した大質量星 (15 太陽質量) の重力崩壊の大規模 3 次元 (3D) シミュレーションに基づき、その重力波シグナルを詳細に解析した (Hayama et al. MNRAS Letters, 2018)。その結果、爆発開始前の超新星コアで発達する様々な流体不安定性の発達の度合いが、重力波波形を特徴づけることを明らかにした。特に「SASI」と呼ばれる衝撃波のグローバルな変形が引き金となって生成される重力波が円偏光成分を持つことを指摘することができた。また、この SASI がニュートリノ放射領域 (ニュートリノ球) と原始中性子星表面付近に陥入するときに、それぞれニュートリノ・重力波シグナルに特徴的な時間変調を引き起こすことを明らかにした。更に、両シグナルの時間相関を取ること、ニュートリノ球と原始中性子星の距離に関する情報が得られることを世界に先駆けて指摘した (Kuroda et al. ApJ, (2017))。さらにこの結果を用い線形解析を行い、圧力 (p モード) や浮力起源 (g モード) の重力波に加え、新たに $w1$ モードの解析をした。この結果から、これらマルチモードの重力波の観測から、原始中性子星の質量と半径の情報を独立に取り出せる可能性を指摘することが出来た (Sotani et al. PRD, (2017))。さらにこの重力波のマルチモードを時間・周波数空間で峻別するために新たな解析法 (ウィグナーヴィレ解析) を提案することが出来た (Kawahara et al. (2018), ApJ)。また、ニュートリノシグナルに関しても国際共同研究を行い、空間 2 次元 (2D) のシミュレーションや空間一次元ながらボルツマンニュートリノ計算の結果に基づく解析を行い、コアバウンス時の中性子化バースト (Horiuchi et al, Journal of Physics G, (2017))、さらには、背景ニュートリノの情報 (Horiuchi et al. MNRAS, (2018)) からそれぞれ親星のコアの重力収縮度 (コンパクトネス) に関する制限が得られることを指摘できた。



5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Kotake Kei, Takiwaki Tomoya, Fischer Tobias, Nakamura Ko, Martinez-Pinedo Gabriel, "Impact of Neutrino Opacities on Core-collapse Supernova Simulations", The Astrophysical Journal, 853, 1~24, (2018), <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aaa716>
- ② Kuroda Takami, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya, Thielemann Friedrich-Karl, "A full general relativistic neutrino radiation-hydrodynamics simulation of a collapsing very massive star and the formation of a black hole" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 477, L80 ~ L84, (2018), <http://dx.doi.org/10.1093/mnrasl/sly059>
- ③ Hayama Kazuhiro, Kuroda Takami, Kotake Kei, Takiwaki Tomoya, "Circular polarization of gravitational waves from non-rotating supernova cores:

- a new probe into the pre-explosion hydrodynamics” , 477, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 477, L96~L100, (2018), <http://dx.doi.org/10.1093/mnrasl/sly055>
- ④ O’ Connor Evan, Bollig Robert, Burrows Adam, Couch Sean, Fischer Tobias, Janka Hans-Thomas, Kotake Kei, Lentz Eric J, Liebendoerfer Matthias, Messer O E Bronson, Mezzacappa Anthony, Takiwaki Tomoya, Vartanyan David, “Global comparison of core-collapse supernova simulations in spherical symmetry” , Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 45, 104001(21pp), (2018) , 1 <http://dx.doi.org/0.1088/1361-6471/aadeae>
 - ⑤ Masada Youhei , Kotake Kei , Takiwaki Tomoya , Yamamoto Naoki, “Chiral magnetohydrodynamic turbulence in core-collapse supernovae” , Physical Review D, 98, 083018(17pp), (2018) ,<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.98.083018>
 - ⑥ Kawahara Hajime, Kuroda Takami, Takiwaki Tomoya, Hayama Kazuhiro, Kotake Kei, “A Linear and Quadratic Time-Frequency Analysis of Gravitational Waves from Core-collapse Supernovae” , The Astrophysical Journal, 867, 126(13pp), (2018) <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aae57b>
 - ⑦ Sotani Hajime, Kuroda Takami, Takiwaki Tomoya, Kotake Kei, “Probing mass-radius relation of protoneutron stars from gravitational-wave asteroseismology” ,Physical Review D, 96, 063005 (10pp), (2017) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.96.063005>
 - ⑧ Horiuchi Shunsaku, Nakamura Ko, Takiwaki Tomoya, Kotake Kei, “Estimating the core compactness of massive stars with Galactic supernova neutrinos” , Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 44, 1~12, (2017) <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6471/aa8f1f>
 - ⑨ Kuroda Takami, Kotake Kei, Hayama Kazuhiro, Takiwaki Tomoya, ” Correlated Signatures of Gravitational-wave and Neutrino Emission in Three-dimensional General-relativistic Core-collapse Supernova Simulations” , The Astrophysical Journal, 851, 1~12, (2017), <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa988d>
 - ⑩ Eichler M, Nakamura K, Takiwaki T, Kuroda T, Kotake K, Hempel M, Cabezón R, Liebendoerfer M, Thielemann F-K, “Nucleosynthesis in 2D core-collapse supernovae of 11.2 and 17.0 Msun progenitors: implications for Mo and Ru production” ,Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 45, 014001~014042, (2017) <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6471/aa8891>
 - ⑪ Katsuda Satoru, Morii Mikio, Janka Hans-Thomas, Wongwathanarat Annap, Nakamura Ko, Kotake Kei, Mori Koji, Mueller Ewald, Takiwaki Tomoya, Tanaka Masaomi, Tominaga Nozomu, Tsunemi Hiroshi, ” Intermediate-mass Elements in Young Supernova Remnants Reveal Neutron Star Kicks by Asymmetric Explosions” , The Astrophysical Journal, 856, 1~18, (2018), <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aab092>
 - ⑫ Horiuchi Shunsaku, Sumiyoshi Kohsuke, Nakamura Ko, Fischer Tobias, Summa Alexander, Takiwaki Tomoya , Janka Hans-Thomas , Kotake Kei, “Diffuse supernova neutrino background from extensive core-collapse simulations of 8-100 Msun progenitors, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 475, (2017) <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx3271>
 - ⑬ Takiwaki Tomoya, Kotake Kei, “Anisotropic emission of neutrino and gravitational-wave signals from rapidly rotating core-collapse supernovae” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 475, L91~L95, (2018) <http://dx.doi.org/10.1093/mnrasl/sly008>

