

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2011

課題番号：20244036

研究課題名（和文） 高強度パルスビームによる星の中での $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$ 断面積測定研究課題名（英文） Cross section measurements of  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$  reactions by means of an intense pulsed beam

研究代表者

宮武 宇也 (MIYATAKE HIROARI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：50190799

研究成果の概要（和文）：星の中での重元素合成でキーとなる  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$  反応の断面積測定を行い、重心系のエネルギー2.1 MeVでのデータを得た。これにより実際に必要となる 300 keVでの断面積を外挿で求めるときの精度を高めることができた。また、幾つかの理論的予測が棄却されることを示唆した。

研究成果の概要（英文）：We performed the cross section measurement at  $E(\text{c.m.})=2.1\text{MeV}$  for the key reaction  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$  of the element synthesis in stars. An important cross section at  $E(\text{c.m.})=300\text{keV}$  can be investigated in more precisely based on this data. And some theoretical predictions were excluded.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	22,700,000	6,810,000	29,510,000
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	37,200,000	11,160,000	48,360,000

研究分野：原子核物理（実験）

科研費の分科・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード：元素合成、原子核物理、加速器ビームハンドリング、天体核物理

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 主系列星内の水素燃焼後のヘリウム燃焼殻で起こる  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  の反応率は、以降の重元素組成比を左右する重要な物理量である。

(2) 必要とされる重心系 300keVでの反応断面積は、直接測定することが困難であるため、より高いエネルギーでの測定値を外挿することにより求められる。この外挿は、反応により放出される $\gamma$ 線の多重極度成分(E1, E2)ごとのエネルギー依存性を調べることでより精度を高められる。

(3) これまでの実験では、特に 2MeV 近傍でのデータの誤差が大きく、そのために外挿値に大きなばらつきがあった。

## 2. 研究の目的

精度よく E1, E2 成分を分離測定できるシステムが、東京工業大学の研究グループによって確立されているので、本研究では、最も実験データがばらついている重心系 2MeV に焦点を当てて、そこでの高精度断面積測定を目指した。

### 3. 研究の方法

(1)  $\gamma$ 線の E1, E2 成分を精度よく分離測定するために、東工大で開発された大体積の鉛遮蔽付き NaI(Tl)検出器 3 台による角度分布測定系を採用した。また、2MeV でのデータを取得するため、高強度、低エネルギーの  $\alpha$  ビームを出せる KEK の TRIAC 施設で実験を行うこととした。

(2) 水冷されたホルダーに 99.9%の高純度  $^{12}\text{C}$  薄膜をセットして標的とした。薄膜作成においては、高強度ビームに耐える金箔でバックグランドされた薄膜を試験開発した(論文番号①)。また、実験時に真空雰囲気中からの不純物炭素の標的への付着を避けるために、標的をおさめた真空槽全体を  $10^{-7}\text{Pa}$  までの高真空を維持できるように排気装置などを整備するとともに、真空槽内壁には表面処理を行ったアルミ材を採用した。

(3) 標的の不純物である  $^{13}\text{C}$  と  $\alpha$  ビームの反応により生じる中性子由来のバックグランド  $\gamma$  線を、測定対象となる  $\gamma$  線から分離するために飛行時間法を採用した。この方法を適用する上で必須となる、バンチされた  $\alpha$  ビームを得るために新しい原理により効率良くビームバンチを形成できるシステムを開発、TRIAC に組込んだ。

### 4. 研究成果

(1) 本研究では、バックグランドとなる中性子により誘起された  $\gamma$  線を、反応により放出された  $\gamma$  線から極力分離することが実験遂行上でのキーポイントとなる。そこで、ビーム強度を、出来るだけ失わずにビームをパルス化し、且つビームオフ時のビーム抑制率が  $10^{-5}$  程度となる、切れの良いビームバンチシステムを新たに開発した。このシステムは、コンパクトで高いバンチング効率を有しており、汎用性もあることから、単独の学術論文として出版した(論文番号②)。

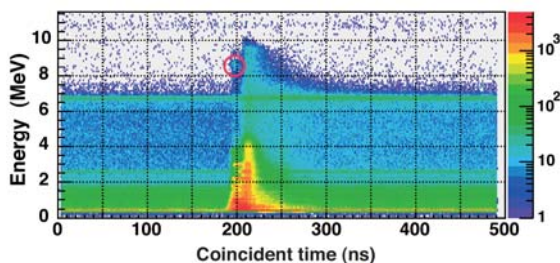


図 1 測定された  $\gamma$  線のエネルギーと時間との相関

(2) 図 1 に測定された  $\gamma$  線の時間スペクトルを示した。断面積導出に必要な  $\gamma$  線は赤丸で囲まれた部分である。反応直後に放出されるこの  $\gamma$  線が検出された後、にやや遅れて大量のバックグランド  $\gamma$  線が検出されていることが見て取れる。

