

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号： 32660

研究種目： 新学術領域研究

研究期間： 2008年度～2012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

研究成果の概要（和文）：

数値シミュレーションを用いて、原子核物理の研究成果に基づいた爆発的天体現象の解明を行った。現実的な状態方程式や可能性が議論されている特殊な状態方程式を用いた重力崩壊型超新星爆発や連星中性子星の合体のダイナミクス、放出されるニュートリノ、重力波、重元素を詳しく調べた。また、電子捕獲型超新星爆発の親星を含む恒星の進化計算、三次元ニュートリノ輸送計算コードの開発、新たな高密度状態方程式の作成も行った。

研究成果の概要（英文）：

Explosive astrophysical phenomena are studied using numerical simulations based on modern nuclear physics. Dynamics of collapse-driven supernova explosions and of binary neutron star mergers, and emission of neutrinos, gravitational waves, heavy nuclei from them are investigated in detail. Calculation of stellar evolution including progenitors of electron-capture supernovae, development of 3 dimensional neutrino transfer code, construction of new equation of states for high density matter are also done.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2009年度	17,400,000	5,220,000	22,620,000
2010年度	18,900,000	5,670,000	24,570,000
2011年度	20,700,000	6,210,000	26,910,000
2012年度	17,400,000	5,220,000	22,620,000
総計	79,600,000	23,880,000	103,480,000

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. 研究開始当初の背景

宇宙に存在する元素の起源は、ビッグバン初期の軽元素合成を除いて、恒星の進化とその終焉を飾る爆発的天体現象に関連するとされてきたが、未だその具体的な描像や定量的な理解は不十分であった。一方、すばる望遠鏡などによる金属欠乏星の元素組成の観測

が進み、個々の爆発的天体現象に伴う元素合成に関する理論モデルを観測との比較によって較正することができるようになってきた。また、LIGOなどの大型重力波検出器により、中性子星の合体などに伴う重力波の検出も現実的になってきた。さらに小柴・戸塚らにより日本が世界を牽引してきたニュート

リノ天文学の分野でも、近傍の超新星爆発やブラックホール形成時のニュートリノバーストの詳細な観測の準備が整っていた。これらの元素分布、重力波、ニュートリノによって、高密度天体の形成や爆発を観測することは、これらの現象を大きく支配する高密度物質の性質すなわち原子核・ハドロン物理を探る貴重な手段である。我々は爆発的天体現象と元素合成について研究を行ってきたが、発展の著しい小さなスケール(クォーク・ハドロン)の物理の研究成果を取り込んだ重層的なアプローチと数値シミュレーションの活用により、さらなる成果が得られると考え、本計画研究を立案した。

2. 研究の目的

本研究は、新設された新学術領域の科学研究費補助金による研究のため、領域内の他の研究分野との連携を強く意識して、研究目的を設定した。具体的には、本領域の計画研究A01, A02の研究者が世界をリードしてきたクォーク力学・原子核構造に関する研究から得られる高密度物質の状態方程式・原子核構造モデル・反応率に関する研究成果を基に爆発的天体現象と元素合成の数値シミュレーションを行い、天体現象モデルの検証のみならず天体観測データから核物理へのフィードバックの可能性を探り、元素の起源および関連する天体現象の理解を進めようとした。

- (1) 恒星進化の専門家と重力崩壊現象の専門家の連携により、星の初期質量、金属量、質量放出の不定性などを考慮した恒星進化計算の結果を星の重力崩壊シミュレーションの初期データとして利用することで、進化段階から重力崩壊に至る一貫したモデルのこれまでに類をみない系統的な研究を行う。
- (2) 爆発的天体現象の数値シミュレーションで必要とされる有限温度高密度物質の状態方程式に関して、天体シミュレーションの専門家と原子核物理の研究者の連携により、新しい数値テーブルの作成をめざす。
- (3) 現実的な状態方程式を用いてさまざまな質量、質量比の高密度連星系の合体現象を調べ、形成される大質量中性子星やブラックホール降着円盤の密度、温度分布、ニュートリノ放射量などを世界で初めて一般相対論的計算により解明する。
- (4) 計画研究A04との連携により輸送方程式固有の連立方程式の高速解法を開発して、多次元ニュートリノ輸送計算コードの開発を進める。
- (5) 上記の恒星進化や爆発的天体現象のシミュレーションに基づいて、爆発的元素合成、 r 過程やニュートリノ過程による元素合成計算を行い、さまざまな元素の起源の解明を目指す。その際、ニュートリノ振動の効果も考