[学会発表] (計 11 件)

- ① Kei Kotake, “Neutrinos and multi-messenger signatures for a galactic supernova” , The 19th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino (NNN18) (招待講演) (国際学会) , 2018 年
- ② Kei Kotake, “Gravitational-wave and Neutrino Signatures from core-collapse supernovae” ,GW-genesis workshop on “Deciphering multi-dimensional nature of core-collapse supernovae via gravitational-wave and neutrino signatures” (SNeGWv2018) (招待講演) (国際学会) , 2018 年
- ③ Kei Kotake, “Gravitational-wave and neutrino signatures from core-collapse supernovae: review and perspectives” , Gamma-ray bursts and supernovae: from the central engines to the observers (招待講演) (国際学会) , 2018 年
- ④ Kei Kotake, “Neutrino and Gravitational-wave Signatures from Core-Collapse Supernovae” , Gravitational-waves, ElectroMagnetic and Dark-Matter, Physics

- (GEMMA2018) (招待講演) (国際学会), 2018年
- ⑤ Kei Kotake, “Exploding and Non-Exploding Core-Collapse Supernova Models in 3D and the Multi-messenger Analysis”, TDLI Workshop on the Exploding Universe (招待講演) (国際学会), 2018年
 - ⑥ 固武 慶, “超新星からのマルチメッセンジャー”, 第4回超新星ニュートリノ研究会 (招待講演) 2018年
 - ⑦ Kei Kotake, “Gravitational wave signatures from multi-dimensional core-collapse supernova models”, GPPAW2017 (招待講演) (国際学会), 2017年
 - ⑧ Kei Kotake, “Correlation and Directionality of Multimessenger Signals in 3D Core-Collapse Supernova Models”, Workshop on the Progenitor-Supernova-Remnant Connection (国際学会), 2017年
 - ⑨ Kei Kotake, “Gravitational-waves Signals from Core-collapse Supernovae”, Wuhan GW workshop (招待講演) (国際学会), 発表年, 2017年
 - ⑩ Kei Kotake, “Multi-Messenger Probes into the Multi-D Supernova Neutrino Mechanism”, CoCoNuT meeting (招待講演) (国際学会), 2017年
 - ⑪ Kei Kotake, “Status of Gravitational Wave Signatures of Core-Collapse Supernovae”, Workshop on Core Collapse Supernovae, their signatures in gravitational waves and their detection with ground-based laser interferometers (招待講演) (国際学会) 2017年

[図書] (計 1 件)

Kei Kotake and Takami Kuroda, “Gravitational waves from core-collapse supernovae” (24pp), Handbook of Supernovae, Springer International Publishing, (2017)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

研究協力者氏名: ハンストーマス, ヤンカ

ローマ字氏名: Hans-Thomas, Janka

所属研究機関名: マックスプランク研究所

部局名: 天体物理学研究所

職名: グループリーダー・教授

※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。