

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.	13/14-10	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

(和文) 大質量星の最期に起こる超新星現象は、中心の鉄コアの重力崩壊によるバウンス・衝撃波伝搬を経て爆発に至ると考えられている。しかし、その爆発に至る中心要因は解明されていない。我々はニュートリノ輻射輸送を厳密に解く手法により、ニュートリノ・核物理をつぎ込んだ数値シミュレーションを行い、爆発メカニズムを探る研究を行っている。

(1) 3次元空間においてニュートリノ輻射輸送を扱う6次元ボルツマン方程式を解く計算コードにより、3次元超新星コアにおけるニュートリノ輻射(空間・エネルギー・角度分布)の特徴を系統的に解明した。特に、太陽質量の1.1倍、2.7倍と異なる2つの質量の星において、3次元において衝撃波が停滞・膨張している例について計算を行い、我々が予備的に指摘していた3次元ニュートリノ輻射輸送の特性が一般的であることを明らかにした。既存の近似手法であるRay-by-ray近似との比較を行い、近似手法ではニュートリノ分布・加熱率の非等方性が強調され過ぎることを解明した。

(2) 3次元ニュートリノ輻射輸送と多次元流体力学を結合して解く計算コードにより、6次元ボルツマン方程式を解くと同時に流体ダイナミクスを追うことが可能となった。2次元においては、バウンス後に衝撃波が停滞した状態から、流体不安定性とニュートリノ加熱の組み合わせにより衝撃波が復活するかどうかを探る長時間計算に成功した。一方、鉄コアの重力崩壊では相対論的効果の取扱いが不可欠であることが判明したため、ドップラー効果によるエネルギー・角度分布歪みをボルツマン方程式へ取り入れる新しい手法を計算コードに組み込み、ニュートリノ輻射流体計算コードの開発段階を終了した。この結果、鉄コアの重力崩壊におけるニュートリノ移流・閉込も正しく扱う事ができるようになり、多次元における重力崩壊から爆発までの計算へ向けた準備を完了した。

(4) 並行して、状態方程式テーブルの構築やニュートリノ反応率の整備を行った。球対称爆発計算コードを活用して、核力から核子多体問題(変分法)を解いて求めた核物質の状態方程式、クォーク・ハドロン相転移の爆発への影響を明らかにした。

(英文) We performed systematic numerical simulations of the neutrino-radiation hydrodynamics of 3D core-collapse supernovae. We have revealed the characteristics of 3D neutrino transfer and the possible influence of ray-by-ray approximate on the explosion mechanism.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読付きの 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)
	6	3	1	4

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program

国際会議講演

1. Data sets of equation of state for core-collapse supernovae: their impact on dynamics and signals,
K. Sumiyoshi,
International workshop "The Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death",
Auditorium al Duomo, Florence, Italy, 2014.3.24-28,
(Invited talk)
2. Multi-dimensional neutrino transfer in core-collapse supernovae and its implications,
K. Sumiyoshi,
International workshop on "Nuclear Physics and Astrophysics of Neutron-Star Mergers and Supernovae,
and the Origin of R-Process Elements",
ECT* European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas,
Trento, Italy, 2014.9. 8-12
(Invited talk)

国内会議講演

1. Numerical simulations of core-collapse supernovae:
Neutrino transfer by 6D Boltzmann equation
住吉光介
超新星・ガンマ線バースト研究会 2014
理化学研究所・和光キャンパス、2014. 8. 25～27
招待講演
2. 多次元ボルツマン流体コード開発の現状と今後の課題
長倉洋樹
新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」の
まとめと今後を語る研究会
2013年12月20～21日、鳴子
3. 相対論的多次元ボルツマン流体コードの開発
長倉洋樹
HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム
2014年3月3～4日、富士ソフトアキバプラザ
4. Multi-D Relativistic Boltzmann-Hydro Code for Core Collapse Supernovae
Hiroki Nagakura,
超新星・ガンマ線バースト研究会 2014、
2014年8月25～27日、理化学研究所和光キャンパス

査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。

Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)

