

# 新研究グループの発足に際して

## 天体における重元素生成過程を 短寿命原子核で調べる



天体重元素研究グループ ■ 宮 武 宇 也 ■

### 1. はじめに

身の回りに存在する元素は、いつ、どこで、どのようにして作られてきたのか？

元素の起源とその合成過程を理解する事は、宇宙の歴史と星の進化を解明する事につながる。鉄よりも重い元素の多くは、星の中で長い時間をかけて生成される遅い中性子捕獲過程（s-過程）によるものと、超新星爆発などの高温・高密度な爆発的天体環境下で、数秒のうちに生成される早い中性子捕獲（r-過程）によるものとに分類される（図1参照）。前者のs-過程は、

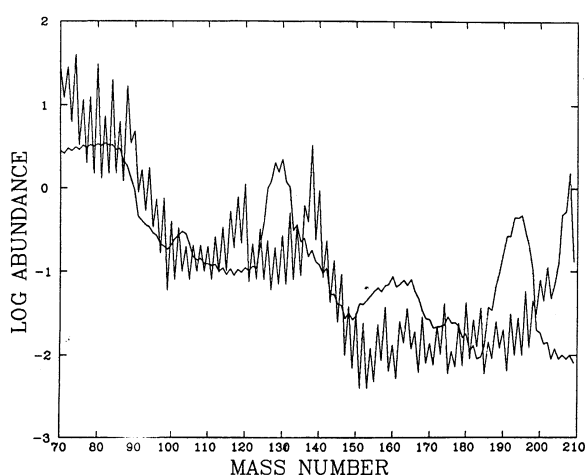


図1 太陽系の元素存在比[1]

ケイ素の存在比を $10^0$ に規格化してある。質量数による細かな変動を示しているのがs-過程によるもの、緩やかな変動を示しているのがr-過程によるもの。

安定な原子核とその近傍核を経由していく過程であるため比較的研究が進んできたのに比べると、ほとんどが安定核から遠くはなれた未知の中性子過剰な短寿命原子核を経由するr-過程は、未だに多くの謎を秘めている。天体観測や大規模な元素合成ネットワーク計算の飛躍的な進歩により、最近になってようやく超新星爆発や中性子星の衝突などの具体的天体事象と結びつけてこの過程を理解する道が見えてきた。

これからの研究においてキーとなるのは、中性子過剰核がこの過程で果たす役割の定量的解明である。これらの核の反応率や崩壊様式、質量といった核物理パラメータを実験的に求める事で、候補となる天体環境での温度や物質密度、それらの時間推移などの天体物理パラメータを検証する事が可能となる。本研究グループでは、(1)滞留核近傍の核的性質の解明、(2)r-過程の種核形成過程の解明、という2つの視点から研究を展開する。以下の章で2つの研究方法について概説し、研究の基盤となっている短寿命核ビーム装置、TRIAC（Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex）の紹介を行う。

### 2. r-過程の実験的解明 — 2つのアプローチ

#### 2-1 滞留核の核的性質の解明

r-過程で生成された元素の存在比分布には、質量数が80、130、195の場所にピークがある。これは、中性子数が50、82、126の魔法数をもつ中性子過剰核の中性子捕獲反応がその逆反応と平衡状態になり、r-過程の滞留が起こるためであると考えられている。これら

存在比のピークをなす滞留核の核物理パラメータが実験的に求められれば、熱平衡状態の仮定の下で、存在比ピークの観測値との比較からr-過程の天体環境における中性子数密度と温度との相関が決まる。これまでの80、130の質量数ピークに対応する滞留核測定の研究から、この相関がある広がりをもって一致しているが、存在比ピークの形状を再現できない、ということが明らかになった[2]。

本研究では、これまで到達不可能であった質量数195に対応する $^{202}\text{Os}$ 、 $^{201}\text{Re}$ 、 $^{200}\text{W}$ 、 $^{199}\text{Ta}$ 等の滞留核の半減期、崩壊様式測定を行い、中性子数密度と温度の相関を求める事によって、r-過程が定常的な天体環境で起こるのか否かを明確にしたい。これらの核は極端に中性子過剰な未知核種ではあるが、短寿命核ビーム装置からの中性子過剰な $^{145}\text{Cs}$ ビームなどを用いた二次核反応により生成する計画である。また、 $^{81}\text{Ga}$ 、 $^{82}\text{Ge}$ 、 $^{131}\text{In}$ 、 $^{132}\text{Sn}$ 等の滞留核の(n,  $\gamma$ )反応率を(d, p)反応から求めることで、3つの存在比ピークを形成するために必要な中性子数密度の時間変化についての情報も得る予定である。

先の研究で示された存在比ピーク形状の問題は、計算に用いられている原子核の核構造模型が、極端に中性子過剰な領域での50、82という魔法数近傍原子核の性質を予測できていないためであろうと考えられている。そこで、スピン偏極核分光法という新たな観測手法を用いて滞留核近傍での殻構造の詳細研究を進める計画である。この方法では、半減期や崩壊様式など従来の核分光法で得られる物理量に加えて、スピン偏極した原子核から放出される $\beta$ 線の非等方分布を利用して $\beta$ 転移終状態のスピン・パリティをユニークに決定したり、始状態の核モーメントをS/N比良く測定出来る[3]。図2に、測定に用いる検出器配置を示した。

短寿命核を核スピン偏極させる方法には、偏向レーザーによる光ポンピングや、偏極した電子を捕獲させて核偏極に移行させる方法などがあるが、本グループでは、最も広範な元素を偏極させられる傾斜薄膜法を採用している。この方法では、短寿命核ビームを入射軸に対して傾斜した薄膜を通過させることでまず原子偏極を起し、それを超微細相互作用により原子核の偏極に移行させる。一枚あたりの偏極量は数%程度と小さいが、薄膜の傾斜角を深くし、なおかつ多層の薄膜を通過させる事で、10%前後の核スピン偏極を達成

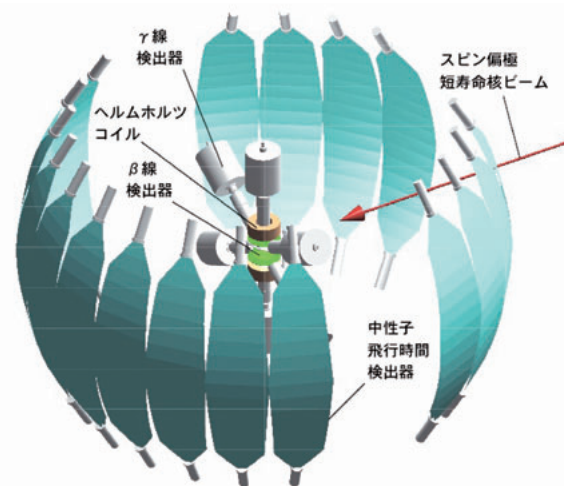


図2 スピン偏極核分光実験に用いる検出器配置

核スピン偏極した短寿命核は、 $\beta$ 線検出器中央に設置されたストッパーに打ち込まれ、ヘルムホルツコイルによって核スピン偏極は保持される。スピン・パリティ決定実験では、 $\beta$ 遅発 $\gamma$ 線や中性子が同時測定される。核磁気モーメント測定では、核スピン反転のためのrf-コイルがヘルムホルツコイルと直角に設置される。

出来るであろうと期待している。また、測定対象となるSn、In等の滞留核近傍の領域で、半減期程度に長い偏極緩和時間を得るために、 $\beta$ 線検出器の中心部に置かれたストッパーは、液体ヘリウム温度にまで冷却する。

## 2-2 r-過程の種核形成過程の解明

2-1のアプローチでは、超新星爆発などの天体現象(シナリオ)に依存せずにr-過程に必要な天体物理パラメータをもとめたが、ここでは元素合成ネットワーク計算に組み込まれている核物理パラメータの精度を上げて、最近有力視されているII型超新星爆発時のr-過程というシナリオ[4]の検証を目的とする。本研究では、r-過程が始まる直前の鉄元素領域までの種核生成量と中性子量との割合が、上記シナリオにおける重元素存在比の再現に敏感な量である事に着目した。元素合成ネットワーク計算では、未知の核反応率は統計模型を用いて推定しており、種核を形成する際の主要経路である軽い中性子過剰核の核反応率推定には大きな誤差が生じる。そこで、ネットワーク計算の中で、種核生成量を精度よく見積もれるようにするために、種核生成過程上で主要な核反応率の直接測定を行う計

