

国立天文台 天文学データ解析計算センター
成果報告書（平成17年度）

提出期限：平成18年3月20日(月)17:00必着

応募カテゴリ (いずれかを選択) A

システム (いずれかを選択) VPP

プロジェクト ID:wks06a

研究代表者 (現在のユーザ ID : sumyshsk)

氏名	住吉光介	
所属機関名	沼津工業高等専門学校教養科物理教室	
連絡先住所	〒 410-8501 静岡県沼津市大岡 3600	
電話番号	055-920-3715	
E-mail	sumi@numazu-ct.ac.jp	
職または学年	助教授	
研究代表者が	学生の場合には	指導教官の氏名

研究課題名

(和文)	不安定核データ・ニュートリノ輻射輸送流体計算による重力崩壊型超新星爆発の研究
(英文)	Study of collapse-driven supernovae by numerical simulations of neutrino-transport hydrodynamics with nuclear data of unstable nuclei

研究分担者

[illegible]

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

査読付き論文雑誌

- Postbounce evolution of core-collapse supernovae: long-term effects of equation of state, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, H. Shen, S. Chiba and H. Toki, Astrophysical Journal 629 (2005) 922-932.
- Gravitational collapse and neutrino emission of population III massive stars, K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada, Astrophysical Journal (2006) in press.
- Neutrino signals from the formation of a black hole: A probe of the equation of state of dense matter, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki and S. Chiba Physical Review Letters (2005) submitted.

査読付き論文雑誌（国際会議）

- An approach toward the successful supernova explosion by physics of unstable nuclei, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, H. Shen and H. Toki, in Proceedings of the 8th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC8), Vancouver, Canada, 2004, Nuclear Physics A758 (2005) 63c-66c.

国際会議プロシーディングス

- Neutrino-nucleus interactions and supernova modeling, K. Sumiyoshi, in Proceedings of 4th International workshop on neutrino-nucleus interactions in the few-GeV region (NuInt05), Okayama University, Okayama, Japan, 2005, (Elsevier, The Netherlands) in press.
- Fate of core-collapse supernovae: formation of neutron star and black hole, K. Sumiyoshi, H. Suzuki and S. Yamada, in Proceedings of International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05), New Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2005, (AIP) in press.
- Gravitational collapse and neutrino emission of population III massive stars, K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada, in Proceedings of "Relativistic Astrophysics and Cosmology - Einstein's Legacy " ESO, Grarching, Germany, 2005, ESO Astrophysics Symposia (Springer-Verlag series), in press.

口頭発表（国際会議）

- Core-collapse supernovae, r-process nucleosynthesis, and the physics of unstable nuclei,

K. Sumiyoshi,
Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and
The Physical Society of Japan,
Ritz-Carlton, Kapalua, Maui, Hawaii, USA, 2005. 9 (Invited Talk)
• Neutrino-nucleus interactions and supernova modeling,
K. Sumiyoshi,
4th International workshop on neutrino-nucleus interactions in the few-GeV region (NuInt05),
Okayama University, Okayama, 2005. 9 (Invited Talk)
• Fate of core-collapse supernovae: formation of neutron star and black hole,
K. Sumiyoshi, H. Suzuki and S. Yamada,
International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG05), New
Horizon of Nuclear Astrophysics and Cosmology,
University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2005. 11, (poster short oral presentation)

口頭発表（国内会議）

• 超新星爆発メカニズムと重元素合成、ニュートリノ反応
住吉光介
物理学会、東京理科大学、2005.3（シンポジウム講演）
• ニュートリノ輸送流体計算による超新星爆発と原始中性子星
住吉光介、山田章一、鈴木英之、H. Shen、千葉敏、土岐博
物理学会、東京理科大学、2005.3
• 超新星爆発メカニズムとニュートリノ反応
住吉光介
超新星 γ + MSW + 元素合成ワークショップ
国立天文台、2005.4
• 重力崩壊型超新星爆発：ブラックホール形成のニュートリノシグナル
住吉光介
第18回理論天文学懇談会シンポジウム「高エネルギー天体物理学の最前線」
京都大学基礎物理学研究所、2005.12
• ニュートリノ輻射流体計算による重力崩壊型超新星爆発とブラックホール形成
住吉光介
大規模シミュレーションプロジェクト・ユーザズミーティング
国立天文台天文学データ解析計算センター、2006.1
• 超新星爆発におけるニュートリノ反応
住吉光介
KEK Mini-Workshop「核子スピン構造に関する最近の発展と今後の展望」
高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所、2006.3

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

査読付き論文雑誌

• Effects of magnetic fields on proto-neutron star winds,
H. Ito, S. Yamada, K. Sumiyoshi and S. Nagataki,
Progress of Theoretical Physics 114 (2005) 995-1020.

国際会議プロシーディングス

- Nuclear data for astrophysical nucleosynthesis: a Japanese + LANL activity,
S. Chiba, T. Kawano, H. Koura, T. Nakagawa, T. Tachibana, T. Kajino, S. Oryu, T. Hayakawa,
A. Seki, T. Maruyama, T. Tanigawa, Y. Watanabe, T. Ohsaki, T. Murata and K. Sumiyoshi,
in Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2004),
Santa Fe, New Mexico, 2004,
American Institute of Physics Conference Proceedings 769 (2005) 1339-1344.
- Supernova explosion energy with relativistic EOS including hyperon,
C. Ishizuka, A. Ohnishi, K. Sumiyoshi and S. Yamada,
in Proceedings of International Symposium on the Origin of Matter and Evolution of Galaxies
2003, Wako, Saitama, Japan, 2003,
(World Scientific, Singapore, 2005) 489-492.
- Properties of dense matter in neutron stars and supernovae,
H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu and K. Sumiyoshi,
in Proceedings of XXIX International workshop on condensed matter theories, Kizu, Kyoto,
Japan, 2005,
Condensed Matter Theories (Nova Science Publishers) in press.

成果の概要

重力崩壊型超新星爆発メカニズムの解明は宇宙物理学の長年の懸案であり、銀河の進化・高密度天体の形成・重元素の起源を明らかにするための基本的な重要課題である。多次元流体計算による対流・磁場の影響や、ニュートリノ輻射流体計算の厳密な取り扱い、の視点から一つずつ問題を解決することが、世界の超新星爆発研究者の課題である。我々の研究グループでは、ニュートリノ輸送流体を厳密に扱う手法の元で、超新星爆発メカニズム解明の研究を行ってきた。特に、最新の不安定核ビーム実験データに基づいた核物理の影響を一つ一つ明らかにしてきた。

本年度の研究では、爆発メカニズムにおけるミクロ物理の役割を解明するとともに、ブラックホールなどの特異天体・重元素の起源との関連を探ることを行った。特に、大質量星の重力崩壊において爆発を起こさない場合に、バウンス後に形成される原始中性子星がブラックホール形成に至るまでの熱的進化・超新星ニュートリノのシグナルを明らかにすることを中心に研究を行った。また、これまで見落とされていたニュートリノ反応を取り込むことにより爆発が復活するかどうか、その依存性を定量的に明らかにすることを行った。

質量が $20M_{\odot}$ 程度までの大質量星による重力崩壊では、SN1987A の様な通常の超新星爆発が起き、その中心には原始中性子星が形成されて、数十秒の間、超新星ニュートリノが放出される。さらに質量の大きな大質量星において起きる爆発現象は、爆発エネルギーや重元素合成量の違いに応じて Hypernovae, Faint Supernovae などと呼ばれている。これらの爆発現象ではブラックホールが中心に形成されていると考えられているが、その形成ダイナミクスは未だよく判っていない。また、爆発はニュートリノ放出を伴うはずであるが、ニュートリノ光度やエネルギーおよび時間変化についても十分な予測はされていない。

我々は、爆発が起きずにブラックホール形成が確実である大質量星 ($\sim 40M_{\odot}$) の重力崩壊について、一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算コードにより、数値シミュレーションを行った。

ここでは回転の度合いが小さいと考えられる Faint Supernovae を念頭に考えて、一般相対論による第一原理計算を球対称の範囲内で行った。さらに、最新の核データを用いることにより、高温高密度状態方程式の違いによる現象の差異を明らかにした。陰解法による計算コードの特長を活かして、バウンス後 1 秒を越える長い時間発展を解明する数値シミュレーションを世界で初めて行った事は特筆すべき点である。

シミュレーション計算は、大質量星の進化計算で得られている鉄のコアの初期条件から初めて、重力崩壊・コアバウンス・衝撃波発生・衝撃波停滞・原始中性子星形成・再崩壊までを一貫して行い、ブラックホール形成へ至る様子について、ダイナミクスの全体像を明らかにした。ニュートリノ輻射輸送計算から求まる、各点でのニュートリノ分布関数の時間発展をもとに、ニュートリノ光度・平均エネルギーなどの分析を行ない、ニュートリノ放出シグナルの予測を行った。

数値シミュレーションの結果、ブラックホール形成が起こるのは中心コアバウンス後の 1 秒程度以内であることを解明した。大質量星重力崩壊の後、コアバウンスが起こり衝撃波が発生するが、外部コアから降り積もる物質の降着率が大きく、衝撃波は直ぐに後退してしまう。中心には原始中性子星が形成されるが、その質量は物質降着のため急速に増加して、原始中性子星の最大質量を越えてしまうため、その時点で再び重力崩壊が起こり、ブラックホールが形成される。このブラックホール形成の経過は、これまで研究されてきたどのシナリオとも異なり、大質量星からのブラックホール形成の新たなシナリオとなった。

また、ブラックホール形成までの時間は、核物質密度を超える高温高密度の状態方程式 (EOS) が大きな鍵を握っており、状態方程式に依存して大きく異なる事を発見した。慣例的に用いられてきた Lattimer-Swesty による状態方程式 (LS-EOS) と、最新の不安定核データに基づく Shen et al. による状態方程式 (SH-EOS) を用いた数値シミュレーションを行った結果、LS-EOS の場合ではバウンス後 0.6 秒でブラックホール形成が起こるのに対して、SH-EOS の場合では 2 倍も長い 1.3 秒であることを明らかにした。この違いは状態方程式が支えることのできる原始中性子星の最大質量の違いに起因しており、より柔軟な状態方程式では、より早い段階でブラックホール形成が起こる傾向を提示した。

この時、ブラックホール形成に至るまでのニュートリノ放出は、通常の超新星爆発のものと異なり、平均エネルギーが増加していくこと、ブラックホール形成とともにバウンス後 1 秒程度でニュートリノシグナルが消える特性を持っていること、を初めて明らかにした。この特性を用いて、宇宙ニュートリノの地上検出器による観測において、ブラックホール形成を検知できることを新たに指摘した。さらに、ニュートリノ放出と消失の性質は、状態方程式により異なることを発見して、ニュートリノ観測により状態方程式について制限がつく可能性があることを提案した。

上述の研究成果の他、通常の超新星爆発を起こす大質量星 ($15M_{\odot}$) の場合について、爆発メカニズムにおけるニュートリノ反応の影響について、系統的な数値シミュレーションを行ない、ニュートリノ反応による加熱率の大きさの変化と衝撃波の復活の関係を定量的に明らかにした。これにより、ニュートリノ核子・ニュートリノ原子核反応の理論的・実験的研究が重要であることを新たに指摘して、素粒子・原子核物理との新たな連携を生み出した。