

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540296

研究課題名(和文) 多次元ニュートリノ輻射流体計算コードによる超新星爆発メカニズムの研究

研究課題名(英文) Explosion mechanism of supernovae by 3D neutrino-radiation hydrodynamics

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：超新星爆発は重たい星の最期に起こる重力崩壊により起こるが、その爆発メカニズムは長年に未解明である。爆発の鍵を握る加熱機構はニュートリノ(電子の仲間である素粒子)が発生・伝搬・消滅する過程を記述する必要がある。本研究ではニュートリノ粒子の分布発展を6次元空間ボルツマン方程式により解く輻射流体計算コードを世界で初めて開発して、重力崩壊から爆発ダイナミクスへの多次元計算を可能にした。特に、3次元空間でのニュートリノ輻射輸送の特性と爆発への影響を初めて解明した。

研究成果の概要(英文)：We developed a new numerical code to perform numerical simulation of core-collapse supernovae by 3D neutrino-radiation hydrodynamics. This code is constructed, for the first time in the world, using the Boltzmann equation in the full 6 dimensions. This novel code is an essential tool to study the mechanism of supernova explosions, which is the final fate of massive stars, via the neutrino heating mechanism. We enabled ones to describe neutrino creation, propagation and annihilation for the neutrino heating in 3D space without approximations previously used. We revealed the characteristics of neutrino transfer in 3D space and its influence on the explosions.

研究分野：原子核宇宙物理学

キーワード：超新星爆発 ニュートリノ 輻射輸送 原子核物理学 理論天文学 計算科学 核反応 核データ

1. 研究開始当初の背景

大質量星（太陽質量の10倍以上）の進化の最期におこる重力崩壊は、中心コアのバウンスを経て華々しい超新星爆発を起こすと考えられている。1987年の超新星ニュートリノ観測により、爆発の概略については理解が進んだが、具体的な爆発メカニズムの問題は未解決のままであった。

超新星爆発は、球対称から外れた例が天文観測でよく知られており、多次元における流体力学の振る舞いについては広く調べられてきている。ところがニュートリノ輻射輸送については、多次元計算はほとんど行われていなかった。3次元輻射輸送計算は、空間3次元+ニュートリノ運動量空間3次元の6次元の時間発展問題であり、計算規模が巨大で数値計算の手法も確立されていなかった。行われていたのは、球対称のもとでの詳細計算か、2次元流体+近似的な手法（拡散近似、光線近似）、3次元流体のみ、によるものであった。一方、計算機の性能向上により、多次元輻射輸送計算が可能な状況になりつつあり、世界に先駆けて多次元計算コードを開発することが急務であった。

研究代表者は、核物理データの整備と球対称における超新星爆発の系統的な数値シミュレーションにより、重力崩壊・爆発メカニズム・ニュートリノ放出について研究成果をあげていた。特に、核物質状態方程式の不定性を考慮しても、爆発が起きないことを初めて明らかにして、球対称の輻射流体計算を越えた手法が必要であることを示した。ここで判明したように爆発の鍵を握るニュートリノ加熱を正確に計算するためには、精密な多次元輻射輸送計算を流体計算に組み入れることが必要不可欠であった。

2. 研究の目的

爆発か否かを結論づける上での最大の課題はニュートリノ輻射輸送にある。超新星の中心コアではニュートリノが大量に発生してエネルギーを持ち去るが、その約1%が物質に吸収される。この時のニュートリノ加熱量が、爆発するか否かのギリギリの状況での引き金となっている。しかし、既存の計算ではこの点について明確な答えは得られていなかった。先行研究における不定性は、ニュートリノ輻射輸送の厳密計算が球対称のもとでのみ行われてきたことにある。この現状を打破して、ニュートリノ輻射輸送計算を空間3次元で実行可能にすることで、重力崩壊型超新星研究のブレークスルーを目指す。

本研究では、3次元ニュートリノ輻射流体計算コードを開発して、ニュートリノ輻射輸送における球対称による制限や近似による不定性を取り除き、爆発ダイナミクスにおける多次元ニュートリノ輻射輸送の役割を明

