

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540278

研究課題名(和文)トリプル 天体核反応率への宇宙物理学からの制限

研究課題名(英文)Constraints on the triple-alpha reaction rate from astrophysics

研究代表者

橋本 正章 (Masa-aki, Hashimoto)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20228422

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 ${}^3\text{He}$  および ${}^{12}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ 核反応率が大量星の進化とその超新星爆発に及ぼす影響について調べた。この二つの核反応率は現在その不確実性が大きく問題になっている。我々は、実験の不定性をいれた4つの反応率を組み合わせて詳細な恒星進化の計算を行った。その結果2から3つの組み合わせは天体物理の結果を相容れがたいことが判明した。さらに超新星爆発と元素合成のシミュレーションを行い、その結果を太陽系組成比と詳細に比較した。その結果従来信じられていた ${}^3\text{He}$ の反応率と不定性の枠内でかなり大きめの値を持つ ${}^{12}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ 核反応率の組み合わせが、もっともよく太陽系組成比を再現することを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We investigate effects of triple- $\alpha$  and  ${}^{12}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$  reaction rates on the production of supernova yields for a massive star of 25Ms. We combine the reaction rates to examine the rate dependence, where the rates are considered to cover the possible variation of the rates based on the experiments on the earth and theories. We adopt four combinations of the reaction rates from the two triple- $\alpha$  reaction rates and two  ${}^{12}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$  ones. First, we compare the stellar evolutionary results for massive stars of 20 and 25 Ms whose helium cores correspond to helium stars of 6 and 8 M, s respectively. we perform calculations of supernova explosions within the limitation of spherical symmetry and compare the calculated abundance ratios with the solar system abundances. We can deduce some constraints to the reaction rates. As the results, the conventional rate is adequate for the triple- $\alpha$  reaction rate and rather higher value  ${}^{12}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$  rate.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：恒星進化 超新星爆発 元素の起源

1. 研究開始当初の背景

恒星進化は特に恒星中心部にヘリウムコアが形成された後期段階においては、天体核反応において最も重要であるトリプル核反応率が最近、量子力学の第一原理に基づいて計算されこれまで使われてきた反応率と数ケタ(高温側)から数十桁(低温側)異なる結果が提出された。この計算が現在最も信頼性のあるものだったので本当なら宇宙物理に及ぼす影響は図り知れないという背景があった。

2. 研究の目的

天体核反応において最も重要であるトリプル核反応率が最近、量子力学の第一原理に基づいて計算されこれまで使われてきた反応率と数ケタ(高温側)から数十桁(低温側)異なる結果が提出された。この計算が現在最も信頼性のあるものなので本当なら宇宙物理に及ぼす影響は図り知れない。そこで我々は新しい反応率の変更可能なレベルをむしろ天体物理的観測から制限することを目的とする。大質量星の進化に及ぼす影響を調べ、高温領域での核反応率を制限し、さらに超新星爆発における元素合成の観測と詳しく調べることで、より厳しく核反応率を理論的に規定する。これらの理論的解析を通じて新しい核反応率の妥当性を宇宙物理的に判断する。

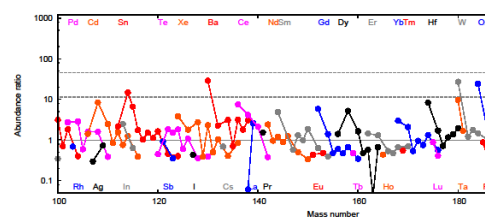
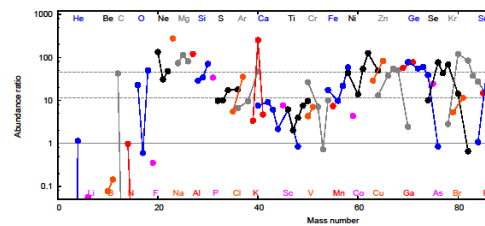
3. 研究の方法

太陽の10-40倍程度の質量をもつ大質量星の進化計算を系統的に行う。これにより3反応率の違いによるHe燃焼後の炭素と酸素の比の違いを系統的に明らかにし、星の進化の最後で最終的に生成される元素組成比を算出する。その際、ヘリウム燃焼における核燃焼過程 $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応率の不定性を考慮する。現在、天体核反応においてトリプル反応率とこの反応率の不定性が大質量星の進化を左右することが分かっている。この二つの核反応率の不定性を組み合わせてその影響を調べる必要があった。そこで反応の不定性を考慮して提案されて反応率を各々の反応に関して2種類ずつ選択し、合計4通りの組み合わせを調べ上げた。

4. 研究成果

太陽の25倍の質量の星の進化計算をこの4通り行い、まず重力崩壊寸前まで進化計算が進むか調べることに成功した。太陽の20倍の質量の星では、反応率の組み合わせによっては重力崩壊する前に中心部の冷却が開始することが判明した。従って、この場合、単独では超新星爆発を起こさないことになる。さらに太陽の20倍以下の質量の星では同様のことが多くの反応率の組み合わせで起きることも分かった。従って、地上での実験を基にした低エネルギーへの外層では予期せぬ星の進化を引き起こしてしまい、観測的事実と整合しないことが明らかになった。かろうじて、太陽の25倍以上の質量の星のみが重力崩壊を起こすことが分かった。これら一連の星々の重力崩壊寸前のモデルのなかで、観測的に最も典型的といえる太陽の25

