

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 11 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05088

研究課題名(和文)現実的な非一様媒質中を伝播する超新星残骸衝撃波での宇宙線加速過程の研究

研究課題名(英文)Study of cosmic-ray acceleration at supernova remnant shocks propagating into realistic inhomogeneous media

研究代表者

山崎 了 (Yamazaki, Ryo)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：40420509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：現実的な媒質中を伝播する超新星残骸等の衝撃波の性質を調べる理論研究や観測研究を行なった。超新星残骸のガンマ線・X線観測、および結果の理論的解釈を行ない、さらにCTA望遠鏡やすばる望遠鏡といった将来観測の理論的予言も行なった。他にも宇宙線加速天体と考えられる銀河団衝撃波や重力波天体についての理論的研究も行なった。

研究成果の概要(英文)：We studied theoretically and observationally shock waves propagating into realistic upstream medium, which are seen in, for example, supernova remnants. We performed X-ray and gamma-ray observations, and gave theoretical interpretations for them. Galaxy clusters and gravitational wave events are also studied in the context of the cosmic-ray acceleration.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙線 宇宙物理学 粒子加速 超新星残骸 無衝突衝撃波

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙線の核子成分のうち、knee エネルギー ( $=10^{15.5}\text{eV}$ ) 以下のものは天の川銀河内で生成されている。このような銀河宇宙線の平均エネルギー密度は宇宙背景放射や星光、銀河磁場、星間ガスと同程度であり、我々の銀河の基本構成要素の一つである。銀河宇宙線の起源天体や加速機構は宇宙物理学における最大級の謎の一つである。加速源の有力な候補は、年齢が約 1000 年程度以下の若い超新星残骸 (SNR) の外縁部に存在する強い衝撃波である。

若い SNR における宇宙線陽子の加速源の同定を目的として、陽子起源のガンマ線 (= 宇宙線陽子が星間ガスに衝突して生成されるパイ中間子の崩壊で放たれる) の検出を目指した観測・理論研究が進められてきた。ところがガンマ線は宇宙線電子が低エネルギー光子を逆コンプトン散乱で叩きあげても発生し、両者の分離が難しく簡単には決着がつかない。また、複数の若い SNR のガンマ線スペクトルは  $10^{14}\text{eV}$  以下にカットオフをもち、かつ単純な陽子起源説が棄却されており、新たな理論的課題が浮上している。

加速機構の最有力は 1 次フェルミ加速である。それによると、衝撃波面の周辺に存在する被加速粒子が磁気乱流による散乱をうけて波面前後を何度も往復しながらエネルギーを獲得していく。従来の粒子加速のモデルでは、簡単化のために上流の一様性と 1 次元球対称性を仮定してきたのに対し、我々は衝撃波上流の星間媒質は現実には非一様であるという事実に着目し、このことが粒子加速および電磁波放射に及ぼす影響を調べてきた。上流の非一様性の効果は現実の SNR で必ず起こる点であり、近年の観測結果と理論のギャップを埋める役割をはたす可能性がある。

## 2. 研究の目的

衝撃波の伝播する媒質はこれまでは簡単のため完全電離した一様なプラズマであると仮定されることが多かったが、現実の星間空間は分子雲や爆発前の親星の星風などの密度揺らぎが存在する。本研究では、上流媒質の非一様性が宇宙線加速過程におよぼす影響を明らかにすることを目指した。

## 3. 研究の方法

おもに理論的研究であるが、適宜観測およびそのデータ解析の仕事も行った。理論的計算では数値計算手法の開発も行った。

## 4. 研究成果

### SNR に関する研究成果

分子雲と衝突している SNR の典型例であ

る RX J1713.7-3946 の最新のガンマ線観測データを宇宙線電子の逆コンプトン散乱放射で説明可能であることを示した (論文 6)。特に衝撃波近傍でのガンマ線空間分布を宇宙線電子がガンマ線を放射するモデルのもとで示したのは世界初である。

SNR RX J1713.7-3946 における粒子加速理論と多波長観測の現状をまとめ、さらに Cherenkov Telescope Array (CTA) で将来観測した際に何がどこまでわかるのかを検討した。その結果、CTA で 50 時間の観測を行えば、ガンマ線放射が電子起源か陽子起源かを同定でき、さらに  $100\text{TeV}$  以上まで加速された陽子が存在すればその兆候をとらえることが可能であることを示した (論文 8)。

