



研究課題名 極端環境下における元素合成過程の解明

大阪大学・大学院理学研究科・教授 かわばた たかひろ
川畑 貴裕

研究課題番号： 19H05604 研究者番号： 80359645

キーワード： トリプルアルファ反応、元素合成、アクティブ標的、中性子ビーム

【研究の背景・目的】

観測可能な領域だけでも 10^{26} m という広大な拡がりをもつ宇宙と、 10^{-15} m という極めてミクロな原子核と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、 ^4He (α 粒子) が二つの α 粒子の共鳴状態である ^8Be に捕獲されて ^{12}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 反応率には、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。そこで、本研究課題では、極端環境下における 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。

【研究の方法】

図 1 に示すように、 3α 反応では 3 つの α 粒子の共鳴状態が中間状態として生成される。これらの 3α 共鳴状態の大半は再び 3 つの α 粒子へ崩壊するが、極めて稀に ^{12}C の基底状態へと崩壊して ^{12}C を生成する。 3α 反応率を決定するには、これらの 3α 共鳴状態の基底状態への崩壊分岐比を測定する必要がある

高密度下における 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 を超える高密度下ではより高い励起エネルギーを持つ 2_2^+ , 3_1^+ , 0_3^+ 状態の寄与が重要となる。 0_2^+ 状態と 2_2^+ 状態から基底状態への崩壊分岐比はすでに知られているが、 3_1^+ 状態や 0_3^+ 状態から基底状態への崩壊分岐比は 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ける ^{12}C からのアルファ非弾性散乱を測定することにより、 3_1^+ 状態と 0_3^+ 状態から

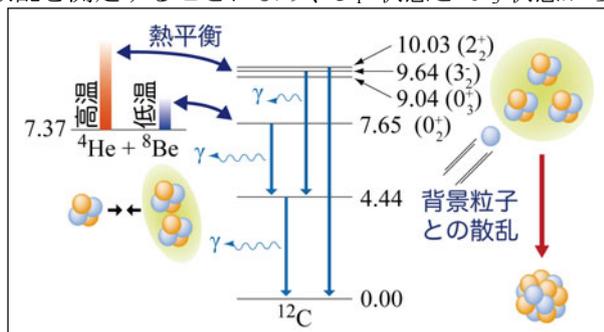


図 1 3α 反応の模式図

基底状態への崩壊分岐比を決定する。

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 γ 崩壊により基底状態へと遷移する。一方、高密度な環境下においては周辺の粒子と 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、これを実際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 (< 0.5 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。

【期待される成果と意義】

宇宙における元素合成過程を明らかにするうえで、 3α 反応率は極めて重要なパラメータである。例えば、重力崩壊型の超新星爆発時には高温・高密度の ^4He 相が発現し、 3α 反応を経由して重元素が生成されると考えられている。このとき 3α 反応率が変化すると、重元素の生成量は劇的に変化する。

本研究課題の遂行によって高温・高密度下における 3α 反応率を決定することができれば、超新星爆発時における重元素合成量の予測精度が飛躍的に向上し、これを超新星残骸の観測と比較することで、これまで詳しく理解されていなかった超新星爆発のメカニズムについての知見を得られるようになると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Wanajo et al., *Astrophys. J.* 729, 46 (2011).
- M. Beard et al., *Phys. Rev. Lett.* 119, 112701 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和 5 年度
132,600 千円

【ホームページ等】

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