

r 過程元素合成における中性子直接捕獲反応の役割

大槻かおり¹⁾ · S. Typel²⁾ · G. Martinez-Pinedo²⁾ · K. Langanke²⁾

(平成 23 年 11 月 30 日受理)

Roles of Direct Neutron-Capture Reaction in the r-Process

K. OTSUKI¹⁾, S. TYPÉL²⁾, G. MARTINEZ-PINEDO²⁾ and K. LANGANKE²⁾

(Received November 30, 2011)

Abstract

Neutron-capture reaction consists of two component, compound process and direct-capture process. It has been pointed out that the direct capture reaction become dominant around r-process path. We studied a role of the direct capture reaction in the r-process using a dynamical network code.

We found that the direct capture reaction furthers r-process and makes freeze out earlier. Neutron capture reaction rates change physical condition of freeze out and affect final abundance significantly, especially in the cold r-process case.

1 序論

自然界に存在する鉄より重い元素は主に中性子捕獲反応によって生成される^[1]. 中性子捕獲反応はその時間スケールによって s 過程と r 過程にわけられる. s (low) 過程は β 崩壊より遅い時間スケールで進む中性子捕獲反応である. 星の内部で, 種核が中性子を 1000 年から 10000 年に一個程度の割合で捕獲し, β 崩壊しながら長い時間をかけて進んでいく.

一方, β 崩壊より速い中性子捕獲反応は r (-apid) 過程と呼ばれる. 種核は数ミリ秒に一つ程度の割合で中性子を捕獲していく. 中性子捕獲過程自体は数秒で完了し, その後 β 崩壊により安定核になる.

r 過程が起こるには非常に中性子過剰な環境が必要であり, そのような環境は重力崩壊型超新星爆発や中

性子星の合体等, 爆発的な天体現象において実現すると考えられている^[e.g., 2]. しかし r 過程元素の天文学的起源は不明である. その原因として, 前述の爆発的天体現象の機構が未だ明らかではなく, これらの天体現象においてどのような物理的環境が実現しているのかわかっていないこと等があげられる.

また, r 過程は非常に中性子過剰な短寿命不安定核を経由して生成されるが, これら経路上の元素の寿命や質量は, 今の時点では実験で測定不可能である. そのため元素合成の理論計算に必要な β 崩壊や中性子捕獲反応率等は理論計算で求めたものを使わざるを得ない. 原子核のモデルからくる反応率の不定性は大きく, r 過程元素合成の研究におけるもう一つの大きな困難となっている.

r 過程元素合成の計算に必要な反応率は, 重元素の

¹⁾ 福岡大学理学部物理科学科, 〒 814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1

²⁾ GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, Darmstadt, Germany

部分だけに限ると、中性子捕獲反応 (n, γ), 光分解反応 (γ, n), β 崩壊である。比較的温度の高い環境では (n, γ) 反応と (γ, n) 反応の兼ね合いで経路が決まるため、核質量が重要だと考えられている。しかしコールド r 過程と呼ばれる、(γ, n) 反応が効かないような温度の低い環境では、(n, γ) 反応と β 崩壊によって経路が決まるので、反応率が特に重要になってくると考えられる^[3]。

中性子捕獲反応には複合核過程と直接捕獲過程がある。従来の r 過程元素合成の研究では、中性子捕獲反応は、ほぼ複合核過程のみが考えられていた。しかし先行研究により、中性子ドリップ線付近では複合核過程よりも直接捕獲過程のほうが優勢になることが指摘されている^[4,5]。本研究では、今まであまり重要視されていなかった中性子直接捕獲反応率を中性子ドリップ線付近の元素について簡単なモデルで計算し、r 過程元素合成における影響を調べた。

2 中性子捕獲反応率

中性子捕獲反応には複合核過程と直接捕獲過程があり、複合核過程の反応率は Hauser-Feshbach 法で求められ、一般に公開されている^[6]。しかし中性子ドリップ線付近の原子核は単位密度が疎になるため、統計的な Hauser-Feshbach 法は本来適用できず、直接捕獲反応を考慮することが必要になる。

本研究では、文献^[7]に基づいた半解析的な手法で、ドリップ線近傍の原子核の直接捕獲反応率を系統的に全て計算した。この手法では、それぞれの核の一粒子単位として、実験で明らかになっている安定核の一粒子

