

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13556

研究課題名（和文）直接・間接測定で解明する爆発的水素燃焼過程中的のアルファ捕獲反応の寄与

研究課題名（英文）Study on the contributions of the alpha-induced reactions in the explosive hydrogen-burning processes by direct and indirect measurements

研究代表者

早川 勢也（Hayakawa, Seiya）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任助教

研究者番号：00747743

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、X線バーストの光強度変化と強く関連する原子核反応の断面積を初めて測定し、爆発的元素合成過程の解明へ繋げるとを目標としていた。当初は1)  $^{26}\text{Si}$  不安定核ビーム生成テスト、2) 厚い標的法による直接測定、3) トロイの木馬法による間接測定を計画していたが、コロナ禍での加速器実験の中断期間や、海外の実験参加者が来日できなかったこともあり、1)と2)の遂行までにとどまった。直接実験のデータからは、理論的な統計モデルから予想される反応断面積に比べて、1桁以上小さいという可能性が明らかになりつつある。本研究は、日韓2学生の修士論文および博士論文のテーマとなっており、投稿論文に向けても準備中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

X線バーストの観測結果を説明するための天体理論モデルは、多くの原子核反応が関わる反応ネットワークに強く依存する。しかし、不安定核を含む原子核反応の断面積測定は技術的に難しく、多くの反応においていまだに十分な実験データが得られていない。本研究では重要な反応の一つ、 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$ 反応を新たなアプローチで測定することにより、X線バースト研究に打開をもたらしようと考えている。実験からは、理論的な統計モデル断面積と比べて、測定結果が1桁以上小さいという可能性が明らかになりつつある。本研究により、原子核実験に留まらず、原子核理論、天体物理理論などへ新たな知見をもたらせる可能性を期待している。

研究成果の概要（英文）：This study aimed at understanding of explosive nucleosynthetic process through measurements of a nuclear reaction cross section which is strongly related to the observed light curves of X-ray bursts. Initially, we planned 1)  $^{26}\text{Si}$  radioactive-isotope beam production test 2) direct measurement by thick target method, and 3) indirect measurement by Trojan Horse method. We were only able to complete 1) and 2) in the covid-19 situation; the accelerator experiments were suspended for some period, and even after it resumed, foreign participants could not come to Japan. The direct-measurement data indicate possibility that the reaction cross-sections are more than one order of magnitude smaller than those predicted by theoretical statistical models. This research is also subjects for the master's thesis and the doctoral dissertation of a Japanese student and a Korean student, respectively, and we are also preparing to submit a paper.

研究分野：原子核物理学

キーワード：宇宙核物理学 不安定核ビーム実験 直接測定 トロイの木馬法 X線バースト p過程 rp過程 元素合成

### 1. 研究開始当初の背景

X線バーストは中性子星へ伴星から降着ガスが溜まったときに周期的に熱核爆発が起こる現象で、銀河系において頻繁に観測されている。その特徴的な光強度の時間変化(光曲線)は、原子核反応率の情報に大きく左右されるため、ミクロな原子核の性質とマクロな天体現象とを結び、宇宙核物理学上重要な対象である。バースト天体が十分高温であれば、 $(\alpha, p)$  反応と陽子捕獲反応が連続する $\alpha p$ 過程が優勢になる。 $\alpha p$ 過程に関係する不安定核の $(\alpha, p)$ 反応の実験的な研究は、質量数20以下の軽い核は比較的取り組まれているが、それ以上重い核については全く実験データのないものも多い。そのうちの一つの $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$ 反応は、特にX線バーストの光曲線への影響が大きいことが指摘されており[1]、その反応率を実験的に決定することは非常に重要である。

