

平成 29 年 4 月 11 日現在

機関番号：92605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800161

研究課題名(和文) 質量数130-150域における中性子不足核の核融合断面積と元素合成過程

研究課題名(英文) Fusion cross section relating to nucleosynthesis in neutron deficient nuclei with mass number of 130-150

研究代表者

木下 哲一 (Kinoshita, Norikazu)

清水建設株式会社技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40455324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000 円

研究成果の概要(和文)：中性子不足核(p核)は、数MeV程度の低エネルギーのプロトン捕獲、もしくは中性子や α 粒子の放出反応により爆発的環境下で生成する。本研究では、8MeV以下のプロトンと質量数130-150のターゲットの核反応断面積を測定し、実験結果を最もよく再現する準位密度や光学模型に関するモデルの絞り込みを行った。最適な原子核のモデルを用いてネットワーク計算を行うと、 ^{130}Ba 、 ^{132}Ba 、 ^{136}Ce 、 ^{138}Ce 、 ^{144}Sm は、s核へのプロトンの捕獲と核子の放出反応の組み合わせにより天然の存在量がよく説明可能である。しかし、 ^{138}La の存在量は説明できず、ニュートリノなど他の反応を考慮しなければならない。

研究成果の概要(英文)：Neutron deficient nuclei, p nuclei, are synthesized via capture reactions of low energy proton and alpha particle, emission reactions of neutron and alpha particle in explosive environments. In the present work, we measured reaction cross sections by irradiating proton beam with energies of less than 8 MeV to targets with mass numbers of 130-150. We optimized models of level density and optical model potential which reproduce the experimental cross sections. When network calculations were examined, natural abundances of ^{130}Ba , ^{132}Ba , ^{136}Ce , ^{138}Ce , and ^{144}Sm were computed well by combination of capture reaction of proton and emission reactions of nuclei. However, abundance of ^{138}La cannot be computed by these reactions. Synthesis of ^{138}La would be strongly affected by another reaction such as neutrino reaction.

研究分野：原子核物理

キーワード：p核 同位体組成 光学模型 準位密度 核反応断面積 熱核融合反応 ネットワーク計算

1. 研究開始当初の背景

天然には中性子捕獲では元素合成されない鉄よりも重い中性子不足核（ p 核）が 35 種類あり、同位体存在度数%以下の低い割合で存在している。しかし、 p 核の生成に関する核反応や温度条件、生成率、 p 核元素合成が始まった時間情報などについて、未だ謎に包まれている。一方、はやい中性子捕獲でできるウランなどは超新星爆発により瞬間的に作られたことが知られている。

図 1 に示すように、中性子不足核である p 核は、プロトンや α 粒子の捕獲、もしくは中性子の放出反応になどより元素合成されるが、ウランやトリウムが作られるような中性子密度が高い場では仮に p 核が作られたとしても、作られた p 核は中性子捕獲し、存在量は極めて少なくなる。中性子の放出反応が起こる高温状態になる場所でも、やはり高い中性子密度が想定され、太陽系内の p 核の同位体組成は説明困難である。

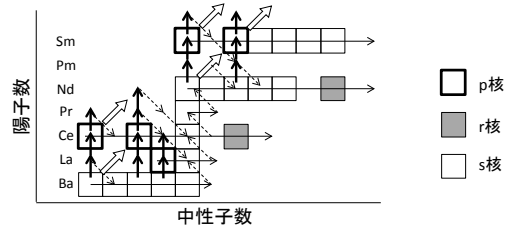


図 1 プロトン、 α 粒子、中性子捕獲による元素合成経路

質量数 130-150 の領域には、本研究で着目している放射性の Sm-146 や非放射性の Sm-144 、 Ce-136 、 Ce-138 、 La-138 など様々な p 核が存在する。中性子数のマジックナンバー 82 の核種も位置しており核構造の観点からも興味深い。本研究では、プロトンや α 粒子の捕獲に着目し、捕獲断面積のデータを充実させる。実験値をよく再現する理論計算による核反応断面積を用いて、 p 核誕生の謎に迫る。

