

太陽系組成分布から見る重元素合成過程

山田 美幸 (お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科)

Abstract

私たちを構成する元素は、恒星内の自発的な核融合反応によって起こるものから、超新星爆発などで誘発的に起こるものまであり、そのでき方は実に様々である。これまで、恒星内の元素合成については、組成分布をもとに様々な計算が行われ、各反応が起こるための具体的なプロセスはほぼ理解されてきた。しかし、鉄より重い重元素の合成過程に関しては、どこで、またどのように進行していったのか、観測データが少ない等の問題もあり、あまりわかっていない状況である。

本研究発表では、重元素が合成されるまでの過程を、組成分布図と照らし合わせ、現在考えられている様々な視点より紹介し、またそれらの過程の問題点についても考察する。

1 Introduction

元素合成過程に関わる研究において、太陽系における元素の分布は、以下のようになることがわかっている(図1)。

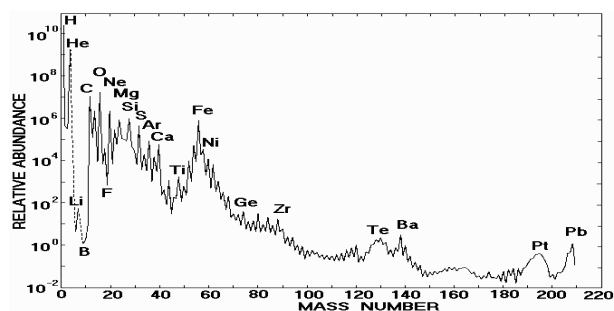


図 1: 太陽系の元素分布

図1より、元素の分布にはいくつかピークが存在していることがわかる。これらのピークをもつ元素ごとに、核融合反応過程は考えられてきた。宇宙空間で最も多く分布する水素から始まり、図1の左側の元素から反応は始まる。ある元素ごとの反応は、それぞれ反応が始まる温度ごとに異なり、水素が燃焼してヘリウムが出来る水素燃焼過程、ヘリウムが燃焼して炭素12を作るトリプルアルファ反応、また炭素12を媒介としてより重い窒素、酸素を合成していくCNOサイクルなどを反応を経て元素合成は進んでいく。これらの反応はすべて星の内

部で自発的に進行し、質量が重い星になるほど反応が進む。

それぞれの核反応が終わると、これ以上反応しない元素は燃えかすとなって星の中心にたまり、自己の重力で収縮してコアを形成していく。このように反応が進むごとに、異なる元素が積み重なっていきたまねぎの皮のような構造を形成する。この一連の自発的な核融合反応は、非常に安定な状態である鉄までいくと基本的に終了する。

これに対し、鉄より重い元素は上のような過程では作られない。結合エネルギーが最も高く、安定であるためである。重い元素を合成するためには、別のアプローチが必要となってくる。そこで次章で、現在考えられている二つの重元素合成プロセスを紹介し、第三章で課題点を議論していく。

2 s,r-process

図2は、図1とは違った視点から見た元素分布である。横軸に中性子数、縦軸に原子番号をとっており、これを見ると原子番号が大きくなるほど、中性子数が多くなっているのがわかる。よって、重元素になればなるほどたくさんの中性子を取り込む、すなわち中性子捕獲が起こっていることが考えられる。重元素を合成するためには、多数の中性子を取り込

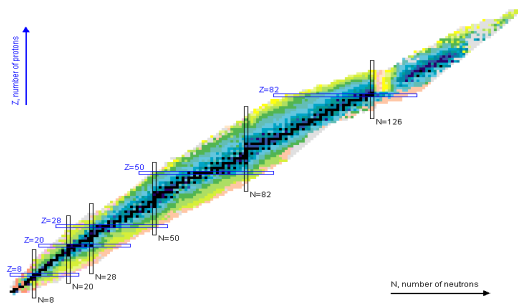


図 2: 原子番号と中性子数から見た元素分布

めるだけの環境が必要なのである。

中性子捕獲反応において、捕獲の速さに応じて、s-process (slow-process) と r-process (rapid-process) の 2 種類の過程が示唆されており、核過程が占める鉄より重い元素の比率はそれぞれ 5% 程度である。

r-process が、中性子捕獲過程がベータ崩壊よりも短いタイムスケールなのに対し、s-process は長いタイムスケールであることが異なる点である。s-process は、主に赤色巨星や AGB 星で起き、不安定核はそのままベータ崩壊しながら、順に重い安定核を登り、ピスマスまで生成する。

また、反応の確率は原子核と中性子の反応断面積と相対速度、また粒子密度に依存するため、これらから反応の起こりやすさを見積もることが出来る。

図 3 は、マクスウェル平均捕獲断面積から計算した、s-process における中性子捕獲断面積と核種の存在量の積と核種の質量との関係を示したものである。平衡状態においては、s-process で生成された各々の核種のマクスウェル平均捕獲断面積と太陽系の存在量 N は保存する。

$$\sigma_A N_A = \sigma_{A-1} N_{A-1} = \text{constant}$$

グラフを見ると、2 つの安定なプロットが存在することがわかる。このことより、s-process においては質量数 A が 100 ~ 120 程度、また 160 ~ 200 程度において安定な核種が存在することが確認できる。

s-process とは異なり、核反応は中性子捕獲反応が一気に進んで中性子ドリップラインを進み、その後ベータ崩壊して安定核となる。この過程ではウランまで

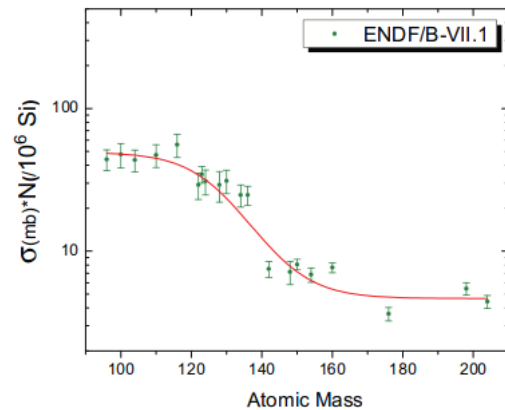


図 3: 元素の質量と中性子捕獲断面積と存在量の積

が生成されると考えられている。このように中性子捕獲反応が進むためには、非常に多くの中性子束が必要であり、超新星爆発などの爆発的な天体現象が起源であると考えられている。

3 Discussion

図 1 をもう一度見てみると、鉄以降の元素の存在比分布において、質量数 80、130、195 付近の場所にピークがあることがわかる。このことは、原子核が特に安定となれる状態の指標となる魔法数 (ここでは 50, 82, 126) をもつ原子核の中性子捕獲反応が平衡状態となり、r-process の滞留が起こるためであると考えられる。

s-process に比べて、r-process は未だ解明されていないことが多い。まず、核種が大量の中性子にさらされて中性子捕獲反応を素早く進ような天体環境を具体的に特定することが難しい。また、非常に中性子過剰な不安定核を経由することから、実験では容易に確認できないような核種の情報を得ることができると期待できる一方で、観測事実が乏しいために具体的な起源を記述することが難しいという問題もある。加えて、恒星だけでなく、惑星ひとつひとつの組成を決めているものは何なのか、対流による組成の均質化、また磁場の効果も考慮にいれて、今後考えていきたい。

Reference

Pritychenko, B. 2011, arXiv:1110.1076

Rolfs, C. E., & Rodney, W. S. 1988, Research supported by NSF, Georgetown University, DFG, et al. Chicago, IL, University of Chicago Press, 1988, 579 p.,