衝撃波上流の現実的な星間媒質は電離していない水素原子が存在するため、SNR の外縁部からはバルマー輝線が観測され、さらにそれが偏光している。衝撃波が効率良く宇宙線加速を行なっている場合は衝撃波下流の温度が下がることに起因し偏光度が上昇することを理論的に示し、将来観測への提言を行なった (論文 2)。

分子雲と衝突している SNR である 3C400.2 の X 線のデータ解析を行い、新たに再結合プラズマを発見し、その起源が小さな分子雲との衝突であると推測した (論文 4)。

分子雲と衝突している SNR である N132D の X 線のデータ解析を行い、プラズマやガンマ線の観測的性質が若い超新星残骸と古いものとの中間状態にあることを示し、外部物質との衝突によって状態遷移している最中にあると結論付けた (論文 3)。

分子雲と相互作用している、または近傍に分子雲が存在する SNR である Vela Jr., Cassiopeia A, G306.3-0.9 の X 線観測を行い、スペクトル形、時間変化、衝撃波下流のプラズマ電離状態をそれぞれ調べ、分子雲衝突の観測的特徴が現れるかどうか調べた (論文 5, 7, 13)。

### SNR 以外の宇宙線加速天体についての研究成果

宇宙線加速効率の大きな SNR の衝撃波での密度ジャンプ (サブショック) 周辺と比較的類似した状態をもつと考えられる銀河団衝撃波での宇宙線加速について調べた。まず、銀河団形成に伴い銀河団外部から降着してくる物質のつくる衝撃波での粒子加速効率を、可視光帯域の逆コンプトン散乱を用いて推定する方法を提唱し、幾つかの銀河団で実際に可視光逆コンプトン散乱放射を観測可能であることを指摘した (論文 16)。次に、銀河団下流で生じる乱流によるフェルミ 2 次加速によってシンクロトロン電波放射の天球面での形態 (morphology) の観測的特徴を統一的に説明できる可能性を指摘した (論文 16)。

重力波の電磁波対応天体現象においても SNR と同様の強い衝撃波が存在する可能性が

あり、そこでの宇宙線加速を調べた。まず、重力波イベント GW150914 から弱いガンマ線も同時に検出された可能性があるという報告を受け、もしガンマ線検出が本当ならば残光として電波シンクロトロン放射が検出可能であることを指摘した(論文 11)。次に、重力波イベント GW170817 に付随したショートガンマ線バーストの起源について考察し、ガンマ線が相対論的ジェットで加速された宇宙線電子による放射であれば、視線方向と反対方向に進むジェット(カウンター・ジェット)が重力波発生後 100~1000 秒程度で観測される可能性を示し、今後の同様の重力波イベントに対する観測的示唆を与えた(論文 1)。

木星型惑星が中心の恒星に落下してエネルギー解放をすると、最終的には減速膨張する衝撃波が残り、そこで加速された宇宙線電子が残光として数千年にわたって電波シンクロトロン放射を行うこと、および、その放射が検出可能であることを指摘した(論文 10)。

### その他の研究成果

衝撃波の下流領域での乱流によるフェルミ 2 次加速によって被加速粒子の最高到達エネルギーが knee エネルギーに到達しうるかどうかを検討したが、分子雲と相互作用する超新星残骸のような強い乱流が期待される状況下においても結果は否定的であった。

#### 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 17 件)

1. R. Yamazaki, K. Ioka, & T. Nakamura, "Prompt emission from the counter jet of a short gamma-ray burst", *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 033E01 (13pp), 2018 年, 査読有  
DOI: 10.1093/ptep/pty012

2. J. Shimoda, Y. Ohira, R. Yamazaki, J. M. Laming, & S. Katsuda, "Polarized Balmer line emission from supernova remnant shock waves efficiently accelerating cosmic rays", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473, 1394-1406, 2018 年, 査読有  
DOI: 10.1093/mnras/stx2339

