

平成30年6月26日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17668

研究課題名(和文) 超新星元素合成の系統的研究

研究課題名(英文) Systematic Study of Explosive Nucleosynthesis in Supernovae

研究代表者

中村 航 (Nakamura, Ko)

福岡大学・理学部・助教

研究者番号：60533544

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：大質量星の進化の最後に行きつくと考えられている重力崩壊型の超新星は、爆発の際に大量の重元素を生成し、銀河の化学進化・物質循環において主要な役割を担っている。元素合成量を調べるには長時間の数値計算に基づくデータが必要であるが、第一原理的な詳細計算は計算量が膨大になり長時間の発展を追うことが難しい。今回の研究では、スーパーコンピュータと先進的な手法を用いて空間多次元での超新星の長時間計算を実現し、爆発的要素合成量を算出した。とくに陽子過剰核であるモリブデンとルテニウムに注目して解析したところ、それぞれ異なる環境で生成されていることがわかった。得られた組成比は、太陽系組成と興味深い一致を示した。

研究成果の概要(英文)：Core-collapse supernovae play important roles in the galactic history. In particular, heavy elements synthesized in their explosions are the main source of the iron-group elements and rare isotopes. Explosive nucleosynthesis has been theoretically studied by means of very simple numerical supernova model since the first-principle supernova simulation is computationally expensive and limited in a short time scale. We have demonstrated multi-dimensional long-term simulations employing a new numerical scheme and a super computer system at NAQJ. We found that some p-rich isotopes such as Mo and Ru are synthesized in a different environment in the supernova. We also found that the abundance pattern of the elements show interesting agreement with the solar abundance.

研究分野：理論宇宙物理学

キーワード：超新星 元素合成 数値シミュレーション ニュートリノ

### 1. 研究開始当初の背景

大質量星が進化の最終段階で経験する重力崩壊型超新星は、爆発の際に大量の重元素を生成する。この重元素は太陽系に存在する重元素の約半分を占め、また銀河の化学進化において重要な役割を担うが、超新星の観測から爆発で合成される各元素の総量を詳細に見積もることは難しく、数値計算に基づく理論予測がおこなわれてきた。しかし、元素合成計算を目的としたこれまでの超新星計算は球対称爆発を仮定したものが多く、球対称を仮定するとそもそも爆発しないという超新星コアの詳細な数値計算の結果と矛盾していた。

また、重力崩壊の際に中心から照射される大量のニュートリノは、爆発自体に決定的な役割を果たすと同時に特徴的な元素合成反応を引き起こすが、従来の元素合成用の超新星モデルは中心部を計算領域から除外しているため、ニュートリノ光度やエネルギー分布を仮定する必要があった。しかし、近年の系統的超新星探査による観測の大幅な進展と、計算機資源の充実による大規模数値シミュレーションの発展により、現実的な超新星モデルに基づく爆発的要素合成計算を様々な質量の親星に対して実現することへの期待が高まりつつあった。

### 2. 研究の目的

本研究は、ニュートリノによって駆動される重力崩壊型超新星の2次元数値計算の結果を用いて、セルフコンシステントな超新星モデルに基づいた爆発的要素合成の計算をおこなう。重力崩壊型超新星の下限質量と考えられている10太陽質量から最大75太陽質量までの幅広い質量領域を網羅し、先進的な近似法を用いてニュートリノ輸送を解いて、各親星に対応するニュートリノ放射や流体運動の時間発展を10秒程度追う。中心コアの重力崩壊から原始中性子星の形成を経て衝撃波の膨張に至る、これまでに前例のないサンプル数の長時間データを得る。各親星に固有の元素合成パターンに注目して核反応ネットワーク計算を実行し、銀河化学進化のモデル構築に応用可能な大規模超新星元素合成データの作成を目的とする。

### 3. 研究の方法

以下の2つの段階に分けて取り組む。(1)超新星親星の重力崩壊から原始中性子星と衝撃波の形成、ニュートリノ放射、衝撃波の膨張にともなう外層の加熱に至る一連の過程を、ニュートリノ輸送を考慮した2次元数値計算で調べる。核反応計算に使うデータを得るには長時間計算する必要があるため、超新星の系統的先行研究を参考にして使用する親星を厳選する。(2)超新星計算で得たデータを基にニュートリノ反応を含む核反応ネットワーク

計算を実行し、超新星爆発で合成される各元素量を算出する。特徴の異なる親星が起こす超新星爆発により元素合成量がどの程度変化するかを調べることによって、爆発的要素合成の系統的傾向を明らかにするとともに、これまでの超新星計算で生成することが困難だった元素を生み出す条件を調べる。

### 4. 研究成果

以下、得られた成果について順に述べる。

#### (1) 超新星の長時間進化計算

先行研究として既に、約400個の超新星親星モデルに対して重力崩壊からコアバウンスを経て衝撃波が発生する過程を計算していたが、爆発的要素合成のためのデータとして使用するには計算時間が短すぎるといった問題があった。そこで、その中から10個のモデルを選択し、バウンス後約10秒間にわたる長時間数値シミュレーションを実行した。先行研究から、超新星爆発を特徴付ける物理量は親星の密度構造と密接な関わりがあることがわかっていたので、密度構造を表すコンパクトネスパラメータの値を幅広く含むように親星モデルを選択した。

計算で得られた超新星爆発の様子を表すエントロピー分布と衝撃波の形状を図1に示す。当初の予想通り、爆発エネルギーや中心に残されるコンパクト天体の質量など、超新星を特徴付ける量はコンパクトネスと良い相関を示した。また、一部のモデルは超新星の典型的な爆発エネルギーである $10^{51}$ エルグに達した。これは、パラメータを含まないセルフコンシステントな計算の結果として注目すべき成果である。一方で、軸対称性を課した空間2次元の計算であるため、多くのモデルで衝撃波が対称軸に沿って発達し、それに垂直な赤道方向からの質量降着を止めることができずに最終的にブラックホールになってしまった。この点は空間3次元の計算では異なる結果になることが予想され、今後の課題である。

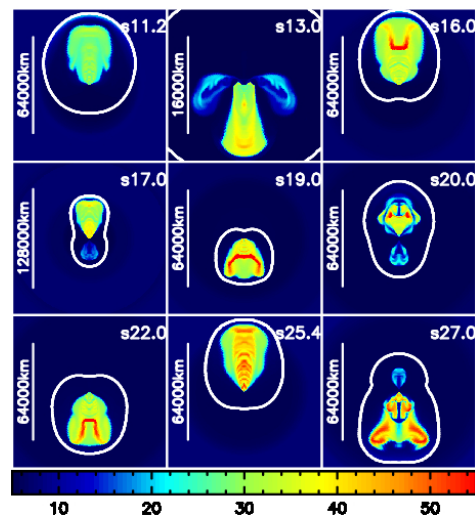


図1. バウンス後5秒におけるエントロピー分布と衝撃波面のスナップショット。初期質量の異なる親星が様々な爆発の様相を示していることがわかる。

## (2) 爆発的要素合成計算

長時間計算を実行した10モデルの中から、初期質量が11.2太陽質量および17太陽質量の2モデルのデータを基に、爆発的要素合成計算を実行した。この2モデルはそれぞれ、コンパクトネスが最も小さく爆発エネルギーも小さいモデルと、コンパクトネスが比較的大きく、爆発エネルギーが典型的な観測値である $10^{51}$ エルグに達したモデルに相当する。

各時刻での流体データを用いて、約13万個の追跡粒子の密度・温度の時間発展データを構築し(図2参照)、2700核種からなる核反応ネットワークに投入して元素合成計算をおこなった。その結果、どちらのモデルでも鉄属元素を越える重元素が生成されていることを確認した。また、特に陽子過剰核に注目して詳細な解析をおこなったところ、モリブデン同位体( $^{92,94}\text{Mo}$ )はどちらの超新星モデルでも生成されていたが、ルテニウム同位体( $^{96,98}\text{Ru}$ )は11.2太陽質量モデルのごく限られた条件下でしか作られなかった。初期に陽子過剰な環境で陽子捕獲反応が逆ベータ崩壊の停滞点( $^{64}\text{Ge}$ ,  $^{68}\text{Se}$ ,  $^{72}\text{Kr}$ )まで進み、陽子の反電子型ニュートリノ吸収で作られた中性子による(n, p)反応で停滞点を脱してルテニウムまで元素合成が進む $\nu$ p過程を経験したと考えられる。

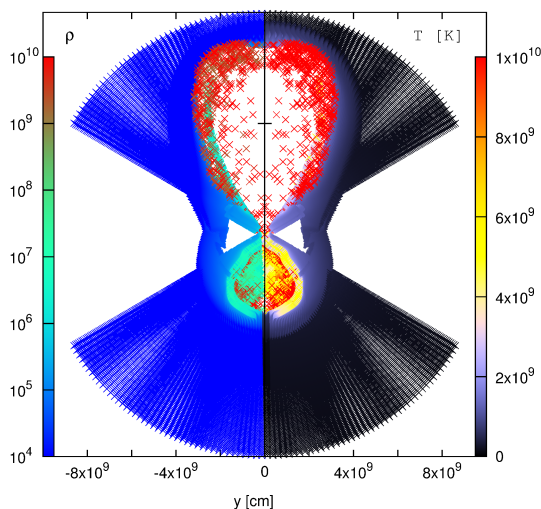


図2. 17太陽質量モデルの爆発計算の結果に基づいて追跡粒子の振る舞いを調べている様子。衝撃波が南北方向に発達し、その内部が非常に高温・高密度になっていることがわかる。

## (3) 超新星マルチメッセンジャー信号解析

超新星の長時間計算から得られるデータは、元素合成以外にも様々な使い途がある。その一例として、我々がいる天の川銀河で超新星爆発が発生した場合に観測されるあらゆる信号(電磁波・ニュートリノ・重力波、総称してマルチメッセンジャー信号)を計算データから予測し、想定される観測量から元の超新星の構造にどこまで迫ることができるのかを解析した。

特に爆発エネルギーが $10^{51}$ エルグに到達した初期質量が17太陽質量のモデルに注目して、銀河中心でこの超新星が爆発したと仮定し、スーパーカミオカンデで検出されるニュートリノ数を見積もった。また、流体データから四重極公式を用いて重力波を算出し、4台の重力波検出器(LIGO-H, LIGO-L, Virgo, KAGRA)での波形から元の重力波形を再構築することを試みた。さらに、爆発的要素合成で生成されたニッケル同位体( $^{66}\text{Ni}$ )の放射性崩壊などを考慮して電磁波の光度曲線を推定した。

その結果、ニュートリノの検出数は、ニュートリノ振動の不定性は残るものの、元の超新星モデルのニュートリノ光度曲線を再現するのに十分な数得られた。特に、バウンス直後から検出可能なので、衝撃波が星の表面に到達する前に爆発を予言可能であることがわかった。また、ニュートリノと電子の散乱反応から超新星のおおまかな方向も予言可能なので、これらの情報をいち早く超新星の電磁波観測コミュニティに通報し、電磁波フォローアップ観測を開始する体制作りが重要であると提言した。重力波に関しても、ニュートリノ観測によるバウンス時刻の同定を用いてその時刻前後を解析することによって、銀河中心程度の距離までであれば検出可能であることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

① 堀内 俊作、住吉 光介、中村 航、Fischer, Tobias, Summa, Alexander、滝脇 知也、Janka, Hans-Thomas、固武 慶、Diffuse supernova neutrino background from extensive core-collapse simulations of 8-100 solar mass progenitors, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society、査読有、475、2017、1363-1374

DOI: 10.1093/mnras/stx3271

② Eichler M、中村 航、滝脇 知也、黒田 仰生、固武 慶、Hempel M、Cabezón R、Liebendoerfer M、Thielemann F-K、Nucleosynthesis in 2D core-collapse supernovae of 11.2 and 17.0 solar mass progenitors: implications for Mo and Ru production, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics、査読有、45、2017、014001

DOI: 10.1088/1361-6471/aa8891

③ 中村 航、堀内 俊作、田中 雅臣、端山 和夫、滝脇 知也、固武 慶、Multi-messenger signals from core-collapse supernovae, Proceedings of the IAU Symposium 329、査読有、329、2017、428

DOI: 10.1017/S1743921317001193

④ 中村 航、滝脇 知也、黒田 仰生、固武 慶、

Systematic Features and Progenitor Dependence of Core-Collapse Supernovae, Proceedings of NIC-XIV、査読有、2017、010610  
DOI: 10.7566/JPSCP.14.010610

⑤ Eichler, Marius、中村 航、滝脇 知也、黒田 仰生、固武 慶、Hempel M、Cabezón R、Liebendoerfer M、Thielemann F-K、Nucleosynthesis in 2D Core-Collapse Supernova Long-Term Simulations of 11.2 and 17.0 Solar Mass Progenitors、Proceedings of NIC-XIV、査読有、2017、020604  
DOI: 10.7566/JPSCP.14.020604

[学会発表] (計 18 件)

① 中村 航 「Neutron Star Kick induced by Aspherical Core-collapse Supernova Explosions」 Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations、2018 年 3 月 20 日、早稲田大学 (東京都新宿区)

② 中村 航 「重力崩壊型超新星の長時間数値計算に基づく中性子星キック」日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年 3 月 17 日、千葉大学 (千葉県千葉市)、

③ 中村 航 「重力崩壊型超新星の 3 次元長時間計算に向けて」日本天文学会 2017 年秋季年会、2017 年 9 月 12 日、北海道大学 (北海道札幌市)

④ 中村 航 「Systematic features of core-collapse supernova based on multi-D simulations」Workshop on the Progenitor-Supernova-Remnant Connection、2017 年 7 月 25 日、リングベルク (ドイツ)

⑤ 中村 航 「Multi-messenger signals from core-collapse supernovae」IAU Symposium 329 "The lives and death-throes of massive stars"、2016 年 11 月 28 日、オークランド (ニュージーランド)

⑥ 中村 航 「回転する重力崩壊型超新星の 2 次元数値計算」日本天文学会 2016 年秋季年会、2016 年 9 月 16 日、愛媛大学 (愛媛県松山市)

⑦ 中村 航 「Systematic features and progenitor dependence of core-collapse supernovae」NIC - XIV、2016 年 6 月 22 日、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)

⑧ 中村 航 「Supernova as sources of multi-messenger signals」International symposium on "Revealing the history of the universe with underground particle

and nuclear research"、2016 年 5 月 13 日、東京大学 (東京都文京区)

[その他]

ホームページ等

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/nakamura/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 航 (NAKAMURA, Ko)

福岡大学・理学部物理科学科・助教

研究者番号：60533544