

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340056

研究課題名（和文） 天体における炭素－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  $^{12}\text{C}$ - $^4\text{He}$  nuclear fusion cross section at stars

研究代表者

相良 建至（SAGARA KENSHUI）

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：00128026

研究成果の概要（和文）：星の進化シナリオの解明には、低いエネルギー $E_{\text{cm}}=0.3\text{MeV}$ での炭素－ヘリウム核融合確率が不可欠であるが、その測定は非常に難しく未だ誰も成功していない。本研究では、世界最厚さの膜無し気体標的を開発し、バックグラウンドを炭素ビームより15桁低減して、炭素－ヘリウム核融合確率を世界で最も低い $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$ で測定した。我々の目標は、 $E_{\text{cm}}=0.7\text{MeV}$ まで測定し、結果を外挿して $E_{\text{cm}}=0.3\text{MeV}$ での確率を求めることである。その準備研究も行った。

研究成果の概要（英文）：To simulate evolution of stars, Carbon-Helium nuclear fusion rate at low energy of  $E_{\text{cm}}=3\text{MeV}$  is essentially important. But measurement of the rate is very difficult, and no one has succeeded in it. In our present study, we developed a windowless Helium gas target of the highest thickness in the world, reduced backgrounds to a level of  $10^{-15}$  lower than Carbon beam particles, and measured Carbon-Helium fusion rate at  $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$ , the lowest in the world. We also prepared for measurements of the fusion rate down to  $0.7\text{MeV}$ , to estimate the fusion rate at  $0.3\text{MeV}$  by extrapolation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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：天体ヘリウム燃焼、炭素－ヘリウム核融合、断面積測定、星の進化、膜無し気体標的、タンデム加速器、極低バックグラウンド

## 1. 研究開始当初の背景

良く知られているように、天体では水素燃焼が先ず起こり4個の水素から $^4\text{He}$ が生成される。水素燃焼を終えた星は、その星の質量が太陽質量の約0.2倍以上であれば、ヘリウム燃焼を始める。まず $^4\text{He}+^4\text{He}\rightarrow^8\text{Be}+\gamma$ 反応が起こり次に $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応が起こる。この $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応により天体で

のC/O比が決まる。このC/O比は、その後の天体の変遷（元素合成プロセスや各元素の存在比、超新星爆発発生など）を左右する重要な因子である。したがって、 $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応断面積は、天体の変遷をシミュレーションする上で、非常に重要な基礎データである。

しかし星での $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$ 反応断面積

は未だ測定がない。この反応は  $E_{cm}=0.3\text{MeV}$  と言う低いエネルギーで起こるが、そのエネルギー付近に  $^{16}\text{O}$  の共鳴状態があり反応断面積が大きく変化する。従って低いエネルギーまで実験する必要がある。低いエネルギーでは、クーロン反発力のせいで反応がなかなか起こらず実験は極めて難しい。他の反応ではこういう共鳴状態がない。 $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応だけが特殊事情で未だに測定が出来ていない。

現在はこの反応速度が測定されていないので、W. A. Fowler (1983 ノーベル物理学賞) らの推奨した2種類の値のいずれかを仮定して星の進化のシミュレーション計算がなされている。星の内部には対流があり、この対流にもモデルが仮定される。「推奨  $\text{C}+\alpha$  反応断面積値」が小さくても、対流を激しくすれば結果としてヘリウム燃焼速度を速くすることが出来る。対流モデルを選べば、観測データに近い結果が得られる。現在はこういう任意性がある。

もし  $E_{cm}=0.3\text{MeV}$  での  $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積を実験で確定すれば、天体の対流モデルがユニークに決まる。天体進化過程が正しくシミュレーションされることになり、星の一生が正しく理解できる。星が超新星爆発を起こす様子や或いはおとなしく白色矮星になってゆく様子が正しく解明されるだろう。天体物理学に大きい寄与ができる。それゆえに、 $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積の測定が、天体物理学の分野で長い間待ち望まれている。

我々の最終目標は、天体でのヘリウム燃焼速度を決定している  $E_{cm} = 0.3 \text{ MeV}$  での  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応全断面積を、加速器実験で精度よく測定することである。本研究は、それに向かっての1つの段階である。

過去40年以上、世界でこの  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積測定が試みられてきたが、未だに成功していない。九州大学ではタンデム型加速器を用いてこの測定を行う計画を1993年に立て、以来15年にわたり、本研究代表者の相良建至を中心に、本実験のための様々な装置・手法を考案し独自開発してきた。

