

# 宇宙における元素合成とトリプル・アルファ反応



研究ノート

川畑 貴裕\*

Nucleosynthesis in the Universe and Triple Alpha Reaction

Key Words : Nucleosynthesis, Triple Alpha Reaction

## はじめに

観測可能な領域に限っても  $10^{26}m$  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スケールしかない原子核の間には密接な関係がある。その事実を初めて指摘したのは、イギリスの天文学者アーサー・エディントンであった。太陽が放出する莫大なエネルギーがどのようにして生み出されているのかは、当時の物理学における最大の謎のひとつであった。太陽が石炭の塊であるとする説、太陽自身の質量による重力エネルギーが放出されているとする説など、様々な説が提案されたが、いずれの説を採っても太陽の寿命が1億年以下となる結論が導かれ、地質学的・生物学的に推定されていた地球の年齢よりもはるかに短くなるという受け入れ難い矛盾が生じていた。そんな状況にあって、エディントンは、1920年に太陽のエネルギー源が水素の核融合によるものであることを指摘した。ラザフォードによる原子核発見から未だ10年が経過しておらず、中性子の存在すら知られていなかった原子核物理学の黎明期にあって、エディントンの指摘は仮説のひとつに過ぎなかったが、1939年にハンス・ベータがCNOサイクルと陽子-陽子連鎖反応を提唱したことにより、核融合反応をはじめとする原子核反応が恒星のエネルギー源として確立された。

原子核反応では、エネルギーが開放されるととも

に新しい元素が合成される。かつて、宇宙開闢の直後、ビッグバンと呼ばれる高温高密度の状態にあった我々の宇宙には、まだ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。水素よりも重いすべての元素は約138億年にわたる宇宙の進化の中で原子核反応によって生み出されてきた。すなわち、宇宙の歴史は元素合成の歴史でもあり、宇宙の成り立ちを明らかにしようとするとき、これらの原子核反応を詳らかにすることは極めて重要である。

## 宇宙における元素合成と「A = 5, 8の壁」

宇宙初期のビッグバン直後にはリチウムまでの軽い元素が生成されたと考えられている。このビッグバン元素合成では、図1に示すように陽子と中性子を始点として陽子と中性子の捕獲をくり返し、 $p(^1H), n \rightarrow ^2H \rightarrow ^3H, ^3He \rightarrow ^4He$  という具合に質量数の大きな原子核が逐次的に合成された。しかし、質量数が5となる原子核には結合状態が存在せず、また、2つの $^4He$ から生成される $^8Be$ も極めて単寿

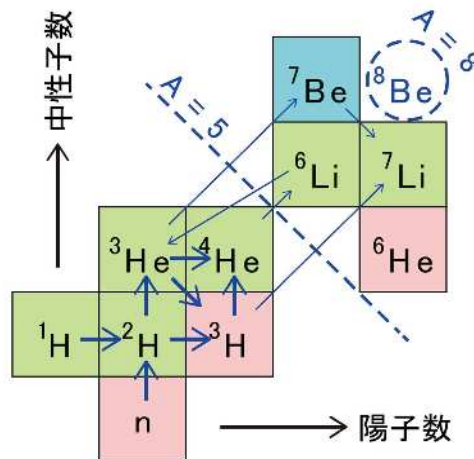


図1 ビッグバン直後における元素合成過程と「A = 5, 8の壁」



\* Takahiro KAWABATA

1973年10月生まれ  
 京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 博士後期課程 (2001年)  
 現在、大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 教授 博士(理学)  
 TEL : 06-6850-5353  
 FAX : 06-6850-5530  
 E-mail : kawabata@phys.sci.osaka-u.ac.jp

命で元の  ${}^4\text{He}$  に崩壊するために、 ${}^4\text{He}$  以降の元素合成は停滞し、 ${}^4\text{He}$  と  ${}^2\text{H}$  や  ${}^3\text{He}$  の反応により、ごく少量の  ${}^6\text{Li}$  と  ${}^7\text{Be}$  が生成されるに留まった。このように、ビッグバン元素合成において重元素の合成を阻むボトルネックを「 $A = 5, 8$  の壁」と呼ぶ。リチウムよりも重い元素が生成されるには、宇宙開闢から2億年後ごろに活発となる恒星の誕生を待つ必要があった。

