

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400271

研究課題名(和文) 超新星の観測と理論へ向けた大質量星進化データベースの開発

研究課題名(英文) Development of massive star evolution database for supernovae

研究代表者

吉田 敬 (Yoshida, Takashi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：80374891

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々は太陽の10-20倍の初期質量を持つ大質量星、太陽の100倍以上の質量を持つ巨大質量星、進化した近接連星を想定したCO星など多様な大質量星の進化について調べた。そして、我々は計算で得られた最終的な星の構造を多様な超新星のモデルに適用し、観測された超新星と大質量星との関係について調べた。また、将来の近傍超新星からの超新星前兆ニュートリノの観測可能性について調べ、ニュートリノ観測から超新星爆発直前の星の構造進化を推定可能なことを示した。今後は大質量星の最終的な内部構造をデータベースとして公開する予定。

研究成果の概要(英文)：We investigate the evolution of various massive stars such as stars with the initial mass of 10-20 solar-mass, very massive stars, and CO stars supposing a star evolved in a close binary system. We apply the calculated evolved stars to various supernova models. Then, we investigate the relation between a variety of SNe recently observed and the massive stars. We also investigate the observational possibility of presupernova neutrinos from future nearby supernovae. The observations of presupernova neutrinos would reveal the evolution of the internal structure of a massive star just before the supernova explosion. We will release the database of the structure and composition of the presupernova stars.

研究分野：理論天文学、宇宙物理学

キーワード：大質量星 超新星 元素合成 ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

大質量星は太陽の約 10 倍以上の初期質量を持つ星で、星の一生を終える時には鉄コアを形成して中心部が重力崩壊する。そしてその多くは最終的に超新星爆発を起こすことが知られている。近年、超新星 (supernova: SN) の中に極超新星、超高輝度超新星 (super luminous SN: SLSN)、ガンマ線バーストに付随する超新星など多様な超新星が観測されている。これらの超新星の観測的な特徴や爆発機構は星の初期質量や重元素量、質量放出や角運動量輸送など大質量星の進化中に起こる現象に関係すると考えられ、個々の超新星の特徴を理解するには超新星の親星としての大質量星の進化を広く知る必要がある。また、超新星爆発の爆発機構はまだ十分に解明されているわけではなく、爆発の可否を決める要因のひとつに爆発直前の星の構造が挙げられている。そのため、超新星の親星としての大質量星の進化を調べることは非常に重要である。

現在日本には Super-Kamiokande や KamLAND という大規模なニュートリノ観測装置があり、大型重力波観測装置 KAGRA が開発中である。これらの装置を使えば近傍で超新星が爆発した際には超新星から来るニュートリノや重力波を観測することができる。これに対して超新星探索や近傍超新星の観測へ向けた大質量星の構造の理論的なテンプレートはまだ十分に用意されていない。そこで、我々はさまざまな初期質量、重元素量、星の回転速度の場合についての大質量星の最終的な構造を用意し、突発天体が観測される際には短時間で多くの情報を引き出せる体制を作る必要がある。

研究代表者は研究分担者とこれまで共同研究を続けながら大質量星の進化を計算するコードを開発してきた。研究分担者が主催する研究室は大質量星の進化を自分たちが開発したコードで重力崩壊直前まで計算できる世界でも数少ない研究グループのひとつである。我々は大質量星の進化コードに星の自転を取り入れた回転大質量星の進化コードを開発し、いくつかの大質量星のモデルについて重力崩壊直前までの進化の計算に成功している。

2. 研究の目的

(1) 現在大規模な超新星探索で調べられている銀河の金属量の範囲より広めである太陽の 1/20 から太陽程度の重元素質量比で広い初期質量範囲の大質量星について水素燃焼から重力崩壊直前または爆発するまで計算して超新星爆発直前の親星の構造を系統的に示す。

(2) 上記の計算を星の自転の効果を入れて

計算することで、回転大質量星が進化した重力崩壊直前の超新星の親星の構造を系統的に明らかにする。

(3) 超新星前兆ニュートリノなど大質量星の最終進化における超新星の前兆現象の観測可能性について調べる。そして観測から超新星爆発直前の大質量星の内部構造についてどのようなことがわかるかを議論する。

(4) 極超新星、超高輝度超新星、電子陽電子対生成型超新星 (pair instability SN: PISN) など特殊な超新星について親星となる大質量星の進化と超新星爆発について調べる。また、これら超新星における元素合成過程を計算しそれぞれの超新星から放出される元素組成の特徴について議論する。

(5) 本研究で計算した大質量星の進化の結果としての重力崩壊直前における大質量星の内部構造および組成分布をデータベース化して公開する。

3. 研究の方法

(1) 水素燃焼から重力崩壊直前または爆発するまでに至る大質量星の進化を計算する。ここで、広い初期質量と金属量の範囲について系統的に調べる。

(2) 計算された大質量星の進化の結果を初期条件として超新星爆発の流体計算を行う。さらに得られた結果を用いて元素合成計算を行い、超新星爆発により放出される元素合成の特徴を調べる。

(3) (2) で得られた超新星モデルの結果と金属欠乏星における組成分布や特徴的な光度曲線を示す超新星などこれまで得られている観測結果とを比較し、超新星の親星の特徴について議論する。ここでは、PISN と金属欠乏星の組成、脈動電子陽電子対生成型超新星 (pulsational pair instability SN: PPISN) と超高輝度超新星、連星系で進化した ultra-stripped 超新星と暗く短時間で減光する光度曲線を示す Ic 型超新星、SN 1987A に対応する大質量星などについて調べる。

(4) 大質量星の進化の結果を用いて大質量星の最終進化の時に放出されるニュートリノのスペクトルの時間変化を求める。そして、KamLAND や Super-Kamiokande という稼働中のニュートリノ観測装置と Hyper-Kamiokande など次世代のニュートリノ観測装置による超新星前兆ニュートリノのイベント数の時間変化を調べる。

4. 研究成果

(1) 銀河系の八口には鉄の存在度が太陽の

1/1000 以下の超金属欠乏星が存在している。このような星はその元素存在度に宇宙初期に形成された初期金属量が 0 の初代大質量星が進化した超新星爆発の痕跡を残していると考えられている。我々はこのような超金属欠乏星の元素組成の特徴を再現する初代大質量星の質量や星の自転に関する特徴について調べた。

我々はまず自転を考慮した初代大質量星の進化を計算し、弱い超新星爆発を起こした星の元素組成の特徴について調べた。そして、40-60 太陽質量の大質量星において Mg と Si の過剰を得た。また、回転星のモデルでは Na と Al の過剰が得られ、80 太陽質量を超える非回転星では Ca が合成された。

我々はこれらの特徴を持つ弱い爆発の初代超新星の組成分布を炭素過剰な hyper-metal-poor-star の元素組成と比較した。そして、これまで観測されている最も金属量が少ない SMSS 0313-6708 の組成分布を 50-80 太陽質量の非回転星が爆発した弱い超新星爆発でよく説明できることを示した。

我々はまた、宇宙初期に存在した可能性がある PISN における元素合成について調べ、金属欠乏星の元素組成の特徴と比較した。我々はまず 100-290 太陽質量の初代大質量星の進化を計算し、PISN になる大質量星の質量範囲を調べた。そして、非回転星と磁場の効果を考慮した回転星では中央部分の C0 コアの質量が ~80-135 太陽質量となる星が PISN になることを得た。我々は組成分布について PISN の放出物質と金属欠乏星を比較した。その結果、観測されている金属欠乏星では PISN の特徴と一致するものは見られなかった。

(2) C0 コアの質量が ~40-60 太陽質量となる大質量星は炭素燃焼後に電子陽電子対生成を起因とする不安定による脈動(PPI)を起こし星の外層の一部を放出する。我々はこのような星における進化と質量放出について調べた。ここでは太陽の 1/5 の金属量を持つ 140, 200, 250 太陽質量の星の進化と PPI について調べた。これらの星は炭素燃焼に至るまでに質量放出によって水素層の全てとヘリウム層の大部分を失い、表面に約 20%のヘリウムを残した ~54-61 太陽質量の Wolf-Rayet 星に進化した。これらの星はネオン燃焼以降に PPI により ~1-2000 年の間隔で脈動を起こしながら重力崩壊に至る。初期質量が大きいほど脈動の周期は長くなり一度に放出される物質の質量は大きくなった。繰り返される物質放出と放出された物質同士の衝突によりこれらの星は断続的に明るく光る。この脈動により星の光度は -16 ~ -20 等になる。この星が超新星爆発になる場合にはこれよりもさらに明るく輝くことを示した。このような天体は I 型の超高輝度超新星や前駆的な増光を持つ超新星として観測されるだろう。

(3) 超新星 SN 1987A は約 30 年前に大マゼラン雲で爆発した超新星である。この超新星は非常に近くで爆発したことから多くの観測が行われてきたが、この超新星の親星の性質についてはこれまで十分に明らかにはされていなかった。我々は星の融合を考慮して SN 1987A の親星の観測から得られた性質を再現する大質量星進化モデルを求めた。その結果、SN 1987A の親星の赤色超巨星から青色超巨星に進化する期間、最終質量、最終的な HR 図の位置という観測結果が 14 太陽質量と 9 太陽質量のふたつの星の融合によりできた星でよく説明することができた。

(4) ultra-stripped 超新星は中性子星との近接連星系にある大質量星が進化した超新星で、進化の過程で連星相互作用により水素層の全てとヘリウム層の大部分が失われた星が爆発する超新星である。この超新星は外層がほとんど存在しないため爆発時に放出される物質が少ない。そのため超新星爆発の後に中性子星の連星が残ることができる。それゆえ ultra-stripped 超新星は合体する中性子星連星の起源天体のひとつと考えられている。

我々は ultra-stripped 超新星の親星を想定した 1.45-2.0 太陽質量の C0 星の進化を計算した。これらの星ではネオン、酸素、ケイ素が中心から離れたところで燃焼し、その後最終的に鉄コアが形成されて重力崩壊した。我々はまた ultra-stripped 超新星の 2 次元ニュートリノ輻射流体シミュレーションを行った。その結果、これらの超新星の爆発エネルギーは約 10^{50} erg、放出物質質量と生成される ^{56}Ni の量はそれぞれ ~0.1、~0.01 太陽質量と得られた。そして爆発後には約 1.3 太陽質量の中性子星が残った。

我々はまた、1.45、1.5 太陽質量の C0 星が進化した ultra-stripped 超新星における元素合成について調べた。これらの星では最大で ~0.01 太陽質量の Ga-Zr という重元素が生成されることがわかった。ただし、これらの生成量は超新星放出物の中性子過剰度に強く依存する。また、 ^{56}Ni も ~0.006-0.01 太陽質量生成される。我々はまた、ultra-stripped 超新星の光度曲線を見積もった。これらの超新星の最大光度は -15 ~ -16 等級で、短時間に減衰する暗い超新星の特徴をよく説明することができる。

(5) 超新星爆発が地球から数 100 パーセクという近傍で起きる場合には、超新星爆発を起こす直前の大質量星が放出するニュートリノが KamLAND や Super-Kamiokande という現在稼働中のニュートリノ観測装置や JUNO や Hyper-Kamiokande という次世代のニュートリノ観測装置で観測されると考えられている。このようなニュートリノを超新星前兆ニュートリノという。我々は 12、15、20 太陽質量の星が進化した超新星爆発直前のケ

イ素燃焼以降の星から放出されるニュートリノのエネルギースペクトルの時間進化を計算した。そして、現在や次世代のニュートリノ観測装置によって観測されるニュートリノのイベント数の時間変化を予測した。その結果として JUNO など次世代の 20kton サイズの液体シンチレータ型ニュートリノ観測装置を用いれば約 200 パーセクのところで超新星が起こると超新星爆発の前の段階で数 100 個のニュートリノが観測される可能性があることを示した。我々はまた Gd を加えた Hyper-Kamiokande における後発ガンマ線信号を用いた超新星前兆ニュートリノの検出についても議論した。我々は爆発直前の星の内部構造の時間変化と超新星前兆ニュートリノとの関係についても議論した。ケイ素燃焼以降超新星爆発に至るまでの大部分の時間ではニュートリノイベントの発生率は時間とともに増加する。しかし、酸素やケイ素の shell 燃焼が強くなる時には一時的にニュートリノイベントの発生率が減少する。そのため、ニュートリノイベント率の時間発展から大質量星内部における燃焼過程の時間変化を推定できる。これにより超新星爆発 1 日前くらいの大質量星の最終的な進化を観測することができるだろう。

我々は重力崩壊型超新星の中で最も軽い部類の電子捕獲型超新星の爆発直前における星からのニュートリノ放出についても調べた。電子捕獲型超新星においては数 100 パーセクという近傍で爆発が起こる場合においても爆発前のニュートリノを検出することは難しいということが得られた。そのため、近傍で弱い爆発の超新星が起きる場合には超新星前兆ニュートリノの観測から超新星の親星が鉄コアを形成した重力崩壊型超新星か酸素ネオンコアからの電子捕獲型超新星かを区別することができる可能性がある。

(6) 現在、9-40 太陽質量の初期質量を持つ大質量星の進化を系統的に計算している。その中で初期質量に対するコア質量や質量放出率に影響を及ぼす対流層境界における混合効率(overshoot)のパラメータに不定性があるため、ここでは 2 通りのパラメータを用いて計算をしている。また、炭素燃焼以降におけるこの混合効率についても観測的な制限はないため、この部分についても 2 通りのパラメータで計算を行っている。これら大質量星の進化の計算後、超新星前兆ニュートリノの観測可能性と超新星前兆ニュートリノを用いた超新星爆発の予測について議論する。また、得られた最終的な大質量星の内部構造と組成分布をデータベース化して公開する予定。

5. 主な発論文等

(研究代表者、究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 15 件)

Koh Takahashi, Takashi Yoshida, Hideyuki Umeda, Stellar Yields of Rotating First Stars. II. Pair Instability Supernovae and Comparison with Observations, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 857, 2018, 111 (22pp).

DOI: 10.3847/1538-4357/aab95f

Takaki Urushibata, Koh Takahashi, Hideyuki Umeda, Takashi Yoshida, A progenitor model of SN 1987A based on the slow-merger scenario, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 査読有, 473, 2018, L101-L105.

DOI: 10.1093/mnras/slx166

DOI: 10.1017/S1743921317002502

Takashi Yoshida, Yudai Suwa, Hideyuki Umeda, Masaru Shibata, Koh Takahashi, Explosive nucleosynthesis of ultra-stripped Type Ic supernovae: application to light tran-iron elements, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 471, 2017, 4275-4285.

DOI: 10.1093/mnras/stx1738

Chinami Kato, Hiroki Nagakura, Shun Furusawa, Koh Takahashi, Hideyuki Umeda, Takashi Yoshida, Neutrino Emission in All Flavors up to the Pre-bounce of Massive Stars and the Possibility of Their Detections, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 848, 2017, 48 (17pp).

DOI: 10.3847/1538-4357/aa8b72

Takashi Yoshida, Yudai Suwa, Hideyuki Umeda, Masaru Shibata, Koh Takahashi, Explosive nucleosynthesis of ultra-stripped Type Ic supernovae, *JPS Conference Proceedings*, 査読有, 14, 2017, 20501 (3pp).

DOI: 10.7566/JPSCP.14.020501

Takashi Yoshida, Koh Takahashi, Hideyuki Umeda, Koji Ishidoshiro, Presupernova neutrino events relating to the final evolution of massive stars, *Physical Review D*, 査読有, 93, 2016, 123012 (20pp).

DOI: 10.1103/PhysRevD.93.123012

Takashi Yoshida, Hideyuki Umeda, Keiichi Maeda, Tatsuo Ishii, Mass ejection by pulsational pair instability in very massive stars and implications for luminous supernovae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 457, 2016, 351-361.

DOI: 10.1093/mnras/stv3002

Koh Takahashi, Takashi Yoshida, Hideyuki Umeda, Kohsuke Sumiyoshi, Shoichi Yamada, Exact and approximate expressions of energy generation rates and their impact on the explosion properties of

pair instability supernovae, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 456, 2016, 1320-1331.

DOI: 10.1093/mnras/stv2649

Yudai Suwa, Takashi Yoshida, Masaru Shibata, Hideyuki Umeda, Koh Takahashi, Neutrino-driven explosions of ultra-stripped Type Ic supernovae generating binary neutron stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 454, 2015, 3073-3081.

DOI: 10.1093/mnras/stv2195

Koh Takahashi, Hideyuki Umeda, Takashi Yoshida, Stellar Yields of Rotating First Stars. I. Yields of Weak Supernovae and Abundances of Carbon-enhanced Hyper-metal-poor Stars, The Astrophysical Journal, 査読有, 794, 2014, 40 (17pp).

DOI: 10.1088/0004-637X/794/1/40

〔学会発表〕(計 16 件)

吉田敬、「Ultra-stripped 超新星における爆発的元素合成」、日本天文学会 2017 年春季年会、2017 年。

Takashi Yoshida, “Explosive nucleosynthesis in ultra-stripped supernovae”, Long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop on “Nuclear Physics, Compact Stars, and Compact Star Mergers 2016”, 2016.

吉田敬、「超新星ニュートリノの観測が示す大質量星の最終進化」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年。

吉田敬、「Gd を入れた Super-Kamiokande と Hyper-Kamiokande による超新星前兆ニュートリノの観測」、日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年。

Takashi Yoshida, “Luminous transients by mass ejection from very massive stars through pulsational pair-instability”, The Supernovae through the Ages Conference, 2016.

Takashi Yoshida, “Observations of presupernova neutrinos relating to the final evolution of massive stars”, XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 2016.

Takashi Yoshida, “Neutrino events from presupernova stars”, Many Riddles About Core-Collapse Supernovae: 1 Bethe and Beyond, 2016.

Takashi Yoshida, “Explosive nucleosynthesis of ultra-stripped Type Ic supernovae”, 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV, 2016.

吉田敬、「超新星前兆ニュートリノの観測と大質量星の最終進化」、日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年。

Takashi Yoshida, “Neutrino emission from nearby supernova progenitors”, XIV

International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 2015.

吉田敬、「重力崩壊型超新星にある軽い C 星の進化」、日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年。

吉田敬、「大質量星のケイ素燃焼におけるニュートリノ観測の可能性」、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年。

Takashi Yoshida, “Type Ic core-collapse supernovae evolved from very massive stars”, Nuclei in the Cosmos XIII, 2014.

〔その他〕

ホームページ等

今後ホームページにデータベースを作成予定。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 敬 (YOSHIDA Takashi)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員
研究者番号：80374891

(2) 研究分担者

梅田 秀之 (UMEDA Hideyuki)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：60447357