

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25年 5月 9日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740170

研究課題名（和文） 恒星温度での炭素-ヘリウム核融合反応率測定

研究課題名（英文） Measurement of $^{12}\text{C}+^4\text{He}$ fusion reaction at stellar energy

研究代表者

藤田 訓裕（FUJITA KUNIHICO）

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：60532364

研究成果の概要（和文）：

天体エネルギー近傍での炭素・ヘリウム融合反応 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ の反応速度および天体 S 因子の測定を九州大学タンデム加速器施設において行った。加速器で作られた炭素ビームとヘリウムガス標的を用い、核融合反応で生成した酸素の数を検出器で測定した。

精度のよいデータを取得するために、窓なし気体標的・電離箱型検出器などを含むいくつかの装置開発を行った。その後、反応エネルギー2.4, 1.5MeV での反応率測定に成功し、反応速度のデータを得る事が出来た。また、これまでの測定より難しくなると予想される、反応エネルギーが1.2 MeV 以下での測定も実現可能である事が確かめられた。

研究成果の概要（英文）：

A cross section measurement employing a direct ^{16}O detection method for the reaction energies from $E_{\text{cm}} = 2.4$ to 0.7 MeV is planned at Kyushu University Tandem Laboratory (KUTL).

To perform this experiment and to obtain quantitative information about the cross section to within an error of 10%, we have developed several instruments, including a blow-in type windowless gas target and an ionization chamber.

Experiments were performed at $E_{\text{cm}} = 2.4$ and 1.5 MeV using the developed instruments and the cross sections were obtained. A hybrid detector employing both an ionization chamber and a Si-SSD detector was developed to reduce the carbon backgrounds more efficiently. It was found that the new detector could reduce the background ratio by three orders, and the experiments in $E_{\text{cm}} < 1.2$ MeV were ready for carrying out.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
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：原子核（実験）

1. 研究開始当初の背景

水素燃焼を終えた星ではヘリウム燃焼が起こり、 $3\alpha\rightarrow^{12}\text{C}+\gamma$ と $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ という2つの核融合反応により炭素と酸素の原子核

が生成される。これらの反応後の酸素・炭素の元素存在比は、その後の星での核合成を左右し、超新星に進化するか否かも決める極めて重要な量である。その為、 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$

反応速度の実験測定は、天体核物理における重要課題の1つであり、過去40年にわたって世界的競争が行われたが、未だに精密測定がない。至難の実験である。

(1) 研究の学術的背景

$^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ の反応速度を測定するにあたり、困難の原因となっているのは以下の2つである

①. 反応確率が極めて小さい: この核融合反応は星内部のエネルギー $E_{\text{cm}}=0.3\text{MeV}$ (ガモフピーク位置) で起こる。しかしクーロン障壁以下のエネルギーであるため、反応断面積は極めて小さく (およそ $10^{-17}\text{barn}=10^{-41}\text{cm}^2$)、非常に高いバックグラウンドの分解性能が要求され、誤差10%以下の精度を達成するのは非常に難しい。

②. 目標エネルギー付近で反応確率が極端に変化する: 他種の天体核反応でもガモフピークでの断面積を実験値から外挿により求めるが、反応断面積からクーロン障壁を除いた S-因子 (S-factor) がエネルギーに依存せずほぼ一定であるため、高いエネルギーでの測定データを使って精度良く決定できる。ところが、 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応の場合は ^{16}O の共鳴準位がガモフピーク近傍にあり外挿はごく短距離でしか行えない。したがって、出来るだけ 0.3MeV に近いエネルギーでの断面積測定という難しい実験が必要である。

(2) 実験方法

$^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応の測定にはこれまでに次の4種類の方法が考えられてきている。

①. α 粒子ビームを用いた $^{12}\text{C}+\alpha\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応測定: γ 線検出効率が低く、 γ 線バックグラウンド

が多いので、 $E_{\text{cm}}=1\text{MeV}$ 以下での測定は実際上不可能である。

②. ^{16}N の不安定核を作り、 $^{16}\text{N}\rightarrow\beta+^{16}\text{O}^*\rightarrow^{12}\text{C}+\alpha$ 反応からの崩壊 ^{12}C と α を同時検出する: $^{16}\text{O}^*$ の励起状態 (1-) を経由するので、E1 遷移確率が測定出来る。しかし、E2 遷移確率の測定が出来ないので、 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応の全断面積を決定できない。

③. ^{16}O ビームを用いた仮想 γ による分解反応、 $^{16}\text{O}+\gamma\rightarrow^{12}\text{C}+\alpha$ の測定: ^{12}C と α の同時測定が実験的に困難である上に、核力による分解反応が混入するので信頼ある結果が得られない。

④. $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応。 ^{12}C ビームを用いて生成した ^{16}O を直接測定する方法: 検出効率がほぼ100%と高い、また全断面積を測定するので反応確率を直接求める事が出来る。 ^{12}C のビームと生成した ^{16}O を精度良く分離する測定器系が必要であるが、原理的に不可能ではない。

上記④の方法を採用し、これまで14年をかけて測定技術の研究開発を行ってきた。

- 2009年1月には $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$ での測定を行い S-factor を求めた。
- 10月には $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$ でのテスト実験を行い ^{16}O の測定に成功した。これは現在世界一の低エネルギー測定での成功例である。

2. 研究の目的

本研究の目的はこの天体核反応 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ の断面積測定を行い、星でのヘリウム燃焼速度を精度約10%で算定し、その結果天体進化シナリオの決定に寄与する事である。

今後は、まず $E_{\text{cm}}=1.2\text{MeV}$ での反応断面積を誤差10%以下の精度で求める。さらに、低いエネルギー、 $E_{\text{cm}}=1.2\sim 0.7\text{MeV}$ での断面積を測定し、最終的には外挿により 0.3MeV の断面積を決定する。我々の最終目的は10%の精度で $E_{\text{cm}}=0.7\text{MeV}$ の反応断面積を測定することである。

3. 研究の方法

天体エネルギーでの炭素・ヘリウム融合反応 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ の断面積測定は九州大学タンデム加速器施設において行う。炭素ビームとヘリウムガス標的を用い、核融合反応で生成した酸素の数を検出器で測定する。

反応エネルギー $E_{\text{cm}}=1.15\sim 0.7\text{MeV}$ の範囲での測定を4点に分けて3年間で高いエネルギーから順次行ってゆく。これらのデータを元に $E_{\text{cm}}=0.3\text{MeV}$ での S-factor 値を外挿により求める。

反応エネルギー (E_{cm}) が小さくなるほど断面積は小さくなるため、I. より大強度のビーム、II. 厚いヘリウム標的、III. 高いバックグラウンド分解性能が必要になってくる。II. の厚いヘリウム標的の開発は前年度で完了した。そのため、これ以外の開発を行いながら順次実験を進めてゆく。

また、1ヶ月程度の長時間測定が予想される為制御機器のモニター、自動制御系の開発も行う。

4. 研究成果

天体エネルギーでの炭素・ヘリウム融合反応 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ の断面積および天体 S-factor の測定を九州大学タンデム加速器施設において行った。炭素ビームとヘリウムガス標的を用い、核融合反応で生成した酸素の数を検出器で測定した。

(1) 2010 年度は反応エネルギー $E_{cm}=1.5\text{MeV}$ での測定を行った。実験期間は 10 日でおおよそ、120 個の ^{16}O を測定した。断面積を 10%の精度で得るには ^{12}C ビームのバックグラウンドを 10^{-17} まで除去する性能が必要であったが、スリットの改良とビーム輸送系の改良によって達成することが出来た。その結果、反応断面積と S-factor の値を誤差 10%以内で求める事に成功した。これにより酸素を直接測定する方法では我々が世界最先端となった。その結果を下図に示す。

