

天体核融合反応断面積の直接測定

Direct measurement of nuclear fusion cross section at stellar energy

相良 建至 (Sagara Kenshi)

九州大学・大学院理学研究院・教授



研究の概要

ヘリウム-炭素核融合反応 (${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$) は星でのヘリウム燃焼において中心的役割をするので約40年前から反応断面積測定が世界中で試みられてきたが、非常に難しく今も未測定である。本研究では、九大タンデム加速器を用いてこれを測定するための新装置・新手法の開発を行いテスト実験に成功した。あと数年で測定を完成できる見通しがついた。

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：熱核反応、星の進化、タンデム加速器、極微量粒子測定、窓なし気体標的

1. 研究開始当初の背景・動機

九大において、ヘリウム-炭素核融合反応断面積の測定準備を10年間行ったが、未だ生成酸素粒子がバックグラウンドに埋もれて検出できていなかった。ドイツ・ルール大学では我々と同じ直接測定法で先行していたが、最終目標には遠かった。他の間接測定では最終達成は望めず、直接測定法を推進してゆく必要があった。

2. 研究の目的

ヘリウム-炭素核融合反応断面積を、 $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$ から 0.7MeV まで測定し、そのデータから星での 0.3MeV での値を外挿で求めるのが最終目標である。低エネルギーではクーロン反発が大きくて反応が起こりにくいので測定が難しい。

本研究の目的は、新装置・手法を開発し、テスト実験を行ってこの難測定を可能にすることである。

3. 研究の方法

研究課題は大別して、ビーム量増加、標的の量増加、バックグラウンド(BG)低減、断面積の絶対値評価、の4つである。

そのために、a) BG低減のために長時間チョッパーを開発し、b) 窓なし気体標的の厚さを液体窒素冷却及び別方法で増やし、c) ビームパルス化効率を向上して実験に使えるビーム量を増やし、d) 絶対値評価のために、標的厚さ測定、検出器の立体角拡大、生成酸素荷電割合の評価を行った。

4. 研究の主な成果

ビーム量増加

相良が考案した、タンデム加速器の加速減速強集束法で大強度炭素ビーム加速テストを行い、それをもとにフィードバック系を強化した。またイオン源に前段バンチャーを新設し、ビームパルス化効率を約3倍向上した。ビーム量の最終目標は $5\text{-}10\mu\text{A}$ であるが、あと数倍で達成可能となった。

標的の量増加

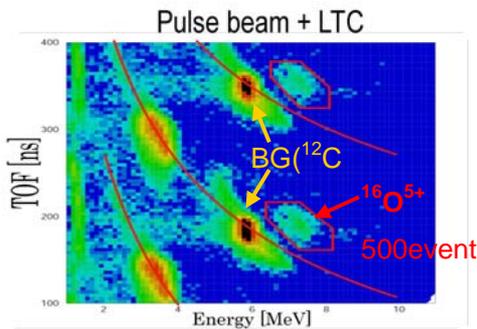
この低エネルギー実験では、ヘリウム標的を真空中に膜なしで閉じ込める必要がある。相良が考案した吹込み型窓なし標的を液体窒素で冷却するため、複雑な構造への大改造を行った。しかし、予備実験の期待に反し20%しか増加しなかった。そこで超薄膜 SiNx をもつ気体標的を試作したが膜がビームに耐えなかった。最後に排気ポンプを増強して最終目標の $25\text{Torr}\times 3\text{cm}$ を達成した。ルール大学の標的より5倍厚い。

バックグラウンド(BG)低減

${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$ 反応からの ${}^{16}\text{O}$ を ${}^{12}\text{C}$ ビームから分離して検出するが、 ${}^{16}\text{O}$ の個数は ${}^{12}\text{C}$ より18桁少ないので、 ${}^{12}\text{C}$ のBGを19桁以上少なくする必要がある。反跳粒子質量分析器とビームパルス化とで世界最高レベルの14桁まで達成していたが、未だ不足であった。

本研究で、相良考案の長時間チョッパーを製作し ${}^{16}\text{O}$ だけを通過させたところ、BGが3桁減り、 ${}^{16}\text{O}$ が孤島になって検出できた。実験準備12年目で、 $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$

でのテスト測定に成功した(下図)。長時間チョッパー(LTC)の威力は大きかった。



$E_{cm}=0.7\text{MeV}$ での最終測定までにあと2桁のBG低減が必要だが、低エネルギーに行くにつれてBGの正体(例えば真空壁散乱を3回繰返したもの)が見えてくるので対策はその時に行う。

断面積絶対値の評価

膜なし気体標的の実効厚さを、 $d\cdot\alpha$ 後方散乱を利用して実測した。また、ヘリウム-炭素核融合反応実験中に標的厚さをモニターする方法を開発した。

反跳粒子質量分析器(RMS)の検出可能立体角を実測したところ不十分だったので、RMSの多重極電磁石5個を大口径に改造し電源も整備した。立体角の最終目標値($\pm 2.7^\circ$)を達成した。

検出 ^{16}O の荷電割合も断面積評価に必要である。ルール大学では後段ストリッパを用いているが、我々の標的は5倍厚いので後段ストリッパなしで十分正確に荷電割合が算出できることが判った。大きな副産物であった。

断面積の測定

$E_{cm}=1.5\text{MeV}-0.7\text{MeV}$ での測定計画を立てた。低エネルギーになるにつれてパルスビームの周期を長くする必要があり、最適条件と実現可能性を検討した。1.5MeVでの測定準備をほぼ終えた。

1.5MeV測定の前に、2.4MeVでシステムチェックのための再測定を行ったところ、RMSの2箇所挿入した固定スリットからBGが逆に発生していることが判明した。このスリットは今後不可欠なので、可動式に改造している。

以上の本研究より、今後実験を完了するには、BGのさらなる除去とビーム量の数倍増強を残すのみとなった。あと数年で、永年の世界的目標が達成可能となった。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

約40年にわたる世界的テーマである天体ヘリウム-炭素核融合断面積の測定が数年後に九大で完成できる見通しがついた意義は大きい。

測定結果は、星の進化研究に多大な貢献をする。また本研究で開発した測定装置や測定手法は、他の極微量粒子検出に適用され、天体核反応測定や不安定核生成はじめ多方面に寄与するであろう。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

A blow-in type windowless gas target for astro-nuclear experiments

K. Sagara, S. Kamibeppu, H. Oba, H. Tanimoto, Y. Akama, and M. Taniguchi
Nucl. Instr. & Methods A (2008) 4 pages (in press)

Measurement of $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ cross section at $E_{cm} = 2.4\text{ MeV}$

H. Oba, K. Nishida, M. Kouzuma, S. Kamibeppu, H. Tanimoto, Y. Akama, M. Taniguchi, and **K. Sagara**
Kyushu University Tandem Accelerator Laboratory Report **10** (2007) 49-52

アルミパイプ4本で大型タンデムを小型タンデムに変える

相良建至

「加速器」Vol. 3, No. 2, 2006(192-195)

Direct measurement of $^4\text{He}(^{12}\text{C},^{16}\text{O})\gamma$ reaction around $E_{cm} = 2.4\text{ MeV}$ at KUTL

K. Sagara, T. Teranishi, H. Oba, M. Oshiro, M. Kouzuma, K. Nishida, N. Ikeda, and S. Tanaka
Nuclear Physics A 758 (2005) 427c-430c

A long-time chopper for direct measurement of $^4\text{He}(^{12}\text{C},^{16}\text{O})\gamma$ reaction cross section

H. Oba, **K. Sagara**, T. Shimizu, M. Oshiro, T. Maeda, and N. Ikeda
Nuclear Physics A 758 (2005) 407c-410c

ホームページ等

<http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/SubGroups/Astro/index.html>