

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340060

研究課題名(和文)大強度中性子ビームによる中重核の元素起源の研究

研究課題名(英文)Study of origin of heavy elements using intense neutron beam

研究代表者

早川 岳人 (Hayakawa, Takehito)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：70343944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：鉄より重い元素のかなりの部分は遅い中性子捕獲反応過程(s過程)で生成されている。アイソマーはs過程において、元素合成の流れの分岐点となりうるため重要である。その一つがCd-113の半減期が約14.1年のアイソマーであり、その流れの一つはSn-115に到着する。Sn-115の天体起源は未解明の問題である。その理由の一つが、アイソマーへの分岐比が計測されていないからである。そこで、J-PARCの大強度中性子ビームを用いてCd-113アイソマーへの分岐比の計測を行った。

研究成果の概要(英文)：Many isotopes heavier than iron are synthesized by the slow neutron capture reaction process (s-process) in stars. Isomers in stable isotopes have sometimes an important role as a branching point in nucleosynthesis flow in the s-process. An isomer with a half-life of 14.1 y in ^{113}Cd is a branching point from which a nucleosynthesis flow reaches to a rare isotope ^{115}Sn . The astrophysical origin of ^{115}Sn has remained still an open question. The s-process abundance of ^{115}Sn depends on the ratio of the $^{112}\text{Cd}(n, \gamma)^{113}\text{Cd}_m$ reaction cross section to the $^{112}\text{Cd}(n, \gamma)^{113}\text{Cd}_g$ reaction cross section. However, the isomer production ratio following the neutron capture reaction has not been measured in the energy region higher than the thermal energy. An intense neutron beam experimental system ANNRI in J-PARC has a high purity germanium (HPGe) detector system consisting of two cluster detectors. We measured γ -rays using the HPGe detectors in conjunction with a time-of-flight method at ANNRI.

研究分野：実験核物理学

キーワード：宇宙核物理学

1. 研究開始当初の背景

太陽系に存在する約 290 核種のうち、天体起源(核反応及び、天体環境)が不明な核種は 8 核種である。その 8 核種のうちの 하나가 Sn-115 である。この領域の核種は中性子捕獲反応とベータ崩壊による s 過程ないし、r 過程の後の中性子過剰領域からベータ崩壊で生成される。Sn-115 を除く核種(同位体)の太陽組成は、これらの元素合成過程で説明できる。しかし、0.34%の同位体組成を持つ Sn-115 の起源については不明であった。

申請者は、Sn-115 の起源として、Cd-113 アイソマー経由による s 過程による生成を提案した(図 1 の点線による元素合成の流れ)。これまでの研究では、Cd-113 アイソマー経由の元素合成が良く考慮されていなかった。これまで、Cd-112 から Cd-113 のアイソマーへの中性子捕獲反応断面積が計測されておらず、それが無視できるほど小さいと仮定されていたためである。仮に、この反応断面積が有意な量を持つ場合には、Cd-113 アイソマーから Sn-115 が生成されることになる。

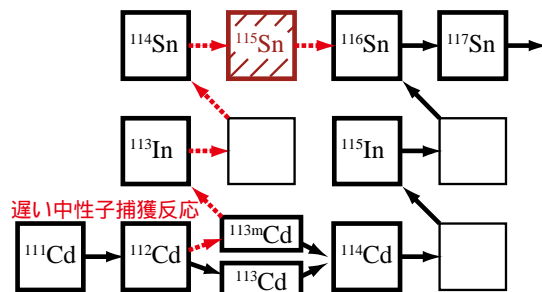


図 1 sn-115 近傍の元素合成の流れ。Cd-112 から Cd-113 アイソマーへの分岐が有意な量があれば、太陽系に存在する Sn-115 の起源が理解できる。

2. 研究の目的

本研究では、熱外中性子領域で、J-PARCの中性子ビームを用いてCd-112 から中性子捕獲反応によるCd-113の基底状態とアイソマーへの生成比を測定する。この結果を元に、元素合成モデルでSn-115の生成量を計算し、太陽組成と比較することで、Sn-115の起源としてCd-113アイソマーの寄与を評価する。

3. 研究の方法

これまでの研究によって、Cd-113のような分岐点においては中性子捕獲反応断面積の

絶対値より、中性子捕獲反応によるアイソマーと基底状態への分岐比が重要な物理量であることが判明している。基本的には、アイソマーの生成比 $m/(g+m)$ に Sn-115 の生成量が比例する。そのため、中性子捕獲反応後の亜アイソマーと基底状態への分岐比の計測が重要である。

