

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540284

研究課題名（和文） 超新星におけるニュートリノ振動と元素合成への応用

研究課題名（英文） Neutrino Oscillation in Supernovae and Application to Nucleosynthesis

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

研究成果の概要（和文）：本研究ではニュートリノがマヨラナ粒子で磁気モーメントを持つ場合における超新星ニュートリノのフレーバー変換と超新星ニュートリノの観測可能性について調べた。その結果、ある特定のニュートリノ振動パラメータの場合にはスーパーカミオカンデで観測される超新星ニュートリノスペクトルの時間進化や将来の液体 Ar 検出器で観測されるニュートリノイベントにニュートリノ磁気モーメントによる効果が検出されることが得られた。また、Ic型超新星での軽元素合成や r-過程元素合成のニュートリノ振動に対する影響も調べている。

研究成果の概要（英文）：We investigate flavor conversions and future observations of supernova neutrinos assuming Majorana neutrinos with finite transition magnetic moments. In the case of inverted mass hierarchy and large mixing angle  $\theta_{13}$ , the effects of the neutrino magnetic moment will be observed in the time variation of the neutrino energy spectra in Super-Kamiokande and the total neutrino events in future liquid Ar detectors. We also investigate light element synthesis in Type Ic supernovae and the effects of neutrino oscillations in r-process nucleosynthesis.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

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：宇宙物理（理論）・超新星・ニュートリノ

## 1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は宇宙における最も重要なニュートリノ生成源のひとつである。近い将来我々の銀河内で超新星爆発が起こればニュートリノ検出器による超新星ニュートリノの観測を通してニュートリノ物理や超新星爆発機構の解明に対する多くの情報が得られることが期待される。そのため超新星ニュ

ートリノの観測のための超新星ニュートリノに対する理論的側面からの深い理解が必要になる。

超新星ではさまざまな元素が作られ、一部の元素の生成量は超新星ニュートリノと原子核との反応の影響を受ける。我々はこれまでニュートリノ物質振動(MSW 効果)による

ニュートリノエネルギー分布の変化を考慮して超新星における軽元素生成量のニュートリノ振動に対する依存性を調べてきた。一方、もしニュートリノがマヨラナ粒子で大きな磁気モーメントを持つならば、MSW 効果だけでなく、より密度が高い領域で resonant spin-flavor (RSF) 変換によるニュートリノのフレーバー変換が起こると考えられている。この効果を考慮すると、超新星ニュートリノの観測やニュートリノ元素合成にこれまでとは異なる効果が見られると考えられる。

## 2. 研究の目的

(1) ニュートリノが磁気モーメントを持つマヨラナ粒子であると仮定し、磁場を考慮した超新星ニュートリノにおける RSF 変換によるフレーバー変換を調べ、超新星ニュートリノのより一般的な性質を理解する。

(2) ニュートリノ振動を考慮した超新星ニュートリノ元素合成による  ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{B}$  という軽元素と  ${}^{138}\text{La}$ 、 ${}^{180}\text{Ta}$  という重元素の生成過程と生成量のニュートリノ振動に対する依存性を調べる。

(3) 上記以外の場合において超新星ニュートリノに広く関係する超新星元素合成について、それぞれの元素合成過程の超新星ニュートリノに対する依存性を広く調べる。

## 3. 研究の方法

(1)  $10^{-12} \mu_B$  ( $\mu_B$ : ボア磁子) 程度の遷移磁気モーメントを持つマヨラナニュートリノを仮定し、3 フレーバーニュートリノにおける RSF 変換を数値的に求め、超新星におけるニュートリノフレーバー変換のニュートリノ振動パラメータや電子モル分率に対する依存性を調べる。そして、スーパーカミオカンデや液体 Ar 検出器による超新星ニュートリノの観測可能性について議論する。

(2) 元素合成については、まず、恒星進化と超新星における元素合成を計算するための核反応ネットワークを重元素合成の計算に対応できるように拡張する。そして、大質量星の晩期進化を追う He 星進化モデルを用いて超新星爆発直前までの重元素合成過程を数値的に求める。恒星進化の計算後は超新星爆発の計算を行い、その計算結果を用いて超新星爆発時の爆発的 element 合成の計算を行う。その時に、磁場とニュートリノ振動パラメータの値を変えて超新星元素合成の計算を行うことで、これら物理量に対する  ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{B}$ 、 ${}^{138}\text{La}$ 、 ${}^{180}\text{Ta}$  などニュートリノ元素合成で作られる

核種の生成量の依存性を調べる。

(3) 大質量星の中でも特に質量が大きい星は進化の途中で H と He の外層を失い、Ic 型の超新星として爆発する。この超新星からはニュートリノ元素合成と外層から出る高エネルギー CNO 核種と星間物質との相互作用による Li や B という軽元素が生成される。ここではこれらの生成過程による Ic 型超新星における軽元素生成について調べる。

(4) 鉄より重い重元素のうち、約半分は r-過程という重元素合成過程で生成される。超新星爆発時に形成される原始中性子星の表面から出るニュートリノ駆動風は r-過程が起こる可能性があると考えられている。ここでは r-過程元素合成について調べるほか、ニュートリノ振動に対する影響について議論する。

