

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740184

研究課題名（和文） 系内ガンマ線天体の放射機構と銀河宇宙線の核子成分の加速機構の解明

研究課題名（英文） Study of radiation mechanism of Galactic gamma-ray sources and acceleration mechanism of Galactic cosmic rays

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

研究成果の概要（和文）：我々の銀河系内にある超新星残骸やパルサー星雲などのガンマ線天体の観測と結果の理論的解釈の研究を行い、宇宙線電子および陽子成分の加速機構に対する知見を得た。さらに、プラズマ粒子シミュレーションを用いた無衝突衝撃波の数値実験を行い、衝撃波遷移層近傍での波動励起過程およびそれに伴う粒子加速過程についての研究を行った。

研究成果の概要（英文）：We investigated both observationally and theoretically gamma-ray emitting supernova remnants and pulsar wind nebulae which generate Galactic cosmic-ray electrons and protons. With particle-in-cell simulations, we also studied processes of wave excitation and associated particle acceleration around the transition layer of collisionless shocks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：数物系科学

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：宇宙線、宇宙物理、理論天文学、無衝突衝撃波、ガンマ線、超新星残骸、パルサー星雲

1. 研究開始当初の背景

地球に降り注ぐ高エネルギー粒子である宇宙線核子成分のうち、 $10^{15.5}\text{eV}$ 以下のものは我々の住む天の川銀河内で生成されていると考えられている。このような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、年齢約 1000 年程度以下で周囲に強い衝撃波を持つ若い超新星残骸(SNR)である。しかし、その決定的証拠は未だ得られておらず、また SNR とは別の種族の加速源が存在

する可能性も残されている。

本研究では、X線・ガンマ線の観測的研究や、電磁波放射の計算・プラズマシミュレーションを用いた理論研究を通じて、SNRの放射機構や宇宙線粒子の加速過程及び無衝突衝撃波の運動論的基礎物理過程の解明をめざした。

2. 研究の目的

SNR等の高エネルギー天体の電磁波放射機構について、理論モデルの予言と観測を比較

し、銀河宇宙線加速天体を同定する。また、粒子加速の理論において加速過程への注入段階が未解明（注入問題と呼ばれる）なために導入されている、電子・陽子の注入効率や磁場に関する未知パラメータを決定する。さらに、得られた結果をプラズマ数値シミュレーションを用いて物理の第一原理から説明する。そのために、以下の2課題の遂行を研究目的とした。

(1) 宇宙線加速天体の同定: 現在の銀河宇宙線研究の中心課題は、核子成分、特に陽子の加速源を同定することである。そのための有効な手段は、加速現場で宇宙線陽子の発するガンマ線を捉えることである。これまでに数個の若い SNR から TeV ガンマ線が検出されている。しかし、TeV ガンマ線は、数 10TeV 以上の陽子が星間ガスに衝突した際にできるパイ中間子の崩壊によるもの(陽子起源)なのか、数 10TeV 以上の電子が宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱で叩きあげたもの(電子起源)なのか、結論が得られていない。このような現状において、まず、若い SNR の電磁波放射の詳細探査により、ガンマ線の放射機構を同定することを目指した。理論的計算結果を Fermi 衛星や H.E.S.S. で取得される GeV-TeV 帯域ガンマ線のデータと比較し、陽子の注入効率を決定する。さらに、若い SNR 以外の電子・陽子加速源の候補として注目を集める TeV ガンマ線未同定天体やパルサー星雲のガンマ線放射機構を同定し、これらの天体における加速過程や陽子及び電子の注入効率を検討する。

(2) プラズマ粒子シミュレーションを用いた無衝突衝撃波の物理過程の理解: 粒子加速の注入段階を物理的に理解するためにはプラズマの粒子コードを用いた運動論の数値実験を行うことが必要不可欠である。粒子加速の注入問題に挑むには、計算領域内に長時間衝撃波が存在するような状況を作ることが必須である。これまで独自に開発した計算手法を用いて、世界に先駆けて衝撃波の長時間シミュレーションを行い、衝撃波遷移層近傍での波動励起過程やそれに伴う粒子加速過程を明らかにする。

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

(1) 宇宙線加速天体に関する研究成果

①超高エネルギーガンマ線未同定天体 HESS J1731-347 を X線帯域と電波で追観測し、年齢数万年の古い超新星残骸が対応天体の候

補であることを指摘した。これにより、古い超新星残骸で核子宇宙線の加速が起こることを観測的に指摘した(論文 15)。

②年齢 2000 年程度の若い超新星残骸 RCW86 を可視光と X線で観測し、衝撃波速度と衝撃波下流の温度を測定した。その結果、衝撃波下流の温度が単純な流体力学の予言よりも低いことがわかり、これは衝撃波エネルギーが宇宙線加速に使われている証拠であることがわかった(論文 21)。