2. 研究の目的

実験により測定が可能な p 核の元素合成に関わる核反応の極々一部であるため、図 1 に示すような p 核元素合成のネットワーク計算には Hauser-Feshbach 統計モデルを用いた核反応断面積の理論値が用いられる。質量数 100 以上では荷電粒子の捕獲反応断面積は小さく、多くは測定されていない。図 1 に示すようなこれらの核種の経路となる核データは存在せず、本研究により実験データを充実させる。この理論値の精度には、原子核の準位密度や光学模型などが強く影響する。 p 核元素合成のネットワーク計算を行う上で、核反応断面積の違いは経路の違いとなり、最終的には同位体組成の違いとして実際の同位体組成とは乖離の大きな結果を生み出す。

本研究では、精度の高いネットワーク計算をするため、核反応断面積の理論計算において、実験値を最もよく再現する準位密度や光学模型の絞り込みを行う。そして、 ^{138}La 、 $^{136,138}\text{Ce}$ 、 $^{144,146}\text{Sm}$ に着目し、同元素間さらには異元素間で存在量や同位体比の進化を検討し、太陽系内のデータと比較を行う。これにより、太陽系内の同位体組成を説明する p 核元素合成の素過程および太陽系誕生前の存在量、 p 核元素合成終了から太陽系誕生までの時間などの情報を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 核反応データの測定

質量数 130-150 の濃縮同位体いくつかを購入し、それぞれを分子電着法により薄膜ターゲット調製する。このターゲットにプロトンビームや α 粒子を照射し、 γ 線測定により生成核種を測定し、断面積を計算する。短半減期の核種は加速器施設に備え付けの Ge 検出器で測定行う。長半減期の核種は生成放射能が微弱であるため、通常の測定環境の 1/100 のバックグラウンドを誇る金沢大学尾小屋地下測定施設にて γ 線測定を行う。生成核種によっては γ 線測定による定量が困難であるため、アメリカ・アルゴンヌ国立研究所にて加速器質量分析を用いて定量する。これまで、ECR イオン源、超伝導線形加速器、ガス充填電磁石を利用した加速器質量分析による測定技術開発を行い、世界初の質量分析による Sm-146 の定量に成功し、応用研究を行ってきた。この測定技術を本研究にも利用する。

(2) p 核元素合成のモデル化

Hauser-Feshbach 統計モデルが組み込まれた核反応の計算コード TALYS を用いて、得られた実験値を最もよく再現する準位密度と光学模型のパラメータの絞り込みを行う。この最適なパラメータを用いて、核図表上の対象領域の核反応を計算する。長期にわたりゆっくりと p 核が作られるシナリオと爆発的環境下で瞬時に作られるシナリオの 2通りのシミュレーションを行い、 ^{138}La 、 $^{136,138}\text{Ce}$ 、 $^{144,146}\text{Sm}$ の同位体組成の進化の計算値を得る。

4. 研究成果

(1) 核反応データの測定

本研究では、 $^{147}\text{Sm}(\gamma, n)^{146}\text{Sm}$ 反応、 $^{144}\text{Sm}(p, \gamma)^{145}\text{Eu}$ 、 $^{142}\text{Nd}(p, \gamma)^{143}\text{Pm}$ 、 $^{143}\text{Nd}(p, n)^{143}\text{Pm}$ の断面積測定を行った。 $^{147}\text{Sm}(\gamma, n)^{146}\text{Sm}$ 反応と $^{144}\text{Sm}(p, \gamma)^{145}\text{Eu}$ 反応の核反応断面積の実験値と理論値の比較を図 2 と図 3 に示した。

