

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24年 5月 16日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540281

研究課題名（和文） 大質量星重力崩壊における長時間進化と物理過程の研究

研究課題名（英文） Long-term evolutions and physical processes of massive star collapse

研究代表者

山田 章一（YAMADA SHOICHI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80251403

研究成果の概要（和文）：

ニュートリノ加熱機構に基づき、原子核反応を適切に考慮した極めて長時間の超新星シミュレーションを行い、爆発エネルギーがどのように決まるかを明らかにした。また、同時に3次元ボルツマンソルバーも開発した。一方、ブラックホール形成からのニュートリノや重力波放出を定量的に計算し、ジェット形成に対する新たな知見も得た。さらには、クォーク星形成の基礎的ダイナミクスを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Performing long-term simulations of post-bounce supernova evolutions in the context of neutrino-heating mechanism, we have revealed how the explosion energy depends on nuclear reactions. We have developed a new 3D Boltzmann solver. We have also computed neutrino and gravity wave emissions from black hole formations quantitatively. New insights into the jet formations have been obtained. Moreover, we have studied basic properties in the dynamics of quark star formations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：重力崩壊・ニュートリノ・一般相対論・輻射輸送・相転移

1. 研究開始当初の背景

太陽のおよそ20～25倍以下の質量を持った大質量星は超新星爆発をおこし中性子星を形成する可能性が高い。このいわゆる重力崩壊型超新星の爆発機構はいまだ謎のままであるが、比較的ゆっくり起こる定常衝撃波不安定(SASI)が重要な役割を果たしていると考えられる。特に、3次元SASIの長時間進化が爆発に与える影響は多くの研究者の注目するところである。

一方、太陽質量の約30倍以上という質量領域は、近年ガンマ線バーストの親星として多くの研究者の注目を集めている。これに加え、自転が十分に速くないためガンマ線バーストを起こさず全ての物質がブラックホールにのみこまれてしまうものも多数いると考えられる。これもニュートリノでならば観測可能であり、核物質の状態方程式に関する重要な情報を与えてくれるため、定量的な研究が求められていた。これと関連して、中性

子星ではなくクォーク星や中性子星ではあるが極めて磁場の強いいわゆるマグネターの形成にも注目が集まっていた。

2. 研究の目的

上記の事柄はいずれも大質量星が重力崩壊を起こす過程で起こると考えられており、特にダイナミカルタイムスケールよりも長い時間かけておこる現象である。これを主として数値シミュレーションにより定量的に明らかにしていくことが本研究の目的である。特に、(1)重力崩壊型超新星における SASI の長時間発展とその爆発への影響と 3次元輻射輸送コードの開発、(2)ガンマ線バーストを含む特に質量の重い星の重力崩壊とブラックホール形成、(3)マグネター磁場における QED 基礎過程、(4)クォーク星やハイペロン星などの形成を解き明かすことが本件で目指したところである。

3. 研究の方法

上記4つの研究テーマは比較的独立性が高いので、研究協力者の協力を得ながら基本的に並列して行った。また、最初の2つのテーマには大規模な数値計算コードの開発も必要であった。以下これら4つについて順に説明していく。

- (1) ニュートリノをいわゆる light bulb 近似で扱った 3次元流体力学コードを用い、SASI の性質を明らかにすると同時に、爆発を起こす臨界ニュートリノ光度への影響を系統的に調べた。特に、降着物質に回転を付加することで、自転の有無が生み出す違いも明らかにした。さらに、より正確にニュートリノ輸送を計算するべく 3次元ボルツマンソルバーを開発した。同時に、原子核の統計平衡を考慮した新しい状態方程式をつくった。一方、極めて長時間のシミュレーションをすることにより、超新星爆発のエネルギーがどのように決まるのかを、核反応や状態方程式を首尾一貫した形で取り込み調べた。
- (2) いわゆる failed supernova に対しては、ガンマ線バーストの文脈で星外層の降着が相対論的ジェットに与える影響とそれが生み出すいわゆる光球放射を 2次元軸対称の数値シミュレーションとレイトレーシングを組み合わせて定量的に調べた。これには、一般相対論的流体力学コードとその弱重力近似版の開発を行った。一方、弱回転ブラックホール形成の文脈では、クォークやハイペロンの出現がダイナミクスとニュートリノ放出に与える影響を球対称一般相対論的輻射流体力学計算により定量的に調べた。その際に、相対論的平均場近似に基づいたハイペロン状態方程式や MITbag モデルによるクォーク物質の状態方程式をシミュレーション用にテーブル化した。

