

令和元年5月29日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05107

研究課題名(和文) 加速粒子から宇宙線へ - 次世代X線・線天文台を用いた銀河宇宙線生成現場の解明

研究課題名(英文) From accelerated particles to cosmic rays --- Understanding particle acceleration and escape with New-generation X-ray/gamma-ray observatories

研究代表者

馬場 彩 (Bamba, Aya)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：70392082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線は我々の銀河の基本構成要素だが、発見以来100年たった現在も加速機構などの議論が続いている。星の死の際の爆発の残骸「超新星残骸」の衝撃波は効率よい加速現場であるが、加速粒子が逃亡し宇宙線になる様は未解明であった。我々は衝撃波が分子雲と衝突した際に磁場減衰が起こり宇宙線が逃亡すると同時にプラズマが急冷却されることに注目し、急冷却プラズマの緩和時間を宇宙線逃亡のストップウォッチとして測定した。15天体程度の超新星残骸で急冷却プラズマの緩和時間(X線)と残された加速粒子の最高エネルギー(ガンマ線)を比較し、高エネルギー粒子ほど早いタイムスケールで逃亡していくことを初めて観測的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線は宇宙マイクロ波背景放射や星光と同程度のエネルギー密度を持つ、我々の銀河の基本構成要素の一つであり、地上でも自然放射線の3割を占める。また、最高エネルギーは10電子ボルトにもなり、地上の実験加速器では到底再現できない素粒子物理学の探求も可能である。宇宙線の起源の理解の最後の1ピースのひとつであった、加速粒子が加速現場から逃亡し宇宙線になる瞬間をとらえた意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Cosmic rays are one of the elemental components of our Galaxy, but the origin is still unclear. Shocks of supernova remnants are the prime candidate of efficient acceleration. The remaining problem is understanding how particles can escape to be cosmic rays. We used the time scale of rapid-cooling plasma due to the interaction with molecular clouds as a clock from particle escape due to the interaction and dumping of magnetic field. We found with X-ray (plasma) and gamma-ray (accelerated protons) observations that higher energy particles escape more rapidly compared with lower energy particles.

研究分野：X線宇宙物理学

キーワード：宇宙線 超新星残骸 プラズマ X線宇宙物理学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙線は、宇宙マイクロ波背景放射や星の光と同程度のエネルギー密度で我々の銀河を満たしている。1912年の発見以来100年経った現在も精力的に研究が続けられている。2000年代に空間分解能に優れたX線宇宙衛星Chandraにより、超新星残骸衝撃波面で磁場増幅が起こり、そこで効率のよい粒子加速を起こしていることが分かってきた(c.f., Bamba et al. 2003)。しかし、増幅された磁場は粒子を加速現場に閉じ込めるため、粒子はその場でシンクロトロン放射でエネルギーを失い宇宙線になれないことになってしまう。この「宇宙線逃亡問題」が、宇宙線に関する最大の未解決問題になっている。

2. 研究の目的

近年Fermi衛星が、比較的年を取った超新星残骸からGeVガンマ線を発見した。スペクトルはsoftで、高エネルギー粒子は既に逃亡しており、低エネルギー粒子だけが残っている状況と考えられる。これらの超新星残骸は分子雲と相互作用していることから、分子雲中の中性粒子との相互作用で増幅された磁場が減衰し、ジャイロ半径の大きな高エネルギー粒子から順に逃亡していきっていると考えた。この逃亡のタイムスケールを測定し、宇宙線に対する超新星残骸の寄与を決定するのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

超新星残骸衝撃波が分子雲と相互作用すると、衝撃波下流の高温プラズマは急冷却される。この時、電離状態にあるイオンの再結合が追いつかず、再結合優勢プラズマ(急冷却プラズマ)が形成される。急冷却プラズマはだんだん電離平衡へと緩和していくが、その時に強い再結合連続成分を放射する。これを調べることで、分子雲と衝撃波の衝突からのタイムスケールを測定することが出来る。このことから、分子雲との衝突により始まる宇宙線逃亡のストップウォッチとして、急冷却プラズマの緩和時間を用いることが出来るという発想にたどり着いた。