これまで、アイソマーへの分岐比は熱領域エネルギーのみで計測されており、熱外領域や J-PARC の大強度ビームによる核データ計測に最適化されたガンマ線計測システムを用いる。Cd-112 同位体濃縮試料にパルス中性子ビームを照射し、Cd-113 の基底状態とアイソマーに崩壊する識別可能なガンマ線を大容量の Ge 半導体検出器で測定する。基底状態に落ちるガンマ線の和と、アイソマーに落ちるガンマ線の和の強度比を中性子エネルギーの関数として評価する。

Cd-112 の中性子捕獲反応では Cd-113 の励起状態が生成される。励起状態は中性子離別エネルギーより僅かに高い程度であるため、ほぼ線崩壊によって基底状態ないしアイソマーに崩壊する。生成された状態と基底状態等とのエネルギーは 6MeV 以上あり、E1 遷移が中心であるが、複数の線を放出するカスケード崩壊の割合が高いと想定される。

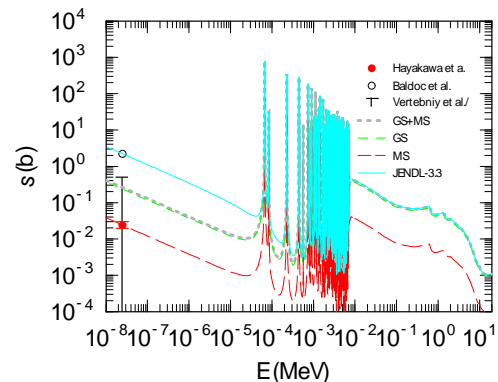


図 2 これまでの Cd-112 の中性子捕獲反応の断面積。熱領域では、既存の Recommended value が 1 桁小さいことが判っている。

J-PARC には核データ計測用の中性子核反応測定装置 ANNRI が設置されている。ANNRI には高分解能の 4 型高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器システムが既に設置されている。Ge 半導体検出器のエネルギー分解能は $dE/E=0.3 \sim 0.5\%$ と高く、個々の線の識別が可能である。そこで、既に判明している基底状態に落ちるガンマ線と、アイソマーに落ちるガンマ線の強度を計測する。中性子を Li グラスシンチレーターで計測し、飛行時間法によってターゲット中での吸収を計測する。

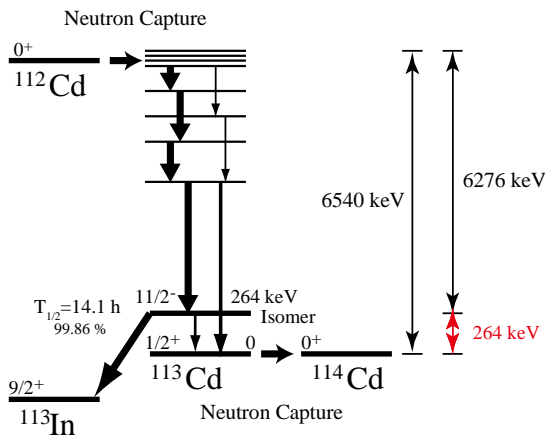


図3 Cd-112 の中性子捕獲反応の模式図

基底状態とアイソマーのエネルギー差は $264\text{keV}/6.5\text{MeV}=4\%$ であるためシンチレータによるトータルエネルギーの計測方法は不可能ではないが困難である。この場合、トータルエネルギーの低いアイソマーに対する割合が小さいため、大きな基底状態へのピークに隠れて事実上困難と予測される。

そこで、Ge の高いエネルギー分解能を生かして、基底状態とアイソマーに崩壊するガンマ線の強度比を計測した。この強度比を中性子のエネルギーでゲートを掛けることで、エネルギー依存性を評価する。

4. 研究成果

図4に中性子のTOFスペクトルの例を示す。Cd-112の同位体濃縮試料であるが、1%以下の濃度でCd-113が混ざっている。Cd-113の熱領域の中性子捕獲反応断面積は、約20657バーンであり、Cd-112の熱領域より4桁程度大きいはずである。そのため、量でCd-112はCd-114より2桁程度多いが、反応率では約2桁Cd-113の方が多くなる。ただし、中性子のエネルギーが上がるにつれて、Cd-113の中性子捕獲反応断面積は急激に下がるため、eV以上のエネルギー領域では、Cd-112反応を測定できるはずである。図4の中のインセットに高エネルギー部分の拡大を示す。Cd-112の共鳴ピークが観測されている。

