

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：57403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400281

研究課題名(和文) 多次元ダイナミクスと元素合成の両面から探る大質量星進化と超新星爆発

研究課題名(英文) Study on evolution of massive stars and their supernova explosion in the light of multi-dimensional hydrodynamics and nucleosynthesis

研究代表者

藤本 信一郎 (Shin-ichiro, Fujimoto)

熊本高等専門学校・制御情報システム工学科・教授

研究者番号：10342586

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本課題の主な成果は以下の3つである；(1)様々な質量の恒星に対して、非球対称な超新星爆発計算および超新星爆発中の元素合成計算を行い、放出ガスの化学組成と質量を見積もった。重力崩壊から300～400ミリ秒程度で超新星爆発が起こる場合、計算結果は太陽系組成・超新星の観測量を再現する。(2)開発した核反応熱の効果を検討した多次元流体力学コードを用いて超新星爆発への核反応熱の影響を議論した。核燃焼の効果は爆発・元素合成に対して比較的小さい。(3)定型的な反応率を用いた場合、 ^{44}Ti の放出量は超新星SN1987Aの観測値より小さいが、反応率の不定性の範囲内で上記の観測を再現可能である。

研究成果の概要(英文)：The project has three major outcomes; (1) By performing simulations of aspherical supernova (SN) explosion of progenitors, which have (10-40) solar masses and nucleosynthetic calculation in SN ejecta, I evaluate abundances and masses of elements of the SN ejecta. In case of early explosion, in which SN explosion occurs 300-400msec after the core-bounce, the evaluated abundances and masses of the ejecta well reproduce the solar abundances and observed masses of elements in SN1987A. (2) We have developed a 2D hydrodynamic code, in which heat produced through nuclear reactions are taken into account. I have examined effects of the heats on the SN explosion in terms of the 2D code. I found that the effects are small on the explosion and nucleosynthesis. (3) I found two progenitors(19.4 and 25 solar masses), whose SN ejecta have abundant ^{44}Ti comparable to the mass observed in SN1987A if I use experimental upper bound of ^{40}Ca (α,γ) ^{44}Ti rates and lower bound of ^{44}Ti (α,β) ^{47}V rates.

研究分野：高エネルギー宇宙物理

キーワード：超新星爆発 元素合成 大質量星進化 核反応

1. 研究開始当初の背景

(1) 重力崩壊型超新星(以下超新星)爆発は大質量星(太陽の8-10倍以上の質量)の進化の最終段階である。銀河全体に匹敵する明るさで輝き、典型的な爆発エネルギーは10の51乗 erg に達する。爆発の際に、大質量星進化途中に準静的に合成された元素および超新星爆発の際に爆発的に合成された元素を星間空間へと放出する。

超新星の爆発機構は、原始中性子星からのニュートリノ加熱機構が有望であると広く認識されているが、その詳細な爆発機構は解明されていない。理論・観測の両面から超新星爆発における非球対称性の重要性が明らかにされている。日本を含む複数のグループが、ニュートリノ輸送を考慮した精密な多次元流体力学コードを用いた超新星爆発の数値計算に取り組んでいるにも拘らず、観測と同程度のエネルギーをもった超新星爆発を未だ数値計算で再現できていない。

(2) 一方、超新星の親星である大質量星の進化は、球対称および準定常状態を仮定した恒星進化コードを用いて、調査されてきた。近年アリゾナ大 Arnett 教授等は、多次元流体力学コードを用いて球対称と定常の仮定を外し、重力崩壊1時間前(中心には鉄コアが形成)から数百秒間の大質量星進化を追った。[1] ([]付きの番号は本欄の最後に示す引用文献番号を表す)。

その結果、上記仮定を外して約5分後に広範囲に渡る酸素の急激な爆発(酸素爆発)が生じ、恒星中心部は非球対称となり、非定常状態に移行することが示された。ただし他グループによる結果の検証はなく結果の信頼性は明確ではない。また Arnett 教授等の研究では、赤道面对称を課し、大質量星の半分($\theta=0 \sim \pi/2$)の領域だけを計算している。さらに太陽質量の23倍の恒星のみを対象とし、非定常・非球対称酸素爆発の大質量星の恒星質量依存性は調査されていない。

(3) Arnett 教授等の研究で示された重力崩壊直前の酸素爆発が普遍的であれば、(酸素層はより広がるので)重力崩壊の際に酸素層から原始中性子星へ降着するガスの降着率(それに伴うラム圧)は減少し、爆発に有利に働くことが予想される。従って恒星進化最終段階における非球対称・非定常性を考慮すれば、球対称恒星進化が仮定された場合と比べ、超新星の爆発エネルギーはより増加することが期待される。このように大質量星進化最終段階における非球対称・非定常性が、観測と同程度の爆発エネルギーをもつ超新星爆発を再現する糸口となる可能性がある。