複合核 $^{30}\text{S}$ の $^{26}\text{Si} + \alpha$ しきい値以上の励起準位構造は、その鏡像核 $^{30}\text{Si}$ に比べるとほとんどデータがない。理論的に反応断面積を予想し得る方法としては、Hauser-Feshbach統計モデル計算や殻モデル計算などがあるが、比較的軽い核では励起準位密度が低かったり、一つの共鳴のエネルギー位置、幅、強度等によって反応率が大きく変わってしまうため、計算による断面積は不定性が大きく、実験的に決定することが必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$ 反応断面積をX線バーストの温度範囲(1-3 GK)に対応する重心系エネルギー範囲(1.2-4.6 MeV)において決定し、X線バーストでの元素合成過程のよりよい理解へ繋げることが目的である。原子核物理の不定性を低減することで、天体の理論モデルにより制限をかけられることを期待する。また、その実験データから $^{26}\text{Si} + \alpha$ の共鳴構造をそのしきい値から数MeVの範囲で調べることにより、 $^{30}\text{S}$ の $\alpha$ クラスター構造との関連も探求する。 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$ 反応のみならず、 $\alpha p$ 過程の重要な $(\alpha, p)$ 反応の反応断面積や $\alpha$ 共鳴を実験的に調べることで、この質量領域の $(\alpha, p)$ 反応の系統的な理解にも繋がると期待する。

### 3. 研究の方法

当初の計画としては、1)「 $^{26}\text{Si}$ 不安定核ビーム生成テスト」により十分なビーム強度を確立した上で、2)「厚い標的法による直接測定」、3)「トロイの木馬法による間接測定[2]」を組み合わせたハイブリッドなアプローチをとる計画であった。コロナ禍における加速器実験の中断期間があったことや、実験が再開した後も海外のコラボレーターの来日が事実上不可能であったことなどの困難があったが、本基金の補助事業期間中には1)および2)までを低エネルギー不安定核分離器CRIB (Center for Nuclear Study Radioactive Isotope Beam separator [3])を用いて完遂することができた。

1)のビーム生成テストにおいては、二次ビーム生成標的の冷却性能を改善し、一次ビームの限界強度を上げることにより、 $^{26}\text{Si}$ 二次ビームの生成量の増加を目指した。冷却性能は、気体標的容器の材質をステンレスから銅に変更すること、標的窓膜の材質をHAVARからモリブデンに変更するなど熱伝導率を改善し、それによって一次ビームの照射強度の限界値を調べた。

2)の厚い標的法による直接測定は図1のようなセットアップになる。一次標的 $^3\text{He}$ に $^{24}\text{Mg}$ 一次ビームを入射し $^{26}\text{Si}$ 二次ビームを生成し、それをさらに $^4\text{He}$ 二次標的に入射し、 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)$ 反応および $\alpha$ 共鳴散乱を標的中に設置されたシリコン検出器によって測定する。

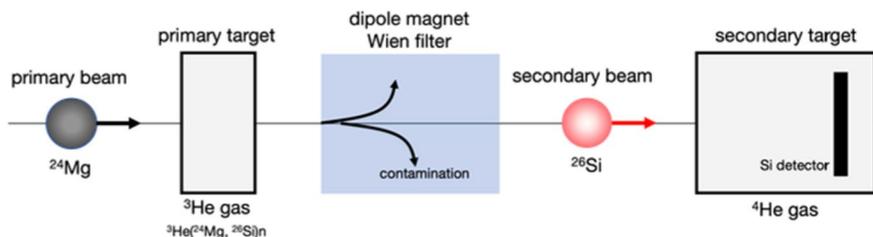


図1. 直接測定概念図。

### 4. 研究成果

#### (1) ビーム生成テスト

2019年に、共同実験者のSungyunkwan大学のChae Kyungyuk氏の研究グループとともに、実験の統計上重要な $^{26}\text{Si}$ 放射性同位体ビームの生成テスト実験を行った。このテスト実験では、二次ビーム生成気体標的に入射可能な一次ビーム $^{24}\text{Mg}$ 強度を上げるため、気体標的窓に用いられる既存のHavar膜よりも熱伝導率のよいモリブデン、チタン、ベリリウム銅などの素材の有用性を評価した。その結果、モリブデン、チタンについては以前の数倍程度の強度の一次ビームを入射できることが示された。これは、類似の気体標的を用いる実験施設の中でも新しい試みで