恒星は水素を主成分とするガス雲から誕生する。ガス雲が重力収縮することによって発熱し、中心温度が1,000万Kに達すると水素の核融合反応が始まる。陽子-陽子連鎖と呼ばれる一連の核融合反応では4つの陽子から1つの ${}^4\text{He}$ を合成し、莫大なエネルギーを放出するようになる。核融合反応を熱源として恒星内部の圧力が上昇し、重力による収縮と拮抗すると主系列星と呼ばれる段階に入り、しばらくの間は安定して輝く。やがて、中心部の水素が消費され枯渇すると恒星のコアが収縮して温度が上昇し、 ${}^4\text{He}$ を燃料とする核融合反応、いわゆるヘリウム燃焼が始まる。質量が太陽の10倍を超える十分に重い恒星では、 ${}^4\text{He}$ が枯渇した後に炭素→酸素→ネオン→マグネシウム→ケイ素と順番に重い元素が燃焼し、最終的には鉄のコアが形成される。しかし、鉄に至ると、もはや核融合反応によってエネルギーを取り出すことができなくなるため、コアが重力崩壊して超新星爆発を起こし、恒星はその一生を終える。すなわち、ヘリウムから鉄に至る元素は恒星内部の核融合反応で合成され、超新星爆発とともに宇宙空間へ放出されたのだと理解できる。

しかし、ここでひとつの疑問が浮かぶ。ビッグバン元素合成の際には、「 $A = 5, 8$  の壁」に妨げられて、元素合成は ${}^4\text{He}$ で停滞してしまった。ならば、恒星内部においても ${}^4\text{He}$ の核融合反応は開始されず、重元素は合成されないのではないだろうか？この疑問は1940年代から1950年代にかけて大きな問題となっていた。この問題がフレッド・ホイルによって解決されたことは広く知られている。ホイルは、 ${}^4\text{He}$ から ${}^{12}\text{C}$ を合成するには ${}^4\text{He}$  ( $\alpha$ 粒子)の三体核融合であるトリプル・アルファ反応を経由するしかないと看破し、この反応を促進するために必要な共鳴準位の存在を予言した。この準位はホイルの予言からほどなく ${}^{12}\text{C}$ の $0^+_{2}$ 状態として実験的に発見され、ビッグバン直後とは異なる高密度の恒星中心部であ

れば、トリプル・アルファ反応により「 $A = 5, 8$  の壁」を乗り越えて重元素を合成できることが明らかになったのであった。

トリプル・アルファ反応は、すべての重元素合成の起点であり、元素合成過程において最も重要な反応のひとつである。今日では、ホイルが予言した ${}^{12}\text{C}$ の $0^+_{2}$ 状態はホイル状態と呼ばれている。

### トリプル・アルファ反応

トリプル・アルファ反応の経路を図2に示す。2つの ${}^4\text{He}$  ( $\alpha$ 粒子)の共鳴状態である単寿命の ${}^8\text{Be}$ に、新たな $\alpha$ 粒子が捕獲されることで3つの $\alpha$ 粒子の共鳴状態が ${}^{12}\text{C}$ の励起状態として生成される。結合状態のない ${}^8\text{Be}$ に対し、 ${}^{12}\text{C}$ には安定な結合状態が存在するため、 $3\alpha$ 共鳴状態を経由することにより「 $A = 5, 8$  の壁」を乗り越えることが可能となる。生成された $3\alpha$ 共鳴状態の大半は再び3つの $\alpha$ 粒子へと崩壊するが、ある確率で基底状態へ脱励起して ${}^{12}\text{C}$ の基底状態となる。すなわち、 ${}^{12}\text{C}$ の $3\alpha$ 共鳴状態における $\alpha$ 崩壊と基底状態への脱励起の分岐比は ${}^{12}\text{C}$ の生成速度を決定する極めて重要な物理量であり、宇宙における重元素合成の鍵を握るパラメータである。しかし、その重要性にもかかわらず、現在でも未測定に分岐比が残されており、トリプル・アルファ反応の速度には、いまだに不確定な要素が残されている。特に、高温であるいは高密度な極端環境下においては、反応速度が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いる。そこで、筆者らの研究グループでは極端環境下におけるトリプル・アルファ反応率の決定に取り組んでいる。