慮する。

3. 研究の方法

- (1) 梅田らによる最新の恒星進化計算の結果とニュートリノ輻射流体計算およびニュートリノ原子核物理データを統合した数値シミュレーションを用いて、大質量星の重力崩壊により起こる超新星爆発やブラックホール形成のダイナミクス及びニュートリノ放出を調べた。その際、球対称のもとでの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と拡散近似の原始中性子星の準静的進化計算コードを使用した。また高温高密度における物質の性質が天体現象に及ぼす影響を探るため、Shen, Lattimer-Swestyの状態方程式に加えエキゾチック物質の出現を考慮した状態方程式テーブルを構築した。
- (2) 計画研究A02の鷹野らにより計算された一様核物質の状態方程式を、非一様相へ拡張しようと、山室、中里、鈴木はトーマス・フェルミ計算を行った。
- (3) 柴田は、関口などと協力して、現実的な物理素過程を取り入れた数値相対論的シミュレーションを行い、連星中性子星の合体や大質量星の重力崩壊過程をこれまでにない確かさで物理的に明らかにした。
- (4) 多次元におけるニュートリノ輻射輸送計算コードとして、住吉、山田らは位相空間のボルツマン方程式を直接差分化する方式で計算コードを開発し、一方柴田らはモーメント方程式による定式化を行った。
- (5) 梅田、吉田、高橋は、超新星における爆発的元素合成に関して、これまであまり調べられてこなかった電子捕獲型超新星や非常に明るい超新星に着目し、以前から用いていた梅田&野本の星の進化コードに加え、電子捕獲型超新星の親星計算に対応できる高速なコードを開発して、それを用いた。また従来の非回転の親星モデルに加えて回転星のモデルを構築するためのコード開発を行った。
- (6) 梶野らは、テンソル力の効果をミクロスコピックに正しく取り入れて、中性子過剰核の構造を系統的に説明できるハミルトニアンを構築した。これをニュートリノ・原子核反応断面積、高温・高密度条件下での電子捕獲率、ベータ崩壊半減期の量子力学計算に応用した。さらに相対論的平均場理論を用いて、核子とハイペロンを考慮した原始中性子星内部の状態方程式を作り、超強磁場下でのニュートリノ吸収・散乱断面積の計算を行った。2次元特殊相対論的流体コードを用いて、ニュートリノ加熱型コラプサーモデルを構築して、ガンマ線バーストにおける元素合成の研究も行った。

4. 研究成果

(1) 梅田らによる質量・金属量の違う親星を初期モデルとして、重力崩壊からバウンス、衝撃波伝播、原始中性子星/ブラックホール誕生を一貫して追う数値シミュレーションを行い、ニュートリノ放出スペクトルの時間発展を系統的に明らかにした。図1は、13太陽質量の親星の爆発時に放出されるニュートリノの計算例である。ブラックホール形成が起こる場合については、状態方程式の影響が顕著に現れることを見だし、クォーク・ハドロン相転移やハイペロン出現をニュートリノ放出の継続時間やスペクトルにより探ることを提案した。また、将来のニュートリノ観測により高温高密度状態におけるエキゾチック物質の出現を検証できるか、詳細な議論を行った。

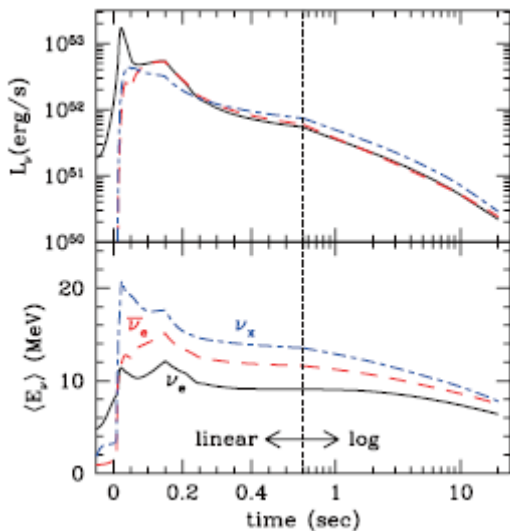


図1

(2) クラスタ変分法に基づく高密度物質の新しい状態方程式の作成に取り組み、代表的な温度における相図を作成して、既存のShen状態方程式との比較を行った。また、古澤らとの共同研究で多核種の存在を考慮した状態方程式の作成、および石塚を中心に高密度物質の状態方程式データベースの開発を行った。