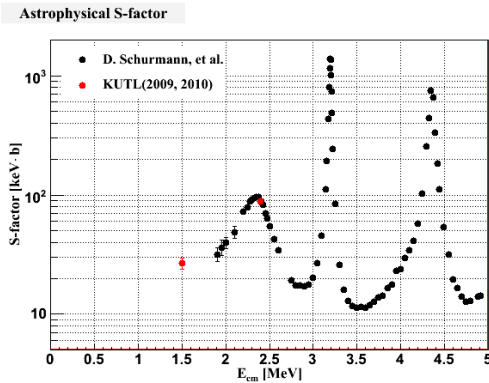


図 1. 測定で得られた天体 S-factor、横軸は反応エネルギー。赤丸が我々のデータである。世界最低エネルギー ($E_{cm}=1.5\text{MeV}$)での測定に成功した。

また、実験装置の開発については以下の事を行った。

- ① バックグラウンド削減のためのビームスリットと真空系の改良: 本研究では炭素粒子によるバックグラウンドイベントを如何に除去するかが最大の問題である。そこで、ビーム輸送系のシミュレーションを行い、バックグラウンド源の発生源を突き止め、新たにビームスリットを導入することで削減に成功した。また、ビーム輸送ダクト内の真空度とバックグラウンドの発生量にも相関があることを発見し、真空ポンプの増設により発生量の削減に成功した。
- ② 制御機器用モニター系の開発: 最終目標の 0.7MeV 実験では約 1 ヶ月の測定が必要であるが、実験機器の全てを 1 ヶ月以上の長期にわたって安定に動作させる為に、機器を自動でモニターし異常検知するシステムが必要であった。今年度は主に高周波装置のモニター系を作成し、実験の高効率化を達成した。

(2) 2011 年度は反応エネルギー 1.2MeV での測定を開始した。 1.5MeV より低い反応エネルギーで測定するためにはバックグラウンド

を 3 桁以上減らす装置が必要である。その為、イオンチェンバーを使った放射線検出器を開発した。有感面積が広く、低エネルギーの重イオンを精度良く測定できるという条件を満たす為、材質の選定や検出器の構造に様々な工夫を行い製作した。

その後、バックグラウンド除去性能の確認のためビームを用いた実験を行った。実験期間は 10 日でおおよそ、30 個の ^{16}O を測定した。バックグラウンドをこれまでの 10^{-16} から 10^{-19} 以下の桁まで除去出来ることが確認された。 ^{16}O と ^{12}C が分離できている様子を図 2 に示す。

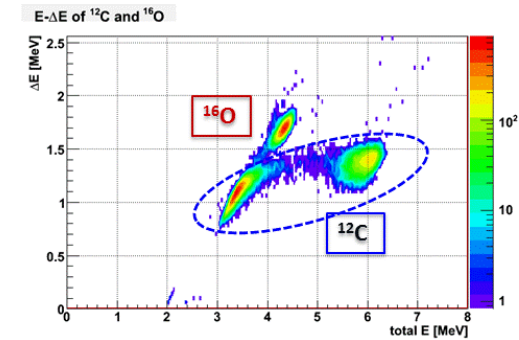


図 2. イオンチェンバー型検出器を使って得られた粒子のエネルギースペクトラム。2 種類の粒子がエネルギー損失値(縦軸)の差で分離できていると確認できる。

これにより次年度以降に実施予定の $E_{cm}=1.15\text{MeV}$ 以下での測定準備が整った。

また、その他の開発については以下の事を行った。

- ① 加速減速法によるビーム量増大のための準備: $E_{cm}=1.15\text{MeV}$ 以下の測定ではビーム量が現在の 10 倍以上必要になる。その為にはビームの透過効率を上げるために加速減速法という手法を用いることを計画している。それにはタンデム加速器を改造する必要があるが、今年度はその前準備として加速管のアライメントを行った。これによって、加速減速法を使わずに透過効率が最大となるようになった。また、加速減速法を用いた際のビーム軌道のシミュレーションも行い、透過効率を最適化する電場勾配を求めた。
- ② ガス循環系の開発: 最終目標の 0.7MeV 実験では約 1 ヶ月の測定が必要であるが、標的であるヘリウムガスはボンベから供給され、使われた後は真空ポンプで排気され捨てられる。これは非常に不経済であるため、ポンプで排気されたヘリウムを洗浄し、再び標的として用いるガス循環系を製作した。

