

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540287

研究課題名(和文) 超新星元素合成とニュートリノ観測から見る超新星ニュートリノ自己相互作用の効果

研究課題名(英文) Effects of supernova neutrino self-interaction on supernova nucleosynthesis and neutrino observations

研究代表者

吉田 敬 (Yoshida, Takashi)

京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員

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、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではr-processや p-processなど重元素合成に関するネットワークの拡張やニュートリノ駆動風におけるこれら重元素合成の計算を行い、r-processのベータ崩壊率に対する依存性や極超新星のニュートリノ駆動風における p-processについて調べた。しかしニュートリノ自己相互作用については動径方向近似での計算は可能となったが角度依存性の導入や最終的な定式化には至らなかった。そのため今後も研究を継続していきたい。超新星元素合成についてはニュートリノ元素合成で作られるフッ素の銀河化学進化や超巨大質量星を起源とする極超新星における元素合成の特徴を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We extended a nuclear reaction network for r-process and nup-process. Then, we investigated the influence of r-process on beta-decay rates and nup-process in neutrino-driven winds on a proto-neutron star. We developed the code for neutrino-flavor evolution of supernova neutrinos taking into account neutrino self-interactions with single-angle approximation. However, we have not taken into account multi-angle effect. Thus, we would like to include the effect in the next step. We calculated the neutrino nucleosynthesis of fluorine in supernovae and applied to galactic chemical evolution. We clarified the 56 Ni production in energetic core-collapse supernovae evolved from very massive stars.

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：超新星 ニュートリノ 元素合成 大質量星

1. 研究開始当初の背景

太陽の約 10 倍よりも重い大質量星はその進化の過程で多くの元素を作る。そして進化の最後に起こる超新星爆発時にこれらの元素を宇宙空間へ放出する。そのため大質量星は宇宙の元素の主な生成源であると考えられている。超新星爆発時には超新星から放出される物質の最深部で鉄族元素が合成される。また、重力崩壊時に形成される原始中性子星の表面から吹く中性子過剰のニュートリノ駆動風において重元素合成過程のひとつである r-process が進行し多くの重元素が合成される可能性がある。一部の元素はニュートリノ破砕反応とそれに続く元素合成によって生成される。これを v-process という。このように放出される元素の量は星の初期質量や金属量、超新星爆発時の熱環境、超新星ニュートリノの特徴などに依存する。そのため生成量の依存性を調べることは元素の起源を解明する上で重要である。

超新星爆発時に放出されるニュートリノは星の中を通過する間に MSW 効果というニュートリノ振動によって種族を変える。さらに超新星から放出されるニュートリノの量が非常に多いことから、超新星から放出されるニュートリノはニュートリノ同士の相互作用(ニュートリノ自己相互作用)による種族変換を起こす可能性があるとして指摘されている。この分野では主に数値計算の結果を元に超新星におけるニュートリノ種族変換のより一般的な性質を調べている。

我々はこれまで ${}^7\text{Li}$ や ${}^{11}\text{B}$ という軽元素の超新星におけるニュートリノ元素合成を MSW 効果を考慮して計算し、ニュートリノ振動パラメータである質量階層や混合角 θ_{13} の依存性を調べてきた。そして、 ${}^7\text{Li}$ や ${}^{11}\text{B}$ の生成量は順質量階層で混合角 θ_{13} が $\sin^2 2\theta_{13} > 0.001$ の場合には有意に多くなることを示した。それ以外にニュートリノ元素合成によって生成される核種として ${}^{19}\text{F}$ や ${}^{138}\text{La}$ などがある。これら核種の超新星における生成量についても明らかにする必要がある。

ニュートリノ自己相互作用による超新星ニュートリノの種族変換の応用例としてニュートリノ駆動風における r-process 元素合成への影響が議論されている。しかし、研究開始の時点ではニュートリノ自己相互作用を取り入れた r-process 元素合成の計算はまだ行われていない。そのため、ニュートリノ自己相互作用を考慮した r-process を計算し r-process に対するニュートリノ自己相互作用の影響を調べることは重要であろう。

近年、非球対称な超新星爆発やガンマ線バーストにおける元素合成の研究が進められてきている。これらの爆発現象は金属量が少

ない大質量星の進化の最後に起こると考えられており、これらの星の進化を調べることはさまざまな超新星爆発における元素合成を調べる上でも重要である。また、近年の観測では超新星の爆発規模やスペクトルに多様性があることも示されている。しかし、個々の超新星に関する対応する親星や爆発のメカニズムについてはまだ十分に明らかにされたとはいえない。超新星における元素合成を計算して超新星放出物の生成量を見積もることは観測される超新星の起源天体を明らかにする手がかりになるだろう。

