

大型シミュレーション研究

中性子星およびブラックホール形成時のニュートリノ放出に関する数値シミュレーション 実施報告書

代表者： 鈴木 英之 (すずき ひでゆき) 東京理科大学理工学部 教授

メンバー： 住吉 光介 (すみよし こうすけ) 沼津工業高等専門学校教養科 准教授

山田 章一 (やまだ しょういち) 早稲田大学理工学部 教授

大質量星のコアが重力崩壊して、超新星爆発を起こさずにブラックホールになってしまふケースについて、住吉、中里を中心として親星や状態方程式がニュートリノバーストに与える影響を詳しく調べた。また重い星のコアの重力崩壊において、核統計平衡状態の元素組成と、Shen らの状態方程式による代表的原子核の比較を行い、電子捕獲率やニュートリノ散乱率に大きな違いが存在することを確認した。Polar Slicing を用いた一般相対論的流体計算コード開発に関する研究も行った。

● Polar Slicing を用いた一般相対論的重力崩壊シミュレーション

これまで、重力崩壊型超新星爆発に関する研究の多くは爆発機構に焦点が当てられてきたが、近年住吉らによって爆発せずブラックホールが形成される場合の超新星コアの進化やその際のニュートリノ放出に関する研究が行われている。我々はこれまで、ブラックホール形成イベントの光学観測に焦点をあて、中心にブラックホールが形成された大質量星の外層が収縮していく段階を数値シミュレーションを用いて調べてきたが、ブラックホール形成を取り扱うにはあまりふさわしくない time slicing を使用してきた。本年度は、小林と共同してブラックホール中心の特異点を避ける Polar Slicing の採用について検討し、球対称の流体計算コードを作成した。

● ブラックホール形成時のニュートリノバースト

また住吉を中心として、早稲田大学の山田の Boltzmann solver によるニュートリノ輸送コードを用いた超新星コアの重力崩壊のシミュレーションを進めてきた。これは、球対称の仮定の下での一般相対論的ニュートリノ輸送の方程式を直接解くもので、拡散近似などの近似をしない精度の高い計算法である。複数の親星のモデルを使った数値シミュレーションの結果から、コア周りの密度分布が、放出されるニュートリノバーストの時間発展に大きく影響することなどを明らかにした。また、中里との共同研究により、このようなブラックホール形成時に放出されるニュートリノを、Super-KAMIOKANDE のような検出器で観測する場合のニュートリノイベントの特徴などを、ニュートリノ振動も考慮して詳しく解析した。

● 核統計平衡状態における元素組成とニュートリノ反応率

重い星のコアが重力崩壊して生じる衝撃波が、ニュートリノによるエネルギー供給などによって超新星爆発を引き起こすと考えられ、数値シミュレーションによる研究が行われてきた。我々は塩見を中心として、このような数値計算で使われている代表的な状態方程式 (Shen EOS など) と核統計平衡状態の詳細な比較を行った。Shen EOS などでは、高密度領域における核力の効果を考慮しているが、核力が重要でない密度領域は最安定核のみが存在するといった近似を採用している。我々は、本来そのような温度・密度領域では

