

平成30年6月18日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17631

研究課題名(和文)トロイの木馬法を用いた世界初のビッグバン元素合成反応の間接測定

研究課題名(英文)First-ever indirect measurement of the Big-bang nucleosynthesis reactions by the Trojan Horse method

研究代表者

早川 勢也 (Hayakawa, Seiya)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：00747743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の3年間の実施期間のうち、1年目はシミュレーションなどに基づく実験の設計と、その内容を反映させた実験プロポーザルの提出と審査の通過、2年目は検出器のテストや実験準備と、実際の重イオン加速器施設での実験の実行、3年目は実験で得られたデータの解析に主にあてられた。データ解析により、第一目標である反応断面積の励起関数はほぼ導出することができている。本研究の結論付けのための材料はほぼ出揃ってきており、近日中の論文投稿の目処が立ってきている。この研究成果として、現時点で国内の学会発表4件、国際会議での発表6件、会議のプロシーディング3本、修士論文1本の発表がなされている。

研究成果の概要(英文)：In the first year of the three-year implementation period of this study, we designed the experiment based on simulations, and submitted a proposal to the Program Advisory Committee to make it passed. In the second year, we tested the detectors and prepared the experiment, and finally carried out the actual experiment at the heavy ion accelerator facility. The third year was basically for the analysis of the data obtained by the experiment. By the data analysis, the energy dependence of the reaction cross sections, which is the first goal of this study, is going to be derived. Now we have most of the materials to conclude this study, and expect to submit a paper in the near future. As the achievements of this study, 4 presentations at domestic academic conferences, 6 presentations at international conferences, 3 proceedings of these conferences, and 1 master's thesis have been made at present.

研究分野：宇宙核物理学

キーワード：原子核物理学実験 宇宙核物理学 トロイの木馬法 不安定核ビーム ビッグバン元素合成

1. 研究開始当初の背景

本研究は、近年発展が目覚ましい不安定核ビームと、ユニークな間接的原子核反応測定法であるトロイの木馬法[1]を用いてビッグバン元素合成に関わる反応を測定したものである。

ビッグバン元素合成におけるリチウムの生成量は、観測量と推定量が一致せず、長年の謎であったが、ここ数年で関連する原子核実験が発表され、原子核反応率がどの程度影響するか明らかになりつつある。本研究は其中でももっとも核心に迫る反応の測定を行った。

本研究代表者は、大学院生時代に、東京大学原子核科学研究センター (Center for Nuclear Study: CNS) の低エネルギー不安定核ビーム分離器 CNS Radioactive Ion Beam separator (CRIB) [2]において多くの経験を積んだ後、イタリア・カタニアの Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Laboratori Nazionali del Sud (INFN-LNS)に博士研究員として在籍し、トロイの木馬法の技術を習得した。その後東大 CNS に再び博士研究員として戻ることになり、不安定核ビームとトロイの木馬法の経験を両方生かせる本研究テーマの着想に至った。

2. 研究の目的

ビッグバン理論は、強固な観測的事実に基づいた上で、宇宙論の基盤部分を非常に良く説明できるため、現代科学の成功の象徴ともいえる。初期宇宙における水素やヘリウムなどの存在比は、ビッグバンが存在した代表的な証拠の一つとされている。その一方で、リチウムの合成量の観測値が、推定量より 3-4 倍も小さいという問題が知られている。この「宇宙論におけるリチウム問題」[3]は宇宙核物理学の分野においても最重要課題の一つであるにも関わらず、依然決定的な原因は明らかになっていない。

本研究では、ビッグバン元素合成におけるリチウムの合成量を減らす働きのある、もっとも重要な ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ と ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 反応断面積の両方をトロイの木馬法で測定し、ビッグバン元素合成モデルにおける不定性を原子核物理学の観点から低減し、原因の所在をより明確にし、リチウム問題の解決に繋げるのが目的である。

3. 研究の方法

前述の原子核反応は、 ${}^7\text{Be}$ と中性子 n が両方とも不安定で崩壊性であるため、直接的な測定が難しく、それが現在に至っても実験的なデータが充実していなかった理由でもある。

