

極端環境下における元素合成過程の解明

Nucleosynthesis under the extreme conditions in the universe

課題番号：19H05604

川畑 貴裕 (KAWABATA Takahiro)

大阪大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

宇宙における元素合成において最も重要な反応のひとつは、3つの ${}^4\text{He}$ から ${}^{12}\text{C}$ を合成するトリプルアルファ反応である。しかし、高温・高密度な極端環境下における反応率には大きな不定性が残されており学術上の大きな問題となっていた。本研究では、極端環境下におけるトリプルアルファ反応率を測定し、宇宙における元素合成過程を明らかにすることを目的とする。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）・トリプルアルファ反応・元素合成・アクティブ標的

1. 研究開始当初の背景

観測可能な領域だけでも 10^{26} mという広大な広がりをもつ宇宙と、 10^{-15} mという極めてミクロな原子核の間には密接な関係がある。宇宙開闢のとき、まだ宇宙には一切の元素が存在していなかった。しかし、現在の宇宙には様々な元素が存在している。すべての元素は138億年にわたる宇宙の進化のなかで、原子核反応によって生み出されてきた。

宇宙における元素合成において最も重要な反応のひとつは、3つの ${}^4\text{He}$ (α 粒子) から ${}^{12}\text{C}$ を合成するトリプルアルファ (3α) 反応である。しかし、高温・高密度な極端環境下における 3α 反応率は、既知の値に比べ数倍から100倍も増大する可能性が指摘されており、宇宙における元素合成過程を明らかにするうえで大きな問題となっていた。

2. 研究の目的

3α 反応の概略を図1に示す。2つの α 粒子の共鳴状態である短寿命の ${}^8\text{Be}$ に、新たな α 粒子が捕獲されることで3つの α 粒子の共鳴状態が ${}^{12}\text{C}$ の励起状態として生成される。生成された励起状態の大半は再び 3α へと崩壊するが、ある確率で脱励起して ${}^{12}\text{C}$ の基底状態となる。そのため、共鳴状態の脱励起確率は 3α 反応率を決定する重要なパラメータとなる。しかし、高温や高密度の極端環境下における共鳴状態の脱励起確率は未知のまま残されており、 3α 反応率の不定性の原因となっていた。そこで、本研究では

- ✓ 逆運動学条件下における ${}^{12}\text{C}$ と α 粒子の非弾性散乱

- ✓ 新しいアクティブ標的を用いた ${}^{12}\text{C}$ と中性子の非弾性散乱

を測定することにより、極端環境下における共鳴状態の脱励起確率を測定して 3α 反応率を決定し、宇宙における元素合成過程を明らかにすることを目的とする。

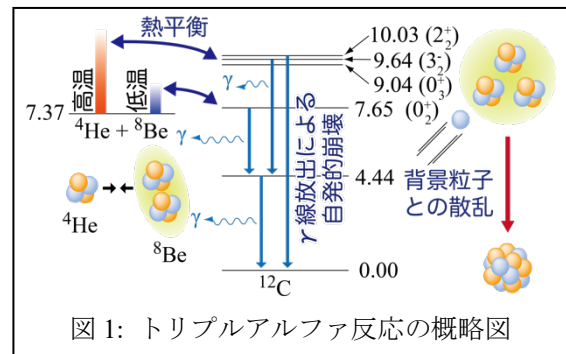


図1: トリプルアルファ反応の概略図

3. 研究の方法

高温下における 3α 反応率

通常温度 ($\sim 10^8$ K) における 3α 反応は、主に 0_2^- 状態を経由するが、 10^9 Kを超える高温ではより高い励起エネルギーを持つ 3_1^- や 2_1^+ 状態の寄与が重要となる。しかし、これらの状態から基底状態への脱励起確率は 10^{-6} — 10^{-8} と極めて低く、これまで測定されていない。そこで本研究では逆運動学条件下において ${}^{12}\text{C}$ と α 粒子の非弾性散乱を測定することにより、 3_1^- 状態と 0_3^+ 状態が基底状態への脱励起する確率を決定する。

高密度下における 3α 反応率

通常の 3α 反応では、中間状態として生成さ

れた 3α 共鳴状態が自発的に γ 崩壊して基底状態へと脱励起する。しかし、高密度環境下では周辺の粒子と 3α 共鳴状態が吸熱型の非弾性散乱を起こすことにより基底状態へと脱励起する機構を無視できなくなる。特に中性子の非弾性散乱による寄与は大きく、 3α 反応率が100倍以上に増大すると予測されている。