#### 高温下におけるトリプル・アルファ反応

通常温度 ( $\sim 10^8$  K) におけるトリプル・アルファ反応は、主に $3\alpha$ 崩壊の閾値に近い $0^+_{2}$ (ホイル)状

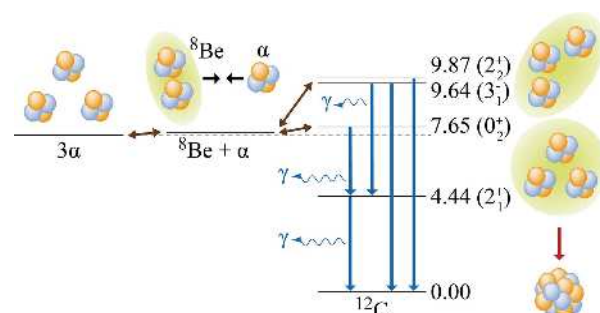


図2 トリプル・アルファ反応の経路図

態を經由する。ひとたび生成されたホイール状態は、 $4.4(5) \times 10^{-5}$  の確率で  $\gamma$  崩壊によって脱励起し  $^{12}\text{C}$  の基底状態へと至る。一方、 $10^9 \text{ K}$  を超える高温下では、ホイール状態よりもエネルギーの高い  $3\alpha$  共鳴状態である  $3^{-1}$  状態や  $2^{+2}$  状態の寄与が重要になることが、1950年代の時点ですでにファウラーやホイールらによって指摘されていた。

$2^{+2}$  状態はホイール状態における3つの  $\alpha$  粒子の相対運動が励起した状態としてその存在が古くから予言されていたが、近年に至るまで発見されておらず、長らくその存否が論争的となっていた。2005年には、フィンボらが  $^{12}\text{N}$  と  $^{12}\text{B}$  の  $\beta$  崩壊測定から  $2^{+2}$  状態の存在を確認できないと報告している<sup>1)</sup>。しかし、伊藤らによるアルファ非弾性散乱の精密測定によって、2011年にその存在が確立され<sup>2)</sup>、その後、2013年にチマーマンらによる光分解反応測定から  $\gamma$  崩壊による脱励起確率が決定された<sup>3)</sup> ことにより、トリプル・アルファ反応に対する  $2^{+2}$  状態の寄与は、それまで期待されていたよりも遥かに少なく、結果的に、高温下におけるトリプル・アルファ反応率は想定よりも大きく抑制されていることが明らかになった。

その一方で、 $3^{-1}$  状態の脱励起確率は未だに測定されておらず、高温下におけるトリプル・アルファ反応率を決定するために、 $3^{-1}$  状態の脱励起確率を実験的に決定することが強く望まれていた。

しかし、 $3^{-1}$  状態の脱励起確率は  $10^{-8} - 10^{-5}$  と極めて小さく、これまで測定に成功した例はなかった。そこで、筆者らは高い感度で  $3^{-1}$  状態の脱励起確率を測定する独自の手法を考案した。図3に示すように、 $^{12}\text{C}$  ビームを水素標的へ入射し、 $^{12}\text{C}$  を励起させる。このとき、反跳された陽子のエネルギーと角度を測定すれば、 $3^{-1}$  状態が励起された事象を同定することができる。励起された  $3^{-1}$  状態は、大半が3つの  $\alpha$  粒子へと崩壊するが (図3左)、ごく稀に  $\gamma$  線を放出して  $^{12}\text{C}$  の基底状態へと脱励起する (図3右)。ゆえに、 $^{12}\text{C}$  と陽子を同時計測して脱励起事象を同定し、全励起事象数と比較すれば  $3^{-1}$  状態の脱励起確率を決定することができる。

この手法によって稀崩壊確率を決定するには、低バックグラウンドでの精密測定が必須であり、多くの技術的な開発が必要であった。標的中の不純物に起因するバックグラウンドを削減するための固体水

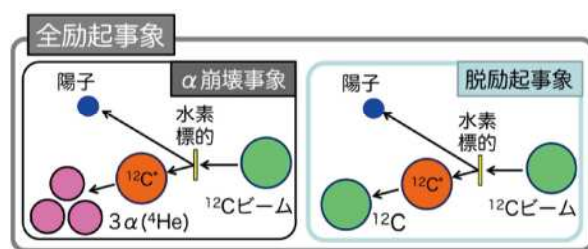


図3  $3^{-1}$  状態の脱励起確率測定概念図

素標的や、高計数率的环境下にあって反跳陽子のエネルギーと角度を決定できる荷電粒子検出器 Gion の開発を行ったほか、 $^{12}\text{C}$  と陽子の同時計測におけるバックグラウンドとなる偶然同時計測事象の削減を図るために、現実的な実験条件を踏まえたシミュレーション計算を行い、検出器配置の徹底的な最適化を行った。

