

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540323

研究課題名(和文)次世代計算機・観測から迫る高エネルギー爆発天体現象の理論的解明

研究課題名(英文)Understanding central engines of explosive stellar phenomenon by next-generation supercomputers and observations

研究代表者

固武 慶 (KOTAKE, Kei)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号：20435506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本申請課題によりIDSA法という極めて効率の良い輻射輸送法を多次元流体計算に取り入れることで、世界に先駆けてニュートリノ加熱メカニズムで爆発する3次元の超新星モデルを発表することができた。爆発に際して放射される重力波、電磁波シグナルの観測可能性を精査したうえで、核燃焼の効果やニュートリノ自己相互作用の効果など、従来のスタンダードシナリオに囚われない新機軸の研究テーマも実行することができた。

研究成果の概要(英文)：By performing three-dimensional hydrodynamics simulations with spectral neutrino transport based on the isotropic diffusion source approximation (IDSA) scheme, we reported the first results on an 11.2 solar mass progenitor model that is trending towards explosion by the neutrino-driven core-collapse supernova mechanism. Studying gravitational-wave signals and nucleosynthetic yields from multi-dimensional supernova models, we obtained a number of new results that would significantly effect the conventional paradigm on the supernova mechanism, which include impacts of equations of state, nuclear burning, and magnetorotational instability.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

科研費の分科・細目：宇宙物理

キーワード：超新星爆発 中性子星 輻射輸送 多次元磁気流体計算 スーパーコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

大質量星がその進化の最終段階において迎える超新星がどのような仕組みで爆発にいたるのかは、過去40年以上にわたる宇宙物理学の謎である。この謎を解明する為に欠かせないのは、ニュートリノ・重力波を始めとする先進の宇宙観測、さらには大規模数値計算機を駆使した高精度の超新星爆発の数値シミュレーションである。

本研究課題では、世界に先駆けて3次元(3D)の超新星シミュレーションを実行しつつ、状態方程式の効果、ニュートリノ自己相互作用の効果、磁気回転不安定性の効果など、これまでのパラダイムに囚われない新機軸の物理を含む超新星モデルを探求することが不可欠である。

2. 研究の目的

従来の星の軸対称性を仮定していた2次元(2D)シミュレーションでは、衝撃波は復活するものの爆発エネルギーが典型的な観測値に比べて一桁ほど足りないことから、3D計算を行い勢いよく爆発する超新星モデルを構築することが急務である。そうしたうえで精度の高い観測のために不可欠な重力波形、さらにはニュートリノ、元素合成の定量的理論予測を行い、理論と観測の双方の視点から爆発メカニズムの研究を行うことを本課題の第一目的とする。

3. 研究の方法

・ニュートリノ輻射輸送流体数値シミュレーションによる超新星爆発メカニズムの解明

上記の研究目的を果たすためには、ニュートリノボルツマン輻射輸送を解く数値スキームの開発が欠かせない。本研究ではまず、空間3次元、ニュートリノの位相空間の自由度1次元まで考慮した計算効率の極めて高いIDSA法を用いた3次元超新星コードを開発する。さらにこれまで当該分野で最も使われてきた二つの高密度物質の状態方程式、相対論的平均場近似に基づくものと、液滴モデルに基づくもの、その両者をそれぞれ流体計算に取り込めるようにコード開発を行う。

・簡易化された輻射輸送を含む一般相対論的コードの開発

ガンマ線バーストを駆動するエネルギー供給源に関しては、回転するブラックホールの有する莫大な回転エネルギーとそのエネルギーの磁場による抜き取り機構が注目されている。極超新星およびガンマ線バースト源の解明に向けては、一般相対論的な流体コードの開発が不可欠である。この目的に向けて黒田仰生研究員と滝脇知也研究員(本課題連携研究者)とともに、簡易化されたニュートリノ輻射を取り扱える一般相対論的数値コードの開発を行う。

4. 研究成果

(1) ニュートリノ加熱メカニズムによる爆発する3D超新星モデル

世界に先駆けて空間3次元、ニュートリノ

位相空間1次元の合計4次元の輻射流体シミュレーションを世界に先駆けて実行し、11倍の太陽質量のモデルに対しては

ニュートリノ加熱メカニズムで衝撃波が復活し、爆発に転ずることを数値計算によって初めて

示した(図1参照)。特に輻射計算に関しては、光線分割法によって超並列計算を可能にした独自のスキームを実装しているのが特徴となっている。さらに空間解像度の依存性を系統的に調べ、爆発エネルギーや衝撃波の形状において一定の数値的収束が得られる分解能が存在することも指摘できた。