4. 研究成果

我々は10天体程度のGeVガンマ線、分子雲、急冷却プラズマのそろっている超新星残骸を系統的に解析した。個々の天体のG298.6+0.0, HB21, N132Dについては論文をまとめた(論文7, 9, 20)。また、GeVガンマ線のべきと急冷却プラズマの緩和時間の相関を調べたところ、緩和時間が長いサンプルほどべきがソフトになっており、高エネルギー粒子の逃亡が進んでいることを突き止めた(論文9)。これは、宇宙線逃亡が高エネルギー粒子から順に、超新星残骸の年齢程度のタイムスケールで起こっていることを示した初めての結果である。さらに我々は、GeVガンマ線の折れ曲がりから各サンプルに残されている粒子の最高エネルギーを求め、逃亡のタイムスケールを定量的に測定する研究を続けている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 41件)(すべて査読有り)

1. M. Sawada, K. Tachibana, H. Uchida, Y. Ito, H. Matsumura, A. Bamba, T. G. Tsuru, T. Tanaka, "Still stratified ejecta in the late Sedov phase: A deep Suzaku observation of the Galactic Ia supernova remnant G306.3-0.9", PASJ, 2019, in press (arxiv:1903.02554)
2. A. Simionescu, S. Nakashima, H. Yamaguchi, K. Matsushita, F. Mernier, N. Werner, T. Tamura, K. Nomoto, J. de Plaa, A. Bamba, E. Bulbul, Y. Ezoe, A. C. Fabian, Y. Fukazawa, L. Gu, Y. Ichinohe, M. N. Ishigaki, J. S. Kaastra, C. Kilbourne, T. Kitayama, S.-C. Leung, M. Leutenegger, M. Loewenstein, Y. Maeda, E. D. Miller, R. F. Mushotzky, H. Noda, C. Pinto, F. S. Porter, S. Safi-Harb, K. Sato, T. Takahashi, S. Ueda, S. Zha, "Constraints on the Chemical Enrichment History of the Perseus Cluster of Galaxies from High-Resolution X-ray Spectroscopy", MNRAS, 483, 1701-1721 (2019) (doi: 10.1093/mnras/sty3220)

