

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05472

研究課題名（和文）天体核反応 $8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ の反応断面積データの検証研究課題名（英文）A new measurement of $8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ -reaction cross section

研究代表者

溝井 浩 (MIZOI, YUTAKA)

大阪電気通信大学・共通教育機構・教授

研究者番号：30388392

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：ビッグバン直後や超新星爆発に伴って起こる元素合成のメカニズムについて、安定元素を使った原子核反応の実験的研究は古くからおこなわれてきた。さらに、近年の加速器技術の発展に伴い不安定同位体が関与する原子核反応の研究が現在、盛んにおこなわれている。特に、 8Li が関与する $8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ 反応は、重たい元素を合成するためのカギとなるプロセスと考えられている。この反応の断面積については、世界中の実験グループが研究成果を発表しているが、いまだ確定的な結果は得られていなかった。本研究は、これまでに発表された研究成果を検証するためのデータを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の世界を成す元素の起源を明らかにすることは、宇宙開闢から現在に至る宇宙の進化の謎を解き明かすことにつながる。元素は、宇宙の進化の過程で基本的な粒子から合成されてきたと考えられており、元素合成に関わる原子核反応についての研究が盛んにおこなわれている。特に 8Li という放射性同位元素の関わる原子核反応の重要性が指摘され、我々も含め世界中の研究者がその原子核反応の高精度の測定を試みてきた。それらの測定結果には、実験方法に起因すると考えられる不一致が見られ、その不一致が元素合成の理論の精度に影響を与えている。本研究はその不一致の原因を解明するための新たな実験を行い、解明のヒントを得ることができた。

研究成果の概要（英文）：Nucleosynthesis processes taking place after a big bang and a supernova explosion are studied for many decades. Recently, studies of nuclear reactions concerning to cosmological nucleosynthesis using unstable-nuclei beams are intensively performed with development of accelerators and RI-beam techniques, in addition to studies using stable-nuclei beams. Especially, it is considered that 8Li might be a key element and the $8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ should be a key reaction to produce heavier elements more than mass number of 12. Many research groups were published its reaction cross-section data, but we have not yet had any reliable result. We have controversial differences in these published cross-section data. The reason of their differences are not resolved. By the present work, we shows the clue to resolve the controversial difference and determine the reliabilities of their cross section data.

研究分野：原子核物理学

キーワード：ビッグバン元素合成 超新星爆発 rプロセス 不安定核反応

1. 研究開始当初の背景

不安定同位元素 ^8Li が関与する原子核反応 $^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ は、ビッグバン元素合成や超新星爆発に伴う元素合成においてカギとなる過程であることが、理論的な研究から指摘されてきた。この原子核反応について、我々も含めて国内外のグループが測定実験を行い、その反応断面積のデータを論文上で発表している。これまで発表されたデータを比較すると、我々の発表した反応断面積が、海外の研究グループが発表したものよりも数倍小さい。この違いは、元素合成過程の理論計算を行う上で、結果に大きな差異を生むため、これまでに発表された反応断面積のデータに数倍の差が生じた理由の解明、あるいは、いずれの実験データがより信頼を置けるか、それらの確認が必要とされていた。

我々がこれまでに公表した実験データ [1-3] は、我々が開発したアクティブ標的型検出器を使った測定方法 [4] により得られたものである。我々の測定方法では、 $^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ 反応で発生した中性子 n と ^{11}B の両方のエネルギーと運動量を同時に計測することで目的の原子核反応を排他的に識別し、低バックグラウンドの結果を得ることができる。一方で、海外の実験グループが行った実験 [5-8] は包括的測定であり、発生する中性子 n が ^{11}B のいずれかのみを検出して、原子核反応を識別している。これまでに報告されている測定結果を図 1 にまとめた。重心系のエネルギーが 1 MeV 付近で 5~6 倍の差異があり、大きな問題となっている。