1	著者名 Author	K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada
	タイトル title	Stellar core collapse with hadron-quark phase transition
	雑誌名 name of journal	Astronomy & Astrophysics, Research Note 558 (2013) A50 (5 pages)
	URL	http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201322231
2	著者名	H. Togashi, M. Takano, K. Sumiyoshi and K. Nakazato
	タイトル	Application of the nuclear equation of state obtained by the variational method to core-collapse supernovae
	雑誌名等	Progress of Theoretical and Experimental Physics (2014) 023D05 (19 pages)

	URL	http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptu020
3	著者名	H. Nagakura, K. Sumiyoshi and S. Yamada
	タイトル	Three-dimensional Boltzmann-Hydro code for core-collapse in massive stars I. Special relativistic treatments
	雑誌名等	Astrophysical Journal Supplement Series 214 (2014) 16 (19 pages)
	URL	http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/214/2/16
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (* 不足する場合には追加願います。 International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)		
1.	著者名 Author	H. Togashi, M. Takano, K. Sumiyoshi and K. Nakazato
	タイトル title	Nuclear equation of state with the variational method and its application to supernova simulations
	雑誌名等	International Journal of Modern Physics, Conference Series 29 (2014) 1460221 (9 pages)
	URL	http://dx.doi.org/10.1142/S201019451460221X
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (著者、タイトル、論文種別、URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)		
掲載決定済み：査読論文		
1. EOSDB: The database for nuclear EoS, C. Ishizuka, T. Suda, H. Suzuki, A. Ohnishi, K. Sumiyoshi and H. Toki Publications of the Astronomical Society of Japan, accepted. ; arXiv:1408.6230		
2. Multi-dimensional features of neutrino transfer in core-collapse supernovae, K. Sumiyoshi, T. Takiwaki, H. Matsufuru and S. Yamada, Astrophysical Journal Supplement Series, accepted. ; arXiv:1403.4476		
企画講演		
1. HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」 素核宇宙融合レクチャーシリーズ 第 10 回 「重力崩壊型超新星の爆発メカニズム：核物理と天文数値シミュレーションの連携」 住吉光介 2014. 1.10-1.11		
投稿中の査読論文		
1. Neutrino emissivities from deuteron-breakup and formation in supernovae, S. Nasu, S. X. Nakamura, K. Sumiyoshi, T. Sato, F. Myhrer and K. Kubodera, Astrophysical Journal, submitted.		
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。) Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)		
1. 2.		

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、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：国立天文台、天文シミュレーションプロジェクト、特任助教
(現、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

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。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ことが特徴である。この計算コード(6Dボルツマンソルバー)を用いて、3次元超新星コアにおけるニュートリノ輻射輸送の特性を明らかにする研究、ニュートリノ輻射流体計算コードおよび相対論的効果の計算手法の開発および超新星コアへの適用による研究を行なった。

まず、ニュートリノ輻射輸送に着目し、6Dボルツマンソルバーにより、現実的な3次元超新星コアの非一様な物質分布においてニュートリノ分布(空間・エネルギー・角度分布)を求めて、非動径方向を含む3次元空間での流束やニュートリノ加熱率を記述できることを世界で初めて示した。また、現在の数値シミュレーションで広く用いられているRay-by-ray近似手法による結果との比較を行い、近似手法の評価を行なった。Ray-by-ray近似手法によるニュートリノ輻射輸送計算は、中心コアにおける物質分布の非一様性を反映するため空間異方性を強く出し過ぎる傾向があることが判った。これらは、世界で行なわれている最新の多次元超新星計算を評価するうえで重要な結果である。この研究成果をまとめた査読論文は先日掲載が決定された。

次に、6Dボルツマンソルバーと流体計算コードの統合を行ない、重力崩壊から爆発へ至る多次元ダイナミクスを数値シミュレーションする準備を整えた。応用として、コアバウンス後に衝撃波が停滞した状況から、ニュートリノ加熱と流体力学不安定性(対流や定在降着衝撃波不安定性SASI)の組み合わせにより、爆発に至るか否かを探る計算を安定して長時間実行することが可能となった。さらに、重力崩壊の際に問題となっていたボルツマン方程式における特殊相対論による効果(ドップラー効果によるエネルギー・角度分布の歪み)の定式化を6Dボルツマンソルバーに組み込み、ニュートリノ輻射流体計算コードを完成させた。この定式化と検証テスト問題の研究結果をまとめた査読論文は、ボルツマン方程式によるニュートリノ輻射輸送計算の有効性を世界的に示すこととなった。

