

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287058

研究課題名(和文) ビッグバン元素合成の鍵  $7\text{Li}$  問題の実験的検討

研究課題名(英文) Experimental Approach to the Key, Li Problem in the Big Bang Nucleosynthesis

研究代表者

久保野 茂 (Kubono, Shigeru)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員主管研究員

研究者番号：20126048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,800,000円

研究成果の概要(和文)：始原的元素合成(BBN)はビッグバン模型の重要な支柱であるが、 $7\text{Li}$ は観測とBBN予測に約3倍の差があり、宇宙のLi問題として重要課題である。本研究では、原子核物理の側面を検討した。当問題に関わる未知の最重要核反応である $7\text{Be}+n$ チャンネルの寄与を実験的に調べた。(1) $7\text{Be}(n,a)4\text{He}$ 反応と(2) $7\text{Be}(n,p)7\text{Li}^*(1/2)$ 反応の断面積の測定に初めて成功した。(1)ではこれまで使われてきた仮の反応率の約 $1/10$ で、Li問題の解決にはならないことが判明した。(2)の反応はこれまで無視されてきたが、主要既知反応 $7\text{Be}(n,p)7\text{Li}$ と比べて有意であり、Li問題の一部を説明することが分かった。

研究成果の概要(英文)：The primordial nucleosynthesis (BBN) is one of the key evidences that support the big bang model. However, the  $7\text{Li}$  abundance has been over predicted by BBN simulation roughly by a factor of three, which is called the cosmological Li problem. We have studied the nuclear physics side for this problem by experiments. Namely, we have experimentally studied for the first time the cross sections of (1) the  $7\text{Be}(n,a)4\text{He}$  and (2) the  $7\text{Be}(n,p)7\text{Li}^*(1/2)$  reaction at the BBN temperature region, and succeeded deriving them.

The reaction rate of (1) was found to be smaller by a factor of ten than the postulated value currently adopted, and thus we have identified that the reaction of (1) has a negligible influence to the Li problem.

The cross section of (2) has been neglected up to now, but our experimental result indicates that this channel contributes significantly to the destruction of  $7\text{Be}$ . Thus, the reaction of (2) has been concluded to be included in the BBN simulation.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：始原的  $7\text{Li}$  問題 ビッグバン元素合成 不安定核の核反応 ビッグバン模型 宇宙核物理実験

### 1. 研究開始当初の背景

ビッグバン元素合成 (BBN) は、ビッグバン模型を支える重要な要素の一つであり、水素、ヘリウムなどの軽元素の存在をよく説明する。しかし、BBNで主に作られたと考えられる ${}^7\text{Li}$ の存在量は、観測と理論の間に大きな矛盾があり、宇宙初期研究の最重要課題の一つと考えられている。一つの可能性は、BBN計算の ${}^7\text{Li}$ 生成に関わる原子核データの主要な核過程が実験的に明らかにされていないことにあると考えられる。この重要未知過程が $n + {}^7\text{Be}$ チャンネルであり、不安定核ビームを用いても研究が困難な核反応であり、本格的研究がなされてこなかった。本研究では、これらの核反応過程をユニークな実験法を導入することで最初の意味のある結果を導出し、BBNの問題を追及する計画に至った。

### 2. 研究の目的

BBNのLi問題は、観測、ビッグバン理論、原子核物理などの各側面からの研究が必要である。当研究では、特にBBNに含まれる核反応で、Li生成に直接かかわる部分に未研究の核反応過程が含まれているので、これらの過程を実験的に明らかにすることにより、Li問題の解明を目的とした。具体的課題として、Li生成に直接かかわる ${}^7\text{Be}$ 核の2つの消滅反応 (1)  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 、(2)  ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ の断面積をBBN温度領域で実験的に測定し、より確かなBBNシミュレーションを行い、Li問題の核物理的側面からの検討を行うことを目的とした。また、実験に先立って、課題反応(1)について、既存の可能なデータからより現実的予測を理論的に行うこととした。