ある。この実験においては、テストをした膜の素材の購入や、標的の温度モニター用のサーモグラフィ、真空層に装着する赤外線透過窓などを導入した。

2020年度は一次標的開発を前年度から継続し、2回のテスト実験を行った。1回目は、前年度の気体標的膜材の評価で候補に絞ったモリブデン膜を実際に気体標的に装着し、現状使用している HAVAR 膜よりも3倍程度の強度の一次ビームを入射できることを確認した。2回目は、モリブデン膜の長時間安定性の評価、および気体標的そのものの冷却性能の向上の可能性を探るべく、現状のステンレス部品を一部銅へ変更して効果を評価した。結果としては、モリブデン膜は HAVAR 膜のときの3倍程度の強度を保って入射し続けると、30分ほどで微小な穴が空き始めることがわかった。また、銅部品による冷却効果は、2次元伝熱シミュレーションなどで予想していたよりも顕著でないことがわかり、むしろ標的窓膜と標的本体の接触状態や、標的気体自身の流量などがより冷却に寄与する可能性を示した。図1は、二次ビーム生成標的膜の温度の時間経過を示す。モリブデン膜の厚みやビーム入射強度の違いにより、強度耐性・熱耐性の振る舞いが変わり、それらの限界値を見積もった。

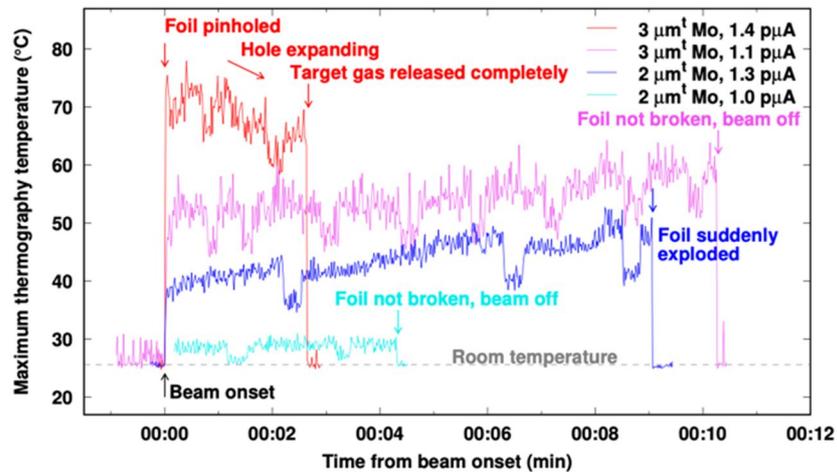


図2. 二次ビーム生成標的膜の温度の時間経過

## (2) 直接測定の結果

直接測定実験は2021年度に実施した。この実験では、前年度までに開発・性能評価をしていた、二次ビーム生成標的を使用し、CRIBにおける過去最大強度の $^{26}\text{Si}$ ビームを生成することができた。さらに、検出効率を高めるために、CRIBにおいては最多の検出器数を使用し、増大したデータ量を確実に処理するため、データ収集系も一新するなど、新しい技術を導入しつつ質・量ともに高い実験データを取得することができた。実験中のオンライン解析では、共鳴散乱由来の $\alpha$ 粒子や、 $(\alpha, p)$ 反応由来の陽子が観測され、目的である原子核反応イベントの存在を確認した。図3は最終焦点面での $^{26}\text{Si}$ の識別の図である。これにより、 $^{26}\text{Si}$ 純度が29%、強度が $3.2 \times 10^4$  ppsとなったことが分かった。

