

研究責任者：住吉光介

所属機関：沼津工業高等専門学校

研究課題名：ニュートリノ輻射流体計算による重力崩壊型超新星の研究

## 研究組織

住吉光介：沼津工業高等専門学校、教養科、教授

長倉洋樹：京都大学基礎物理学研究所、HPCI 研究員

松古栄夫：高エネルギー加速器研究機構、計算科学センター、助教

櫻井鉄也：筑波大学、大学院システム情報工学研究科、教授

今倉暁：筑波大学、計算科学研究センター、研究員

## 実施報告の概要

本研究は、ニュートリノ輻射輸送を厳密に扱う数値シミュレーション手法を用いて、重力崩壊型超新星の爆発メカニズム・ニュートリノ放出の性質を明らかにしようとするものである。特に、3次元空間におけるニュートリノ輻射輸送を6次元空間ボルツマン方程式により直接解く方法で実現する取り組みを世界に先駆けて行っている。我々は、3次元計算コードにより超新星コアにおけるニュートリノ輻射輸送での多次元的な様相を明らかにした。この計算では、陰解法での大規模疎行列を解く計算を高速化する必要があるため、反復法の前処理方法を新たに提案して、実際の問題において有効であることを示した。また、多次元流体計算コードと組み合わせてニュートリノ輻射流体計算を実現するための開発を行った。並行して、実績のある球対称計算コードによるハドロン・核物理と連携した応用計算を行うと共に、多次元計算へ適用するための開発を行った。

## 研究実施の詳細

(1) 3次元ニュートリノ輻射輸送計算コードにより、3次元超新星コアのモデル分布におけるニュートリノ輻射の時間発展から定常解を求めて、6次元空間におけるニュートリノ分布（空間3次元・ニュートリノのエネルギー1次元・角度2次元）の性質を明らかにした。球対称・解析解との比較による検証と共に、2次元・3次元特有のニュートリノ分布や伝搬の特徴を明らかにした。我々の3次元計算コードは、近似計算（拡散・角度独立など）では記述ができない領域においても適用可能であり、例えば非動径方向の流束を記述することができることを示した。

(2) 3次元計算コードによる超新星コアの計算例においては、時間ステップが長くなるにつれて、行列の性質が悪くなり反復法が収束しない場合があり問題となっていた。こうした場合の行列パターンを切り出して、より良い行列解法を探索することを行った。中でも改良ヤコビ法による方法は効果が高く、超新星のみならず様々な行列パターンにおいても収束を改善する方法になっている事を明らかにした。

(3) 球対称計算コード（一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算）を用いて、様々な大質量星の重力崩壊への応用を行っており、その一環として、ブラックホール形成に至る重力崩壊においてハイペロン出現が及ぼす影響について調べて、ニュートリノ放出シグナルの違いによりハイペロン相互作用の違いをプローブすることが可能であることを明らかにした。

## コードの開発・運用状況

(1) 別途開発した多次元流体計算コードと3次元ニュートリノ輻射輸送計算コードを組み合わせ、ニュートリノ輻射流体計算を実現するための開発とテスト計算を行った。マルチステップにより時間発展を計算する方法で、球対称における重力崩壊における時間発展計算を行うことが可能となった。さらに相対論的な扱い（ドップラー効果など）を組み入れる改良を行っている。

(2) 3次元計算コードにおけるMPIによる並列化を整備拡張して、システムAの8ノードにおける最大規模計算が実行可能となった。入出力においても並列化を行い、最大ファイルサイズの制限を回避することに成功した。また計算速度については、計算コードのチューニングを集中的に行った。日立のプログラム相談（メールおよび直接会合）により計算コードのチューニング方針やコード変更についての詳細情報を得て、計算コードの改訂を行った結果、スピード測定においてピーク計算速度の5%を越える性能を得る事ができた。これにより、最大規模でのニュートリノ輻射輸送計算を本格的に行うことが可能になった。

(3) 球対称計算コードを多次元流体計算コードと結合させるための機能拡張を行ったほか、ブロック三重対角行列の直接解法を反復法へ置き換えるための調査を行った。