

機関番号：62616

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20740150

研究課題名（和文） 非対称超新星の爆発機構の解明と重力波、ニュートリノ放射の
定量的評価研究課題名（英文） Explosion mechanism, gravitational wave, and neutrino emission
in core-collapse supernovae

研究代表者

固武 慶 (KOTAKE KEI)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：20435506

研究成果の概要（和文）：ニュートリノ加熱の効果を含む3次元の超新星シミュレーションを行い、超新星から放射される重力波が時間とともにランダムに変動する特徴を持つことを初めて明らかにした。また、非等方なニュートリノ放射を起源とする重力波の従来の評価方法の問題を指摘し、レイ・トレース法に基づく新たな評価法を提示した。重力波スペクトルには超新星爆発を駆動する流体力学不安定性の時間変動スケールと一致する100ヘルツ付近にピークが現れることを示し、重力波の観測が爆発のメカニズムを解明する上で欠かせないことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：By performing three-dimensional (3D) hydrodynamic simulations which model neutrino-driven supernova explosions, we find that the emitted gravitational waves (GWs) change stochastically with time due to the interplay between the standing accretion shock instability (SASI) and convection. In order to estimate correctly the GWs originated from anisotropic neutrino emission, we propose a ray-tracing method. Our result show that the GW spectra have its peak around 100 Hz, which is found to be a typical timescale of the growth of SASI that assists the neutrino-driven explosion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：宇宙物理学

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・重力波・強磁場・輻射流体力学

1. 研究開始当初の背景

今世紀は、従来の電磁波に加え、今まさに花開かんとする“ニュートリノ及び重力波”による宇宙の観測が物理学に大きな進歩をもたらすことが期待されている。事実、国内においては、カミオカンデ、TAMA300が稼動中であり、また海外においても多くの

計画が運用中もしくは進行中である。ここで特筆すべきは、本研究課題で主題に据える天体現象：“超新星爆発”において、その両者が同時にそしてまた非常に強く放出されることである。加えて超新星はガンマ線バースト、マグネターなどの高エネルギー天体現象を生み出していることが分かってきており、

近年大きな話題となっている。

このように宇宙物理学上極めて重要な高エネルギー天体現象である超新星に関して、過去 40 年以上にわたり詳細な数値シミュレーションを含めた多くの研究が行われてきたが、その爆発のメカニズムはいまだに明らかにされていない。これまでこの分野の研究者の殆どは、星の球対称性を仮定した上で、爆発メカニズムの研究にあたってきた。しかし超新星で形成される中性子星が高速回転していることや、近年の観測が明らかにした強磁場中性子星の存在からも、星の自転、磁場などの非対称な効果を考慮した爆発メカニズムの研究が不可欠である

2. 研究の目的

従来の星の球対称性を仮定した超新星の研究では、爆発自体を再現できなかったことから、自転、磁場の効果まで取り込み、爆発する超新星のモデルを構築することが急務である。そうした上で、精度の高い観測のために不可欠なニュートリノ光度、スペクトル及び重力波の波形、振幅の理論的予言を行うことを本研究の第一目的に据える。更には、申請者の研究で得られる理論予測と観測を比べることにより、星の中心部のような極限状態で始めて現れる原子核、素粒子物理などのミクロな物理や、自転、磁場などのマクロな物理など、ニュートリノや重力波以外では観測できない物理を明らかにすることも本研究の狙いどころである。

3. 研究の方法

・**三次元MHDニュートリノ輻射数値シミュレーションによる超新星爆発メカニズムの解明**
上記の研究目的遂行のためには、三次元の超新星MHD数値コードの開発が欠かせない。さらにニュートリノ輻射の効果まで考慮し、重力崩壊から爆発までコンシステントに明らかにする。ニュートリノ駆動型超新星においては、対流・流体不安定性によりニュートリノ加熱の時間スケールが流体の降着の時間スケールより長くなることが爆発のダイナミクスを支配的に決めることを申請者は指摘した。しかし以前の研究では、星の軸対称性を仮定した二次元モデルであった為、フルに対流・流体不安定性の効果を取り込むことが出来なかった。

