

研究責任者名 Name	住吉光介	所属機関 Affiliation	沼津工業高等専門学校
受理番号 Proposal No.	14/15-17	研究課題名 Program title	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

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

### 成果の概要

本研究は、ニュートリノ輻射輸送（伝搬・反応）をボルツマン方程式により厳密に解く事により、ニュートリノ・核物理の不定性を取り除きながら、重力崩壊型超新星の爆発メカニズムを解明しようとするものである。空間 1 次元（球対称）の問題においては、一般相対論を含めた第一原理計算コードにより状態方程式の影響や異なるタイプの超新星爆発についての研究を進めた。2 次元・3 次元空間の問題においては、6 次元空間ボルツマン方程式を解く計算コード（6D ボルツマンソルバー）による多次元空間ニュートリノ輻射輸送の特性についての研究、6D ボルツマンソルバーと流体ソルバーを組み合わせたニュートリノ輻射流体計算コードによる超新星ダイナミクス（重力崩壊および衝撃波伝搬）の研究を行なった。

3 次元超新星コアや 2 次元軸対称コラプサー（ガンマ線バースト候補天体）の物質分布のもとで多次元におけるニュートリノ輻射輸送の特性を明らかにした。近似手法である Ray-by-ray 法やモーメント法の近似関係式の検証を行い、ボルツマン方程式による厳密手法からのズレの大きさを定量的に明らかにした。さらに、6 次元空間ボルツマン方程式と多次元流体力学方程式の結合による数値シミュレーションを安定的に追う技術を確立して、重力崩壊からコアバウンス、バウンス後の衝撃波伝搬と流体不安定性の先駆的な計算を行なった。最新の核データと特殊相対論を組み込み、鉄コアの重力崩壊からバウンス・衝撃波伝搬の一貫した計算が可能となった。また、バウンス後の超新星コア中心部分の境界条件に改良を施して、ニュートリノ加熱のもとで対流・物質降着・衝撃波伝搬の様子を長時間追うことが可能となった。

球対称において通常よりも軽い星（太陽質量の 9 倍程度で、鉄コアと爆発型が異なる星）における重力崩壊と爆発現象を扱うことが可能となった。また、対生成による不安定性から爆発に至る例についての研究を行なったほか、シミュレーション計算データを基にして状態方程式の影響、重陽子に関するニュートリノ反応の影響について研究成果を発表した。

### Abstract

We study the mechanism of supernova explosions by the first-principle type simulations by solving the Boltzmann equation for neutrino distributions together with hydrodynamics. We revealed the characteristics of 2D/3D neutrino transfer and pointed out significant deviations could arise in approximate methods commonly used. We successfully performed numerical simulations of the neutrino-radiation hydrodynamics with the 6D Boltzmann equation to follow the gravitational collapse and shock dynamics in 2D.

研究成果を公開しているホームページアドレス

事務局にて使用	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)

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

研究課題番号：14/15-17

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、特任助教

岩上わかな：京都大学基礎物理学研究所、HPCI 研究員

滝脇知也：理化学研究所、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

今倉暁：筑波大学、計算科学研究センター、研究員

高橋亘：東京大学、大学院理学研究科

原田了：東京大学、大学院理学研究科

加藤ちなみ：早稲田大学、先進理工学研究科

### **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解く事により、ニュートリノ・核物理の不定性を取り除きながら、重力崩壊型超新星の爆発メカニズムを解明しようとするものである。なかでもニュートリノの伝搬・反応を精密に取り扱うためのボルツマン方程式を解くことに特徴がある。この方法はニュートリノの空間・エネルギー・角度分布の時間発展を追う第一原理的な計算となっている。これによりニュートリノ加熱やニュートリノ輻射量を厳密に求めて、爆発の可否や観測量を求める際の不定性を取り除くことができる。

空間1次元（球対称）の問題においては一般相対論を含めた第一原理計算をもとに、状態方程式の影響や異なるタイプの超新星爆発についての研究を進めた。2次元・3次元空間の問題においては、6次元空間ボルツマン方程式を解く計算コード（6Dボルツマンソルバー）による多次元空間ニュートリノ輻射輸送の特性についての研究および6Dボルツマンソルバーと流体ソルバーを組み合わせたニュートリノ輻射流体計算コードによる超新星ダイナミクスの研究を行なった。後者については、6次元空間ボルツマン方程式と多次元流体力学方程式の結合による数値シミュレーションを安定的に追う技術を確立して、重力崩壊からコアバウンス、バウンス後の衝撃波伝搬と流体不安定性の先駆的な計算を行なった。

