

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 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740181

研究課題名（和文） 星の中での $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$ 反応測定に向けた高濃縮炭素 12 標的の開発研究課題名（英文） Preparation of highly enriched ^{12}C target for measurement of stellar $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$ reaction.

研究代表者

牧井 宏之 (MAKII HIROYUKI)

独立行政法人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

研究成果の概要（和文）： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応は恒星内のヘリウム燃焼期後の炭素/酸素比だけでなく、鉄までの中重元素の合成に大きな影響を与えていることが知られているが、恒星内での温度に相当するエネルギーでの反応率の不確定性は大きい。従来の研究では実現できていない、恒星内の温度に近い低エネルギー領域での断面積導出を可能にするため、測定に必要となる濃縮炭素 12 標的の製作を行った。

研究成果の概要（英文）：The $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction plays an important role in determining the mass fraction of ^{12}C and ^{16}O after helium burning, abundance distribution of elements between carbon and iron, and the iron-core mass before a supernova explosion. The reaction cross section at the stellar temperature still has large uncertainty. In order to measure the cross section precisely near the stellar temperature, we produced the enriched ^{12}C target.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：実験核物理、恒星内元素合成、イオン注入、高濃縮標的

1. 研究開始当初の背景

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応は恒星内のヘリウム燃焼期におけるエネルギー発生率・ヘリウム燃焼期後の炭素 / 酸素比・酸素から鉄までの中重元素の合成・超新星爆発直前の構成内部の構造に大きな影響を与えることが知られており、恒星の進化及び元素合成のモデルを構築する上で非常に重要な反応である。信頼できるモデルの構築にはヘリウム燃焼期における恒星内の温度に相当する重心系エネルギー

0.3 MeV での反応率を求める必要があるが、過去 30 年以上にわたって行われてきた測定では必要な精度（約 10%とされている）を達成できていない。測定の精度向上には、(1) 期待される断面積が小さい、(2) 標的に含まれる ^{13}C 等の不純物の (α, n) 反応により発生した中性子起因のバックグラウンドが大きい、(3) 大強度ビームの長時間照射による標的の劣化、などの問題点を克服する必要がある。このため、研究代表者らは入射 α ビーム

の脉冲化と高感度 NaI (Tl) 検出器を組み合わせた手法を開発し、重心系エネルギー1.5 MeV 付近において $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応断面積の高精度測定に成功した (図 1 参照)。この成果を受け、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が共同で設置した短寿命核分離加速実験装置 (TRIAC) で高強度パルス化 α ビームを生成し、図 1 に示した理論計算による断面積の不確定性が大きい、重心系エネルギー3.5 MeV 以上の領域と、理論計算と実際の測定結果の差が大きい、重心系エネルギー2.0 MeV で測定を行う計画が進行している。

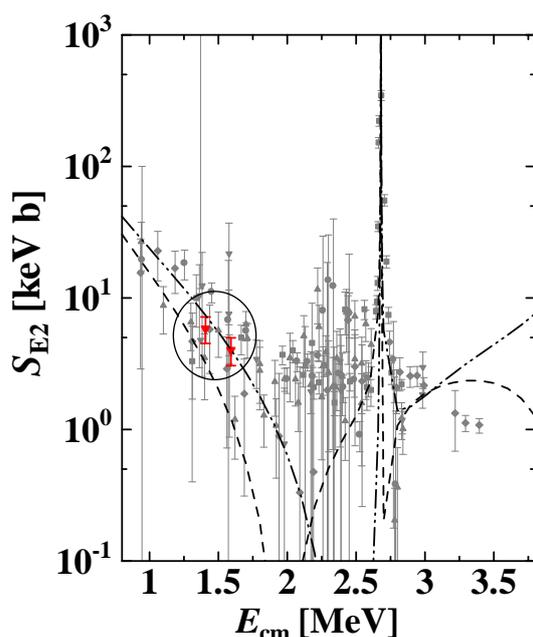


図 1 過去の測定結果。ここで S_{E2} は $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応の E2 遷移に対応した反応断面積からクーロン障壁の効果を除いた、Astrophysical S-factor を表している。研究代表者らが過去に行った測定の結果を○で囲っている。曲線は理論計算の結果である。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応の E2 遷移には ^{16}O の 2^+ 励起状態に起因した複数の共鳴が存在することがわかっており、図中の複数の曲線はそれぞれ共鳴同士の異なる干渉効果を仮定して得られたもので、重心系エネルギー3.5 MeV 以上の領域で大きくエネルギー依存性が異なることが予想されている。さらに、どちらの曲線においても重心系エネルギー 2 MeV 近傍では実験データとの差が大きい。

2. 研究の目的

重心系エネルギー0.3 MeV での $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応断面積は非常に微小 (10^{-17} b) であることが予想されるため、現在の技術で直接測定することは困難である。従って、図 1