(2) 状態方程式、集団自己相互作用

高密度状態方程式の効果調べた結果、従来指摘されてきた核物質の非圧縮率に加え、対象エネルギーの大小が爆発のしやすさに支配的な効果を及ぼすことを明らかにすることができた。

素粒子論の研究者の間で話題になっているニュートリノ自己相互作用の効果を実験的に超新星シミュレーションに取り入れ、爆発の動的進化に効くための条件を精査した。今後のより首尾一貫した自己相互作用、輻射輸送計算に向けて、一つの方向性を与えた研究成果である。

(3) 回転する超新星コアからの重力波

回転を伴う超新星の3次元流体シミュレーションに基づき、爆発時に放射される重力波形

を評価・詳細に解析した。回転の効果によって、星の水平面方向に非軸対称モードが発達し、このモ

ードに伴って密度・温度が上昇するため、ニュートリノ放射としては星の自転軸から見たときが最大になることが分かった。さらに

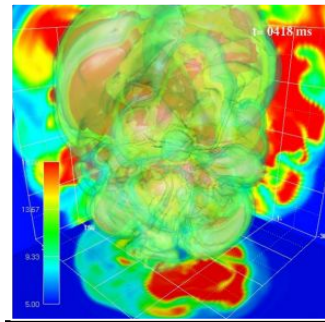


図1:「京」を駆使した世界初の3Dの超新星シミュレーション:ニュートリノ放射により流体が加熱され重力を振りきり、爆発している様子を示す(Takiwaki, Kotake, and Suwa, ApJ, (2013)).

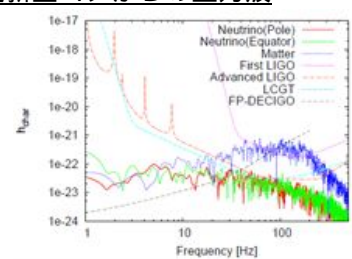


図2: 回転を伴う超新星から放射される重力波のスペクトル: 銀河中心の超新星に対して、ニュートリノ起源の重力波(緑線、赤線)は次世代検出FP-DECIGOの検出限界内に入っている。(Kotake et al. (2011), ApJ)

このニュートリノ放射の非対称性を作る重力波が強度としては最も強く、その観測には日本で計画されている干渉計 DECIGO が不可欠であることも指摘できた(図2)。

(4) コラプサーからの重力波シグナル

コラプサーモデルは長い継続時間を持つガンマ線バーストの物理的起源を説明するモデルとして最も有力なモデルである。大質量星の中心核におけるニュートリノ冷却・加熱を近似的手法によって取り込んだ2次元の重力崩壊の特殊相対論的磁気流体数値シミュレーションを行い、ブラックホール周りの降着円盤の長時間の動的変化、それに伴って放射される重力波放射について調べた。結果、遠心力の効果で扁平になった準定常状態の降着円盤から「非等方に放射される」ニュートリノが重力波の源として最も大きな寄与を持つことを明らかにした。この重力波は10Mpcの距離にあるコラプサーに対して、DECIGOをはじめとする次世代重力波検出器の検出限界内にあることを指摘できた。降着円盤がブラックホールに吸い込まれると、重力波のシグナルが突然消失する。このように重力波シグナルから明らかにできる中心エンジンの具体的物理的性質(ここでは角運動量)に関する示唆が得られることを示したことが、本成果の大きな特徴になっている。

(5) 局所シミュレーションによる磁気回転不安定性(MRI)の爆発メカニズムに及ぼす効果

磁気回転不安定性(MRI)の局所シミュレーションを実行して、重力崩壊前の親星が高速回転している場合、磁気回転不安定性(MRI)による自転エネルギーの散逸により、従来のニュートリノ加熱爆発を助けられる可能性があることを指摘した。

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 19 件)

Kuroda, Takami; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei, “Gravitational wave signatures from low-mode spiral instabilities in rapidly rotating supernova cores” *Physical Review D*, Volume 89, Issue 4, id.044011, (2014) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.044011
Nakamura, Ko; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Nishimura, Nobuya, “Revisiting Impacts of Nuclear Burning for Reviving Weak Shocks in” *Neutrino-driven Supernovae*, *Astrophysical Journal*, 782, 91, 14 pp. (2014), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/782/2/91
Yasutake, Nobutoshi; Kotake, Kei; Kutsuna, Masamichi; Shigeyama, Toshikazu, “An Investigation into

Surface Temperature Distributions of High-B Pulsars”, *PASJ* in press, 査読有, URL: <http://pasj.oxfordjournals.org/>

