

短寿命核ビームによる天体核反応率の直接測定

Direct measurements of astrophysical nuclear reaction rates with radioactive nuclear beams

橋本 尚志 極限重原子核研究グループ

Takashi Hashimoto Research Group for Physics of Heavy Nuclei



- 天体における元素の起源解明のため、安定な原子核の存在しない質量数 8 を超える元素合成反応で鍵を握る、 ${}^8\text{Li}$ を含む反応の核反応断面積の直接測定を行いました。これらの反応の天体核反応率の実測値は、これまで推定されていた値から数倍から数十倍も異なる事が分かりました。
- 差異を生む原因は、離散的な励起状態の関与する反応断面積の共鳴現象にあります。軽い原子核領域での天体核反応率の直接測定が重要性を増しています。
- In order to investigate the astrophysical origin of elements, we have performed the direct measurements of the nuclear reactions involving ${}^8\text{Li}$, which are key reactions to bridge over the stability gap at mass number $A = 8$. These measured astrophysical nuclear reaction rates are significantly different with the previous measured and expected ones.
- Resonance-like structures were observed in all of measured reaction cross sections. It is found that direct measurements are important to determine the astrophysical nuclear reaction rates on light-mass system.

概要

宇宙の開闢であるビッグバンや超新星爆発、恒星内で起こる元素合成過程では、安定な原子核のみならず、短い時間で崩壊する原子核（短寿命核）も重要な役割を演じています。元素合成過程を理解するためには、天体中で核反応の起こる温度である 10 から 30 億度程度での核反応率が必要になります。核反応率の決定に用いられる核反応断面積は、安定な原子核同士の反応については実験的に精度良く決められていますが、短寿命核が関与する反応の場合、その測定は困難であり、精度の良い系統的なデータは存在していませんでした。

我々のグループでは高エネルギー加速器研究機構（石山博恒、渡辺裕、平山賀一、今井伸明、田中雅彦、野村亨）、東京理科大学（石川智子（現、物質・材料研究機構）、中井浩二（現、国際高等研究所））、大阪電気通信大学（溝井浩、Suranjan K. Das、福田共和）、筑波大学（山口香菜子）、大阪大学（下田正）、国立天文台（梶野敏貴）、ドイツ重イオン科学研究所（大槻かおり）、東京大学（佐々木孝浩（現、日立製作所））と共同研究を行い、天体における元素合成過程で鍵となる短寿命核を含む核反応断面積の系統的な直接測定を行っています。

本稿ではこれまで得られた結果の内、 ${}^8\text{Li} + \alpha \rightarrow n + {}^{11}\text{B}$ 反応（以下 ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応と表記。他の反応も同様）と ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応の測定について紹介し、これらの反応が元素合成過程に与える影響について議論します。

本成果の一部は、国内外の研究会で発表すると共に、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Physics Letters B 誌に掲載されました。最新の成果については Physics Letters B に投稿中です。

1. 研究の背景

自然界には水素からウランまで約 90 種の元素が存在する事が知られています。元素の起源はビッグバンによる元素合成に始まり、恒星、新星、超新星などの天体中での原子核反応によって記述されると考えられます。したがって、これら元素の起源についての理解は宇宙年齢や銀河の進化、星の一生の記述との密接な関連の中で進むこととなります。

宇宙での元素合成過程の内、超新星爆発中で起こると考えられている速い中性子捕獲過程 (r 過程) [1] では、爆発後数 ms のうちに、陽子、中性子から鉄周辺の「種核」と呼ばれる元素までの生成が

(α, n)等の荷電粒子反応により進みます。その後の数秒間で「種核」が中性子を連続的に捕獲する事で中性子過剰な原子核を次々と生成し、図1の赤い線付近で中性子捕獲反応と β 崩壊を繰り返しながら、アクチノイド領域(もしくはそれを超える超重核)までの元素が生成されると考えられています。この過程においては、元素合成のスタート地点である図1の赤の楕円付近の軽い中性子過剰核領域での天体核反応率が「種核」形成の鍵を握るため、重い元素の生成量にまで影響を及ぼします。