この技術的困難を回避するために、原子核反応の三体崩壊チャンネルから二体反応の断面積を間接的に求めるトロイの木馬法を、不安定核と中性子との反応へ初めて応用した測定法を開発した。トロイの木馬法では、 ${}^7\text{Be}$ ビームを中性子の代わりに重陽子標的に入射し、

三体崩壊チャンネルを測定する。重陽子核中の陽子が反応に参加しない準自由反応とみなせる運動学条件を選択することによって、目的とする二体反応の断面積を導き出す。トロイの木馬法はその特性から、これまで主に陽子誘起反応の天体物理学的な低エネルギー領域での測定に用いられてきた。中性子誘起反応にも原理的には同様に応用できることは知られていたが、実際に実験が行われた例は少なく、特に不安定核と中性子との反応に応用されたのは初めての試みである。

${}^7\text{Be}$ 不安定核ビームの生成は前述の CRIB にて行った。理化学研究所(理研)の AVF サイクロトロンから供給される ${}^7\text{Li}$ ビームを液体窒素冷却水素気体標的へ入射し、生成された二次イオンを双極電磁石と速度分離器によって純化し ${}^7\text{Be}$ ビームを得た。

4. 研究成果

(1) 検出器テスト

本実験の前に、反跳粒子のエネルギー・位置を測定するためのシリコン検出器の動作テストと最適化を行った。使用したシリコン検出器は電荷分割型の位置感応型 (PSD) フォトダイオードで、今まで重イオン検出で十分な性能を発揮していなかったが、このテストによってシェイピングアンプの時定数を長く取るなど対応によって目標とするエネルギー・位置分解能で動作させることができた。また、ソフトウェアにより位置の非線形性とエネルギー依存性の補正の手法を開発した。

(2) ビームタイム(本測定)

理研の加速器施設使用したビームタイムは、Program Advisory Committee for Nuclear Physics (NP-PAC) に申請し、審査を通して平成 28 年 11 月に 14 日間獲得した。CRIB で生成された ${}^7\text{Be}$ ビームの標的直前のエネルギーは 22.1 ± 0.14 MeV、強度は 1×10^6 pps となるよう調整した。反応測定のセットアップは、上流から、ビームの飛程測定と粒子識別を担う 2 台の Parallel-Plate Avalanche Counter (PPAC)、ポリエチレン CD_2 重陽子標的、そして 6 組の ΔE -E 構成の PSD テレスコープからなる。PSD テレスコープはビーム軸に対して $\pm 12^\circ$ 、 $\pm 34^\circ$ そして $\pm 56^\circ$ に置かれた。 CD_2 標的の厚みは $64 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ で、この薄さが標的中のビームのエネルギーの広がりを 120 keV 程度に抑え、 ${}^7\text{Li}$ の基底状態と 478 keV の第一励起状態を Q 値スペクトル上で分離する狙いである。

(3) 実験結果

ΔE -E 粒子識別により、陽子と重陽子と α 粒子、及び ${}^7\text{Li}$ と ${}^7\text{Be}$ が明確に分離できた。その粒子識別を適用し、2 粒子コインシデンスとなるイベントを選択し、陽子- ${}^7\text{Li}$ および α - α ペアが観測された。それらの粒子のペアのエネルギーや散乱角度などの運動学的な関係性は予想していた 3 体放出チャンネルのそれらと一致していることを確認した。さらに、

三体反応の Q 値を観測されたエネルギーから計算すると、既知の Q 値 -0.580 MeV (${}^7\text{Be}(d, {}^7\text{Li})\text{H}$ 反応) と 16.766 MeV (${}^7\text{Be}(d, \alpha\alpha)\text{H}$ 反応) に分解能 200 keV, 300 keV の範囲内でそれぞれ一致していることがわかった(図 1)。

