

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・教養科
受理番号 Proposal No.	12/13-05	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 (Abstract)

(和文) 太陽の 10 倍以上の大質量を持つ星は、進化の最期に重力崩壊を起こして超新星現象を起こす。こうした重力崩壊型超新星の爆発メカニズムを解明するための数値シミュレーションによる研究を行った。爆発メカニズムの鍵を握るニュートリノ輻射輸送を厳密に解く手法を用いることが特徴である。また、原子核データの整備を行い、状態方程式やニュートリノ原子核反応の影響を探ることも行った。

(1) 3次元ニュートリノ輻射輸送計算コードによる応用計算を開始して、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について解明した。6D ボルツマン方程式を解く独自方法による3次元ニュートリノ輻射輸送計算は世界初の成果である。既存の近似計算方法との詳細の比較を行えるようになり、Ray-by-ray 近似によるニュートリノ分布・加熱率のずれの度合いやパターンを明らかにした。

(2) 3次元ニュートリノ輻射輸送計算コードと多次元流体計算コードの統合を行い、典型的なテスト問題を解くことに成功した。初期条件である鉄コアの重力崩壊からコアバウンス・衝撃波伝搬へ至るダイナミクスの時間発展を追って、球対称計算コードとの相違点を明らかにした。この際、ニュートリノ輻射輸送における相対論的な効果が重要であることを発見した。

(3) ニュートリノ輻射輸送計算の陰解法で現れる大規模疎行列の解法について、新たに開発した反復法における前処理手法を、多次元計算へ応用したほか、球対称ニュートリノ輻射流体計算コードにも適用して、シミュレーション計算の高速化・並列化を行った。これにより任意のメッシュ数の採用や高い並列度への拡張が可能となった。

(4) 並行して、状態方程式データテーブルやニュートリノ反応率の整備を行い、爆発におけるニュートリノ軽元素反応が爆発に及ぼす影響について明らかにした。また、重力崩壊・バウンス・爆発・原始中性子星誕生と冷却の過程において放出されるニュートリノ光度・エネルギーについて、様々な質量の星のシミュレーションを系統的に行い、超新星ニュートリノ観測へ向けたデータベースを構築した。

(英文) We performed the numerical simulations of neutrino-radiation hydrodynamics of core-collapse supernovae. We have applied the 6D Boltzmann solver to the 3D supernova profiles to clarify the influence on explosions. We have applied a newly developed pre-conditioner to 1D neutrino-radiation hydrodynamics. Effects of light nuclei and associated neutrino reactions are explored. The database of neutrino signal of core-collapse supernovae is constructed.

研究成果を公開しているホームページアドレス

<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>

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)
	11	4	1	2

国際会議

1. Numerical modeling of core-collapse supernovae with progress in nuclear physics and supercomputing,
K. Sumiyoshi,
International Symposium: Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012),
Nara Prefectural New Public Hall, 2012.12.13-16 (12.16)
(Invited talk)
2. Solving 6D Boltzmann equations for core-collapse supernovae and its future
K. Sumiyoshi
Exascale Computing in Astrophysics
Centro Stefano Franscini, Monte Verita, Ascona, Switzerland, 2013.9.8-13 (9.12)
3. A Parameter Tuning Technique of a Weighted Jacobi-Type Preconditioner and its Application to Supernova Simulations,
Akira IMAKURA, Tetsuya SAKURAI, Kohsuke SUMIYOSHI, Hideo MATSUFURU,
International Symposium: Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012),
Nara Prefectural New Public Hall, 2012.12.13-16
(Invited talk)

国内会議

1. 超新星爆発における核物質と状態方程式
住吉光介
新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」キックオフシンポジウム
理化学研究所
2012. 10. 26～27（講演日10. 27）
招待講演
2. 超新星における3次元ニュートリノ輻射輸送シミュレーション
住吉光介
第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」
2012. 12. 22～24（講演日12. 24）
つくば国際会議場、つくば市
3. ニュートリノ輸送方程式の数値解法
住吉光介
宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ WS2013
2013. 2. 18～19（講演日2. 18）
千葉大学
招待講演
4. 6次元ボルツマン方程式による超新星でのニュートリノ輻射輸送
住吉光介
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
2013. 3. 5～3. 6（講演日3. 6）
富士ソフトアキバプラザ 6階セミナールーム1
5. 重力崩壊型超新星における3次元ニュートリノ輻射輸送計算
住吉光介, 長倉洋樹, 山田章一, 松古栄夫
日本物理学会、広島大学、2013. 3. 26～29（講演日3. 29）
6. Multi-Dimensional Boltzmann-Neutrino Transfer and Hydrodynamic Code for Supernova Simulations

