

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22351

研究課題名（和文）宇宙における元素合成解明に向けた新型アクティブ標的の開発

研究課題名（英文）Development of a new active target to investigate the nucleosynthesis in the universe

研究代表者

古野 達也（Furuno, Tatsuya）

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30876363

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、宇宙の高密度環境下における炭素原子核の合成速度を決定する実験を実施するために、既存の放射線検出器をアップグレードすることを目指している。本研究ではフレキシブル基板技術を用いた新しい放射線検出器の試作機を開発した。製作した試作機の性能評価をアルファ線源を用いて実施した。アルファ線による信号の測定に成功した一方で、信号の混線が確認された。今後は信号混線を克服する改良を行っていく予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したTPC検出器を用いることで、宇宙における炭素原子核の合成過程トリプルアルファ反応の反応速度を決定することができる。炭素原子核は宇宙における様々な元素合成過程の材料となるので、重元素合成量を決定する上で本研究は極めて重要である。また、TPC検出器は放射線の飛跡を捉えることができる装置であるため、原子核反応を測定する基礎研究だけでなく、様々な社会応用が期待される。例えば、我々のTPC検出器とシンチレータを組み合わせるとコンプトンカメラとして使用することで、ガンマ線のイメージングを行うことができる。ガンマ線のイメージングは環境放射線の計測や放射線による癌治療において近年注目されている。

研究成果の概要（英文）：This project aims to upgrade the existing radiation detector in order to conduct experiments to determine the synthesis rate of the carbon nucleus in the high-density environment of the universe. In this study, a prototype of a new radiation detector using flexible substrate technology was developed. The performance of the prototype device was evaluated using an alpha source. While the signal due to the alpha source was successfully measured, signal cross-talk was observed. We plan to make improvements to overcome the signal cross-talk in the future.

研究分野：原子核物理学

キーワード：元素合成 トリプルアルファ反応 アクティブ標的 タイムプロジェクションチェンバー フレキシブル基板

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙の歴史において、炭素原子核の合成過程を明らかにすることは、地球や人類の起源を明らかにする上で重要である。炭素原子核は 3 つのアルファ粒子が共鳴状態を経由して合成される(トリプルアルファ反応)。トリプルアルファ反応には、炭素 12 原子核のホイル状態が基底状態へ崩壊する過程が含まれているため、その崩壊確率はトリプルアルファ反応の合成速度を支配する。これまで、ホイル状態が基底状態へ崩壊する過程はガンマ崩壊のみが考慮されてきた。

近年、Beard らによって、超新星爆発などの高密度環境下では、ガンマ崩壊に加えて、ホイル状態が周辺原子核との発熱散乱によって直接基底状態へ崩壊する過程が指摘されている [1]。この発熱散乱はクーロン障壁の影響を受けない中性子との散乱が最も重要で、この過程を加えるとトリプルアルファ反応の反応速度が数 10 倍も増大される可能性があることが理論計算によって示された。また、炭素 12 原子核はその後の元素合成の材料となる原子核であるため、トリプルアルファ反応の合成速度が修正を受けると、超新星爆発での陽子過剰原子核の合成結果も大きく影響を受けることが Jin らによって指摘されている [2]。

以上から、中性子との発熱散乱によるトリプルアルファ反応の反応速度を決定することは重要である。しかし、この反応速度を得るためには、ホイル状態と中性子の非弾性散乱断面積を測定する必要がある。ホイル状態の寿命は極めて短いため、実験を行うことは不可能であった。

[1] M. Beard *et al.*, *Physical Review Letters* **119**, 112701 (2017).

[2] S. Jin *et al.*, *Nature* **588**, 57 (2020).

2. 研究の目的

本研究では、ホイル状態と中性子が非弾性散乱を起こして炭素 12 基底状態が合成される反応の逆反応、つまり、炭素 12 の基底状態と 10 MeV 程度の中性子が非弾性散乱によってホイル状態が合成される反応の断面積を測定する。詳細つり合いの原理を利用することで、準反応の断面積を求めることができる。ホイル状態へ励起された反応を同定するには、ホイル状態が崩壊によって放出する 3 つのアルファ粒子を検出して、不変質量法によって炭素 12 の励起エネルギーを求める必要がある。しかし、崩壊アルファ粒子のエネルギーは 100 keV 程度と非常に低いため、通常の実験セットアップでは測定が困難である。

そこで我々は不安定核実験のために開発を行ってきた MAIKo アクティブ標的 [3, 4] を用いて上記の困難を克服する。MAIKo アクティブ標的は荷電粒子の飛跡を 3 次元的に捉えることができる飛跡ガス検出器 TPC を用いている。MAIKo では TPC の検出ガスを散乱の標的ガスとして用いている。散乱反応を検出器内部で測定することで、低エネルギー粒子の検出を可能としている。

MAIKo では荷電粒子による電離電子の検出に μ -PIC と呼ばれるマイクロパターンガス検出器を用いている。 μ -PIC は読み出しの間隔が 400 μ m と非常に細かいため、エネルギーが低く、ガス中での飛程が短い粒子の検出に適している。しかし、読み出しを直行する 2 方向のストリップによって行っているため、3 つのアルファ粒子の飛跡を分離する効率が悪い。そこで、本研究では、読み出し間隔を細かく維持しつつ、読み出し方法を 2 方向のストリップから、互いに 60 度で交わる 3 方向のストリップ構造に更新することを目的としている。

[3] T. Furuno *et al.*, *Nuclear Instrument and Method in Physics Research A* **908**, 215 (2018).