2. 研究の目的

(1) 超新星におけるニュートリノ元素合成による元素生成量の依存性を明らかにする。必要に応じて MSW 効果やニュートリノ自己相互作用の効果を取り入れる。

(2) 原始中性子星表面から吹くニュートリノ駆動風における r-process 元素合成について調べる。特にニュートリノ自己相互作用によるニュートリノ種族変換に対する r-process への影響を調べる。また、星における元素組成の観測と元素合成から得られる組成分布の比較や将来のニュートリノ観測装置を用いた超新星ニュートリノの検出の推定から得られるニュートリノの性質について議論する。

(3) 近年観測された超新星に対応する超新星モデルにおける元素合成を計算し生成量を求めることで超新星の爆発機構の可能性を調べる。また、超新星の親星としての大質量星の進化を調べる。

3. 研究の方法

(1) さまざまな初期質量と金属量を持つ星が進化した超新星におけるニュートリノ元素合成を計算する。そして、ニュートリノ元素合成で生成された核種の生成量の初期質量と金属量に対する依存性を調べる。

(2) r-process 元素合成を計算するため核反応ネットワークを拡張するとともにニュートリノ自己相互作用によるニュートリノ反応率の変化を元素合成計算コードに取り入れる。そして等エントロピーの駆動風モデルを用いて r-process 元素合成を計算する。ここではニュートリノ光度やそれぞれの種族のニュートリノの平均エネルギーがパラメータとなる。その中で r-process が進行するようなパラメータ範囲を求め、その範囲でニュートリノ自己相互作用による影響を調べる。

(3) 現状ではニュートリノ自己相互作用の計算にはニュートリノの放出角度を考慮し

ない近似(single-angle 近似)を用いている。これを、ニュートリノの放出角度を考慮した計算(multi-angle 計算)に変更してr-process に対するニュートリノ自己相互作用の影響を調べる。

(4) MSW 効果、Resonant spin-flavor (RSF) 変換、ニュートリノ自己相互作用を考慮して超新星ニュートリノのスペクトルの特徴を調べる。そして、現在と将来のニュートリノ観測装置を念頭に入れて超新星ニュートリノから得られるイベント数を見積もりニュートリノ振動に対する依存性を調べることでニュートリノ振動パラメータを制限する可能性を議論する。

(5) さまざまな超新星における元素合成を計算するため、広い初期質量と金属量の範囲で計算可能な大質量星進化コードを開発する。

(6) (5) で開発したコードを用いて巨大質量星の進化を計算する。そして、これらの星が爆発した超新星における ^{56}Ni の生成量について調べる。得られた結果を超高輝度超新星 SN 2007bi の爆発機構に適用し、この超新星の親星の可能性について議論する。

4. 研究成果

(1) 我々は ν -process を考慮して超新星におけるフッ素の生成について調べた。星の初期質量は 15、25、50 太陽質量、金属量は $Z=0$ 、0.004、0.02 とした。これらの星について超新星爆発における元素合成を計算した。25、50 太陽質量の星については爆発エネルギーが大きい極超新星を仮定した。ニュートリノの性質についてはニュートリノの全エネルギーを $3 \times 10^{53}\text{erg}$ 、電子(反)ニュートリノとその他の種族のニュートリノの温度をそれぞれ 4 MeV と 6 MeV とした。

超新星の中でフッ素は主に $^{20}\text{Ne}(\nu, \nu' p)^{19}\text{F}$ という ν -process 反応によって生成される。また、一部は星の進化段階で $^{15}\text{N}(\alpha, \gamma)^{19}\text{F}$ という熱核反応によって生成される。前者は星の金属量に依存せず第一世代星から生成されるが後者は金属量に依存するため第一世代星では作られにくい。

銀河化学進化においてフッ素は主に超新星と中小質量星が進化した漸近超巨星で作られると考えられている。今回の計算で得られた超新星で合成されるフッ素生成量の結果を銀河化学進化に適用したところ、金属量が太陽の 1/10 程度になるまでは超新星の寄与が卓越し、酸素に対するフッ素の存在度比がほぼ一定になることが示された。そして、それ以降はこの比は漸近超巨星からの寄与により増加した。金属量が少ない星を観測することで超新星の典型的なニュートリノ光度に制限をつけられる可能性がある。