中性子の放出反応およびプロトンの捕獲反応は、Hauser-Feshbach 統計モデルを用いた理論計算では、実験値を 2 倍以内の精度で

再現できることが明らかになった。また準位密度には Constant Temperature Fermi Gas モデル、光学模型には実測に基づいた phenomenological optical model を用いると最もよく実験値を再現することが分かった。

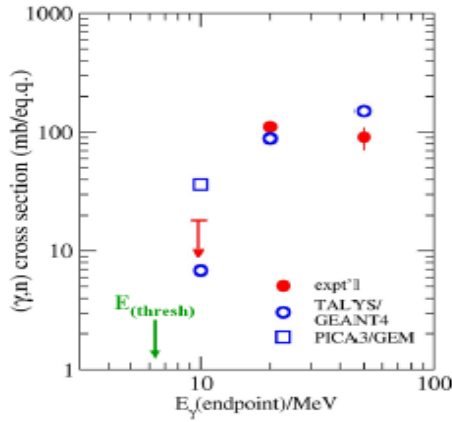


図 2 $^{147}\text{Sm}(\gamma, n)^{146}\text{Sm}$ 反応の断面積と理論計算との比較

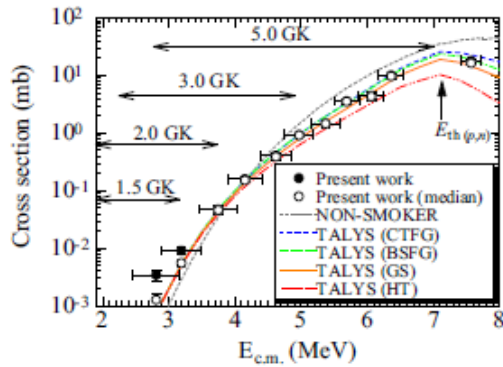


図 3 $^{144}\text{Sm}(p, \gamma)^{145}\text{Eu}$ 反応の断面積と理論計算との比較

(2) p 核元素合成のモデル化

上記の「核反応データの測定」により最も実験値を再現するパラメータを用いた理論計算による核反応断面積を用いて、①長期にわたるプロトン捕獲によりゆっくりと生成、②爆発的環境下で瞬時に生成、の 2 つのシナリオにおける p 核の存在量のネットワーク計算を行った。

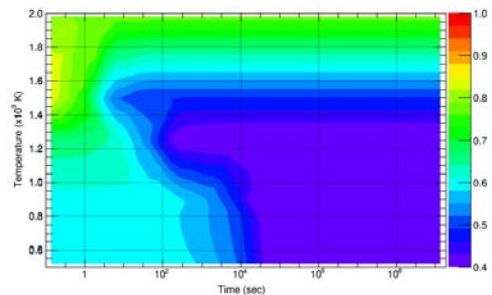


図 4 温度と核融合時間に対する $^{136}\text{Ce}/^{138}\text{Ce}$ 比の関係

「①長期にわたるプロトン捕獲によりゆっくりと生成」では、ある一定の温度とプロトン密度の中で (p, γ) 反応と (p, n) 反応により生成する p 核について、温度と核融合時間と同位体比の情報を得た。図 4 に $^{136}\text{Ce}/^{138}\text{Ce}$ 比の温度と核融合時間の関係を示す。現在の太陽系内の $^{136}\text{Ce}/^{138}\text{Ce}$ 比は 0.74 であり、おおよそ $2 \times 10^9 \text{K}$ の温度が必要とされる。 $2 \times 10^9 \text{K}$ は超新星爆発時の天体の中心付近で瞬間的に得られる温度であり、この温度が定常的に長く続く状況は現在の天体のモデルの中では考えることはできず、「長期にわたるプロトンによりゆっくりと生成するシナリオ」では現在の太陽系内の $^{136}\text{Ce}/^{138}\text{Ce}$ 比を検討するには無理がある。

