

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800153

研究課題名(和文)天体温度での炭素-ヘリウム核融合反応断面積の直接測定

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

研究代表者

藤田 訓裕 (Fujita, Kunihiro)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60532364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：恒星がヘリウム燃焼の後期に起こす反応、炭素-ヘリウム核融合反応の反応速度(断面積)を測定する研究を行った。九州大学タンDEM加速器施設を用いて、加速器で作られた炭素ビームをヘリウムガス標的に照射し、生成した酸素を質量分析器でバックグラウンドを取り除いた後、放射線検出器を用いて測定を行った。天体温度近傍では断面積が激減するため、大強度ビーム、厚い標的、及び高分解能なバックグラウンド除去装置が必要であった。これらを開発し、世界初となる低エネルギーでの断面積の測定に成功した。

研究成果の概要(英文)：A cross section measurement of  $^4\text{He}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})\gamma$  reaction at near stellar energy was performed at Kyushu University Tandem Laboratory. The oxygen produced by nuclear fusion of the carbon beam and the helium target was measured by the radiation detector after passing the recoil mass separator.

We developed the new instruments for achieving high intensity beam, thick gas target, and high background separation power. The cross section at world lowest energy was successfully measured.

研究分野：数理系科学

キーワード：原子核(実験)

### 1. 研究開始当初の背景

太陽質量の8倍以上の恒星ではヘリウム燃焼の後期に炭素-ヘリウム核融合反応 ( $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ ) が起こり、酸素が生成される。この反応が終わった時点での炭素と酸素の存在比がその後の星の進化に大きな影響を与え、例えば超新星爆発を起こすか、白色矮星に進化するかを決定する事が分かっている。しかし、50年以上の世界的な研究にもかかわらず、この反応の速度(断面積)は未だにはっきりと分かっていない。

#### (1)研究の学術的背景

$^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応の反応断面積を測定するに当たって、困難の原因となっている物は以下の2点である。

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、 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+$  反応の場合は  $^{16}\text{O}$  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  $0.3\text{MeV}$  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

$^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+$  反応の測定方法として、次の4種類の手法が考えられる。

粒子ビームを用いた  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}+$  反応測定: 線は検出効率が低く、 $E_{\text{cm}}=1\text{MeV}$  以下での測定ではバックグラウンドが支配的となり、精度の高い測定は実際上不可能である。

$^{16}\text{N}$  の不安定核を作り、 $^{16}\text{N}\rightarrow^{16}\text{O}^*$   $^{12}\text{C}+$  反応からの崩壊  $^{12}\text{C}$  と  $^{16}\text{O}^*$  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、 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+$  反応の全断面積を決定できない。

$^{16}\text{O}$  ビームを用いた仮想  $^{16}\text{O}+$  による分解反応、 $^{16}\text{O}+\alpha\rightarrow^{12}\text{C}+\alpha$  の測定:  $^{12}\text{C}$  と  $\alpha$  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。

$^{12}\text{C}$  ビームを用いて  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+$  反応で生成した  $^{16}\text{O}$  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。 $^{12}\text{C}$  のバックグラウンドと生成した  $^{16}\text{O}$  を精度良く分離する必要があるが、原理的に

不可能ではない。

九州大学ではこの方法を採用し、これまで19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。
- ・ 2010年9月には  $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$  でのテスト実験を行い、精度 10% での  $^{16}\text{O}$  の測定に成功した。

今後は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、外挿により  $0.3\text{MeV}$  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。

九大ではこれまでに、炭素の大強度パルスビームの生成、膜を使わないヘリウムガスターゲット、高いバックグラウンド除去能力を持ったイオンチェンバー等を開発してきており目的達成まで後少しの状況である。

### 2. 研究の目的

天体エネルギーで  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+$  反応を測定する為には本研究の手法をとる以外にはない。現在この手法で世界的競争が行われているが、リードしているのはドイツ・ルール大学と我々九州大学である。ルール大学では  $E_{\text{cm}}=5.0\sim 1.9\text{MeV}$  までを測定したが、バックグラウンド除去の見通しが立たず、より低いエネルギーで測定する予定は立っていない。