我々はまず、軽い中性子過剰核の元素合成過程の中でも、安定核の存在しない質量数8のギャップを超えて進む経路の鍵を握ると予想される ${}^8\text{Li}$ (半減期830ms)が関与する反応に注目しました。 ${}^8\text{Li}$ を経由する反応経路を定量化するため、ギャップを超えて重元素生成を進める ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応[2]、 ${}^8\text{Li}$ を壊し軽い核へと戻る ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応の測定を行いました。

r過程における天体の温度は10から30億度程度に達すると考えられています。この環境温度で核反応が起こるエネルギー領域を求めると、重心系で1 MeV周辺となります。このエネルギーはクーロン障壁以下なので、反応断面積はより高いエネルギーでの核反応に比べて小さくなります。また、一般に短寿命核ビームは安定核ビームを用いた核反応で生成するので、その強度は安定核ビームに比較して桁違いに小さく、安定核が不純物として混入する場合

もあります。これらの困難を打破するためには、
 1. 高品質な低エネルギー短寿命核ビームの供給
 2. 高効率な検出器系の開発
 の2つの実験条件を充たさなくてはなりません。

2. 研究の手法

上記の問題をクリアするために次のような手法を取りました。

1. 短寿命核ビームの生成

安定核と質量の小さな標的核との核子移行反応で短寿命核を生成し、反跳生成核質量分離装置(RMS)により1次ビームと分離し供給する方法[3]と、東海短寿命核加速実験装置(TRIAC)を用いる方法[4]を確立しました。

RMSを用いる方法では、短寿命核である ${}^8\text{Li}$, ${}^{12}\text{B}$, ${}^{16}\text{N}$ 等を 10^3 から 10^4 個/秒の強度で核子あたり1から2MeVのエネルギーの短寿命核ビームとして供給することが可能です。また、目的とする短寿命核ビームに他の粒子が混入する確率を数%以下に抑えることで、取得イベント中に測定目的以外の反応の混入を抑える事が可能です。

TRIACでは、 ${}^8\text{Li}$ ビームの場合、 10^5 個/秒の強度、核子当たり0.2から1.1MeVの範囲でエネルギー可変、エネルギー分解能2%、ほぼ100%の純度のビームとして供給することが可能です。

2. 高効率な検出器系の開発

${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応の測定には核反応の標的としてHeガスを使用します。我々は短寿命核ビームを効率よく使用し、小さな断面積を精度良く測定するために標的が検出器ガスを兼ねる新しいガス検出器、多重飛跡検出型ガス比例計数検出器(GMSTPC)を開発しました[5]。この検出器は、ほぼ100%の効

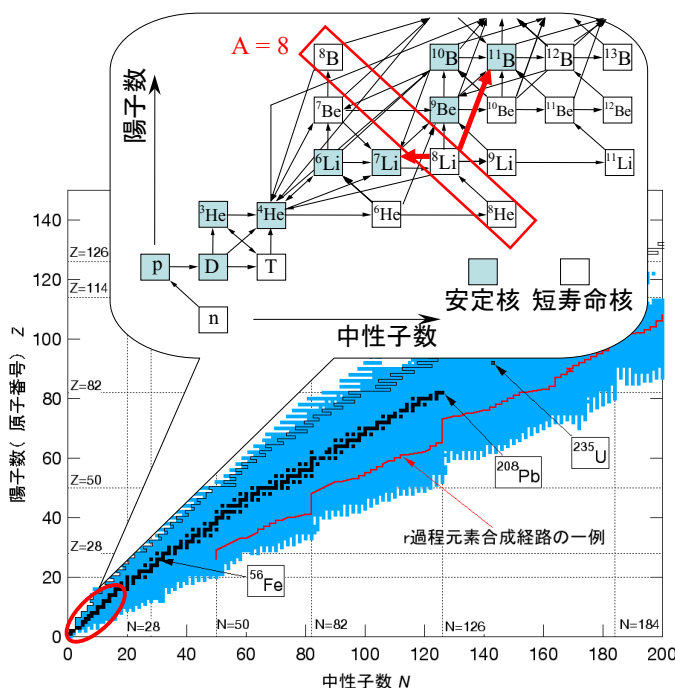


図1 核図表(極限重原子核研究グループ小浦寛之氏提供)。中性子数を横軸に、陽子数を縦軸に取っています。また、安定な原子核を黒で、不安定な原子核を青で表しており、不安定な原子核には未発見の原子核も含まれます。赤い線がr過程の経路の一例を示します。挿入図は質量数8付近の核図表を拡大したものです。安定な原子核が存在しない質量数8の領域を赤い四角で示しています。黒い矢印は核反応ネットワーク計算で考慮されている反応を示し、我々の測定した ${}^8\text{Li}$ を経由する反応を赤い矢印で示しています。

