

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540262

研究課題名(和文) 初代と第二世代の種族 III 星への異なる質量降着が引き起こす超新星とその元素合成

研究課題名(英文) The first and second generations of population III supernovae and their nucleosynthesis

研究代表者

野本 憲一 (NOMOTO, Ken'ichi)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：90110676

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)：宇宙で最初に誕生した初代の星、すなわち重元素を含まない種族 III の星には、巨大な質量の III.1 星と普通の大質量星である III.2 が存在することが予測されていた。本研究では、超新星の元素合成や光度曲線のモデルと観測との比較によって、種族 III.1 と III.2 に対応する天体を示唆することに成功した。すなわち重元素含有量の極めて少ない星を作った初代の超新星の多くは III.2 に属するが、確証には Ca の起源の解明が必要である。また超輝度超新星には 2 種類あり、光源がマグネターの場合は III.2 であるが、星周物質との衝突や放射性元素が光源の場合は、III.1 の巨大質量星の爆発である可能性が大きい。

研究成果の概要(英文)：The First Stars in the Universe, which contain no heavy elements and are called Population III stars, have been predicted to consist of Pop III.1 and III.2 depending on their masses. In the present study, we succeeded to provide the observational indications for Pop III.1 and III.2 stars. Namely, the elemental abundance patterns of extremely metal-poor stars indicate that most of the first generation supernovae belong to Pop III.2, although the clarification of the origin of Ca is necessary. Superluminous supernovae may have two kinds, i.e., magnetar-powered supernovae are Pop III.2, while Pop III.1 supernovae are powered by collision or radioactive decays.

研究分野：天文学

キーワード：超新星 金属欠乏星 元素合成 初代星 矮小銀河

1. 研究開始当初の背景

ビッグバン宇宙論においては、大規模構造形成がコールド・ダークマター・シナリオにより、よく再現されている。そして、初期宇宙の暗黒時代に終わりを告げる初代星の形成に始まる宇宙の黎明期の解明が、観測的にも理論的にも現在の宇宙論の主要な課題となっている。初代星がどのような星であり、どのような進化をし、どのような超新星爆発を起こしたかは、宇宙の再電離の源が何であったか、巨大質量および中間質量ブラックホールがどのような種から形成されてきたか、そして、初代銀河がどのように形成されたか、宇宙の元素がどのように形成されていったか、などの現在の天文学の大きな課題を解決する重要なカギである。このような背景は、研究開始時から現在に至るも変わっていない。

初代星の形成過程は、3次元流体力学的シミュレーションにより、理論的な理解が進んできた。それによれば、重元素を含まない種族 III のガスは水素分子によって冷却し、1000 Msun を越す非常に大きなジーンズ質量の段階で原始星へと分裂していき、わずか 0.01 Msun の原始星として誕生する。その後の初代星は大質量の原始ガス雲の中で、大量のガスを降着して大質量星となると想定されている。さらに、その種族 III の星には、初代星としての種族 III.1 の星と、初代星に熱的力学的影響を受けたガスから形成される第二世代の種族 III.2 の星とがある。種族 III.2 のガスは、水素分子(H₂) がいったん解離され再結合する中で、HD 分子による冷却が重要となり、ジーンズ質量は 50Msun 程度にまで小さくなる。この2種類の種族 III の星の存在とその進化が、その後の宇宙の進化にどのような影響を与えたかは、質量降着段階の詳細な計算が開始された段階で、重要な課題として残されている。

2. 研究の目的

宇宙の初期に形成された重元素を含まない種族 III の星の進化は、宇宙の元素の起源、宇宙の再電離の源、巨大および中間質量ブラックホールの起源の問題とも密接に関連して、現在の天文学の焦点の一つである。種族 III の星には、初代星としての種族 III.1 の星と、初代星に熱的力学的影響を受けて形成される種族 III.2 の星とがある。本研究では、これらの星が、どのように大質量星に進化していくか、どのようなタイプの超新星を引き起こし、どのような重元素を宇宙空間に放出するか、種族 III.1 と III.2 の星に降着率の違いにより、どのような違いが生じるかの理論的予測をたて、元素組成などの観測との比較から、初期天体の性質と進化を探求する。種族 III の星がどのような爆発をする星であるかが明らかになれば、宇宙の再電離源の