確にする。さらに、開発した計算コードを流体力学と結合させて統合計算コードを開発する。これらの計算コード群には最新の核データをつぎ込み、計算機資源を最大まで使い切る計算により超新星爆発ダイナミクスの探求を行い、世界で最も進んだ多次元ニュートリノ輻射流体計算のもとで超新星爆発メカニズム解明を目指す。

3. 研究の方法

3次元ニュートリノ輻射流体計算による超新星爆発シミュレーションを実現するためには、多次元でボルツマン方程式を解く計算コードの開発・検証、超新星爆発に必要なニュートリノ核データの組み込み、流体計算コードとの組み合わせなどが必要である。新たに開発した統合計算コードを用いて、大質量星モデルを用いた数値シミュレーションを段階的に行ない、モデル規模をスケールアップして、最終的には空間3次元・ニュートリノ運動量3次元の数値シミュレーションを可能にする。これにより、重力崩壊・コアバウンス後の衝撃波伝搬から爆発へ向かうメカニズムを探求する。

研究の方法としては、ニュートリノ輻射輸送の多次元計算の定式化をもとに計算コードを開発して、拡散や伝搬現象を扱う基礎テスト問題によるコード検証を行う。多次元ニュートリノ輻射輸送計算により、超新星コアにおけるニュートリノ輻射の振舞いを調べて、球対称計算との比較のもとで、多次元計算がもたらす特徴を明らかにする。既存の流体計算コードと組み合わせた、多次元ニュートリノ輻射流体計算へ統合して、爆発ダイナミクスの各ステージに着目して、爆発メカニズムへ及ぼす影響を定量的に明らかにする。さらに大規模並列計算コードへ拡張して、大質量星の多次元ダイナミクス探索を可能にする。

4. 研究成果

多次元における輻射輸送方程式（ボルツマン方程式）の基本的な定式化をもとに、数値計算が可能な形に差分式を整備した。それに基づいて計算コードの開発を行い、2次元（軸対称）、3次元のもとでニュートリノ輻射輸送計算の基本コードを完成させた。球対称のもとでのニュートリノ衝突項、多次元でのニュートリノ光源からの伝搬、ガウス分布の拡散などの基礎テストを行い、コードを検証した。さらに、超新星コアの2次元・3次元形状モデルのもとで、ニュートリノ輻射輸送計算コードによる6次元空間ニュートリノ分布の定常解を求めて、非動径方向の流束など、多次元的なニュートリノ輻射輸送の特徴を記述できることを示した。この計算コー

ドは、世界で初めてニュートリノ輻射輸送を3次元空間で解く事を可能にしたものであり、画期的な成果として世界的に認識されるようになった。(原著論文リスト[6, 8])

さらに、3次元超新星コアのプロファイルにおけるニュートリノ輻射を系統的に調べて、多次元におけるニュートリノ輻射輸送の特徴を明らかにした。並列計算法により大計算規模・効率化した6次元ボルツマン方程式計算コードにより、爆発後の代表的なスナップショットについてニュートリノ輻射定常解を求めて、ニュートリノの空間・エネルギー・角度空間全ての分布および反応・加熱率の空間分布を解明した。Ray-by-ray法による近似計算法との比較を行い、近年の多次元計算で頻繁に用いられているRay-by-ray法は動径方向のみを扱うため、ニュートリノ分布や加熱率において方向変動を強調しすぎることを、世界で初めて3次元空間のもとで示した。この研究結果は、現在の多次元近似計算による数値シミュレーション結果に再検証を促すものとして、世界的にも重みを持って受け止められている。(原著論文リスト[2, 7])

輻射輸送方程式の定式化において、衝突項の評価をローレンツ変換により計算する部分は難しい点である。速度分布に基づいて散乱項をローレンツ変換により計算する方法を新たに開発した。これを含めて、流体力学計算コードとの統合を行い、相対論的な効果を含んだニュートリノ輻射流体計算コード(6次元ボルツマン方程式+流体力学)を完成させた。球対称による重力崩壊からコアバウンス・衝撃波伝搬の検証を行なった他、コアバウンス後の定常降着衝撃波に対する不安定性(SASI)を記述することに成功した。これにより多次元で重力崩壊からコアバウンス、衝撃波伝搬と復活へ至る各ステージでの現象を追うことが可能となり、京コンピュータによる大規模数値シミュレーションを開始することができた。原著論文リスト[3]

