

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22684012

研究課題名(和文)TeVガンマ線・X線観測で探る宇宙線の起源

研究課題名(英文)Study of Cosmic Ray Origin with TeV gamma-rays and X-rays

研究代表者

馬場 彩 (Bamba, Aya)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：70392082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,900,000円

研究成果の概要(和文)：我々の銀河の基本構成要素の一つである宇宙線の起源について研究を行なった。宇宙X線衛星「すざく」で多くのTeVガンマ線未同定天体を観測し、半数がパルサー星雲であることをつきとめた。一方、誰が宇宙線陽子成分を加速しているかについて、新たな謎が生まれた。また、宇宙線加速天体である超新星残骸の詳細観測から、加速効率の議論を行い、加速粒子が衝撃波から逃亡し、「宇宙線」となる瞬間をとらえた。

研究成果の概要(英文)：Our aim is to find the origin of cosmic ray protons. We observed TeV unidentified sources with X-ray satellite Suzaku, and found that around half of them are pulsar wind nebulae. On the other hand, it is still unclear that what is the main accelerator of cosmic ray proton. We also made detailed study of the accelerator candidate, shocks of supernova remnants, and discussed on the acceleration efficiency. We also found the escaping particles from the shocks of supernova remnants for the first time.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：宇宙線 X線 ガンマ線 加速

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙線とは宇宙を飛び交う超高エネルギー粒子である。そのエネルギー密度は  $1 \text{ eV/cc}$  と大変高く、宇宙背景放射や星光などにも匹敵する、我々の銀河の基本構成要素の一つである。にも関わらず、1912年の宇宙線発見から100年経ってもその加速源は明らかになっていなかった。1995年に日本の宇宙 X 線衛星「あすか」が超新星残骸 SN1006 の衝撃波面からシンクロトロン X 線を発見し (Koyama et al. 1995)、加速電子に関しては理解が進んだ。しかし、宇宙線主成分の陽子に関しては直接観測の証拠がないままだった。

## 2. 研究の目的

このような背景を踏まえ、X 線と、当時特に観測が急激に進んでいた TeV ガンマ線の観測を組み合わせることで、宇宙線陽子成分加速源を発見することが研究の最大の目的である。

## 3. 研究の方法

加速電子は磁場中でシンクロトロン放射を主に X 線帯域で放射する。また、宇宙背景放射光子を逆コンプトン散乱で叩き上げ、TeV ガンマ線帯域の光子を生成する。したがって、電子加速天体は、X 線でも TeV ガンマ線でも明るい。一方、加速陽子は背景陽子との相互作用でパイ中間子崩壊起源の TeV ガンマ線を放射するものの、X 線帯域ではほとんど放射を出さない。つまり、TeV ガンマ線だけで「明るい」。したがって、TeV ガンマ線で明るく、X 線で暗い天体を探すことで、宇宙線主成分である陽子の加速源を突き止めることが出来る。また、本研究をさらに発展させるために、将来計画である宇宙 X 線衛星 ASTRO-H や TeV ガンマ線望遠鏡 CTA の開発研究も行っている。

## 4. 研究成果

我々は、当時始まっていた TeV ガンマ線望遠鏡 H. E. S. S. 無バイアス銀河面探査で発見された TeV ガンマ線未同定天体に注目した。これらは TeV ガンマ線帯域で初めて発見された天体で、宇宙線陽子加速源の可能性が高い。しかし、本当に他の波長で「暗い」のか、それとも多波長での観測が少ないために見つかっていないのか、はっきりしたことは分かっていなかった。

そこで我々は日本の宇宙 X 線衛星「すざく」搭載 X 線 CCD カメラ XIS を用いた TeV ガンマ線未同定天体の追観測を始めた。もし TeV ガンマ線未同定天体が電子加速源であったとしたらシンクロトロン放射が X 線帯域で見つかるはずであり、陽子起源であれば見つ

らないはずである。また、X 線帯域ではプラズマからの熱的放射も見えるため、TeV ガンマ線未同定天体がどのような種族の天体なのか判別することが出来る。

我々は個々の天体についての正体をまず突き止めた。比較的年老いたパルサーとパルサー星雲であったケースが一番多く、全体の半分近くに上る (発表論文 1, 15, 24)。また、本当に X 線帯域で暗い「暗黒加速器」も発見した (発表論文 28)、宇宙線加速超新星残骸も新たに発見している (発表論文 22)。特に年老いたパルサー星雲は、非常に表面輝度の低い広がった構造が発見され、パルサー星雲誕生後 100 万年にわたって広がり続けることを発見した (発表論文 37)。これは従来のパルサー星雲モデルでは考えられていなかった現象であり、加速された電子がパルサー星雲から逃げ出す現場をとらえたのではないかと注目されている。一方、陽子を加速していると思われる天体はほとんど発見されず、誰がどのように宇宙線陽子を加速しているのかという根本的な問題は未解決のまま残った。