(4) さらに恒星進化最終段階における非球対称・非定常性は超新星爆発に伴い星間空間へと放出されるガスの化学組成にも影響を与えることが予想される。科研費基盤研究

C(H22-24年度)支援の下になされた研究において、(球対称大質量星進化計算に基づいて)放出ガス組成への超新星爆発の非球対称性の影響が調査された。爆発が、超新星で観測される爆発エネルギーと同程度の場合、放出ガス組成は太陽系組成を再現することが示された。しかし生成・放出される ^{44}Ti は超新星 SN1987A などの観測値と比べて1桁程度少ないことも明らかにされた。ただし ^{44}Ti 量は放出ガスのエントロピーに敏感であり、重力崩壊直前における酸素爆発の ^{44}Ti 放出量への影響は大きいことが予想される。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、多次元流体力学コードを用いて、非定常・非球対称効果を考慮し、重力崩壊直前の大質量星進化を計算して Arnett 教授等の結果を検証する。また同研究では行われていない上記結果の計算領域および恒星質量に対する依存性を調べ、Arnett 教授等の結果の普遍性を明らかにする。

(2) 次に非球対称・非定常大質量星進化計算結果に基づいて、核反応熱の影響を考慮しながら超新星爆発計算を行い、過去の数値計算では再現できない観測と同程度のエネルギーをもつ超新星の再現可能性を定量的に明らかにする。これまで大質量星進化の非球対称性・非定常性の超新星爆発への影響は調査されていない。

(3) さらに上記の超新星爆発計算に基づいて放出ガスの組成を定量的に見積もり、太陽系や低金属量星で観測された組成と比較する。上述の通り、過去の研究では再現できていない ^{44}Ti およびp核と呼ばれる質量数74以上の中性子の少ない安定な原子核(特に $^{92,94}\text{Mo}$ 、 $^{96,98}\text{Ru}$)の起源が明らかになる可能性がある。

3. 研究の方法

(1) 公開されている MESA コードを利用して、球対称を仮定し、様々な質量・金属量を持つ大質量星の進化計算を重力崩壊直前の段階まで行う。

(2) 超新星爆発における非球対称性および核反応熱の影響を調査する下準備として、様々な質量および金属量をもつ大質量星に対して、球対称を仮定して、重力崩壊計算を行う。計算には、開発済みのニュートリノ反応および現実的な状態方程式を考慮した流体力学コードおよび公開されている GR1D コードを利用する。

(3) 核反応・核反応熱の効果を組み込んだ多次元流体力学コードを開発する。多次元恒星進化計算を行うために、開発コードの並列化を行う。並列化には OpenMP もしくは MPI を用いる。

(4) 開発した核反応熱を考慮した流体力学コードを用いて、(2)の結果に非球対称摂動を与えた状態を初期条件として非球対称な超新星爆発計算を行う。超新星爆発への核反応熱の影響を明らかにする。また過去の数値計算では再現できない観測と同程度のエネルギーをもつ超新星の再現可能性を定量的に明らかにする。

(5) (4)の計算結果に基づいて、核反応ネットワークを用いて、超新星爆発中の放出ガスの組成進化を計算し、放出ガスの化学組成および様々な元素の放出質量を見つめる。その結果と様々な超新星の観測値とを比較する。太陽金属量を持った多数の恒星の超新星爆発の結果を平均し、その結果と太陽系組成とを比較する。同様に金属量 0 の多数の恒星の超新星爆発の結果を平均し、その結果と低金属量星の表面組成とを比較する。

(6) ^{44}Ti 観測量と理論計算結果との矛盾(理論値が観測値より一桁近く小さい)の原因を明らかにする。爆発のダイナミクスおよび核反応率の不定性に焦点を絞り、調査する。また上記の超新星爆発計算結果に基づいて、 p 核の放出量を見積もり、太陽系組成との比較を行う。特に起源が明確でない p 核 ($^{92,94}\text{Mo}$ 、 $^{96,98}\text{Ru}$ 、 ^{138}La 、 ^{180}Ta)の元素合成への非球対称性の影響を調査する。

4. 研究成果

本課題の主要な研究成果は以下の3つである；(1)多次元効果を考慮した重力崩壊型超新星爆発における元素合成の解明、(2)超新星爆発および元素合成への核反応熱の影響の解明、(3)超新星爆発における元素合成に重要な核反応の解明、である。

(1) 公開されている MESA コードを利用して、球対称および恒星の自転を考慮した場合に対して、15, 20, 40 倍の太陽質量を持つ大質量星の進化計算を重力崩壊直前の段階まで行った。太陽金属量および金属量 0 の二つの場合に恒星進化を計算した。

(2) 開発済みのニュートリノ反応および現実的な状態方程式を考慮した流体力学コードおよび公開されている GR1D コードを利用し、太陽の 10-70 倍の様々な質量を持つ恒星に対して、太陽金属量および金属量 0 の場合について、球対称を仮定して重力崩壊計算を行った。Woosley & Heger (2002)により計算・公開されている 100 個程度の超新星親星(重力崩壊直前まで進化した恒星)に対して、重力崩壊から衝撃波形成・伝播および定在衝撃波形成段階まで、同様の計算を行った。

(3) 核反応・核反応熱の効果を組み込んだ多次元流体力学コードを開発した。ただし開発

したコードの並列化までは至らなかった。開発コードを用いて、(2)の結果に非球対称摂動を加えた状態を初期条件として、非球対称超新星爆発計算を行い、超新星爆発への核反応熱の影響を議論した。爆発エネルギーへの核反応熱の影響はニュートリノ加熱効果と同程度かそれ以上であることを示した。ただし核反応熱中の多くは核子の再結合熱に起因し、核燃焼の効果は爆発および元素合成に対して比較的小さいことも分かった。またコアバウンスから 300~400 ミリ秒程度経過後に超新星爆発が生じる場合に観測と同程度のエネルギーを持った超新星となることを明らかにした。

(4) 多数の超新星親星に関して、超新星爆発計算を行った。その計算結果に基づいて、核反応ネットワークを用いて、超新星爆発中の放出ガスの組成進化を計算し、放出ガスの化学組成および様々な元素の放出質量を見積もった。太陽金属量を持った 25 個程度の超新星親星の放出物質を、初期質量関数(IMF)で重みをつけて平均し、その結果と太陽系組成とを比較した。

コアバウンスから 300~400 ミリ秒および 500~600 ミリ秒程度経過後に超新星爆発が生じる 2 つの場合に計算を行った。その結果、爆発が 300~400 ミリ秒程度後に爆発が生じる場合に、太陽系組成を再現できることが分かった。さらに II-P 型と呼ばれる超新星爆発において観測される爆発エネルギーと ^{56}Ni 生成量の相関関係が再現されること、および超新星 SN1987A の観測を再現する太陽の 20-25 倍の質量の親星が存在することが分かった。一方、爆発が遅い(コアバウンスから 500~600 ミリ秒程度)場合には、上記の観測結果は再現できない。また金属量 0 の多数の親星について同様の計算を行い、その結果を IMF で重みづけ平均した。低金属量星の表面組成の平均値を再現できることが分かった。

(5) 超新星爆発生成量の核反応率依存性に着目した。定型的な反応率を用いた場合、 ^{44}Ti の放出量は親星に依らず、超新星 SN1987A や超新星残骸 Cas A の観測値より小さいが、 $^{40}\text{Ca}(\beta^-)$ 、 ^{44}Ti 反応率の実験的上限值および $^{44}\text{Ti}(\beta^-)$ 、 ^{47}V の下限値を用いた場合、上記の観測を再現する親星(太陽質量の約 20 倍と 25 倍)が存在することを示した。さらに Cr・Mn 合成に重要な反応を特定し、これらの反応率を、超新星残骸での Cr・Mn 比の観測値から制限可能であることを示した。

(6) p 核合成への非球対称性の影響を調査した。多次元超新星爆発計算の結果に基づいて、 p 核の放出量を見積もった。 p 核は、(a) 恒星進化段階で合成された s 核(遅い中性子過剰核)の光分解反応、(b) Ba と Hf のニュート

リノ反応、および (c) 電子捕獲反応により中性子過剰な状態にある放出ガス中の反応、3 種の反応を通して生成されることが分かった。p 核は主に反応(a)を通して生成され、球対称を仮定した場合と同程度である。反応(b)により太陽系組成を説明可能な程度の ^{138}La および ^{180}Ta が生成される。反応(c)により ^{92}Mo より軽い p 核が合成されるが、 ^{94}Mo 、 ^{96}Ru 、 ^{98}Ru に関しては太陽系組成を説明できる程放出されない。

(7) 以上の計算は2次元流体力学コードを用いており、軸対称性の仮定の上記結果への影響を調査するために3次元流体コードを開発し、超新星爆発の3次元計算を行った。今後はこの3次元爆発計算に基づいて、元素合成計算を行う予定である。

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3件)

Yu Yamamoto, Shin-ichiro Fujimoto, Hiroki Nagakura, Shoichi Yamada, Post-shock-revival evolution in the neutrino-heating mechanism of core-collapse supernovae, *Astrophysical Journal* 771号、査読有、2013、27-37、DOI: 10.1088/004-637X/771/1/27

Motoaki Saruwatari, Masa-aki Hashimoto, Ryohei Fukuda, Shin-ichiro Fujimoto, R-Process Nucleosynthesis in MHD Jet Explosions of Core-Collapse Supernovae, *Journal of Astrophysics* 506146号、査読有、2013、1-13、DOI: 10.1155/2013/506146