### 3. 研究の方法

Li問題を左右する主要な原子核反応は、 $n + {}^7\text{Be}$ チャンネルであり、共に不安定な粒子であるので、実験的に正反応で研究することは容易ではない。課題(1)の研究では、時間反転反応 ${}^4\text{He}(\alpha,n){}^7\text{Be}$ を用いることで、実験の困難性を回避し、高分解能の測定を可能とした。特に、高分解能の中性子測定には、大阪大学核物理研究センターの中性子測定装置を用いることで可能とした。

課題(2)の反応研究は、 ${}^7\text{Be}+n$ のBBN温度領域の共鳴準位の陽子崩壊の分岐比 $p_1/p_0$ を実験的に求め、良く知られた ${}^7\text{Be}(n,p_0){}^7\text{Li}$ 反応断面積から、所定の ${}^7\text{Be}(n,p_1){}^7\text{Li}$ の断面積を導出する。実験は、核子移行反応の放出粒子を日本原子力エネルギー機構の高分解能スペクトログラフENMAを用いて測定し、重要共鳴状態からの崩壊陽子をSi検出器アレイで同時測定し、共鳴の陽子崩壊分岐比 $p_1/p_0$ を求めた。

### 4. 研究成果

課題(1-1)： 課題(1)反応の理論的予測を行った。課題反応のミラー核反応、 ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ は、BBNエネルギー領域でもよく調べられているので、それらのデータを集計し、荷電対称性を仮定し、クーロン透過率、遠心力バリア透過率の補正を行い、 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 反応の予想される断面積を導出し、Phys. Rev. C (論文(1)) にまとめた。この結果は、実験に先立ち得られ、実験の指針となった。その結果は、今回の実験結果とよく一致することが分かった。図1の が得られた予想値である。

課題(1-2)：

上記中性子測定装置(TOF)の特徴を生かすことで、非常にバックグラウンドの少ない時間反転反応の測定に成功した。これから、当初目的のBBN温度領域での ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$ 反応の導出に世界で最初に成功した。図1の黒丸が得られたデータである。

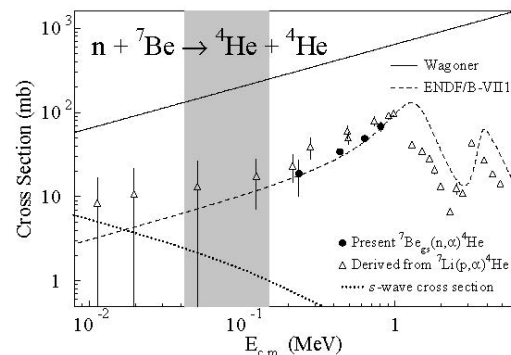


図1  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応の断面積。  
三角印が課題(1-1)で、黒丸が課題(1-2)で今回得られたデータである。実線は、現在広くBBN計算に使われている仮定された断面積。

結果は、これまで仮定されていた同反応の反応率の約 $1/10$ であることが分かり、Li問題の解決にはならないことが判明した。この結果をPhys. Rev. Lett.誌(論文(2))に発表すると同時に、報道関係にも公表した。

課題(2)： 所定の核子移行反応の高分解能測定は、標的を適切に選択することで、バックグラウンドの非常に少ない測定を実現した。崩壊陽子の測定は、Si検出器アレイで行い、基底状態への遷移( $p_0$ )のみならず、第一励起状態への遷移( $p_1$ )のきれいなローカスも明確に測定できた。Li問題にかかわる最も主要な反応過程でありながら、これまで無視されてきた分岐過程であり、初めての重要なデータとなる。結果として、この分岐の分だけLi問題が軽減されることになる。なお、使用した加速器の都合で実験が当研究期間終了間際に行われたので、最終解析結果には未だ至っていないが、1年以内には、国際紙に公表する予定である。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

(1) 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 :

Phys. Rev. Lett. **118** (2017) 052701-5,

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

(2) Revised thermonuclear rate of  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  relevant to Big-Bang nucleosynthesis :

Phys. Rev. C **91** (2015) 055802

S. Q. Hou, J. J. He, S. Kubono, and Y. S. Chen

[学会発表](国際会議 9件、物理学会等 5件、合計 14件)

