

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14248

研究課題名（和文）パルサー駆動型爆発の多波長観測で探る中性子星形成の多様性

研究課題名（英文）Unveiling the diversity of neutron star formation with multiwavelength modeling and observation of pulsar-driven supernovae

研究代表者

榎山 和己 (Kashiyama, Kazumi)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：10785744

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では大質量星の重力崩壊に伴う中性子星の誕生、その100年以内の活動性を解き明かすための重要な道しるべを見つけることができた。特に、1. 超高輝度超新星のパルサー駆動モデル検証へ向けた生後100年までのパルサー星雲放射の理論モデルの確立し、その過程で2. 高速電波バーストの起源天体としての超高輝度超新星残骸の提案、3. それらを検証するための電波観測を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽のおよそ10倍以上の質量を持つ重たい星がその一生の最後に重力崩壊を起こして形成する中性子星、その誕生は超新星爆発と呼ばれる明るい大爆発を伴う。本研究では、超高輝度超新星と呼ばれる宇宙でもっとも明るい超新星がなぜそれほどまでに明るいのか、その起源を生まれたての中性子星からのエネルギー注入に求めた。この所謂「パルサー駆動シナリオ」を検証するため、シナリオ特有の多波長電磁波放射現象を理論的計算、その予言に基づき観測を実施し、一部のターゲットから理論予言どおりのシグナルを検出した。この結果は宇宙最大の爆発現象と中性子星という極限天体誕生の間の関係に迫る意義深いものであると考える。

研究成果の概要（英文）：Through this research project, we have built milestones to understand the evolution and activity of newborn neutron stars (NSs) up to 100 years after their formation in collapsing massive stars. In particular, (i) we have succeeded to construct multi-wavelength emission model of pulsar wind nebula within 100 years after the NS formation, aiming at testing the pulsar-driven model for superluminous supernovae (SLSNe), and (ii) have proposed the possible connection between SLSN remnants and repeating fast radio bursts, and (iii) to test these theories, we have conducted follow-up observations of SLSN in the radio and submm bands.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：中性子星 超新星爆発 高速電波バースト

## 1. 研究開始当初の背景

近年、突発天体探査観測が急速に発展したことによって、新種の突発天体が次々と発見されている。中でも、宇宙でもっとも明るい超新星、超高輝度超新星や、ミリ秒のコヒーレント電波現象、高速電波バーストなどは起源がわかっていない。起源天体の最有力候補は誕生直後、あるいは比較的「若い」中性子星である。我々の天の川銀河の中に存在する中性子星は最も若いものでも誕生後数100年が経過している。誕生からおよそ100年以内のタイムスケールの中性子星の物理的性質およびその時間進化は理論、観測のミッシングリンクとなっていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、中性子星進化のミッシングリンクである誕生後およそ100年までの中性子星の姿を解き明かすべく、

[2.1] 誕生後およそ100年までの中性子星とそれを取り囲むパルサー星雲、超新星残骸の時間進化、それらからの多波長電磁波放射を自己無同着に計算する理論モデルを確立すること、

[2.2] そのモデルを用いて、どのような物理パラメータを持って生まれた中性子星が超高輝度超新星や高速電波バーストの起源天体になり得るか調べること、

[2.3] 誕生後どのタイミングにどの波長でどのような観測を行うことで生まれたばかりの中性子星のどのような性質にどこまで制限をつけることができるのか、観測戦略の提案を行うこと、

[2.4] そして実際に観測を実施して理論モデルを検証すること、

である。

## 3. 研究の方法

理論モデル構築に関しては、私の過去の研究(引用文献1)をベースに、従来からの共同研究者である村瀬孔大氏(ペンシルバニア州立大学)に加え、特にConor Omand氏(東京大学理学系研究科博士課程)と協力し、パルサー星雲からの電波、サブミリ波、近赤外放射の時間発展をより正確に予言できるようにモデルの改良を行った。特にパルサー星雲に炙られた超新星残骸におけるダストの生成、ダストによるパルサー星雲放射の吸収、再放射過程を取り入れた。また、仏坂健太氏との共同研究で、連星相互作用によって外層を失った星の重力崩壊で形成される中性子星、付随する超新星にもモデルを拡張した。

構築した理論モデルを用いて誕生後およそ100年までの中性子星とそれを取り囲むパルサー星雲、超新星残骸からの多波長電磁波放射を計算し、主にMAGIC collaborationによるガンマ線観測、Casey Law氏(UC Berkeley)が主導した電波観測、それぞれの結果に対して理論解釈を与えた。

