

Toward observational data of r-process elements from unstable nuclei

住吉光介 (沼津工業高等専門学校)

E-mail: sumi@la.numazu-ct.ac.jp

1) はじめに

r プロセス (rapid neutron-capture process) は宇宙における重元素合成の基本的な過程の一つとして考えられているが、r プロセスが宇宙のいつどこで起きたのかは現在でも明らかにはなっていない。最近、このr プロセスの起源を明らかにする手掛かりが観測と実験から得られつつある。一つには、鉄欠乏星の観測でr プロセスの存在が明らかになったことがある。太陽系でのr プロセス元素の存在比 (solar abundance) のパターンと見事に一致するような、元素存在比が観測されて、銀河形成の初期に起きた天体現象、超新星爆発によるr プロセスの起源が強く示唆されている。このため、超新星爆発でのr プロセスの解明が急務となっている。もう一つは、原子核物理の最近の発展にある。安定線から離れた所での短寿命原子核の実験が数多く行われるようになったことで、r プロセスに関わる原子核のデータが直接得られつつある。(不安定核ビームを用いた核物理の研究に関しては、研究会での谷畑氏レビュー報告を参照してください。) これらの最近の天体観測および原子核物理の発展を結び付けて、重元素の起源をさぐるべく、我々のグループでは超新星爆発での原子核データを作り上げて、r プロセス元素合成の様子を数値シミュレーションで明らかにする研究を行っている。

2) 超新星爆発におけるr プロセス

r プロセスが超新星爆発の際にいつどこで起きたのかは、超新星爆発のメカニズムとも関わる問題である。大質量の親星ではdelayed mechanismにより、爆発が起きると考えられているが、鉄のコアが比較的小さい軽い質量の親星の場合には、prompt explosionが起きる可能性も残されている。この2つの場合に起きうるr プロセスとしては、大質量星ではニュートリノ駆動風が考えられ、軽質量星では直接中性子過剰な物質を放出する可能性が考えられる。親星の質量によってr プロセスが起きる様子がもしも違うならば、それらを重元素の化学進化に組み入れて、鉄欠乏星の系統的観測と比較することにより、r プロセスの起源を絞り込むことができるはずである。我々は2つのシナリオ (ニュートリノ駆動風と質量放出) を、流体計算とr プロセス元素合成ネットワーク計算を組み合わせた数値シミュレーションにより扱い、それぞれのシナリオにおいて、どのような条件が必要なのか、そしてどのようなr プロセスパターンになるのかを探っている。

3) 数値シミュレーションによる結果

我々は超新星爆発のメカニズム解明のために開発された一般相対論的流体力学の計算コード[1]を活用して、流体素片の密度・温度の時間発展を求めて、それを元素合成ネットワークに代入して、r プロセス元素合成量を求めている。流体計算で必要不可欠な核物質の状態方程式として相対論的状态方程式テーブルを新たに採用した。[2,3] 我々は核物質の飽和性を再現することで成功を納めている相対論的多体理論に基づいて理論を構築し、不安定核構造の実験データによりチェックを行い、この相対論的状态方程式を作り上げた。超新星爆発シミュレーション用にデータが整備しており、広い範囲の密度・温度・組成をカバーしている。r プロセス元素合成のシミュレーション計算の詳細については、文献[5,8,9]を参照していただきたい。

軽質量の親星の場合に鉄のコアのサイズが小さければ、重力崩壊からバウンスした後ショックが滞

ることがなく、鉄のコアの外まで伝わり、爆発をおこすことができる可能性がある。この時、中心に残される原始中性子星の表面に近い部分から放出される物質はショックの通過時に陽子と中性子に分解され、さらに電子捕獲反応により、極めて中性子過剰になる。こうした中性子過剰な物質が直接放出されてrプロセス元素合成を起こすのが一つのシナリオである。[4]

我々はこの現象が実際に起こりえるかどうかを調べるために、太陽質量の11倍の親星の進化のモデル(Woosleyらによる)のコア部分を採用し、その重力崩壊と爆発の様子を流体計算により、まず調べた。放出される物質にまずは興味があるため、ニュートリノ輸送の取り扱いは行っていない。そこで放出される物質に関して、陽子による電子捕獲の取り扱いを施し、rプロセス元素合成の反応ネットワーク計算をおこなった結果が図1である。solar abundanceでの質量数200程度の元素まで生成されているほか、質量数130と195付近での特徴的なrプロセスピークを実に良く再現することがわかった。ここでの計算にはフリーパラメーターはなく、単に爆発の流体計算による質量放出部分の元素合成を足しあわせただけであることを付け加えておきたい。[5]

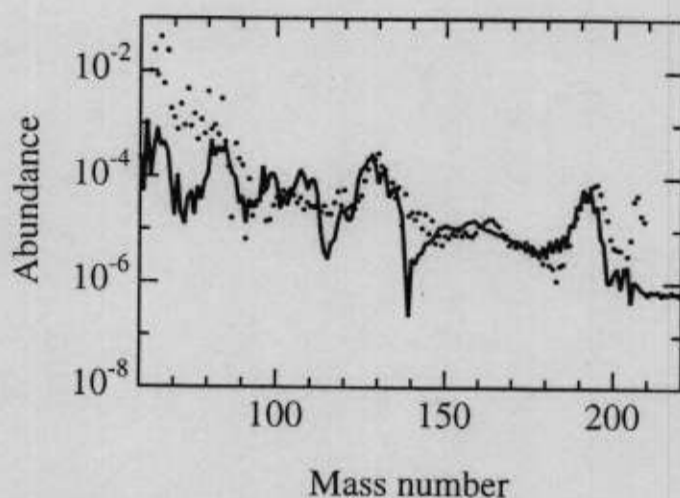


図1：11 M_{\odot} の親星の超新星爆発によるrプロセス元素合成での存在比、点はsolar abundanceによる値をスケールしたもの

大質量の親星の場合は原始中性子星が形成されてから起こる、ニュートリノ駆動風が問題となる。原始中性子星に含まれるニュートリノの放出により、表面が温められて、わずかながら中性子過剰な物質が放出される。この際に、中性子を含む割合がかなり大きいのか、密度が極めて低くなる(エントロピーが高くなる)か、膨脹が極めて速ければ、rプロセス元素合成を起こすことができる。歴史的には、エントロピーが高くなる説が初めに示され、[6]その後、困難が指摘されてきていたが、最近になり、膨脹が極めて速い場合に、rプロセス元素合成が起こりえることが明らかになってきた。[7-9]

我々のグループでは、流体計算にニュートリノによる加熱・冷却や物質の組成の変化を組み込んだ計算コードを用いて、流体の振るまいについて調べている。その結果を用いてrプロセス元素合成の反応ネットワーク計算をおこなった結果が図2である。現段階では幾つかの仮定をおいて簡単化を計っているために、現段階では強い結論を導くことはできないが、現状の結果を見ると中心に形成される原始中性子星の質量が重い場合を支持しており、rプロセスの起源として大質量星が起源となりうることを示している。また、質量によるパターンの違いも現れており、今後の詳細の数値シミュレーションにより、詳しく明らかにすべき興味ある点である。

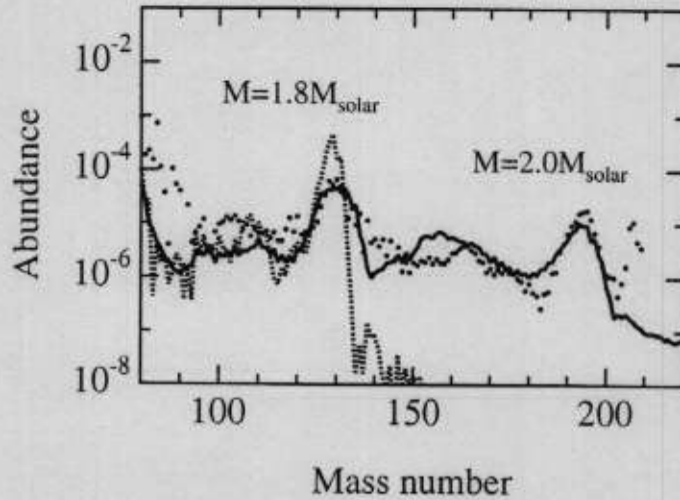


図2：原始中性子星からのニュートリノ駆動風におけるrプロセス元素合成での存在比、中性子星の質量が、 $1.8M_{\odot}$ と $2.0M_{\odot}$ の場合が示してある。

3) まとめ

最新の不安定核データをもとに超新星爆発・rプロセスに必要な核物理を提供できる体制が整いつつあり、それを元に数値シミュレーションを行い、超新星爆発でのrプロセス元素合成を定量的に議論する段階に来ている。すばるやHSTなどによる鉄欠乏星の観測によるrプロセス元素の存在比データと比較していくためには、これらのシミュレーションを系統的に行い、親星の質量範囲などを特定していく必要がある。これらの問題を通じて宇宙や銀河での元素の進化を明らかにしていきたいと考えている。

謝辞：上記の一連の研究は、寺澤真理子、大槻かおり、鈴木英之、山田章一、H. Shen、G. Mathews、谷畑勇夫、土岐博、梶野敏貴（敬称略）などの方々と共同で行っているもので、これまで共同研究を続けてこられたことを、ここに改めて感謝いたします。

Reference

- [1] S. Yamada, *Astrophys. J.* **475** (1997) 720.
- [2] H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu and K. Sumiyoshi, *Nucl. Phys.* **A637** (1998) 435.
- [3] H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu and K. Sumiyoshi, *Prog. Theor. Phys.* **100** (1998) 1013.
- [4] K. Sato, *Prog. Theor. Phys.* **51** (1974) 726.
- [5] K. Sumiyoshi, M. Terasawa, S. Yamada, H. Suzuki, G. J. Mathews and T. Kajino, in preparation for submission to *Astrophys. J.*
- [6] S.E. Woosley, J.R. Wilson, G.J. Mathews, R.D. Hoffman and B.S. Meyer, *Astrophys. J.* **433** (1994) 229.
- [7] K. Otsuki, H. Tagoshi, T. Kajino, and S. Wanajo, *Astrophys. J.* **533** (2000) 424.
- [8] K. Sumiyoshi, H. Suzuki, K. Otsuki, M. Terasawa and S. Yamada, *Pub. Astron. Soc. J.* **52** (2000) 601.
- [9] M. Terasawa, K. Sumiyoshi, T. Kajino, I. Tanihata and G. J. Mathews, submitted to *Astrophys. J.*