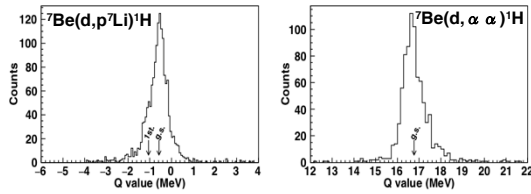


図 1 ${}^7\text{Be}(d, {}^7\text{Li})\text{H}$ 反応(左)と ${}^7\text{Be}(d, \alpha\alpha)\text{H}$ 反応(右)の Q 値スペクトル。矢印はそれぞれ既知の値を示す。

観測した三体反応において、準自由過程が支配的かどうかは、spectator にあたる陽子の運動量分布が、既知である標的の重陽子中の陽子のそれとどれほど一致しているかで判断できる。本実験で得られたデータからは、それが 75 MeV/c 程度まで、エラーの範囲内で一致していることがわかった。これは分布の 2σ 程度にあたる。

この範囲内でのデータを選択し、各重心系エネルギーでの断面積を表すと図 2 (${}^7\text{Be}(n, p_0){}^7\text{Li}$ 反応)および図 3 (${}^7\text{Be}(n, \alpha)$ 反応)のようになる。図 2 の p_0 (基底状態)と p_1 (第一励起状態)の収量比は、それぞれのエネルギーにおいて Q 値をガウス関数でフィットして得られたものである。なお、トロイの木馬法においては入射チャンネル中の中性子は実粒子ではないため、軌道角運動量(と荷電粒子の場合はクーロン力)に由来する透過係数の影響は受けておらず、また、規格化もなされていない(Half-Off Energy-Shell, HOES 断面積)。

${}^7\text{Be}(n, p_0){}^7\text{Li}$ および ${}^7\text{Be}(n, \alpha){}^4\text{He}$ チャンネルは、中性子反応断面積における速度の逆比例則で補正をすると、概ね励起関数の傾向が正しいことが確認できた。より詳細な補正は、R 行列解析をこれらの 3 つのチャンネルに同時に適用して共鳴構造を解明することで可能になる。

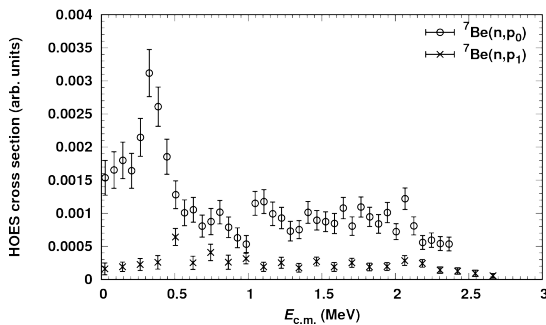


図 2 ${}^7\text{Be}(n, p_0){}^7\text{Li}$ および ${}^7\text{Be}(n, p_1){}^7\text{Li}$ チャンネルの HOES 断面積の励起関数。

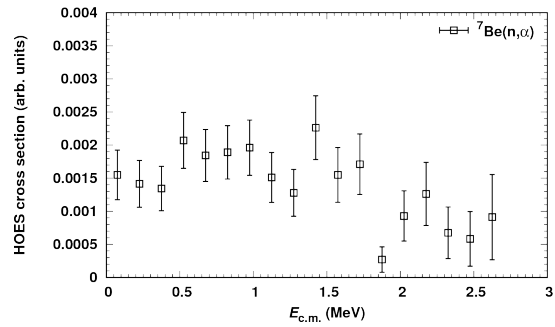


図 3 ${}^7\text{Be}(n, \alpha){}^4\text{He}$ チャンネルの HOES 断面積の励起関数。

(4) R 行列解析

図 4 は ${}^7\text{Be}(n, p_0)$, ${}^7\text{Be}(n, p_1)$, そして ${}^7\text{Be}(n, \alpha)$ チャンネルをすべて含めた R 行列計算と実験データとの比較である。