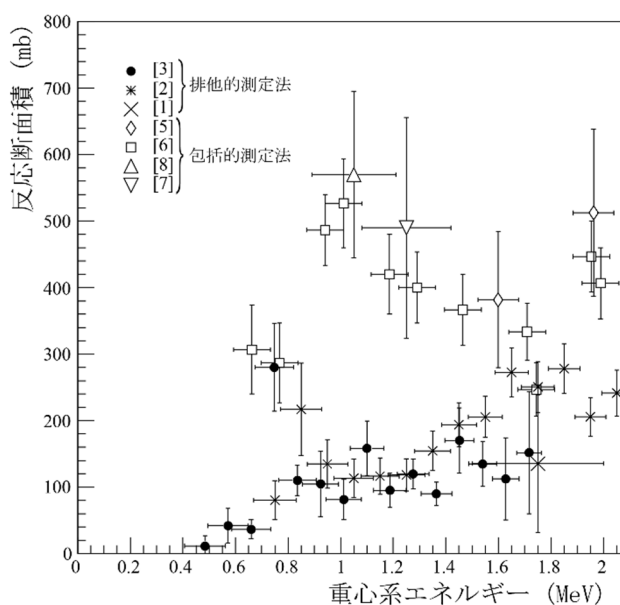


図 1 反応断面積の測定結果

イタリアの研究グループより、排他的測定と包括的測定の方法の差異が、測定結果に影響を与えているという指摘 [9] がなされているが、その実験的な根拠は示されていない。

2. 研究の目的

イタリアの研究グループは、我々の実験で中性子の検出に用いているプラスチックシンチレータは、中性子検出のエネルギー閾値が高いため、 $^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ 反応によって放出される中性子のエネルギー分布が低エネルギー側に偏っているとすると、我々の実験装置では中性子を数え落としている可能性があるという指摘 [9] がある。他の実験では、中性子を検出せずに ^{11}B のみ測定する [5,6]、あるいは、中性子検出のエネルギー閾値が非常に低い検出器を用いて中性子のみ検出する [7,8] といった実験を行っているため、低エネルギーの中性子を数え落とすことがない。そのため、我々の発表した反応断面積の値が、彼らのものに比べて小さくなっているのであるという主張を行っている。

放出される中性子のエネルギー分布が低エネルギー側に偏ることを示した実験事実はないが、我々の実験結果が中性子を数え落としている可能性を完全に排除できるデータもない。そこで

今回、低エネルギー中性子が、 ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応の反応断面積にどの程度寄与しているのかが明らかにすることを目的とした研究を行った。

3. 研究の方法

${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応によってエネルギーの低い中性子が放出されるためには、エネルギー保存則と運動量保存則の要請から、高い励起状態にある ${}^{11}\text{B}$ が同時に放出される必要がある。従って、反応によって放出される中性子の測定だけでなく ${}^{11}\text{B}$ の高励起状態の観測も併せて行うことで、測定される中性子が ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応に由来するものか、バックグラウンドに由来するものか、精度よく判別することができる。

今回の実験のために、我々は、低エネルギーの中性子を効率よく検出することのできる ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを用いた中性子検出器を製作した。合わせて、高励起状態の ${}^{11}\text{B}$ が放出する高エネルギー線を検出するために既存の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器[10]も併用することとした。

東京大学原子核科学研究センター（CNS）に図2のような実験セットアップを構築し実験を行った。CNS に設置された低エネルギー RI ビーム生成装置（CRIB）を用いて ${}^8\text{Li}$ ビームを生成し、それを重心系エネルギーが 1 MeV 前後になるように調整して ${}^4\text{He}$ ガスの詰められた容器に入射させた。イタリアの研究グループの主張[9]が正しければ、 ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応が起きたとき、高励起状態の ${}^{11}\text{B}$ が生成されると同時に低エネルギーの中性子が放出されるような事象が非常に高い割合で観測されるはずである。また、高励起状態の ${}^{11}\text{B}$ は、エネルギーの高い γ 線を放出するため、高エネルギーの γ 線も高頻度で観測されることが期待される。実験室は低エネルギー中性子のバックグラウンドが非常に高いが、低エネルギーの中性子と同時に高エネルギーの γ 線が検出される事象を観測することで、S/N の良い観測が可能となる。