(3) 数値相対論に関してはまず有限温度の状態方程式およびニュートリノ冷却の効果を考慮する輻射輸送コードを取り入れた。その後テスト計算を行い、コードの正当性を確かめた後に、回転する大質量星がブラックホールと降着円盤からなる系へ重力崩壊する過程を明らかにした。特に、誕生する降着円盤が、これまで予想されてこなかった短い時間変動を示すこと、さらに質量降着による衝撃波加熱により高光度のニュートリノ放射を行うことを解明した。さらに連星中性子星の合体にコードを適用し、連星中性子星の合体後には、高温の大質量中性子星が誕生し

そうなこと、それは最大 5×10^{53} ergs/s にも達する高光度でニュートリノ放射をすること、さらに周波数が 2~3 kHz 程度の特徴的な重力波を放射することを解明した。この成果は Phys. Rev. Lett. に発表され、結果の一部が表紙に掲載された(図2)。ブラックホール・中性子星連星に対するシミュレーションも実行した。

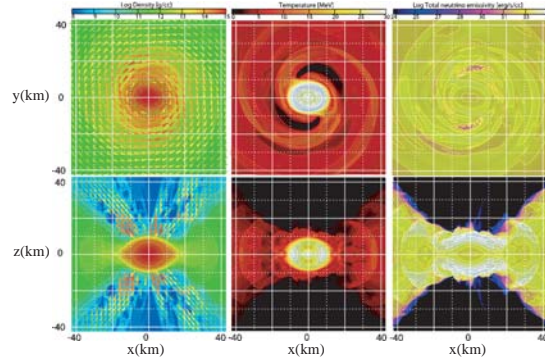


図2

(4) 住吉を中心に3次元ニュートリノ輻射輸送問題においてボルツマン方程式を直接解く計算コードを開発して、3次元空間超新星コアにおける3次元運動量空間のニュートリノ分布を解くことに世界で初めて成功した。この時、反復法による行列解法を効果的に行う手法を開発して並列化・高速化を可能とすることができた。図3は、3次元ニュートリノ輻射輸送計算による超新星コアにおけるニュートリノ密度分布である。

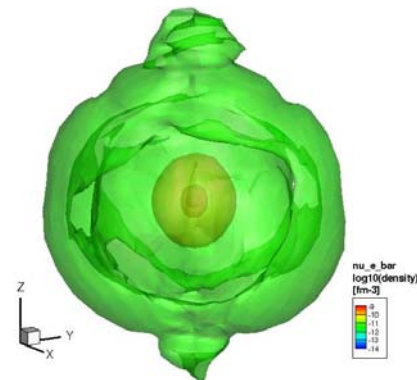


図3

(5) 星の進化計算に関しては、回転星の計算コード開発を完了することができ、今後そのコードを使っていろいろな計算を行える段階に達する事ができた。図4はこのコードを用いて星の進化を計算し、回転星と非回転星のHR図上での違いを示したものである。また電子捕獲型超新星の爆発直前のモデルを構築することに成功した。このような計算は過去20年以上行われておらず、最新の物理

を取り入れた計算の結果、過去のモデルと比べ爆発直前の電子捕獲がより進み、中心での爆燃波の発達が早いことがわかった。この結果は最終的な超新星爆発に影響を及ぼす可能性がある。このように計算した超新星の親星モデルを用いて元素合成の計算を行い、重力崩壊型超新星によって非常に明るい超新星を説明できるかどうかの議論を行い、また重力崩壊型超新星により弱 r 過程元素の合成が可能であることを示した。

