

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19104006

研究課題名（和文）超新星の爆発機構とガンマ線バースト源エンジンの統一的解明

研究課題名（英文）Quest for the unified picture of the explosion mechanism of supernovae and the central engine of gamma-ray bursts

研究代表者

佐藤 勝彦（SATO KATSUHIKO）

東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授

研究者番号：00111914

研究成果の概要（和文）：本研究課題では大質量星が進化の最後におこす重力崩壊型超新星及びガンマ線バーストの爆発機構・源エンジンについて世界最先端の研究を行い、多くの成果を挙げた。大規模数値シミュレーションによる研究を豊富に行い、場合によっては京コンピュータを用いた世界最高レベルの数値シミュレーションを実現した。またこれらの現象に付随して起こる重力波・ニュートリノ放射、r-process 元素合成を含めた爆発的要素合成、最高エネルギー宇宙線生成、等々について世界が注目する成果を数多く挙げた。以上の様に本研究課題では当初の予想を上回る、世界最先端の成果を修めることが出来た。また同時にこの分野に於ける将来の課題・展望を提示しつつ5年間のプログラムを終了した。

研究成果の概要（英文）Advanced studies on the explosion mechanism of core-collapse supernovae and central engine of gamma-ray bursts were performed in this program, giving fruitful and state-of-the-art results. Lots of large-scale numerical simulations were done for the purpose, and in some cases cutting-edge simulations were performed using the K-computer. We also succeeded to obtain fruitful and noteworthy results on lots of phenomena accompanying core-collapse supernovae and gamma-ray bursts, such as gravitational waves, neutrino emissions, explosive nucleosynthesis including r-process nucleosynthesis, and ultra-high energy cosmic rays. For the above reasons, it is concluded that we could achieve great success to obtain cutting edge results in this program, which is more than we expected. Simultaneously, our five-year mission has ended successfully, leaving future works and direction of this field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2008年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2009年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2010年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2011年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
総計	66,800,000	20,040,000	86,840,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学／素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（理論）

キーワード：超新星 ガンマ線バースト 重力崩壊 重力波 ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

大質量星が進化の最後におこす重力崩壊型超新星がどのような仕組みで爆発にいた

るのかは、宇宙物理学の長年の謎である。一方、ガンマ線バーストも大質量星の進化の最終形態の一つであることが明らかになり、通

常の超新星とガンマ線バーストや極超新星を分ける仕組みがどうなっているのか、またその際に鍵をにぎる物理量は何か、大質量星の終焉に他の形態はないのか、といった間に答えることが重要となってきた。

2. 研究の目的

本研究課題では、単に超新星爆発のメカニズムやガンマ線バーストの中心天体の解明にとどまらず、大質量星がその進化の最後に到達する様々な最終形態の系統的な研究を行うことが重要であると考え、大質量星の進化、重力崩壊のダイナミクスとコンパクト天体の形成、ジェットの生成と伝播、元素の合成や高エネルギー粒子の生成などに注目し、その全体像を統一的に明らかにすることを目的としている。

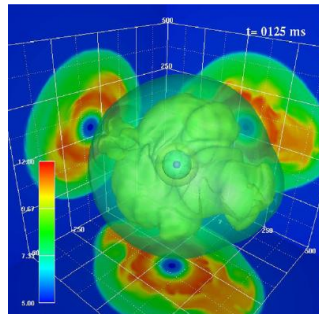
3. 研究の方法

本研究課題のメンバーは、大質量星の重力崩壊現象の異なる時点において重要となる物理過程の専門家の集まりである。分担者はその専門に応じ現象の時系列に沿って配置されている。研究は主に大規模数値シミュレーションを用いて行うが、前後の現象に関する研究成果が互いにフィードバックをかけるようなかたちで進める。

4. 研究成果

(1) 大質量星コアの重力崩壊に関する成果

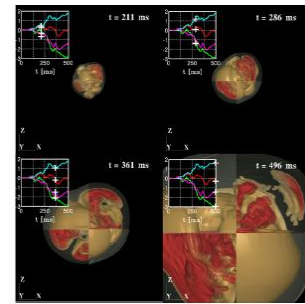
世界に先駆けて空間3次元位相空間1次元のニュートリノ輸送コードを開発した。京コンピュータを利用してそのコードによる大規模数値実験を行い、軽い親星において停滞した衝撃波が復活することを初めて示した。また3次元計算をすることで今まで2次元軸対称行われてきた計算とは対流の発達の様子が質的に異なることを指摘できた(右図)。



また強磁場回転星の重力崩壊において、磁場が赤道面対称性を破って存在する場合に、数100~1000km/sの固有速度を出しうるということを示した。また、より弱磁場で高速回転している星の重力崩壊でも磁気圧で爆発が起こることを確認した。さらに、アルフベン波によるエネルギー輸送で超新星爆発を起こすという斬新な機構も発表した。