超新星残骸では、加速現場の詳細な観測から、加速現場での効率についての議論を推し進めた。衝撃波での加速効率は非常に高いと思われているが、あまりに大きいと衝撃波の進化に影響を与え、観測と矛盾が出る可能性もある。我々は現実的な系を考えることで、現在用いられている加速効率測定法の矛盾を突き (発表論文 3)、他の加速効率測定法の提案などを行なった (発表論文 11)。また、最近注目されている「粒子逃亡」についても理解を進めた。粒子が加速現場で加速されても、増幅された磁場によって閉じ込められたままだと「宇宙線」として宇宙空間に飛び出すことが出来ない。我々は W28 という超新星残骸の北東部にて衝撃波が分子雲にぶつかった箇所から粒子が逃げ出している様子を世界で初めて発見した (発表論文 4)。どのような条件で粒子逃亡が始まるか、などについて検討を進めている。特に次世代宇宙 X 線衛星「ASTRO-H」や次世代 TeV ガンマ線望遠鏡 CTA により宇宙線逃亡の理解はぐんと進むと考え、観測検討を続け、機器開発にあたっている。

## 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 39 件: すべて査読あり)

1. 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, in press
2. T. Yasuda, W.B. Iwakiri, M.S. Tashiro, Y. Terada, T. Kouzu, T. Enoto, Y. E.