画を立てた。

測定対象は、天体の環境温度にして $10^9\text{K}$ 程度でのガモフピーク位置の周辺、すなわち $100\text{keV}$ から数 $\text{MeV}$ までの反応断面積である。短寿命核ビームの強度はたかだか $10^3\sim 10^8$ 個/秒で、通常安定な原子核による重イオンビームに比べてきわめて小さい。そのため、測定を成功させるには高効率の検出システムが必須となる。本グループでは、この条件を満たすものとして、核反応による放出粒子が中性子である場合は、ほぼ100%の検出効率が期待できるガス検出器(多重比跡検出型比例計数検出器)と大立体角を覆う中性子飛行検出器からなる検出器システムを開発した。放出粒子が荷電粒子である場合の核反応率測定には、大立体角の荷電粒子テレスコープの開発を予定している。前者の検出器システムによって得られた $^8\text{Li}$  ( $\alpha, n$ ) 反応断面積の直接測定結果を図3に示した。この反応は、初期宇宙での重元素合成の可能性を示唆する非一様ビッグバンモデルにおけるLiよりも重い元素の生成量を予測する上でも重要とされる反応[5]でもある。

この測定で、従来よりも10倍程度高い統計で得られた断面積データから(図3の赤丸)、これまでネットワーク計算に用いられていた反応率が約2倍程度高い値で

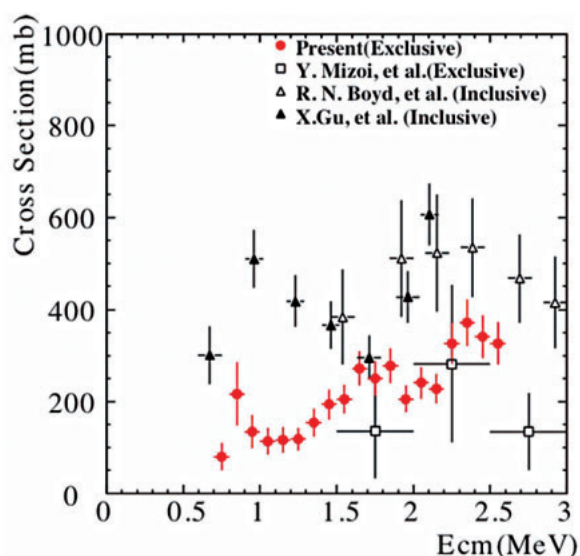


図3  $^8\text{Li}$  ( $\alpha, n$ ) 反応断面積の測定結果

赤丸は本グループの測定結果。丸印は放出中性子の同時測定を行って、核反応の終状態を同定しているが、三角印は行っていない。

あったことが明らかとなった[6]。さらに低エネルギーの領域 ( $0.5\text{MeV}$ 周辺) での測定も終わっており、今後の解析結果に関心が集まっている。

### 3. 天体核研究のための実験基盤

—TRIAC (Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex)—

これまでに概説してきた研究課題の遂行には、エネルギー、空間分布ともに良く揃った高品質の低エネルギー短寿命核ビームが必須となる。そこで本グループでは、2005年度より稼働を開始した再加速型短寿命核ビーム装置;TRIAC (Tokai radioactive Ion Accelerator Complex) [7] を利用する。

TRIACは、高品質の短寿命核ビーム供給装置として高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発されてきた短寿命核分離加速実験装置を東海研タンDEM加速器施設に移設し、同施設に既存のオンライン同位体分離器 (ISOL) や超伝導ブースターと結合した装置全体を指している。KEKから移設した装置に含まれる重イオン線形加速器 (分割同軸型 (SCRFQ) 線形加速器とインターデジタル型 (IH) 線形加速器) と原研の超伝導 (SC) 線形加速器という3種類の加速器 (TRIACcelerators) 群からなる設備という意味でもある。

