

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01929

研究課題名(和文)トリプルアルファ反応率の精密決定

研究課題名(英文)Precise determination of the triple-alpha reaction rates

研究代表者

寺西 高(Teranishi, Takashi)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10323495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ヘリウムから炭素を生成するトリプルアルファ(3α)反応は宇宙の進化を考える上で重要な核反応と考えられている。 3α 反応率は複数の原子核実験のパラメータにより決定される。その中でも炭素12第2励起状態(ホイール状態)の対崩壊分岐比は $\pm 9\%$ の誤差で決定されており、これが、 3α 反応率の誤差を支配している。本研究では、この対崩壊分岐比の精度を向上させるための新しい実験手法「逆運動学 非弾性散乱法」の開発を進展させた。新たに構築した実験セットアップを用いて、反跳粒子および電子・陽電子対を検出するテスト実験を行った。この実験結果から、計画中の本測定の実験条件を決定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トリプルアルファ反応は宇宙の進化を理解する上で重要である。本研究で開発した、ホイール状態の対崩壊分岐比のための新実験手法が、今後の本測定に適用されれば、長年の懸案であったトリプルアルファ反応率の精度向上が期待される。その結果は、さまざまな天体シミュレーションの精度向上につながる。我々の身の回りに存在する炭素の大部分はトリプルアルファ反応により生成されたと考えられており、その点で本テーマは一般社会において科学研究に対する興味を呼び起こすものであるといえる。

研究成果の概要(英文)：Triple-alpha reaction, which converts helium into carbon, is a key nuclear reaction process in studying the evolution of the universe. The triple-alpha reaction rates are determined by several parameters from nuclear physics experiments. Among them, the pair-decay branching ratio of the second excited state in carbon-12 (the Hoyle state) has been determined with an error of $\pm 9\%$, which dominates the error of the triple-alpha reaction rates. This study advanced the development of a new experimental method with "alpha inelastic scattering in inverse kinematics" for improving the precision of the pair-decay branching ratio. Using a newly constructed setup, test experiments for detecting recoil alpha particles and electron-positron pairs were performed. From the experimental results, optimal experimental conditions were determined for the main measurement being planned.

研究分野：実験核物理

キーワード：トリプルアルファ反応 ホイール状態 原子核実験 対崩壊

1. 研究開始当初の背景

ヘリウムから炭素を生成するトリプルアルファ(3 α)反応は宇宙の進化を考える上で重要な核反応と考えられ、初代星の形成や、超新星の元素合成で決定的な役割をしている。3 α 反応は $\alpha + \alpha + \alpha$ および $\alpha + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \gamma$ (第2励起状態 ${}^{12}\text{C}$ (基底状態)+放射、の二段階からなる(図1)。ここで炭素12 (${}^{12}\text{C}$) の第2励起状態 ${}^{12}\text{C}^*$ はホイル状態と呼ばれ、3 α 反応率を支配する重要な役割をしている。ホイル状態の基底状態への放射崩壊幅 Γ_{rad} は3 α 反応率を決定する際の比例係数となるが、実験的には $\pm 10\%$ 程度の精度でしか決まっておらず、これが3 α 反応率の決定精度を支配している。3 α 反応率の精度を向上させることは、天体における元素合成と進化のシミュレーションを改善するうえで重要である。放射崩壊幅 Γ_{rad} は実際には3つの異なる実験測定値の積として、 $\Gamma_{\text{rad}} = (\Gamma_{\text{rad}}^1) (\Gamma_{\text{rad}}^2) (\Gamma_{\text{rad}}^3)$ のように決定される。そのうち3番目の逆数である対崩壊分岐比 λ_{branch} の精度が $\pm 9\%$ と最も悪く、長年その改善が期待されていた。この対崩壊はホイル状態が電子・陽電子対を放出して基底状態に崩壊する現象である(図1)。