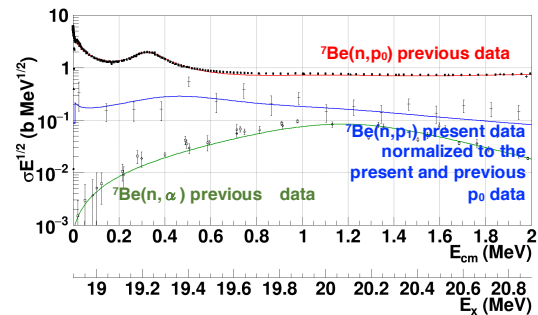


図 4 ${}^7\text{Be}(n, p_0)$ と ${}^7\text{Be}(n, \alpha)$ の過去の実験データ、 ${}^7\text{Be}(n, p_1)$ の本測定データと R 行列計算との比較。

${}^7\text{Be}(n, p_0)$ と ${}^7\text{Be}(n, \alpha)$ チャンネルに関しては過去の実験データ [4, 5], ${}^7\text{Be}(n, p_1)$ に関しては過去データと本測定データの ${}^7\text{Be}(n, p_0)$ から規格化した本測定データを表示している。ただし、この ${}^7\text{Be}(n, p_1)$ の規格化は暫定的なものであり、解析の狙いとしては、複数チャンネル R 行列計算で網羅的に共鳴パラメータを把握することで図 2、図 3 に示す生の実験データを規格化することである。

解析にはこの領域の既知の中性子放出チャンネルを含む共鳴準位とそのパラメータを採用し、それが図 4 に示すように概ねそれぞれの励起関数を再現することがわかった。過去には ${}^7\text{Be}(n, p_0)$ チャンネルのみを扱った R 行列解析の研究があるが、共鳴準位に不自然な点があった。本研究ではより妥当と考えられる共鳴準位の採用と複数チャンネルの取り扱いによって、共鳴構造からの裏付けでもって、より不定性の小さく説得力のある断面積の導出を目指している。

(5) 結論

ビッグバン元素合成において ${}^7\text{Li}$ の生成量に関わる重要な反応、 ${}^7\text{Be}(n, p){}^7\text{Li}$ と ${}^7\text{Be}(n,$

α)⁴He は、両方共近年実験的研究が進みつつある中で、我々は他研究のなし得なかった、最も重要なエネルギー領域での測定で ⁷Li の第一励起状態への寄与も含めた網羅的な測定を行った。

⁷Be(n, p)⁷Li 反応に関しては、低エネルギー部での直接測定のデータが報告されたが、我々はこれまで議論されてこなかった第一励起状態の寄与 p_1 を初めて測定した。図 2 に示す p_0 に対する p_1 の寄与は最大でも 10 から数十%程度とみられるが、その影響が、ビッグバン元素合成において重要な数十 keV から 100 keV 程度のエネルギー領域において正確にどの程度になるかは、R 行列解析の結果によるため、これは今後の解析の課題である。仮に、 p_1 の寄与によって 25%反応率が上がるとしたら、⁷Li の生成量は 15%程度減ることになる。

⁷Be(n, α)反応のほうは、低エネルギー部での直接測定、高エネルギー部での時間反転反応測定等が近年報告されているが、100 keV 前後の最も重要なエネルギーでの断面積データが欠落していた。我々の測定では、高エネルギー部で過去のデータとの整合性を確認しつつ、100 keV 前後の新たなデータを提供できる。

現時点ではデータ解析の途中ではあるが、最終的な結果までは遠くない段階まで来ており、宇宙論におけるリチウム問題の解決に向けて一歩前進するための判断材料を提供しうる、意義のある研究ができたと考えている。

<引用文献>

- ① C. Spitaleri et al., *Physics of Atomic Nuclei* **74**, 1725 (2011).
- ② Y. Yanagisawa et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **539**, 74 (2005).
- ③ A. Coc et al., *J. Cosm. and Astropart. Phys.* **40**, 050 (2014).
- ④ A. Adahchour and P. Descouvemont, *J. Phys. G* **29**, 395 (2003).
- ⑤ L. Lamia et al., *Astrophys. J.* **850**, 175 (2017)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① S. Hayakawa et al., “Measurements of the neutron-induced reactions on ⁷Be with CRIB by the Trojan Horse method”, *AIP Conference Proceedings* 1947 (2018) 020011, DOI: 10.1063/1.5030815 (査読有)
- ② S. Hayakawa et al., “Measurements of the ⁷Be+n Big-Bang Nucleosynthesis reactions at CRIB by the Trojan Horse method”, *CNS Annual Report 2016*, CNS-REP-96 (2018) 11-12, <http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/index.php?AnnualReports> (査読有)