3. A. Bamba, Y. Ohira, R. Yamazaki, M. Sawada, Y. Terada, K. Koyama, E. D. Miller, H. Yamaguchi, S. Katsuda, M. Nobukawa, K. K. Nobukawa, "The Transition from Young to Middle-Aged Supernova Remnants: Thermal and Nonthermal Aspects of SNR N132D", *The Astrophysical Journal*, 854, 71 (9pp), 2018 年, 査読有

DOI: 10.3847/1538-4357/aaa5a0

4. T. Ergin, A. Sezer, H. Sano, R. Yamazaki, & Y. Fukui, "Recombining Plasma and Gamma-Ray Emission in the Mixed-Morphology Supernova Remnant 3C 400.2", *The Astrophysical Journal*, 842, 22 (9pp), 2017 年, 査読有

DOI: 10.3847/1538-4357/aa72ee

5. T. Sato, Y. Maeda, A. Bamba, S. Katsuda, Y. Ohira, R. Yamazaki, K. Masai, H. Matsumoto, M. Sawada, Y. Terada, J. P. Hughes, M. Ishida, "Multi-Year X-ray Variations of Fe-K and Continuum Emissions in the Young Supernova Remnant Cas A", *The Astrophysical Journal*, 836, 225 (10pp), 2017 年, 査読有

DOI: 10.3847/1538-4357/836/2/225

6. Y. Ohira & R. Yamazaki, "Inverse Compton Emission from Cosmic-Ray Precursor in RX J1713.7-3946", *Journal of High Energy Astrophysics*, 13-14, 17-21, 2017 年, 査読有

DOI: 10.1016/j.jheap.2017.03.001

7. A. Sezer, T. Ergin, & R. Yamazaki, "Suzaku analysis of the supernova remnant G306.3-0.9 and the gamma-ray view of its neighborhood", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466, 3434-3441, 2017 年, 査読有

DOI: 10.1093/mnras/stw3331

8. F. Acero (他 381 名。著者の順はアルファベット順。R. Yamazaki (365 番目)), "Prospects for Cherenkov Telescope Array Observations of the Young Supernova Remnant RX J1713.7-3946", *The Astrophysical Journal*, 840, 74 (14pp), 2017 年, 査読有

DOI: 10.3847/1538-4357/aa6d67

9. T. Mizuno, N. Tanaka, H. Takahashi, J. Katsuta, K. Hayashi, R. Yamazaki, "X-Ray Studies of the Extended TeV Gamma-Ray Source VER J2019+368", *The Astrophysical Journal*, 841, 104 (14pp), 2017 年, 査読有

DOI: 10.3847/1538-4357/aa7201

10. R. Yamazaki, K. Hayasaki, & A. Loeb, "Optical-infrared flares and radio afterglows by Jovian planets inspiraling into their host stars", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466, 1421-1427, 2017 年, 査読有

DOI: 10.1093/mnras/stw3207

11. R. Yamazaki, K. Asano, & Y. Ohira,

“ Electromagnetic afterglows associated with gamma-ray emission coincident with binary black hole merger event GW150914 ”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2016, 051E01 (7pp), 2016 年, 査読有  
DOI: 10.1093/ptep/ptw042

12. S. Katsuda, K. Maeda, Y. Ohira, Y. Yatsu, K. Mori, W. Aoki, K. Morihana, J. C. Raymond, P. Ghavamian, J.-J. Lee, J. Shimoda, R. Yamazaki, “ Spatially Resolved Spectroscopy of a Balmer-Dominated Shock in the Cygnus Loop: An Extremely Thin Cosmic-Ray Precursor? ”, The Astrophysical Journal Letters, 819, L32 (6pp), 2016 年, 査読有  
DOI: 10.3847/2041-8205/819/2/L32

13. S. Takeda, A. Bamba, Y. Terada, M. S. Tashiro, A. Katsuda, R. Yamazaki, Y. Ohira, W. Iwakiri, “ Suzaku observations of the hard X-ray spectrum of Vela Jr. (SNR RX J0852.0-4622) ”, Publ. Astron. Soc. Japan, 68 (SP1), S10 (11pp), 2016 年, 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psw036

14. K. Kohri, K. Ioka, Y. Fujita, & R. Yamazaki, “ Can we explain AMS-02 antiproton and positron excesses simultaneously by nearby supernovae without pulsars or dark matter? ”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2016, 021E01, 2016 年, 査読有  
DOI: 10.1093/ptep/ptv193