- Nakagawa, A. Bamba, Y. Urata, K. Yamaoka, M. Ohno, S. Shibata, Kazuo Makishima, and The Suzaku-WAM team, "Sub-MeV Band Observation of a Hard Short Burst from AXP 1E 1547.0–5408 with the Suzaku Wide-band All-sky Monitor", PASJ, in press
3. J. Shimoda, T. Inoue, Y. Ohira, R. Yamazaki, A. Bamba, J. Vink "On cosmic-ray production efficiency at supernova remnant shocks propagating into realistic diffuse interstellar medium", ApJ, 803, 98 (2015)
  4. R. Nakamura, A. Bamba, M. Sawada, M. Ishida, R. Yamazaki, K. Tatematsu, K. Kohri, G. Puehlhofer, S. Wagner, "The X-ray Spectroscopy of the Mixed Morphology Supernova Remnant W28 with XMM-Newton", PASJ, 66, 6210 (10 pages) (2014)
  5. S. Broersen, A. Chiotellis, J. Vink, A. Bamba "Many sides of RCW86; a type Ia supernova remnant evolving in its progenitor's wind bubble", MNRAS, 441, 3040-3054 (2014)
  6. Y.T. Tanaka, L. Stawarz, J. Finke, C.C. Cheung, C.D. Dermer, J. Kataoka, A. Bamba, G. Dubus, M. De Naurois, S. Wagner, Y. Fukazawa, D.J. Thompson, "Extreme TeV Blazar Candidate HESS J1943+213 Studied at High Energies with Suzaku and Fermi-LAT", ApJ, 787, 155 (10 pages) (2014)
  7. E. Rivers, A. Markowitz, R. Rothchild, A. Bamba, Y. Fukazawa, T. Okajima, J. Reeves, Y. Terashima, Y. Ueda, "Tracking the Complex Absorption in NGC2110 with Two Suzaku Observations", ApJ, 786, 126 (8 pages) (2014)
  8. K. Maeda, S. Katsuda, A. Bamba, Y. Terada, Y. Fukazawa "Long-Lasting X-Ray Emission from Type IIb Supernova SN2011dh and Mass-Loss History of The Yellow Supergiant Progenitor", ApJ, 785, 95 (12 pages) (2014)
  9. K. Someya, A. Bamba, M. Ishida, "Progenitor Type Identification of the Supernova Remnant N103B in the Large Magellanic Cloud by Suzaku and Chandra", PASJ, 66, 26 (16 pages) (2014)
  10. S. Yamauchi, A. Bamba, K. Koyama "X-Ray Emission from the Galactic Supernova Remnant G12.0-0.1", PASJ, 66, 20 (8pages) (2014)
  11. R. Yamazaki, Y. Ohira, M. Sawada, A. Bamba, "Synchrotron X-ray diagnostics of cutoff shape of nonthermal electron spectrum at young supernova remnants", RAA, 14, 165-178 (2014)
  12. E.A. Helder, J. Vink, A. Bamba, J.A.M. Bleeker, D.N. Burrows, P. Ghavamian, R. Yamazaki, "Proper Motion of Halpa filaments in Supernova Remnant RCW86", MNRAS, 435, 910-916 (2013)
  13. T. Kouzu, M.S. Tashiro, Y. Terada, S. Yamada, A. Bamba, T. Enoto, K. Mori, Y. Fukazawa, K. Makishima, "Spectral Variation of the Hard X-ray Emission from the Crab Nebula with the Suzaku Hard X-ray Detector", PASJ, 65, 74, (11 pages) (2013)
  14. A. Harayama, Y. Terada, M. Ishida, T. Hayashi, A. Bamba, M.S. Tashiro, "Search for Non-Thermal Emission from an Isolated Magnetic White Dwarf EUVE J0317-855 with Suzaku", PASJ, 65, 73, (6 pages) (2013)
  15. T. Fujinaga, K. Mori, A. Bamba, S. Kimura, T. Dotani, M. Ozaki, K. Matsuta, G. Puehlhofer, H. Uchiyama, J.S. Hiraga, H. Matsumoto, Y. Terada, "An X-ray counterpart of HESS J1427-608 with Suzaku", PASJ, 65, 61 (2013)
  16. F. Acero, A. Bamba, S. Casanova, E. de Cea, E. de Ona Wilhelmi, S. Gabici, Y. Gallant, D. Hadasch, A. Marcowith, G. Pedalletti, O. Reimer, M. Renaud, D. F. Torres, F. Volpe, for the CTA collaboration, "Gamma-ray signatures of cosmic ray acceleration, propagation, and confinement in the era of CTA", Astroparticle Physics, 43, 276-286 (2013)
  17. B.S. Acharya, A. Bamba, et al. "Introducing the CTA concept", Astroparticle Physics, 43, 3-18 (2013)
  18. Y. Hanabata, M. Sawada, H. Katagiri, A. Bamba, Y. Fukazawa "X-Ray Observations of the Supernova Remnant W51C and Its Environment with Suzaku", PASJ, 65, 42 (2013)
  19. K. Maeda, Y. Terada, D. Kasen, F.K. Ropke, A. Bamba, R. Diehl, K. Nomoto, M. Kromer, I.R. Seitenzahl, H. Yamaguchi, T. Tamagawa, W. Hillebrandt, "PROSPECT OF STUDYING HARD X- AND GAMMA-RAYS FROM TYPE IA SUPERNOVAE", ApJ, 760, 54, 9pp. (2012)

