

研究責任者名 Name	住吉光介 Sumiyoshi Kousuke	所属機関 Affiliation	沼津工業高等専門学校・教養科	
受理番号 Proposal No.	(T)11-08	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の重力崩壊によりおこる重力崩壊型超新星のメカニズム・観測シグナルについて、ニュートリノ輻射流体計算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て、3次元計算コードの開発を進めると共に球対称における物理シミュレーションを行った。球対称においては、一般相対論のもとでニュートリノ輻射流体計算を第一原理的に解く事により、超新星ニュートリノ観測により高温高密度物質の状態方程式を探る研究を行った。数値シミュレーション結果により、密度や温度は QCD 相転移における臨界点/境界を通過する可能性があることを発見した。また、数値シミュレーションに必要な不可欠な状態方程式データテーブルの整備を行った。爆発メカニズムの解明においては、球対称では停滞してしまう衝撃波が、多次元の流体不安定性とニュートリノ加熱が合わさって、爆発へ転ずると考えられている。しかしニュートリノ輻射輸送は近似的にしか計算が行われていない。この点を打破するために、空間 3次元・ニュートリノ位相空間 3次元においてニュートリノ分布関数の時間発展を扱うボルツマン方程式を解く、新しい計算コードを開発した。拡散・自由伝搬・中間領域におけるテスト計算、球対称計算と解析解との比較を行い、3次元計算コードの信頼性を検証した。さらに超新星コアのモデル分布に適用して、ニュートリノ輻射の様子について研究を開始した。また、計算コードの並列化に着手して、開発とテストを行って、チューニングのための基礎データを取得した。

(英文) We conducted studies of the core-collapse supernovae via the gravitational collapse of massive stars beyond 10Msun by performing the numerical simulations of the neutrino-radiation hydrodynamics. We applied the numerical code of general relativistic neutrino-radiation hydrodynamics under spherical symmetry to study the neutrino bursts from massive stars in order to probe the equation of state at extreme conditions. We found that the conditions of density and temperature sweep the critical point in the QCD phase diagram by the numerical simulations. We have newly developed the 3D numerical code of neutrino transfer to study the neutrino heating mechanism to clarify the 3D dynamics of supernova explosions. We made test calculations of 3D neutrino transfer to complete the code and started the tuning of the MPI numerical code.

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）
	7	3	3	0

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

国際会議

1. Numerical challenges in physics of core-collapse supernovae: the role of dense matter and neutrinos
K. Sumiyoshi
Third International Conference on Nuclear Fragmentation: From Basic Research to Applications (NUFRA2011)
Kemer, Turkey, 2011.10.2-10.9 (10.4) (Invited Talk)
2. Progress of the equation of state table for supernova simulations and its influence
K. Sumiyoshi
the 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11)
RIKEN, Wako, Saitama, Japan, 2011.11.14-17 (11.14)

国内会議

1. 超新星シミュレーションの状態方程式:現状と影響
住吉光介
仁科センターミニワークショップ「中性子星の核物質」
理化学研究所、和光市、2011.9.13
2. 3次元ニュートリノ輻射輸送計算コードによる超新星コアの研究
住吉光介、山田章一
日本物理学会、弘前大学、2011. 9. 16-19(講演日9. 16)
3. 科研費 A04 班活動報告:Interdisciplinary algorithms and computer simulations
松古栄夫
研究会「素核宇融合による計算基礎物理学の進展 - ミクロとマクロのかけ橋の構築 -」
合歓の郷、三重県志摩市、2011. 12. 3-5(講演日12. 3)
4. ニュートリノ輻射流体計算と状態方程式
住吉光介
研究会「素核宇融合による計算基礎物理学の進展 - ミクロとマクロのかけ橋の構築 -」
合歓の郷、三重県志摩市、2011. 12. 3-5(講演日12. 4)
5. 超新星爆発計算のための減速 Jacobi 型前処理
今倉暁、櫻井鉄也、住吉光介、松古栄夫
研究会「素核宇融合による計算基礎物理学の進展 - ミクロとマクロのかけ橋の構築 -」
合歓の郷、三重県志摩市、2011. 12. 3-5(講演日12. 4)
6. 多次元ニュートリノ輻射流体コードの開発
長倉洋樹、住吉光介、山田章一
研究会「素核宇融合による計算基礎物理学の進展 - ミクロとマクロのかけ橋の構築 -」
合歓の郷、三重県志摩市、2011. 12. 3-5(講演日12. 5)

7. 超新星におけるニュートリノ輻射輸送と状態方程式

住吉光介

研究会「超新星爆発と数値シミュレーション」

京都大学基礎物理学研究所

2011. 12. 26～28(講演日12. 27)招待講演

8. 超新星爆発の大規模数値シミュレーションと原子核物理

住吉光介

「大規模計算による原子核研究の展開－核子多体系を中心に－」

HPCI 戦略プログラム分野 5 研究会

理化学研究所、2012. 1. 24～25(講演日1. 24)招待講演

査読付きの学術論文(URL を記載)

1. The equation of state and composition of hot, dense matter in core-collapse supernovae, S.I. Blinnikov, I.V. Panov, M.A.Rudzsky and K. Sumiyoshi, *Astronomy & Astrophysics* 535 (2011) A37 (13 pages).
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201117225>
2. Relativistic equation of state for core-collapse supernova simulations, H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu and K. Sumiyoshi, *Astrophysical Journal, Supplement Series* 197 (2011) 20 (14 pages).
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/197/2/20>
3. Possibility of the QCD critical point sweep during the black hole formation, A. Ohnishi, H. Ueda, T. Z. Nakano, M. Ruggieri and K. Sumiyoshi, *Physics Letters B* 704 (2011) 284-290.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2011.09.018>

プロシーディング論文(URL を記載)

1. Progress of the equation of state table for supernova simulations and its influence, K. Sumiyoshi
in Proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), RIKEN, Wako, Saitama, Japan
American Institute of Physics Conference Proceedings, (2012) in press.
2. The influence of hyperon potential on the black-hole-forming failed supernovae, K. Nakazato and K. Sumiyoshi,
in Proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), RIKEN, Wako, Saitama, Japan
American Institute of Physics Conference Proceedings, (2012) in press.

3. QCD critical point sweep during black hole formation,
A. Ohnishi, H. Ueda, T. Z. Nakano, M. Ruggieri and K. Sumiyoshi,
in Proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies
(OMEG11), RIKEN, Wako, Saitama, Japan
American Institute of Physics Conference Proceedings, (2012) in press.

その他（学位論文、紀要、投稿中の論文を含む）（URL を記載）

特記（本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など）

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、准教授

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

実施報告の詳細

本研究で用いる計算コードは、ニュートリノ輻射のボルツマン方程式を近似せずに扱う手法を用いており、輻射輸送における近似がなく、第一原理的にニュートリノ輸送現象を扱えるのが強みである。また、研究代表者が長年にわたり蓄積・整備してきた状態方程式データ・ニュートリノ反応の詳細を組み込むことが可能であり、クォーク・ハドロン・原子核・ニュートリノの物理が天体現象へどのような影響を与えるのか、両者を繋ぎながら研究を行っている。

球対称計算においては、超新星の爆発メカニズム解明、ブラックホール形成に至る際のニュートリノ放出スペクトルの予測などで研究実績を積んできた計算コードを活用している。大質量星のモデルと状態方程式を系統的に組み合わせ物理シミュレーションを行い、超新星ニュートリノ検出によりダイナミクスや高温高密度物質の性質を探る研究を行っている。特に、ブラックホール形成に至る場合に、原始中性子星内部の温度と密度がどのような経路をたどるのかを求めて、QCD 相図上での動きを調べることで、臨界点や相境界を探ることができる事を発見して、ニュートリノ観測の重要性を提案した。また、計算上で必要なブロック三重対角行列の解法について、現在用いている直接法による並列巡回縮約法から、反復法による行列計算へ置き換えるための研究を進めている。実際の数値シミュレーションにおける行列パターンを生成して、行列データの解析を行い、どのような反復法や前処理を用いることができるかの探索を行っている。

3次元ニュートリノ輻射計算については、空間3次元・ニュートリノ変数3次元（エネルギーと角度2つ）の6次元でのニュートリノ分布関数の時間発展問題であり、我々の計算コードおよび計算結果は、世界に先駆けた取り組み・研究成果である。これまでに開発を進めてきた、3次元ニュートリノ輻射輸送計算コードの基礎テストと検証を行い、超新星へ応用するための計算コード開発を完了させた。（投稿した論文へ対するレフェリーコメントが詳細に渡り、このコメントに答える形で、計算コードの検証を詳しく行うことができた。）

これと並行して、3次元輻射計算コードを並列化するための開発と大規模化テストを行った。計算の中心となる部分の並列化を完了して、並列計算テストを行った。1ノードおよび4ノードまでのテストにより並列化した計算に問題がなく、高速化できることが判った。一方、計算速度の測定では、ピーク速度に対して十分な性能がまだ得られておらず、計算コードのチューニングが課題となっている。また、大規模化においては、8ノード使用へ向けて、規模拡大をテスト中であるが、ファイル出力の面において、最大ファイルサイズを越えたためのエラーが出てしまうため、入出力についても並列化が必要であることが判明した。これについては、引き続き開発と改良を行っている。

輻射輸送計算は時間発展について陰解法で行っており、3次元においても大規模なブロック三重対角行列を含む疎行列の解法が必要である。行列解法においては反復法を用いているが、単純な点ヤコビ前処理では、収束しない場合があることが判明した。この例について、行列データの解析と反復法の探索により、改良ヤコビ法により収束が得られることを発見した。長い時間ステップを取った時にも収束が改善しており、超新星爆発を探索する長時間計算へ向けて、必要な時間ステップも実現できることが判った。こうした連携により新しい前処理方法を提案する計算科学の研究成果へと繋げることができた。