並行して、数値シミュレーション実行に必要な状態方程式データテーブルの整備と、状態方程式の多次元超新星現象への影響について研究を行った。特に、原子核混合組成の系統的な構築、軽い原子核の出現とニュートリノ加熱への影響、クォーク・ハドロン相転移の影響、核子多体理論による核物質状態方程式の影響などの研究を行い、本格的な大規模計算へ向けた基礎研究を行った。また、重力崩壊から原始中性子星冷却までの超新星ニュートリノ放出を系統的に予測して、広く世界へ向けて公開した。(原著論文リスト[1, 4, 5, 9, 10])

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線、代表的なものを記載)

[雑誌論文] (計41件)

(うち、原著論文22件、国際会議プロシーディングス19件(第一著者)5件(共著者)14件、原著論文は全て査読のある論文雑誌に掲載)

原著論文

[1] Neutrino emissivities from deuteron-breakup and formation in supernovae, S. Nasu, S. X. Nakamura, K. Sumiyoshi, T. Sato, F. Myhrer and K. Kubodera, *Astrophysical Journal* 801 (2015) 78 (12 pages).

[2] Multi-dimensional features of neutrino transfer in core-collapse supernovae, K. Sumiyoshi, T. Takiwaki, H. Matsufuru and S. Yamada, *Astrophysical Journal Supplement Series* 216 (2015) 5 (37 pages).

[3] Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars, I. Special relativistic treatments, H. Nagakura, K. Sumiyoshi and S. Yamada, *Astrophysical Journal Supplement Series* 214 (2014) 16 (19 pages).

[4] Influences of inelastic neutrino reactions with light nuclei on standing accretion shock instability in core collapse supernovae, S. Furusawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi and S. Yamada, *Astrophysical Journal* 774 (2013) 78 (13 pages).

[5] Supernova neutrino light curves and spectra for various progenitor stars: From core collapse to proto-neutron star cooling, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki, T. Totani, H. Umeda and S. Yamada, *Astrophysical Journal Supplement Series* 205 (2013) 2 (17 pages).

[6] A parameter optimization technique for a weighted Jacobi-type preconditioner, A. Imakura, T. Sakurai, K. Sumiyoshi and H. Matsufuru, *Japan Society for Industrial and Applied Mathematics (JSIAM)* 4 (2012) 41-44.

[7] Core-collapse supernovae as supercomputing science: a status report toward 6D simulations with exact Boltzmann neutrino transport in full general relativity, K. Kotake, K. Sumiyoshi, S. Yamada, T. Takiwaki, T. Kuroda, Y. Suwa and H. Nagakura, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (2012), 01A301 (34

pages). (Invited review paper)

[8] Neutrino transfer in three dimension for core-collapse supernovae. I. static configurations, K. Sumiyoshi and S. Yamada, *Astrophysical Journal Supplement Series* 199 (2012) 17 (32 pages).

[9] Relativistic equation of state for core-collapse supernova simulations, H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu and K. Sumiyoshi, *Astrophysical Journal, Supplement Series* 197 (2011) 20 (14 pages).

[10] Impact of quarks and pions on dynamics and neutrino signal of black hole formation, in non-rotating stellar core collapse, K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada, *Astrophysical Journal* 721 (2010) 1284-1294.

国際会議報告

[1] Numerical modeling of core-collapse supernovae and compact objects, K. Sumiyoshi, in *Proceedings of the IAU Symposium 291 "Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years"*, Beijing, China, August 20-31, 2012. *Proceedings IAU Symposium No. 291 (2012)* 67-72. (ed. Joeri van Leeuwen, Cambridge University Press)

[2] Numerical code of the neutrino-transfer in three dimensions for core-collapse supernovae, K. Sumiyoshi and S. Yamada, in *Proceedings of the IAU Symposium "Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts"*, Nikko, Japan, March 12-16, 2012. *Proceedings IAU Symposium No. 279 (2012)* 395-396 (eds. P. Roming, N. Kawai and E. Pian, Cambridge University Press).