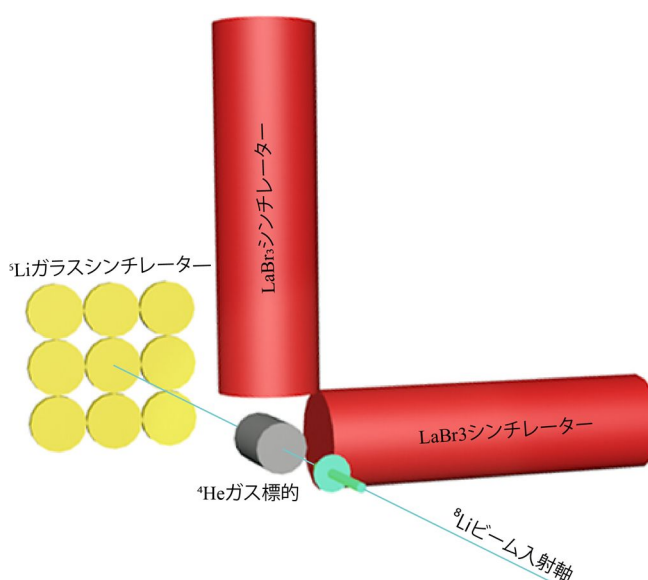


図2 実験セットアップ

4. 研究成果

実験で得られたデータを解析して得られた γ 線のエネルギーと重心系エネルギーの相関スペクトルを図3にそれぞれ示す。縦軸は ${}^8\text{Li}$ ビームが入射されてから γ 線が放出されるまでの時間であるが、これは ${}^4\text{He}$ ガス標的中の ${}^8\text{Li}$ の反応エネルギーと強い相関がある。縦軸が 10 ns 付近は重心系エネルギー 2.0 MeV に、20 ns 付近は重心系エネルギー 1.0 MeV 付近に相当する。イタリアの研究グループの指摘[9]が正しければ、重心系エネルギー領域 1.0 ~ 2.0 MeV で生成される ${}^{11}\text{B}$ はほとんどすべてが高励起状態にあるはずであり、必然的に約 7 MeV 以上のエネルギーを持つ γ 線を放出し、一方でそれよりも低いエネルギーの γ 線はほとんど放出されないはずである。しかしながら、このスペクトルからは、逆の結果が読み取れる。

また、図4は中性子のエネルギースペクトルである。横軸が中性子のエネルギー、縦軸は相対的な強度分布である。こちらについても、イタリアの研究グループの指摘[9]が正しければ、0.1 MeV 前後に特異的に強い分布の中性子の分布が現れるはずであるが、1.0 MeV 以上の分布と大きな差異は見られない。