実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) のリングサイクロロン施設において実施した。AVF サイクロロンを用いて加速した  $^{12}\text{C}$  ビームを 15 mm 四方で厚さ 0.5 mm の固体水素標的に照射し、反跳陽子を Gion 検出器で測定した。また、前方角度に放出された  $^{12}\text{C}$  ないし  $\alpha$  粒子は RCNP が誇る高分解能磁気スペクトロメータである Grand Raiden を用いて運動量分析した後に計測した。反跳陽子の測定から得られた  $3^{-1}$  状態の全励起事象数と、散乱  $^{12}\text{C}$  の同時計測によって得られた脱励起事象数を比較し、さらにシミュレーション計算から評価した同時計測事象の検出効率を評価することで  $3^{-1}$  状態の脱励起確率を  $1.3(8) \times 10^{-6}$  と決定することに成功した。

図4に筆者らの研究を含めた近年の測定に基づくトリプル・アルファ反応率  $r_{3\alpha}$  と天体核計算において広く用いられている NACRE と呼ばれている

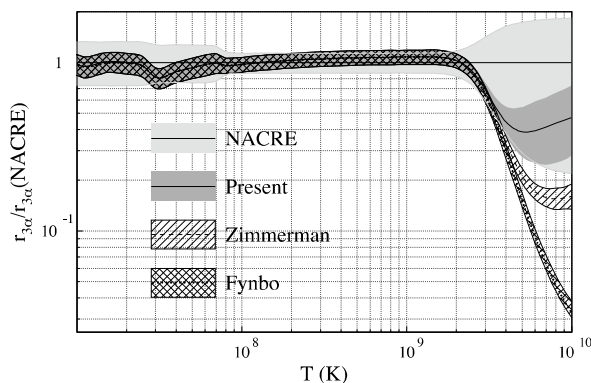


図4 近年の測定に基づくトリプル・アルファ反応率と NACRE に収録された反応率の比

ライブラリ<sup>4)</sup>に収録されている反応率 $r_{3\alpha}$  (NACRE)の比を温度の関数として示す。薄灰色はNACREにおける評価誤差である。NACREが構築された当時には $2^+_{2}$ 状態や $3^-_{1}$ 状態に関する実験的情報が不足していたため、 $10^9$  K以上の高温領域で大きな誤差が残されていた。フィンボらの主張に従うと $2^+_{2}$ 状態の寄与は無視できる程度に小さいため、高温領域でのトリプル・アルファ反応率は点線で示すようにNACREに比べ1桁以上小さな値となる。チャーマンらによって測定された $2^+_{2}$ 状態の情報を考慮すると、破線で示すように、トリプル・アルファ反応率は高温領域においていくぶん回復するものの、測定された $2^+_{2}$ 状態の脱励起確率がNACREにおいて仮定されていた値よりも小さいため、依然としてNACREにおいて評価されていた誤差範囲を逸脱して抑制されたままとなる。

一方で、筆者らの測定によって得られた $3^-_{1}$ 状態についての情報を考慮すると太い実線と濃灰色の誤差範囲で示されたトリプル・アルファ反応率となる。 $3^-_{1}$ 状態の寄与により、高温領域における反応率がさらに回復し、結果的にはNACREに収録された反応率と誤差の範囲内で一致する結果が得られた。NACREに比べると誤差を縮小することに成功したが、今回測定された $3^-_{1}$ 状態の脱励起確率には依然として約50%を超える大きな測定誤差が残されており、今後、測定精度の向上を図り、トリプル・アルファ反応率の精度を高めていく必要がある。

#### 高密度下におけるトリプル・アルファ反応

通常のトリプル・アルファ反応では、中間状態として生成された $3\alpha$ 共鳴状態は $10^{-8}$ – $10^{-4}$ の確率で自然に $\gamma$ 崩壊して脱励起する。しかし、高密度な環境下においては、図5上に示すように、 $3\alpha$ 共鳴状態と周辺粒子が吸熱型の非弾性散乱を起こすことにより、 $3\alpha$ 共鳴状態が脱励起する過程を無視することができなくなる。近年、ベアードらは密度が $10^6$  g/cm<sup>3</sup>である環境において、陽子・中性子・ $\alpha$ 粒子とホイル状態の非弾性散乱によるトリプル・アルファ反応率の変化を理論的に検討した<sup>5)</sup>。この結果、熱中性子とホイル状態の非弾性散乱による影響が極めて大きく、 $10^8$  K付近ではトリプル・アルファ反応率が100倍以上も増大する可能性が指摘された。ところが、ホイル状態と熱中性子の非弾性散乱の確率(断面積)は知られておらず、高密度下における