3. H. Yamaguchi, T. Tanaka, D.R. Wik, J. Rho, A.R. Foster, A. Bamba, R. Petre, B.J. Williams, H. Uchida, R.K. Smith, D. Castro, “NUSTAR OBSERVATIONS OF THE SUPERNOVA REMNANT W49B: I. THERMAL ASPECT”, *ApJL*, 868, :35 (2018) 6 pp. (doi: 10.3847/2041-8213/aaf055)
4. T. Tanaka, H. Yamaguchi, D.R. Wik, H. Uchida, Y. Uchiyama, F.A. Aharonian, A. Bamba, F. Castro, A.R. Foster, R. Petre, J. Rho, R.K. Smith, B.J. Williams, “NuSTAR Observations of the Supernova Remnant W49B: II. Nonthermal Aspect”, *ApJL*, 866, L26 (2018) 6 pp. (doi: 10.3847/2041-8213/aae709)
5. T. Kasuga, T. Sato, K. Mori, H. Yamaguchi, A. Bamba, “Asymmetric Expansion of the Fe ejecta in Kepler’s Supernova Remnant”, *PASJ* (2018) (11pp, DOI: 10.1093/pasj/psy085)
6. M. Kuriki, H. Sano, N. Kuno, M. Seta, Y. Yamane, S. Yoshiike, K. Okawa, D. Tsutsumi, Y. Hattori, M. Khono, S. Fujita, A. Nishimura, A. Ohama, M. Matsuo, Y. Tsuda, K. Torii, T. Minamidani, T. Umemoto, G. Rowell, A. Bamba, K. Tachihara, Y. Fukui, “DISCOVERY OF MOLECULAR AND ATOMIC CLOUDS ASSOCIATED WITH THE GAMMA-RAY SUPERNOVA REMNANT KESTEVEN 79”, *ApJ*, 864, 161 (2018) (10pp, DOI: 10.3847/1538-4357/aad7be)
7. H. Suzuki, A. Bamba, K. Nakazawa, Y. Furuta, M. Sawada, R. Yamazaki, K. Koyama, “Discovery of recombining plasma from the faintest GeV SNR HB 21 and a possible scenario of the cosmic ray escaping from SNR shocks”, *PASJ*, 70, 75 (2018) (DOI: 10.1093/pasj/psy069)
8. M. Miceli, A. Bamba, “Detection of X-ray flares from AX J1714.1-3912, the unidentified source near RX J1713.7-3946”, *A&A*, 612, 32 (2018) (DOI: 10.1051/0004-6361/201732374)
9. A. Bamba, Y. Ohira, R. Yamazaki, M. Sawada, Y. Terada, K. Koyama, E.D. Miller, H. Yamaguchi, S. Katsuda, K.K. Nobukawa, M. Nobukawa, “Transition from Young to Middle-aged Supernova Remnants: Thermal and Nonthermal aspects of the SNR N132D”, *ApJ*, 854, 71 (2018), <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa5a0>
10. T. Sato, S. Katsuda, M. Morii, A. Bamba, J.P. Hughes, Y. Maeda, M. Ishida, F. Fraschetti, “X-ray Measurements of the Particle Acceleration Properties at Inward Shocks in Cassiopeia A”, *ApJ*, 853, 46 (2018), doi:10.3847/1538-4357/aaa021
11. V. Doroshenko, G. Puehlhofer, A. Bamba, W.W. Tian, D. Klochov, A. Santangelo, “XMM-Newton observations of the non-thermal supernova remnant HESS J1731-347”, *A&A*, 608, A23 (2017), DOI:10.1051/0004-6361/201730983
12. 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 Iron-K and Continuum Emissions in the Young Supernova Remnant Cassiopeia A”, *ApJ*, 836, 225 (2017) DOI:10.3847/1538-4357/836/2/225
13. M. Miceli, A. Bamba, S. Orlando, F. Bocchino, P. Zhou, S. Safi-Harb, Y. Chen, “XMM-Newton observation of the supernova remnant Kes 78 (G32.8-0.1): Evidence for shock-cloud interaction”, *A&A*, 599, 45 (2017) DOI:10.1051/0004-6361/201629842
14. Y. Tsubone, M. Sawada, A. Bamba, S. Katsuda, J. Vink, “A Systematic Study of the Thermal and Nonthermal Emission in the Supernova Remnant RCW 86 with Suzaku”, *ApJ*, 835, 34 (2017) doi:10.3847/1538-4357/835/1/34
15. S. Shibata, E. Watanabe, Y. Yatsu, T. Enoto, A. Bamba, “X-ray and Rotational Luminosity Correlation and Magnetic Heating of the Radio Pulsars”, *ApJ*, 833, 59 (2016) doi:10.3847/1538-4357/833/1/59
16. S. Katsuda, K. Maeda, A. Bamba, Y. Terada, Y. Fukazawa, K. Kawabata, M. Ohno, Y. Sugawara, Y. Tsuboi, “Soft and Hard X-Ray Components from Type II_n Supernovae: Evidence for Asphericity in the Circumstellar Medium”, *ApJ*, 832, 194 (2016) doi:10.3847/0004-637X/832/2/194
17. Y. Terada, K. Maeda, Y. Fukazawa, A. Bamba, Y. Ueda, S. Katsuda, T. Enoto, T. Takahashi, T. Tamagawa, F. K. Röppke, A. Summa, R. Diehl, “Measurements of the Soft Gamma-ray Emission from SN2014J with Suzaku”, *ApJ*, 823, 43 (2016) doi:10.3847/0004-637X/823/1/43
18. S. Takeda, A. Bamba, Y. Terada, M.S. Tashiro, S. Katsuda, R. Yamazaki, Y. Ohira, W.B. Iwakiri, “Suzaku observations of the hard X-ray spectrum of Vela Jr.”, *PASJ*, 68, S10 (2016) doi:10.1093/pasj/psw036
19. S. Yamauchi, M. Sumita, A. Bamba “Suzaku observations of two diffuse hard X-ray sources G22.0+0.0 and G23.5+0.1”, *PASJ*, 68, S6 (2016) doi:10.1093/pasj/psv109
20. A. Bamba, M. Sawada, Y. Nakano, Y. Terada, J. Hewitt, R. Petre, L. Angelini, “New Identification of the Mixed-Morphology Supernova Remnant G298.6–0.0 with Suzaku”, *PASJ*,

68, S5 (2016) doi:10.1093/pasj/psv096

21. K. Hotokezaka, S. Wanajo, M. Tanaka, A. Bamba, Y. Terada, and T. Piran, “Gamma-ray line emission from neutron star merger ejecta and its effects on the heating rate”, MNRAS, 459, 35-43 (2016)
22. A. Bamba, Y. Terada, J. Hewitt, R. Petre, L. Angelini, S. Safi-Harb, P. Zhou, F. Bocchino, M., Sawada, “Discovery of X-ray Emission from the Galactic Supernova Remnant G32.8-0.1 with Suzaku”, ApJ, 818, 63 (2016)
23. M. Izawa, T. Dotani, T. Fujinaga, A. Bamba, M. Ozaki, J.S. Hiraga “Suzaku observations of the old pulsar wind nebula candidate HESS J1356–645”, PASJ, 67, 43 (8 pages) (2015)