我々の計画は、以下の通りである。

①  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積を、 $E_{cm} = 2.4 \text{ MeV}$  から  $E_{cm} = 0.7 \text{ MeV}$  まで精密に実測する。  
②その実測結果を  $E_{cm} = 0.3 \text{ MeV}$  まで外挿して、星での  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積を正確に評価する。

$E_{cm} = 2.4 \text{ MeV}$  から  $E_{cm} = 0.7 \text{ MeV}$  までで、反応断面積は5桁も小さくなる。①は従って大変な仕事である。だから世界中で未だに出来ないでいる。

本研究開始前の2008年春に、我々は  $E_{cm} = 2.4 \text{ MeV}$  での測定に一度成功したが、確認の

ための再測定がなかなかうまく行かず、バックグラウンド (BG) の除去方法を模索している状況であった。

## 2. 研究の目的

我々の究極目標は、 $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積を、 $E_{cm} = 2.4 \text{ MeV}$  から  $E_{cm} = 0.7 \text{ MeV}$  まで精密に実測し、それらの実測結果を  $E_{cm} = 0.3 \text{ MeV}$  まで外挿して、星での  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積を正確に評価する事である。しかし、 $E_{cm} = 2.4 \text{ MeV}$  から  $0.7 \text{ MeV}$  までに反応確率が5桁も小さくなるので、短期間で達成は出来ない。

本研究の目的は、従って、以下の3点に絞った。

- (1)  $E_{cm} = 2.4 \text{ MeV}$  での  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積をバックグラウンド (BG) を更に除去して再測定し、これまでの測定結果を確認する。
- (2)  $E_{cm} = 1.5 \text{ MeV}$  での  $^{12}\text{C}+^4\text{He}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応断面積を測定する。 $E_{cm} = 2.4 \text{ MeV}\rightarrow 1.5 \text{ MeV}$  で断面積は約30分の1になるので、測定は容易ではない。特殊ヘリウム標的の改造、BGの低減、断面積絶対値の正確評価、が主たるテーマである。
- (3) 次の  $E_{cm} = 1.15 \text{ MeV}$  以下での測定の準備をする。加速器を改造してビーム強度を数桁増大することが最大のテーマである。

## 3. 研究の方法

$\text{C}+\alpha$  融合反応速度の測定は、直接測定と間接測定の2つに大別できる。

直接測定では、

- a)  $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応からの  $^{16}\text{O}$  を検出、
- b)  $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応からの  $\gamma$  線を検出、2通りがある。

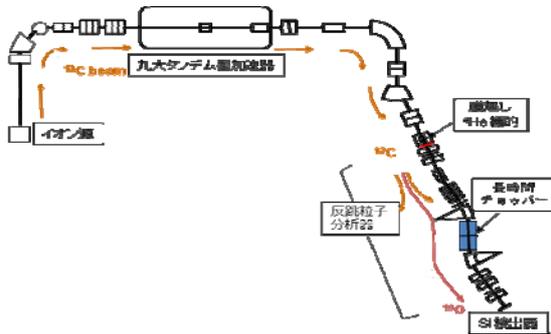
間接測定では

- c)  $^{16}\text{O}+\gamma\rightarrow^4\text{He}+^{12}\text{C}$  逆反応の測定、
- d)  $^{16}\text{N}\rightarrow\beta+^{16}\text{O}(1^-)\rightarrow^4\text{He}+^{12}\text{C}$  の逆反応測定、がある。c) には、クーロン分解による仮想  $\gamma$  線を用いる方法と、逆コンプトンによる実  $\gamma$  線を利用して  $^{16}\text{O}$  を分解する方法がある。

歴史的に b) の方法が広く採られてきた。 $^4\text{He}+^{12}\text{C}\rightarrow^{16}\text{O}+\gamma$  反応を起こし、そこからの  $\gamma$  線を周囲に置いた  $\gamma$  線検出器で検出する。この方法は他の方法よりも手軽に始められる。しかし、 $E_{cm}=1.5\text{MeV}$  以下で精度の良いデータを得るには至っていない。これは、 $\gamma$  線検出器の検出効率が低いと、 $\gamma$  線検出器が宇宙線他のバックグラウンド  $\gamma$  線を検出するからである。 $E_{cm}=1.2\text{MeV}$  以下で精度の良いデータを得ることは、まず不可能である、とされている。