Fig.1 The nuclear chart. The black squares indicate the stable nuclei and the blue squares are the unstable nuclei. The red lines indicate an expected r-process path producing heavy elements. The inset figure indicates the nuclear chart around mass number A = 8. The red box shows the mass number A = 8, where no stable nuclei exist. The measured reactions including ${}^8\text{Li}$ are shown by the red arrows. The black arrows are the reactions taken into account in the reaction network calculation.

率で荷電粒子の3次元の軌跡とそれに沿ったエネルギー損失を測定することができる検出器であり、反応ごとに反応後の原子核の同定が可能です。このGMSTPCの周りに、全立体角の31.4%を覆い検出効率が約50%の中性子検出器を配置し、荷電粒子と放出中性子の同時測定を行いました。

一方、 ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応の測定では CD_2 固体標的を使用しました。この実験では ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応の他、 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$ や ${}^8\text{Li}(d, \alpha){}^6\text{He}$ 反応も起こります。放出粒子の識別と、エネルギーと散乱角度測定のため2次元位置検出型の $\Delta E-E$ 検出器を使用しました。 $\Delta E-E$ 検出器は薄い透過型シリコン半導体検出器(本実験では $45\mu\text{m}$)と全エネルギー測定用のシリコン検出器を組み合わせて使用しました。透過型シリコン検出器内でのエネルギー損失の違いを利用してp, t, α 粒子を識別することで、異なる反応を識別しました。

3. 研究の成果

${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応と ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応の測定結果を図2に示します。

${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応では、反応の終状態を同定しながら測定をおこなったので、信頼性の高い断面積を得ました。図に示したように、実験結果は20億度から30億度の天体の環境温度に対応するエネルギー領域を全てカバーしていることがわかります。我々の結果は、過去に行われた反応の終状態を同定しない実験(図の黒と白の三角) [6, 7]と比較して、60%程度小さい断面積を示しています。過去の測定値が大きな断面積を示しているのは、反応の終状態を同定しない測定のために、弾性散乱などのバックグラウンド事象を排除しきれていないのが原因だと考えられます。

注目すべきは、重心系で0.85 MeVに共鳴状の構造がはっきりと見出された点です。このエネルギー

は複合核である ${}^{12}\text{B}$ の10.9 MeVの励起状態に一致します。過去に行われた実験でも、この励起状態の寄与と思われる断面積の増大が示唆されていましたが、我々のデータはこの構造を明確に示しています。

${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応では、10から30億度のエネルギー領域をカバーする重心系で1.5 MeV以下の断面積のデータを初めて測定することが出来ました。

図で示したように、重心系で0.8 MeV付近に、高エネルギー領域の測定 [8]からは予想されなかった断面積の増大が測定されました。このエネルギーは複合核である ${}^{10}\text{Be}$ の22.4 MeVの励起状態 [9]と一致します。

これらの測定結果から核反応率を計算した結果、 ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応では従来用いられていた核反応率の50%程度である事が明らかとなりました。 ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応では、 ${}^{10}\text{Be}$ の22.4 MeVの励起状態の共鳴の寄与によって、逆に10倍大きな反応率であることが明らかとなりました。我々がこれまで測定した ${}^{12}\text{B}(\alpha, n){}^{15}\text{N}$ 反応 [10]でも複数の共鳴の寄与によって理論計算による推測値よりも約2倍大きな反応率であること、 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$ では予備的な結果ではありますが、やはり ${}^{10}\text{Be}$ の22.4 MeV付近の共鳴の寄与により2桁も大きな反応率であることが見出されつつあります。

4. 成果の意義と波及効果

実験的に得られた核反応断面積から計算される核反応率を用いて ${}^8\text{Li}$ を経由する反応経路がどのようなものになるかを評価します。この評価には得られた核反応率と反応に関与する2種類の粒子の存在比との積で定義される「反応の速さ」を用いました。粒子の存在比は、天体の爆発環境や関与する原子核のデータを考慮し、連続的に起こる原子核反応をシミュレートする核反応ネットワーク計算の結果を使います。図3に超新星爆発の環境下で、 ${}^8\text{Li}$ を経由す