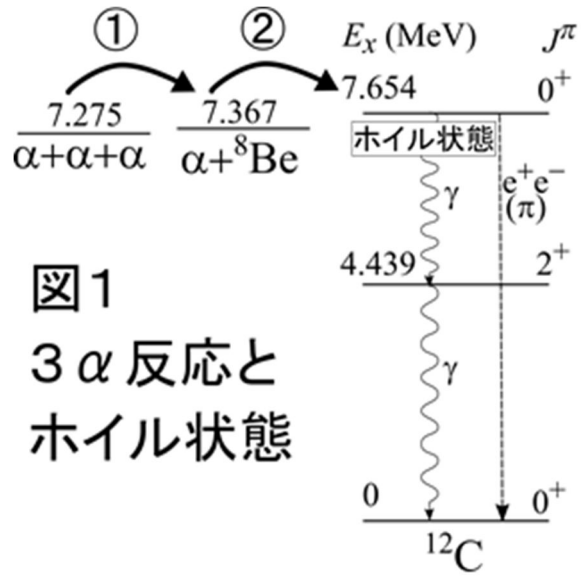


図1
3 α 反応と
ホイル状態

2. 研究の目的

本研究の目的は、約40年間更新されていないホイル状態の対崩壊分岐比を $\pm 5\%$ 程度の高精度で測定し、トリプルアルファ反応率の精度を改善させることである。我々は従来の陽子非弾性散乱法による測定の問題点を克服する、新実験手法「逆運動学非弾性散乱法」を開発し、テスト実験により新実験手法の検証を行った。

3. 研究の方法

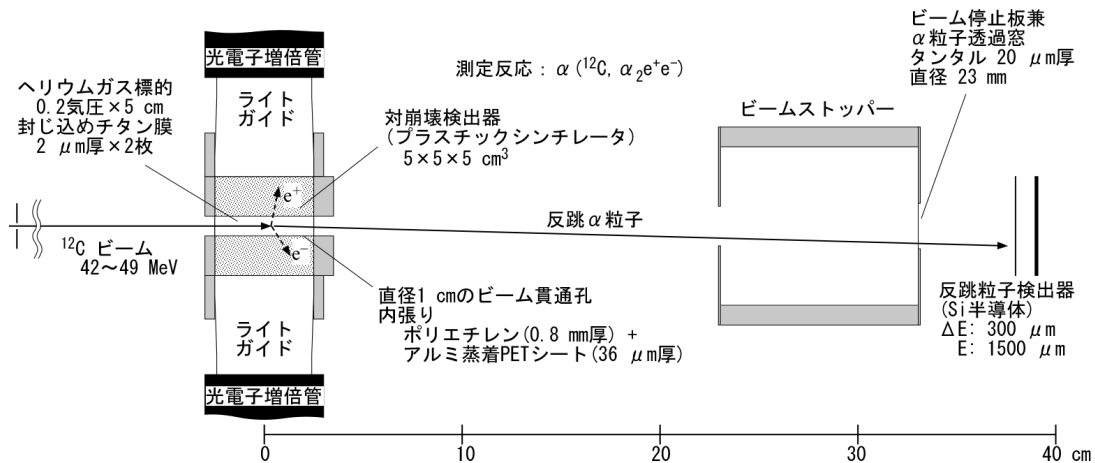


図2: 逆運動学非弾性散乱法によるホイル状態対崩壊分岐比測定セットアップ

(1) 新実験手法「逆運動学非弾性散乱法」

従来の対崩壊分岐比測定法の1つである陽子非弾性散乱法では、陽子を ${}^{12}\text{C}$ 標的に照射し、非弾性散乱による陽子と電子・陽電子対を同時測定する。このとき標的を囲む対崩壊検出器(プラスチックシンチレータ)にビーム貫通孔と散乱陽子観測孔(ビーム軸に対し135°方向)の2つの孔を設ける必要があり、検出器構造が複雑になるという問題があった。また運動学的条件により測定効率もそれほど高くなかった。我々は、これらを改善すべく、「逆運動学非弾性散乱法」を考案した(図2)。この方法では、従来標的であった ${}^{12}\text{C}$ をビームとし、標的はヘリウムガス(α 粒子)とし、逆運動学非弾性散乱によりホイル状態を生成し、対崩壊を観測する。このとき反跳 α 粒子は前方角度に放出され、ビーム貫通孔を通過して下流側に設置した反跳粒子検出器により検出される。このため、プラスチックシンチレータに設ける孔は、ビーム貫通孔のみでよく、検出器形状が単純となる。また逆運動学条件での反跳 α 粒子は前方角度に収束するため、測定効

率が向上する。なお、標的下流にはビーム停止板が設置されており、ビーム粒子はそこで停止する。一方、反跳粒子はビーム停止板を透過して、さらに下流の反跳粒子検出器により検出される。

(2) 実験用シミュレーション・コードの作成

実験セットアップを設計するために、GEANT4 に基づいたモンテカルロ・シミュレーション・コードを作成し、シミュレーション上で対崩壊検出器による電子・陽電子対のエネルギースペクトルを求め、検出効率とバックグラウンド低減の観点からシンチレータの形状を最適化した。