間接測定 c), d) では逆反応を用いるので、もし測定に成功すれば逆反応確率が判る。し

かし、測定する逆反応確率は、直接反応確率と異なる事が判っている。参考データになるが、最終決定データにはならない。



我々は、 ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$  直接反応からの  ${}^{16}\text{O}$  を検出する a) の方法を採用している。この方法以外の方法のいずれも、 $E_{\text{cm}}=0.3\text{MeV}$  での S-因子を測定することは不可能である、との判断に基づいて、18年前にこの方法を採用した。18年の経緯から、この判断は正しかった、と言える。この a) の方法によってのみ、星での  ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$  の全断面積が精密に評価できる。

図に示すように、九大タンデム型加速器で  ${}^{12}\text{C}$  ビームを加速して、特殊な  ${}^4\text{He}$  膜無し標的に入射し、 $\pm 2^\circ$  以内に生成された全  ${}^{16}\text{O}$  粒子 (但し 1 荷電状態) を同じ方向に来る  ${}^{16}\text{O}$  から分離して、検出する。

この方法は、以前 (約 30 年前) に米国 CALTEC で行われたことがある。さらに約 30 年前から 5 年前まで、ドイツ・ルール大学で行われてきた。九大でも 18 年前この方法での実験の準備が始めた。これら以外に、この方法に本格的に取り組んだ例を聞かない。

九大ではこの方法で  $E_{\text{cm}}=0.7\text{MeV}$  まで測定をする計画を持っている。ルール大学でも同じエネルギーまでの測定を目指していたが、 $1.9\text{MeV}$  で止まっている。

$E_{\text{cm}}=0.7\text{MeV}$  以下が難しいのは、反応確率が小さく、検出粒子数が少ないためである。測定実施上の課題は、以下の 2 つである。

- (1) 検出粒子数を増やす。
- (2) 検出粒子数に比して大量の BG を低減する。

(1) の内容は以下の 4 点である。

- ① ビーム強度を増やす
- ② 標的厚さを増やす
- ③ 検出効率を増やす
- ④ 測定時間を増やす

③ は既に完成している。反跳粒子分析器を開発し、荷電分布の最大値 (40%-50%) で検出できるようになっている。

④ は 1 ヶ月の徹夜測定 (積算可能) と想定している。

本研究では

- ② を行い、 $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$  での実験を実施した。
- ① のための順擬研究を行った。

(2) の BG 低減は、方法論を手探りで作って行くしかない。難しい永遠のテーマである。低いエネルギーでの実験を開始すると、相対的に多数の BG が見えてくる。その時点で発生原因を調べ、ケースバイケースで対策を立てて行くしかない。

#### 4. 研究成果

本研究の 3 年間に以下の研究成果を得た。

##### (1) $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$ での再測定

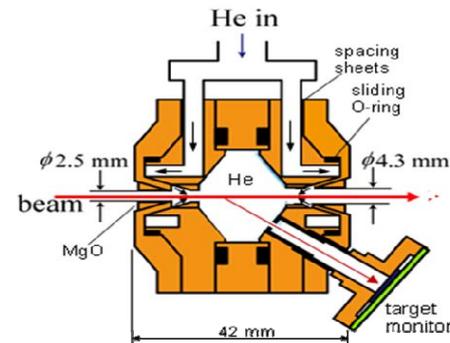
反跳粒子分析器内で発生する BG を、測定結果と起動計算で解析して発生箇所を推定し、新スリットの製作挿入と全スリットの微調整をした後に、 $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$  での再実験に成功した。きれいなデータを得た。

##### (2) 膜無し気体標的の改造

我々は既に独自の吹込み型膜無し気体 (ヘリウム) 標的 (下図) を開発していたが、厚さがまだ 3 倍程度必要であった。過去に液体窒素冷却を試みたが、厚さは 1.2 倍にしかならなかった。