[3] Progress of the equation of state table for supernova simulations and its influence, K. Sumiyoshi, in *Proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11)*, RIKEN, Wako, Saitama, Japan, November 14-17, 2011, *American Institute of Physics Conference Proceedings* 1484 (2012) 39-44.

[4] A numerical challenge on the core-collapse supernovae: physics of neutrino and matter at extreme conditions, K. Sumiyoshi, In *Proceedings of International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011"* (nanoPHYS'11), Tokyo, Japan, 2011, *Journal of Physics,*

Conference Series, 302 (2011) 012060 (7 pages).

[5] Neutrino bursts from failed supernovae as a promising target of neutrino astronomy, K. Sumiyoshi, K. Nakazato, H. Suzuki and S. Yamada, In *Proceedings of 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos*, Heidelberg, Germany, 2010, *Proceedings of Science (PoS, SISSA, Trieste), PoS(NIC XI)* 157.

[学会発表] (計 31 件)

(口頭発表のうち、国際会議 14 件、国内会議・学会 17 件、うち招待講演 15 件)

国際会議 (招待講演)

[1] Roles of dense matter & neutrino transfer in core-collapse supernovae, K. Sumiyoshi, *Advances and Perspectives in Computational Nuclear Physics*, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Hilton Waikoloa Village, Waikoloa, Hawaii, USA, 2014. 10.5-7 (10.7)

[2] Multi-dimensional neutrino transfer in core-collapse supernovae and its implications, K. Sumiyoshi, *International workshop on "Nuclear Physics and Astrophysics of Neutron-Star Mergers and Supernovae, and the Origin of R-Process Elements"*, ECT* European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento, Italy, 2014. 9.8-12 (9.8)

[3] Data sets of equation of state for core-collapse supernovae: their impact on dynamics and signals, K. Sumiyoshi, *International workshop "The Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death"*, Auditorium al Duomo, Florence, Italy, 2014. 3.24-28 (3.26)

[4] Numerical modeling of core-collapse supernovae and compact objects, K. Sumiyoshi, *IAU Symposium 291: Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years*, *IAU General Assembly XXVIII*, Beijing, China, 2012. 8.20-31 (8.20)

[5] Numerical challenges in physics of core-collapse supernovae: the role of dense matter and neutrinos, K. Sumiyoshi, *Third International Conference on Nuclear Fragmentation: From Basic Research to Applications (NUFRA2011)* Kemer, Turkey, 2011. 10.2-10.9 (10.4)

[6] Progress of supernova simulations with the Shen equation of state, K. Sumiyoshi, International workshop on "Microphysics in Computational Relativistic Astrophysics" Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, Canada, 2011.6.20-6.24 (6.21)

[7] Clusters and the equation of state in core-collapse supernovae, K. Sumiyoshi, International workshop on "Clusters in Nuclei and Nuclear Matter: Nuclear Structure, Heavy Ion Collisions, and Astrophysics" ECT*, European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento, Italy, 2011.6.13-17 (6.16)

国内会議・学会（招待講演）

[1] 超新星ニュートリノの理論, 住吉光介, 新学術「地下素核研究」第一回超新星ニュートリノ研究会, 東京理科大学野田キャンパス, 2015. 3. 16~17 (講演日3. 16)

[2] Numerical simulations of core-collapse supernovae: Neutrino transfer by 6D Boltzmann equation, 住吉光介, 超新星・ガンマ線バースト研究会2014, 理化学研究所・和光キャンパス, 2014. 8. 25~27 (講演日8. 25)

[3] ニュートリノ輸送方程式の数値解法, 住吉光介, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ WS2013, 千葉大学, 2013. 2. 18~19 (講演日2. 18)

