

論文内容の要旨

論文題目 : The r-Process Nucleosynthesis in Supernova Explosion
(超新星爆発での r-過程元素合成)

氏名 : 寺澤真理子

r (rapid)-過程元素合成(以下 r-過程)は、中性子捕獲のタイムスケールが β 崩壊のタイムスケールより速い元素合成過程であり、 β 安定線から離れた中性子過剰な領域を通して反応が進む。鉄より重い元素の約半分が r-過程によって合成されると考えられているため、r-過程を知ることは銀河の化学進化を知る上で非常に重要である。そのため、多くの研究がなされ、r-過程は非常に中性子過剰で高温、かつ、エントロピーが高い爆発的な現象で起こるということがわっている。そこで、r-過程が起こるサイトは、重力崩壊型の超新星爆発、OneMg コアの超新星爆発、中性子星の合体などいくつか考えられており、その中でも重力崩壊型の超新星爆発が最も有力である。

重力崩壊型の超新星爆発は、コアのバウンスによる衝撃波によって外層が一気に短時間で吹き飛ばされる爆発(prompt explosion)と、バウンスによる衝撃波が一度弱まったところをニュートリノの再加熱によって、衝撃波が再びエネルギーを獲得して外層を飛ばす爆発(delayed explosion)とがある。どちらの機構が起こるかははっきりとわかっていないが、少なくとも重い星の爆発では delayed メカニズムで爆発すると考えられている。

このような爆発現象では、衝撃波の通過によって原子核は自由核子に分解され、温度がさがるにつれて、まず α 粒子が合成される。そして、安定核付近の α 捕獲反応(以下 α -過程)によって質量数 $A \sim 100$ 程度の鉄族元素(r-過程で中性子がくつつく種になる核という意味で Seed 核と呼ぶ)を合成し、Seed 核から r-過程が始まり、中性子過剰領域を反応が進むと

考えられていた。そのため、これまでの r -過程の研究では、重い元素のみ注目され軽い元素は安定核付近のごく限られたものしか扱われていなかった。特に、陽子数 $Z < 10$ の元素については、 ${}^4\text{He}(\alpha n, \gamma){}^9\text{Be}$ 、 ${}^4\text{He}(\alpha \alpha, \gamma){}^{12}\text{C}$ と、 ${}^{12}\text{C}$ 以上の安定核付近の α 捕獲のみ注目されており、それ以外の反応はほとんど無視されていた。

しかし、BigBang 元素合成でさえ、軽い中性子過剰核の反応が非常に大きな役割を果たすことが知られている。そこで、これまで扱われていなかった軽い中性子過剰核のニュートリノ反応を含めた全ての反応をとりいれた原子核反応ネットワークを構築し、元素合成計算をした。その結果、非常に短いタイムスケールかつ中性子過剰な爆発現象では、軽い ($Z < 10$) 中性子過剰核反応が非常に大きな役割を果たし、重い中性子過剰核の組成比が 1 桁程度減少し、逆に $A \sim 50$ 程度の軽い核の組成比は増加するということがわかった(図 1)。これは、 r -過程が非常に軽い核から始まったことと、物質が十分遠くに飛んで温度がさがった状況でも r -過程により Seed 核をつくり続けた結果である。ここでは重い中性子星 ($M = 2.0 M_{\text{solar}}$) を仮定した delayed explosion のモデルを用いたが、prompt explosion や中性子星の合体などの中性子過剰な環境で、かつ、爆発のタイムスケールが非常に短い爆発現象では、非常に重要であることが期待される。

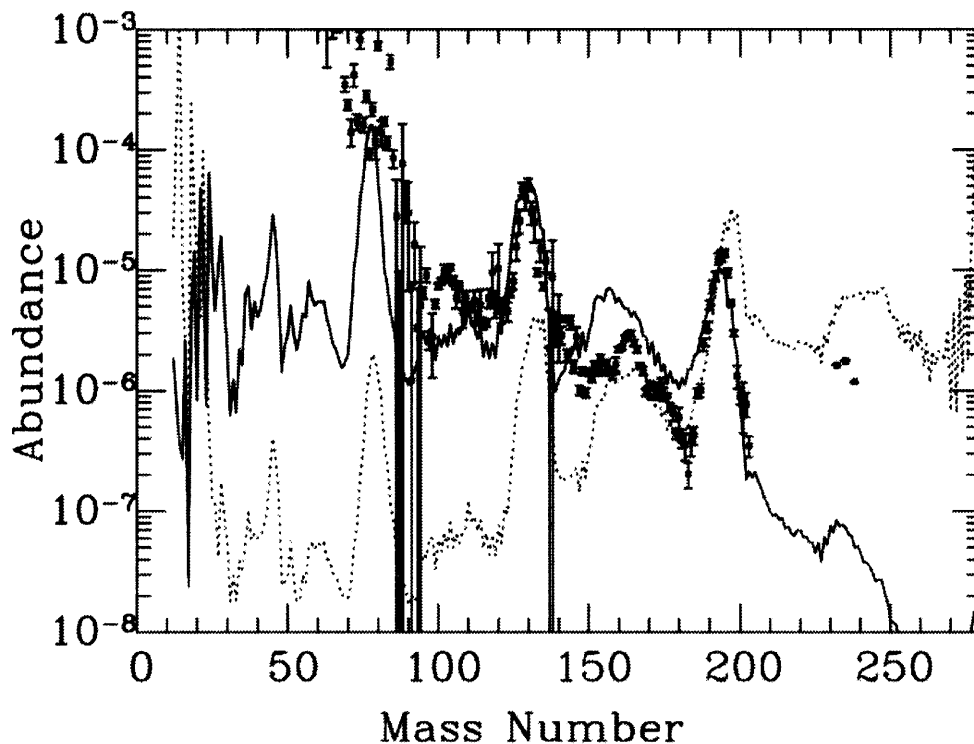


図 1. 最終的な元素の組成比。横軸は質量数で、縦軸は組成比である。実線は、拡張したネットワークを用いた場合で、点線は拡張前のネットワークを用いた場合の計算結果である。データ点は太陽系の r -過程元素の組成比である (Kappeler et al. 1989)。

Delayed explosion では、非常に強いニュートリノフラックスが発生し、ニュートリノと原子核の反応が r-過程を抑制することが知られている。さらに、ニュートリノ過程が r-過程に与える影響を最小限にするためには、爆発のタイムスケールがニュートリノ反応のタイムスケールより充分短い爆発モデルが必要であることがわかっている。典型的な中性子星の質量は $1.4 M_{\text{solar}}$ と考えられているが、これまでの理論計算では、 $M \sim 2.0 M_{\text{solar}}$ 、 $R \sim 10 \text{ km}$ という非常に重いコンパクトな中性子星を残すモデルしか、太陽系の r-過程元素の組成比を再現できなかった。しかし、先の研究から delayed explosion のように非常に短いタイムスケールの爆発では、物質が十分遠くに飛んで温度がさがった状況での r-過程が重要であることがわかった。そこで、境界条件となる圧力(P)をパラメーターにし、超新星爆発のシミュレーションを行った。そして、r-過程元素の組成比の境界条件依存性を調べた。その結果、典型的な中性子星、 $M=1.4 M_{\text{solar}}$ 、 $R=10 \text{ km}$ 、を仮定した場合でも、r-過程が起りうることがわかった(図2)。

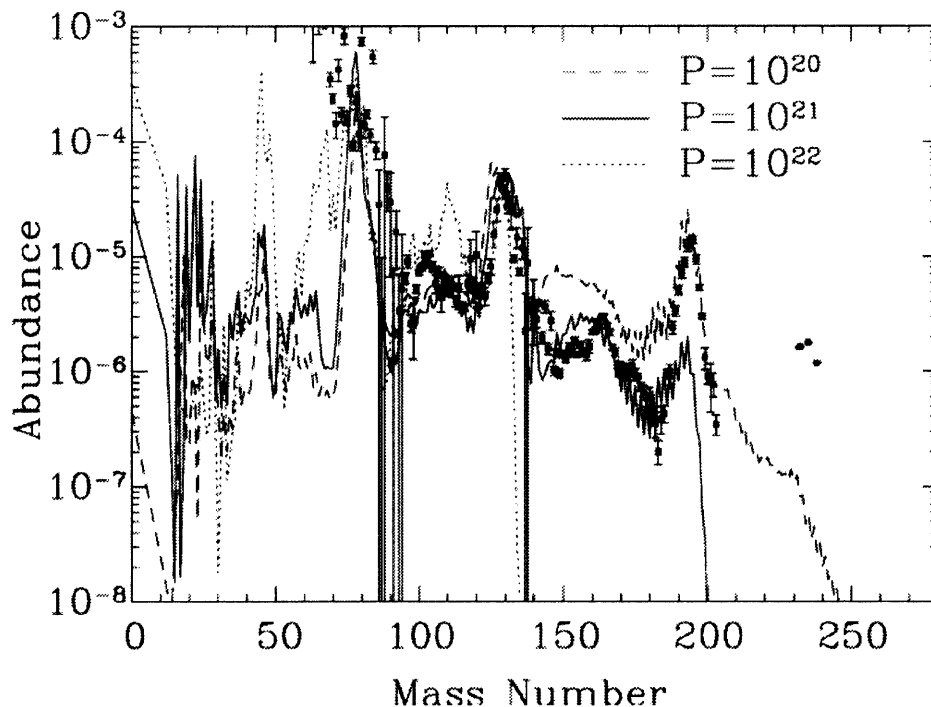


図2. 図1同様、 $M=1.4 M_{\text{solar}}$ の場合の元素の組成比。破線は $P = 10^{20} \text{ dyn/cm}^2$ 、実線は $P=10^{21} \text{ dyn/cm}^2$ 、点線は $P=10^{22} \text{ dyn/cm}^2$ の場合である。データ点は太陽系の r-過程元素の組成比。

一方、これまで r-過程は起こらないとされていた prompt explosion についてもシミュレーションを行い、再度 r-過程元素合成のネットワーク計算を試みた。Prompt explosion は比較的軽い星の超新星爆発と考えられているため、ここでは中性子星の質量を $1.2 M_{\text{solar}}$ とした。その結果、 $A > 100$ の元素について太陽系の r-過程元素の組成比を非常によく再現で

きた(図3)。さらに、爆発により放出される重元素量を計算したところ、銀河の化学進化を説明できることもわかった。

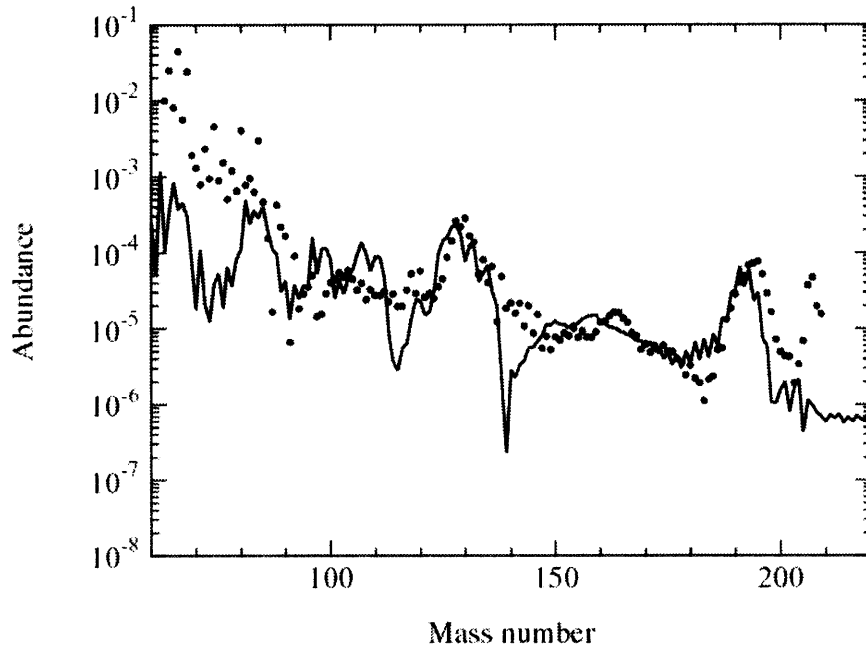


図3. 図1、2同様、元素の組成比。実線は今回の計算結果を示し、データ点は太陽系の r - 過程元素の組成比を示す。

以上、本論文では、r-過程の起こる最も有力なサイトだと考えられている重力崩壊方の超新星爆発における r-過程元素合成を詳細に調べ、r-過程において重要な原子核反応、r-過程の起こる条件を調べた。その結果、重力崩壊型の超新星爆発で r-過程が起こる可能性は非常に大きいことが確認できた。今後は、現在進んでいる、古い星での重元素の観測、不安定な中性子過剰核の実験の結果を、随時取り入れ比較することによりさらに詳細な制限を試みる。