九大ではこれまでに  $E_{\text{cm}}=2.4, 1.5\text{MeV}$  での断面積測定に成功した(直接測定では世界最低エネルギーでの成功例である)。この測定に際して、九大独自に開発した中心圧力が 24 Torr という世界最高性能の膜無しガス標的を用いた事、さらに他の研究施設に先立ちビームをパルス化するという手法を用いた結果、世界最高性能(S/N 比  $10^{16}$ )のバックグラウンド除去を行っている事が功を奏した。現在は更なるバックグラウンド除去のためにイオンチェンバー(E カウンター)の開発も行い、S/N 比 3 桁減となるバックグラウンド除去に成功しており、より低いエネルギーでの測定の準備も整いつつある。

これらの点から、このまま測定を順調に行い世界に先駆けて  $1.2\sim 0.7\text{MeV}$  のデータを取得し、約 50 年間にもわたる競争に終止符を打つことが目標である。

### 3. 研究の方法

炭素-ヘリウム核融合反応  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+$  の断面積測定を九州大学タンDEM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  $E_{\text{cm}}=1.2\sim 0.7\text{MeV}$  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 を外挿により求

める。

反応エネルギーが小さくなるほど断面積は小さくなるため、大強度のビームと高いバックグラウンド分解性能が必要になってくる。25年度にはビームを現在の倍程度まで大強度化させる。その為にパルス化装置の改良を行う。26年度以降の実験では飛行時間差を利用したバックグラウンド除去のために新たな検出器を開発する。これら全てを組み合わせ、26年度以降に反応エネルギー1.2 MeV以下での測定を行う。

#### 4. 研究成果

天体エネルギーでの炭素・ヘリウム核融合反応  $^{12}\text{C}+^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O}+\gamma$  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。加速した炭素ビームをヘリウム標的に衝突させ、生成した酸素を質量分析器を用いてバックグラウンドとの分離を行った後、最終収束面に設置した放射線検出器を用いて測定した。

(1) 2013年度は反応エネルギー  $E_{\text{cm}}=1.2\text{MeV}$  での測定を行った。前年度までに改良を加えたガス標的と金スリットを使用することで酸素バックグラウンドを大幅に削減することが出来た。実験期間はおよそ20日で115個の  $^{16}\text{O}$  を測定した。バックグラウンド量はアルゴンガスを標的とした場合の  $^{16}\text{O}$  の収量から見積もった。その結果、反応断面積と S-factor の値を誤差10%以内で求めることに成功した。これは酸素の直接測定では世界初のデータである。

また、断面積を求めるために以下の2つの測定を行った。

##### 1. 荷電分布測定

$^{16}\text{O}$  がヘリウムガスを通じた後の荷電状態(何価のイオンになるか)は検出効率を決めるために必要な値である。これを実測するために酸素ビームをヘリウムガス標的に入射し、通過前と通過後の電流比を価数毎に求めた。

##### 2. ガス標的の厚さ測定。

本研究で用いたガス標的はガスを閉じ込めるためにフィルム等を使わない窓なし標的である。そのため実効厚さは容器の奥行きよりも大きくなるため実測の必要があった。陽子ビームを用いてヘリウムとの弾性散乱を測定することで厚さを求めることが出来た。

(2)2014年度は反応エネルギー1.0MeVでの実験とそのための装置開発を行った。

##### 1. 前段バンチャーの開発

この測定では酸素の飛行時間を測定し、バックグラウンドと分離する為にビームを時間的に粗密構造を持ったパルス状にしている。このパルス化の際にビーム強度が低下することを低減させるために前段バンチャーの開発と設置を行った。これによって従来の倍のビーム電流を得ることに成功した。

##### 2. 加速減速法によるビーム電流量の増強

本実験のような低エネルギーにおいて、ビーム電流量をさらに増強する改良を行った。タンデム加速器本体に短絡用のアルミ棒を取り付け、加速と減速が起こる構造とし、透過効率の向上を果たした。これによって従来の10倍以上のビーム電流量を得ることに成功した。

##### 3. 飛行時間測定器の開発

前年度までに  $^{16}\text{O}$  の検出器として使用していたイオンチェンバーは低いエネルギーではバックグラウンド分離能力が低下することがわかったので、それに替わる検出器を開発した。フォルムパール薄膜を電子放出膜として用いたマイクロチャンネルプレート型飛行時間測定器を開発した。 $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$  ビームを用いた性能評価実験を行い、十分な分離能力を持っていることを確認した。得られた質量スペクトルを図1に示す。