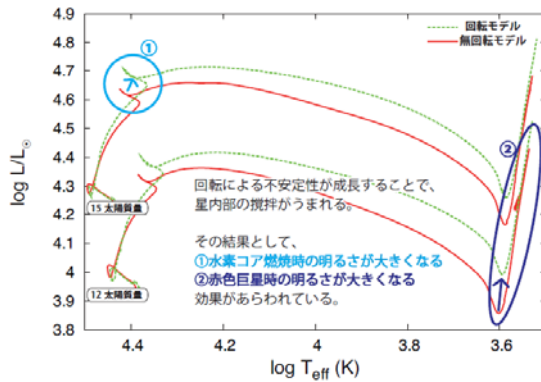


図 4

(6) 梶野を中心に超新星爆発とガンマ線バーストで、ユニバーサリティーを満たす重元素 (r 過程元素) が生成される条件を明らかにした。そしてこれらの重元素が、宇宙・銀河の化学進化に与える影響および残存超新星ニュートリノによる重力崩壊型超新星の宇宙論的進化の考察を進めた。またニュートリノと超新星物質との相互作用、特に真空振動・物質振動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。さらにニュートリノ自己相互作用によるフレーバー振動の量子論的な厳密解の導出を試みるとともに、超新星ニュートリノが引き起こす諸現象の理解を進めた。その他、原始中性子星内部でのニュートリノ吸収および散乱断面積に現れるパリティの破れの効果によって非等方的なニュートリノ輸送が起き、パルサーキックに大きく影響することを定量的に明らかにし、パルサーキック速度を説明できる可能性を示した。理化学研究所 RIBF で世界で初めて測定された中性子過剰核のベータ崩壊寿命が超新星 r プロセスに及ぼす影響も明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 122 件)

① K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki,

T. Totani, H. Umeda and S. Yamada,
“Supernova neutrino light curves and spectra for various progenitor stars: From core collapse to proto-neutron star cooling”, *Astrophysical Journal Supplement Series* 205 (2013) 2(17pages), (査読有),
DOI:10.1088/0067-0049/205/1/2

② W. Aoki, T. Suda, R. N. Boyd, T. Kajino and M. A. Famiano, “New Insights into the Astrophysical r-Process”, *Astrophys. J. Lett.* 766 (2013), L13, (査読有),
DOI:10.1088/2041-8205/766/1/L13

③ K. Sumiyoshi and S. Yamada, “Neutrino Transfer in Three Dimension for Core-Collapse Supernovae. I. Static Configurations”, *Astrophysical Journal Supplement Series* 199 (2012) 17 (32 pages) (査読有),
DOI:10.1088/0067-0049/199/1/17

④ H. Umeda, T. Yoshida and K. Takahashi, “Massive Star Evolution and Nucleosynthesis -Lower End of Fe-Core Collapse Supernova Progenitors and Remnant Neutron Star Mass Distribution”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 1 (2012) A302(27pages) (査読有),
DOI:10.1093/ptep/pts017

⑤ S. Furusawa, S. Yamada, K. Sumiyoshi and H. Suzuki, “A New Baryonic Equation of State at Sub-nuclear Densities for Core-Collapse Simulations”, *Astrophys. J.* 738 (2011) 178(17pages) (査読有)
DOI:10.1088/0004-637X/738/2/178

⑥ Y.-I. Sekiguchi and M. Shibata, “Formation of black hole and accretion disk in collapsar”, *Astrophys. J.* 737 (2011) 6 (28 pages) (査読有),
DOI:10.1088/0004-637X/737/1/6

⑦ Y. I. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, “Effects of hyperons in binary neutron star mergers”, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 211101-1--5, (査読有)
DOI:10.1103/PhysRevLett.107.211101

⑧ Y. I. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, and M. Shibata, “Gravitational waves and neutrino emission from the merger of binary neutron stars”, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 051102-1-5, (査読有),
DOI:10.1103/PhysRevLett.107.051102

⑨ T. Yoshida and H. Umeda, “A

progenitor for the extremely luminous Type Ic supernova 2007bi”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters 412 (2011) L78-L82, (査読有)

DOI:10.1111/j.1745-3933.2011.01008.x

- ⑩ T. Kuroda and H. Umeda, “Three-dimensional Magnetohydrodynamical Simulations of Gravitational Collapse of a 15 M [sun] Star”, The Astrophysical Journal Supplement Series 191 (2010) 439-466, (査読有)
DOI:10.1088/0067-0049/191/2/439
- ⑪ K. Nakazato, K. Sumiyoshi and S. Yamada, “Impact of quarks and pions on dynamics and neutrino signal of black hole formation in non-rotating stellar core collapse”, Astrophysical Journal 721 (2010) 1284-1294, (査読有)
DOI:10.1088/0004-637X/721/2/1284
- ⑫ Dai. G. Yamazaki, Kiyotomo Ichiki, Toshitaka Kajino, and Grant J. Mathews, “New constraint on the Primordial Magnetic Field”, Phys. Rev. D81 (2010) 023008, (査読有)
DOI:10.1103/PhysRevD.81.023008
- ⑬ 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-L46 (査読有),
DOI:10.1088/0004-637X/690/1/L43

[学会発表] (計 161 件)