- ③ K. Abe, S. Hayakawa, H. Yamaguchi, and L. Lamia, “Feasibility Study for the ⁷Be+n Reaction Measurements by Trojan Horse Method at CRIB”, *JPS Conf. Proc.* 14 (2017) 020507, DOI: 10.7566/JSPC.14.020507 (査読有)
- ④ K. Abe, S. Hayakawa, H. Yamaguchi, and L. Lamia, “Feasibility Study for the ⁷Be+n Reaction Measurements by Trojan Horse Method at CRIB”, *CNS Annual Report 2015*, CNS-REP-95 (2017) 5-6, <http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/index.php?AnnualReports> (査読有)
- ⑤ S. Hayakawa, “Trials for the cosmological ⁷Li problem with ⁷Be beams at CRIB and collaborating studies”, *IL NUOVO CIMENTO C*, 39 (2017) 370, 1-4, DOI: 10.1393/ncc/i2016-16370-2 (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- ① 早川勢也 et al., 「トロイの木馬法による ⁷Be+n ビッグバン元素合成反応の測定 II」、日本物理学会 秋季大会、2017 年 9 月 12-15 日、宇都宮大学 (栃木県宇都宮市)
- ② 早川勢也, 「CRIB での ⁷Be ビームを用いたビッグバン元素合成反応の測定」、宇核連研究会「X 線天体と元素合成」、2017 年 7 月 20-21 日、理化学研究所 (埼玉県和光市)
- ③ S. Hayakawa et al., “Measurements of the neutron-induced reactions on ⁷Be with CRIB by the Trojan Horse method”, *The 14th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG2017)* (口頭、国際学会)、2017 年 6 月 27-30 日、大田 (韓国)
- ④ S. Hayakawa et al., “Measurements of the neutron-induced reactions on ⁷Be with CRIB by the Trojan Horse method”, *The 8th Nuclear Physics in Astrophysics International Conference (NPA8)* (口頭、国際学会)、2017 年 6 月 18-23 日
- ⑤ 早川勢也 et al., 「トロイの木馬法による ⁷Be+n ビッグバン元素合成反応の測定」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17-20 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)
- ⑥ S. Hayakawa, “Upcoming CRIB experiment: ⁷Be+n reaction measurements by the Trojan horse method”, *SKKU workshop* (口頭、国際学会)、2016 年 10 月 11 日、水原 (韓国)
- ⑦ S. Hayakawa, “Trials for the cosmological ⁷Li problem with ⁷Be beams at CRIB and collaborating studies”, *The 2nd Sicily-East Asia*

- Workshop on Low-energy Nuclear Physics (口頭、国際学会)、2016年6月26-28日、理化学研究所(埼玉県和光市)
- ⑧ K. Abe, S. Hayakawa, H. Yamaguchi, and L. Lamia, “Feasibility Study for the ${}^7\text{Be}+n$ Reaction Measurements by Trojan Horse Method at CRIB”, 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV (ポスター、国際学会)、2016年6月19-24日、朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
- ⑨ S. Hayakawa, ”Trojan horse method at CRIB for $R1+n$ reactions”, 8th Japan-Italy Symposium (招待講演、国際学会)、2016年3月7-10日、理化学研究所仁科センター(埼玉県和光市)
- ⑩ 早川勢也、「Big-Bang+(CRIB, THM)」宇宙核物理連絡協議会研究会(招待講演)、2016年2月22-24日、国立天文台三鷹キャンパス(東京都三鷹市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 勢也 (HAYAKAWA, Seiya)
東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員
研究者番号：00747743