一方、大質量星の重力崩壊にともない普遍的に形成される定常降着衝撃波の3次元非軸対称モードに対する不安定性の数値的解

析を行なった。また、そこから放出される重力波は時間とともにランダムに変動する特徴を持つことを初めて明らかにした(右図)。



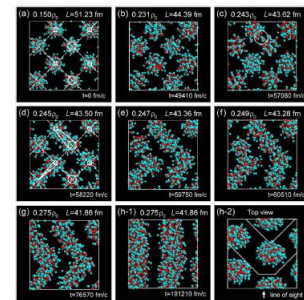
また、ブラックホール形成をとまなう高速自転していない大質量星の重力崩壊は大質量星進化の新たなチャンネルとして重要であり、その際非常にユニークな光度曲線とエネルギースペクトルを示すニュートリノが放出されることを世界に先駆け提唱した。

またこれに関連し、重力崩壊型超新星の爆発後の長時間ダイナミクスを核反応まで首尾一貫した状態方程式を考慮し、1次元および2次元のシミュレーションで調べた。その結果、衝撃波復活のタイミングが適切な時のみ、観測されているような爆発エネルギーとニッケルの合成量を得られることが分かった。

その他、実験の原子核データと質量公式を組み合わせ、パスタ相の存在を加味し、統計平衡にある多数の原子核の分布を考慮した新しい状態方程式テーブルを作成した。

(2) 高密度物質における新たな物質相に関する成果

量子分子動力学法(QMD)を用い、大質量星の重力崩壊では物質の圧縮により原子核間の引力で体心立方格子構造が不安定になりパスタ相が動的に形成されることを明らかにした(右図)。この結果はPRLに発表され、



American Physical Societyの紹介記事に取り上げられるなど大きな反響をよんでいる。また、gyroidとよばれる新たな相も存在する可能性が高いことを液滴模型により示し、PRLに発表した。

(3) ニュートリノ振動に関する成果

超新星コア近傍でのニュートリノ自己相互作用を含んだニュートリノ振動を数値計算して、エネルギースペクトルの変化を系統的に調べた。また、現行及び次世代検出器で未定パラメーターを決定する精度を具体的に評価した。

(4) 元素合成に関する成果

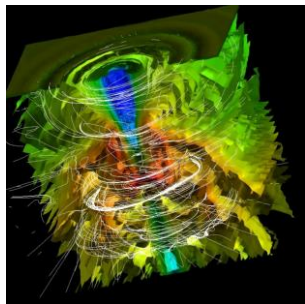
強磁場自転超新星におけるジェット状爆発に対し重元素合成計算を行い、第3ピーク

が顕著に表れる r-元素分布を得た。また、鉄コア領域も含むコラプサージェット内部における重元素合成計算を行い、質量数が 60 以上の元素は r-元素まで含めて太陽組成に比べ過剰生成になることを示した。

また後期恒星進化に決定的に影響を与える triple- α 核反応率に 2009 年、劇的な変更が理論的に示唆された。そこでその影響をつぶさに調べ、ヘリウム降着白色矮星においては Ia 型超新星にシナリオが大幅に変更されうること、ヘリウム降着中性子星では新しい反応率は観測とほぼ合致すること、ヘリウムコアでの s-過程元素合成では炭素燃焼の反応率に変更がなければ結果的に従来とあまり変わらないこと等を明らかにすることができた。

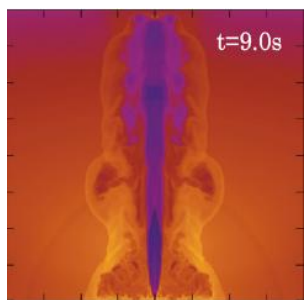
(5) ガンマ線バーストジェット形成と伝播に関する成果

MPI による一般相対論的磁気流体コードを開発し、ガンマ線バーストの数値シミュレーションを行った。その結果、磁気卓越ジェットが高速回転する大質量星中心で形成出来ることが明らかとなった(右図)。また、より高速回転するブラックホール程、より強力なジェットの噴出することが示された。



一方、ガンマ線バーストを駆動するエネルギー供給源としては、降着円盤からのニュートリノ対消滅反応も依然有力であることもシミュレーションにより示した。

またガンマ線バースト伝搬数値シミュレーションによって、観測されているガンマ線バーストの光度、スペクトル等がジェットの持つ光球面からの熱的放射の重ね合わせでほぼ説明出来ることが示された(右図)。



(6) 高エネルギー粒子と電磁波放出に関する成果

ガンマ線バーストからの高エネルギーニュートリノ、高エネルギーガンマ線、および最高エネルギー宇宙線生成可能性を解析的なアプローチで検討した。その結果、IceCube では 3 年ほどの継続的観測によってガンマ線バースト高エネルギーニュートリノが観測可能であることやボイド領域などではペア