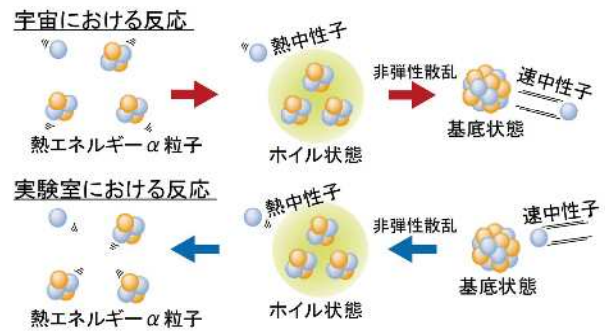


図5 高密度環境下におけるトリプル・アルファ反応とその時間反転反応

トリプル・アルファ反応率を決定するにはその断面積を実験的に決定する必要がある。

しかし、ホイル状態は単寿命の $3\alpha$ 共鳴状態であるため、高密度環境下における熱中性子とホイル状態が非弾性散乱して、 $^{12}\text{C}$ の基底状態へ脱励起する断面積を測定することは不可能である。そこで、筆者らは詳細釣り合いの原理に基づいて、時間反転反応である図5下の反応、すなわち、速中性子が $^{12}\text{C}$ の基底状態と非弾性散乱してホイル状態を励起する断面積を測定することを着想した。詳細釣り合い原理によると、状態密度を除けば、時間反転の関係にある2つの反応の断面積は等しいため、逆方向の反応の断面積を測定すれば順方向の反応の断面積を決定することができる。しかし、時間反転反応では、散乱後の終状態が天体核反応のエネルギー、すなわち、 $\sim 10^9$  Kの温度に相当するエネルギーしか持たないので、放出される粒子のエネルギーは極めて低く、これを通常の検出器で測定することは困難である。そこで、筆者らはこの困難をアクティブ標的の導入により克服する計画である。

近年、筆者らの研究グループでは、 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の有感領域をもつMAIKoアクティブ標的を開発した<sup>6)</sup>。MAIKoアクティブ標的は $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ガスを検出ガスとして用いる放射線検出器で、荷電粒子の飛跡を3次的に測定することができる。このMAIKoアクティブ標的へ中性子ビームを入射させると、検出ガスが標的ガスとしても働き、 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ガス中の $^{12}\text{C}$ と中性子が非弾性散乱してホイル状態が励起される。検出器内部で反応が起こるので、ホイル状態から放出される低エネルギー $\alpha$ 粒子であっても飛跡を測定し、時間反転反応の断面積を決定することが可能となる。すでに、筆者らは大阪大学の

強力 14 MeV 中性子工学実験装置から供給される中性子ビームを用いてテスト実験を行い、現在、そのデータ解析を進めているところである。テスト実験で得られた知見をもとに、将来的にはMAIKoアクティブ標的のアップグレードを行って有感領域を30 cm×30 cm×30 cmに拡大し、検出効率を十分に高めた上で反応断面積の測定を実施する計画である。

#### おわりに

本稿では宇宙における元素合成過程を明らかにする上で極めて重要なトリプル・アルファ反応について紹介した。筆者らは独自のアイデアと検出器を用いて高温・高密度という極端環境下におけるトリプル・アルファ反応率の測定に取り組んでいる。近い将来に新しい成果を公表できるよう全力を尽くしたい。

#### 参考文献

- 1) H. Fynbo *et al.*, *Nature* **433**, 136–139 (2005).
- 2) M. Itoh, T. Kawabata *et al.*, *Phys. Rev. C* **84**, 054308 (2011).
- 3) W. Zimmerman *et al.*, *Phys. Rev. C* **110**, 152502 (2013).
- 4) C. Angulo *et al.*, *Nucl. Phys. A* **656**, 3–183 (1999).
- 5) M. Beard *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 112701 (2017).
- 6) T. Furuno, T. Kawabata *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **908**, 215–224 (2018).