## 4. 研究成果

引用文献1で構築した理論モデルを改良したことにより(引用文献3、4、6)形成直後の原始中性子星からの磁気回転駆動風における動力学と電磁波放射をより矛盾なく計算することが可能になった。中性子星、特に強磁場中性子星起源の突発天体の統一的な理論的枠組みを構築し、様々な突発天体現象に応用して成果を挙げた。

引用文献2では上記の理論的枠組みを、初めて母銀河が特定された反復する高速電波バースト、FRB121102に応用した。そして、観測を矛盾なく説明するためには、中心エンジンが $10^{13}$ G程度の磁場強度を持ち、約1ミリ秒の周期で高速回転している中性子星であることを示し、この中性子星は約100年前に形成され、その際には超高輝度超新星が起きていたはずである、という結論を得た。この研究は高速電波バーストの観測データから中性子星の物理パラメータと超新星爆発の具体的なタイプにまで初めて言及したものであり、今後の観測データの理論的解釈と多波長観測戦略に関して道筋を示した仕事であると言える。

我々の観測予言を基に、ガンマ線望遠鏡MAGICを軸とした多波長突発天体観測戦略が生まれ、実際にFRB121102のガンマ線カウンターパートの制限が行われた(引用文献5)。また、超高輝度超新星爆発のALMAを用いたサブミリ波、VLAを用いたGHz帯電波のフォローアップ観測を実施、特にPTF10hgiという超高輝度超新星残骸からパルサー駆動超新星モデルの予言と整合する電波放射の検出に成功した(引用文献7)。