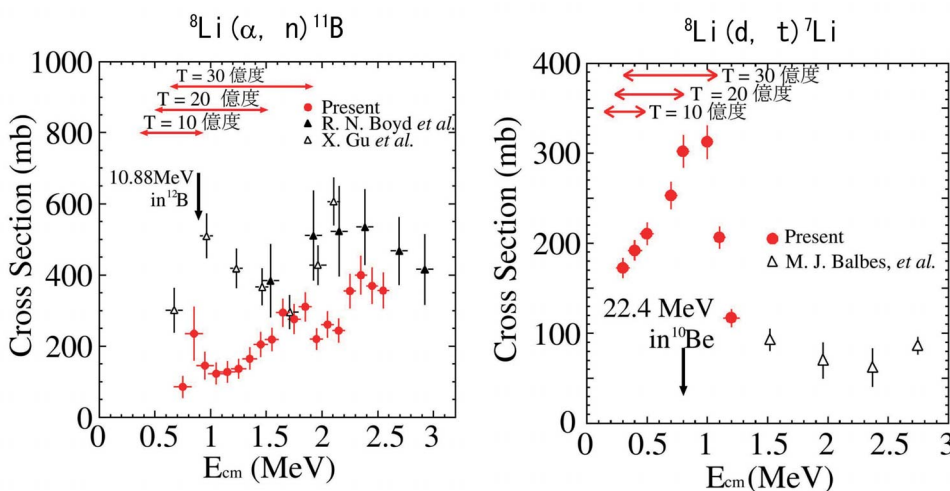


図2 ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応と ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ 反応の励起関数。いずれも赤い丸が今回の実験結果です。宇宙核物理で注目されるガモフピークの領域を温度毎に赤い矢印で示しています。下向き矢印は他の実験で報告されている複合核の励起準位を示しています。

Fig. 2 The measured excitation functions for the ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ and ${}^8\text{Li}(d, t){}^7\text{Li}$ reactions. In each figure, the red-closed circles show the present data. Energy regions of astrophysical interest are indicated by the red arrows. The downward arrows indicate the excited levels in the compound nucleus, ${}^{12}\text{B}$ and ${}^{10}\text{Be}$, reported so far.

る「反応の速さ」の比較を示します。反応断面積では ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ は ${}^8\text{Li}(\text{d}, \text{t}){}^7\text{Li}$ よりも小さなものですが、超新星爆発環境下では α 粒子が大量に生成されるため、他のどの反応よりも速く進むことがわかります。2番目に速い反応は、温度が低下するに従い26億度付近で ${}^8\text{Li}(\text{p}, \alpha){}^5\text{He}$ [12]から ${}^8\text{Li}(\text{n}, \gamma){}^9\text{Li}$ [13]へと変わります。低温では中性子捕獲反応によって重元素生成が促進される方向に進む事が判ります。また、 ${}^8\text{Li}(\text{d}, \text{t}){}^7\text{Li}$ 反応は重陽子の存在比が小さいために「反応の速さ」が遅く、主要な経路とはならない事が判りました。

今回の結果を考慮して、最終的に生成されるアクチノイド領域の元素の生成量を求めると、超新星の爆発時間(およそ「種核」の形成時間に等しい)が従来考えられていた数msよりも長い50msと言う環境でも、過去の推定値を用いた場合に較べ約2倍多くなり、宇宙における元素存在比を再現できることがわかりました。生成量が増加する理由は ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 反応の核反応率が低下した事により、種核の生成量が下がり、種核と中性子の比が中性子側に寄った事によります。そのため種核一つ当たりが吸収できる中性子の数が増え、アクチノイド領域の重元素の生成量が増加するのです。

5. 今後の予定

軽い原子核反応に特有な離散的励起状態の共鳴現象によって、これまでの天体核反応率の推定値は、実測に比べ数倍から数10倍の差異を生む可能性がある事がわかりました。この差異は宇宙で生成される重元素の存在比に大きな影響を与えます。