[4] 超新星爆発における核物質と状態方程式, 住吉光介, 新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」キックオフシンポジウム, 理化学研究所, 2012. 10. 26~27 (講演日10. 27)

[5] 超新星爆発の大規模数値シミュレーションと原子核物理, 住吉光介, 「大規模計算による原子核研究の展開ー核子多体系を中心にー」HPCI 戦略プログラム分野5研究会, 理化学研究所, 2012. 1. 24~25 (講演日1. 24)

[6] 超新星におけるニュートリノ輻射輸送と状態方程式, 住吉光介, 研究会「超新星爆発と数値シミュレーション」, 京都大学基礎物理学研究所, 2011. 12. 26~28 (講演日12. 27)

〔依頼講演〕(計 6件)

[1] HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」素核宇宙融合レクチャーシリーズ 第10回「重力崩壊型超新星の爆発メカニズム:核物理と天文数値シミュレーションの連携」, 住吉光介, 2014. 1.10-1.11

[2] 超新星爆発のメカニズムを探る, 住吉光介, サイエンスカフェ in 静岡、第77話, 2013. 6. 20、B-nest 静岡市産学交流センター、静岡大学理学部

[3,4,5] サマースクール「クオークから超新星爆発まで」核物質状態方程式を用いた超新星爆発シミュレーション(講義および実習), 住吉光介, 滝脇知也, 諏訪雄大, 固武慶, 鷹野正利, 京都大学基礎物理学研究所, 2013. 8.20-8.24 (8.23-8.24), 2012. 7.27-7.31 (7.30-7.31), 2011. 8.4-8.8 (8.7-8.8)

[6] 原子核から超新星シミュレーションへの道のり, 住吉光介, 記念講演会「クオーク核物理学ーマイクロからマクロへ」2010. 6. 5、大阪大学

〔解説記事〕(計 1件)

[1] 非等方性の強い輻射場における輸送計算:超新星爆発におけるニュートリノ輻射輸送の例, 講座 輻射流体シミュレーション 2章, 住吉光介, プラズマ・核融合学会誌、第88巻第10号 p.610-617 (2012年10月号) J. Plasma Fusion Research 88 (2012) 610-617

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

研究会・世話人/組織委員(計 8件)

[1] Neutrino nuclear responses for neutrino studies in nuclei (NNR14), 2014. 11. 5~6, Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Organizer

[2] Advances and Perspectives in Computational Nuclear Physics, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Hilton Waikoloa Village, Waikoloa, Hawaii, USA, 2014. 10. 5~7, Organizing committee

[3] Multi-Messengers from Core-Collapse Supernovae (MMCOCS) 2013. 12. 2

～ 6 , Fukuoka University, Scientific Organizer

[4] The 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), 2013. 11. 18～22, Tsukuba, Program Advisory Committee

[5] Supernovae and Gamma-Ray Bursts in Kyoto, YIPQS long-term workshop, 2013. 10. 14～11. 15, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, Scientific Organizing Committee

[6] 核物質の対称エネルギーからコンパクト天体現象へ, 理論核物理領域, 実験核物理領域, 宇宙線・宇宙物理領域合同シンポジウム, 2013. 9. 21, 日本物理学会分科会、高知大学朝倉キャンパス, 提案者

[7] The 8th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJJNPS2012) Beijing, 2012. 10, Organizing Committee

[8] The 11th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG11) RIKEN, Japan, 2011. 11, Local Organizing Committee

受賞 (計 1件)

[1] The third prize in the best poster competition at the international symposium on Nuclei in the Cosmos XI, Heidelberg, 19-23 July 2010 to K. Sumiyoshi for poster presentation: Neutrino bursts from failed supernovae as a promising target of neutrino astronomy.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

なお、山田章一 (早稲田大学)、長倉洋樹 (京都大学)、岩上わかな (京都大学)、古澤峻 (国立天文台)、佐藤透、中村聡 (大阪大学)、滝脇知也 (理化学研究所)、松古栄夫 (高エネルギー加速器研究機構)、中里健一郎 (東京理科大学) らが研究協力を行なった。