・**コラプサーからの重力波・ニュートリノシグナル**

ガンマ線バーストを駆動するエネルギー供給源については、降着円盤からのニュートリノ対消滅反応が有力候補とされてきたが、過去の研究ではそのエネルギー供給率を手で仮定したものがほとんどであった。本研究課題ではレイ・トレース法によってこれらを正確に見積もり、超新星においても重要であるニュートリノ加熱反応がガンマ線バーストエンジンにおいても重要なことを指摘した

い。これらの結果を元に、コラプサーから放出される重力波・ニュートリノの定量的評価を行い、ガンマ線バースト源の解明を目指す。

4. 研究成果

(1) 超新星コアとブラックホール降着円盤の流体力学的不安定性

大質量星の重力崩壊にともない普遍的に形成される定常降着衝撃波の3次元非軸対称モードに対する不安定性の数値的解析を行い、3次元的不安定は軸対称2次元的不安定よりも飽和振幅が小さいもののニュートリノ加熱に与える影響は同程度となることが明らかにした。これは、超新星爆発のメカニズムを考えるうえで大変重要な知見である。

(2) 超新星コアからの重力波

上記の3次元シミュレーションに基づき、超新星から放射される重力波が時間とともにランダムに変動する特徴を持つことを初めて明らかにした。また、非等方なニュートリノ放射を起源とする重力波の従来の評価方法の問題を指摘し、レイ・トレース法に基づく新たな評価法を提示した。重力波スペクトルには超新星爆発を駆動する流体力学不安定性の時間変動スケールと一致する 100 ヘルツ付近にピークが現れることを示し、重力波の観測が爆発のメカニズムを解明する上で欠かせないことを明らかにした。重力波天文学が明らかにできる天文現象を具体的に指摘した点に本研究の独創性がある。

(3) コラプサーのダイナミクス・ニュートリノシグナル

ガンマ線バーストを駆動するエネルギー供給源としては、降着円盤からのニュートリノ対消滅反応が有力候補とされていたが、過去の研究はそのエネルギー供給率を仮定しているものが殆どであった。上記のレイ・トレース法によってニュートリノ対消の反応率を正確に見積り、超新星爆発において重要と目されるニュートリノ加熱機構がガンマ線バーストエンジンにとっても重要である可能性があることを指摘した。またコラプサー天体からのニュートリノシグナルを評価し、観測可能性について精査した。

(4) ニュートリノ輻射輸送計算による非対称超新星爆発のメカニズムの研究

ニュートリノの位相空間の自由度まで含めた輻射輸送計算を行い、従来指摘されていた流体不安定性に加え、星の自転が爆発を助けることを示すことができた。

(5) 一般相対論的時空におけるニュートリノ輻射輸送コードの開発

γ 線バーストの中心天体のエネルギー源として、ブラックホール降着円盤からのニュートリノ対生成が注目されている。二年度目に開発を済ませた超新星用の輻射コードを一般相

対論的に拡張して γ 線バースト源へ適応し、ニュートリノ対生成がアウトフローを形成する条件を求めることに成功した。

(6) 中性子星磁場の崩壊過程の理論的解明
従来、中性子星はその進化に伴い、自身が有する磁場をジュール散逸によって散逸すると考えられてきた。この正当性を検討する為、粒子(PIC)シミュレーションを行った結果、電子の慣性長以下のスケールではサイクロトロン共鳴によって磁場の散逸が起こることを明らかにした。

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16件)