エコー現象がフェルミ衛星などで観測可能であることなどを明らかにした。

また Pierre Auger Observatory によって報告された最高エネルギー宇宙線の組成変化、スペクトル、到来方向は、過去に天の川銀河で起こったガンマ線バーストから放出された最高エネルギー宇宙線が現在観測されているという新説によって良く説明出来ることが示された。

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)

[雑誌論文] (計 106 件)

- (1) Neutrino Transfer in Three Dimensions for Core-Collapse Supernovae. I. Static Configurations, K. Sumiyoshi and S. Yamada, *Astrophysical Journal Supplement Volume 199*, pp.17-48 (2012) 査読有
- (2) Impacts of Collective Neutrino Oscillations on Core-collapse Supernova Explosions, Suwa, Yudai; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya; Liebendörfer, Matthias; Sato, Katsuhiko *The Astrophysical Journal*, Volume 738, id.165 (2011) 査読有
- (3) Explosive Nucleosynthesis in the Neutrino-driven Aspherical Supernova Explosion of a Non-rotating $15 M_{\text{sun}}$ Star with Solar Metallicity, Fujimoto, Shin-ichiro; Kotake, Kei; Hashimoto, Masa-aki; Ono, Masaomi; Ohnishi, Naofumi *The Astrophysical Journal*, Volume 738, id.61 (2011) 査読有
- (4) Effects of Rotation on Stochasticity of Gravitational Waves in the Nonlinear Phase of Core-collapse Supernovae, Kotake, Kei; Iwakami-Nakano, Wakana; Ohnishi, Naofumi, *The Astrophysical Journal*, Volume 736, id.24 (2011) 査読有
- (5) Rotating Black Holes as Central Engines of Long Gamma-Ray Bursts: Faster is Better, S.Nagataki *Publications of the Astronomical Society of Japan* Volume 63, pp.1243-1249 (2011) 査読有
- (6) Jet Propagations, Breakouts and Photospheric Emissions in Collapsing Massi

- ve Progenitors of Long Duration Gamma-ray, Hiroki Nagakura, Hiroataka Ito, Kenta Kiuchi, Shoichi Yamada The Astrophysical Journal, Volume 731, id.80 (2011) 査読有
- (7) Impact of Quarks and Pions on Dynamics and Neutrino Signal of Black Hole Formation in Nonrotating Stellar Core Collapse, Ken'ichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada The Astrophysical Journal, Volume 721, pp.1284-1294 (2010) 査読有
- (8) Role of Galactic Sources and Magnetic Fields in Forming the Observed Energy-Dependent Composition of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays, Calvez, Antoine, Kusenko, Alexander, Nagataki, Shigehiro Physical Review Letters Phys. Rev. Lett. 105, 91101 (2010) 査読有
- (9) Stochastic Nature of Gravitational Waves from Supernova Explosions with Standing Accretion Shock Instability, Kotake, Kei; Iwakami, Wakana; Ohnishi, Naofumi; Yamada, Shoichi, The Astrophysical Journal Letters, Volume 697, Issue 2, pp. L133-L136 (2009) 査読有
- (10) Formation of Nuclear "Pasta" in Supernovae, Gentaro Watanabe, Hidetaka Sonoda, Toshiki Maruyama, Katsuhiko Sato Kenji Yasuoka, and Toshikazu Ebisuzaki, Phys. Rev. Lett. 103, 121101 (2009) 査読有
- (11) Magnetohydrodynamic Effects in Propagating Relativistic Jets: Reverse Shock and Magnetic Acceleration, Y. Mizuno, B. Zhang, B. Giacomazzo, K. Nishikawa, P.E. Hardee, S. Nagataki, D.H. Hartmann, The Astrophysical Journal Letter, 690 L47-L51 (2009) 査読有
- (12) Emergence of Hyperons in Failed Supernovae: Trigger of the Black Hole Formation, K.Sumiyoshi, C.Ishizuka, A.Ohnishi, S.Yamada, H.Suzuki, The Astrophysical Journal Letters, 690(2009) pp. L43-L46 査読有
- (13) Gyroid phase in nuclear pasta, Ken'ichiro Nakazato, Kazuhiro Oyamatsu, Shoichi Yamada, Physical Review letters 103(2009) 132501-1-132501-4 査読有
- (14) Cosmic Rays above the Second Knee from Clusters of Galaxies and Associated High-Energy Neutrino Emission', K. Murase, S. Inoue, S. Nagataki, The Astrophysical Journal Letter, 689, L105-L108 (2008) 査読有
- [学会発表] (計 155 件)
- (1) Numerical Study of Propagation of UHECRs, Nagataki Shigehiro, Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (PACIFIC) 2011, Moorea, French Polynesia France, 2011年9月10日 (招待講演)
- (2) Multimessenger from core-collapse supernovae: multidimensionality as a key to bridge theory and observation, Kotake Kei, Multi-messenger probe into nuclear physics, Washington University, USA 2011年7月16日 (招待講演)
- (3) Numerical recipes in microphysics to energize core-collapse supernovae, Kotake Kei, Microphysics in Computational Relativistic Astrophysics, Perimeter institute, Canada 2011年6月20日 (招待講演)
- (4) Multidimensional supernova simulations with a concentration of equation of state, Kotake Kei, International symposium of symmetry energy, Massachusetts, USA 2011年6月17日 (招待講演)
- (5) Numerical Propagation of UHECRs: Spectrum, Arrival Direction, Composition, Nagataki Shigehiro, Multi-Messenger Astronomy of Cosmic Rays, Beijing, China 2011年4月11日 (招待講演)
- (6) Ultra-High Energy Cosmic Rays and Neutrinos, Nagataki Shigehiro, XIV Mexican School on Particles and Fields, Morelia, Mexico 2010年11月11日 (招待講演)
- (7) Gravitational waves from successful vs. failed supernova explosions, Kotake