(2) r-process 元素合成計算をするため核反応ネットワークを拡張した。当初は Bi までの合成計算ができる 3517 核種からなるネットワークを作成した。この核反応ネットワークと等エントロピーのニュートリノ駆動風モデルを用いて r-process 元素の 3rd peak を再現するような r-process 元素合成を計算した。そして、 $N=126$ の中性子魔法数を持つ核種のベータ崩壊半減期を更新したときの r-process 元素合成に対する影響を調べた。

ここでは殻モデルを用いて $N=126$ 核種のベータ崩壊半減期を更新した。これにより、多くの核種で半減期が短くなった。そして、いくつかのニュートリノパラメータの駆動風モデルにおける r-process 元素合成を計算した。その結果、r-process 元素の 3rd peak における組成分布の中で最も存在度が多い核種は質量数で 1 程度増加した。今年度、Th や U の生成量を求めることができるように核反応ネットワークを 5543 核種まで拡張した。これを用いて $N=126$ 核種のベータ崩壊率を更新したときの Th や U 生成量の依存性を調べる予定。

(3) (2) と同様の駆動風モデルを用いてニュートリノ自己相互作用を考慮した r-process 元素合成の初歩的な計算を行った。ニュートリノ自己相互作用についてはニュートリノの放出角度の依存性を考慮しない近似を用いた。順質量階層の場合にはニュートリノ自己相互作用の効果は現れないため r-process 元素合成にも影響はない。一方、逆質量階層の場合には r-process は従来よりも進みにくくなることが示された。通常、ニュートリノ反応を考慮すると中性子の過剰が抑制され r-process は進みにくくなる。ニュートリノ自己相互作用は電子ニュートリノと $\mu\tau$ ニュートリノの変換により電子ニュートリノのエネルギーが実質的に高くなる。そのため r-process の進行はより妨げられる。初歩的な計算の範囲では 3rd peak 核種の生成量はニュートリノ自己相互作用を考慮することにより 1/5 - 1/10 程度まで減少することがわかった。

最近の超新星爆発の詳細な計算から超新星の最深部は中性子過剰になりにくいことが明らかになってきた。そのため、現在では超新星の最深部で起こるニュートリノ駆動風は r-process の候補としては否定的に考えられ始めている。今は中性子星合体における質量放出が r-process が起こる場所として有力視されている。

(4) 液体アルゴンを用いたニュートリノ観測装置は電子反ニュートリノだけでなく電子ニュートリノのイベントも検出できる。我々は将来建設される可能性がある 100kt サイズの液体アルゴンニュートリノ検出装置を用いた超新星ニュートリノの観測から得

られるニュートリノイベントのニュートリノ振動パラメータに対する依存性を調べた。

我々はMSW効果とニュートリノが磁気モーメントを持つ場合に起こりうるRSF変換を考慮して超新星ニュートリノの種族変換を計算した。ニュートリノ自己相互作用による種族変換については簡単に取り入れた。ニュートリノイベント数を求めるときには超新星は銀河中心で起こると仮定した。そして、ニュートリノのイベント数について中性カレント反応に対する電子ニュートリノの荷電カレント反応、電子反ニュートリノの荷電カレント反応のイベント数の比を調べた。その結果、これらの比はニュートリノ磁気モーメントの大きさとニュートリノ振動パラメータに依存することがわかった。将来超新星ニュートリノが多く観測されればニュートリノの振動パラメータを制限できる可能性があるだろう。

(5) 初期質量が13-300太陽質量で金属量が $Z=1 \times 10^{-4}$ から0.02までの大質量星の進化を水素燃焼からヘリウム燃焼または炭素燃焼まで追い、星の最終質量の初期質量と金属量に対する依存性を調べた。金属量が太陽と同程度の $Z=0.02$ の星で初期質量が40太陽質量以上の星では激しい質量放出が起こり水素層とヘリウム層が失われ約10太陽質量の主に炭素と酸素を表面組成に持つウォルフ-ライエ星に進化した。一方、金属量が小さい星では質量放出の効果はより小さくなり、 $Z<0.001$ では初期質量が100太陽質量を超える巨大質量星でもヘリウム層や水素層が残るようになる。また、我々は星の後期進化に重要なC0コアの質量の依存性についても調べた。金属量が0.001以下の巨大質量星の中にはC0コアの質量が60太陽質量を超えるものがあり、これらの星は進化の最後に電子対生成型超新星として爆発する可能性がある。

