

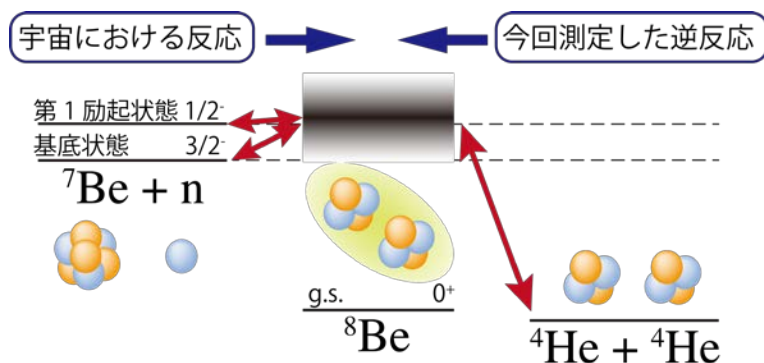
ビッグバン元素合成研究に残る最後の重要核反応確率を初測定

—ビッグバン元素合成の謎がさらに深まる—

概要

川畑 貴裕 京都大学大学院理学研究科准教授、久保野 茂 理化学研究所仁科加速器研究センター客員
主管研究員、岩佐 直仁 東北大学大学院理学研究科准教授らの研究チームは、大阪大学核物理研究セン
ターの施設を用いて、ビッグバンによる元素合成で起こる ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積¹を初めて測
定することに成功しました。ビッグバン元素合成で生成される元素のうち、 ${}^7\text{Li}$ は理論的に予測されてい
るよりも少ない量しか観測されていません。「宇宙リチウム問題」と呼ばれるこの問題を解く仮説の一つ
として、今回取り上げた反応が高い確率で起こっている可能性が指摘されていましたが、今回の測定結
果によりこの仮説では説明が難しいことが分かりました。ビッグバン元素合成の謎がさらに深まること
を示唆する結果です。本研究成果は平成 29 年 2 月 3 日、アメリカ物理学会発行の学術誌 *Physical Review
Letters* に掲載されました。

なお、本研究は、学生教育を兼ねつつ、京都大学理学部の卒業研究科目「物理科学課題研究 P4」に所
属する学部 4 年生の手によって実施されました。また、大阪大学核物理研究センターから、大学の枠を超
えた教育用ビームタイムの提供を受けました。



1. 背景

多くの物理学者は、今から約 140 億年前におこったとされる「ビッグバン」によって、我々の宇宙が誕生したと考えています。ビッグバン理論によると、宇宙開闢の約 10 秒後から 20 分後にかけて「ビッグバン元素合成」がおり、水素、ヘリウム、リチウムなどの軽い元素が生成されました。

宇宙初期における軽元素の生成量について、観測による推定値とビッグバン元素合成計算による予測値を比較することは、宇宙創生のシナリオを明らかにする上で極めて重要な知見をもたらします。

水素とヘリウムの同位体については、生成量の観測推定値と理論予測値が良く一致している一方で、 ${}^7\text{Li}$ については、生成量の観測推定値が理論予測値の約 1/3 でしかないという重大な不一致が知られています。この不一致は「宇宙リチウム問題」と呼ばれ、ビッグバン理論に残された深刻な問題として世界中の研究者の関心を集めています。

${}^7\text{Li}$ は ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ 反応によって生成された ${}^7\text{Be}$ が、ビッグバン元素合成終了後に、53.3 日

¹ 量子力学的な粒子が衝突し、散乱ないしは反応を起こす確率を表す量のこと。

の半減期で電子捕獲崩壊²することで生成されたと考えられています。しかし、 ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ 反応の断面積は、過去に十分な精度で測定がなされており、 ${}^7\text{Be}$ の生成確率を減少させることで宇宙リチウム問題を解決できる可能性は、すでに否定されています。

${}^7\text{Be}$ は電子捕獲崩壊して ${}^7\text{Li}$ に変化するほかに、原子核反応によって他の原子核に変化しています。 ${}^7\text{Be}$ に対して、最も高い確率で起こると考えられている反応は ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^7\text{Li} + p$ ですが、この反応の断面積も、過去に十分な精度で測定されており、この反応がビッグバン元素合成計算による予測値を大きく変更する可能性も、すでに否定されています。次いで高い確率で起こると考えられている反応が ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応です。しかし、ビッグバン元素合成に関係するエネルギー領域では実験条件が難しく、実際にこの反応の断面積が測定されたことはありませんでした。この反応の断面積によっては、大部分の ${}^7\text{Be}$ が電子捕獲崩壊する前に ${}^4\text{He}$ に変化してしまい、結果として ${}^7\text{Li}$ の最終的な生成量が減少することで、宇宙リチウム問題が説明できると期待されていました。