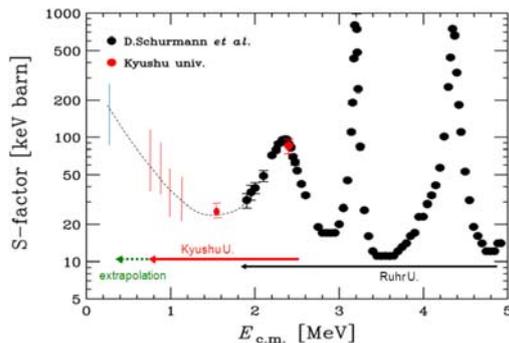
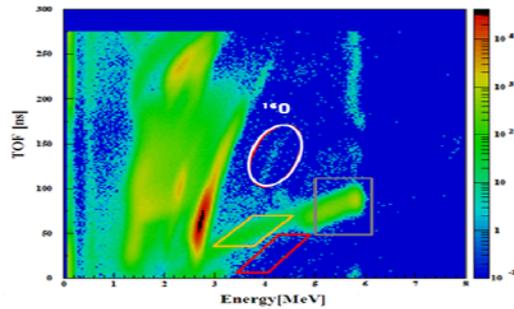
そこで、常温型に戻し、設計を最適化し、真空ポンプ系を強力化して、目標を上回る 24Torr $\times$ 4.1cm の厚さを実現した。膜無し気ヘリウム標的では世界最高の厚さである。

また、その厚さを、陽子ビームを用いて 3% の精度で精密に測定した。



##### (3) $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$ での測定

更なる BG 低減策を幾重にも追加して、 $E_{\text{cm}}=1.5\text{MeV}$  で  ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$  全断面積測定に成功した。下図に示すように、 ${}^{16}\text{O}$  が BG から分離されて、くっきりと検出された。これは世界最低エネルギーでの  ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$  全断面積測定である。つまり本研究の成果で、我々が世界のトップに躍り出た。



上図に我々の本研究での測定結果(赤丸)と、これまでに測定されたドイツ・ルール大のデータ(黒丸)とを示す。ドイツのデータは緻密であるが  $E_{c.m.}=1.9\text{MeV}$  までしかない。最終目的は  $E_{c.m.}=0.3\text{MeV}$  での断面積を知ることであり、 $1.5\text{MeV}$  以下のデータが決定的な意味を持つ。しかし、まだ  $E_{c.m.}=1.5\text{MeV}$  までしかない。 $0.7\text{MeV}$  まで行かないとゴールに達せない。

#### (4) $E_{c.m.}=1.15\text{MeV}$ 以下での測定の準備

本研究期間中に  $E_{c.m.}=1.15\text{MeV}$  測定の準備も行った。このエネルギー以下では、九大独自のタンデム加速器の加速減速強集束束運転が出来る。ビーム強度を100倍以上を増やせる。ただ、大強度ビームの安定制御にまだ問題があった。そこで、安定制御に不可欠な、ハロービームによる加速器の負荷を低減する方法を開発した。

1年以内に  $E_{c.m.}=1.15\text{MeV}$  測定が出来るであろう。

#### (5) 今後の展望

本測定に必要な2つの点、

- (1) 検出粒子数を増やす。
  - (2) 検出粒子数に比して大量のBGを低減する。
- のうち、(1)は解決した。(2)は測定を進めながら対策を考えて行くしかない。

(2)は予定が立ちにくい、予算等が十分なら、3年くらいで、 $E_{c.m.}=1.15\text{MeV}$ ,  $1.0\text{MeV}$ ,  $0.85\text{MeV}$ ,  $0.7\text{MeV}$  での測定が出来るであろう。そうすれば、45年間に及ぶ天体核物理の最大

の課題に終止符が打てる。

本研究期間中の発表論文は多くない。装置について、改良途中のものを発表するのは他の研究者の参考になるだろうが、我々はそれよりも最終的な装置に仕上げる方を選んだ。テスト実験結果も、学会発表は行ったが、最終データではないものはまだ論文にしていない。いずれ、最終データ、最終装置は順次論文にして残す。今は少しでも早く、低いエネルギーでの実験を次々と成功させることである。九大加速器の移転計画もあり、時間との戦いでもある。

#### 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 K. Fujita, K. Sagara, T. Teranishi, T. Goto, R. Iwabuchi, S. Matsuda, N. Oba, M. Taniguchi and H. Yamaguchi “Direct measurement of  ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$  reaction near stellar energy”, AIP Conference Proceedings Volume 1269 (2010) 289-295、査読有

② M. Taniguchi, K. Sagara, T. Teranishi, K. Fujita, R. Iwabuchi, T. Goto, K. Nakano and N. Oba “Background Reduction System for  ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$  at KUTL”, AIP Conference Proceedings Volume 1238 (2010) 208-210、査読有

