

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540342

研究課題名(和文)無機シンチレータ標的によるp過程元素の光核反応の研究

研究課題名(英文) Study of the photonuclear reactions of p-nuclides by means of inorganic scintillation targets

研究代表者

嶋 達志 (Shima, Tatsushi)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号：10222035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)： ^{92}Mo はモリブデンの安定同位体の中でもっとも中性子数が少なく、宇宙元素合成において「p-過程元素」に分類されるが、実際に観測される ^{92}Mo の量は、理論による予測値の数十分の1しかなく、宇宙核物理学における難問のひとつとなっている。 ^{92}Mo 合成に対してもっとも影響が大きい $^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91}\text{Nb}$ 反応は、従来、断面積が未測定であったが、本研究はMo同位体を含む検出器自身を“能動標的”とする新しい測定手法を開発することによって、反応断面積の精密測定を実現した。また、断面積測定のもうひとつの手法として、高感度放射化分析法の開発にも成功した。

研究成果の概要(英文)： ^{92}Mo is the most neutron-deficient nuclide in molybdenum isotopes, and is supposed to be produced via the p-process of the astrophysical nucleosynthesis. It has been a long-standing problem in nuclear astrophysics that the observed abundance of ^{92}Mo is smaller by a factor of a few ten than the predicted value of the p-process theory. One of the possible reason for this discrepancy is the inaccuracy of the $^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91}\text{Nb}$ reaction cross section which has not been measured experimentally. We developed a new method for measurement of the $^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91}\text{Nb}$ cross section by using an inorganic scintillator including molybdenum as an active target. A high-sensitivity photo-activation analysis was also developed, and was successfully used for measurement of the $^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91}\text{Nb}$ reaction cross section using a quasi-monochromatic laser Compton-scattered gamma-ray beam provided at the NewSUBARU synchrotron radiation facility of the University of Hyogo.

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：p-過程 モリブデン92 能動標的 無機シンチレータ 光核反応 放射化法

1. 研究開始当初の背景

宇宙に存在するさまざまな原子核の中で、安定線よりも陽子過剰な側に孤立して存在するものは「p-核 (proton-rich nuclei)」と呼ばれ、35核種の存在が知られている。p-核は、絶対的な存在量は少ないが、宇宙における中性子捕獲反応を中心とした主要な元素合成過程では作ることができないため、その生成過程と、その過程が起こる天体現象は宇宙核物理学における大きな謎の一つとなっている。これまでに提唱されたさまざまなシナリオのうち、定量的にもっとも成功していると思なされるものは、s-過程、r-過程などの主要な過程で作られた原子核が、超新星爆発の際に発生する強いガンマ線の照射を受け、 (γ, n) 反応を立て続けに起こすことによってp-核に至る、というものである。しかしこのシナリオに基づいた理論計算においても、 ^{92}Mo 、 ^{96}Ru 、 ^{113}In 、 ^{112}Sn 、 ^{138}La 、 ^{152}Gd 等が十分に生成されない、という問題が指摘されており、積年の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究は、上記のp-核合成シナリオの中で、p-核を作る (γ, n) 反応よりもむしろ、それを壊す (γ, p) 、 (γ, α) 反応の寄与が不明確であることに着目し、それらの反応断面積を実験的に測定することで、シナリオの再検証に必要な正確な反応率データを取得することを目的とした。また、このような測定を実現するための方法として、無機シンチレータ結晶を能動標的として用いる測定手法、および高感度光放射化法の開発をも目標とした。

3. 研究の方法

(γ, n) 反応の場合、生成される中性子が中性粒子であり標的物質の外部へ飛び出し得るため、中性子検出器を標的の周囲に設置することにより容易に測定が可能である。一方、 (γ, p) 、 (γ, α) 反応の場合、超新星爆発で発生するガンマ線のエネルギー領域 (~10MeV 以下) では生成する p、 α の運動エネルギーが低く、標的物質内で止まってしまうため、測定が難しかった。そこで我々は、(1) 標的核を含むシンチレータ物質を能動標的として用いることで、生成粒子が内部で止まった場合でも検出を可能とする方法、(2) (γ, p) 、 (γ, α) 反応で生成された放射性核種を低バックグラウンド放射線計測法によって検出する方法、の2つを考案し、開発を行なった。これらの手法による光核反応実験は、兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・ニュースバル放射光施設において提供される高品質な準単色レーザー逆コンプトンガンマ線を用いて行なった。