${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応では、鏡映反応³とよばれる陽子と中性子を入れ替えた反応、すなわち、 ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積はすでに知られており、鏡映反応の断面積から原子核の荷電対称性⁴を仮定して、間接的に ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積を推定しようという試みがなされていました。しかし、ビッグバン元素合成エネルギーのような低いエネルギー領域においてクーロン力の影響を正しく取り扱うことは簡単ではなく、推定結果の信頼性が低いため、直接に ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積を測定することが強く望まれていました。

2. 研究手法・成果

${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応は、 ${}^7\text{Be}$ と n (中性子) がともに短寿命の不安定核であるため、この反応を測定することは容易ではありません。そこで、本研究では、逆反応である ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + n$ 反応の断面積を測定する手法を着想し、実験を実施した結果から、詳細釣り合いの原理⁵を用いて ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積を決定することに成功しました。

測定は大阪大学核物理研究センターの中性子実験室において実施されました。同実験室は世界的に見ても優れた特徴を備えており、中性子の精密測定を行うことが可能です。加速した ${}^4\text{He}^{2+}$ ビームを He ガス標的に照射し、放出された中性子を測定することにより、 ${}^7\text{Be}$ の基底状態と第一励起状態が生成されたことを確認し、その生成断面積を決定しました。

本研究によって初めて測定された ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積は、これまでビッグバン元素合成の理論計算に広く用いられていた推定値より約 10 倍も小さい値であり、宇宙初期において中性子が ${}^7\text{Be}$ に衝突して 2 つの ${}^4\text{He}$ に分解する反応の寄与は非常に小さいことが明らかになりました。

² 原子核の放射性崩壊の一種で、陽子過剰な原子核が電子を吸収して原子核内の陽子を中性子に変換すると同時に電子ニュートリノを放出する現象。電子捕獲崩壊した原子核は、質量数が同じで原子番号が 1 だけ小さな原子核に変化する。

³ ある原子核反応において、反応に関与する原子核中の陽子と中性子をそっくり入れ替えた反応。例えば、本研究で注目した ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の鏡映反応は ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ となる。

⁴ 原子核中の陽子と中性子をそっくり入れ替えても、電荷以外の性質は変わらないという性質。原子核において近似的に成り立つ。この性質に基づくと、電荷の影響を除けば、鏡映反応の断面積は近似的に等しい。しかし、本研究のように、低エネルギーの反応では電荷によるクーロン力の影響を正しく取り扱うことが難しく、荷電対称性を仮定した断面積の推定は信頼性が低くなる。

⁵ 原子核反応の時間反転不変性から導かれる性質で、順方向の反応断面積と逆方向の反応断面積は、スピン多重度や状態密度などの運動学的条件を除けば厳密に等しいという性質。

3. 波及効果、今後の予定

${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積は、これまでの推定値よりも約 10 倍小さく、この反応によって宇宙初期に ${}^7\text{Be}$ が分解し、 ${}^7\text{Li}$ 生成量が減少していたことが宇宙リチウム問題の原因であったとする可能性は否定され、ビッグバン元素合成の謎はさらに深まることになりました。

宇宙リチウム問題の有力な解決策が否定されたことにより、原子核反応率の見直しや、標準ビッグバン模型を超える新しい物理の探索など、宇宙リチウム問題へのさらなる研究を動機づけることになると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

科学研究費補助金 (JP26287058、JP15H02091)

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(B) (代表: 久保野 茂, JP26287058) の研究課題として、学部学生教育を兼ねつつ、京都大学理学部の卒業研究科目「物理科学課題研究 P4」の研究テーマとして実施されました。実験提案書の執筆、中性子検出器と He ガス標的システムの開発およびテスト実験、測定、解析、成果報告にいたる一連の過程は、教員らによる指導のもと、2014 年度から 2016 年度にかけて課題研究 P4 に在籍した 3 学年合計 20 名の学部 4 年生らによって実施されました。また、 ${}^4\text{He}^{2+}$ ビームの利用にあたっては、共同利用・共同研究拠点である大阪大学核物理研究センターから、大学の枠を超えた教育用ビームタイムの提供を受けました。

<論文タイトルと著者>

タイトル : Time-reversal measurement of the p -wave cross sections of the ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ reaction for the cosmological Li problem

著者 : T. Kawabata, Y. Fujikawa, T. Furuno, T. Goto, T. Hashimoto, □M. Ichikawa, M. Itoh, N. Iwasa, Y. Kanada-En'yo, A. Koshikawa, S. Kubono, E. Miyawaki, M. Mizuno, K. Mizutani, T. Morimoto, □M. Murata, T. Nanamura, S. Nishimura, S. Okamoto, Y. Sakaguchi, □I. Sakata, A. Sakaue, R. Sawada, Y. Shikata, Y. Takahashi, D. Takechi, T. Takeda, C. Takimoto, M. Tsumura, K. Watanabe, and S. Yoshida

掲載誌 : *Physical Review Letters*