長倉洋樹
 新学術領域「重力波天体」第1回シンポジウム
 大阪市立大学, 2013年3月1-2日

7. 重み付き定常反復型前処理のためのパラメータ最適化手法および超新星爆発計算における有効性,
 今倉 暁, 櫻井 鉄也, 住吉 光介, 松古 栄夫,
 RIMS 研究集会「次世代計算科学の基盤技術とその展開」
 京都大学 数理解析研究所, 2012/10/23 - 25.
8. 大規模連立一次方程式に対する高並列前処理技術について
 今倉 暁, 櫻井 鉄也, 住吉 光介, 松古 栄夫,
 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ --WS2013--
 千葉大学, 2013/2/18-19. (招待講演)

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	K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki, T. Totani, H. Umeda and S. Yamada
	タイトル	Supernova neutrino light curves and spectra for various progenitor stars: From core collapse to proto-neutron star cooling
	雑誌名	Astrophysical Journal Supplement Series 205 (2013) 2 (17 pages)
	URL	http://iopscience.iop.org/0067-0049/205/1/2/
2	著者名	N. Buyukcizmeci, A. S. Botvina, I. N. Mishustin, R. Ogul, M. Hempel, J. Schaffner-Bielich, F.-K. Thielemann, S. Furusawa, K. Sumiyoshi, S. Yamada and H. Suzuki
	タイトル	A comparative study of statistical models for nuclear equation of state of stellar matter
	雑誌名等	Nuclear Physics A907 (2013) 13-54
	URL	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947413003588
3	著者名	S. Furusawa, S. Yamada, K. Sumiyoshi and H. Suzuki
	タイトル	New equation of state based on liquid drop approximation of heavy nuclei and quantum approach to light nuclei for core collapse supernova simulations
	雑誌名等	Astrophysical Journal 772 (2013) 95 (16 pages)
	URL	http://iopscience.iop.org/0004-637X/772/2/95/
4	著者名	S. Furusawa, H. Nagakura, K. Sumiyoshi and S. Yamada
	タイトル	The Influences of inelastic neutrino reactions with light nuclei on standing accretion shock instability in core collapse supernovae
	雑誌名等	Astrophysical Journal 774 (2013) 78 (13 pages)
	URL	http://iopscience.iop.org/0004-637X/774/1/78/

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	K. Sumiyoshi
	タイトル	Numerical modeling of core-collapse supernovae and compact objects
	雑誌名等	in Proceedings of the IAU Symposium 291 "Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years", Beijing, China, August 20-31, 2012 Proceedings IAU Symposium No. 291 (2012) 67-72. (ed. Joeri van Leeuwen, Cambridge University Press)
	URL	http://www.pulsarastronomy.net/IAUS291/proceedings/ http://arxiv.org/abs/1212.6131

その他(学位論文、紀要、投稿中の論文を含む)(URLを記載)

Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)

講究録(査読なし)

1. 今倉 暁, 櫻井 鉄也, 住吉 光介, 松古 栄夫
 重み付き定常反復型前処理のためのパラメータ最適化手法および超新星爆発計算における有効性
 京都大学数理解析研究所講究録, No.1848 「次世代計算科学の基盤技術とその展開」

2013.8, pp.15-24.

<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1848-02.pdf>

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.)

学会誌解説（査読あり）

1. 非等方性の強い輻射場における輸送計算：
超新星爆発におけるニュートリノ輻射輸送の例
講座 輻射流体シミュレーション 2章
住吉光介
プラズマ・核融合学会誌、第88巻第10号 p.610-617（2012年10月号）
J. Plasma Fusion Research 88 (2012) 610-617
http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2012_10/jspf2012_10-610.pdf

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計算を世界に先駆けて行い、成果を出し始めることができた。我々は、この開発済計算コードの6Dボルツマンソルバーを3次元超新星コアにおけるニュートリノ輻射輸送の問題へ適用して、多次元におけるニュートリノ輻射輸送やニュートリノ加熱率を精密に求めることを行い、現在の主流である近似的な計算方法の評価を行うことに成功した。輻射輸送計算では、陰解法での大規模疎行列を解くための反復法が重要である。今倉が開発した新しい前処理方法を多次元計算において適用することを始めたほか、新たにニュートリノ輻射流体計算コードにも応用することができた。長倉は6Dボルツマンソルバー計算コードを多次元流体計算コードと組み合わせることを行い、重力崩壊やバウンス後のダイナミクスとニュートリノ輻射輸送の基本的な振る舞いを調べることが可能となった。ここで重要であることが判明した相対論的な効果をニュートリノ輻射輸送計算に取り入れるためのコード開発を進めている。並行して、実績のある計算コードによる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) 6Dボルツマンソルバーにより、実際の3次元超新星コアにおけるニュートリノ輻射輸送の研究を行った。先行研究による3次元数値シミュレーションから、バウンス後の超新星コアの3次元流体スナップショットを取り出して固定し、輻射が定常に至る時間発展を解くことにより、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）を求めて、その密度・流束・反応率などの性質を明らかにした。特に、先行研究に広く用いられている近似計算法（Ray-by-rayスキーム）を6Dボルツマンソルバーにおいて再現することにより、ニュートリノ分布・ニュートリノ加熱について近似法の精密な評価が可能となった。

(2) 6Dボルツマンソルバーを多次元流体計算コードと組み合わせることにより、重力崩壊からコアバウンス・衝撃波伝搬までの基本的なダイナミクスを追うことに成功した。既存の球対称計算コードとの比較により、重力崩壊時にはニュートリノ輻射輸送において相対論的な効果が重要であることを発見した。これに基づいて特殊相対論のもとでボルツマン方程式を解く新しい計算スキームを開発することができた。また、6Dボルツマン流体統合計算コードを、バウンス後の超新星コアでの定在降着衝撃波不安定性（SASI）へ適用することが可能となった。

(3) ニュートリノ輻射輸送計算の陰解法で現れる大規模疎行列の解法のため開発した反復法における前処理手法を、6D ボルツマンソルバーに組み込み、3次元超新星コアの問題への応用を行った。さらに、超新星研究における第一原理計算である、一般相対論的ニュートリノ輻射流体計算コードにも応用して、ニュートリノ輻射と流体を同時に解く疎行列要素パターンの場合についても適用可能であることを明らかにした。既存計算コードでは(拡張性が悪い)並列巡回縮約による直接法で解いていたが、任意のメッシュ数の採用や高い並列度への拡張が可能となった。

(4) 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・コアバウンス後の進化を系統的に調べた。質量・金属量が違う親星の1セットについて重力崩壊・バウンス・爆発・原始中性子星誕生と冷却の過程において放出されるニュートリノの光度・エネルギーについて系統的なシミュレーションを行い、超新星ニュートリノ観測へ向けたデータベースを構築した。また、軽元素を含む多核種平衡分布を考慮した拡張状態方程式データテーブルやニュートリノ反応率の整備を行い、爆発におけるニュートリノ軽元素反応が爆発に及ぼす影響について明らかにした。

コードの開発・運用状況

(1) 6D ボルツマンソルバー計算コードは、MPI 並列化されており、システム A において、基本的なチューニングを済ませて、スピード測定においてピーク計算速度の5%を越える性能で安定稼働している。また、大規模データに対応する入出力並列化を行い、システム A の8ノードにおける最大規模計算を実現している。これにより3次元超新星コアにおけるニュートリノ輻射輸送を十分な解像度で研究することができるようになった。さらに、蓄積した計算結果データを読み込んで再解析するための並列計算コードも整備して、詳細な解析を進めることにより研究論文としてまとめることができ、その投稿準備を進めている。

(2) 長倉らが開発した多次元流体計算コードと6D ボルツマンソルバーを組み合わせた統合ニュートリノ輻射流体計算コードは、球対称の重力崩壊・バウンスのテスト計算を済ませて、基本コードとして機能する状態となった。軸対称(空間2次元)においてバウンス後の定在降着衝撃波不安定性を調べるための数値シミュレーションによる研究を開始した。システム A においてプロファイラーによる計算負荷の調査を行い、計算コードの軽量化を図り、輻射流体統合計算コードの並列化へ向けた準備を進めた。また相対論効果を含んだ計算コードについては、コード開発をほぼ終えており、球対称重力崩壊計算による検証を行った結果を、計算スキームとともに論文にまとめる予定である。

(3) 大規模疎行列の反復法による解法において、今倉らが開発した新しい前処理計算コードについては、6D ボルツマンソルバー計算コードに組み込みが完了して、応用計算に用いることが可能となっている。ポイントヤコビ法では収束しない問題において新しい前処理方法が効率よく用いることができることが分かっている。この方法が超大規模においても有効であることを調べるのが課題となっている。一方、同方法から発展して、球対称一般相対論ニュートリノ輻射流体計算コードに適用することを行い、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ことに成功した。計算負荷の軽量化を実現しており、スケーラビリティも確保した。

(4) 球対称一般相対論ニュートリノ輻射流体計算コードは、超新星研究において第一原理基礎コードとして信頼性が高く、安定稼働しており様々な応用研究に用いられている。行列解法を置き換えることができたので、さらにメッシュをつぎ込んだ大規模計算や一層のチューニングなどが今後の課題となっている。