4. 研究成果

Fig. 1 に本研究で開発した能動標的の実験設置アップを示す。

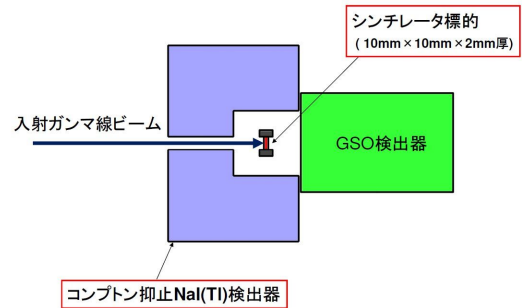


Fig. 1. 実験セットアップ (側面図)。

この手法では、標的核を含むシンチレーション物質にレーザー逆コンプトン散乱法で発生した準単色エネルギーのガンマ線ビームを直接照射し、標的核が (γ, p) 、 (γ, α) 反応を起こした際に放出される荷電粒子を、シンチレーション光の観測によって検出する。この時、入射ガンマ線がシンチレーション物質と相互作用することによって大量に生じるコンプトン散乱電子、光電子、電子・陽電子対がバックグラウンド信号となるため、標的を別のシンチレーション検出器で取り囲み、それらの電子、ガンマ線に対する反同時計数を行ない、バックグラウンドを抑圧する。

この手法の有効性を確認するため、小型のNaI(Tl)検出器を能動標的として用い、ガンマ線エネルギー30MeVにおいて $^{23}\text{Na}(\gamma, p)^{22}\text{Ne}$ 反応の試験測定を行なった。その結果、Fig. 2 に示すように、期待される陽子の波高12~14MeVの範囲において、約5倍のS/N比改善が得られた。 $^{23}\text{Na}(\gamma, p)^{22}\text{Ne}$ 反応の真のイベントを確認するためには、さらに4倍ほどのS/N比向上を要するため、シンチレータ標的からのアナログ信号に波形弁別解析を施し、散乱電子と (γ, p) 反応からの陽子を識別する準備をすすめている。

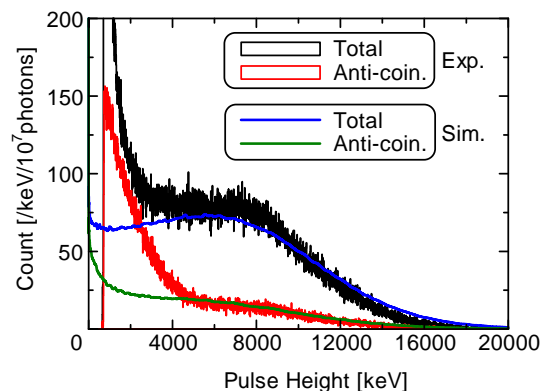


Fig. 2. 30MeV 準単色ガンマ線に対するNaI(Tl)シンチレータ標的の波高スペクトル。ヒストグラム; 実験値(黒; 反同時計数なし、赤; 反同時計数あり)、実線; モンテカルロ計算(青; 反同時計数なし、緑; 反同時計数あり)。

一方、金属モリブデン標的に 17MeV のレーザー逆コンプトンガンマ線を照射し、光核反応で生成された放射性核種からの崩壊ガンマ線を低バックグラウンドゲルマニウム検出器によって計数することにより、モリブデン同位体の光核反応断面積の測定を行なった。Fig. 3 に典型的な崩壊ガンマ線スペクトルを示す。天然放射性同位元素 ^{40}K 、 ^{214}Bi のガンマ線ピークに加えて ^{100}Mo および同時に照射した参照用試料 ^{197}Au の反応生成物 ^{99}Mo 、 ^{99}Tc 、 ^{196}Au からのピークが明瞭に観測されていることがわかる。