TRIACでは、タンDEMからの陽子や重イオンビームによる標的との核反応から得られた短寿命核をその場でイオン化し、ISOLで質量分離したのち、SCRFQやIH、SC線形加速器を用いて加速する(図4)。TRIACの特徴の一つは、ウラン標的による陽子誘起核分裂反応により生成された多種類の中性子過剰核分裂片を従来の加速器から供給される安定核イオンビームと同じ高品質ビームとして実験に利用できる点である。まさにこの点が、中性子過剰核領域を経由するr-過程の実験的研究に適している理由である。本研究グループが利用するビームエネルギーは、 $0.5\text{MeV}$ /核子程度(2-2章と2-1章後半の研究課題)から $5\text{MeV}$ /核子(2-1章前半の研究課題)まで広く分布する。現時点では、超伝導ブースターへのビームライン繋ぎ込みとブースター加速空洞の一部改造、輸送効率向上のためのバンチャー制作が終了していないため、短寿命核ビームの最大加速エネルギーは $1.1\text{MeV}$ /核子であるが、上記改造を早期に完了させ、核子あたり $5\text{MeV}$ 以上の加速エネルギーを実現する計画である。

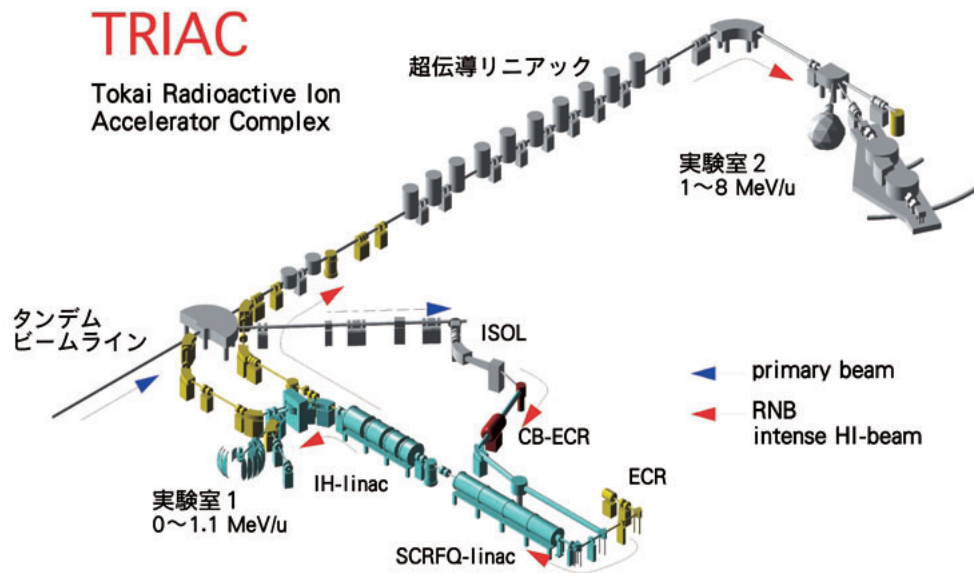


図4 TRIACの概念図

#### 4. おわりに

天体における元素合成過程の短寿命核による研究は、天体核物理分野で発展してきた比較的新しい研究分野である。現在同種の研究課題を主要な柱の一つとして、アメリカやカナダ、ヨーロッパなどの研究機関で再加速型短寿命核設備の建設・稼働が進んでおり、競争の激しい研究分野となっている。本研究グループでは、国内唯一のTRIACを最大限利用しながら、r-過程研究の新たな段階を切り開いていく。ここから生み出される成果が次世代の高強度短寿命核ビームによる科学の研究基盤となることをおおいに期待している。

#### 参考文献

- [1] A.G.W. Cameron, *Astro. Space Sci.* 82, 123 (1982).
- [2] B. Pfeiffer et al., *Z. Phys.* A357, 235 (1997).
- [3] H. Miyatake et al., *Phys. Rev.* C67, 014306 (2003).
- [4] M. Terasawa et al., *Astro. J.* 562, 470 (2001).
- [5] T. Kajino et al., *Astrophys. J.* 359, 2167 (1990).
- [6] T. Hashimoto, Doctor thesis, Tokyo Univ. of Sci. (2004).
- [7] H. Miyatake et al., *Nucl. Instrum. Meth.* B204, 746 (2003).