## 4. 研究成果

(1) ニュートリノがマヨラナ粒子で磁気モーメントを持つ場合には RSF 変換によって超新星ニュートリノのスペクトルが変化することを確認した。そして、RSF 変換の効果が見られる場合には、RSF 変換によって変換されるフレーバーの組が超新星 ejecta の最深部の電子モル分率  $Y_e$  が 0.5 を境に変わることが得られた。例えば、 $Y_e < 0.5$  で順質量階層の場合あるいは  $Y_e > 0.5$  で逆質量階層の場合には電子反ニュートリノと  $\mu$ 、 $\tau$  ニュートリノとの間でフレーバー変換が起き、そうでない場合には電子ニュートリノと  $\mu$ 、 $\tau$  反ニュートリノの間でフレーバー変換が起こる。

我々はこれを考慮して超新星爆発が起きた場合にスーパーカミオカンデで観測される超新星ニュートリノのスペクトルを予測した。その結果、逆質量階層でニュートリノ混合角  $\sin^2 2\theta_{13} > 0.01$  ではニュートリノの平均エネルギーが爆発後数秒間だけ増加する可能性を得た。この効果は MSW 効果だけを考慮した場合には現れず、これはニュートリノがマヨラナ粒子で大きな磁気モーメントを持つことに対する検証になりうることを得られた。また、将来建設される可能性がある液体 Ar 検出器を用いた超新星ニュートリノの観測についても調べたところ、超新星ニュートリノにおいて電子ニュートリノと電子反ニュートリノの両方のイベントを考慮することで、RSF 変換の特徴を持つ超新星ニュートリノのイベントが起こりうることを示した。

(2) 我々は重元素合成の計算ができるように核反応ネットワークを拡張した。そのため、現在は r-過程を計算することが可能である。

しかし、恒星進化については当初 He 星の進化を行う予定でいたが、現在ではもはや He を用いた進化計算はあまり行われないため、主系列星から重力崩壊まで統一的に計算できる大質量星の進化コードの開発を行うことにした。現在は主系列星から酸素燃焼まで計算できる状態で、ケイ素燃焼を精度よく計算できるよう恒星進化コードを改良中である。

(3) Ic 型の超新星における軽元素合成について調べた。 $^{11}\text{B}$  は Ic 型超新星においても II 型と同様に生成された。一方、 $^7\text{Li}$  は Ic 型超新星では II 型ほど生成されなかった。また、星の外層から出る高エネルギー CNO 核種と星間物質との相互作用では Li、Be、B という微量軽元素がニュートリノ元素合成と同程度またはそれ以上生成されることが示された。

(4) 我々は shell モデルを用いて中性子数 126 の原子核のベータ崩壊半減期を新しく求め、3rd peak まで r-過程元素が生成されるニュートリノ駆動風における r-過程重元素合成に対する半減期の影響を調べた。その結果、r-過程によって重元素合成が質量数 195 付近まで進む場合には元素合成が従来よりも質量数で 1~2 進むことが示された。

(5) 近年、超新星爆発時には非常に大量のニュートリノが放出されることから、MSW 効果 (ニュートリノ-電子相互作用) 以外にニュートリノ自己相互作用によるフレーバー変換が議論され始めている。我々はニュートリノ駆動風における r-過程元素合成のニュートリノ自己相互作用による影響を調べ始めた。初歩的な結果として single angle 近似を用いた場合には、逆質量階層の場合に r-過程重元素合成が従来よりも進みにくくなることが示された。今後は、上記の近似を外した上でより詳細な計算を行うことで r-過程重元素合成のニュートリノ自己相互作用に対する依存性を調べていく予定である。

## 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 10 件)

- ① Ko Nakamura, Takashi Yoshida, Toshikazu Shigeyama, Toshitaka Kajino, Boron Synthesis in Type Ic Supernovae, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, 718, 2010, L137-L140
- ② Takashi Yoshida, Akira Takamura, Keiichi Kimura, Hidekazu Yokomakura, Shio Kawagoe, Toshitaka Kajino,

Resonant Spin-Flavor Conversion of Supernova Neutrinos: Dependence on Electron Mole Fraction, Physical Review D, 査読有, 80, 2009, 125032

- ③ Toshio Suzuki, Michio Honma, Koji Higashiyama, Takashi Yoshida, Toshitaka Kajino, Takaharu Otsuka, Hideyuki Umeda, Ken'ichi Nomoto, Neutrino-induced reactions on  $^{56}\text{Fe}$  and  $^{56}\text{Ni}$ , and production of  $^{55}\text{Mn}$  in population III stars, Physical Review C, 査読有, 79, 2009, 061603(R)

[学会発表] (計 9 件)

- ① Takashi Yoshida, Explosive and Neutrino Nucleosynthesis in Supernovae, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of APS and JPS, October 13-18, 2009, Waikoloa, Hawaii, U.S.A.
- ② Takashi Yoshida, Neutrino Oscillation in Supernovae and its Influence on Nucleosynthesis, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of APS and JPS, October 13-18, 2009, Waikoloa, Hawaii, U.S.A.
- ③ 吉田敬、高村明、木村恵一、横枕英和、川越至桜、梶野敏貴、超新星ニュートリノにおける spin-flavor conversion の電子モル分率依存性、日本物理学会 2008 年秋季年会、山形大学、2008 年 9 月 20 日~23 日

[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：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

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

高村 明 (TAKAMURA AKIRA)  
豊田工業高等専門学校・一般学科・准教授  
研究者番号：90332030

(3) 連携研究者

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