Kotake, Kei, “Multiple physical elements to determine the gravitational-wave signatures of core-collapse supernovae”, *Comptes rendus - Physique*, 14, 4, pp. 318-351, (2013), 査読有, DOI: 10.1016/j.crhy.2013.01.008

Ando, Shin'ichiro et al. (29人中24番). “Colloquium: Multimessenger astronomy with gravitational waves and high-energy neutrinos” *Reviews of Modern Physics*, 85, 4, pp. 1401-1420, (2013), 査読有, DOI: 10.1103/RevModPhys.85.1401

Suwa, Yudai; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Fischer, Tobias; Liebendörfer, Matthias; Sato, Katsuhiko, “On the Importance of the Equation of State for the Neutrino-driven Supernova Explosion Mechanism”, *Astrophysical Journal*, 764, 99, 19 pp. (2013), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/764/1/99

Sawai, H.; Yamada, S.; Kotake, K.; Suzuki, H., “Effects of Resistivity on Magnetized Core-collapse Supernovae” *Astrophysical Journal*, 764, 10, 38 pp. (2013), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/764/1/10

Masada, Youhei; Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Sano, Takayoshi, “Local Simulations of the Magnetorotational Instability in Core-collapse Supernovae”, *Astrophysical Journal*, 759, 110, 11 pp. (2012), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/759/2/110

Ono, M.; Hashimoto, M.; Fujimoto, S.; Kotake, K.; Yamada, S., “Explosive Nucleosynthesis in Magnetohydrodynamical Jets from Collapsars. II --- Heavy-Element Nucleosynthesis of s, p, r-Processes”, *Progress of Theoretical Physics*, 128, No. 4, pp. 741-765 (2012), 査読有, DOI: 2012PThPh.128..741O

Kotake, Kei; Sumiyoshi, Kohsuke; Yamada, Shoichi; Takiwaki, Tomoya; Kuroda, Takami; Suwa, Yudai; Nagakura, Hiroki, “Core-collapse supernovae as supercomputing science: A status report toward six-dimensional simulations with exact Boltzmann neutrino transport in full general relativity”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 1, id.01A301, (2012), 査読有, DOI: 10.1093/ptep/pts009

Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya; Harikae, Seiji, "Gravitational Wave Signatures of Hyperaccreting Collapsar Disks", *Astrophysical Journal*, 755, 84, 14 pp. (2012), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/755/2/84

Kuroda, Takami; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya, "Fully General Relativistic Simulations of Core-collapse Supernovae with an Approximate Neutrino Transport", *Astrophysical Journal*, 755, 11, 21 pp. (2012), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/755/1/11

Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei; Suwa, Yudai, "Three-dimensional Hydrodynamic Core-collapse Supernova Simulations for an 11.2 M_{\odot} Star with Spectral Neutrino Transport", *Astrophysical Journal*, 749, 98, 17 pp. (2012), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/749/2/98

Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya; Suwa, Yudai; Iwakami Nakano, Wakana; Kawagoe, Shio; Masada, Youhei; Fujimoto, Shin-ichiro, "Multimessengers from Core-Collapse Supernovae: Multidimensionality as a Key to Bridge Theory and Observation", *Advances in Astronomy*, vol. 2012, 46pp, (2012), id. 428757, 査読有, DOI: 10.1155/2012/428757

Kotake Kei, Nakano-Iwakami Wakana, Naofumi Ohnishi "Effects of Rotation on Stochasticity of GWs" *Astrophysical Journal* 736. 124, 15pp (2011), 査読有 DOI: 10.1088/0004-637X/736/2/124

Takiwaki, Tomoya; Kotake, Kei "Gravitational Wave Signatures of Magnetohydrodynamically Driven Core-collapse Supernova Explosions", *Astrophysical Journal*, 743, 30, 13 pp. (2011), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/743/1/30

Suwa, Yudai; Kotake, Kei; Takiwaki, Tomoya; Liebendörfer, Matthias; Sato, Katsuhiko, "Impacts of Collective Neutrino Oscillations on Core-collapse Supernova Explosions", *Astrophysical Journal*, 738, 165, 13 pp. (2011), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/738/2/165

Kotake, Kei; Iwakami-Nakano, Wakana; Ohnishi, Naofumi, "Effects of Rotation on Stochasticity of Gravitational Waves in the Nonlinear Phase of Core-collapse Supernovae", *Astrophysical Journal*, 124, 15 pp. (2011), 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/736/2/124

Fujimoto Shin-ichiro, Kotake Kei,

Hashimoto et al.: "Explosive Nucleosynthesis in Neutrino-driven SN" *Astrophysical Journal* 738. 61, 15pp (2011), DOI: 10.1088/0004-637X/738/1/61