20. Y. Terada, M.S. Tashiro, A. Bamba, R. Yamazaki, H. Seta, T. Kouzu, S. Koyama "Search for Diffuse X-rays from a Bow Shock Region of a Runaway Star, BD+43°3654, with *Suzaku*" PASJ, 64,138 (2012)
21. M. Lemoine-Goumard, M. Renaud, J. Vink, G. E. Allen, A. Bamba, F. Giordano, Y. Uchiyama, "Constraints on cosmic-ray efficiency in the supernova remnant RCW 86 using multi-wavelength observations", A&A, 545, A28 (9pp.) (2012)
22. A. Bamba, G. Puehlhofer, F. Acero, D. Klochkov, W. Tian, R. Yamazaki, Z. Li, D. Horns, K. Kosak, N. Komin "Suzaku Observations of the Non-thermal Supernova Remnant HESS J1731-347" ApJ, 756, 149, 11pp. (2012)
23. S. Yamada, H. Uchiyama, T. Dotani, M. Tsujimoto, S. Katsuda, K. Makishima, H. Takahashi, H. Noda, S. Torii, S. Sakurai, T. Enoto, T. Yuasa, S. Koyama, A. Bamba, "Data-oriented Diagnostics of Pileup Effects on the Suzaku XIS", PASJ, 64, 53 (2012)
24. T. Kishishita, A. Bamba, Y. Uchiyama, Y. Tanaka, T. Takahashi, "X-RAY INVESTIGATION OF THE DIFFUSE EMISSION AROUND PLAUSIBLE  $\gamma$ -RAY EMITTING PULSAR WIND NEBULAE IN KOOKABURRA REGION", ApJ, 750, 162, 8pp. (2012)
25. R. Nakamura, A. Bamba, T. Dotani, M. Ishida, R. Yamazaki, K. Kohri, "Evolution of Synchrotron X-rays in Supernova Remnants", ApJ, 746, 134-138 (2012)
26. The CTA Consortium, A. Bamba et al., "Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy", Experimental Astronomy, 32, 193-316 (2011) 10.1007/s10686-011-9247-0
27. S. Yamauchi, A. Bamba, K. Koyama "A New Candidate of an X-Ray Luminous Cluster of Galaxies Behind the Galactic Plane", PASJ, 63, S957-S961 (2011)
28. T. Fujinaga, A. Bamba, T. Dotani, M. Ozaki, G. Puehlhofer, S. Wagner, O. Reimer, S. Funk, J. Hinton, "Suzaku Observation of the unidentified VHE Gamma-Ray Source HESS J1702-420", PASJ, 63, S857-S864 (2011)
29. S. Katsuda, K. Mori, R. Petre, H. Yamaguchi, H. Tsunemi, F. Bocchino, A. Bamba, M. Miceli, J.W. Hewitt, T. Temin, H. Uchida, R. Yoshii "Suzaku Detection of Diffuse Hard X-ray Emission outside Vela X", PASJ, 63, S827-S836 (2011)
30. T. Hayashi, M. Ishida, Y. Terada, A. Bamba, T. Shionome, "Suzaku Observation of the Intermediate Polar V1223 Sagittarii", PASJ, 63, S739-S750 (2011)
31. G. Poshak, N. Isobe, M. Birkinshaw, D.M. Worrall, I. Sakon, K. Iwasawa, A. Bamba "Diffraction-limited Subaru imaging of M82: sharp mid-infrared view of starburst core", PASJ, 63, S505-S521 (2011)
32. J. Vink, A. Bamba, R. Yamazaki "The radiative X-ray and gamma-ray efficiencies of rotation powered pulsars", ApJ, 727, 131-135 (2011)
33. A. Hayato, H. Yamaguchi, T. Tamagawa, S. Katsuda, U. Hwang, J.P. Hughes, M. Ozawa, A. Bamba, K. Kinugasa, Y. Terada, A. Furuzawa, H. Kunieda, K. Makishima, "Expansion Velocity of Ejecta in Tycho's Supernova Remnant Measured by Doppler Broadened X-Ray Line Emission", ApJ, 725, 894-903 (2010)
34. T. Sato, A. Bamba, R. Nakamura, M. Ishida, "Identification of CXOU J171405.7-381031 as a New Magnetar with XMM-Newton", PASJ, 62, L33-L36 (2010)
35. K. Someya, A. Bamba, M. Ishida, "Suzaku observations of the Supernova Remnant N23 in the Large Magellanic Cloud", PASJ, 62, 1301-1306 (2010)
36. Y. Terada, M. Ishida, A. Bamba, K. Mukai, "X-ray Observation of AM Herculis in a Very Low State with Suzaku", ApJ, 721, 1908-1918 (2010)
37. A. Bamba, T. Anada, T. Dotani, K. Mori, R. Yamazaki, K. Ebisawa, J. Vink, "X-ray Evolution of Pulsar Wind Nebulae", ApJL, 719, L116-L120 (2010)
38. H. Yamaguchi, M. Sawada, A. Bamba, "Searching for Diffuse Nonthermal X-Rays from the Superbubbles N11 and N51D in the Large Magellanic Cloud", ApJ, 715, 412-420 (2010)
39. S. Yamauchi, M. Ueno, A. Bamba, K. Koyama, "A New Candidate of a Cluster of Galaxies, 2XMM J045637.2+522411", PASJ, 62, 219-224 (2010)

〔学会発表〕 (計 27 件)

国際招待講演

1. A. Bamba, “Multiwavelength studies of gamma-ray supernova remnants”, “Fifth International Fermi Symposium”. Nagoya, Japan, 2014 Oct.
2. A. Bamba, “Observational Results on Galactic Cosmic-Ray Acceleration”, “Cosmic Ray Origin - beyond the standard models -”, San Vito di Cadore, Italy, 2014 Mar.
3. A. Bamba, “Recent Progress of X-ray Observations of Nonthermal Emission from Supernova Remnants and Pulsar Wind Nebulae”, “Suzaku-MAXI 2014 - Expanding the Frontiers of the X-ray Universe”, Ehime, Japan, 2014 Feb.
4. A. Bamba, “Supernova Remnants as Chemical Element Distributors”, “Chemical Evolution of the Universe “, Tokyo, Japan, 2011 Oct.
5. A. Bamba, “Multi-wavelength Studies of PWNe”, “Suzaku 2011”, Stanford, US, 2011 Jul.
6. A. Bamba, “SNR study with CTA”, “CTA General Collaboration Meeting”, Oxford, UK, 2010 Oct.
7. A. Bamba, “Cosmic ray production in Supernovae and SNR”. “IXO Science Meeting”, Paris, France, 2010 Apr.