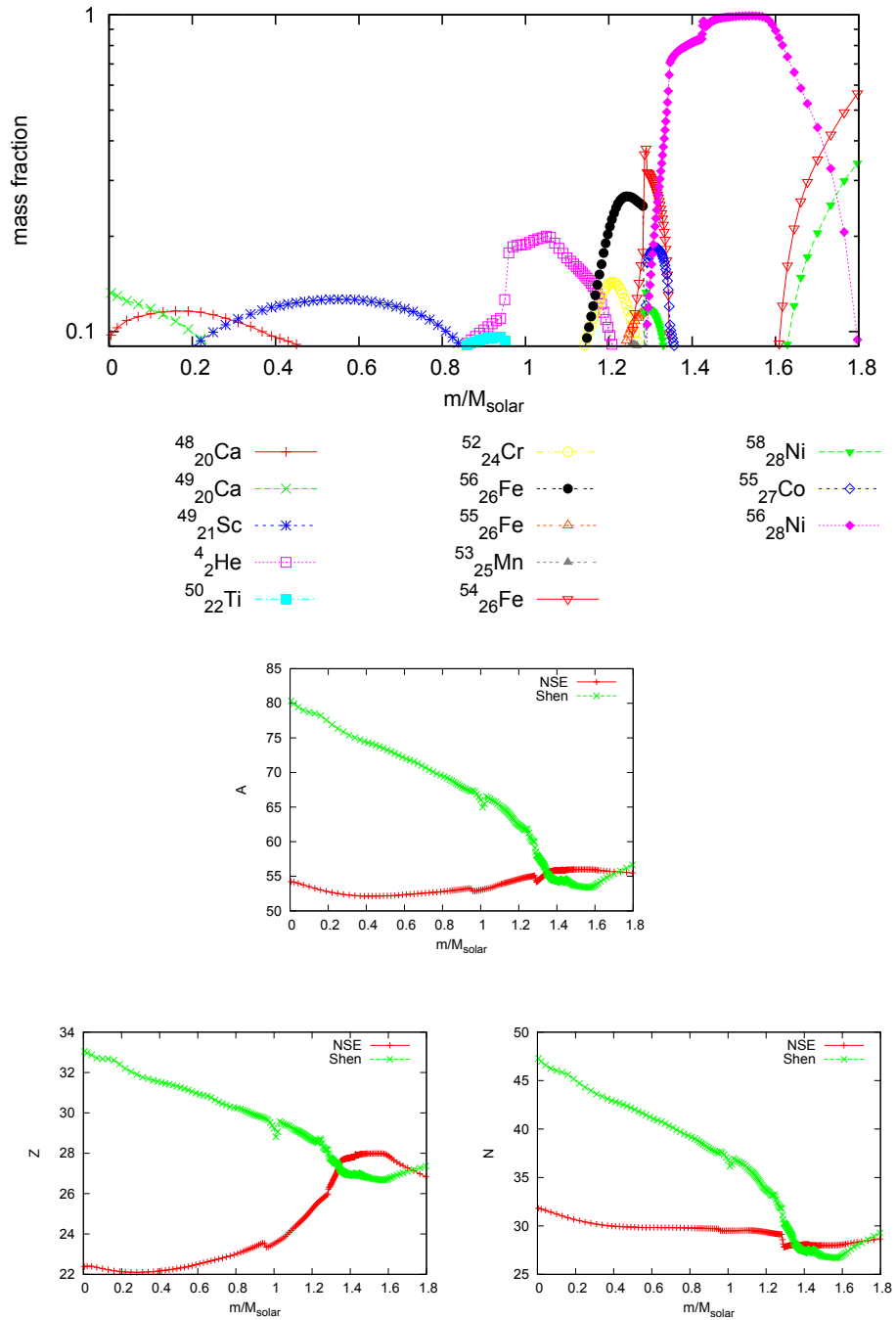


Figure 1: $15M_{\odot}$ の星のコアの重力崩壊に関する Sumiyoshi *et al.* (2005) による数値シミュレーションで、中心密度が 10^{11}g/cc になった時刻における元素組成。上段は、核統計平衡時の各原子核の質量存在比の空間分布。中段は、核統計平衡時の平均質量数と Shen EOS による代表的原子核の質量数の比較。下段は、同じく陽子数、中性子数の比較。