- ① K. Sumiyoshi, “Numerical modeling of core-collapse supernovae and compact objects”, IAU Symposium 291: Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years, IAU General Assembly XXVIII, Beijing, China, 2012. 8. 20 (招待講演)
- ② M. Shibata, “Numerical simulations of gravitational waves with matter”, in “Gravitational Wave and Electromagnetic Studies of Compact Binary Mergers”, Santa Barbara, USA, July 30--Aug 3, 2012 (招待講演)
- ③ T. Kajino, “Supernova Nucleosynthesis and the Physics of Neutrino Oscillation”, Carpathian International Summer School of Physics 2012: Exotic Nuclei and Nuclear/Particle Astrophysics IV, From nuclei to stars, June 24-July 7, 2012, Sinaia, Romania (招待講演)
- ④ M. Shibata, “Numerical simulation for binary neutron star mergers”, in “Gamma-ray Bursts in the Era of Rapid Follow-up”, Liverpool, UK, June 18--22, 2012 (招待講演)
- ⑤ Koh Takahashi, Hideyuki Umeda, Takashi Yoshida, “Evolution of stars just below the critical mass for iron core formation”, Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts, IAU Symposium 279, Nikko, Japan, 12-16 March, 2012
- ⑥ 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” (nanoPHYS’11) International House of Japan, Jan. 27, 2011, Roppongi, Tokyo, Japan (招待講演)
- ⑦ T. Kajino, “Supernova Nucleosynthesis, Neutrino Mass and Oscillation, and Nuclear Weak Interactions”, French-Japanese Joint Symposium on Nuclear Structure Problems, January 5-8, 2011, RIKEN, Wako, Japan (招待講演)
- ⑧ 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 (招待講演)
- ⑨ T. Kajino, “Nucleosynthesis and Neutrinos”, International Symposium on New Faces of Atomic Nuclei, Okinawa, Japan, November 15-17, 2010 (招待講演)
- ⑩ Hideyuki Umeda, “On the progenitors of GRBs”, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts, Kyoto, Japan, April 19-23, 2010 (招待講演)
- ⑪ M. Shibata, “Simulation for neutron star-neutron star and black hole-neutron star binaries” in “Computational relativistic astrophysics”, Oct 20--22, 2009, Princeton, USA (招待講演)
- ⑫ K. Sumiyoshi, K. Nakazato, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada and H. Suzuki, “Emergence of hyperons in failed supernovae with short neutrino bursts”, The 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp X), “RICOTTI” in Tokai, Ibaraki, Japan, Sep. 14-18,

2009 (招待講演)

[図書] (計3件)

- ① 宇川彰、青木慎也、初田哲男、柴田大、梅村雅之、西村淳、岩波講座「計算科学2: 計算と宇宙」2012年2月、1-250ページ
- ② 梶野敏貴 他、地人書館、「天文学大事典」、2009年、総ページ数832ページ
- ③ 梶野敏貴 他、朝倉書店、「地球と宇宙の化学事典: 宇宙の年齢、ビッグバン宇宙」、2011年、総ページ数500ページ

[その他]

ホームページ「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」

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

Supernova Neutrino Database
(超新星ニュートリノデータベース)

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

EOSDB (状態方程式データベース)

<http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/eos-gate/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

梶野 敏貴 (KAJINO TOSHITAKA)
国立天文台・理論研究部・准教授
研究者番号: 20169444

住吉 光介 (SUMIYOSHI KOHSUKE)
沼津工業高等専門学校・教養科・教授
研究者番号: 30280720

梅田 秀之 (UMEDA HIDEYUKI)
東京大学・理学系研究科・准教授
研究者番号: 60447357

柴田 大 (SHIBATA MASARU)
京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号: 80252576

(3) 連携研究者

山田 章一 (YAMADA SHOICHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 80251403

大西 明 (OHNISHI AKIRA)

京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号: 70250412

瓜生 康史 (URYU KOHJI)
琉球大学・理学部・教授
研究者番号: 40457693

千葉 敏 (CHIBA SATOSHI)
東京工業大学・理工学研究科・教授
研究者番号: 60354883

岩本 信之 (IWAMOTO NOBUYUKI)
原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究
部門・研究副主幹
研究者番号: 70391307

吉田 敬 (YOSHIDA TAKASHI)
東京大学・理学系研究科・研究員
研究者番号: 80374891

親松 和浩 (OYAMATSU KAZUHIRO)
愛知淑徳大学・人間情報学部・教授
研究者番号: 10262883

鷹野 正利 (TAKANO MASATOSHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00257198