また、核物理データの構築および球対称一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算コードによる爆発への影響について研究を行なった。特に、核力から核子多体問題(変分法)を解いて求めた核物質の状態方程式、クォーク・ハドロン相転移による爆発への影響についての査読論文を出版した。

研究実施の詳細

(1) 6D ボルツマンソルバーを用いて、3次元ニュートリノ輻射輸送の特性を探る研究を行うため、滝脇らによる3次元超新星計算結果から中心コアの流体スナップショットを取り出して固定し、ニュートリノ輻射が定常に至る時間発展を解いて、6次元空間におけるニュートリノ分布を求めて、その密度・流束の他、ニュートリノ加熱率の分布における特徴を明らかにした。特に、近年の計算で広く用いられている Ray-by-ray 近似手法を再現する計算を同時に行い、両者の定量的な比較により物理量の違いを定量的に求めた。さらに、異なる分布モデル、時刻タイミングを採用して普遍的な性質を見いだす事に成功した。

(2) 6D ボルツマンソルバーと流体計算コードを統合した計算コードにより、流体ダイナミクスと同時にニュートリノ輻射を解く技術は、ニュートリノ分布の解の収束や時間ステップのコントロールが難しいが、これらの調整を行なう事により、安定して長時間の発展を追う事が可能となった。これにより定在降着衝撃波不安定性(SASI)を探るための計算実行を開始した。また、相対論的効果を組み込んだニュートリノ輻射流体計算コードの開発を完了して、鉄コアの重力崩壊でのニュートリノ閉込めにおける相対論的効果を明らかにした。また、慣性系と共動系の2つの座標系の双方においてニュートリノ反応を記述する検証などを行い、この計算手法が有効であることを示した。

(3) 以前より実績のある球対称一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算コードを用いて、状態方程式データテーブルの整備および超新星シミュレーションへの応用を行なった。核子間の核力をもとに変分法を用いた核子多体問題を解いて得られた核物質の新しい状態方程式テーブルを用いて、球対称での鉄コア重力崩壊・コアバウンス・衝撃波伝搬の計算を行い、先行研究である Shen EOS テーブルとの比較による相違点を明らかにした。また、クォーク・ハドロン相転移においてバグ模型のパラメータによっては爆発に至る場合があることを示した。

コードの開発・運用状況

(1) 6D ボルツマンソルバーは、並列化およびチューニングが完了した計算コードが整備されており、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。行列計算の反復回数にもよるが、計算速度はピーク計算速度の5%程度である。解析用の並列計算コードも整備しており、8ノードにおける高解像度計算で物理計算を行なっている。研究論文向けの計算では、異なる親星質量・時刻について超新星モデル分布を選び、系統的に物理計算を行なった。これにより、衝撃波が停滞・膨張している場合において、3次元ニュートリノ輻射輸送の普遍的な特徴を明らかにした。また、近似手法におけるニュートリノ加熱率の違いも一般性を持って示すことができた。

(2) 6D ボルツマンソルバーと流体計算を組み合わせたコードは、シリアル版での統合を完了したのち、並列化を行なって、物理計算サイズにおける運用を行なっている。研究論文へ向けてバウンス後の停滞衝撃波の状態を初期条件とした物理計算を開始している。時間ステップのコントロールなどについては安定化を行なうことができた。現在、長時間計算を効率よく行なうための、基本的なチューニングと高速化を施している。相対論効果を組み込んだコードについても並列化とチューニングを進めて、重力崩壊からスタートする計算へ向けた準備を進めている。

(3) 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、行列解法を直接法から反復法へ置き換える作業が完了して、空間メッシュ数を自由に取れるように改良を行なった。また、非統計平衡状態方程式、軽い核の電子捕獲反応、核反応を組み入れる拡張を行なっている。

以上