1. Experimental Challenge to the Cosmological Li Problem in the Big-Bang Model :

S. Kubono,

15th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XV (NIC-XV), 24-29 June, 2018, Assergi, L'Aquila, Italy. (invited)

2. Experimental challenge to the big-bang nucleosynthesis - Cosmological  ${}^7\text{Li}$  problem in BBN : S. Kubono, T. Kawabata, S. Q. Hou, and J. J. He, Proc. of the 14th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies AIP Conf. Proc. 1947 (2018) 020010 (invited)

3. Direct measurement of the  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  reaction cross sections for the cosmological lithium problem : T. Kawabata, Korean Physics Society Fall Meeting, Oct. 25-27, 2017, Hwabaek International Convention Center, Gyeongju, Gyeongsangbuk, Korea. (invited)

4. Direct measurement of the  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  reaction cross sections for the cosmological Li problem : Takahiro Kawabata, Yuki Fujikawa, Tatsuya Furuno, Tatsuya Goto, Toshikazu Hashimoto, Masaya Ichikawa, Makoto Itoh, Naohito Iwasa, Yoshiko Kanada-En'yo, Ami Koshikawa, Shigeru Kubono, Eisuke Miyawaki, Masatoshi Mizuno, Keigo Mizutani, Takahiro Morimoto, Motoki Murata, Takuya Nanamura, Shunji Nishimura, Takuya Nanamura, Shintaro Okamoto, Yuichi Sakaguchi, Itsushi Sakata,

Akane Sakaue, Ryo Sawada, Yuki Shikata, Yu Takahashi, Daiki Takechi, Tomoya Takeda, Chisato Takimoto, Miho Tsumura, Ken Watanabe, and Sota Yoshida, Proceedings of the 7th International Conference on Heavy-Ion Collisions at Near-Barrier Energies (FUSION17), 20-24 Feb, 2017, Hobart, Tasmania, Australia, E3S Web of Conferences 163, 00028 (2017).

5. The First Measurement of Cross Section for the  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  Reaction at the Cosmological Energy : Tomoya Takeda, Takahiro Kawabata, Tatsuya Furuno, Masaya Ichikawa, Naohito Iwasa, Yoshiko Kanada-En'yo, Ami Koshikawa, Shigeru Kubono, Eisuke Miyawaki, Takahiro Morimoto, Motoki Murata, Takuya Nanamura, Shunji Nishimura, Yuki Shikata, Yu Takahashi, Miho Tsumura, and Ken Watanabe, Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV (NIC-XIV), 19-24 June, 2016, Toki Messe, Niigata, Japan, JPS Conf. Proc., 010103 (2017).

6. Measurement of the cross section for the  ${}^4\text{He}(\alpha,n){}^7\text{Be}$  reaction as a possible solution to the cosmological lithium problem : T. Kawabata, T. Furuno, M. Ichikawa, N. Iwasa, Y. Kanada-En'yo, A. Koshikawa, S. Kubono, E. Miyawaki, T. Morimoto, M. Murata, T. Nanamura, S. Nishimura, Y. Shikata, Y. Takahashi, T. Takeda, M. Tsumura, and K. Watanabe, Proceedings of the 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (CLUSTER16), 23-27 May, 2016, Complesso Universitario dei SS. Marcellino e Festo, Napoli, Italy. J. Phys.: Conf. Ser. 863, 012073 (2017).

7. Problems in Big Bang nucleosynthesis; Heavy element synthesis and Li problem:

S. Kubono, The 40th ASRC International Workshop on Experimental and Theoretical Advances in Fission and Heavy Nuclei, JAEA, Tokai, 12 – 13th December, 2016 (invited)

8. Challenge to Explore the Mechanism of Evolution of the Universe and the Origin of Elements : S. Kubono, The 20th International Conference on Accelerators and Beam Utilizations, Nov. 2 - 4, 2016, Gyeongju, Korea, Nov, 2016 (invited)

9. The first measurement of cross section for the  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  reaction near the threshold energy : T. Kawabata, T. Furuno, M. Ichikawa, N. Iwasa, Y. Kanada-En'yo, A. Koshikawa, S. Kubono, E. Miyawaki, T. Morimoto, M. Murata, T. Nanamura, S. Nishimura, Y. Shikata, Y. Takahashi, T. Takeda, M. Tsumura, and K. Watanabe, International Nuclear Physics

Conference (INPC2016), 11--16 Sep, 2016, Adelaide Convention Centre, Adelaide, Australia.