国内招待講演

8. 馬場 彩, 「硬 X 線で探る超新星残骸での宇宙線加速」, 「2020 年代の高エネルギー宇宙物理学シンポジウム」, 神奈川, 日本, 2014 年 8 月
9. 馬場 彩, 「超新星残骸での元素合成」, 「研究環シンポジウム:宇宙の化学進化 2014」, 東京, 日本, 2014 年 1 月
10. 馬場 彩, 「超新星残骸と高エネルギー観測」, 「超新星と超新星残骸の融合研究会 - 恒星進化・爆発メカニズムと元素合成 - 」, 東京, 日本, 2012 年 10 月
11. 馬場 彩, 「すざくで観測した HESS J1731-347」, ワークショップ「超新星残骸」, 名古屋, 日本, 2012 年 1 月
12. 馬場 彩, 「SNR と CTA」, 宇宙線研究所共同利用研究会 「マルチメッセンジャー宇宙物理学と CTA」, 千葉, 日本, 2011 年 9 月
13. 馬場 彩, 「X 線観測による銀河系内

宇宙線加速源の研究」, 日本天文学会研究奨励賞受賞記念講演, 鹿児島, 日本, 2011 年 9 月

14. 馬場 彩, 「ASTRO-H / CTA で探る Pulsar System」, 「High Energy Observation of Pulsar Systems for Future Missions」, 埼玉, 日本, 2011 年 9 月
15. 馬場 彩, 「超新星残骸プラズマとアバンダンス」, 「Astro-H に関するワークショップ」, 東京, 日本, 2010 年 12 月
16. 馬場 彩, 「CTA Japan が狙う SNR Science」, 宇宙線研究所共同利用研究会「ガンマ線天文学 ~日本の戦略~」, 千葉, 日本, 2010 年 10 月
17. 馬場 彩, 「次世代 X 線天文台と ALMA-Subaru で探る超新星での元素合成」, 「ALMA-Subaru Workshop 2010」, 東京, 日本, 2010 年 9 月
18. 馬場 彩, 「RCW86 逆行衝撃波での宇宙線加速の可能性」, 「SNR 研究会」, 名古屋, 日本, 2010 年 4 月

国内一般講演

19. 馬場 彩, 「NGHXT で狙う超新星残骸のサイエンス」, 日本天文学会春季年会, 大阪大学, 2015 年 3 月
20. 馬場 彩, 「NGHXT で狙う超新星残骸のサイエンス」, 第 15 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2015 年 1 月
21. 馬場 彩, 「X 線観測で探る超新星残骸衝撃波面での加速電子最高エネルギー決定機構」, 日本天文学会秋季年会, 山形大学, 2014 年 9 月
22. 馬場 彩, 「「すざく」による X 線バースター 2XMM J185114.3S-\$000004 からのフレアの観測」, 日本天文学会春季年会, 国際基督教大学, 2014 年 3 月
23. 馬場 彩, 「ASTRO-H プロジェクトの教育広報活動」, 第 12 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2012 年 1 月
24. 馬場 彩, 「「すざく」衛星による宇宙線加速超新星残骸 HESS J1731-347 の観測 (II): 他波長との比較」, 日本天文学会秋季年会, 2011 年 9 月
25. 馬場 彩, 「CTA 報告 9: CTA で狙う物理 SNR」, 日本物理学会春季年会, 2011 年 3 月
26. 馬場 彩, 「「すざく」による TeV ガンマ線未同定天体 HESS J1503-582 の観測」, 日本天文学会春季年会, 2011 年 3 月
27. 馬場 彩, 「「すざく」衛星による宇宙線加速超新星残骸 HESS J1731-347 の観

測」、日本天文学会秋季年会、2010年9月

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~bamba/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

馬場 彩 (BAMBA, Aya)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：70392082