星の初期質量が10太陽質量程度の星は超漸近超巨星(super AGB star)になった後で白色矮星または電子捕獲型超新星になる。我々は10太陽質量程度の星の進化を計算し、その中で電子捕獲型超新星になる星の進化を重力崩壊直前まで計算した。ここでは新しい原子核反応の反応率や高温高圧下の核統計平衡における電子捕獲反応率などの新しい物理を取り入れた。この星ではヘリウム燃焼後にC0コアの中心から外れたところから炭素燃焼が始まり、縮退したONeコアが形成された。ONeコア形成後にはヘリウムのshell燃焼によるコア質量の増加を仮定してONeコアの進化を計算した。そしてコアの大きさが臨界質量である1.367太陽質量を超えた後、中心でネオンと酸素が点火、燃焼してその燃焼波面が外側に伝播することでごく短時間に鉄コアが生成された。我々はまたコアの臨界質量の不定性についても議論した。

我々は星の自転による混合や角運動量輸送を考慮した大質量星の進化コードを開発

している。このコードを用いて大質量星の進化を重力崩壊直前まで計算することに成功した。ただし、高速回転になるとまだ計算を進めることが難しくなるため改良が必要である。

(6) 超高輝度超新星SN 2007biは光度曲線の特徴から巨大質量星が進化した超新星の可能性があると考えられた。我々はこの超新星と同程度の金属量を持つ巨大質量星の進化を重力崩壊直前まで計算し、その後、非球対称な超新星爆発を計算した。そして、この超新星から放出される ^{56}Ni の量を見積もりSN 2007biの観測から推定される ^{56}Ni の生成量を再現しうるかを調べた。

われわれは星の初期質量を110、250太陽質量、金属量を $Z=0.004$ と設定した。これらの星は進化の途中で質量放出し、最終的には43、61太陽質量のウォルフ-ライエ星になった。次に我々はこれらの星について非球対称で強い爆発の超新星爆発と爆発的要素合成を計算した。ここでは爆発の非球対称性をパラメータとした。

計算の結果、これらの超新星で放出される ^{56}Ni やケイ素の量は爆発の非球対称性に依存し、非球対称性が弱いほど多くの ^{56}Ni が放出された。そして、鉄、カルシウム、ケイ素などの放出速度の分布に大きな分散が見られた。また、110、250太陽質量の超新星モデルがSN 2007biの観測から推定される ^{56}Ni の放出量を再現できることがわかった。そのため超巨大質量星が進化した非球対称な重力崩壊型超新星はSN 2007biの爆発に対応する可能性がある。

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11件)

Takashi Yoshida, Shinpei Okita, Hideyuki Umeda, Type Ic core-collapse supernova explosions evolved from very massive stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 438, 2014, 3119-3127.

DOI: 10.1093/mnras/stt2427

<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/185160>

Koh Takahashi, Takashi Yoshida, Hideyuki Umeda, Evolution of progenitors for electron capture supernovae, The Astrophysical Journal, 査読有, 771, 2013, 28 (13 pages).

DOI: 10.1088/0004-637X/771/1/28

Toshio Suzuki, Takashi Yoshida, Toshitaka Kajino, Takaharu Otsuka, β decays of isotones with neutron magic number $N=126$ and r-process

nucleosynthesis, Physical Review C, 査読有, 85, 2012, 15802 (10 pages).

DOI: 10.1103/PhysRevC.85.015802

Chiaki Kobayashi, Natsuko Izutani, Amanda I. Karakas, Takashi Yoshida, David Yong, Hideyuki Umeda, Evolution of fluorine in the Galaxy with the n-process, The Astrophysical Journal Letters, 査読有, 739, 2011, L57 (5 pages).

DOI: 10.1088/2041-8205/739/2/L57

Takashi Yoshida, Akira Takamura, Keiichi Kimura, Shio Kawagoe, Toshitaka Kajino, Hidekazu Yokomakura, Supernova neutrino signal by liquid Argon detector and neutrino magnetic moment, Physics Letters B, 査読有, 704, 2011, 108-112.

DOI: 10.1016/j.physletb.2011.09.041

〔学会発表〕(計 10 件)

Takashi Yoshida, Very massive stars for super-luminous supernovae, Massive stars: From α to Ω , 2013 年 6 月 10-14 日、Rodos Palace、ギリシャ

吉田敬、巨大質量星が進化した非球対称超新星爆発における ^{56}Ni 合成、日本天文学会 2013 年春季年会、2013 年 3 月 20-23 日、埼玉大学

吉田敬、回転大質量星進化コードの開発、日本天文学会 2011 年秋季年会、2011 年 9 月 19-22 日、鹿児島大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田敬 (YOSHIDA Takashi)

京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員
研究者番号：8 0 3 7 4 8 9 1

(2) 連携研究者

高村明 (TAKAMURA Akira)

豊田工業高等専門学校・一般学科・教授
研究者番号：9 0 3 3 2 0 3 0

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：6 0 4 4 7 3 5 7