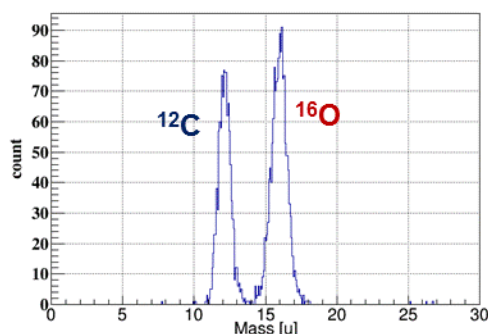


図1:  $^{12}\text{C}$  と  $^{16}\text{O}$  の質量スペクトル。十分な分解能があることを確認できた。

##### 4. ビームスリットの開発

測定において最も致命的なバックグラウンドは標的近傍から発生する  $^{16}\text{O}$  である。これはガス標的容器の金属が酸化被膜を作り、ビームによってたたき出されることで生成するということが判明した。これを低減させるため金板を用いたビームスリットを設計し、設置した。これによりビームの衝突が抑えられ、 $^{16}\text{O}$  バックグラウンドの生成数が大幅に減少した。

##### 5. $E_{\text{cm}}=1.0\text{MeV}$ での測定

これまで開発した装置を用いて反応エネルギー1.0MeVの実験を行った。バックグラウンドの除去性能は全体で  $10^{-19}$  以上を達成していることが確認できた。これにより  $^{16}\text{O}$  のイベントを確認することができた。ただ、予想よりも標的から生成した  $^{16}\text{O}$  バックグラウンドの量が多く、断面積の絶対値を求めることが困難であるということが分かった。

(3)2015年度はこれまでに得られたデータの解析と飛行時間測定器の校正を行った。前年度に得られた反応エネルギー1.0MeV測定の

データは実験中にビーム変動があり、それに伴ってバックグラウンドの発生が起こっていることが判明した。そのため、ビーム変動モニタの映像出力を解析し、実験データに統合するプログラムの作成を行った。これによって1.0MeV測定におけるバックグラウンド評価が行えるようになった。実験とデータ解析はこれでほぼ終了した。反応エネルギー1.0MeVまでの測定データを元に、外挿で天体温度での反応断面積を求める作業をしてゆく準備ができた。実験で得られたS-factorの値を図2に示す。

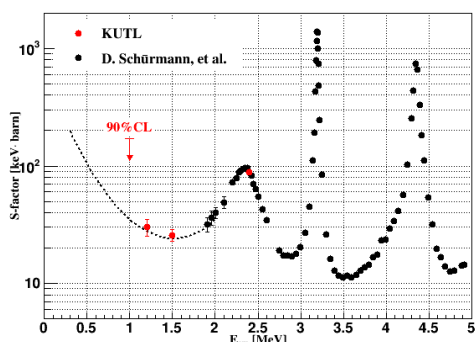


図2: 反応エネルギーとS-factor、赤丸が本研究での測定値。

## 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 3件)

K. Fujita, et al., Direct Measurement of the  ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$  Total Cross Section Near Stellar Energies, EPJ Web of Conferences, 査読有り, Vol. 93, 2015, 03005, DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159303005>

藤田 訓裕, 他、九大タンデムにおけるビームバンチャーの開発、第27回タンデム加速器及び周辺技術の研究会報告集、査読無し、2015、64-67

K. Fujita, et al., Measurement of  ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$  reaction in inverse kinematics, Few-Body Systems, 査読有り, 2013, Volume 54 Issue 7, 1603-1606, DOI: 10.1007/s00601-012-0558-0

[学会発表](計 4件)

藤田 訓裕,  $E_{\text{cm}}=1.0\text{MeV}$ での ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ 全反応断面積測定、日本物理学会第71回年次大会、2016/3/21、東北学院大学

K. Fujita, Direct Measurement of the  ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$  Total Cross Section Near Stellar Energy, Fifteenth International Symposium on Capture Gamma-Ray

Spectroscopy and Related Topics(CGS15)、2014/08/26、ドレスデン(ドイツ)

藤田 訓裕、九大タンデムにおけるビームバンチャーの開発、第27回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2014/7/4、京都大学

藤田 訓裕、 $E_{\text{cm}}=1.2\text{MeV}$ 以下の ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ 反応の直接測定、日本物理学会2013年秋季大会、2013/9/22、高知大学

[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