15. Y. Fujita, M. Takizawa, R. Yamazaki, H. Akamatsu, & H. Ohno, “ Turbulent Cosmic-Ray Reacceleration at Radio Relics and Halos in Clusters of Galaxies ”, The Astrophysical Journal, 815, 116 (7pp), 2015 年, 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/815/2/116

16. R. Yamazaki & A. Loeb, “ Optical inverse Compton emission from clusters of galaxies ”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 453, 1990-1998, 2015 年, 査読有  
DOI: 10.1093/mnras/stw3207

17. Y. Urata, K. Huang, R. Yamazaki, & T. Sakamoto, “ Extremely Soft X-ray Flash as the Indicator of Off-Axis Orphan Gamma-Ray Burst Afterglow ”, The Astrophysical Journal, 806, 222 (10pp), 2015 年, 査読有  
DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/222

[学会発表](計 27 件)

1. 山崎 了, 井岡 邦仁, 中村 卓史, 「GW 170817 / GRB 170817A のカウンター・ジェット放射」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14 日-17 日, 千葉大学)

2. 篠田 理人, 山崎 了, 梅田 隆行, 「プラズマ粒子シミュレーションを用いた無衝突衝撃波遷移層の構造のベータ依存性の研究」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14 日-17 日, 千葉大学)

3. 霜田 治朗, 大平 豊, 山崎 了, J. M. Laming, 勝田 哲, 「H $\alpha$  輝線の偏光観測による超新星残骸衝撃波での宇宙線量の測定について」, 日本天文学会 2018 年春季年会 (2018 年 3 月 14 日-17 日, 千葉大学)

4. 山崎 了, 大平 豊, 田中 周太, 勝田 哲, 坂本 貴紀, 太田 耕司, 藤田 裕, 「超低面輝度の可視光天体の探査による新たな高エネルギー天文学の開拓へむけて」, 研究会 3.1-2 (2018 年 3 月 1 日-2 日, 広島大学)

5. 山崎 了, 「重力波とガンマ線バースト、さらに実験室宇宙物理学」, 分野横断ワークショップ (2018 年 1 月 23 日-24 日, 浜名湖ロイヤルホテル)

6. 山崎 了, 井岡 邦仁, 中村 卓史, 「GW 170817 / GRB 170817A の Counter-jet の放射について」, ガンマ線バースト研究の新基軸 (2017 年 11 月 21-23 日, 東京大学宇宙線研究所)

7. R. Yamazaki, 「Toward the Unified Model of Supernova Remnants」, SNR workshop 2017 (September 28-29, 2017, Nagoya, Japan)

8. R. Yamazaki, 「Low-Mach-number collisionless shocks in astrophysical and laboratory plasmas」, The 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (September 18-23, 2017, Chengdu, China)

9. 山崎 了, 大平 豊, 田中 周太, 勝田 哲, 坂本 貴紀, 太田 耕司, 藤田 裕, 「超低面輝度の可視光天体の探査による新たな高エネルギー天文学の開拓へむけて」, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2017 (2017 年 9 月 5 日-7 日, 京都大学基礎物理学研究所)

10. 鈴木 寛大, 馬場 彩, 中澤 知洋, 山崎 了, 「分子雲衝突に起因する超新星残骸からの宇宙線逃亡シナリオの観測的検証」, 日本天文学会 2017 年秋季年会 (2017 年 9 月 11-13 日, 北海道大学)

11. 田中 慎之, 水野 恒史, 高橋 弘充, 勝田 隼一郎, 林 克洋, 山崎 了, 「広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の X 線観測(2)」,

日本天文学会 2017 年秋季年会 (2017 年 9 月 11-13 日, 北海道大学)

12. 霜田 治朗, Alex Lazarian, 井上 剛志, 大平 豊, 山崎 了, 「電波シンクロトロン偏光による超新星残骸磁場スペクトルの測定について」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15-18 日, 九州大学)

13. 中森 健之, 片桐 秀明, 佐野 英俊, 山崎 了, 大平 豊, 井上 剛志他 CTA-Japan, 「超高エネルギーガンマ線による超新星残骸の観測の現状と展望」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15-18 日, 九州大学)

