

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340056

研究課題名(和文)天体エネルギーにおける炭素-ヘリウム融合反応全断面積の直接測定

研究課題名(英文)Direct measurement of $^{12}\text{C}-4\text{He}$ fusion total cross section near stellar energy

研究代表者

相良 建至 (Sagara, Kenshi)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：00128026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽は4個の陽子からヘリウム核を作る水素燃焼をしている。重い星では水素燃焼、ヘリウム燃焼、炭素・酸素燃焼・・・と進み、ウランまでの重い元素が次々作られている。この過程は多くの原子核反応データを用いて計算できる。ところが基本的に重要なヘリウム燃焼の炭素とヘリウム核が融合する反応速度が、半世紀の世界中での研究を経て未測定である。特殊事情により極めて難しい測定である。この難測定に本研究では、九大タンデム加速器を改造し新装置と新手法を独自開発して取組み、世界レベルを1.5桁進めた。あと2.5桁進めれば測定完成のところに来た。

研究成果の概要(英文)：In the sun 4He is being made from 4 protons. That is Hydrogen burning. In heavier stars, heavy elements up to Uranium are being made in succeeding processes of Hydrogen burning, Helium burning, Carbon and Oxygen burning, These processes can be simulated using many nuclear reaction rates. However, a basically important reaction rate of $4\text{He}+^{12}\text{C}$ $160+\text{gamma}$ in Helium burning has not been measured yet in spite of experiments in half century in the world. The measurement is extremely difficult due to special nuclear reaction mechanism.

In our present study, we measured very small $4\text{He}+^{12}\text{C}$ $160+\text{gamma}$ rate near stellar energy by remodeling the tandem-accelerator at Kyushu Univ. and developing new instruments and methods based on our original ideas. We succeeded in measuring the reaction rate 1.5 orders of magnitude smaller than the previous world record. The final goal can be achieved by progressing further 2.5 orders of magnitude.

研究分野：実験核物理

キーワード：天体ヘリウム燃焼 タンデム加速器改造 極微量粒子検出 極低バックグラウンド測定 窓無し気体標的
金箔皮膜

1. 研究開始当初の背景

炭素とヘリウムが核融合して酸素になる反応速度(重心系エネルギー0.3MeV)は星の進化で非常に重要だが、約45年の世界的競争を経ても、反応全断面はドイツで1.9MeVまで、九大で1.5MeVまで測定されただけであった。他の研究所で部分的な断面が測定されているが、全断面を知るデータにはなりえない。星での反応速度を知るには、少なくとも0.7MeVまでの測定が必要であるが、1.5-0.7MeVで反応速度はクーロン反発力のために約1/3,000に小さくなり測定は極めて難しい。

天体では他の原子核反応も低エネルギーで起こるが、実験が易しい少し高いエネルギーで反応断面を測定すれば低エネルギーでの値が容易に評価できる。炭素とヘリウムが核融合して酸素になる反応は、酸素の原子核構造が特殊で低エネルギーまで実際に測定する必要がある。しかし低エネルギーでは測定すべき反応断面が極めて小さい。これが約半世紀を経ても解決されない問題の原因である。

2. 研究の目的

炭素とヘリウムが核融合して酸素になる反応速度(断面)を、九大タンデム加速器施設を利用して、少なくとも重心系エネルギーが1.2MeVと1.0MeVで、出来ればそれ以下でも測定する。そして最終目標の0.7MeVまでの測定のための問題点を明確にし、目標達成までの具体策と見通しを得る。

本研究で最終目標を達成することが可能とは考えていない。しかし、最終目標を達成するための手法を明確にしたい、そして本研究に続く研究で達成して貰いたい。

3. 研究の方法

我々は、炭素ビームをヘリウム標的に入射し、前方角度に反応生成される酸素を検出する。検出酸素の個数は、反応断面 \times ビーム炭素個数 \times 標的ヘリウム個数 \times 酸素検出効率 \times 測定時間に比例する。