用語の説明

1. 短寿命核

陽子と中性子から構成される原子核は、それらの比がほぼ1:1の時安定となり、自然に変化する事はありません。短寿命核とはこの比が異なるために不安定で、短い時間の内に別の原子核へと崩壊する原子核の事を言います。中性子の数が安定核よりも多いものを中性子過剰核、陽子の数が多いものを陽子過剰核と呼びます。短寿命核ビームはこれをビーム状に形成したものです。

2. 核反応率

2つの原子核が核反応断面積(σ)で反応する時に、温度がTの環境で、毎秒当たりに反応を起こす割合を核反応率と言います。温度Tでの原子核の速度(v)はマクスウェル

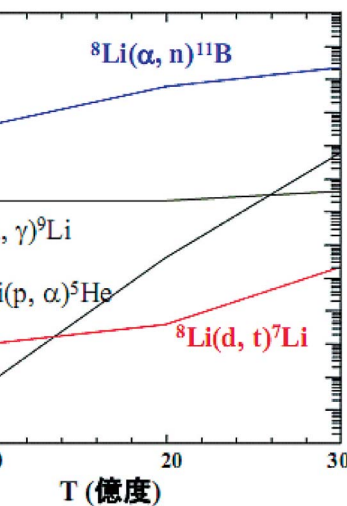


図3 ${}^8\text{Li}$ を経由する反応の速さ。縦軸は各反応の核反応率と核反応ネットワーク計算で見積もられた各元素の存在比の積で、横軸は 10^9 Kで規格化した温度です。ただし ${}^8\text{Li}$ の存在比は1に規格化してあります。

Fig. 3 The flow of reactions through the ${}^8\text{Li}$ nucleus, determined from the measured reaction rates multiplied by the mass fractions of reacting nuclei. The horizontal axis is temperature normalized by 10^9 K. The mass fraction of ${}^8\text{Li}$ is normalized as 1.

短寿命核ビームを用いた宇宙核物理の実験は世界中で凌ぎを削って行われています。この中で我々は実験に適した強力なツールをタンデム加速器周辺に構築し、特に軽い中性子過剰核の断面積の直接測定では世界においてもユニークな研究を進めてきました。これらのツールを有効に用いて、元素の起源の謎に挑戦して行きたいと考えています。

参考文献

- [1] M. Terasawa, *et al.*, *Astrophys. J.* **562**, 470 (2001).
K. Otsuki, *et al.*, *Astrophys. J.* **533**, 424 (2000).
- [2] H. Ishiyama, *et al.*, *Phys. Lett. B* **640**, 82 (2006).
- [3] H. Ishiyama, *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **560**, 366 (2006).
- [4] H. Miyatake, *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. B* **204**, 746 (2003).
- [5] T. Hashimoto, *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **556**, 339 (2006).
- [6] R. N. Boyd, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1283 (1992).
- [7] X. Gu, *et al.*, *Phys. Lett. B* **343**, 31 (1995).
- [8] M. J. Balbes, *et al.*, *Nucl. Phys. A* **584**, 315 (1995).
- [9] R. O. Nelson and A. Micaudon, *Nucl. Sci. Eng.* **140**, 195 (2002).
N. R. Fletcher, *et al.*, *Phys. Rev. C* **68**, 024316 (2003).
- [10] T. Ishikawa, Doctor Thesis, Tokyo Univ. of Sci., 2006.
- [11] F.D. Becchetti, *et al.*, *Nucl. Phys. A* **550**, 507 (1992).
- [12] Z. H. Li, *et al.*, *Phys. Rev. C* **71**, 052801 (2005)(R).

分布に従いますので、核反応率は σ と v の積の平均値($\langle\sigma v\rangle$)となります。

3. 核反応断面積の共鳴現象

原子核反応において、標的核と入射核が一体となって複合核を形成し、その後複合核が放出核と残留核に崩壊するという過程をたどる反応の事を複合核反応と言います。

この複合核反応において、複合核の励起状態のエネルギーと重心系でのエネルギー(核反応に寄与するエネルギー)とが一致するように粒子の入射エネルギーを合わせると、複合核を形成する可能性が高い共鳴と呼ばれる現象が起こり、複合核から崩壊する粒子や放射線の観測から核反応断面積の増大が観測されます。