<引用文献>

1. Kazumi Kashiyama, Kohta Murase, Imre Bartos, Kenta Kiuchi, Raffaella Margutti, "Multi-Messenger Tests for Fast-Spinning Newborn Pulsars Embedded in Stripped-Envelope Supernovae", *The Astrophysical Journal*, 818, 94 (2016)
2. Kazumi Kashiyama, Kohta Murase, "Testing the young neutron star scenario with persistent radio emission associated with FRB 121102", *The Astrophysical Journal*, 839, L3 (2017)
3. Kenta Hotokezaka, Kazumi Kashiyama, Kohta Murase, "Rapidly Rising Optical Transients from the Birth of Binary Neutron Stars", *The Astrophysical Journal*, 850, 18 (2017)
4. Conor M. Omand, Kazumi Kashiyama, Kohta Murase, "Radio Emission from Embryonic Superluminous Supernova Remnants", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474, 573 (2018)
5. MAGIC Collaboration; and Kazumi Kashiyama et al., "Constraining very-high-energy and optical emission from FRB 121102 with the MAGIC telescopes", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 481, 2, 2479 (2018)
6. Conor M. Omand, Kazumi Kashiyama, Kohta Murase, "Dust formation in embryonic pulsar-aided supernova remnants", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 5468 (2019)
7. Casey Law, Conor M. Omand, Kazumi Kashiyama et al., "A Search for Late-Time Radio Emission and Fast Radio Bursts from Superluminous Supernovae", *The Astrophysical Journal*, 886, 24 (2019)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Omand Conor M B, Kashiyama Kazumi, Murase Kohta	4. 巻 484
2. 論文標題 Dust formation in embryonic pulsar-aided supernova remnants	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5468 ~ 5483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/mnras/stz371">https://doi.org/10.1093/mnras/stz371</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Shigeyama Toshikazu, Kashiyama Kazumi	4. 巻 70
2. 論文標題 Repulsion of fallback matter due to central energy source in supernova	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/pasj/psy108">https://doi.org/10.1093/pasj/psy108</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 MAGIC Collaboration	4. 巻 481
2. 論文標題 Constraining very-high-energy and optical emission from FRB 121102 with the MAGIC telescopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2479 ~ 2486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/mnras/sty2422">https://doi.org/10.1093/mnras/sty2422</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kisaka Shota, Ioka Kunihiro, Kashiyama Kazumi, Nakamura Takashi	4. 巻 867
2. 論文標題 Scattered Short Gamma-Ray Bursts as Electromagnetic Counterparts to Gravitational Waves and Implications of GW170817 and GRB 170817A	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 39 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae30a">https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae30a</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kashiyama Kazumi, Hotokezaka Kenta, Murase Kohta	4. 巻 478
2. 論文標題 Radio transients from newborn black holes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2281 ~ 2290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/mnras/sty1145">https://doi.org/10.1093/mnras/sty1145</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kyutoku Koutarou, Kashiyama Kazumi	4. 巻 97
2. 論文標題 Detectability of thermal neutrinos from binary neutron-star mergers and implications for neutrino physics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.103001">https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.103001</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fernandez Rodrigo, Quataert Eliot, Kashiyama Kazumi, Coughlin Eric R	4. 巻 476
2. 論文標題 Mass ejection in failed supernovae: variation with stellar progenitor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2366 ~ 2383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/mnras/sty306">https://doi.org/10.1093/mnras/sty306</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kashiyama Kazumi, Murase Kohta	4. 巻 839
2. 論文標題 Testing the Young Neutron Star Scenario with Persistent Radio Emission Associated with FRB 121102	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa68e1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Masato Shirasaki, Kazumi Kashiyama, Naoki Yoshida	4. 巻 95
2. 論文標題 Large-scale clustering as a probe of the origin and the host environment of fast radio bursts	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.083012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ioka Kunihito, Matsumoto Tatsuya, Teraki Yuto, Kashiyama Kazumi, Murase Kohta	4. 巻 470
2. 論文標題 GW150914-like black holes as Galactic high-energy sources	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notice Royal Astronomy Society	6. 最初と最後の頁 3332 ~ 3345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1337	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hotokezaka Kenta, Kashiyama Kazumi, Murase Kohta	4. 巻 850
2. 論文標題 Rapidly Rising Optical Transients from the Birth of Binary Neutron Stars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8c7d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murase Kohta, Toomey Michael W., Fang Ke, Oikonomou Foteini, Kimura Shigeo S., Hotokezaka Kenta, Kashiyama Kazumi, Ioka Kunihito, Meszaros Peter	4. 巻 854
2. 論文標題 Double Neutron Star Mergers and Short Gamma-ray Bursts: Long-lasting High-energy Signatures and Remnant Dichotomy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa48a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Omand Conor M. B., Kashiya Kazumi, Murase Kohta	4. 巻 474
2. 論文標題 Radio emission from embryonic superluminous supernova remnants	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notice Royal Astronomy Society	6. 最初と最後の頁 573 ~ 579
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2743	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fernandez Rodrigo, Quataert Eliot, Kashiya Kazumi, Coughlin Eric R	4. 巻 476
2. 論文標題 Mass Ejection in Failed Supernovae: Variation with Stellar Progenitor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notice Royal Astronomy Society	6. 最初と最後の頁 2366 ~ 2383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kazumi Kashiya
2. 発表標題 The birth and growth of supermassive black holes in the early universe
3. 学会等名 Space Gravitational Wave Detection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumi Kashiya
2. 発表標題 Ultra-Long Gamma-Ray Bursts and Tidal Disruption Events from Intermediate-Mass Black Holes in Collapsing Star Clusters
3. 学会等名 Taiwanese Theoretical Astrophysics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumi Kashiyama
2. 発表標題 Detectability of Small-Scale Dark Matter Clumps with Pulsar Timing Arrays
3. 学会等名 JSPS-FAPESP workshop on Dark Energy, Dark Matter, and Galaxies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 Ultra-long GRBs and TDEs from Newborn IMBHs in Collapsing Star Cluster
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumi Kashiyama
2. 発表標題 Electromagnetic counterparts of massive black hole formation
3. 学会等名 新学術領域(重力波物理学・天文学：創世記)シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 Multi-messenger astronomy with DECIGO?
3. 学会等名 第17回DECIGOワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 Missing links of high energy astrophysics
3. 学会等名 理論懇シンポジウム2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 An FRB in a bottle? : a multi-wavelength approach
3. 学会等名 TeVPA2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 An FRB in a bottle?
3. 学会等名 KIAA-WAP II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 Fast Radio Bursts
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 大質量星の回転と突発天体
3. 学会等名 共同利用研究会「ガンマ線バースト研究の新機軸」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 高エネルギー天体現象における放射過程
3. 学会等名 宇宙における光渦(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎山和己
2. 発表標題 Targeted Search of Coherent Radio Bursts from Extragalactic Young Neutron Stars
3. 学会等名 中性子星の観測と理論 研究活性化ワークショップ 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎山和己、仏坂健太、村瀬孔大
2. 発表標題 Radio Transients from Newborn Black Holes
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 櫻山和己	4. 発行年 2017年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 7
3. 書名 相対論と宇宙物理学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----