

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20244035

研究課題名（和文） 超新星元素合成による生成核種のアイソトープ分離とニュートリノ振動

研究課題名（英文） Isotope separation in supernova nucleosynthesis and the studies of neutrino oscillation

研究代表者

梶野 敏貴 (KAJINO TOSITAKA)

国立天文台・理論研究部・准教授

研究者番号：20169444

研究成果の概要（和文）：超新星ニュートリノ元素合成を天文学・宇宙物理学・核物理学から総合的に研究し、理論予測を天文観測・隕石組成分析と比較するとともに素粒子実験で決定された振動パラメータ  $\theta_{13}$  を取り入れて、統計的にニュートリノ逆質量階層が優位であることを発見した。未知のニュートリノ・核反応断面積の量子力学計算、超新星爆発とガンマ線バーストの理論モデル構築、新しい宇宙核時計の提案、1957年来の未解決問題であった p 過程元素の起源の同定、等に関して多くの成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：We studied the supernova nucleosynthesis by bringing interdisciplinary expertise on element genesis from astronomy, astrophysics and nuclear physics. We found that the inverted neutrino mass hierarchy, which is one of the fundamental questions in particle physics and cosmology, is preferred statistically by taking account of the recent discovery of  $\theta_{13}$ -mixing angle. We also made several progress in quantum mechanical calculations of unmeasured neutrino-nucleus interaction cross sections, new model construction of the supernovae and gamma-ray bursts, new proposal of nuclear cosmic-clock, identification of the origin of the p-elements which was a long-standing unresolved problem since 1957, etc.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2009年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2010年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2011年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
年度			
総計	33,400,000	10,020,000	43,420,000

研究分野：理論宇宙物理学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超新星、元素合成、アイソトープ、ニュートリノ、物質振動効果

ニュートリノ振動問題において、質量の異なる2つのニュートリノ( $\nu_1$ と $\nu_3$ )の質量差 $\Delta m_{13}$ と混合角 $\theta_{13}$ の決定が素粒子・原子核・宇宙物理学の重要な課題であるが、ニュートリノと物質の相互作用が極めて小さいため、地上実験でこれらの両方を測定することは困難である。我々は、この問題に対して超新星爆発のニュートリノ元素合成過程を理論・原子核実験・天体観測の3分野を統一的に研究することで挑んだ。

## 2. 研究の目的

当初の研究目的は、以下の5項目である。

- (1) 未知のニュートリノ・核反応の理論研究。
- (2) 重力崩壊型超新星爆発モデルの構築。
- (3) ニュートリノ過程を含む爆発的要素合成モデルおよび計算コードの開発と実行。
- (4) アイソトープ分離を行う天文観測装置の開発とすばる望遠鏡への装着、共同利用開始。
- (5) 生成核種の理論予測と天体観測およびプレソーラーグレイン分析による比較から、未知のニュートリノ振動パラメータの決定を行う。

## 3. 研究の方法

宇宙物理学理論、原子核実験、天体観測の3分野を横断する研究グループを構成した。宇宙物理学理論グループは、超新星爆発およびガンマ線バーストの理論モデルを構築してニュートリノ元素合成過程を研究する。原子核実験グループは、元素合成計算に必要な原子核反応率を精度よく実験的に決定するとともに、実験で得られないニュートリノ・原子核反応断面積の量子力学計算を実行する。天体観測グループは、太陽組成及び初期世代星の組成を観測する為の装置を開発し、すばる望遠鏡に装着する。3つの研究グループが協力して、元素合成量の理論予測と観測・実験値を詳細に比較することで、ニュートリノ振動パラメータの決定を試みる。

## 4. 研究成果

以下の7項目に要約する。

- (1) 質量数が4から180までの元素アイソトープに関して、ベータ崩壊によるキャリブレーションが可能な低励起エネルギー領域は原子核殻模型、100MeVに及ぶ高励起エネルギー領域は準粒子ランダム位相近似(QRPA)模型を用いて、ニュートリノ・核反応断面積を理論的に計算した。

- (2) 重力崩壊型超新星爆発とガンマ線バースト(コラプサー)の理論モデルを構築した。
- (3) 核反応とニュートリノ反応に加え、中性子過剰アクチノイドの非対称核分裂過程を組み込んだr過程元素合成コードを構築し、爆発天体の流体シミュレーション結果を用いて元素合成計算を実行した。

- (4) アイソトープ分離を行う天文観測装置(イメージスライサ)の開発を行い、すばる望遠鏡・高分散高分解能スペクトログラフに装着して全国共同利用による天体観測を開始した。

- (5) Burbidge, Burbidge, Fowler and Hoyle (1957)論文以来、未確定であったLi-6,7, Be-9, B-10, 11, Mn-55, Co-59, Nb-92, Tc-98, La-138, Ta-180ほかの元素アイソトープの生成過程を解明した。

- (6) Nb-92が超新星ニュートリノ元素合成に起源を持つことを見つけ、新たな宇宙核時計を提案した。

- (7) 2011年にプレソーラーグレインに発見されたLi-7とB-11の存在比と、2011-2012年に明らかにされた長軌線および原子炉ニュートリノ振動実験による振動パラメータ $\theta_{13}$ を用いて、超新星元素合成の理論計算からニュートリノ逆質量階層が統計的に優位であることを発見した。