③宇宙線変性衝撃波を背景プラズマと宇宙線成分の2流体近似で取扱い、衝撃波から逃走した宇宙線エネルギーの割合と衝撃波圧縮比の間の関係をシンプルに導出することに成功し、宇宙線圧力が高くなるのはごく限られたパラメータ領域の場合であることを示した(論文 12)。

④被加速粒子の最高エネルギーが加速領域の逃走の効果によってきまるシナリオのもとで、加速領域を出た粒子の時間平均のエネルギースペクトルを理論的に計算した。その結果、宇宙線加速が効率よくおこる超新星残骸等では、得られるエネルギースペクトルは加速領域でのエネルギースペクトルそのものから異なる可能性があることを指摘した(論文 16)。

⑤年齢 1000 年程度の若い超新星残骸 RX J1713.7-3946 の GeV 帯域ガンマ線観測を行い、単純な陽子起源モデルとは矛盾するガンマ線スペクトルを取得した。さらに、このガンマ線データに加え、これまでに得られている X線のスペクトル、空間分布、時間変動などの観測事実も含めて、無矛盾に説明する陽子起源のモデルを提唱した(論文 4, 7)。

⑥Fermi 衛星によって、年齢数百年の SNR である Cassiopea A, 年齢数万年程度の SNR である W28, W51C, W44, Cygnus Loop, G8.7-0.1 の GeV 帯域のガンマ線観測を行い、その放射スペクトルから、放射起源が陽子起源である可能性が高いことを示し、これらの超新星残骸で宇宙線核子成分の加速が起こっていることを明らかにした(論文 3, 6, 14, 17, 18, 19)。さらに、年齢数万年程度の年齢の超新星残骸の GeV ガンマ線スペクトルを説明する理論的シナリオとして、「宇宙線逃走シナリオ」と「2次の衝撃波による2段階加速シナリオ」の2つを提唱した(論文 9, 11)。

⑦全部で12個の超新星残骸のシンクロトロン X線の放射強度を超新星残骸の半径の関数としてプロットすると、半径が約 10 パーセクより大きくなるとシンクロトロン X線が急激に暗くなることを示した。さらに得られたプロットは、セドフ期にある衝撃波で電子が冷却支配的に加速されているとすると自然に説明できることを示し、加速された電子のエネルギー総量は 10^{47-48} erg であると見積もった(論文 2)。

⑧パルサー星雲は年齢とともにX線サイズとガンマ線放出効率が上がり、X線放出効率がさがるということを見出しパルサー近傍での高エネルギー電子生成過程について新たな観測的制限を取得した。この結果の一つの解釈として、宇宙線電子の移流・拡散を考えるモデルを考案した(論文8,13)。

⑨PAMELA衛星によって発見された地球にふりそそぐ宇宙線陽電子の過剰の起源として、近傍の古い超新星残骸説を提唱し、同時に検証可能な予言を行った(論文20)。

(2) プラズマ粒子シミュレーションに関する研究成果

①衝撃波面に表れるイオンスケールの空間的変動(リップル構造)を含んだ完全垂直衝撃波および準垂直衝撃波の大規模2次元プラズマ粒子シミュレーションを行い、これまで1次元シミュレーションで理解されてきた周期的な衝撃波面の振動(衝撃波再形成)がリップル構造によってその特性を大きく変えることを示した(論文10)。

②低マッハ数の完全垂直衝撃波と準垂直衝撃波の大規模2次元プラズマ粒子シミュレーションを行い、衝撃波ドリフト加速および変形二流体不安定を介した電子-陽子スケール間結合が衝撃波遷移層で重要となる可能性を指摘した(論文1,5)。

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21件)

1. Umeda, H., Kidani, Y., Matsukiyo, S., Yamazaki, R., “Modified two-stream instability at perpendicular collisionless shocks: Full particle simulations”, *Journal of Geophysical Research*, 117, A03206 (11pp), 2012年, 査読有

DOI:10.1029/2011JA017182

2. Nakamura, R., Bamba, A., Dotani, T., Ishida, M., Yamazaki, R., Kohri, K., “Evolution of Synchrotron X-Rays in Supernova Remnants”, *The Astrophysical Journal*, 746, 134 (5pp), 2012年, 査読有
DOI:10.1088/0004-637X/746/2/134

3. Abdo, A. A. (他148名, アルファベット順に144番目), “Fermi Large Area Telescope Observations of the Supernova Remnant G8.7-0.1”, *The Astrophysical Journal*, 744, 80 (11pp), 2012年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/744/1/80

4. Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., Fukui, Y., “Toward Understanding the Cosmic-Ray Acceleration at Young Supernova Remnants Interacting with Interstellar Clouds: Possible Applications to RX J1713.7-3946”, *The Astrophysical Journal*, 744, 71 (15pp), 2012年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/744/1/71

5. Matsukiyo, S., Ohira, Y., Yamazaki, R., Umeda, T., “Relativistic Electron Shock Drift Acceleration in Low Mach Number Galaxy Cluster Shocks”, *The Astrophysical Journal*, 742, 47 (9pp), 2011年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/742/1/47