に示したような測定結果を理論計算による外挿を行って求めるが、現状では重心系エネルギー0.95 MeV での測定結果の誤差は50%を超えている。これは、重心系エネルギー1 MeV を下回るような低エネルギー領域では断面積は ^{12}C と α 間のクーロン障壁により小さくなる一方、不純物による (α, n) 反応の断面積が $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応の断面積と比較すると大きくなるためと考えられる。重心系エネルギー1 MeV 未満の領域で高精度測定を実現するには、不純物の少ない高濃縮の炭素 12 標的をどのようにして得るかが課題となる。TRIACでの測定では濃縮炭素 12 粉末から薄膜標的を製作する予定であり、これまでのところ濃縮度が 99.95%のものしか得られていない。本研究課題では日本原子力研究開発機構・タンデム加速器施設にはイオン注入を行える装置があり、これを利用して高濃縮標的の製作を行う。

3. 研究の方法

標的は図 2 に示す、イオン源 (ECR ion source) ・質量分析用電磁石 (Analyzing magnet) ・ビーム収束用レンズ (Einzel lens) ・照射箱から構成される装置を用いて、質量分離した ^{12}C イオンを金薄膜に注入して製作する。イオン源は 10Gz、RF~200W の永久磁石方 ECR イオン源 (NANOGAN) を使い、イオン源から引き出されてビーム収束用レンズで収束された ^{12}C ビームは、分析マグネットで質量分離され、Faraday Cup 下流にある照射箱中の金薄膜に照射される。イオン源からの引き出し電圧は最大 25 kV であり、1 価の炭素イオンであればエネルギー25keV まで加速することが可能である。さらに、分析マグネット出口にはスリットが設置されており、分析マグネットの磁場を調整することにより、炭素であれば1 価から6 価のビームを選択することが可能で、イオン源からの引出電圧の 6 倍までのエネルギー (最大 150 keV) を得ることが可能である。

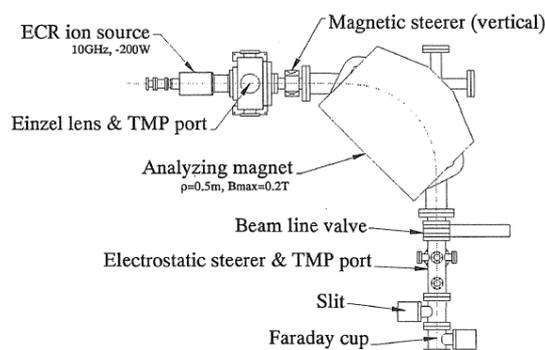


図 2 標的製作に用いた装置。イオン源 (ECR ion source) ・質量分析用電磁石 (Analyzing

magnet)・ビーム収束用レンズ (Einzel lens)・照射箱 (図中の Faraday Cup の下にある) から構成される。

4. 研究成果

標的を製作する条件を決定するため、国際会議 (FINUSTAR3) に出席して $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応断面積測定や本研究課題と同様の手法を用いた標的製作で先行するグループとの情報交換を行った。その結果、ビームのエネルギーはできるだけ低いエネルギーに設定し、金薄膜のできるだけ表面に近い部分に ^{12}C イオンを注入すればよいことがわかった。これを受けてイオン源からの引き出し電圧を 25 kV に設定し、 ^{12}C イオンの価数を 1 または 2 として、25 keV もしくは 50 keV のエネルギーでイオンを注入することにした。実際の標的製作に際しては、イオン源に導入するするガスを CO_2 ガスとし、 $^{12}\text{C}^{2+}$ の金薄膜位置でのビーム電流が最大となるよう、イオン源のパラメータ (導入するガスの流量、RF パワー等) の調整を行った。その状況で得られた金薄膜位置での各イオンの強度分布を図 3 に示す。炭素及び酸素の 1 価から 4 価までのイオンが観測されており、標的の作成に十分な $10\ \mu\text{A}$ 以上の $^{12}\text{C}^{2+}$ ビームが得られていることがわかる。なお、炭素イオンだけでなく、酸素イオンも観測されているのは、導入ガスとして、 CO_2 を選択したためである。また、 $^{12}\text{C}^{3+}$ 及び $^{16}\text{O}^{4+}$ においては両者の質量数 / 価数比がほぼ等しいため、今回使用した装置の分解能では両者を分離することは困難である。図 3 に示したとおり、 $^{12}\text{C}^{2+}$ または $^{12}\text{C}^{2+}$ を使用する際には、酸素イオンは問題とならない。このビームを金薄膜に照射して、標的の作成を行い、イオン注入により濃縮炭素 12 標的が製作可能であることを確認した。

本研究で炭素 12 標的の純度を向上させることが可能となったが、現在よりも低いエネルギー領域で $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応の高精度測定を実現するためには、これまで (例えば、TRIAC では $5\ \mu\text{A}$ 程度) 以上の高強度パルス化 α ビームの開発と、その高強度ビームに耐え得る標的の開発が必要となる。今後も 2 MeV 程度の低エネルギー α ビームを照射可能な加速器施設を用いた試験測定を行いながら、金以外のバック材の検討及び標的冷却システム等、実際の測定で必要になると予想される装置の開発を進める。このため、本研究課題では筑波大学に新たに導入予定のタンデム加速器でのパルス化 He ビームを用いた $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応測定の可能性について検討を行い、関係する研究会に参加してその内容を紹介するとともに、関係者との議論も行った。標的等の開発と実際の実験を遂行するため、このような議論も継続して行う。