- Kei, 35th Workshop on Gravitation and Numerical Relativity, Seoul, Korea 2010年10月22日(招待講演)
- (8) Black Hole Formations as a Probe into Microphysics, Yamada Shoichi, The 35th Workshop on Gravitation and Numerical Relativity, APCTP in Seoul, Korea 2010年10月22日(招待講演)
- (9) Nonlinear Relativistic Jet Formation and Gamma-Ray bursts, Nagataki Shigehiro, Frontiers of Nonlinear Physics IV, Nizhny, Russia 2010年7月14日(招待講演)
- (10) High-Energy Neutrino Astronomy and Gamma-Ray Bursts, Nagataki Shigehiro, APCTP Focus Program on Recent Developments in Neutrino Physics and Astroparticle Physics, Pohang, Korea, 2009年6月23日(招待講演)
- (11) Toward Understanding of GRB-Supernova Connection by General Relativistic MHD Simulation, Nagataki Shigehiro, KIAA Program on GRB Physics, Beijing, China, 2009年5月21日(招待講演)
- (12) Probing the central engine of core-collapse supernovae through gravitational-wave and neutrino emissions, Kotake Kei, Gravitational Wave + High-Energy Neutrino Workshop, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie, Paris, France 2009年5月18日(招待講演)

[図書] (計 1 件)

(1) 長滝重博 シリーズ現代の天文学 14 シミュレーション天文学(富阪幸治、花輪知幸、牧野淳一郎(編)) 日本評論社、2007年 P.257-268

[その他]

ホームページ

<http://utaprc4.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~sn09/>

<http://th.nao.ac.jp/meeting/sn10/>

<http://th.nao.ac.jp/meeting/sn11/>

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/ws/2011/sn11/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 勝彦 (SATO KATSUHIKO)

東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授
研究者番号：00111914

(2) 研究分担者

橋本 正章 (HASHIMOTO MASAOKI)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：20228422

鈴木 英之 (SUZUKI HIDEYUKI)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：90211987

山田 章一 (YAMADA SHOICHI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80251403

長滝 重博 (NAGATAKI SHIGEHIRO)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：60359643

固武 慶 (KOTAKE KEI)

国立天文台・CfCA・助教

研究者番号：20435506

滝脇 知也 (TAKIYAKI TOMOYA)

国立天文台・CfCA・専門研究職員

研究者番号：50507837

渡辺 元太郎 (WATANABE GENTARO)

理化学研究所・基礎科学特別研究員

研究者番号：50553294

(3) 連携研究者

大西 直文 (OHNISHI NAOHUMI)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20333859

住吉 光介 (SUMIYOSHI KOHSUKE)

沼津高専・助教授

研究者番号：30280720

藤本 信一郎 (FUJIMOTO SHINICHIRO)

熊本電波高専・助教

研究者番号：10342586

木内 健太 (KIUCHI KENTA)

京都大学・基礎科学研究所・研究員

研究者番号：40514196

岩上 わかな (IWAKAMI WAKANA)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：50571535

澤井 秀朋 (SAWAI HIDETOMO)

東京理科大学・理工学部・研究員

研究者番号：70514199

安武 伸俊 (YASUTAKE NOBUTOSHI)

千葉工業大学・助教

研究者番号：10532393

西村 信哉 (NISHIMURA NOBUYA)

国立天文台・研究支援員

研究者番号：70587625

諏訪 雄大 (SUWA YUDAI)

京都大学・基礎科学研究所・研究員
研究者番号：40610811

中里 健一郎 (NAKAZATO KENICHIRO)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：80609347

長倉 洋樹 (NAGAKURA HIROKI)

早稲田大学・理工学術院・研究員
研究者番号：00616667