(3)  $\gamma$  線の角度分布から E1, E2 成分の成分費を求め、これまでの測定データの上にプロットした図が図 2 である。図中赤丸で囲まれたデータが今回得られた測定結果である。灰色で示された従来の測定データに較べ精度が向上していることが分かる。青丸で囲まれたデータ及び赤色で示したデータは、今回と同一の測定器系で測られた先行研究の結果である。

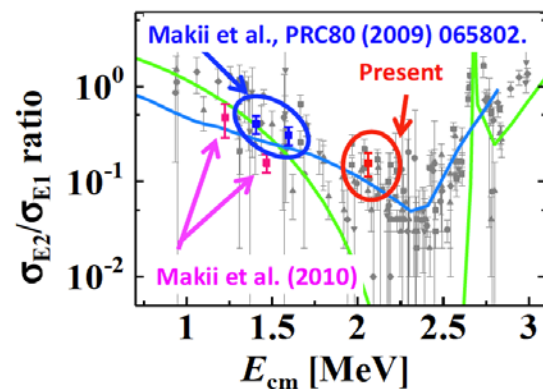


図 2 本研究により得られた E1, E2 成分の断面積比 (赤丸で囲まれたデータ)。過去に得られたデータを合わせて示している。

(4) 図 2 における緑と青の実線は、300keV での断面積を求めるための代表的な理論的外挿線を示している。緑色の外挿線は、今回の結果を含む高精度データをほぼ再現しているが、青色の外挿線は、今回の結果により棄却されうることを示唆した(学会発表①)。

(5) このエネルギー領域での高精度測定をさらに進めて行く上では、バックグランド  $\gamma$  線の由来追求が最も重要となることから、測定に用いた高純度標的の成分分析を急いでいる。最終的には、300 keV に出来るだけ近い低エネルギーかつ高強度  $\alpha$  ビームによる測定を目指している。本研究による新ビームバンチング法により高強度ビーム生成はめどが立った。他方、高強度ビームに耐える高純度  $^{12}\text{C}$  標的の開発が途上であり、成分分析とともに、実験条件を満たす標的の開発を推進している。

(6) 天体における爆発的要素合成では、安定な元素がない質量数 5, 8 を超える一連の核反応率決定が重要であり、本研究の  $^{12}\text{C}(\alpha,$

$\gamma$ )<sup>16</sup>Oの他に、<sup>8</sup>Liが関与する反応率の系統的測定を平行して進めて来た。これらの軽い質量数の核反応データを基礎に、超新星爆発時における重元素合成過程、特に金・白金等の元素を速い中性子捕獲過程で生成して行くための天体環境の詳細な研究を推進して行く予定である。

#### 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 29 件)

- ① Low-background prebunching system for heavy-ion beams at the Tokai radioactive ion accelerator complex, M. Okada, K. Niki, Y. Hirayama, N. Imai, H. Ishiyama, S. C. Jeong, I. Katayama, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y. X. Watanabe, S. Arai, H. Makii, Y. Wakabayashi, Phys. Rev. STAB 15, 030101 (10 ページ) (2012), 査読有
- ② Adhesion improvement of HIVIPP <sup>12</sup>C targets on Au backings, I. Sugai, Y. Takeda, H. Kawakami, N. Ohta, H. Makii, H. Miyatake, Nucl. Instrum. Meth. A 685, 24-33(2011), 査読有
- ③ Development of the GEM-MSTPC for measurements of low-energy nuclear reactions, K. Yamaguchi, H. Ishiyama, Y. X. Watanabe, H. Miyatake, Y. Hirayama, N. Imai, H. Makii, Y. Fuchi, S. C. Jeong, T. Nomura, Y. Mizoi, S. K. Das, T. Fukuda, T. Hashimoto, I. Arai, Nucl. Instrum. Meth. A623 (2010)135-137 査読有り
- ④ A new measurement of the astrophysical <sup>8</sup>Li(d, t)<sup>7</sup>Li reaction, T. Hashimoto, H. Ishiyama, Y. X. Watanabe, Y. Hirayama, N. Imai, H. Miyatake, S. C. Jeong, M.-H. Tanaka, N. Yoshikawa, T. Nomura, S. Mitsuoka, K. Nishio, T. K. Sato, A. Osa, S. Ichikawa, M. Matsuda, H. Ikezoe, S. K. Das, Y. Mizoi, T. Fukuda, A. Sato, T. Shimoda, K. Otsuki, T. Kajino, Phys. Lett. B674, 276-280(2009). 査読有り
- ⑤ E1 and E2 cross sections of the <sup>12</sup>C( $\alpha$ ,  $\gamma$ )<sup>16</sup>O reaction using pulsed  $\alpha$  beams, H. Makii, Y. Nagai, T. Shima, M. Segawa, K. Mishima, H. Ueda, M. Igashira, and T. Ohsaki, Phys. Rev. C 80 065802-1-16 (2009). 査読有り