重要な手掛かりとなる。それらの星がどのようなフィードバック効果を種族 III の銀河に与えるのか、それが、その後の初期天体の進化にどう影響するかなどを理解する手がかりとなる。

種族 III の星の非球対称爆発モデルの構築はガンマ線バースト立つ。逆にガンマ線バーストから、種族 III 星に関するどのような情報が得られるかが分かる。

3. 研究の方法

種族 III の星の初期質量関数がどのようなものになるかは、質量降着過程に原始星からの輻射がどのように影響して質量降着を止めるのか(Feedback)の simulation が Hirano et al. により行われ、予備的な結果が得られ始めた。それによれば、HD 分子による冷却の有無により降着ガスの温度に大きな差が生じ、質量関数に 10-50 Msun と 50-1000 Msun の2つの質量範囲のピークが形成される。これが、種族 III.1 と III.2 に対応しているのか、単にガス雲の質量に対応しているのかは、明らかにされていない。本研究では、HD 分子による冷却の効いた低温ガスの降着によって形成された低質量側(10-50 Msun)の星が種族 III.2、高質量側(50-1000 Msun)の星が種族 III.1 の形成を simulate しているものと見なして、以下のような方法で研究を進めた。

(1) 金属欠乏星の元素組成を使った、初代超新星の質量の推定：

これまで計算された多数の極超新星・超新星の元素合成モデルの予測する化学組成を、銀河のハローや矮小銀河で観測されている極端な金属欠乏星の元素組成と比較検討する。観測される特異な元素組成を説明するような星の質量、爆発エネルギー、非球対称の程度などを推定する。それにより、初代超新星が種族 III.1 と III.2 のどちらに属するかの推測を行う。

(2) 超高輝度超新星の親星の質量の推定：最近、観測例の増えてきた Superluminous Supernova(超高輝度超新星)の爆発機構の解明により、親星の質量が極端に大きな種族 III.1 に対応するものかどうかを明らかにしていく。考慮する爆発機構には、Pair-Instability Supernovae、星周物質と超新星との衝突、マグネターモデルである。

(3) 爆発による元素合成の計算：上述した方法の基礎として、極超新星の爆発を含む超新星に伴う元素合成を近似的に再現するために、爆発時の mixing-fallback process をより多くの parameter space で調べる。

(4) 種族 III 星の進化の解析：同じく、上述した方法の基礎として、重元素

を含まない種族 III 星の前主系列の段階から主系列星への進化、すなわち、まず 3 過程によって C が生成された後に、CNO-cycle による主系列に落ち着く過程を詳細に調べる。これは、Ca 生成の有無が、鉄を含まないような、金属欠乏星の元素組成を形成する星の質量に重要な制約を与えるからである。

4. 研究成果

(1) 新たに報告された、鉄が観測されない星 ($[Fe/H] < -7$) の元素組成の分析と、それを説明する星の進化と超新星爆発のモデルの解析を行った。その結果、注目すべき点として、微量ながら有意に存在するカルシウムに 2 つの起源があることを見出した。すなわち、爆発前の Hot-CNO cycle で生成される場合と、爆発時に生成される場合である。前者の場合は爆発した星の質量が非常に大きく、初期 CNO 量が極端に少ないという制限がつく。すなわち、種族 III.1 の初代星である可能性が高い。それに対して、後者の場合は、2.5 - 4.0 Msun の星の mixing-fallback によって、Ca を表面に運ぶことは可能である。すなわち種族 III.2 と考えてよいことになる。他の鉄欠乏星の元素組成と比較して、種族 III.1 と III.2 の星の初期質量関数の差を明らかにする上で、カルシウムと鉄より重い元素の含有量が重要な手がかりとなることが判明した。

(2) 低アルファ・金属欠乏星の起源: $[O, Mg, Si/Fe]$ がハロー星より低い、低アルファ星の起源については、(a) Ia 型超新星の寄与が金属量の極端な環境でも起こって、鉄を増加させている、(b) 10 Msun 程度の低質量星の重力崩壊型超新星、という 2 つの可能性がこれまで指摘されていた。本研究では、低アルファ星の組成も、2.5 - 4.0 Msun の星の高エネルギーの爆発によって Fe を多く作る場合が最もよく観測を説明することを示した。したがって種族 III.1 に属する可能性が高い。

(3) 従来の超低金属量の星の化学組成は、鉄の含有量は少ないものの、炭素と鉄の比が太陽比の 1 万倍もあって、炭素による冷却とダストの形成による第 2 世代の小質量の星の形成は可能であった。最近の炭素量も少ない低質量星の発見によって、第 2 世代の小質量の星の形成過程の新たな問題が提起された。本研究では、金属量非常に少ないガス雲中で星の形成が進行する場合、重元素ガス降着によってダストがどう成長するかを調べ、金属量が太陽の 10 万分の 1 ほどしかない収縮ガス中でもダストの成長が効率的に起きることを示した。その結果、成長したダストの熱放射によるガスの冷却によって、ガス雲は太陽質量の 0.1 倍程度のガス塊へと分裂することが可能になり、現在最も金属量の低い

星として知られている SDSSJ102915+172927 (金属量が太陽の 10 万分の 1) のような低質量の星の形成過程を説明できるようになった。種族 III.1 星の超新星爆発時におけるダスト形成、および収縮ガス雲でのその成長が次世代以降の小質量星形成に不可欠であることを示した。

(4) 最近発見されはじめた 超高輝度超新星 (Super-luminous supernovae) がどの程度の大質量の星の爆発なのか、どの程度の鉄その他の元素を放出する超新星なのか、種族 III.1 あるいは III.2 にどう関係しているのかを推定することに主眼をおいて研究を進めた。そのために、Super-luminous supernovae の一つである Ic 型超新星 1999as の光度曲線とスペクトルのモデルと観測から、質量、爆発エネルギーなどを推定する研究をおこなった。主系列で 100 Msun 近い大質量星の爆発モデルが明るさのピーク付近の観測をよく説明する結果が得られた。しかしながら、後期の光度曲線は星周物質との衝突を示唆しており、明確な結論を得るためには、衝突モデルの計算が必要である。

他の I 型超高輝度超新星も、単一の爆発機構では十分再現できない例が多いという結果が得られた。Magnetar model であれば、種族 III.2, 大量の星周物質との衝突モデルであれば種族 III.1, 放射性元素の崩壊モデルであれば両者が可能である。

(5) 種族 III.1 と III.2 の星の初期質量関数の差が宇宙初期の星や銀河の化学組成に顕著に現れてくるのは、重力崩壊型超新星の質量範囲の上限と下限の違いによるところが大きいと予想される。特に、質量範囲の下限に近い星の進化と元素合成、その超新星爆発は、星の数が相対的に多いだけに重要である。その点で、従来の星の進化の研究で不明確だったこと、すなわち、星が $O+Ne+Mg$ から成るコアを形成した段階でネオンの shell flash を起こした場合に、電子捕獲型超新星を起こす質量範囲があることを新たに明らかにできた。これは重要な達成点である。さらに、この型の超新星がストロンチウム、ジルコニウムなどの弱 r プロセス元素を多く合成し、銀河系初期における鉄より重い元素の重要な供給源となり得ることを示した

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 12 件)

Jones, S., Hirschi, R., and Nomoto, K., The Final Fate of Stars that Ignite Neon and Oxygen Off-center: Electron Capture or Iron Core-collapse Supernova?, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 797, 2014, id. 83 (8

pages)

DOI: 10.1088/0004-637X/797/2/83

Bersten, M. C., Benvenuto, O. G., Folatelli, G., and Nomoto, K., iPTF13bvn: The First Evidence of a Binary Progenitor for a Type Ib Supernova, *The Astronomical Journal*, 査読有, Vol. 148, 2014, id. 68 (6 pages)

DOI: 10.1088/0004-6256/148/4/68

Ishigaki, M. N., Tominaga, N., Kobayashi, C., and Nomoto, K., Faint Population III Supernovae as the Origin of the Most Iron-poor Stars, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Vol. 792, 2014, id. L32 (6 pages)

DOI: 10.1088/2041-8205/792/2/L32

Kobayashi, C., Ishigaki, M. N., Tominaga, N., and Nomoto, K., The Origin of Low $[\alpha/\text{Fe}]$ Ratios in Extremely Metal-poor Stars, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Vol. 785, 2014, id. L5 (5 pages)

DOI: 10.1088/2041-8205/785/1/L5

Tominaga, N., Blinnikov, S. I., and Nomoto, K., Supernova Explosions of Super-asymptotic Giant Branch Stars: Multicolor Light Curves of Electron-capture Supernovae, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 771, 2013, id. L12 (6 page)