また「②爆発的環境下で瞬時に生成」では、 (p, γ) 、 (p, n) 、 (p, α) 、 (γ, n) 、 (γ, p) 、 (γ, α) 反応を考慮したネットワーク計算を行った。図 5 と図 6 に、例として 2 種類の温度変化した際の超新星爆発直前の ^{134}Ba と比した p 核存在比の時間変化を示した。図 5 には超新星爆発における最高温度が $3.25 \times 10^9 \text{K}$ の際の p 核存在量の時間変化を、図 6 には最高温度が $2.75 \times 10^9 \text{K}$ の際の p 核存在量の時間変化を示す。

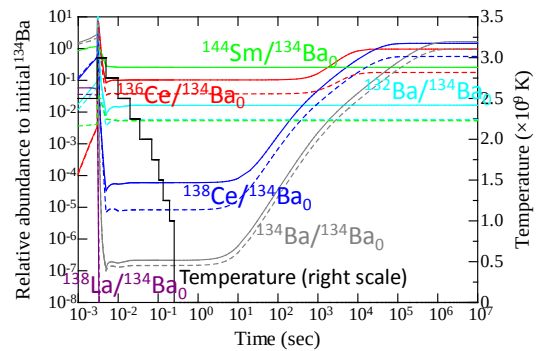


図 5 最高温度 $3.25 \times 10^9 \text{K}$ の際の p 核の組成の時間変化

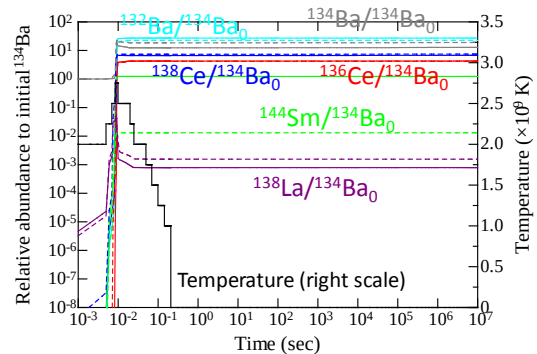


図 6 最高温度 $2.75 \times 10^9 \text{K}$ の際の p 核の組成の時間変化

本研究で行ったシミュレーションでは、最高温度前後の数ミリ秒で劇的に中性子不足核が作られ、その後 β 壊変することにより、

^{136}Ce などの同位体が生成する。核種により、現在の太陽系内の存在量が説明可能な元素合成における温度条件などは異なるが、図5および図6で示した温度変化を起こす場所では主にp核は作られる。

その反面、 ^{138}La は本研究でのシミュレーションでは現在の太陽系内の組成よりも数桁存在量が低く、本研究でのシミュレーションに用いた核反応の経路では全く説明がつかない。ニュートリノとの (ν, e) 反応などを考慮しなければならないことも明らかになった。しかし、ニュートリノとの核反応では、 ^{144}Sm の大きな同位体組成が説明できない。赤色巨星の超新星爆発の際、爆発の中心付近でほとんどのp核がつくられ、外側でニュートリノとの核反応により ^{138}La などが少量作られるものと推定される。

また、このネットワーク計算では、連続した (γ, n) 反応により様々な中性子不足核が生成し、各図表上の安定核よりも中性子不足側にはなれるに従い (γ, p) 反応や (γ, α) 反応の割合が大きくなる。特に (γ, α) 反応において、 α 粒子の光学模型の絞り込みも重要で、より精度の高いシミュレーションをする上で、 α 粒子の放出反応の必要性も、今後の課題として明らかになった。

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 4 件)