(3) 実験セットアップの製作

シミュレーションの結果を踏まえ、実際に図2のような実験セットアップを製作した。

(4) 反跳粒子収量の測定

これ以降述べる、加速器を用いた実験は、すべて九州大学タンデム加速器施設で実施した。 ^{12}C ビームエネルギーを 42~49 MeV の範囲で変化させ、 ^{12}C ビームと標的の散乱 ($^{12}\text{C}, i$) ($i = 0, 1, 2$) の収量を測定した。ここで、反跳粒子の記号の添え字 $i = 0, 1, 2$ はそれぞれ、散乱直後の ^{12}C が基底、第1、第2励起状態(ホイール状態)であることを表す。この測定により、バックグラウンド粒子 (α_0 および α_1) に対する測定対象粒子 (α_2) の収量の比が最大となる、本測定に最適なエネルギーを決定した。

(5) 対崩壊および線のテスト測定

本測定の対象である ^{12}C の対崩壊の分岐比は 7×10^{-6} 程度であり、短時間のテスト実験で測定するには小さすぎるので、かわりに酸素 16 (^{16}O) ビームを用いて、対崩壊分岐比が 100% である、 ^{16}O の第一励起状態の対崩壊のテスト測定を行った。また、線バックグラウンドに対する検出器の応答を検証するため、 ^{12}C ビームを用いて ^{12}C 第一励起状態からの線の測定を行った。これらの結果はモンテカルロ・シミュレーションの結果と比較した。

(6) 想定する本測定の実験条件決定と収量予測

テスト実験により決定した α_2 収量、およびシミュレーションにより決定した対崩壊検出効率より、想定する本測定の実験条件を決定し収量予測を行った。

4. 研究成果

(1) 反跳 α_2 粒子収量の測定結果

($^{12}\text{C}, i$) ($i = 0, 1, 2$) 散乱による反跳 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 粒子の生成微分断面積のビームエネルギー依存性の測定結果を図3に示す(ビームエネルギーの範囲は 42~49 MeV)。バックグラウンド粒子 (α_0, α_1) に対する測定対象粒子 (α_2) の比が最も高いエネルギーは 45.5 MeV であった。

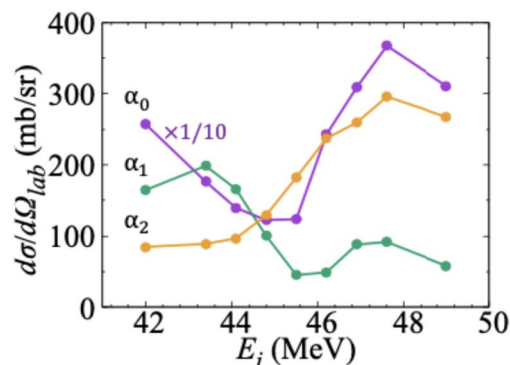


図3 ($^{12}\text{C}, i$) ($i = 0, 1, 2$) 散乱の実験室系 0° における微分断面積の結果

(2) ^{16}O 第1励起状態からの電子・陽電子対および ^{12}C 第1励起状態からの線の測定結果

図4(左)は 47 MeV ^{16}O ビームと標的を用いた ($^{16}\text{O}, 1$) 散乱における ^{16}O 第1励起状態からの電子・陽電子対に対するエネルギースペクトルである。4.7 MeV 付近に電子・陽電子対によるピークをはっきりと観測することができた。赤線はシミュレーションによる実験データに対するフィッティングの結果であり、実験をよく再現している。ただし、スペクトルには、標的ガス封じ込め膜起源の線、および、 ^{16}O 第2励起状態起源の線のバックグラウンド成分が含まれており、それらの寄与もフィッティングの際に考慮した。

図4(右)は 42 MeV ^{12}C ビームと標的を用いた ($^{12}\text{C}, 1$) 散乱における ^{12}C 第1励起状態からの線に対するエネルギースペクトルである。同様にシミュレーションによるフィッティングにより、実験結果が良く再現できた。なお、このスペクトル中にも封じ込め膜起源の線のバックグラウンド成分が含まれている。