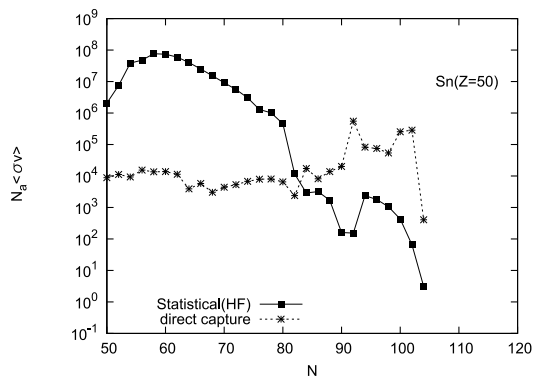


Fig. 1 Comparison of neutron capture rates of Sn isotopes. The black squares are neutron capture rates computed using the Hauser-Feshbach model^[6]. The stars are direct capture rates obtained in this study.

子準位を参考にそのパターンをスケールしたものを仮定した。原子核の変形についても考慮した。この計算の変数はそれぞれの親核の質量数、中性子乖離エネルギー、変形パラメータとなり、すべて FRDM 質量モデルの値を用いた^[8]。

例として、Sn ($Z=50$) の同位体について、今回計算した直接捕獲反応率と Hauser-Feshbach 法で求められた反応率^[6]を Fig. 1 に示す。安定核付近では直接捕獲反応率は二桁以上小さいが、中性子過剰側では逆転し、直接捕獲反応率が優勢になっている。

3 元素合成の計算モデル

導入でも述べたように、r 過程元素合成の天文学的な起源は未だ不明である。本研究では、r 過程の環境として、1.4 太陽質量の中性子星を中心とした球対称定常流を仮定した。これは超新星爆発時に原始中性子星周りで発生するニュートリノ風を再現するものとして提案されたモデルであり、元素合成の計算に必要な温度、密度の時間変化は以下の連立方程式を解いて得られる^[9]。

$$4\pi r^2 \rho v = \dot{M},$$

$$\frac{v^2}{2} - \frac{MG}{r} + N_A k T s_{rad} = E,$$

$$s_{rad} = \frac{11\pi^2}{45\rho N_A} \left(\frac{kT}{\hbar c} \right)^3,$$

ここで \dot{M} は単位時間辺りに中性子星表面から放出される質量、 M は中性子星の質量、 r は中性子星中心からの距離、 ρ , v , T , E はそれぞれニュートリノ風の密度、速度、温度、エネルギーになる。 s_{rad} は放射のエントロピーであり、このモデルでは近似的にニュートリノ風のエントロピーに等しい。エントロピーを与えると 1 つの音速点を通る解 (wind 解) と複数の亜音速解 (breeze 解) が得られる。

今回の計算では、背景のニュートリノの影響ならびに一般相対論的な効果は考慮しなかった。これらは本研究の目的である、直接捕獲反応の効果の議論には影響しないからである。

元素合成の計算には、大規模な力学的ネットワークコードを用いた。計算に必要な核反応のデータとして、FRDM モデルに基づいて計算された質量、中性子捕獲反応率、 β 崩壊率を採用した。種核生成のための荷電反応率は、NACRE および reaclib の二つのデータベースを用いた^[6,8,10,11]。

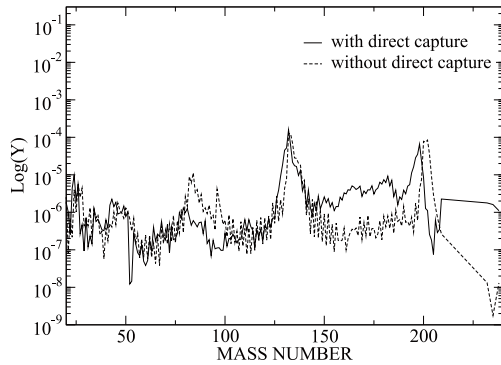


Fig. 2 Results of r-process calculations with (solid line) and without (dashed line) direct capture.

4 結果

中性子直接捕獲の有無によって最も顕著な差が出たエントロピー 250 の wind 解の例を Fig. 2 に示す. 中性子直接捕獲反応を考慮した計算は実線, 考慮していない計算は破線でプロットした. 中性子捕獲反応以外の物理条件は等しくしてある.