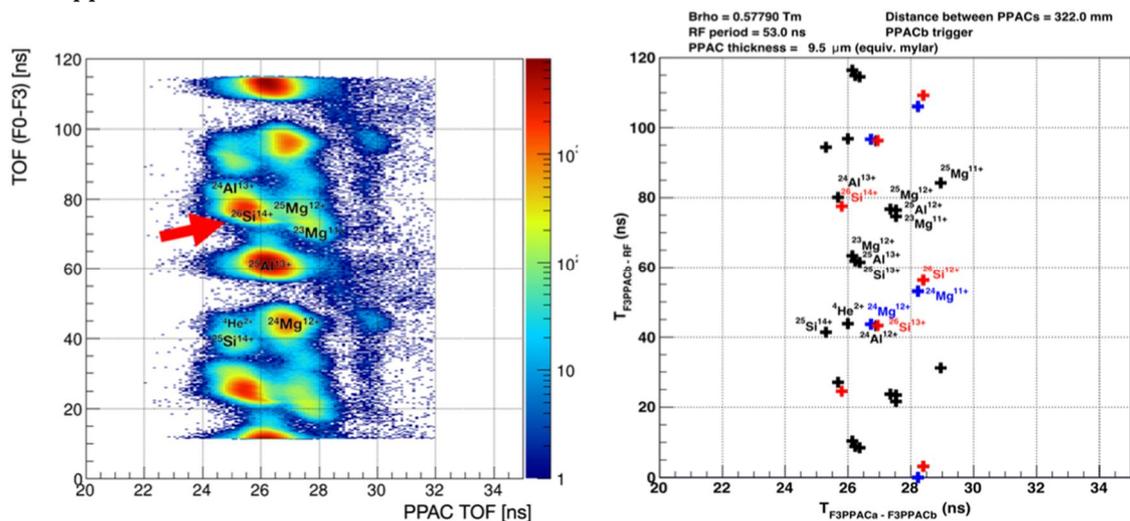


図3. 最終焦点面での粒子識別の測定値(左)と計算値(右)の比較

2022年度は定期的に韓国のSungyunkwan大学のグループとオンラインミーティングを開きつつ、データ解析を進めた。データ解析は、主に東大CNS山口研究室の学生とSungyunkwan

大グループの学生らが進めており、それぞれ修士論文[4]、博士論文のテーマとして解析が完了しつつある。結果として、 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$  反応断面積は統計モデルから予想されるものよりも1桁以上も小さいことが見えてきており、X線バーストにおける光曲線への影響も示唆される。

図4は、今回の測定と解析で得られた $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$  反応の反応断面積と推定された上限値の統計モデル計算 NON-SMOKER の反応断面積との比較である。反応断面積の関数形は NON-SMOKER を仮定し、それをスケールさせている。上限値を求めるのに用いたデータは重心エネルギーが6.0 MeV から7.5 MeV のもので、フィットする際に得られたスケールファクターの誤差の上側  $3\sigma$  (99.9%) を上限値としている。

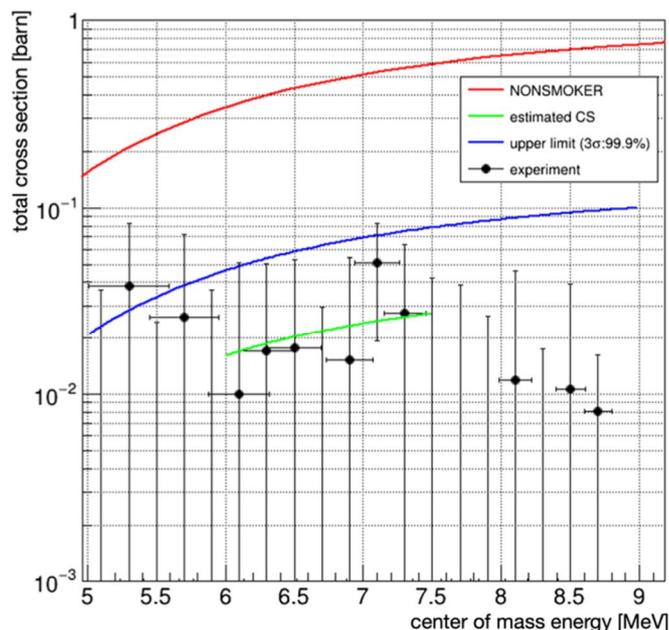


図4. 今回の測定と解析で得られた $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$  反応の反応断面積と推定された上限値の統計モデル計算 NON-SMOKER の反応断面積との比較。