(3) 2012 年度では前年度では不足していたバックグラウンド除去性能の向上のための開発を行い、実験の実現可能性の評価を行った。バックグラウンドの主な原因は炭素粒子が短い時間の間に 2 個同時に観測されてしまい、酸素イベントと同じエネルギー、飛行時間を持つ為であると判った。その為、昨年度開発したイオンチェンバーのさらなる改良を行った。グリッド電極の分割、ガス圧の最適化等を行いバックグラウンドが除去出来る事を確認した。しかし、ビームを用いた実験を行った所、標的容器に付着している酸化被膜が酸素を発生させ、それが新たなバックグラウンドとなる事が判明した。これの発生を抑える為、標的容器に金メッキを施す対策を行った。

以上のバックグラウンド対策を行った後、反応エネルギー 1.2MeV での本測定を行った。加速器が不調であったため予定していた実験期間を確保する事が出来ず、およそ 1 日分しかデータを取得する事が出来なかった。しかし、バックグラウンドの発生量を確認したところ、設計した通りに減少しており、昨年度までよりも 1/10 以下になっていることが解った。これにより反応エネルギー 1.2MeV 以下の測定は加速器からビームが出ればすぐにでも可能であると言う事が確認できた。

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 6 件)

- ① K. Fujita, et al., AIP Conference Proceedings (NIC XII)、査読有、PoS (NIC XII) 249、2013、1-5
<http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=146>
- ② H. Yamaguchi, K. Sagara, K. Fujita, et al. (3 番目)、Few-Body Systems、査読有、Volume 54, Issue 1-4、2013、299-302
DOI: 10.1007/s00601-012-0380-8
- ③ K. Fujita, et al., Few-Body Systems、査読有、online、2013、1-4
DOI: 10.1007/s00601-012-0558-0
- ④ 藤田 訓裕、他、九州大学タンデム加速器の現状、第 24 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、査読無、2011、97-100
- ⑤ K. Fujita, et al., Direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ reaction near stellar energy、AIP Conference Proceedings (NIC XI)、査読有、1269 巻、2010、289-294
<http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=100>
- ⑥ K. Fujita, et al., Direct Measurement

of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ Reaction at KUTL、AIP Conference Proceedings (OMEG10)、査読有、1238 巻、2010、211-213

[学会発表] (計 7 件)

- ① K. Fujita、Measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ reaction in inverse kinematics、The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20)、2012/8/23、福岡
- ② K. Fujita、Direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ in inverse kinematics、XII International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC 2012)、2012/8/6、ケアンズ (オーストラリア)
- ③ 藤田 訓裕、恒星温度における ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ 反応の直接測定、日本物理学会春季大会、2012/3/25、関西学院大学
- ④ 藤田 訓裕、 $E_{\text{cm}}=1.5, 1.15\text{MeV}$ での ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ 反応断面積測定の現状、日本物理学会秋季大会、2011/9/19、弘前大学
- ⑤ 藤田 訓裕、九州大学タンデム加速器の現状、第 24 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2011/7/2、奈良女子大学
- ⑥ K. Fujita、Measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ near Stellar Energy by Inverse Kinematics、韓国物理学会 2010 年秋季年次大会、2010/10/22、Phoenix Park, Pyeon-Chang (韓国)
- ⑦ K. Fujita、Direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}) \gamma$ reaction near stellar energy、11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XI)、2010/7/19、ハイデルベルグ (ドイツ)

[その他]

ホームページ等

<http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/SubGroups/Astro/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 訓裕 (FUJITA KUNIHIRO)

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：60532364