この計算例では, 直接捕獲反応を考慮すると第 3 ピークの位置が左にずれ, 第 3 ピークに対するアクチノイドの生成比も増加する. この組成パターンはより太陽系の r 過程元素の組成パターンに近いものとなっている.

二つの結果の違いは, 中性子捕獲反応率が異なるために, 組成パターンがほぼ決定される中性子捕獲反応の終了 (freeze-out) 点が大きく異なることからくる. 直接捕獲反応を考慮すると, 中性子捕獲反応率が大きくなるため, 中性子が早く消費される. freeze-out 点を種核一つあたりの中性子数が一つになる点と定義すると, 直接捕獲反応を考慮した場合は freeze-out 点が計算を開始しておよそ 1.4 秒後に訪れる. その時の r 過程の経路はまだ中性子ドリップ線に近い. しかし直接捕獲反応が含まれていない場合は, freeze-out 点は 82 秒後になる. その頃には β 崩壊も進み, r 過程の経路はかなり安定核に近づいている. そのため第 3 ピークの位置も重いほうにずれるのである.

また, breeze 解を用いて同様の計算を行ったが, この場合, 第 3 ピークのずれのような違いは見られず, アクチノイドとピーク間の元素の生成比が異なるだけだった. これは, breeze 解のような環境のもとでは (n, γ) (γ, n) 平衡で経路が決まり, 中性子捕獲反応率はそれぞれの質量数への分配の比率に影響するからだと思われる. しかしアクチノイドの生成比は観

測と比較し, r 過程の物理条件を決定する上で重要な要素である. 本研究は, r 過程元素において, 原子核質量だけではなく中性子捕獲反応率も重要であることを示した.

5 まとめと議論

本研究では, 中性子直接捕獲反応の r 過程元素合成における影響を調べた. 直接捕獲反応を考慮すると, 中性子ドリップ線付近の原子核の中性子捕獲反応率が増加するため, r 過程がより速く進むことになる. この効果は球対称定常流の wind 解のように, 温度が比較的早く下がり (γ, n) が効かないために, (n, γ) と β 崩壊率がより重要になるような環境において顕著である. また, 本論分では紹介しなかったが, β 崩壊の寿命を短くすることでも同様な効果が得られた.

この研究において, 直接捕獲反応率は, 非常に単純なモデルで計算している. 一粒子準位は安定核のパターンをスケールしたものになっているが, このパターンかスケールの方法をわずかに変えただけで, 原子核によっては反応率が 4 桁以上変わる場合がある. 理論計算の結果は, 直接捕獲反応率を一桁変えただけで影響を受ける.

残念ながら中性子ドリップ線近傍の原子核の一粒子準位は全くわかっていない. 今後 J-PARC 等の実験によって, Ti 辺りの同位体の中性子捕獲反応断面積なら, 中性子ドリップ線まで測定可能だといわれている. しかしその場合も, 実験では直接捕獲過程と複合核過程をわけることはできない. また, r 過程の計算には, 中性子過剰核全ての中性子捕獲反応率, β 崩壊率, 質量 (光分解反応率を求めるのに必要) が必要であるが, 全てを実験で求めることはできない. したがって, 今後新しく得られた実験結果を r 過程元素合成に活かすには, 系統的な原子核構造の研究が必要不可欠である.

参考文献

- [1] E.M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. Hoyle Rev. of Modern Physics 29 (1957) 547.
- [2] C. Sneden, J. Cowan, and R. Gallino, ARA&A 46 (2008) 241. *and reference there in.*
- [3] S. Wana jo ApJ666 (2007) L77.
- [4] G.J. Mathews, A. Mengonni, F.K. Thiele-mann, & W.A. Fowler, ApJ270 (1983) 740.
- [5] S. Goriely, A&A 325 (1997) 414.

- [6] T. Rauscher & F-K. Thielemann AD-NDT75 (2000) 1.
- [7] S. Typel & G. Baur, Nucl. Phys. A 759 (2005) 247.
- [8] P. Möller, J. R. Nix, W.D. Myers, & WJ Swiatecki, ADNDT 59 (1995) 185.
- [9] K. Takahashi & H-Th. Janka, Proceedings of Origin of Matter and Evolution of Galaxies (1997) 213.
- [10] P. Möller et al. PRC67 (2003) 055802.
- [11] NACRE Database <http://pntpm.ulb.ac.be/Nacre/nacre.htm>.