

## 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 准教授  
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  
吉原 一久(よしはら かずひさ) 東京理科大学大学院理工学研究科 博士課程  
菊地 英仁(きくち ひでと) 東京理科大学大学院理工学研究科 修士課程  
芝村 俊彦(しばむら としひこ) 東京理科大学大学院理工学研究科 修士課程

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うケースについて、住吉を中心として高密度物質の状態方程式がニュートリノバーストの継続時間に大きな影響を与えることなどを明らかにした。また、Heger らによる大質量星の進化計算に基づく初期モデルと OPAL の状態方程式、ZEUS2D 流体動力学計算コードを用いて、超新星爆発に至らなかった星の外層のダイナミクスと、HR 図上での軌跡を求め、その進化を解析した。超新星ニュートリノ観測からのニュートリノ振動パラメータの決定精度に関する研究も行った。

#### ● ブラックホール形成時のニュートリノバーストと状態方程式

昨年度に引き続き住吉を中心として、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。相対論的平均場近似に基づく Shen らの状態方程式と、非相対論的液滴モデルに基づく Lattimer-Swesty の状態方程式を用いて、 $40M_{\odot}$  の星のコアの重力崩壊からブラックホール形成に至る数値シミュレーションを行い、コアバウンス、衝撃波の停滞の後、原始中性子星が再び重力崩壊を起こすまでの時間が、高密度物質の状態方程式によって大きく異なり、ニュートリノによる観測で区別できることなどを明らかにした。これは、柔らかい状態方程式では原始中性子星の臨界質量が小さく同じような質量降着率でも早く臨界質量に達してしまうからである。

#### ● 現実的大質量星モデルの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、近年我々は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を行っている。本研究では、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詳しく調べた。

昨年、二次元 CIP 流体計算コードを用いて、ポリトロープモデルの星の外層が重力崩壊する様子を調べたが、本年度は、ZEUS2D 流体計算コードを用いて、より現実的な星の外層の重力崩壊の数値シミュレーションを行った。初期モデルとしては、Heger らによる質量放出なども考慮した現実的な星の進化計算結果を用いた。また、状態方程式も、

これまでのポルトローブ型のものではなく、現実的な OPAL の状態方程式を使った。その結果、年のタイムスケールで外層が収縮し、観測的には HR 図上で、ほぼ等温的に暗くなっていく段階を経ることがわかった。これは、不透明度を決める電離度が温度に強く依存するので、光球面が電離面とほぼ一致するためであり、定性的には昨年の結果と同じである。また、星の初期質量の影響を調べ、対流層発展の差に起因すると思われる水素含有量の違いが光球面の位置を変化させ、HR 図上の軌跡が異なることを示した。今後は、不透明度やヘリウムの電離等をより正しく扱った光球面の評価などの改良をする必要がある。

#### ● 超新星ニュートリノとニュートリノ振動

吉原を中心として、将来超新星ニュートリノが観測された場合に期待されるニュートリノ振動パラメータの決定精度に関する研究を行った。ニュートリノが超新星の外層を通過する際のニュートリノ振動を計算し、水チェレンコフ型、氷チェレンコフ型、液体シンチレーター型、液体アルゴン型の4種類の検出器における様々なニュートリノ検出チャンネルについて、銀河中心で超新星爆発が起こった場合のイベントのエネルギー分布、角度分布を計算した。超新星で放出されるニュートリノのエネルギースペクトルが既知の場合、これらの観測データから未確定のニュートリノ振動パラメータ(質量の階層性と混合角  $\theta_{13}$ ) の範囲がどの程度制限されるのかを、 $\chi^2$  法で評価した。その際、検出器の分解能も考慮したことが一つの特徴である。そして次世代検出器の組合せに対して、以下のようなことが明らかになった。

(1) normal mass hierarchy の場合: (1a)  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 10^{-2}$  のとき、 $\sin^2 2\theta_{13}$  は一桁程度の精度で制限でき、地上実験による測定と相補的な役割を果たし得る。(1b)  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 10^{-4}$  のとき、電子型ニュートリノの生き残り確率  $P$  が  $\theta_{13}$  に強く依存し、超新星ニュートリノの観測データのエネルギー分布から  $\theta_{13}$  が最も精度よく決められる。(1c)  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 10^{-6}, 10^{-8}$  のとき、地上実験では測定不可能であるが、超新星ニュートリノのデータからは  $\sin^2 2\theta_{13} < O(10^{-5})$  程度の上限が得られる。

(2) inverted mass hierarchy の場合: (2a)  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 10^{-2}$  のとき、電子型反ニュートリノに対する感度の高いチェレンコフ型や液体シンチレーション型検出器のデータから、 $\sin^2 2\theta_{13}$  は一桁の精度で決定できる。(2b)  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 10^{-4}$  のとき、もともと統計量の多い電子型反ニュートリノの生き残り確率  $\bar{P}$  が  $\theta_{13}$  に強く依存するので、次世代検出器を待つまでもなく、現行検出器でも非常によく  $\theta_{13}$  が決定できる。(2c)  $\sin^2 2\theta_{13} \sim 10^{-6}, 10^{-8}$  のときも、電子型反ニュートリノイベントの統計量の多さから normal mass hierarchy の場合よりも多少良い  $\sin^2 2\theta_{13}$  の上限が得られる。

今回は、超新星から放出されるニュートリノのエネルギースペクトルが既知であるという限定的な条件で行ったが、今後はエネルギースペクトルの不定性を考慮した解析も行わなければならない。

#### 口頭発表

- 鈴木 英之, 重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーション, シンポジウム「未来の素粒子・原子核数値シミュレーション」, 2007年12月20日, つくば国際会議場

- 鈴木英之, 超新星ニュートリノの観測とニュートリノ振動, 第二回 Numazu Workshop on Supernova EOS, 2008年3月28日, 沼津工業高等専門学校

#### 発表論文

- K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki, “Dynamics and Neutrino Signal of Black Hole Formation in Nonrotating Failed Supernovae. I. Equation of State Dependence”, *Astrophys. J.* 667 (2007) 382–394.
- H. Suzuki and K. Yoshihara, “Constraining neutrino oscillation parameters with future observations of supernova neutrinos by various types of detectors”, *Journal of Physics: Conference Series*, in press.