14. 馬場 彩, 山崎 了, 大平 豊, 澤田 真理, 寺田 幸功, 「NuSTAR/Suzaku による最も明るいガンマ線超新星残骸 N132D の観測」, 日本天文学会 2017 年春季年会 (2017 年 3 月 15-18 日, 九州大学)

15. 正治 圭崇, 山崎 了, 大平 豊, 富谷 聡志他 24 名, 「磁化プラズマ中の無衝突衝撃波の生成実験」, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2016 (2016 年 11 月 30 日-12 月 2 日, 青山学院大学)

16. 山崎 了, 「超新星残骸のガンマ線観測の現状と将来への展望」, SNR workshop 2016 winter (2016 年 11 月 21-22 日, 名古屋大学)

17. 水野 恒史, 高橋 弘充, 田中 慎之, 勝田 隼一郎, 林 克洋, 山崎 了, 「『すざく』による広がった TeV ガンマ線放射 VER J2019+368 の X 線観測(3)」, 本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 21 日-24 日, 宮崎大学)

18. 山崎 了, 大平 豊, 澤田 真理, 吉田 龍生, 柳田 昭平, 馬場 彩, 「衝撃波で加速された宇宙線スペクトルのカットオフの形について」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14 日-16 日, 愛媛大学)

19. 田中 慎之, 水野 恒史, 高橋 弘充, 勝田 隼一郎, 林 克洋, 山崎 了, 「広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の X 線観測」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14 日-16 日, 愛媛大学)

20. 山崎 了, 「超新星残骸と銀河宇宙線の起源」, 研究会「Sub-PeV ガンマ線による天体観測から迫る Knee 領域宇宙線の起源」(2016 年 8 月 8 日, 宇宙線研究所)

21. 水野 恒史, 田中 慎之, 高橋 弘充, 勝田 隼一郎, 林 克洋, 山崎 了, 「『すざく』による広がった TeV ガンマ線放射 VER J2019+308 の X 線観測(2)」, 日本物理学会 第

71 回年次大会 (2016 年 3 月 19 日-22 日, 東北学院大学)

22. 山崎 了, 正治 圭崇, 富谷 聡志, 富田 沙羅, 大平 豊他 11 名, 「磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験: 2015 年度の実験結果」, 日本天文学会 2016 年春季年会 (2016 年 3 月 14 日-17 日, 首都大学東京)

23. 藤田 裕, 滝沢 元和, 山崎 了, 赤松 弘規, 大野 寛, 「銀河団の電波レリックの起源としての乱流加速」, 日本天文学会 2016 年春季年会 (2016 年 3 月 14 日-17 日, 首都大学東京)

24. 山崎 了, 浅野 勝晃, 大平 豊, 「Electromagnetic Afterglows Associated with Gamma-Ray Emission Coincident with Binary Black Hole Merger Event GW150914」, HSC 時間軸天文学(TDA)ブレインストーミング研究会 (2016 年 3 月 4 日-5 日, 国立天文台)

25. 山崎 了, 正治 圭崇, 富谷 聡志, 富田 沙羅, 大平 豊他 13 名, 「磁化プラズマ中を伝播する低マッハ数の無衝突衝撃波の生成実験」, 高エネルギー宇宙物理学研究会 2015 (2015 年 11 月 25 日-27 日, 沼津市)

26. 水野 恒史, 高橋 弘充, 勝田 隼一郎, 林 克洋, 山崎 了, 「『すざく』による広がった TeV ガンマ線放射 VER J2019+368 の X 線観測」, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 25 日-28 日, 大阪市立大学)

27. 霜田 治朗, 井上 剛志, 大平 豊, 山崎 了, 馬場 彩, J. Vink, 「現実的非一様媒質と相互作用する超新星残骸衝撃波での宇宙線加速効率についての理論研究」, 日本天文学会 2015 年秋季年会 (2015 年 9 月 9 日-11 日, 甲南大学)

〔その他〕  
ホームページ  
<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~ryo/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山崎 了 (YAMAZAKI, Ryo)  
青山学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 4 0 4 2 0 5 0 9

### (3) 連携研究者

井上 剛志 (INOUE, Tsuyoshi)  
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 9 0 5 3 1 2 9 4

大平 豊 (OHIRA, Yutaka)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 4 0 5 8 9 3 4 7