

平成 21年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18540279  
 研究課題名（和文） 超新星の磁気回転爆発に伴う中性子星形成と元素合成  
 研究課題名（英文） SUPERNOVAE DUE TO MAGNETO-HYDRODYNAMICAL EXPLOSIONS RELATED TO THE FORMATION OF NEUTRON STARS AND NUCLEOSYNTHESIS  
 研究代表者  
 橋本 正章（HASHIMOTO MASA-AKI）  
 九州大学・大学院理学研究院・教授  
 研究者番号：20228422

## 研究成果の概要：

超新星爆発の磁気回転爆発シミュレーションを行い、爆発に伴う重元素合成、爆発的要素合成のシミュレーションを原子核合成のプログラム、核反応ネットワークを開発して遂行した。計算の初期モデルとして、従来、我々が開発してきた大質量星の進化の最終段階のモデルを数値流体の計算に適合するように再構築し、星のコア部分に回転と磁場を与えた。その結果、軽元素を除くほとんどの元素が太陽系組成比に匹敵するほど生成されることが分かった。また、ほとんどの場合、中性子星形成には至らなかった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	420,000	2,920,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理、超新星、元素合成、中性子星、磁気流体力学、回転星

## 1. 研究開始当初の背景

背景：超新星爆発の研究は過去数十年にわたって行われてきたが、未だに爆発のメカニズムが解明されていない。多くの超新星が大質量星をその起源に持っており、超新星 1987A の場合には親星もわかっているが爆発の理由が不明である。多くの研究の結果、最近では爆発には多次元の効果が極めて重要であることが分かってきたが、親星の磁場の分布と角運動量の分布から磁気回転爆発が示唆されている。しかしながら、超新星爆発のメカニズムを解明するには、3次元の流体力学

シミュレーションとニュートリノ輸送をボルツマン方程式で解きながらカップルさせて計算する必要がある、現在のコンピュータパワーでは不可能に等しいといわれている。そこで、我々はこの点に着目し、超新星爆発のメカニズムはフル計算を単純化してモデルとして行い、観測量が豊富なことを考慮して、長年の歴史的蓄積の多い超新星の観測的分類を手がかりにして、超新星爆発に伴う元素合成により爆発モデルに制限を与え、超新星爆発モデルに新たな知見を得ることを考えた。

## 2. 研究の目的

超新星の磁気回転爆発のシミュレーションを行うことにより、元素の起源に一石を投げ、超新星と元素合成の研究に新たな展開を進めることを目的とした。特に、我々の超新星研究はこれまで球対称爆発に限られてきたので、この研究により2次元の爆発計算を行うことにより、超新星のジェット状爆発モデルを構築したい。その際、モデルの正当性は元素合成結果がはたして観測と整合性を持ちうるかにかかっており、この点を中性子星形成と合わせて包括的見解を得る。

## 3. 研究の方法

期間内の研究方法として次のような計画を立てた。まず、シミュレーションに必要な道具を整理、開発必要がある。これまで研究を進めてきた、恒星進化計算、核合成、磁気流体計算のプログラムを拡張、発展させるために4段階にわけ大学院生を中心に組織的に研究を進めた。

- 1) 恒星進化プログラムを再稼働し、従来進めてきた大質量星の進化計算を再現し、特に核燃焼に伴う対流領域を再計算し、其の領域を数値的に特定する。
- 2) 核反応ネットワークプログラムの拡張とバージョンアップ：元素合成計算に必要な核合成プログラムの原子核データを最新のバージョンにする。1)の恒星進化計算に伴う大規模元素合成を行う準備をする。1)の計算では30種類の原子核種を用いて計算していたので、それを500核種程度に拡張しておこなう。これにはポストプロセス法を用いる。その際、星の進化過程で起こる対流領域の取扱を1-ゾーン法で行うように元素合成計算プログラムを開発する。また超新星爆発に伴う重元素合成を行うため、数千各種を含む元素合成ネットワークプログラムを整備する。
- 3) コラプサーモデル計算用の磁気流体プログラムの開発：超新星爆発そのものは現在でもそのメカニズムが未解決なのでガンマー線バースの有力モデルであるコラプサーをシミュレーションできるダイナミクスのプログラムを開発する。ニュートリノ損失率は降着円盤モデルから求められた近似式を用いてエネルギー方程式に導入する。またアルファネットワークという近似ネットワークを用いて核反応に伴う原子核エネルギーの解放を調べ、有効な場合にはダイナミクスのエネルギー方程式に核融合のエネルギー生成率を加えシミュレーションを行う。
- 4) ニュートリノ輸送を近似的なニュートリノスキームを用いて2次元計算に導入す

る。その際、チェックとしてボルツマン輸送を厳密に解いた初期モデルが同じ球対称計算と比較して近似の妥当性を見る。2次元の磁気回転のシミュレーションをバウンス後500ミリから1秒程度まで追い、中性子星形成を確かめる。バウンスの衝撃波により爆発が成功する磁場と回転のパラメータを見つける。そしてそのパラメータで元素合成の可能性を調べる。とくに電子数の低いジェット物質が外層まで伝わる場合のパラメータを探り、重元素合の可能性を調べる。

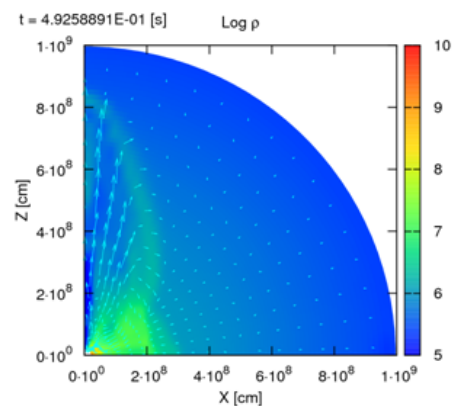
## 4. 研究成果

超新星爆発に関して、我々はガンマー線バーストに関連するモデルを用いた場合と恒星進化の最終モデル(鉄コアモデル)を初期モデルとして重力崩壊、バウンス、原始中性子星形成と元素生成の可能性を調べた。計算は修士課程と博士課程の院生が中心になり行い、研究成果の発表は論文、学会発表にあるように共著者として加わっている。

(1) ガンマー線バーストに関連する超新星爆発のコラプサーモデルと元素合成：

超新星爆発を起こす前に、初期モデルを元素合成に関して現実的なものにするために進化モデルに500個程度からなる核反応ネットワークを組み込んだ形式で元素合成を再計算した。およそクリプトンまでの元素組成を詳細に計算した結果、ヘリウム燃焼段階におけるSプロセス元素合成をチェックすることができた。球対称計算で用いた30個核種のネットワークで省いた多くの元素を正確に算出した。静水圧平衡段階で生成された元素は超新星爆発により再合成されるが、衝撃波がシリコン層と酸素層を通過する場合に特に元素合成が起きると予測される。

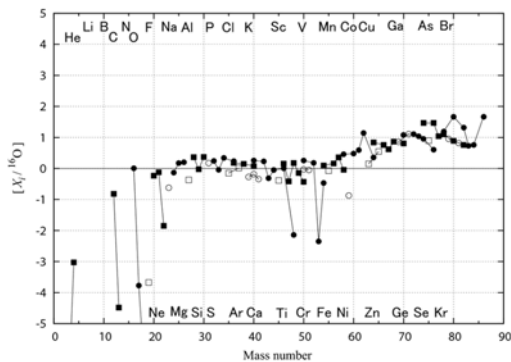
我々は先ずコラプサーモデルを構築した。初期モデルに磁場と回転を与え、中心部にブ



ラックホールを仮定してシミュレーションすることにより適当な磁場と回転のパラメータにより強いジェットが鉄コアの外側に出ていくことを再現した。上の図はジェット

が極軸方向に成長していることを表し、鉄コアのそとまでジェットが出ている。青色の部分は密度が対数スケールで5-6 [CGS]を表し、極軸が特に密度が薄くなっている。矢印は速度場を表し外向き速度を担っている。このモデルを用いて詳細な元素合成計算を遂行した。その結果、球対称計算で考えられていた放射性元素がこのモデルでも生成され、さらにジェットの持続時間を考慮するとIC型超新星のニッケルの生成量を合成できるということが分かった。この指摘は我々が初めて行った。さらに衝撃波がジェットに発展する場合、磁場と回転のパラメータと爆発に伴う質量放出率との関連を詳細に分析した。このような分析は従来なされなかったものである。この研究の国際的に見て評価されるべきものは、超新星爆発にともないジェットにより放出される物質の元素分布が太陽系組成比と極めてよく一致するという点である。従来の球対称の計算では進化過程での元素合成は近似的にしか考えていなかったため太陽系組成比の一部しか再現できなかったが、今回の研究により質量数が90程度までの大部分の太陽系組成比を再現できることが分かった。これは爆発にともなう元素合成が初期組成に依存する部分とそうでなく爆発そのものでだけできる部分にわかれ、両者を重ね合わせることで初めて太陽系組成比を再現できるという結論を得た。これらの成果をまとめて学術雑誌 Progress of Theoretical Physics に現在投稿中である。

図は太陽系組成比との比較で横軸が元素の質量数、縦軸は太陽系組成との生成比であるが、超新星爆発でできる主要な元素は横にほぼ直線状にならび再現されていることに

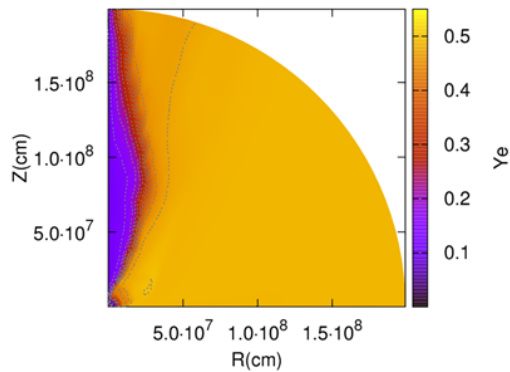


なる。軽い元素のほうは低質量星に起源があることが分かっている。重い方の元素が過剰にできているのは星の進化段階でのヘリウム燃焼で、s-過程元素合成が起こったことを示している。

(2) ニュートリノ輸送を導入した磁気回転爆発シミュレーションと重元素合成:

大質量星の進化の最終段階のモデルを初期モデルとし、この鉄コアの重力崩壊、バウンスを一貫してシミュレーションした。その際にニュートリノ輸送をリーキッジスキームと呼ばれる方法で導入し、爆発に対する影響を調べることに成功した。ニュートリノの輸送モデルの正当性をみるために球対称の計算でボルツマン方程式を厳密に解いてニュートリノ輸送を取り入れた計算と比較し、十分良い近似で再現できることを示した。リーキッジスキームを2次元の磁気回転爆発のシミュレーションに適用し、500ミリから秒に至るシミュレーションを遂行し、原始中性子星の形成まで計算を続けた。その結果、爆発可能な初期の磁場と回転のパラメータを見出すことに成功した。初期の磁場と回転はかなり強くないと爆発に至らないことが分かった。さらに爆発はジェット状と球状に広がるモデルが存在することが判明した。

次に流体粒子法を用いて爆発により放出される物質の元素合成の可能性を詳細に調べた。その結果、爆発により必ずしも電子数が低い物質が放出されるのではなく、ニュートリノ輸送による電子捕獲とニュートリノ放射にともなうニュートリノ反応のかなり微妙な差により電子数にかなり大きな違いがでることが分かった。このことはこれまで気づかれていなかったことで、今回の計算で初めて2次元の爆発により重元素合成が可能になることが分かった。また、以前の我々の研究では重元素合成は原子核種の熱力学的平衡状態を出発して行えると考えていたが、今回ニュートリノを導入することにより、この近似では正しく元素合成を計算できないことがわかり、電子数を変化させながら計算していく必要があることが判明した。下図は強い初期磁場と微分回転を与えて爆発に成功したモデルであり、爆発に際してジェット状に衝撃波が伸びていることに対応して、ニュートリノ反応により電子数比 (Ye) 分布が0.1(紫色)から0.5(オレンジ色)まで幅広く分布することを示した図である。Ye分布が0.5に近い分布は球対称爆発と同様な爆発的要素合成を起こすが、Yeが0.1から0.2の領域(紫色)は典型的重元素合成の一つ r-過程要素合成が起きる領域であり、この部分が超新星爆発で放出されれば宇宙の元素進化に寄与する。従来の議論では超新星爆発のシミュレーションで r-過程元素を生成できなかったが我々のシミュレーションによりその可能性を提示することができた。



ただし、爆発が可能ためには磁場と回転のパラメータのかなり細かい微調節が必要となり、さらにニュートリノ輸送の多次元的效果をどう取り入れるかが今後の課題として残った。また、磁気流体力学シミュレーションの数値的正確さは多くの研究でも必ずしもチェックされていないので、この点もチェックしていく必要がある。これらの結果は学会等で発表し、学術雑誌に投稿準備中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① S. Nishimura, K. Kotake, M. Hashimoto, S. Yamada, N. Nishimura, K. Sato  
R-Process Nucleosynthesis in MHD Jet Explosion of Core-Collapse Supernovae  
The Astrophysical Journal, 642, 2006, 410-419  
査読有
- ② S. Fujimoto, K. Kotake, S. Yamada, M. Hashimoto, K. Sato  
Magnetohydrodynamic Simulations of a rotating massive star collapsing to a black hole  
The Astrophysical Journal, 656, 2006, 1040-1055  
査読有
- ③ S. Fujimoto, M. Hashimoto, K. Kotake, S. Yamada  
Heavy element nucleosynthesis in a Collapsar  
The Astrophysical Journal, 656, 2007, 383-392  
査読有
- ④ N. Yasutake, K. Kotake, M. Hashimoto and S. Yamada  
Effects of QCD phase transition on the gravitational radiation from the magneto-rotational core collapse of massive stars  
Physical Review D, 75, 2007, 084012-1-12  
査読有
- ⑤ N. Nishimura, M. Hashimoto, S. Fujimoto, K. Kotake and S. Yamada  
AIP Conference Proceedings, 847, 2006, 452-454  
査読有
- ⑥ T. Noda, M. Hashimoto, M. Fujimoto and K.

Arai

Exotic Cooling on Isolated Neutron Stars with Different Surface Compositions  
Physics Report of Kumamoto University, 12, 2006227-0232 査読無

⑦ S. Matsuura, S. Fujimoto, M. Hashimoto and K. Sato

Reply to "Comments on 'Heavy element production in inhomogeneous big bang nucleosynthesis'"

Physical Review D, 75, 2007, 383-392

⑧ S. Fujimoto, N. Nishimura, M. Hashimoto  
Nucleosynthesis in Magnetically Driven Jets from Collapsars

The Astrophysical Journal, 680, 2008, 1350-1358  
査読有

⑨ R. Nakamura, M. Hashimoto, K. Ichiki

Cosmic microwave background constraints on a decaying cosmological term related to the thermal evolution

Physical Review D, 77, 2008, 1-8, 査読有

⑩ M. Ono, M. Hashimoto, S. Fujimoto, K. Arai  
Physics Reports of Kumamoto University, 13, 2008, 33-46 査読無

[学会発表] (計 6 件)

超新星爆発とニュートリノ

猿渡元彬、橋本正章、固武慶、山田章一  
日本物理学会九州支部例会、大分大学、2007年12月1日

Yitem First Star の形成過程 Y ¥件)

① 大質量星の進化における重元素合成  
西村信哉、橋本正章、藤本信一郎  
日本物理学会九州支部例会、大分大学、2007年12月1日

② 大質量星の進化における重元素合成  
西村信哉、橋本正章、藤本信一郎  
日本物理学会九州支部例会、大分大学、2007年12月1日

③ 超新星爆発とニュートリノ  
猿渡元彬、橋本正章、固武慶、山田章一  
日本物理学会九州支部例会、大分大学、2007年12月1日

④ 大質量星の進化における重元素合成:  
weak s-process による生成物  
西村信哉、橋本正章、藤本信一郎  
日本物理学会第 63 回年次大会、近畿大学、2008年3月22日-26日  
西村信哉、橋本正章、藤本信一郎

⑤ 大質量星の進化における重元素合成  
日本物理学会、2008年3月24日、近畿大学本部キャンパス  
小野勝臣、橋本正章、藤本信一郎、固武慶、山田章一

⑥ Collapsar model における初期の磁場と回転がジェットに与える影響

日本天文学会春季年会、2008年3月24日、国立オリンピック記念青少年総合センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 正章 (HASHIMOTO MASA-AKI)  
九州大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号：20228422

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：