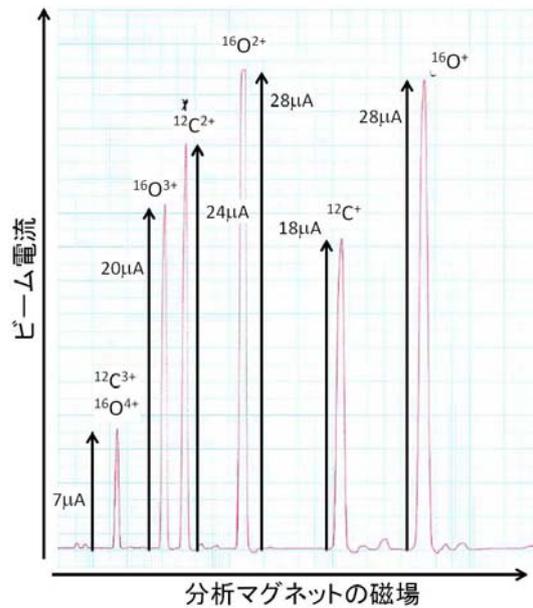


図 3 CO_2 ガスを ECR イオン源に導入し、金薄膜位置で得られたイオンの強度分布。イオン源のパラメータ (導入ガスの流用及び RF パワー等) は金薄膜位置で $^{12}\text{C}^{2+}$ の強度が最大となるように設定した。

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 5 件)

- ① Y. Hirayama, M. Mihara, Y. X. Watanabe, S. C. Jeong, H. Miyatake, S. Momota, T. Hashimoto, N. Imai, K. Matsuta, H. Ishiyama, S. Ichikawa, T. Ishii, T. Izumikawa, I. Katayama, H. Kawakami, H. Kawamura, I. Nishinaka, K. Nishio, H. Makii, S. Mitsuoka, A. Osa, Y. Otokawa, T. K. Sato, "Tilted-foil technique for producing a spin-polarized radioactive isotope beam", *European Physical Journal A* 48, 54-1-10 (2012).
査読有
DOI: 10.1140/epja/i2012-12054-1
- ② H. Ishiyama, K. Yamaguchi, Y. Mizoi, Y. X. Watanabe, S. K. Das, T. Hashimoto, H. Miyatake, Y. Hirayama, N. Imai, M. Oyaizu, S. C. Jeong, T. Fukuda, S. Mitsuoka, H. Makii, T. K. Sato, "GEM-MSTPC: An active-target type detector in low-pressure He/ CO_2 mixed gas", *Journal of Instrumentation* 7, C03036-1-16 (2012).
査読有
DOI: 10.1088/1748-0221/7/03/C03036

- ③ Y. Hirayama, M. Mihara, Y.X. Watanabe, S.C. Jeong, N. Imai, K. Matsuta, H. Miyatake, T. Hashimoto, H. Ishiyama, S. Ichikawa, T. Ishii, T. Izumikawa, I. Katayama, H. Kawakami, I. Nishinaka, K. Nishio, H. Makii, S. Mituoka, S. Momota, A. Osa, Y. Otokawa, T.K. Sata, Y. Wakabayashi, “Spin-polarization of radioactive $^{123}\text{In}_{g.s.}$ by the tilted-foil method”, THE European Physical Journal A 11, 138-1-5 (2011).

査読有

DOI: 10.1140/epja/i2011-11138-8

- ④ 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, Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 15, 030101-1-10 (2012).

査読有

DOI:

10.1103/PhysRevSTAB.15.030101

- ⑤ I. Sugai, Y. Takeda, H. Kawakami, N. Ohta, H. Makii, H. Miyatake, “Adhesion improvement of HIVIPP ^{12}C target”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 655, 24-33 (2011).

査読有

DOI: 10.1063/1.3670740

[学会発表] (計4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, S. Chiba, “Measurement of the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction at TRIAC”, 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG 11), 2011年11月17日、理化学研究所 (埼玉県)

- ② 牧井宏之、「代理反応による不安定核の中性子捕獲断面積測定」、宇宙核連絡協議会主催第3回ワークショップ「J-PARC 中性子ビームラインでの宇宙核物理研究及び関連する研究」、2010年11月4-5日、日本原子力研究開発機構システム計算科学センター (東京都)

- ③ H. Makii, ” Measurement of the E1 and E2 cross sections of the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction”, 宇宙連絡協議会主催第3回 OMEG Institute 「 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction」、2010年11月1日、理化学研究所 (埼玉県)

- ④ H. Makii, H. Miyatake, Y.X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, Y. Hirayama, K. Niki, M. Okada, S.C. Jeong, S. Chiba, S. Mituoka, K. Nishio, Y. Wakabayashi, “Preparation for the measurement of the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction at TRIAC”, 3rd International Conference on “Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics, and Reaction” (FINUSTAR3), 2010年8月23日-27日、Rhodes 島 (ギリシャ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧井 宏之 (Makii Hiroyuki)

独立行政法人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