倍質量の星の最終モデルについて超新星爆発のモデルシミュレーションを遂行した。星の進化の全過程において大規模核反応ネットワークを用いて重元素合成計算をまず行った。この元素合成計算では鉄までの元素合成に加えて、s-過程、p-過程元素合成が含まれている。s-過程については上記の4種類の組み合わせの反応率についてヘリウム燃焼と炭素燃焼でのs-過程の結果、従来と定性的には変わらない結果を得た。p-過程については従来の反応率の組み合わせ以外の組み合わせでは顕著なoverproductionを得た。また、従来の反応率と比べて他の組み合わせではNe-Na-Mgの元素がとくに過剰にでき観測との不整合が予期された。しかし、最終的判断をするには超新星爆発のシミュレーションと元素合成の精密計算が必要であった。超新星爆発モデルを用いて大質量星の超新星爆発により放出される元素を定量的に計算し、太陽系組成比と比べることにより高温領域( $T > 10^8\text{K}$ )でのOKK反応率の許容範囲を制限することができる。また、 $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応率を制限することもできる。最終的にすべての反応率の組み合わせに応じて元素合成の結果を太陽系組成比と比較した。結論として、従来のトリプル反応率と $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応率については実験的に上限に近い値が最も観測結果を再現することが判明した。下の図はトリプル反応率に新しい反応率、 $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応率は最新の実験を取り入れたもので超新星爆発での元素合成を計算したものである。太陽系組成比に比べて何倍元素が生成されたかを示す。点線内に点があれば太陽系組成比と合うと言える。Ne-Mgにかけてのoverproductionが顕著であり、恒星進化と矛盾した反応率であることが分かる。



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 4 件)

「Effects of Triple- $\alpha$  and  $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  Reaction Rates on the Supernova Nucleosynthesis in a Massive Star of  $25 M_{\odot}$ 」  
著者: Y. Kikuchi, M. Hashimoto, M. Ono, and R. Fukuda  
論文: Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2015, accepted (論文番号: 1410-030)、査読有

「Effects of triple-alpha reaction rates on the nucleosynthesis in massive stars」  
Y. Kikuchi, M. Hashimoto, M. Ono, S. Fujimoto  
Proceedings of SCIENCE, PoS(NIC XIII) 109, 査読有

Matter Mixing in Aspherical Core-collapse Supernovae: A Search for Possible Conditions for Conveying  $^{56}\text{Ni}$  into High Velocity Regions  
M. Ono, S. Nagataki, H. Ito, S.-H. Lee, J. Mao, M. Hashimoto, A. Tolstov  
The Astrophysical Journal, 2013, 773, 161--189, doi:10.1088/0004-637X/773/161

Numerical Experiments for Nuclear Flashes toward Superbursts in an Accreting Neutron Star  
Masa-aki Hashimoto, Reiko Kuromizu, Masaomi Ono, Tsuneo Noda, and Masayuki Y. Fujimoto  
Journal of Astrophysics, Volume 2014 (2014), Article ID 817986, 12 pages  
http://dx.doi.org/10.1155/2014/817986

Big-bang nucleosynthesis in comparison with observed helium and deuterium abundances: Possibility of a nonstandard model  
R. Ichimasa, R. Nakamura, M. Hashimoto, and K. Arai  
Phys. Rev. D 90, 023527 Published 21 July 2014

Explosive Nucleosynthesis in Magnetohydrodynamical Jets from Collapsars. II--Heavy-Element Nucleosynthesis of s, p, r -Processes--  
M. Ono, M. Hashimoto, S. Fujimoto, K. Kotake and S. Yamada  
Progress of Theoretical Physics, 2012, No. 4, Vol. 128, 741--765  
DOI:10.1143/PTP.128.741

Cooling of Compact Stars with Color

Superconducting Phase in Quark Hadron Mixed Phase

T. Noda, M. Hashimoto, N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, M. Fujimoto  
The Astrophysical Journal, 2013, Vol. 765, 1--5

R-Process Nucleosynthesis in MHD Jet Explosions of Core-Collapse Supernovae  
Motoaki Saruwatari, Masa-aki Hashimoto, Ryohei Fukuda, and Shin-ichiro Fujimoto  
Journal of Astrophysics, Volume 2013(2013), Article ID 506146, 1--13  
http://dx.doi.org/10.1155/2013/506146

Constraint on Heavy Element Production in Inhomogeneous Big-Bang Nucleosynthesis from the Light Element Observations

Riou Nakamura, Masa-aki Hashimoto, Shin-ichiro Fujimoto, and Katsuhiko Sato  
Journal of Astrophysics, Volume 2013 (2013), Article ID 587294, 1--9,  
http://dx.doi.org/10.1155/2013/587294

〔学会発表〕(計 5 件)

**国際会議発表**

Effects of triple-alpha reactions on the supernova nucleosynthesis  
Y. Kikuchi, M. Hashimoto, M. Ono, and S. Fujimoto  
Nuclei in the Cosmos XIII, Debrecen, Hungary, 2014 年 7 月 7 日-11 日  
(<http://www.nic2014.org/>)

**国内学会発表**

超新星爆発における元素合成に対する  $^3\text{He}$  及び  $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  熱核反応率の影響  
菊池之宏, 橋本正章, 小野勝臣, 藤本信一郎  
第 120 回日物理学会九州支部例会, 崇城大学池田キャンパス, 2014 年 12 月 6 日

〔図書〕(計 1 件)

橋本正章、荒井賢三:「相対論の世界」(裳華房) 2014 年 10 月 25 日 発行

〔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://astrog.phys.kyushu-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 正章 (MASA-AKI, Hashimoto )  
九州大学大学院 理学研究院・教授  
研究者番号：20228422

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：