高密度下における 3α 反応率を決定するためには、 3α 共鳴状態と中性子の非弾性散乱の断面積を測定する必要があるが、 3α 共鳴状態は短寿命であるため、これを直接に測定することは不可能である。そこで、本研究では宇宙における反応の逆反応、すなわち、 ^{12}C の基底状態を 3α 共鳴状態へ励起する中性子非弾性散乱の断面積を測定し、詳細釣り合いの原理を用いて 3α 共鳴状態と中性子の非弾性散乱断面積を決定する。しかし、逆反応では終状態となる3つの α 粒子のエネルギーが極めて低い(<1 MeV)ため測定は容易でない。そこで、新しいアクティブ標的を開発し、低エネルギー α 粒子の測定を可能とする。

4. これまでの成果

本研究の最初の2年間では、極端環境下における 3α 反応率を決定する準備を行った。高温環境下における 3α 反応率を決定するために、逆運動学条件下の非弾性散乱によって反跳をうけた低エネルギー粒子を測定するSi検出器群を開発した。また、高密度環境下における 3α 反応率を決定するために、可変エネルギー単色中性子源の開発、アクティブ標的を用いた中性子非弾性散乱測定技術の開発およびアクティブ標的の大型化を実施した。

Si検出器群の開発

本研究では、低エネルギー荷電粒子を大立体角にわたって粒子識別しつつ測定する必要がある。そこで、表面と裏面の読み出し電極が合計120チャンネルのストリップに分割された大面積Si検出器群とデータ読み出し回路を構築し、出力信号の波形解析による粒子識別技術の開発を行った。この結果、3 MeVの陽子と α 粒子については99%以上の精度で粒子識別が可能であることが分かった。しかし、粒子識別の精度は粒子のエネルギーの減少とともに低下し、2 MeVの粒子に対する精度は93%となった。そこで、近年、進展の著しいニューラルネットワーク技術を導入して粒子識別アルゴリズムの改善を図ったところ、95%の識別精度が得られ、若干の改善が見られた。検出器からの出力波形にはチャンネル依存性があり、従来型の解析手法では120のチャンネルに対して個別に判定条件を設定する必要があったが、ニューラルネットワークを導入することにより、自動的に粒子識別条件が決定されるため、データ解析の労力を劇的に減少させることに成功した。

可変エネルギー単色中性子源の開発

単色中性子ビームを生成する反応として

$^{11}\text{B} + ^1\text{H} \rightarrow n + ^{11}\text{C}$, $^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow n + ^{13}\text{N}$, $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow n + ^{15}\text{O}$ の3種類の反応を検討し、 ^{11}B が最適であることを明らかにした。また、イオン源開発を行って ^{11}B ビームの強度を2倍に増強することに成功した。今後も開発を続け、さらなる大強度化を図る。

中性子非弾性散乱測定技術の開発

既存の小型のアクティブ標的を用いて、テスト実験を行った。中性子と ^{12}C の非弾性散乱から放出される3つの α 粒子のエネルギーと放出角度を決定し、 ^{12}C の励起エネルギースペクトルを得ることに成功した。 3α 反応の中間状態である 0^+_2 状態の励起断面積の測定値が過去の文献値と誤差の範囲で一致することを確認し、アクティブ標的を用いた中性子非弾性散乱の測定技術が実証された。

アクティブ標的の大型化

中性子非弾性散乱の測定効率を向上させるためにアクティブ標的の有感体積を既存の10 cm立方から30 cm立方へと大型化を図った。シミュレーション計算によると、この大型化により検出効率は約30倍増大すると期待されている。そこで、信号読み出し回路の構築、真空チェンバーの製作を行った。また、有限要素法を用いた電場計算を実施し、電場の非一様性が0.3%以下となるようフィールドケージの設計を行った。令和3年度早々にフィールドケージの実機を製作してアクティブ標的の大型化を実現させることを目指す。

5. 今後の計画

アクティブ標的の大型化を完了させたのちに、 ^{12}C と中性子の非弾性散乱の断面積を測定し、高密度環境下における 3α 反応率を決定する。また、逆運動学条件下における ^{12}C と α 粒子の非弾性散乱の断面積を測定し、高温環境下における 3α 反応率を決定する。実験で得られた成果について、国内外の連携研究者らと議論を重ね、宇宙における元素合成過程を明らかにすることを目指す。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- [1] First experimental determination of the radiative-decay probability of the 3_1 state in ^{12}C for estimating the triple alpha reaction rate in high temperature environments, T. Tsumura, T. Kawabata et al., Phys. Lett. B (in press).
- [2] Triple alpha reaction rate under extreme conditions, T. Kawabata, the 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2020), Mar. 1—5, 2021, Kanazawa, Japan (Invited Talk).
- [3] 宇宙における元素合成とトリプル・アルファ反応, 川畑貴裕, 生産と技術 第72巻 第3号 52—56 (2020).

7. ホームページ等

<http://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>