## 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151件)

1. G. J. Mathews, T. Kajino, W. Aoki, and Fujiya, Exploring the neutrino mass hierarchy probability with meteoritic supernova materials, neutrino-process nucleosynthesis, and 13-mixing, Physical Review, 査読有, D85, 2012, 105023, DOI 10.1103/PhysRevD.85.105023.
2. G. J. Mathews, Y. Pehlivan, T. Kajino, A. B. Balantekin, and M. Kusakabe, Quantum Statistical Corrections to Astrophysical Photodisintegration Rates, Astrophysical Journal, 査読有, 727, 2011, 10, DOI 10.1088/0004-637X/727/1/10.
3. T. Maruyama, N. Yasutake, T. Kajino, M. Cheoun, and C. Ryu, Asymmetric Neutrino Emission from Magnetized

- Proto-Neutron Stars in fully Relativistic Framework including Hyperons, *Physical Review*, 査読有, D83, 2011, 081303, DOI 10.1103/PhysRevD.83.081303.
4. Hayakawa, P. Mohr, T. Kajino, S. Chiba, and G. J. Mathews, Reanalysis of the (J=5) state at 592 keV  $^{180}\text{Ta}$  and its role in the neutrino-process nucleosynthesis of  $^{180}\text{Ta}$  in supernovae, *Physical Review*, 査読有, C82, 2010, 058801, DOI 10.1103/PhysRevC.82.058801.
  5. M.-K. Cheoun, E. Ha, T. Hayakawa, T. Kajino and S. Chiba, Neutrino reactions on  $^{138}\text{La}$  and  $^{180}\text{Ta}$  via charged and neutral currents by the quasiparticle random phase approximation, *Physical Review*, 査読有, C82, 2010, 035504, DOI 10.1103/PhysRevC.82.035504.
  6. T. Yoshida, A. Takamura, K. Kimura, H. Yokomakura, S. Kawagoe, and T. Kajino, Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos: Dependence on Electron Mole Fraction, *Physical Review*, 査読有, D80, 2009, 125032, DOI 10.1103/PhysRevD.80.125032.
  7. S. Kawanomoto, T. K. Suzuki, T. Kajino, H. Ando, M. Bessell, K. Noguchi, W. Aoki, S. Honda, H. Izumiura, E. Kambe, K. Okita, K. Sadakane, B. Sato, A. Tajitsu, M. Takada-Hidai, W. Tanaka, E. Watanabe, M. Yoshida, First Observation of  $^7\text{Li}/^6\text{Li}$  Isotopic Ratio in the Interstellar Media beyond the Solar Neighborhood, *Astrophysical Journal*, 査読有, 701, 2009, 1506-1518, DOI 10.1088/0004-637X/7012/2/1506.
  8. T. Hayakawa, N. Iwamoto, T. Kajino, T. Shizuma, H. Umeda, and K.-I. Nomoto, Empirical Abundance Scaling Laws and Implications for the Gamma Process in Core-Collapse Supernovae, *Astrophysical Journal*, 査読有, 685, 2008, 1089-1102, DOI 10.1086/589938.
- [学会発表] (計 8 2 件)
1. Kajino, Quest for Particle Astrophysics Solution to Lithium Problems, International Workshop on Lithium in the Cosmos, February 27-March 1 in 2012, Institute for Astrophysics, Paris, France.
  2. T. Kajino, R-Process in Gamma-Ray Bursts, International Workshop on Physics of Rare-Ring, November 10-12 in 2011, RIKEN, Wako, Japan.
  3. T. Kajino, Supernova Neutrino-process Nucleosynthesis and Implications in Neutrino Oscillation, 1st Subaru International Conference on Galactic Archaeology, November 1-4 in 2011, LaForet Shuzenji, Shuzenji, Japan.
  4. Kajino, Cosmology and the Formation of Elements in the Early Universe, 2nd JSPS-USA Multidisciplinary Science Forum, October 27-28 in 2011, Western Michigan University, Kalamazoo, U. S. A.
  5. T. Kajino, Big-Bang Models, 6th European Physical Society Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics, September 18-27 in 2011, Catania, Sicily, Italy.
  6. T. Kajino, Nuclear Weak Interactions, Supernova Nucleosynthesis and Neutrino Oscillation, Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics, August 24-29 in 2011, University of Manchester, Manchester, U. K.
  7. Kajino, Supernova Nucleosynthesis and Neutrino Oscillation, 19th Particles and Nuclei International Conference, July 25-30 in 2011, MIT, Boston, U. S. A.
- [図書] (計 8 件)
1. 梶野敏貴、大阪科学振興協会・大阪市立科学館、月刊うちゅう第 28 巻 10 号「元素は宇宙をめぐる」、2012 年、6 ページ。
  2. 鈴木俊夫・吉田敬・千葉敏・梶野敏貴、日本物理学会、物理学会誌 (最近の研究

から) 第67巻1号「超新星での元素合成とニュートリノ振動」、2012年、6ページ。

3. 梶野敏貴、東海大学出版会、望星2010年9月号(特集・アインシュタインのことば)「アインシュタインは正しかったのか?」、13ページ。

[その他]

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/kajino/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梶野 敏貴 (KAJINO TOSHITAKA)  
国立天文台・理論研究部・准教授  
研究者番号：20169444

### (2) 研究分担者

野本 憲一 (NOMOTO KENICHI)  
東京大学・数物連携宇宙研究機構・  
特任教授  
研究者番号：90110676

青木 和光 (AOKI WAKO)  
国立天文台・光赤外研究部・助教  
研究者番号：20321581

早川 岳人 (HAYAKAWA TAKEHITO)  
日本原子力研究開発機構  
量子ビーム応用研究部・研究主幹  
研究者番号：70343944