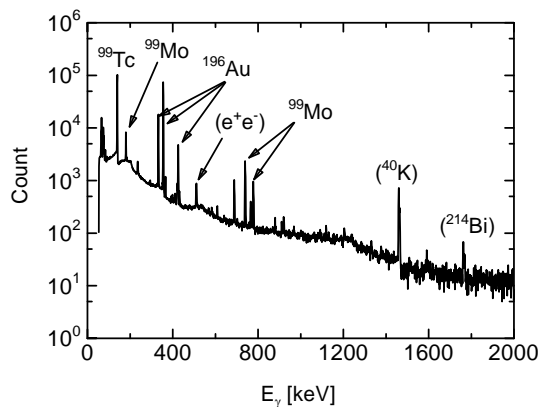


Fig. 3. ガンマ線照射後のモリブデン試料に含まれる光核反応生成物からの崩壊ガンマ線スペクトル。

また、このスペクトルの 1200keV 付近を拡大した図を Fig. 4 に示す。

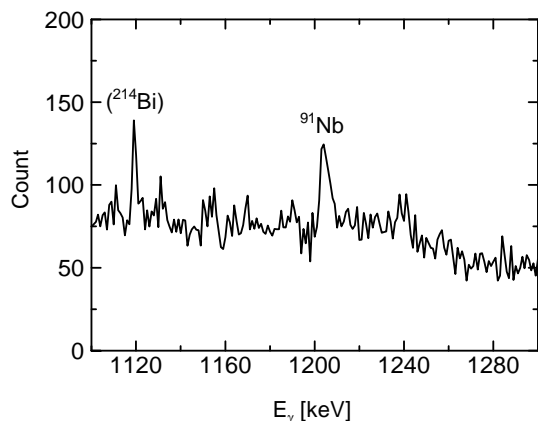


Fig. 4. Fig. 3 のスペクトルのうち 1200keV 付近を拡大したスペクトル。

このように、 $^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91}\text{Nb}$ 反応によって生成された ^{91}Nb の 1/2-アイソマー状態からの β - γ 崩壊(半減期 60.86 日)による 1204.67keV ガンマ線の観測に成功した。現在、入射ガンマ線エネルギー 11MeV~17MeV の領域での

測定を行なっている。

なお、上記の光核反応測定において、入射ガンマ線ビームの強度およびエネルギーの絶対値較正は、断面積の測定精度を決めるもっとも重要なファクターのひとつであり、本研究ではそれらの較正の精度を高めるため、特に工夫を凝らした。ビーム強度については、光子計数法を適用し、ガンマ線光子数の統計分布から平均光子数を求めることにより、絶対強度を 2%の精度で決定することに成功した。またエネルギーの絶対値測定については、放射性同位元素による標準ガンマ線源を用いて較正されたゲルマニウム検出器を用いることで、 10^{-4} の精度が達成された。

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)

H. Utsunomiya, T. Shima, K. Takahisa, D.M. Filipescu, O. Tesileanu, I. Gheorghe, H.-T. Nyhus, T. Renstrøm, Y.-W. Lui, Y. Kitagawa, S. Amano, and S. Miyamoto, "Energy Calibration of the NewSUBARU Storage Ring for Laser Compton-Scattering Gamma Rays and Applications", accepted for publication in IEEE Transactions on Nuclear Science.

H. Ejiri, I.H. Hashim, Y. Hino, Y. Kuno, Y. Matsumoto, K. Ninomiya, H. Sakamoto, A. Sato, T. Shima, A. Shinohara, K. Takahisa, and N.H. Tran, "Nuclear γ Rays from Stopped Muon Capture Reactions for Nuclear Isotope Detection", Journal of Physical Society of Japan 82, 044202 (2013).

H. Ejiri and T. Shima, "Resonant photonuclear isotope detection using medium-energy photon beam", Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams 15, 024701 (2012).

T. Kondo, H. Utsunomiya, H. Akimune, T. Yamagata, A. Okamoto, H. Harada, F. Kitatani, T. Shima, K. Horikawa, and S. Miyamoto, "Determination of the number of pulsed laser-Compton scattering photons", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A659, 462-466 (2011).

〔学会発表〕(計 6件)

T. Shima,

“Energy Calibration of Electron and Gamma-ray Beams at NewSUBARU-GACKO”,
Nuclear Physics and Gamma-ray sources for Nuclear Security and Nonproliferation, Ricotti, JAEA, Tokai, January 28-30, 2014
(招待講演)

T. Shima,

“Nuclear Astrophysics with Secondary Particle Beams”,
French Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems,
CNRS, Paris, September 30 - October 3 2013
(招待講演)

嶋 達志,

“高輝度ガンマ線による基礎物理研究”
実験核物理・ビーム物理合同シンポジウム
「次世代高輝度低エネルギーレーザーコンプトン散乱ガンマ線が切り開く展望」
日本物理学会秋季大会、2013年9月22日(日)、
高知大学
(招待講演)

T. Shima,

“Nuclear Astrophysics with Laser Compton-backscattered γ -rays”,
The 13th Symposium on Advanced Photon Research,
Kansai Photon Science Institute, JAEA,
November 15-16, 2012
(招待講演)

嶋 達志,

“弱電核反応と元素合成”
理論・実験合同シンポジウム「元素の起源と核物理」
日本物理学会秋季大会、2012年9月13日(木)、
京都産業大学
(招待講演)

T. Shima,

“Nuclear Astrophysics with Laser Compton-backscattered γ -rays”,
ECT* Workshop on Electro-Weak Probes: from Low-Energy Nuclear Physics to Astrophysics, Trento, Italy, June 25-29, 2012
(招待講演)

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶋 達志 (SHIMA, Tatsushi)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号: 10222035

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: