

研究種目： 新学術領域研究
研究期間： 平成20年度～平成24年度
課題番号： 20105004
研究課題名（和文） クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成
研究課題名（英文） Study of Explosive Astrophysical Phenomena and Nucleosynthesis based on Quark Dynamics and Nuclear Structure
研究代表者
鈴木 英之 (SUZUKI HIDEYUKI)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号： 90211987

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 超新星爆発、ニュートリノ、状態方程式、ブラックホール、中性子星、重力波、
元素合成、ニュートリノ振動

1. 研究計画の概要

本研究では、原子核物理の研究者と天体物理の研究者の連携により、格子 QCD など得られるハドロン間相互作用やさまざまな多体系の取り扱い法に基づく現実的な状態方程式や原子核構造モデルを用いて、超新星爆発、ブラックホール形成、連星中性子星やブラックホールと中性子星の合体などの爆発的天体現象に関する一般相対論的数値シミュレーションを行い、そのダイナミクスや宇宙における元素の起源の解明を目指す。その際、自転に伴う質量放出や物質混合などを考慮した恒星進化、ハイペロンを含む核物質のダイナミクスへの影響、爆発的要素合成・ r -過程・ s -過程・ニュートリノ要素合成など多様な元素合成過程や元素合成サイト、元素組成の観測データを用いた超新星モデルへのフィードバック、放出されるニュートリノや重力波の将来観測からのハドロン物理へのフィードバックの可能性についても詳しく解析する。また将来の大規模数値計算の準備として数値相対論と多次元ニュートリノ輸送の結合に関する基礎研究も行う。また、ニュートリノ振動についてニュートリノ-電子相互作用が作り出す物質効果だけでなく、ニュートリノの自己相互作用による二体量子効果を厳密に扱う理論計算の枠組みを検討し、超新星ニュートリノフレーバーの変化および元素合成に与える影響を数値計算により解明する。これらの研究テーマについて、本計画研究内のみならず他の計画研究班の研究者との新たな連携を推進することも大きな目標の一つである。

2. 研究の進捗状況

(1) 現実的な状態方程式やニュートリノ冷却を組み込んだ並列化数値相対論コードを世界に先駆けて開発した。これを用いて連星中性子星の合体や種族 III の星が重力崩壊してブラックホールになる過程を調べた。
(2) 球対称ニュートリノ輻射流体計算による大質量星の重力崩壊現象の系統的な計算を行った。放出されるニュートリノの地上観測によって、超新星爆発か否か、原始中性子星形成かブラックホール形成か、中心コアの高温高密度物質がどのような性質を持つか、などに関する知見が得られることを明らかにした。さらに、親星の性質による違いを明確にするため、梅田らによる大質量星のモデル系列を用いた系統的な研究を進めている。
(3) 極超新星爆発とガンマ線バーストの中心候補天体とされるコラプサーの爆発モデルを構築し、特に真空振動・物質振動・ニュートリノ自己相互作用によるフレーバー振動が元素合成過程に及ぼす影響を研究し、ニュートリノ平均温度および未知のニュートリノ振動パラメータの決定方法を提案した。
(4) 自転の影響を考慮した恒星進化計算コードの開発とともに、大質量星から質量放出された物質の化学組成や、非常に重い星の爆発とされる SN2007bi の爆発機構を探る研究を行った。
(5) クラスタ変分法に基づく高密度物質の状態方程式数値テーブルを新たに作成するため、鷹野らとの連携研究を進め、原子核のトーマス・フェルミ計算パラメータの最適化

手法を詳しく検討した。

(6) ニュートリノ輻射輸送計算で現れる大規模行列のパターンを解析して、どのような行列解法で解くのが効率がよいのかを探るA04 班との連携研究の道筋を確立することができた。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

現実的状态方程式やニュートリノ冷却を組み込んだ並列化数値相対論コードを世界に先駆けて開発できた。また自転する恒星進化計算コード開発も順調に進んでおり、水素燃焼が終わるまでの計算が可能になった。爆発的天体現象における元素合成やさまざまな状態方程式を用いた球対称重力崩壊数値シミュレーションを系統的に行うとともに、新たな状態方程式の作成や三次元ニュートリノ輻射輸送計算コードの開発に向けた連携も進んでいる。ただしまだ格子 QCD 計算に基づく核力を取り込む段階には至っていない。

4. 今後の研究の推進方策

自転の影響が小さい星の球対称重力崩壊シミュレーションを、恒星モデルや入力物理に関して系統的に行い、放出されるニュートリノも含めた計算データを公開していく。また、簡略化したニュートリノ輸送コードも開発できたので、コアの重力崩壊から外層の爆発に至る長時間シミュレーションを行い、ニュートリノ風における重元素合成などの研究も進める。一方、自転の影響が無視できないケースについては、回転星の進化計算コードの開発をさらに進め、重力崩壊前のモデルを構築するとともに、その後の重力崩壊、コアプサーなどに起因する爆発や元素合成を詳しく調べる。さらにこれらの重元素合成が宇宙・銀河の化学進化に与える影響や、ニュートリノ自己相互作用によるフレーバー振動の影響も検討する。

現実的な入力物理を取り込んだ数値相対論では、引き続きブラックホールが形成されるようなケースについても数値シミュレーションを進め、ダイナミクスや重力波放出を詳しく調べていく。

また新学術領域研究の一つの要として、新たな状態方程式作成と多次元ニュートリノ輸送計算コードの開発に向けたA02, A04 班との連携を引き続き進める。

5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 65 件)

1. T. Yoshida and H. Umeda, “A progenitor for the extremely luminous Type Ic

supernova 2007bi”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 412, 2011, L78 査読有

2. K. Kiuchi, Y. Sekiguchi, M. Shibata, and K. Taniguchi, “Exploring binary-neutron-star-merger scenario of short-gamma-ray bursts by gravitational-wave observation”, Phys. Rev. Lett. 104, 2010, 141101 査読有

3. T. Hayakawa, T. Kajino, S. Chiba, and G. J. Mathews, “New Estimate for the Time-Dependent Thermal Nucleosynthesis of ^{180}Tm in Supernova Nucleosynthesis”, Phys. Rev. C81, 2010, 052801 査読有

4. K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki and S. Yamada, “Exploring hadron physics in black hole formations: A new promising target of neutrino astronomy”, Phys. Rev. D81, 2010, 083009 査読有

5. K. Sumiyoshi, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada and H. Suzuki, “Emergence of hyperons in failed supernovae: trigger of the black hole formation”, Astrophysical Journal 690, 2009, L43 査読有

[学会発表] (計 57 件)

1. K. Sumiyoshi, “A numerical challenge on the core-collapse supernovae: physics of neutrino and matter at extreme conditions”, International Symposium “Nanoscience and Quantum Physics 2011”, Jan. 27, 2011, International House of Japan, Roppongi, Tokyo, Japan

2. T. Kajino, “Supernova Nucleosynthesis, Neutrino Oscillation, and Nuclear Weak Interactions”, French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, Jan. 6, 2011, RIKEN, Wako, Japan

3. H. Suzuki, “Neutrinos from supernovae and failed supernovae”, 11th International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, Dec. 13, 2010, Toyama International Conference Hall, Toyama, Japan

4. H. Umeda, “On the progenitors of GRBs”, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts, Apr. 22, 2010, 京都テルサ, 京都

5. M. Shibata, “Merger of binary neutron stars and black hole-neutron star binaries”, Computational General Relativistic Astrophysics, Oct. 23, 2009, Princeton, USA

[その他]

ホームページ

http://aspht1.ph.noda.tus.ac.jp/bridge_a03/