③ K. Fujita, K. Sagara, T. Teranishi, T. Goto, R. Iwabuchi, S. Matsuda, K. Nakano, N. Oba, M. Taniguchi and H. Yamaguchi, “Direct Measurement of  ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$  Reaction at KUTL” AIP Conference Proceedings Volume 1238 (2010) 211-213、査読有

④ 藤田訓裕、相良建至、後藤昴、中野桂樹、岩淵利恵、谷口雅弘、大場希美、前田豊和 「九大タンデムにおけるビームバンチャー改良」 第22回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 (2009) 69-72、査読無

⑤ K. Sagara, S. Kamibeppu, H. Oba, H. Tanimoto, Y. Akama and M. Taniguchi, “A blow-in type windowless gas target for astro-nuclear experiments” Nuclear Instruments and Methods A 590 (2008) 194-197、査読有

[学会発表] (計21件)

① 山口祐幸、相良建至、寺西高、藤田訓裕、谷口雅彦、岩淵利恵、大場希美、松田沙矢香、 $E_{c.m.}=1.5\text{MeV}$  での  $4\text{He}+{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{16}\text{O}+\gamma$  天体

核反応測定 ～BG 除去～」第 116 回日本物理学会九州支部例会, 2010 年 12 月, 長崎大学.

②松田沙矢香、相良建至、寺西高、藤田訓裕、谷口雅彦、岩淵利恵、大場希美、山口祐幸、「天体核実験用の窓無しガス標的とガス循環系の開発」第 116 回日本物理学会九州支部例会, 2010 年 12 月, 長崎大学

③Maria Theodora Rosary、相良建至、寺西高、藤田訓裕、谷口雅彦、大場希美、松田沙矢香、山口祐幸、「タンデム加速器の加速減速強集束運転法」第 116 回日本物理学会九州支部例会, 2010 年 12 月, 長崎大学

④相良建至 「Direct measurement of c+alpha fusion cross section at  $E_{cm} = 2.4-1.5$  MeV at KUTL」宇宙核物理第 3 回 OMEG(Origin of Matter nad Evolution of Galaxies) Institute セミナー、理化学研究所、2010 年 11 月 1 日

⑤K. Fujita, K. Sagara, T. Teranishi, R. Iwasaki, S. Matsuda, T. Mitsuzumi, N. Oba, M. Taniguchi and H. Yamaguchi, “Measurement of  $4\text{He}(12\text{C},16\text{O})\gamma$  near Stellar Energy by Inverse Kinematics” Korea Japan Exchange Session at KPS meeting, Phoenix park, Pyeong Chang, Korea, 20-22 October 2010

⑥ K. Sagara, K. Fujita, T. Teranishi, M. Taniguchi, N. Oba, H. Yamaguchi, and S. Matsuda, “Direct measurement of  $^{12}\text{C}+^4\text{He}$  fusion cross section near stellar energy” 21th European Conference on Few-Body Problems in Physics, Aug. 30.- Sept. 03. 2010, Salamanca, Spain

⑦K. Fujita, K. Sagara, T. Teranishi, T. Goto, R. Iwabuchi, S. Matsuda, K. Nakano, N. Oba, M. Taniguchi and H. Yamaguchi, “Direct measurement of the  $4\text{He}(12\text{C},16\text{O})\gamma$  cross section near stellar energy” 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XI), Heidelberg, 19-23 July 2010.

⑧ K. Sagara, K. Fujita, T. Teranishi, M. Taniguchi, N. Oba, T. Goto, R. Iwabuchi, S. Matsuda and H. Yamaguchi, “Direct measurement of  $^4\text{He}+^{12}\text{C}$  fusion cross section at  $E_{cm}=1.5$  MeV at KUTL” International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC2010), July 5-9, 2010, Vancouver, Canada

⑨大場希美、相良建至、藤田訓祐、岩淵利恵、後藤昂、谷口雅彦、松田沙矢香、山口祐幸、田中 薫、寺西 高、「天体核実験のための厚い膜無しヘリウムガス標的(0.1 気圧・cm)の開

発と性能」第 65 回年次大会, 2010 年 3 月, 岡山大学.

⑩相良建至, 藤田訓裕, 谷口雅彦, 岩淵利恵, 後藤昂, 大場希美, 松田沙矢香, 山口祐幸, 田中薫, 寺西高 「 $\text{C}+\alpha$  天体核反応全断面積の  $E_{cm}=1.5-1.15\text{MeV}$  での測定」第 65 回年次大会, 2010 年 3 月, 岡山大学

⑪ K. Fujita, K. Sagara, T. Teranishi, T. Goto, R. Iwabuchi, S. Matsuda, K. Nakano, N. Oba, M. Taniguchi and H. Yamaguchi, “Direct measurement of  $4\text{He}(12\text{C},16\text{O})\gamma$  reaction near stellar energy” The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG10), March 8-10, 2010 RCNP, Osaka University, Ibaraki, Osaka, Japan.

⑫大場 希美, 相良 建至, 寺西 高, 藤田 訓裕, 谷 雅彦, 岩淵利恵, 後藤昂, 中野桂樹, 「天体核実験のための膜無し He 標的の圧力分布と厚さ測定,」第 115 回日本物理学会九州支部例会, 2009 年 12 月, 宮崎大学.

⑬後藤昂, 相良建至, 寺西高, 藤田訓裕, 谷口雅彦, 岩淵利恵, 中野桂樹, 大場希美, 田中 薫, 松田沙矢香, 山口裕幸, 「 $E_{cm} = 1.5\text{MeV}$  での  $4\text{He} +^{12}\text{C} \rightarrow^{16}\text{O} + \gamma$  断面積測定: BG 低減」第 115 回日本物理学会九州支部例会, 2009 年 12 月, 宮崎大学.

⑭ M. Taniguchi, K. Sagara, K. Fujita, N. Goto, R. Iwabuchi, K. Nakano, N. Oba and T. Teranishi, “Background reduction system for  $4\text{He}(12\text{C},16\text{O})\gamma$  measurement at KUTL” VII TOURS Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics, November 16 - 20, 2009, Kobe, JAPAN.

⑮ K. Fujita, K. Sagara, N. Goto, R. Iwabuchi, K. Nakano, N. Oba, M. Taniguchi and T. Teranishi, “Direct measurement of  $4\text{He}(12\text{C},16\text{O})\gamma$  reaction at KUTL” VII TOURS Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics, November 16 - 20, 2009, Kobe, JAPAN.

⑯ S. Matsuda, K. Sagara, T. Teranishi, K. Fujita, R. Iwabuchi, M. Taniguchi, T. Gotoh, K. Nakano, N. Oba and H. Yamaguchi, “A windowless He-gas target for astrophysics experiments,” 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 2009 年 10 月, Hawaii.

⑰ R. Iwabuchi, K. Sagara, K. Fujita, T. Teranishi, M. Taniguchi, T. Gotoh, K. Nakano, N. Oba, S. Matsuda and H. Yamaguchi,

“Performance of a thick windowless He gas target at KUTL” 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS , 2009 年 10 月, Hawaii.

⑮ K. Fujita, K. Sagara, T. Teranishi, T. Goto, R. Iwabuchi, S. Matsuda, K. Nakano, N. Oba, M. Taniguchi and H. Yamaguchi, “Present Status of direct  ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$  measurement near stellar energy at KUTL”, 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 2009 年 10 月, Hawaii.

⑯ 藤田訓裕, 相良建至, 後藤昂, 中野桂樹, 岩淵利恵, 谷口雅弘, 大場希美, 前田豊和「九大タンデムにおけるビーム・バンチャー改良」第 22 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会, 2009 年 7 月, 筑波大学.

⑰ 岩淵利恵, 藤田訓裕, 相良建至, 五百木崇博, 後藤昂, 中野桂樹, 谷口雅彦, 寺西高, 「天体核実験のための膜なし He 標的の最終型と性能」第 114 回日本物理学会九州支部例会, 2008 年 12 月, 福岡工業大学

⑱ 相良建至, 寺西高, 藤田訓裕, 谷口雅彦, 五百木崇博, 中野桂樹, 後藤昂, 岩淵利恵, 前田豊和, 二宮重史, 「九大における天体ヘリウム-炭素反応速度測定の現状」第 114 回日本物理学会九州支部例会, 2008 年 12 月, 福岡工業大学.

[その他]

ホームページ等

[http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/html/astr\\_o.html](http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/html/astr_o.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

相良 建至 (SAGRA KENSHI)

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号 : 00128026

### (2) 研究分担者

寺西 高 (TERANISHI TAKASHI)

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号 : 10323495

池田 伸夫 (IKEDA NOBUO)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号 : 70193208

橋本 正章 (HASHIMOTO MASA AKI)

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号 : 20228422