重心系エネルギーが低くなると断面が非常に小さくなる。そこで、(1)標的ヘリウムは真空中に膜無しで置く必要があるが、相良が考案した吹込み型膜無し標的を改良してヘリウム個数を増やす。(2)九大タンデム加速器を改造して炭素ビーム強度を増やす。検出効率は約40%でこれが限界値である。測定時間は1ヶ月(徹夜)が限度である。検出酸素数を1日に5個以上にしたい。

もう1つの問題は、検出におけるバックグラウンド(BG)を検出酸素数の1/10以下にすることである。どういうBGがどこから発生するか、どういう対策が必要かはやってみないと判らない。九大タンデム加速器はホームマシンなので比較的自由に使える。

4. 研究成果

(1)吹込み型膜無し標的を改良してヘリウム個数を増やした。これ以上増やすと標的中のエネルギー損失が増えて測定が出来ない。(2)相良が考案したタンデム加速器の加速減速強集束運転法を最適化してビーム量を2.3倍増した。BG除去のためビームをパルス化するが、主バンチャーに前段バンチャーを加えてパルス化効率を2.2倍にした。合わせて有効ビーム量を5倍にした。

(3)検出酸素数は1時間に数個であるが、その16~18桁多いビーム炭素粒子が同じ方向に来て大量のBGを発生する。電磁場を用いた炭素ビーム除去、ビームパルス化による飛行時間分析、粒子通過口径拡大による二次・三次散乱低減などの対策をして、炭素BG数を炭素ビーム個数より17~18桁減らすことに成功した。

(4)更に低エネルギー専用のイオンチェンバーを開発して炭素と酸素を識別し、炭素BGを減らした。

(5)1.2MeVで測定を行ったところ、十分な個数の酸素が検出でき、かつ炭素BGは1/10程度であった。このままで1.0MeV測定も可能と思われた。

(6)ただし1.0MeV以下ではイオンチェンバーによる炭素-酸素分離は、エネルギー損失差が小さくなるので、悪くなる。そこで、理研で新元素発見のために開発された飛行時間差(ToF)測定装置を借用し、本研究用に改造した。これで炭素BG対策は完了した。

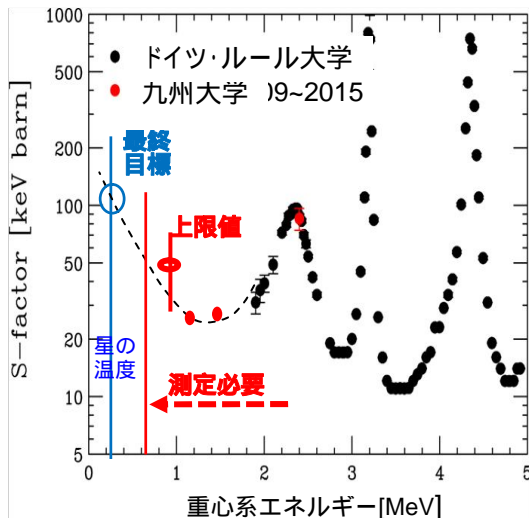
(7)ところが1.2MeVで、1/10程度のBG酸素が発生していることに気付いた。BG炭素と異なりBG酸素は“本物”酸素と識別できないので発生源を根絶するしかない。大難問である。

BG酸素発生は、スリットや標的容器内壁の酸化皮膜に炭素ビームが入射して酸素を叩き出すのが原因だと判った。

(8)そこで、ビームの当たりそうなスリットと容器内壁を全て金箔で覆った。しかし、約1週間経つとBG酸素が発生した。これは、真空ポンプ油の蒸気が金箔に付着して酸素を含む皮膜を作るためだと推測される。油蒸気対策は可能だが、多額の費用と時間がかかるので本研究では出来なかった。

(9)また、ビームがスリットや容器内壁に当たらなければ良いのだが、タンデム加速器を改造して設計想定外の低エネルギーで想定外の大強度ビームを加速しているので、ビームの位置制御が不安定で、どうしても内壁等に当たった。

(10)以上の悪条件下であったが、1MeVでの測定を敢行した。酸素BGが多くかつBG個数を正確に評価できないので、上限値を示すデータしか得られなかった。下図にこれまでの50年のデータを下図に示す。星における0.3MeVでの値を知るには、まだ相当な努力と苦労が要る。



(11) 本研究の最大の成果は、最終目標である 1.0MeV ~ 0.7MeV 測定のための改良点を示したことである。

a) 低エネルギーの大強度ビーム加速器のタンデムを導入する(約5億円)。

b) オイルフリーで大排気量の真空ポンプ系を導入する。オイルトラップも付設する。

c) ビームスリット、標的容器内壁その他を金箔にする。

d) その他の装置は、これまで九大で開発してきたものを使用すれば良い。

e) 以上に加えて、執念ある実験推進リーダーが不可欠である。1.0MeV ~ 0.7MeV 測定は 10 年以上かかる。研究資金を獲得し、学生を育成して強力チームを作り、長期実験を行う必要がある。相良は既に 2 年前に定年退職して、これ以上は続けられない。執念あるリーダーは今のところ世界的にも見つかっていない。

(12) H27 年 1 月まで年末年始不休で 1.0MeV 測定に集中し、4 人の修士を卒業させてチームを解散した。これまでの多くの成果は約 10 篇の論文に相当し、相良と藤田が現在書きつつあるが 1 年はかかるだろう。

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)

H. Yamaguchi, K. Sagara, K. Fujita, T. Teranishi, 他 6 名、Direct measurement of $^{12}\text{C}+^4\text{He}$ fusion cross section at $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$ at KUTL, Few-Body Systems **54** (2013) 299-302 (査読有)

K. Fujita, K. Sagara, T. Teranishi, 他 6 名 (査読有) Direct measurement of $^4\text{He}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})\gamma$ in inverse kinematics, Proc. of Science NIC XII **249** (2013) 1-5

K. Sagara, K. Fujita, 他 7 名, (査読有) A windowless gas target for low-energy ^4He (^{12}C , ^{16}O) γ experiment: improvement to reduce ^{16}O backgrounds, J Radio-anal Nucl Chem. (2015) published online 17 March, DOI 10.1007/s10967.015.4033.5

[学会発表](計 5 件)

H. Yamaguchi, K. Sagara, K. Fujita 他 5 名、Equipments to measure $^4\text{He}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})$ total cross section down to $E_{\text{cm}} = 1.0$ MeV at KUTL, 13th Nuclei in the Cosmos, Hungary, 2014.7.07-11

Y. Narikiyo, K. Sagara, K. Fujita. 他 5 名、Acceleration-Deceleration system and Pre-buncher system for high intensity ^{12}C pulsed beam, 第 4 回日米合同核物理学会, 2014.10.07-11

K. Hamamoto, K. Sagara, K. Fujita, 他 4 名、Development of ToF detector with ultra-thin Formvar films for astrophysics experiment, 第 4 回日米合同核物理学会, 2014.10.07-11

K. Sagara, Direct measurement of the $^4\text{He}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})$ reaction cross section near stellar energies, 第 4 回日米合同核物理学会, 2014.10.07-11

相良建至, 藤田訓裕, 他 5 名、 $E_{\text{cm}}=1.0$ MeV における $^{12}\text{C}(^4\text{He}, ^{16}\text{O})$ 反応全断面積測定 ~ 九大タンデムでの最終実験 ~、日本物理学会 2015.3.21-24.

[図書](計 件)

[産業財産権]

出願状況(計 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 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
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

相良 建至 (SAGARA, Kenshi)
九州大学・大学院理学研究院・名誉教授
研究者番号：00128026

(2)研究分担者

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

寺西 高 (TERANISHI, Takashi)
九州大学・大学院理学研究院・準教授
研究者番号：10323495

(3)連携研究者

森田 浩介 (MORITA, Kousuke)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：20250110