Riou Nakamura, Masa-aki Hashimoto, Shin-ichiro Fujimoto, Katsuhiko Sato, Constraint on Heavy Element Production in Inhomogeneous Big-Bang Nucleosynthesis from the Light Element Observations, *Journal of Astrophysics* 587294号、査読有、2013、1-9、DOI: 10.1155/2013/587294

[学会発表](計17件)

藤本 信一郎、小野 勝臣、橋本 正章、固武 慶、非球対称な重力崩壊型超新星爆発における元素合成の大質量星質量依存性、日本天文学会 2017 年春期年会講演論文集、2017.03.15-18、九州大学(福岡県福岡市)

藤本 信一郎、小野 勝臣、橋本 正章、固武 慶、非球対称な重力崩壊型超新星爆発における元素合成の親星質量依存性、新学術「地下素核研究」第3回超新星ニュートリノ研究会、2017.03.04-05、東北大学(宮城県仙台市)

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake, Nucleosynthesis in asymmetric, core-collapse supernovae of massive stars, Proc. Nuclei in the Cosmos XIV, 2016.06.19-24, Niigata, Japan

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake, Nucleosynthesis in core collapse supernovae based on 2D hydrodynamic simulations, Ringberg 18th Workshop on Nuclear Astrophysics, 2016.03.14-18, Ringberg, Germany

藤本 信一郎、小野 勝臣、橋本 正章、重力崩壊型超新星爆発における Ni, Ti 元素合成、宇宙核物理連絡協議会研究会、2016.02.22-24、国立天文台(東京都三鷹市)

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake, Ti and Ni in a neutrino-driven, aspherical supernova, Workshop on Supernovae and Their Remnant, 2015.11.09-10, Kanagawa, Japan

藤本 信一郎、小野 勝臣、橋本 正章、固武 慶、非球対称な重力崩壊型超新星爆発における p 過程核元素合成、日本天文学会 2015 年秋期年会、2015.09.09-11、甲南大学(兵庫県神戸市)

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake, Nucleosynthesis in Aspherical Supernovae of Pop. III Stars, First stars, galaxies, and black holes - Now and Then, 2015.06.15-18, Groningen, Netherlands

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Kei Kotake, P-process nucleosynthesis in neutrino-driven, aspherical supernova explosion of massive stars, P-process workshop 2015: status and outlook, 2015.06.10-13, Limassol, Cyprus

藤本 信一郎、小野 勝臣、橋本 正章、Magnetar および Collapsar モデルに基づく r-process 元素合成 -- ニュートリノ吸収の影響、日本天文学会 2015 年春期年会講演論文集、2015.03.18、大阪大学(大阪府豊中市)

藤本 信一郎、小野 勝臣、橋本 正章、高速回転大質量星の磁気駆動型超新星爆発における r-process 元素合成、研究会「コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域」、2015.02.12-14、京都大学(京都府京都市)

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, R-process Nucleosynthesis in Baryon-Rich Jets from Collapsars and Magnetars, Proc.

XIII International Symposium on Nuclei in the Cosmos、2014.07.07-11、Debrecen、Hungary

藤本 信一郎、橋本 正章、小野 勝臣、固武 慶、Magnetar および Collapsar モデルに基づく r-process 元素合成、日本天文学会 2014 年春期年会 講演論文集、2014.03.19、国際基督教大学 (東京都三鷹市)

藤本 信一郎、固武 慶、橋本 正章、小野 勝臣、大西 直文、Pop.II・III 大質量星の非球対称重力崩壊型超新星爆発における爆発的要素合成、研究会「初代星・初代銀河研究会」、2014.01.22、鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto、Masaomi Ono、Kei Kotake、Production of Ti44 in neutrino-driven aspherical supernova explosions、Proc. of 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies、2013.11.18-22、Tsukuba、Japan

藤本 信一郎、小野 勝臣、橋本 正章、固武 慶、非球対称超新星爆発の放出ガス組成に対するニュートリノ照射の影響、日本天文学会 2013 年秋期年会 講演論文集、2013.09.10、東北大学 (宮城県仙台市)

Shin-ichiro Fujimoto、Masa-aki Hashimoto、Masaomi Ono、Kei Kotake、Effects of neutrino interactions on nucleosynthesis during neutrino-driven、aspherical supernovae、Proc. VI International symposium on Nuclear Physics in Astrophysics、2013.05.19-24、Lisbon、Portugal

〔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〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 信一郎 (FUJIMOTO、Shin-ichiro)

熊本高等専門学校・

制御情報システム工学科・教授

研究者番号：10342586

(2) 研究分担者：なし

(3) 連携研究者：なし

(4) 研究協力者：なし