- ① Yudai Suwa, Kei Kotake (6人中2番目) (査読有) “Explosion geometry of a rotating 13 Ms star driven by the SASI-aided neutrino-heating supernova mechanism”, *Publication of Astronomical Journal of Japan (Letters)* in press
- ② Seiji Harikae, Kei Kotake, and Tomoya Takiwaki (査読有) “Neutrino Pair Annihilation in Collapsar: Ray-Tracing Method in Special Relativity”, *Astrophysical Journal* (以下ApJと記す) 713, 304-317, (2010)
- ③ Seiji Harikae, Kei Kotake, Tomoya Takiwaki, Yuichiro Sekiguchi (査読有), “A General relativistic ray-tracing method for estimating the energy and momentum deposition via pair neutrino annihilation in collapsars” *ApJ* 720, 614-625 (2010)
- ④ Kei Kotake, Wakana Iwakami, Naofumi Ohnishi, and Shoichi Yamada, (査読有) “Stochastic Nature of Gravitational Waves from Three-Dimensional Supernova Explosions” *Astrophysical Journal Letters*, 697, L133-136, (2009)
- ⑤ Kei Kotake, Wakana Iwakami, Naofumi Ohnishi, and Shoichi Yamada, (査読有) “Ray-Tracing Analysis of Anisotropic Neutrino Radiation for Accurate Estimation of Gravitational Waves from Core-Collapse Supernovae” *ApJ*, 704, 951-963, (2009)
- ⑥ Seiji Harikae, Tomoya Takiwaki, and Kei Kotake, (査読有) “Long-term Evolution of Slowing Rotating Collapsar in Special Relativistic Magnetohydrodynamics”, *ApJ* 704, 354-371, (2009)
- ⑦ Shio Kawagoe, Tomoya Takiwaki, and Kei Kotake, (査読有) “Neutrino oscillations in magnetically driven supernova explosions”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 09, 33, (2009)
- ⑧ Masaomi Ono, Shin-ichiro Fujimoto, Masa-aki Hashimoto, Kei Kotake, and Shoichi Yamada, (査読有) “Explosive Nucleosynthesis in Magnetohydrodynamical Jets from Collapsars” *Progress of Theoretical Physics*, 122, 755-777, (2009)
- ⑨ Wakana Iwakami, Kei Kotake, Naofumi Ohnishi, Shoichi Yamada, and Keisuke Sawada, (査読有) “Effects of Rotation on Standing Accretion Shock Instability in Non-linear phase for Core-Collapse Supernovae” *ApJ*. 700, 232-242, (2009)
- ⑩ Yudai Suwa, Tomoya Takiwaki, Kei Kotake, and Katsuhiko Sato, (査読有) “Impacts of Rotation on Neutrino Emission and Relic Neutrino Background from Population III Stars” *ApJ*, 690, 913-922, (2009)
- ⑪ Kenta Kiuchi, Kei Kotake, and Shijun Yoshida (査読有) “Equilibrium Configurations of Relativistic stars with purely toroidal magnetic fields: Effects of Realistic Equations of State” *ApJ*, 698, 541-557, (2009)
- ⑫ Kenta Kiuchi and Kei Kotake, (査読有) “Equilibrium Configurations of Strongly Magnetized Neutron Stars with Realistic Equations of State”, *Monthly Notices of Royal Academy Press*. 385, 1327-1347, (2008)
- ⑬ K. Hayama, S. Desai, K. Kotake, S.D. Mohanty, M. Rakhmanov, T. Summerscales, and S. Yoshida, (査読有) “Determining the angular momentum distribution of massive evolved stars from gravitational wave observations”, *Classical Quantum Gravity*, 25, 184022 (2008)
- ⑭ Yoichi Aso, Zsuzsa Marka, Chad Finley, John Dwyer, Kei Kotake, and Szabolcs Marka, (査読有) “Search method for coincident events from LIGO and IceCube detectors” *Classical Quantum*

- Gravity 25, 114039 (2008)
- ⑮ Wakana Iwakami, Kei Kotake, Naofumi Ohnishi, Shoichi Yamada, and Keisuke Sawada, (査読有) “Three-Dimensional Simulations of Standing Accretion Shock Instability in Core-Collapse Supernovae,” ApJ. 678, 1207-1222 (2008)
- ⑯ Hidetomo Sawai, Kei Kotake, and Shoichi Yamada (査読有) “Numerical Simulation of Equatorially-Asymmetric Magnetized Supernovae: Formation of Magnetars and Their Kicks”, ApJ (672), 465-478, (2008)

[学会発表] (計 25 件)