DOI: 10.1088/2041-8205/771/1/L12

Jones, S., Hirschi, R., and Nomoto, K., 他 8 名, Advanced Burning Stages and Fate of 8-10 Msun Stars, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 772, 2013, id.150 (14 page)

DOI: 10.1088/0004-637X/772/2/150

Moriya, T. J., Blinnikov, S. I., Tominaga, N., Yoshida, N., Tanaka, M., Maeda, K., and Nomoto, K., Light-curve modelling of superluminous supernova 2006gy: collision between supernova ejecta and a dense circumstellar medium, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 428, 2013, pp. 1020-1035

DOI: 10.1093/MNRAS/sts075

Kamiya, Y., Tanaka, M., Nomoto, K., Blinnikov, S. I., Sorokina, E. I., and Suzuki, T., Super-Chandrasekhar-mass Light Curve Models for the Highly Luminous Type Ia Supernova 2009dc, *The*

Astrophysical Journal, Vol. 756, 2012, id. 191 (12 pages)

DOI:10.1088/0004-637X/756/2/191

Nozawa, T., Kozasa, T., and Nomoto, K., Can the Growth of Dust Grains in Low-metallicity Star-forming Clouds Affect the Formation of Metal-poor Low-mass Stars?, *The Astrophysical Journal*, Vol. 756, 2012, id. L35 (5 pages)

DOI: 10.1088/2041-8205/756/2/L35

Tanaka, M., Kawabata, K. S., Hattori, T., Mazzali, P. A., Aoki, K., Iye, M., Maeda, K., Nomoto, K., Pian, E., Sasaki, T., and Yamanaka, M., Three-dimensional Explosion Geometry of Stripped-envelope Core-collapse Supernovae. I. Spectropolarimetric Observations, *The Astrophysical Journal*, Vol. 754, 2012, id. 63 (10 pages)

DOI: 10.1088/0004-637X/754/1/63

Tanaka, M., Moriya, T., Yoshida, N., and Nomoto, K., Detectability of High-Redshift Superluminous Supernovae with Upcoming Optical and Near-Infrared Surveys, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 422, 2012, pp. 2675-2684
DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.20833.x

Nomoto, K., Maeda, K., Tanaka, M., and Suzuki, T., Gamma-Ray Bursts and Magnetar-forming Supernovae, *Astrophysics and Space Science*, Vol. 336, 2011, pp. 129-137

DOI:10.1007/s10509-011-0658-1

[学会発表](計 7件)

Nomoto, K., Final Evolution of Spinning White Dwarfs (招待講演), International Conference on Type Ia Supernovae, 2014年9月18日, Chicago, USA

Nomoto, K., Hypernova Nucleosynthesis (招待講演), INT Conference 14-56w: "The r-process: status and challenges", 2014年7月28日, Seattle, USA

Nomoto, K., Supernova Yields for Chemical Evolution Modeling (招待講演), International Astronomical Union Symposium No. 298: "Setting the scene for Gaia and LAMOST--the

current and next generations of surveys and models”, 2013年5月22日, Lijiang, China

Nomoto, K., Recent Developments in Supernova Models (review talk), International Astronomical Union Symposium No. 296: “Supernovae Environmental Impacts”, 2013年1月7日, Raichak, India

Nomoto, K., Binary stellar evolution leading to SN explosions (Review talk), ESO/MPA/MPE Workshop “Supernovae Illuminating the Universe: from individuals to Populations”, 2012年9月11日, Garching, Germany

Nomoto, K., First Supernovae & Gamma Ray Bursts (Review talk), First Stars IV - From Hayashi to the Future -, 2012年5月23日, ハートピア京都(京都市)

Nomoto, K., Final Fates of Massive Stars (招待講演), International Astronomical Union Symposium No. 279: “Death of Massive Stars: Supernovae and Gamma-Ray Bursts”, 2012年3月12日, 日光千姫物語(栃木県日光市)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://supernova.astron.s.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

野本 憲一(NOMOTO, Ken'ichi)
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・
特任教授
研究者番号：90110676

(2)研究分担者

鈴木 知治(SUZUKI, Tomoharu)
中部大学・工学部・准教授
研究者番号：20280935

(3)連携研究者

()

研究者番号：