### **研究実施の詳細**

6次元空間におけるボルツマン方程式を解く計算コードはシステムAの1～8ノードにおいて効率良い状態で安定した運用を行なっている。2次元軸対称空間における計算では、角度分布の解像度を新たに評価するため、角度グリッド数を大きくすることが可能となり、その依存性を調べることができた。

ボルツマン方程式の計算コードにより物質分布を固定してニュートリノ輻射輸送計

算を行って定常解を求めることにより、多次元空間におけるニュートリノ輻射輸送の様相を明らかにした。6次元空間におけるニュートリノ分布をもとに、空間分布だけでなく角度・エネルギー分布の詳細な解析を行ない、超新星コアの物質分布における近似計算（Ray-by-ray法）との比較を論文出版した。新たにコラプサー（中心天体と円盤を含むガンマ線バーストの中心天体候補）における物質分布を採用して、通常よりも球対称から大きく外れた場合の多次元輻射輸送の様相を探索した。これにより、先行研究では簡易なニュートリノ放射や輸送モデルを用いて解明していた問題について、ボルツマン方程式による解明を行なうことが可能となり、ニュートリノ加熱率やニュートリノ光球（放射面）を評価する事ができた。また、ニュートリノ角度分布の情報からモーメント法で用いられる近似関係式との比較を行い、近似計算手法の値は（ボルツマン方程式による厳密計算値に対して）10%を越える大きなズレが生ずる領域が広がっていることを明らかにした。これらの成果については国際会議において報告を行なったほか、解析を進めて論文投稿の準備を進めている。

ボルツマン方程式と流体力学を結合させた計算コードについては、特殊相対論を含まない軽量バージョンのコードセットにおいて、並列化ののちの基本チューニングが完了して、システムAにおいて安定的に運用することが可能となった。これによりバウンス後の停滞衝撃波のダイナミクスを探る計算を開始した。中心部分の計算負担を減らすためにニュートリノ放射の境界条件の改良を行なうことで、ニュートリノ加熱を伴う衝撃波ダイナミクスを長時間に渡って追う事が可能となり、対流の発生や衝撃波の歪みが生ずる流体力学的不安定性が成長する現象を追う事に成功した。この手法を発展させて、内部境界条件を高密度側へシフトしてニュートリノ発生部分をボルツマン方程式により記述できるように改良を進めている。

特殊相対論を含むボルツマン方程式と流体力学を結合させた計算コードについては、基本的な重力崩壊・バウンス計算を行なうことが可能となり、超大規模計算を行なうための準備を完了した。最新の電子捕獲反応率や状態方程式を組み込む開発を終えて、京コンピュータにおける長時間計算に成功した。計算手法は論文発表のうへ、計算成果について国際会議で発表したほか、論文投稿の準備中である。このコードセットは再びシステムAに移行して、基本的な動作確認を行ない、再度の基本チューニングを完了した。大規模並列計算のための改善を行なったうへで、低解像度における重力崩壊の計算を準備している。ボルツマン流体計算コード群はシステムAでの稼働のほか、システムBへの移行作業を進めており、チューニングが完了しだい、システムAでは実行できない規模の計算を行なう予定である。

球対称一般相対論的ニュートリノ輻射輸送計算コードについては、通常よりも軽い星（太陽質量の9倍程度で、酸素・ネオンが中心コアとなっている星）における重力崩壊と爆発現象を扱うための改良を行った。非統計平衡状態方程式、核反応、統計平衡下での電子捕獲反応の組み込みを完了して、システムAにおける計算を進めている。これにより先行研究が一例しかない酸素・ネオンコアの爆発について最新の親星モデル・物理過程のもとでの研究成果が得られる予定である。また、発展応用例として対生成による不安定性から爆発に至る例についての研究成果をあげたほか、シミュレーション計算データを基にした応用として状態方程式の影響、重陽子に関するニュートリノ反応の影響について研究成果を発表した。

以上