- ① Kinoshita, N., Hayashi, K., Ueno, S., Yatsu, Y, Yokoyama, A., Takahashi, N., 2016. Proton capture cross sections on neutron-magic ^{144}Sm at astrophysically relevant energies. Phys. Rev. C 93, 025801.
- ② Wallner, A., Feige, J., Kinoshita, N., Paul, M., Fifield, L.K., Golser, R., Honda, M., Linnemann, U., Matsuzaki, H., Merchel, S., Rugel, G., Tims, S.G., Steier, P., Yamagata, T., Winkler, S.R., 2016. Recent near-Earth supernovae probed by global deposition of interstellar radioactive ^{60}Fe . Nature 532, 69-72.
- ③ Nusair, O., Bauder, W., Gyürky, G., Paul, M., Collon, P., Fülöp, Zs., Greene, J., Kinoshita, N., Palchan, T., Pardo, R., Rehm, K. E., Scott, R., Vondrasek, R., 2016. Accelerator mass spectrometry in laboratory nuclear astrophysics. J. Phys. Conf. Ser. 665, 012076.
- ④ Feige, J., Breitschwerdt, D., Wallner, A., Schulreich, M. M., Kinoshita, N., Paul, M., Dettbarn, C., Fifield, L. K., Golser, R., Honda, M., Linnemann, U., Matsuzaki, H., Merchel, S., Rugel, G., Steier, P., Tims, S. G., Winkler, S. R.,

Yamagata, T. The link between the local bubble and radioisotopic signatures on Earth. JPS Conf. Proc. 14, 010304.

〔学会発表〕(計 9 件)

- ① 木下哲一、関本 俊、大槻 勤、榎本和義、浜島靖典、横山明彦、質量数 140 付近における p プロセス解明に向けた素過程の研究① — $^{147}\text{Sm}(\gamma, p)$ 反応と逆過程一、2014 年放射化学学会年会
- ② 林 和憲、上野慎吾、木下哲一、高橋成人、横山明彦、質量数 140 付近における p プロセス解明に向けた素過程の研究② —陽子過剰核の (p, γ) 反応断面積の測定一、2014 年放射化学学会年会
- ③ 上野慎吾、木下哲一、林和憲、横山明彦、質量数 140 付近における p プロセス解明に向けた素過程の研究③ —プロトン捕獲反応による同位体比のモデル計算一、2014 年放射化学学会年会
- ④ 木下哲一、上野慎吾、林和憲、横山明彦、プロトン捕獲による質量数 130-150 の p 核存在量の解明、2014 年地球化学学会年会
- ⑤ 林和憲、上野慎吾、木下哲一、高橋成人、横山明彦、核合成に関わる $^{142}\text{Nd}(p, \gamma)^{143}\text{Pm}$ 反応と $^{143}\text{Nd}(p, n)^{143}\text{Pm}$ 反応の断面積測定—p 核 ^{144}Sm の同位体組成解明を目指して一、2015 年放射化学学会年会
- ⑥ 木下哲一、A. Wallner、S. Tims、L.K. Fifield、M. Paul、 ^{60}Fe を用いた超新星爆発の痕跡の探索、2015 年放射化学学会年会
- ⑦ 木下哲一、A. Wallner、S. Tims、L.K. Fifield、M. Paul、山形武靖、松崎浩之、Search for supernova signature of ^{60}Fe from manganese crust、The 6th conference of East Asia Accelerator Mass Spectrometry
- ⑧ 木下哲一、A. Wallner、J. Feige、M. Paul、L.K. Fifield、本多真紀、松崎浩之、山形武靖、R. Golser、U. Linnemann、S. Merchel、G. Rugel、S.G. Tims、S. Pavetich、M. Flöhlich、P. Steier、S.R. Winkler、海底試料中の太陽系外気源 Fe-60、2016 年度加速器質量分析シンポジウム
- ⑨ 木下 哲 一、Optimization of Hauser-Feshbach statistical calculation and evolution of p nuclei with mass numbers of 130-150 in stellar environments、The 9th International Conference on Nuclear and Radiochemistry

〔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〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

木下 哲一 (KINOSHITA, Norikazu)
清水建設株式会社技術研究所・研究員
研究者番号：40455324

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

Michael Paul
ヘブライ大学・教授
Anton Wallner
オーストラリア国立大学・シニアフェロー
Ernst K. Rehm
アルゴンヌ国立研究所・シニアフェロー