10. 宇宙リチウム問題の現状 : 川畑貴裕, シンポジウム講演, 日本物理学会 2018 年年次大会, 2018 年 3 月 22 日-25 日, 東京理科大学

11. 閾値近傍における  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  反応の断面積測定 1 : 高橋祐羽, 市川真也, 延與佳子, 川畑貴裕, 越川亜美, 澤田涼, 四方悠貴, 武田朋也, 津村美保, 七村拓野, 古野達也, 宮脇瑛介, 村田求基, 森本貴博, 渡邊憲, 吉田聡太 A, 久保野茂, 西村俊二, 岩佐直仁, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21-24 日, 宮崎大学

12. 閾値近傍における  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  反応の断面積測定 2 : 越川亜美, 市川真也, 延與佳子, 川畑貴裕, 澤田涼, 四方悠貴, 高橋祐羽, 武田朋也, 津村美保, 七村拓野, 古野達也, 宮脇瑛介, 村田求基, 森本貴博, 渡邊憲, 吉田聡太 A, 久保野茂, 西村俊二, 岩佐直仁, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21-24 日, 宮崎大学

13.  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  反応測定のための液体シンチレータによる中性子検出効率の評価 : 武田朋也, 延與佳子, 川畑貴裕, 津村美保, 古野達也, 村田求基, 七村拓野, 森本貴博, 市川真也, 越川亜美, 四方悠貴, 高橋祐羽, 宮脇瑛介, 渡邊憲, 岡本慎太郎, 後藤達也, 坂口雄一, 坂田逸志, 瀧本千里, 藤川祐輝, 久保野茂, 西村俊二, 岩佐直仁, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21-24 日, 宮崎大学

14. 反応閾値近傍における  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  の反応断面積の測定 : 渡邊憲, 市川真也, 岩佐直仁, 延與佳子, 川畑貴裕, 久保野茂, 越川亜美, 四方悠貴, 高橋祐羽, 武田朋也, 津村美保, 七村拓野, 西村俊二, 古野達也, 宮脇瑛介, 村田求基, 森本貴博, 日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19 日-22 日, 東北学院大学

〔報道発表、受賞など〕(計 7 件)

1. Still No Solution To The Mystery Of The Missing Lithium, 2017 年 3 月 28 日, Asian Scientist Magazine  
<https://www.asianscientist.com/2017/03/in-the-lab/big-bang-theory-hypothesis-is-cosmology/>

2. 京都大学総長賞 表彰式  
2017 年 3 月 21 日 KBS 京都ニュース

3. 京大生、宇宙の謎に一石  
2017 年 2 月 14 日, 朝日新聞 31 面.

4. 京大生が「宇宙誕生『ビッグバン』理論」の有力仮説を覆す : 2017 年 2 月 14 日 ホウドウキョク, フジテレビジョン.

5. 日本の大学、卒業クラスの学生、ビッグバンの有力仮説を覆す : 2017 年 2 月 14 日 韓国聯合ニュース  
<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2017/02/14/0200000000AKR20170214130400009.HTML>

6. 平成 29 年度原子核談話会特別賞

7. 平成 28 年度京都大学総長賞 物理科学課題研究 P4

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
久保野 茂 (KUBONO, Shigeru)  
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員主管研究員  
研究者番号 : 20126048

(3) 研究分担者  
川畑 貴裕 (KAWABATA, Takahiro)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 80359645

岩佐 直仁 (IWASA, Naohito)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 50322996

西村 俊二 (NISHIMURA, Shunji)  
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加  
速器研究センター・前任研究員  
研究者番号： 90272137