[学会発表] (計 37 件)

- ① H. Makii, H. Miyatake, Y. Wakabayashi, H. Ishiyama, K. Niki, M. Okada, N. Imai, Y. X. Watanabe, Y. Hirayama, S. C. Jeong, T. Shima, I. Nishinaka, S. Mitsuoka, K. Nishio and S. Chiba, Measurement of the <sup>12</sup>C( $\alpha$ ,  $\gamma$ )<sup>16</sup>O reaction at TRIAC, 11th Int. Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Wako Japan, 17th Nov., 2011.
- ② A new approach for next TRIAC (invited talk), H. Miyatake, The 2nd ANPhA Symposium -Rare Isotope Accelerator Facility: KoRIA-, 2010. 10. 1 - 2, Sungkyunkwan University, Seoul, Korea
- ③ BEAM TEST OF SAWTOOTH-WAVE PRE-BUNCHER COUPLED TO A MULTILAYER CHOPPER, M. Okada, H. Ishiyama, I. Katayama, K. Niki, H. Miyatake, Y. X. Watanabe, H. Makii, S. Arai, 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, Japan, May 23-28, 2010.
- ④ Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex (TRIAC): present and future (Invited talk), S. C. Jeong for TRIAC collaboration, International Symposium on Exotic Nuclei (EXON2009), Sochi, Russia, 28 Sept.-2 October 2009
- ⑤ <sup>12</sup>C( $\alpha$ ,  $\gamma$ )実験の準備状況について、宮武 宇也、第 5 回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会、大阪、2008 年 12 月 24~25 日

[その他]

- ① ホームページ等  
<http://kekranb.kek.jp/>
- ② KEK 技術賞の受賞  
岡田雅之、「2 ギャップバンチャーを用いた鋸歯状波電圧による新バンチング技術の開発」、2011 年 3 月 8 日  
KEK 広報ページ  
<http://legacy.kek.jp/ja/news/topics/2011/11/gijutsusho.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

宮武 宇也 (MIYATAKE HIROARI)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号：50190799

(2) 研究分担者

石山 博恒 (ISHIYAMA HIRONOBU)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師  
研究者番号：50321534  
渡辺 裕 (WATANABE YUTAKA)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：50353363  
牧井 宏之 (MAKII HIROYUKI)  
日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員  
研究者番号：20425573  
(H20：連携研究者)

(3) 連携研究者

新井 重昭 (ARAI SHIGEAKI)  
理化学研究所・仁科加速器研究センター・研究支援員  
研究者番号：90013424  
鄭 淳讚 (JEONG SUNCHAN)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号：00262105  
平山 賀一 (HIRAYAMA YOSHIKAZU)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：30391733  
今井 伸之 (IMAI NOBUYUKI)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：80373273  
嶋 達志 (HIRAYAMA YOSHIKAZU)  
大阪大学・核物理研究センター・助教  
研究者番号：10222035  
仁木 和昭 (NIKI KAZUAKI)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授  
研究者番号：20242167  
岡田 雅之 (OKADA MASASHI)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・技師  
研究者番号：30391759  
菅井 勲 (SUGAI ISAO)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・研究員  
研究者番号：80150291  
新井 重昭 (ARAI SHIGEAKI)  
理化学研究所・仁科加速器研究センター・研究支援員  
研究者番号：90013424

(4) 研究協力者

千葉 敏 (CHIBA SATOSHI)  
日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹  
研究者番号：60354883  
光岡 真一 (MITSUOKA SHINICHI)  
日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹  
研究者番号：40354881  
西中 一郎 (NISHINAKA ICHIROU)  
日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹  
研究者番号：70354884  
若林 泰生 (WAKABAYASHI YASUO)  
日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員  
研究者番号：80447359