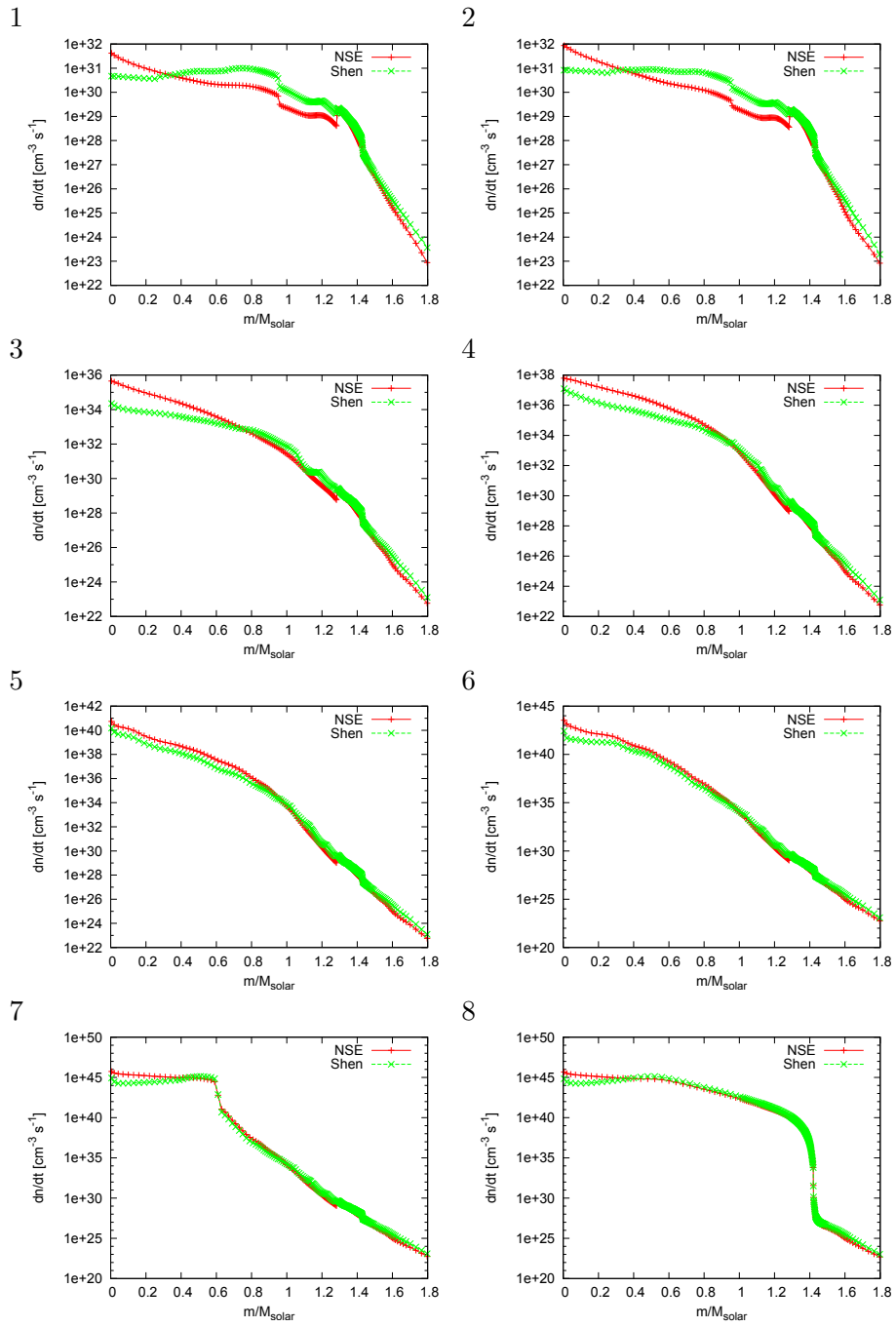


Figure 2: 電子捕獲反応によるニュートリノ放出率の空間分布の時間発展。15 M_{\odot} の星のコアの重力崩壊に関する Sumiyoshi *et al.* (2005) による数値シミュレーションで、八つの時刻を取り出して、電子型ニュートリノの放出率を、核統計平衡による元素組成で計算したものと、Shen EOS の代表的原子核で計算したものとの比較。

核反応の平衡状態 (核統計平衡 NSE) が実現し, 多様な原子核が存在していることに着目し, 元素組成や電子捕獲反応率 (ニュートリノ放出率) などを計算した。その際, 質量の測定値の存在しない原子核には理論値を補うことで 6653 核種を考慮した。その結果, 圧力など流体の運動に関係する物理量は, Shen EOS や NSE で大きな差は見られなかったが, 原子核の平均陽子数, 中性子数には大きな違いが見られた。NSE で質量数が 50 程度のさまざまな元素が存在する状況でも, Shen EOS では陽子数にして 10, 質量数にして数 10 大きめの原子核が存在することになっている。有限温度下で多核種が存在する効果は, ニュートリノ反応率の従来の評価や, 原子核によるニュートリノ散乱率にも影響を与えることがわかった。Shen EOS はコアからのニュートリノ放出を抑える傾向があるようである。今後は, 高密度状態方程式と低密度の NSE を接続する必要がある。

- 一般相対論的流体計算コードと拡散近似によるニュートリノ輸送の結合

重い星のコアの重力崩壊から爆発に至るメカニズムはまだ明らかになっておらず, さまざまな近似レベルの数値シミュレーションが行われている。特に, 球対称モデルではニュートリノのボルツマン方程式を直接解くような大規模計算も行われているが, 計算コストがかかりコアの重力崩壊から外層の爆発までを一貫して調べようとする研究には向いていない。我々は菊地を中心として, 一般相対論的流体力学計算コードに, 計算コストのかからない近似でのニュートリノ輸送を組み込むアルゴリズムを検討・開発した。具体的には, ニュートリノの分布関数に関する一般相対論的ボルツマン方程式を角度及びエネルギー積分した輸送方程式に対して, フェルミディラック分布近似と流束制限拡散近似を導入した計算アルゴリズムを検討した。長いタイムスケールのシミュレーションを安定して行えるよう陰解法を採用し, ニュートリノの数密度・エネルギー密度とニュートリノの温度・縮退度を結びつける関係式を, 連立方程式に加える手法を考案した。

口頭発表

- 鈴木 英之, 高密度天体の形成とニュートリノ放出の数値シミュレーション, 計算科学フロンティアフォーラム, 2008 年 9 月 9 日, 東京ガーデンパレス
- 鈴木 英之, 星の重力崩壊に伴う爆発的天体現象, 第 21 回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」, 2008 年 12 月 17 日, 国立天文台
- 鈴木英之, “超新星爆発・ブラックホール形成に伴うニュートリノ”, 研究会「重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学」, 2009 年 2 月 2 日, 東京大学
- 塩見敦史、鈴木英之、住吉光介、山田章一, 超新星コアの元素組成、ニュートリノ反応率に対する状態方程式の影響, 物理学会, 2009 年 3 月 30 日, 立教大学

発表論文

- K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki, “Dynamics and Neutrino Signal of Black Hole Formation in Nonrotating Failed Supernovae. II. Progenitor Dependence”, *Astrophys. J.* 688 (2008) 1176–1185.

- K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki and S. Yamada, “Oscillation and future detection of failed supernova neutrinos from a black-hole-forming collapse”, *Phys. Rev. D* 78 (2008) 083014-1–14.
- K. Sumiyoshi, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada and H. Suzuki, “EMERGENCE OF HYPERONS IN FAILED SUPERNOVAE: TRIGGER OF THE BLACK HOLE FORMATIO”, *Astrophys. J.* 690 (2009) L43–L46.