- (3) 超場形式と n 粒子既約ダイヤグラムを用いた非平衡系の場の理論を用いて、エネルギー運動量テンソルとその保存則を導き、強磁場がガスの運動方程式に与える補正項を導いた。これを低痔のループまでで打ち切った近似のもとで評価し、熱力学的に首尾一貫した方程式を求める。
- (4) クォーク星の形成は準安定状態にある通常の中性子星を経ておこる可能性がある。その場合、相転移は非平衡非可逆過程となり、地上の燃焼過程に似たものとなる。この過程を(2)でも用いた状態方程式を拡張して流体力学的に記述し、ガスの運動がある中で相転移が非可逆的に起こる様子を調べた。その際、いわゆる絶対安定なストレンジ物質のレジームとそうでない場合の2通りを考慮し、爆轟と爆燃の2つの燃焼形式を調べた。

4. 研究成果

上記の4つの研究テーマごとにその成果を述べていく。

- (1) 自転がある場合、SASI の非線形成長は無回転時に比べ抑制されることが分かった。また、モード分解と時間方向のフーリエ変換を併用することにより、自転と同じ向きに回転するモードの成長が促進され、逆回転のものは抑制されることが、軸対称モードは影響をあまり受けないことなども明らかにした。この意味で、爆発によって自転は必ずしもプラスに働かないことが分かる。このモデルに基づき、重力波放出も計算したところ、3次元非軸対称な不安定降着流から放出される重力波は、軸対称のものに比べ、より stochastic であることもわかった。この研究では、重力波の新たな計算法も提案した。一方、ニュートリノ加熱機構に基づく極めて長時間のシミュレーションを 1, 2次元で行い、衝撃波復活のタイミングが適切な時のみ、観測されているような爆発エネルギーとニッケルの合成量を得られることが分かった。また、爆発エネルギーには核子の再結合エネルギーが最も大きな寄与を与えることも示した。さらに、球対称性を仮定しない場合の方が観測とよく合うことも明らかにした。
- (2) 地上観測器として具体的にスーパーカミオカンデを想定し、そこでの観測から高密度核物質にハイペロンが存在するかどうかを現在提案されている状態方程式をもとに区別可能か統計的に議論し、われわれの銀河系内のイベントであれば十分にそれが可能であることを示した。また、クォークやパイ凝縮などがあった場合のニュートリノシグナルへの影響も定量的に明らかにした。一方、ガンマ線バーストでは、大質量星の重力崩壊において超

相対論的なジェットがいつ生じるのかをパラメーターとして、収縮する星外層の中をジェットが伝播する様子を軸対称 2 次元の数値シミュレーションで調べ、観測量特に光球放射に現れる違いを定量的に調べた。その際、崩壊前の星を作るため、多層からなる回転平衡形状を求める新しい方法を開発した。計算の結果、ジェット生成が遅くなると、外層の密度分布が大きく変わるため、輻射にも定性的な違いが出るのが明らかになった。

- (3) 超場形式と n 粒子既約ダイヤグラムを用いた非平衡系の場の理論をコヒーレントな磁場が存在する系での QED に適用し、Slavnov-Taylor 恒等式からエネルギー運動量テンソルの保存式を導いた。ループ数による展開の低次項を書き下し、繰り込みの必要になるところを同定した。
- (4) バリオンからなっている物質がクォークの非閉じ込め状態に非可逆的に相転移するダイナミクスを流体力学的に記述し、燃焼過程との類推で理解する試みを行った。その際、クォーク相には MITbag モデルを用い、バリオン相には、相対論的平均場理論に基づく現実的な状態方程式を用い、混合相もモデル化した。その結果、地上の燃焼とは異なり、相転移は吸熱領域で起こりうることを示した。また、燃焼モードが強い爆轟と弱い爆燃であること、後者では燃焼波面が Landau-Darwin 不安定を示さないことなども明らかにした。

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 18 件)

- ① Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada Neutrino Transfer in Three Dimensions for Core-Collapse Supernovae. I. Static Configurations, *Astrophysical Journal Supplements*, 査読有、199/, 17-48, 03. 2012
- ② K. Nakazato, S. Furusawa, K. Sumiyoshi, A. Ohnishi, S. Yamada, H. Suzuki, Hyperon Matter and Black Hole Formation in Failed Supernovae, *Astrophysical Journal*, 査読有、745/, 197-206, 02. 2012
- ③ Shun Furusawa, Shoichi Yamada, Kohsuke Sumiyoshi and Hideyuki Suzuki, A New Baryonic Equation of State at Sub-Nuclear Densities for Core-Collapse Simulations, *Astrophysical Journal*, 査読有、738/, 178-194, 09. 2011
- ④ Hiroki Nagakura, Hirotaka Ito, Kenta Kiuchi, Shoichi Yamada, Jet Propagations, Breakouts and Photospheric Emissions in Collapsing Massive Progenitors of Long Duration Gamma-ray Bursts, *Astrophysical Journal*, 査読有、731/, 80-97, 04. 2011
- ⑤ H. Ito, M. Kino, N. Kawakatsu and S. Yamada, Evolution of Non-Thermal Emission from Shell Associated with AGN Jets, *Astrophysical Journal*, 査読有、730/, 120-131, 04. 2011
- ⑥ Ken'ichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada, Impact of Quarks and Pions on Dynamics and Neutrino Signal of Black Hole Formation in Non-rotating Stellar Core Collapse, *Astrophysical Journal*, 査読有、721/, 1284-1294, 10. 210
- ⑦ Kenta Kiuchi, Hiroki Nagakura and Shoichi Yamada, Multi-layered Configurations in Differentially-Rotational Equilibrium, *The Astrophysical Journal*, 査読有、717/, 666-673, 07. 2010
- ⑧ Shio Kawagoe, Takashi Yoshida, Toshitaka Kajino, Hideyuki Suzuki, Kohsuke Sumiyoshi and Shoichi Yamada, Neutrino oscillation and expected event rate of supernova neutrinos in adiabatic explosion model, *Physical Review D*, 査読有、81/, 123014, 06. 2010
- ⑨ Ken'ichiro Nakazato, Kohsuke Sumiyoshi, Hideyuki Suzuki, and Shoichi Yamada, Exploring Hadron Physics in Black Hole Formations: a New Promising Target of Neutrino Astronomy, *Physical Review D*, 査読有、81/, 083009, 04. 2010
- ⑩ Bungo Shikita, Hiroko Koyama and Shoichi Yamada, The Dynamics of Three-Planet Systems: an Approach from Dynamical System, *The Astrophysical Journal*, 査読有、712/, 819-832, 04. 2010
- ⑪ Kei Kotake et al., Ray-Tracing Analysis of Anisotropic Neutrino Radiation for Estimating Gravitational Waves in Core-Collapse Supernovae, *Astrophysical Journal*, 査読有、704/, 951-963, 10. 2009
- ⑫ Ken'ichiro Nakazato, Kazuhiro Oyamatsu, and Shoichi Yamada, Gyroid phase in nuclear pasta, *Physical Review Letters*, 査読有、103/, 132501, 09. 2009
- ⑬ Wakana Iwakami, Naofumi Ohnishi, Kei Kotake, Shoichi Yamada, Keisuke Sawada, Spiral Mode of Standing Accretion Shock Instability in Core-Collapse Supernovae, *Astrophysics and Space Science*, 査読有、322/, 43-47, 08. 2009
- ⑭ Wakana Iwakami, Kei Kotake, Naofumi Ohnishi, Shoichi Yamada, and Keisuke Sawada, Effects of Rotation on Standing Accretion Shock Instability in Nonlinear Phase for Core-Collapse Supernovae, *Astrophysical Journal*, 査読有、700/, 232-242, 07. 2009

- ⑮ Masaomi Ono, Masa-aki Hashimoto, Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake and Shoichi Yamada, Explosive Nucleosynthesis in Magnetohydrodynamical Jets from Collapsars, Progress of Theoretical Physics, 査読有、122/, 755-777, 06. 2009
- ⑯ Kei Kotake, Wakana Iwakami, Naofumi Ohnishi and Shoichi Yamada, Stochastic Nature of Gravitational Waves from Supernova Explosions with Standing Accretion Shock Instability, Astrophysical Journal Letters, 査読有、693/, L133-L136, 06. 2009
- ⑰ Hiroki Nagakura and Shoichi Yamada, The Standing Accretion Shock Instability in the Disk around the Kerr Black Hole, The Astrophysical Journal, 査読有、696/, 2026-2035, 05. 2009
- ⑱ K. Sumiyoshi, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada, and H. Suzuki, Emergence of Hyperons in Failed Supernovae: Trigger of the Black Hole Formation, The Astrophysical Journal Letters, 査読有、690/, L43-L46, 01. 2009

[学会発表] (計 8 件)

- ① 2011 年 12 月京大研究会「超新星爆発と数値シミュレーション」招待講演「ニュートリノ加熱機構における爆発の条件と爆発エネルギー」
- ② 2011 年 8 月京大サマースクール「クオークから超新星爆発まで」---基礎物理の理想への挑戦---招待講演「超新星爆発の物理と数値シミュレーション」
- ③ 2011 年 7 月 Pohang (韓国) 2011 APCTP International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves 招待講演「Core collapse supernovae: hydrodynamics, EOS and weak interactions」
- ④ 2010 年 12 月京大第 23 回理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」招待講演「超新星爆発理論」
- ⑤ 2010 年 10 月 Seoul (韓国) The 35th Workshop on Gravitation and Numerical Relativity 招待講演「Black Hole Formation as a Probe into Microphysics」
- ⑥ 2010 年 10 月 Pyeongchang (韓国) 韓国物理学会招待講演「Black Hole Formations as a Probe into Microphysics」
- ⑦ 2009 年 8 月名大公開セミナー「宇宙の磁場」招待講演「超新星・中性子星と非常に強い磁場」

- ⑧ 2009 年 2 月東大研究会「重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学」招待講演「重力崩壊型超新星の爆発メカニズム」

[その他]

ホームページ等

ホームページURL

<http://www.heap.phys.waseda.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田章一 (YAMADA Shoichi)

早稲田大学 理工学術院 教授

研究者番号：80251403

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：