以上の測定データから、図1に見られる反応断面積の大きな差異の原因は、我々の排他的測定法に起因する中性子の数え落としが原因ではないと結論付けることが可能であろう。

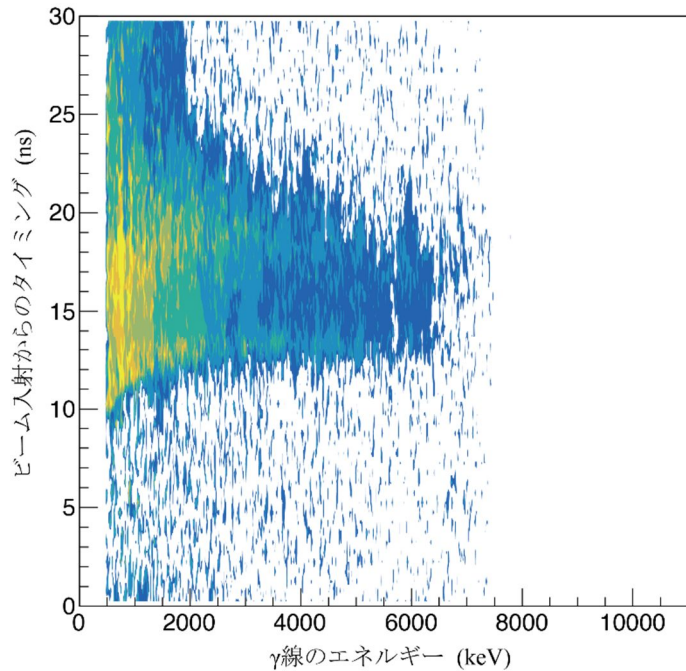


図3 γ 線エネルギーとビーム入射からのタイミングの相関図

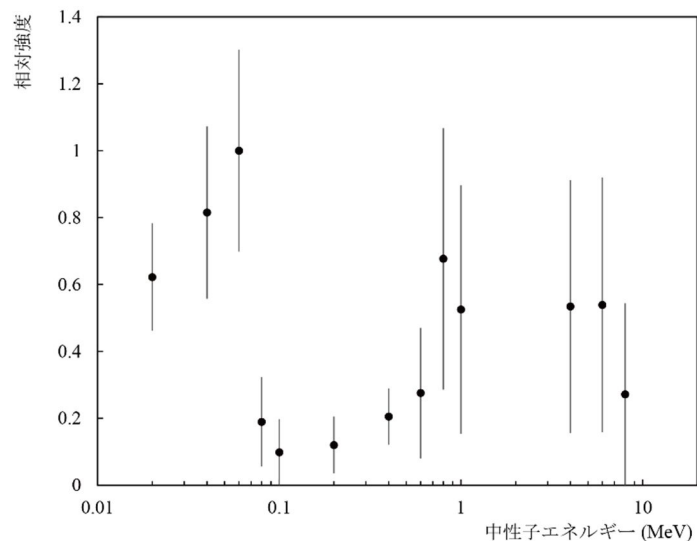


図4 中性子のエネルギースペクトル

<引用論文>

- [1] Measurement of the ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ reaction and astrophysical implications, Y. Mizoi, et al., Physical Review C62(2000)065801.
- [2] A new measurement of the astrophysical ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ reaction, H. Ishiyama, et al., Physics Letters B640(2006)82.
- [3] New measurement of the ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ reaction in a lower-energy region below the Coulomb barrier, S. K. Das, et al., Physical Review C95(2017)055805.
- [4] Multiple-sampling and tracking proportional chamber for nuclear reactions with low-energy radioactive isotope beams, Y. Mizoi, et al., Nuclear Instruments and Method A431(1999)112.
- [5] Measurement of the ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ reaction cross section at energies of astrophysical interest, R.N. Boyd, et al., Physical Review Letters 68(1992)1283.
- [6] The ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ reaction and primordial nucleosynthesis, X. Gu et al., Physics Letters B343(1995)31.
- [7] Cross-section of ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$: Inhomogeneous Big Bang nucleosynthesis, S. Cherubini et al., European

Physical Journal A20(2004)355.

[8] On the magnitude of the ${}^8\text{Li} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{11}\text{B} + n$ reaction cross section at the Big-Bang temperature, M. La Cognata et al., Physics Letters B664(2008)157.

[9] Solving the large discrepancy between inclusive and exclusive measurements of the ${}^8\text{Li} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{11}\text{B} + n$ reaction cross section at astrophysical energies, M La. Cognata et al., the Astrophysical Journal 706(2009)L251.

[10] Characterization of large volume 3.5"×8" LaBr3:Ce detectors, A. Giaz, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics A729(2013)910.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Mizoi, et al.	4. 巻 52
2. 論文標題 New measurement of $8\text{Li}(\text{ , }n)11\text{B}$ reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 溝井浩
2. 発表標題 $8\text{Li}(\text{ , }n)11\text{B}$ 反応の新しい測定結果と、そこから示唆される元素合成ネットワークへの影響
3. 学会等名 核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝井浩、他
2. 発表標題 天体核反応 $8\text{Li}(\text{ , }n)11\text{B}$ 反応断面積データの検証
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Mizoi
2. 発表標題 Measurement of excitation function with RI beam
3. 学会等名 RCNP AT-TPC workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝井浩、他
2. 発表標題 天体核反応 $^8\text{Li}(\text{ ,n})^{11}\text{B}$ 反応断面積データの検証II
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 溝井浩 他
2. 発表標題 天体核反応 $^8\text{Li}(\text{ ,n})^{11}\text{B}$ の反応断面積データの検証
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	福田 共和 (Fukuda Tomokazu)		
研究協力者	三原 基嗣 (Mihara Mototsugu)		
研究協力者	宮武 宇也 (Miyatake Hiroari)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	渡邊 裕 (Watanabe Yutaka)		
研究協力者	平山 賀一 (Hirayama Yoshikazu)		
研究協力者	石山 博恒 (Ishiyama Hironobu)		
研究協力者	山口 英斉 (Yamaguchi Hidetoshi)		
研究協力者	早川 勢也 (Hayakawa Seiya)		
研究協力者	大田 晋輔 (Ota Shinsuke)		
研究協力者	道正 新一郎 (Michimasa Shinichiro)		
研究協力者	今井 伸明 (Imai Nobuaki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	馬場 秀忠 (Baba Hidetada)		
研究協力者	久保野 茂 (Kubono Shigeru)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	INFN/Milano	Milan University	INFN/LNS	他1機関
中国	IMP/CAS			
韓国	Seoul National University	Sungkyunkwan University	Ewha Womans University	
イタリア	INFN - Milano	Milan University	INFN - LNS	他1機関
中国	IMP - CAS			
韓国	Seoul National University	Sungkyunkwan University	Ewha Womans University	
イタリア共和国	National Institute for Nuclear Physics			
中国人民共和国	中国科学院近代物理研究所			
大韓民国	Institute for Basic Science			