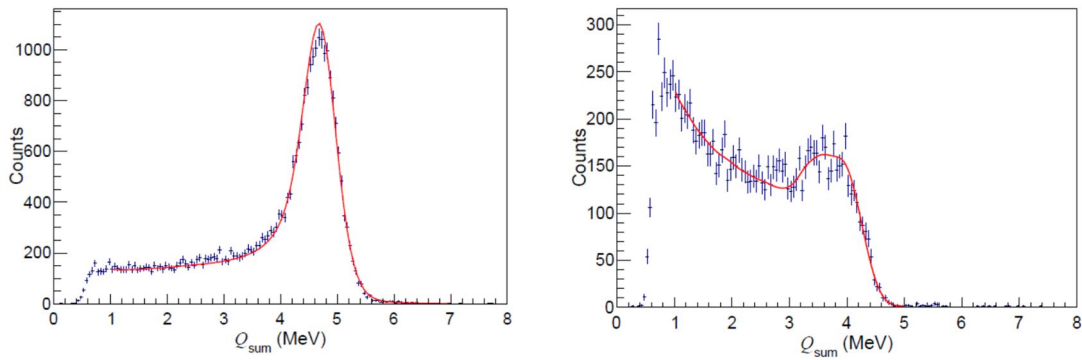


図4 (左) 47 MeV ^{16}O ビームの $(^{16}\text{O}, \gamma)$ 散乱による電子・陽電子対スペクトルの測定結果。(右) 42 MeV ^{12}C ビームの $(^{12}\text{C}, \gamma)$ 散乱による線スペクトルの測定結果。赤い曲線はシミュレーションによる実験データに対するフィッティングの結果。

(3) 想定する本測定の実験条件と収量予測

テスト実験により決定した、最適な ^{12}C ビームエネルギー 45.5 MeV における反跳 2_2 粒子の生成微分断面積と、反跳粒子検出器の立体角、対崩壊検出器の検出効率、を用いて対崩壊イベントの収量を以下のように予測した。ビーム強度 5 粒子 nA、測定時間 7 日間という測定条件で、測定対象の対崩壊分岐比が 7×10^{-6} であると仮定した場合、得られる対崩壊イベント数は約 1500 個である。このとき対崩壊分岐比の統計誤差は $\pm 2.6\%$ である。検出効率およびバックグラウンドの評価に起因する系統誤差を $\pm 4\%$ 以内に抑えられれば、全体として $\pm 5\%$ 以内で対崩壊分岐比を決定することが期待できる。

(4) 結果の意義と今後の展望、国内外における位置づけ

本研究では、トリプルアルファ反応率の精度を向上させるために必要な、ホイル状態の対崩壊分岐比をこれまでより高精度で決定する新しい実験手法を考案した。実際に実験セットアップを製作し、電子・陽電子対のテスト測定に成功し、本測定の実験条件を決定することができた。

今後の展望として、ビーム強度を今回のテスト実験の場合の数十倍にして、本測定を実現させることが期待される。このビーム強度は技術的には問題なく得られるが、その際、検出器系や測定系が問題なく動作するか、想定外のバックグラウンドが発生しないかを確認する必要がある。

なお、本実験の遂行には、十分な加速器の性能があり、かつ小規模で実験コストを抑えられるという点で、国内では、九州大学のタンデム加速器施設が最も適している。

国外においては、本研究の期間中の 2020 年にオーストラリア国立大のグループがペア・スペクトロメータ法という別の方法を用いて、ホイル状態の対崩壊分岐比を測定し、実験結果の誤差 $\pm 6\%$ を実現させた (T.K. Eriksen et al., Physical Review C 102, 024320 (2020))。しかし、この結果は、過去の複数の実験値による平均値と比較して、誤差の範囲を超えて食い違っており、今後の追試が必要である。本研究で開発した新実験手法による今後の本測定が、この対崩壊分岐比の問題にさらなる一石を投じることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久保大志、寺西高、中島優人、後藤滉一、松尾仁、久保野茂
2. 発表標題 逆運動学12C(, 2)散乱によるホイル状態の生成
3. 学会等名 第126回日本物理学会九州支部例会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島優人、寺西高、後藤滉一、松尾仁、井元悠介、小谷基樹、松本悠椰、田中久登
2. 発表標題 炭素12の逆運動学 非弾性散乱を用いたホイル状態の対崩壊分岐比測定方法の開発
3. 学会等名 第127回日本物理学会九州支部例会（オンライン）
4. 発表年 2021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
研究分担者	久保野 茂 (Kubono Shigeru) (20126048)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・客員主管研究員 (82401)	

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
---------	---------