[4] T. Furuno *et al.*, *Physical Review C* **100**, 054322 (2019).

3. 研究の方法

本研究では、3 方向のストリップ読み出し基板を作成するにあたって、フレキシブル基盤技術を導入した。フレキシブル基盤技術によって世界で初めて細かい読み出し間隔を持つ TPC 基板を製作する。本研究の最終的な目標は TPC の有感領域が 30×30 cm² の 3 方向読み出し基板を開発することであるが、本研究課題では有感領域が 5×5 cm² の試作機を製作した。製作した試作読み出し基板の性能評価を行うために、これを既存の MAIKo TPC に組み込んだ。従来の μ -PIC は電離電子の増幅機能も備えているが、3 方向読み出し基板では増幅機構がないため、増幅率を補うために、ガス電子増幅器を従来の 1 枚から 3 枚へ増強も行った。開発した TPC を用いて、アルファ線源から放出されるアルファ粒子の飛跡構築を試みた。

4. 研究成果

開発した 3 方向読み出し基板による TPC でアルファ線による信号を確認することができた。また、電子ドリフト時間をストリップ毎にプロットすることで、アルファ線の飛跡を 3 次元的に構築することができた。その一方で、基板上で接近して配線されているストリップ間でクロストークする問題が確認された。本課題の最終年度に基板製作者と綿密な打ち合わせを行って、クロストークを解消する新たな基板の設計を完了させた。

本研究課題について、得られた成果を研究責任者、及び研究責任者が指導する学生 2 名が国内外の学会で発表を行った。学生の内 1 名は日本物理学会学生優秀発表賞を受賞した。また、申請者が筆頭著者として、国際学会プロシーディングスを出版した [5]。

[5] T. Furuno *et al.*, EPJ Web of Conferences **260**, 11010 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsumura M., Kawabata T., Takahashi Y., Adachi S., Akimune H., Ashikaga S., Baba T., Fujikawa Y., Fujimura H., Fujioka H., Furuno T. et al.	4. 巻 817
2. 論文標題 First experimental determination of the radiative-decay probability of the 31- state in 12C for estimating the triple alpha reaction rate in high temperature environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136283 ~ 136283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136283	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
1. 著者名 Adachi S., Fujikawa Y., Kawabata T., Akimune H., Doi T., Furuno T., Harada T., Inaba K., Ishida S., Itoh M., Iwamoto C., Kobayashi N., Maeda Y., Matsuda Y., Murata M., Okamoto S., Sakaue A., Sekiya R., Tamii A., Tsumura M.	4. 巻 819
2. 論文標題 Candidates for the 5 condensed state in 20Ne	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136411 ~ 136411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136411	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 -
1. 著者名 Furuno T., Koshikawa A., Kawabata T., Itoh M., Kurosawa S., Morimoto T., Murata M., Sakanashi K., Tsumura M., Yamaji A.	4. 巻 16
2. 論文標題 Response of the GAGG(Ce) scintillator to charged particles compared with the CsI(Tl) scintillator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P10012 ~ P10012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/10/p10012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Furuno Tatsuya, Doi Takanobu, Himi Kanako, Kawabata Takahiro, Adachi Satoshi, Akimune Hidetoshi, Enyo Shiyo, Fujikawa Yuki, Hijikata Yuto, Inaba Kento, Itoh Masatoshi, Kubono Shigeru, Matsuda Yohei, Murata Isao, Murata Motoki, Okamoto Shintaro, Sakanashi Kosuke, Tamaki Shingo	4. 巻 260
2. 論文標題 Measurement of 12C(n,n') reaction cross section to determine triple-alpha reaction rate in high-density environments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 11010 ~ 11010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226011010	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Furuno
2. 発表標題 Measurement of neutron quadrupole matrix element in ^{10}C using the MAIKo active target
3. 学会等名 JSPS/NRF/NSFC A3 Foresight Program Nuclear Physics in the 21st Century Joint Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Furuno
2. 発表標題 Measurement of $^{12}\text{C}(n, n')$ reaction cross section to determine triple-alpha reaction rate in high-density environment
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古野達也・坂梨公亮
2. 発表標題 GAGGシンチレータの波形解析による粒子識別
3. 学会等名 GAGGワークショップ 0 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古野達也
2. 発表標題 GAGG:Ceシンチレータの荷電粒子に対する応答とRCNPでの活用
3. 学会等名 おのころプロジェクトキックオフミーティング (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古野達也
2. 発表標題 Measurement of inelastic scatterings of unstable nuclei with MAIKo active target
3. 学会等名 RCNPでの次期計画検討会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古野達也
2. 発表標題 MAIKoアクティブ標的を用いた ^{12}C と中性子の非弾性散乱測定
3. 学会等名 MPGD&Active媒質TPC2020研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古野達也
2. 発表標題 ^{10}C アルファ非弾性散乱の測定
3. 学会等名 RCNP研究会「原子核における多様な共鳴現象とそれを探る反応機構」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Furuno
2. 発表標題 MAIKo active target for RI beam experiments and measurement of alpha inelastic scattering of ^{10}C
3. 学会等名 Korean Physics Society 70th Anniversary and 2022 Fall Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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			
韓国	高麗大学			
中国	Institute of Modern Physics			
米国	Michigan State University			