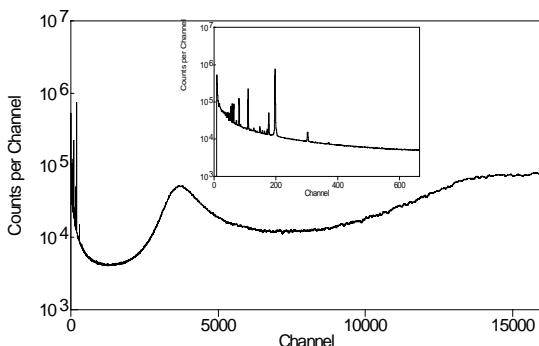


図4 中性子のTOFスペクトルの例

図5に中性子のTOFゲートによるガンマ線のスペクトルを示す。強度比が変わっていることが判る。

残念なことに、J-PARCのハドロン施設における放射能漏れ事故によって、ハドロン施設だけでなく、中性子源も含めたJ-PARCが運転停止になった。安全確認が終わるまで、中性子源MLFは約1年間に亘って停止になり、その間実験は全て中止となった。再開後に、本実験を再開したが、今度はミューオン施設における火災事故が発生し、数週間に亘って実験が中止となり、残念なことに受理されていたマシンタイムもキャンセルとなった。この2つの事故で、約1年半研究が遅れた。

現時点では、基底状態とアイソマーに崩壊するガンマ線を識別でき、相対的な強度比を求めることが可能であることを確認した。

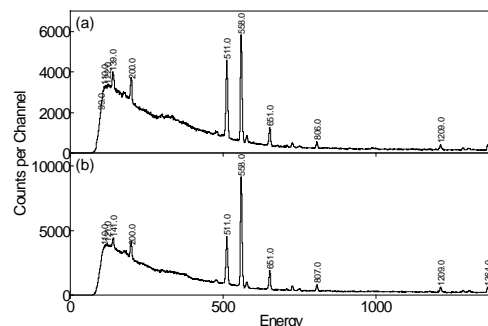


図5 中性子のTOFによるゲートスペクトルの例

仮に、本仮説で太陽組成が説明できない場合の可能性として、Cd-113の基底状態とアイソマーの間の遷移問題が挙げられる。AGB星では、温度は108Kに達し、数MeVの線も輻射の一部に存在する。そのため、(, ') 反応で基底状態とアイソマーの間の遷移が起こる可能性がある。このような遷移は、アイソマーを有するLu-176やTa-180でも知られている。そこで、放射光施設にファイバーレーザーを導入することで、レーザーコンプトン散乱ガンマ線のエネルギー領域を拡大して、Cd-113の(, ') が発生しやすい励起状態の探索を行う。レーザーコンプトン散乱ガンマ線とは、電子とレーザーの散乱で発生させるガンマ線である。そのため、既に保有している波長 $2\mu\text{m}$ のファイバーレーザーを放射光蓄積リング UVSOR-II に運搬しレーザーコンプトン散乱ガンマ線を生成した。

また、宇宙核物理の問題として、Nb-92の天体起源に関する研究を行った。Nb-92は3千5万年の半減期を有する放射性同位体であり、現在の太陽系には存在しない。しかし、隕石研究の進展によって、太陽系形成時には安定な同位体Nb-93と比較して、Nb-92/Nb-93 $\sim 10^{-5}$ の量のNb-92が存在していたことが判明した。しかし、その宇宙起源は謎であった。そこで、代表者等は重力崩壊型超新星爆発に

おけるニュートリノによる生成仮説を提案した。そのため、Nb-92に関連したニュートリノ・原子核反応率をQRPAモデルで計算し、超新星爆発モデルに組み込んで計算を行った。さらに、銀河系における物質化学進化を考慮した結果、太陽系形成の前に超新星爆発が発生した場合には、隕石で測定された量を再現できることが判った。

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14件)

1. 早川岳人、梶野敏貴、千葉敏、最近の研究から「太陽系を作った超新星爆発はいつ起きたのか？」

-宇宙核時計ニオブ92-、日本物理学会誌、掲載予定(2015)。

2. 早川岳人、宮本修治、展望「レーザーコンプトン散乱線を用いた光核反応理論の実証」、アイソトープ協会機関誌「Isotope News」、6月号P.12-P.17(2015)。

3. S.Matsuba, T.Hayakawa, T.Shizuma, N.Nishimori, R.Nagai, M.Sawamura, C.T.Angell, M.Fujiwara, R.Hajima, "Diffraction of γ -rays with energies of 1.17 and 1.33 MeV by a flat Si crystal", Japanese Journal of Applied Physics 54, 052203, (2015)。

4. E.Mcneice, K.Setoodehnia, B.Singh, Y.Abe, D.N.Binh, A.A.Chen, J.Chen, S.Cherubini, S.Fukuoka, T.Hashimoto, T.Hayakawa, Y.Ishibashi, Y.Ito, D.Kahl, T.Komatsubara, S.Kubono, T.Moriguchi, D.Nagae, R.Nishikiori, T.Niwa, A.Ozawa, T.Shizuma, H.Suzuki, H.Yamaguchi, T.Yuasa, In-beam γ -ray Spectroscopy of ^{30}P via the $^{28}\text{Si}(^3\text{He}, p)^{30}\text{P}$ Reaction, Nucl.Data Sheets 120, 88 (2014). 10.1016/j.nds.2014.07.014