[学会発表](計 21 件)

固武 慶: "超新星からの重力波、ニュートリノ、電磁波放射" (招待講演), 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3/28) 東海大学

固武 慶: "多次元超新星モデルの現状と問題点" (招待講演), 超新星研究会 (2014 年 1/16), 九州大学

Kotake, Kei: "Cutting-edge issues in core-collapse supernova theory" (招待講演), Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), (2013 年 11/19), エポカルつくば

Kotake, Kei: "Multi-D Core-Collapse Supernova Explosions and the Multi-Messenger Signatures" (招待講演), Supernovae and Gamma-ray bursts in Kyoto, (2013 年 10/29), 京都大学

Kotake, Kei: "Explosion mechanism of core-collapse supernovae and the astrophysical multi-messengers", 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP), (2013 年 9/12), Asilomar, California USA

Kotake, Kei: "Simulations of Core-Collapse Supernovae" (招待講演) Inauguration symposium of Center of Nuclear Astrophysics, (2013 年 5/31), Jiao Tong University (上海交通大学), 中国

固武 慶: "京コンピュータによる超新星爆発シミュレーション" (招待講演) 日本物理学会: シンポジウム

「動き出した京コンピュータと素粒子・原子核・宇宙の計算物理」, (2012 年 9/11) 京都産業大学

Kotake Kei: "Current status of multi-D hydrodynamic simulations of core-collapse supernovae (招待講演)" NIC XII satellite workshop on r-process Nucleosynthesis, (2012 年 8/4-10), ケアンズ、オーストラリア

Kotake, Kei: "Brainstorming on core-collapse supernova theory with perspectives toward multi-messenger astronomy (招待講演)", Nuclear Theory program INT-12-2a, Core-Collapse Supernovae: Models and observable Signals, (2012 年 7/13-23), University

of Washington, institute of nuclear theory

Kotake Kei: "Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae and Collapsars" (招待講演) Marcel Grossmann Meeting, (2012年7/1-7), ストックホルム

Kotake Kei: "From micro- to macrophysical impacts on the mechanism of core-collapse supernovae", (招待講演) Modeling at the interface between nuclear physics and nuclear astrophysics, (2012年6/17-22), Beijing (Kavli 研究所)

Kotake Kei: "Fostering Core-Collapse Supernovae by General Relativity, 3D hydrodynamics, and anything else?" CompStar2012 (2012年6/3-9), Tahiti

Kotake Kei: "3D vs. GR: which one will help the onset of CCSN?" 16th workshop on nuclear and astrophysics. (2012年3/26-30). Ringberg, Munich, Germany

Kotake Kei: "Cutting-edge issues in the theory of CCSN" IAU Symposium 279(招待講演). (2012年3/12-16). 日光、栃木県、日光千姫ホテル

Kotake Kei: "Cutting-edge issues in CCSN modeling" Formations of compact objects(招待講演). (2012年3/7-9). 早稲田大学

固武 慶: "超新星爆発からのニュートリノと重力波" 研究会「Multi-messenger Astronomy で迫るコンパクト天体」(招待講演). (2012年2/23-24). 京都大学

固武 慶: "超新星の物理" 大阪市立大学アインシュタインの物理でリンクする研究・教育拠点 研究会(招待講演). (2012年2/18-21). 滋賀県、長浜市、サイクルセンター

固武 慶: "数値シミュレーションで迫る爆発天体のエンジン" 天文天体物理夏の学校(招待講演). (2011年8/1). 愛知県、蒲郡市、ホテルたつき

Kotake Kei: "Multimessenger from CCSN" Microphysical probe into nuclear astrophysics(招待講演). (2011年7/16-24). Institute of nuclear theory, アメリカ

Kotake Kei: "Microphysical recipes to energize CCSN" Microphysics in Computational Astrophysics(招待講演). (2011年6/20-24). Perimeter institute, カナダ

- 21 Kotake Kei: "Multimessenger from CCSN" International symposium of symmetry energy(招待講演). (2011年6/17-19). Smith college, Massachusetts, アメリカ

{その他}

ホームページ等

<http://www.cis.fukuoka-u.ac.jp/~kkotake/kotake.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

固武 慶 (KOTAKE, Kei)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号: 20435506

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

滝脇 知也 (TAKIWAKI, Tomoya)

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・特任助教

研究者番号: 50507837

安武 伸俊 (YASUTAKE, Nobutoshi)

千葉工業大学・情報科学部・助教

研究者番号: 10532393