他 18 件

〔学会発表〕(計 20 件)

〔国際学会招待講演〕(計 10 件)

1. A. Bamba, “Constraining the energetic particle content of Supernova Remnants through X-ray observations”, “Particle Acceleration and Transport: from the Sun to Extragalactic Sources”, Università della Calabria, Rende, Italy, 2018, Nov.12-16
2. A. Bamba, “X-ray studies of SNRs and relevant sources in Large Magellanic Clouds”, “SNR workshop 2018”, Nagoya University, Japan, 2018, Oct.9-10
3. A. Bamba, “Recent Progress on Supernova Remnants - Present achievements and Future -”, “SNR workshop 2017”, Nagoya University, Japan, 2017, Sep.28-29
4. A. Bamba, “X-ray Observations of Supernova Remnants”, “Asia-Pacific Regional IAU Meeting”, Taipei, Taiwan, 2017, Jul.
5. A. Bamba, “Recent Progress on Supernova Remnants - Progenitors, Evolution, Cosmic-ray Acceleration”, “X-ray Universe 2017”. Roma, Italy, 2017, Jun.
6. A. Bamba, “X-ray observations of supernova remnants - environment study of acceleration sites -”, “Cosmic Ray Origin - beyond the standard models -”, San Vito di Cadore, Italy, 2016, Sep.
7. A. Bamba, “Particle Acceleration and Environments of Supernova Remnants”, “Workshop on Supernovae and Their Remnants - The Elegant Last Dance of Stars -”, ISAS, Japan, 2015, Nov.
8. A. Bamba, “What can we learn on cosmic ray acceleration with ASTRO-H?”, “Central Engines in the High Energy Universe”, KEK, Japan, 2015, Oct.
9. A. Bamba, “X-ray properties of young SNRs with GeV/TeV gamma-rays”, “SNR Workshop”, Nagoya, Japan, 2015 June
10. A. Bamba, “Non-thermal Phenomena in Shocks”, “Japanese-Dutch Bilateral Workshop: Spectroscopy of Cosmic Plasma in the Era of ASTRO-H”, Kanagawa, Japan, 2015 May

〔国内学会招待講演〕(計 5 件)

1. 馬場 彩, 「X 線・ガンマ線で見たマゼラン雲 - ideal laboratory か monster factory か? -」, 2018 年日本天文学会春季年会、千葉、日本、2018 年 3 月
2. 馬場 彩, 「Supernova Remnants and other interesting sources with high energy photons and FUGIN」, 「cience Workshop 2018 on FUGIN: The Galactic Plane Legacy Survey for Molecular Clouds」, 名古屋、日本、2018 年 2 月
3. 馬場 彩, 「宇宙の多様性の源: 超新星残骸」, 「星間現象ワークショップ」, 名古屋、日本、2017 年 3 月
4. 馬場 彩, 「変なコンパクト星を持つ超新星残骸と X 線観測を用いた progenitor 推定あれこれ」, 「中性子星勉強会」, 山形、日本、2016 年 9 月
5. 馬場 彩, 「「すざく」で見た RCW86 - 環境と加速の関係」, 「SNR workshop 2016」, 名古屋、日本、2016 年 8 月

〔国内学会口頭講演〕(計 5 件)

1. 馬場 彩, 「FORCE で探る超新星残骸での粒子加速」, 「超新星残骸観測の将来展望」, 東京大学、2017 年 12 月
2. 馬場 彩, 「GeV SNR 候補の系統的探索」, 「超新星残骸観測の将来展望」, 東京大学、2017 年 12 月
3. 馬場 彩, 「恒星 bow-shock 候補 G70.7+1.2 からの X 線の発見」, 日本天文学会秋季年会、北海道大学、2017 年 9 月
4. 馬場 彩, 「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

文学会春季年会、九州大学、2017年3月

5. 馬場 彩、「「すざく」によるガンマ線超新星残骸 G298.6-0.0 および G32.8-0.1 の観測」、日本天文学会秋季年会、愛媛大学、2016年9月

〔その他〕

ホームページ等

<http://energetic-universe.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究分担者：なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：山崎 了

ローマ字氏名：Yamazaki, Ryo

研究協力者氏名：山口 弘悦

ローマ字氏名：Yamaguchi, Hiroya

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。