5. T.Komatsubara, S.Kubono, T.Hayakawa, T.Shizuma, A.Ozawa, Y.Ito, Y.Ishibashi, T.Moriguchi, H.Yamaguchi, D.Kahl, S.Hayakawa, D.N.Binh, A.A.Chen, J.Chen, K.Setoodehnia, T.Kajino, Excited states above the proton threshold in ^{26}Si , Eur. Phys. J. A 50, 136 (2014). 10.1140/epja/i2014-14136-4

6. K.Horikawa, S.Miyamoto, T.Mochizuki, S.Amano, D.Li, K.Imasaki, Y.Izawa, K.Ogata, S.Chiba, T.Hayakawa, Neutron

angular distribution in (γ, n) reactions with linearly polarized γ -ray beam generated by laser Compton scattering, Phys. Lett. B 737, 109 (2014). 10.1016/j.physletb.2014.08.024

7. R.Hajima, T.Hayakawa, T.Shizuma, C.T.Angell, R.Nagai, N.Nishimori, M.Sawamura, S.Matsuba, A.Kosuge, M.Mori, M.Seya, Application of Laser Compton Scattered γ -ray beams to nondestructive detection and assay of nuclear material, EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL-SPECIAL TOPICS, 223, 6, 1229-1236 (2014)。

8. T.Kajino, G.J.Mathews, T.Hayakawa, Neutrinos in core-collapse supernovae and nucleosynthesis, JOURNAL OF PHYSICS G-NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS, 41, 4, 044007 (2014). 10.1088/0954-3899/41/4/044007

9. T.Hayakawa, K.Nakamura, T.Kajino, S.Chiba, N.Iwamoto, M.K.Cheoun, G.J.Mathews, SUPERNOVA NEUTRINO NUCLEOSYNTHESIS OF THE RADIOACTIVE Nb-92 OBSERVED IN PRIMITIVE METEORITES, Astrophysica Journal Letters, 779, L9, (2013). 10.1088/2041-8205/779/1/L9

10. M.Sugawara, T.Hayakawa, M.Oshima, Y.Toh, A.Osa, M.Matsuda, T.Shizuma, Y.Hatsukawa, H.Kusakari, T.Morikawa, Z.G.Gan, T.Czosnyka, Possible band termination in ^{99}Rh , Phys.Rev. C 87, 064319 (2013). 10.1103/PhysRevC.87.064319

11. T.Shizuma, T.Hayakawa, H.Ohgaki, H.Toyokawa, T.Komatsubara, N.Kikuzawa, T.Inakura, M.Honma, H.Nakada, Dipole strength distribution in ^{56}Fe , Phys.Rev. C 87, 024301 (2013). 10.1103/PhysRevC.87.024301

12. M.Oshima, T.Kin, S.Nakamura, M.Honma, F.Minato, T.Hayakawa, K.Y.Hara, A.Kimura, M.Koizumi, H.Harada, J.Goto, Y.Murakami, Spectroscopic Study of ^{63}Ni via Cold Neutron Capture Reaction: I. Nuclear Structure of ^{63}Ni , J. Phys. Soc. Jpn. 81, 084201 (2012). 10.1143/JPSJ.81.084201

13. M.Sugawara, T.Hayakawa, M.Oshima, Y.Toh, A.Osa, M.Matsuda, T.Shizuma, Y.Hatsukawa, H.Kusakari, T.Morikawa, Z.G.Gan, T.Czosnyka, Possible

antimagnetic rotational band and neutron alignment in ^{101}Pd , Phys. Rev. C 86, 034326 (2012).
10.1103/PhysRevC.86.034326

14. M.-K.Cheoun, E.Ha, T.Hayakawa, S.Chiba, K.Nakamura, T.Kajino, G.J.Mathews,
Neutrino induced reactions for ν -process nucleosynthesis of ^{92}Nb and ^{98}Tc , Phys.Rev. C 85, 065807 (2012).
10.1103/PhysRevC.85.065807

〔学会発表〕(計 1 件)

1. 日本原子力学会、2014 年秋の大会「 $\text{Cd-112}(n, \gamma)$ 反応における線測定」早川岳人他、2015 年 3 月 20 日、茨城県、日立市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 岳人 (HAYAKAWA, Takehito)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：70343944

(2) 研究分担者

静間 俊行 (SHIZUMA, Toshiyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：50282299

藤 暢輔 (TOH, Yousuke)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号：60354734

梶野 敏貴 (KAJINO, Toshitaka)

自然科学研究機構国立天文台・理論研究部・准教授

研究者番号：20169444

(3) 連携研究者

中村 詔司 (NAKAMURA, Shoji)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号：90421461

木村 敦 (KIMURA, Atsushi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号：30360423