- ① 固武 慶: 超新星と重力波: マルチメッセンジャー天文学に向けて 基盤S超新星研究会, 国立天文台, 2011年3/1-3
- ② Kei Kotake: Recipes to energizing supernova explosions 研究会「若手・中堅研究者が見据える次世代の宇宙物理」石垣島, 2011年2/24-25
- ③ Kei Kotake: Supernova Explosions: from their central engines to multi-messenger astronomy, Seminar, nuclear physics group (Riken), 2011年1/26
- ④ Kei Kotake: Towards gravitational-wave astronomy of massive stellar core-collapse, 25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Heidelberg, Germany, 2010年12/6~10
- ⑤ Kei Kotake: Multidimensional modeling of core-collapse supernovae 35th Workshop on Gravitation and Numerical Relativity @Seoul(APCTP), Korea, 2010年10月22日
- ⑥ Kei Kotake: Gravitational waves from successful vs. failed supernova explosions Korean Physical Society Meeting (special session on compact objects), Pyonchong, Korea, 2010年10月20~22日
- ⑦ Kei Kotake: Probing successful vs. failed core-collapse supernovae via neutrinos and gravitational-waves seminar at relativity group of Universitat de Valencia, Spain, 2010年9月13日
- ⑧ Kei Kotake: Topics in Failed Supernovae Spanish relativity meeting, Granada, Spain, 2010年9月6日~10日
- ⑨ Kei Kotake: Gravitational waves from core-collapse supernovae Lecture at summer school on numerical relativity and gravitation, Pyonchong, Korea, 2010年7月26日~30日
- ⑩ 固武 慶: 壮絶なる星の最期、超新星爆発サイエンスカフェ in ふなばし, 千葉県船橋市, 2010年7月10日
- ⑪ Kei Kotake: Neutrino-driven explosion of massive stars Progenitors and Environments of Stellar Explosions @ Institut d’Astrophysique- Paris, 2010年6/28~7/2, フランス
- ⑫ Kei Kotake: 2D and 3D modeling of core-collapse supernova explosion, 15th workshop on nuclear astrophysics, 2010年3/22~27, Ringberg castle, Tegernsee, Germany
- ⑬ Kei Kotake: Neutrino-driven explosion of massive stars, New frontiers in QCD, 2010年2/1, 京都大学基礎物理学研究所
- ⑭ Kei Kotake: Magnetically-driven explosion of massive stars: a possible route to collapsar and beyond, Shocking Universe. 2009年9/14-18, Venice (Italy)
- ⑮ Kei Kotake: Probing supernova mechanisms through gravitational waves, Spanish relativity meeting 2009年9/5-11, Bilbao (Spain)
- ⑯ 固武 慶: 超新星からの重力波と爆発メカニズム. 重力波研究交流会, 2009年7/31, 国立天文台
- ⑰ Kei Kotake: Probing the central engine of core-collapse supernovae through gravitational-wave and neutrino emissions, Gravitational Wave + High-Energy Neutrino Workshop, 2009年5/18-21, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie, Paris (フランス)
- ⑱ 固武 慶: 超新星爆発シミュレーション最前線、「大規模計算が切り拓く基礎科学の将来」2009年2月23日つくば国際会議場
- ⑲ 固武 慶: “Explosion mechanism of core-collapse supernovae: current status and implication to nucleosynthesis” 研究会「爆発的要素合成での水素燃焼と ν pプロセス、rpプロセスとの競合」2009年2月20日理化学研究所
- ⑳ 固武 慶: SASI駆動型超新星からの重力波 研究会「重力崩壊型超新星と高エネルギー天文学」2009年2月4日

- 東京大学理学部 小柴ホール
- ⑳ Kei Kotake:Gravitational waves from core-collapse supernovae: key to the explosion mechanism”, 24th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics
2008年12月7日
バンクーバー カナダ
 - ㉑ Kei Kotake, Multidimensional modeling of core-collapse supernovae : new challenges and perspectives” RESCEU Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology
2008年11月11日 東京大学
 - ㉒ 固武 慶”SASIが駆動する三次元、非軸対称超新星爆発と重力波”日本物理学会 秋季大会 2008年9月20日 山形大
 - ㉓ Kei Kotake:Gravitational Radiation from SASI-aided Rotating Supernova Explosions in Three Dimensions. Numerical Modeling of Astrophysical Sources of Gravitational Waves
2008年9月8日 スペイン、バレンシア
 - ㉔ Kei Kotake:Stochastic Nature of Gravitational-wave Signals from 3D Supernova Explosions. Asymmetric instabilities in stellar collapse
2008年6月30日
ポアンカレ研究所、パリ (フランス)

[その他]

ホームページ等

<http://th.nao.ac.jp/~kkotake>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

固武 慶 (KOTAKE KEI)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：20435506

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし