

## 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

菊地との共同研究によって、大質量星のコアの重力崩壊とその後の内部コアのバウンス、コアの爆発、外層の爆発を一貫しておえるような計算コードを開発して、原始中性子星の形成と冷却、ならびに爆発にいたる段階での原始中性子星周辺の状態変化を計算した。フェルミ分布を仮定したニュートリノ輸送と山田の作成した一般相対論的な球対称流体計算コードの組み合わせにより  $O(100)$  秒間の進化をおえるようになり、梅田らとの共同研究により爆発時に放出される元素分布の計算も開始した。また、富樫、鷹野らと、新たな状態方程式数値テーブル作成に向けて、トーマスフェルミモデルによる原子核の自由エネルギー最小化の計算手法を検討し、現時点ではシンプレックス法と準ニュートン法の組み合わせが有望であることがわかった。

#### ● 一般相対論的重力崩壊シミュレーション

近年、重力崩壊型超新星爆発に関する研究は、ニュートリノ輸送の精密化と多次元効果の取り込みに焦点が当てられてきた。その結果として、非常に軽いコアを除いて、対流などを含まない球対称モデルでは爆発せず、SASI などの非球対称効果とニュートリノ加熱効果が重要であるという認識がひろがってきた。ただし、これらの数値計算は計算コストがかかるため、多くのモデルに対する系統的な研究は難しくなってきた。そこで、我々は菊地の簡易的なニュートリノ輸送と山田の一般相対論的球対称流体力学コードを組み合わせた計算コードを開発して、現象論的なモデルの系統的な研究を行おうとしている。ニュートリノのエネルギー分布としてフェルミ分布を仮定することで計算コストを大幅に削減し、また対流などによるホットバブルにおけるニュートリノ加熱の増加を実効的に取り入れることにより、コアの重力崩壊開始から、コアバウンス、コアの爆発、衝撃波が外層を伝播する段階までを一貫して計算できるようになった。まだ、電子型ニュートリノと反ニュートリノのみを考慮した計算であるが、100 秒間におよぶ中性子星の冷却とその周辺のダイナミクスを調べることができた。爆発時に放出される元素分布を調べるため、我々の数値計算で得られたイジェクタの密度と温度の時間変化情報を用いて、元素合成計算を行う共同研究を梅田、泉谷と開始したところである。

#### ● 超新星物質の新しい状態方程式数値テーブル作成に向けた最適化手法の検討

超新星爆発やブラックホール形成などの数値シミュレーションを行う際、鉄などの原子核が存在する低密度領域から、核密度を越えて一様核物質になる高密度領域までの有限温度の状態方程式が必要となる。これまで、Lattimer-Swesty の状態方程式と Shen らの状態方程式が使われてきたが、我々は新たに変分法に基づく状態方程式を富樫、鷹野らとの共同研究で作成しようとしている。富樫らに作成してもらった一様核物質の状態方程式に基づいて、原子核が存在する低密度状態の状態方程式を求めるために、Shen らになら

い Thomas-Fermi 近似での原子核の計算を行う予定であるが、その際に自由エネルギーを最小とするモデルパラメーターの決定が必要となる。我々は、山室らと共同して、いくつかの最適化アルゴリズムの検討を行い、温度 0 の原子核モデルの計算においては、シンプレックス法と準ニュートン法の組合せによるパラメーターの最適化が有望であることがわかった。

#### 口頭発表

- 鈴木 英之, Neutrinos from supernovae and failed supernovae, the 11th International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, 2010 年 12 月 13 日, 富山国際会議場
- 菊地 英仁、鈴木 英之、山田 章一、住吉 光介, 拡散近似ニュートリノ輸送による球対称超新星爆発の長時間シミュレーション, 物理学会, 2011 年 3 月 16 日, 筑波大学
- 菊地 英仁、鈴木 英之、山田 章一、住吉 光介, 球対称拡散近似ニュートリノ輸送による超新星爆発の長時間シミュレーション, 物理学会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学