今回の解析で評価できなかった点として、反応後の $^{29}\text{P}$  が全て基底状態に遷移したとして計算を行った点と、反応の角度依存性を考慮できなかったという点がある。陽子イベントの統計量から、これら进行评估することは困難であると考えられるが、バックグラウンドイベントの同定などを行い、今後の解析で解決したいと考えている。

また、誤差解析から、最も誤差の影響が大きかったものはバックグラウンドイベントの統計誤差であることが分かった。バックグラウンド測定での陽子イベントは数が少なく、物理データから差し引くと統計誤差に大きな影響を与えてしまった。今後の解析で、この統計誤差を減らすためには高エネルギー側で見えているバックグラウンドの陽子イベントの由来を同定し、正確なシミュレーションを行うことで影響を小さくできる可能性があると考えられる。

また、韓国の学生を中心に進められている $\alpha$ 共鳴散乱のデータからも、 $\alpha$ クラスター構造は顕著ではなく、また、統計モデル断面積の反応率ほどは大きい反応率が得られないことが示唆されつつある。

### (3) 結論

本研究では、X線バースト中の元素合成で重要な役割を果たす $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$  反応を評価するために、 $^{26}\text{Si}$  ビームを用いて、 $^4\text{He}$  気体標的と反応させる実験を行った。目的としていた、高エネルギー領域での陽子イベントが観測された。しかし、統計モデルの反応断面積を仮定したときに予測される収量と比較し、今回の測定で得られた収量は1桁以上小さな収量であった。従って、 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$  反応の反応速度は、統計モデルから予想されている値よりも1桁以上小さくなる結果となった。これは、 $\alpha$ 共鳴散乱のデータからも同様の結果が示唆されている。先行研究で行われた、X線バーストの光度曲線への感度分析では、 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$  反応の反応速度を大きくした場合に与える影響が大きくなるため、今回の結果より、 $^{26}\text{Si}(\alpha, p)^{29}\text{P}$  反応がこれらに与える影響は大きくないことが予想されるが、少なくとも天体モデルに何らかの制限を加えられると考えられる。今回評価したのはX線バーストの温度と比べると、より高いエネルギー領域での測定であり、より低エネルギーでの正確な測定が期待される。

また、多くの陽子イベントは標的窓のMylar膜と $^{26}\text{Si}$ 粒子が弾性散乱したものであり、ほとんどの陽子イベントはバックグラウンドによるものだと判明した。さらに、今回焦点を当てた高エネルギーの陽子イベントは薄いシリコン検出器を貫通してしまい、位置情報を得ることができなかった点も誤差に大きく寄与している。

データを低エネルギー側へ延伸するには、3. 研究の方法の項で述べた3)のトロイの木馬法が有効であると当初考えていたが、そのデータを規格化するための高エネルギー側のデータが、今

回の実験では十分な質を得ることができなかった。そのため、上記の今回のセットアップの問題点を解決した直接測定を再度行うか、あるいはより高いビーム強度と統計量が期待できる時間反転反応の測定を行うなどで、今回の実験結果を補完しうる知見が得られると考えている。

<引用文献>

- [1] R. H. Cyburt et al., *Astrophys. J.* 830, 55 (2016).
- [2] C. Spitaleri et al., *Phys. of Atom. Nucl.* 74, pp1725–1739, (2011).
- [3] Y. Yanagisawa et al., *Nucl. Instrum. Methods, A* 539, pp74-83, (2005).
- [4] 大川皓大 修士論文 東京大学理学系研究科物理学専攻 2023年1月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kodai Okawa, Minju Kim, Kyungyuk Chae, Seiya Hayakawa, et al.	4. 巻 275
2. 論文標題 Direct measurement of the $^{26}\text{Si}(\text{ , p})^{29}\text{P}$ reaction at CRIB for the nucleosynthesis in the X-ray bursts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 European Physical Journal Web Conferences	6. 最初と最後の頁 2009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202327502009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大川皓大
2. 発表標題 Direct measurement of $^{26}\text{Si}(\text{ , p})^{29}\text{P}$ reaction at CRIB for the nucleosynthesis in X-ray bursts
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大川皓大 修士論文 東京大学理学系研究科物理学専攻 2023年1月
-----------------------------------

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------