6. Katagiri, H. (他9名, 10番目), “Fermi Large Area Telescope Observations of the Cygnus Loop Supernova Remnant”, *The Astrophysical Journal*, 741, 44 (9pp), 2011年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/741/1/44

7. Abdo, A. A. (他163名, アルファベット順に162番目), “Observations of the Young Supernova Remnant RX J1713.7-3946 with the Fermi Large Area Telescope”, *The Astrophysical Journal*, 734, 28 (9pp), 2011年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/734/1/28

8. Vink, J., Bamba, A., Yamazaki, R., “The Radiative X-ray and Gamma-ray Efficiencies of Rotation-powered Pulsars”, *The Astrophysical Journal*, 727, 131 (5pp), 2011年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/727/2/131

9. Ohira, Y., Murase, K., Yamazaki, R., “Gamma-rays from molecular clouds illuminated by cosmic rays escaping from interacting supernova remnants”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410, 1577-1582, 2011年, 査読有

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.17539.x

10. Umeda, T., Kidani, Y., Yamao, M., Matsukiyo, S., Yamazaki, R., “On the reformation at quasi- and exactly perpendicular shocks: Full particle-in-cell simulations”, *Journal of Geophysical Research*, 115, A10250 (7pp), 2010年, 査読有

DOI: 10.1029/2010JA015458

11. Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., “Two-step Acceleration Model of Cosmic Rays at Middle-aged Supernova Remnants: Universality in Secondary Shocks”, The Astrophysical Journal Letters, 723, L108-L112, 2010年, 査読有

DOI: 10.1088/2041-8205/723/1/L108

12. Vink, J., Yamazaki, R., Helder, E. A., Schure, K. M., “The Relation Between Post-shock Temperature, Cosmic-ray Pressure, and Cosmic-ray Escape for Non-relativistic Shocks”, The Astrophysical Journal, 722, 1727-1734, 2010年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/722/2/1727

13. Bamba, A., Anada, T., Dotani, T., Mori, K., Yamazaki, R., Ebisawa, K., Vink, J., “X-ray Evolution of Pulsar Wind Nebulae”, The Astrophysical Journal Letters, 719, L116-L120, 2010年, 査読有

DOI: 10.1088/2041-8205/719/2/L116

14. Abdo, A. A. (他 153 名, アルファベツト順に 151 番目), “Fermi Large Area Telescope Observations of the Supernova Remnant W28 (G6.4-0.1)”, The Astrophysical Journal, 718, 348-356, 2010年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/718/1/348

15. Tian, W. W., Li, Z., Leahy, D. A., Yang, J., Yang, X. J., Yamazaki, R., Lu, D., “X-Ray Emission from HESS J1731-347/ SNR G353.6-0.7 and Central Compact Source XMMU J173203-344518”, The Astrophysical Journal, 712, 790-796, 2010年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/712/2/790

16. Ohira, Y., Murase, K., Yamazaki, R., “Escape-limited model of cosmic-ray acceleration revisited”, Astronomy and Astrophysics, 513, A17 (10pp), 2010年, 査読有

DOI: 10.1051/0004-6361/200913495

17. Abdo, A. A. (他 180 名, アルファベツト順に 179 番目), “Gamma-Ray Emission from the Shell of Supernova Remnant W44 Revealed by the Fermi LAT”, Science, 327, 1103-1106, 2010年, 査読有

DOI: 10.1126/science.1182787

18. Abdo, A. A. (他 171 名, アルファベツト順に 170 番目), “Fermi-Lat Discovery of

GeV Gamma-Ray Emission from the Young Supernova Remnant Cassiopeia A”, The Astrophysical Journal Letters, 710, L92-L97, 2010年, 査読有

DOI: 10.1088/2041-8205/710/1/L92

19. Abdo, A. A. (他 176 名, アルファベツト順に 175 番目), “Fermi LAT Discovery of Extended Gamma-Ray Emission in the Direction of Supernova Remnant W51C”, The Astrophysical Journal Letters, 706, L1-L6, 2009年, 査読有

DOI: 10.1088/0004-637X/706/1/L1

20. Fujita, Y., Kohri, K., Yamazaki, R., Ioka, K., “Is the PAMELA anomaly caused by supernova explosions near the Earth?”, Physical Review D, 80, 063003 (5pp), 2009年, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.80.063003

21. Helder, E. A., Vink, J., Bassa, C. G., Bamba, A., Bleeker, J. A. M., Funk, S., Ghavamian, P., van der Heyden, K. J., Verbunt, F., Yamazaki, R., “Measuring the Cosmic-Ray Acceleration Efficiency of a Supernova Remnant”, Science, 325, 719-722, 2009年, 査読有

DOI: 10.1126/science.1173383

[学会発表] (計 15 件)

1. Yamazaki, R., “On Gamma-ray Spectra of Young and Middle-aged SNRs Producing CRs”, International Workshop on Particles and Radiation from Cosmic Accelerators CA2012 (February 20-22, 2012, Chiba University, Chiba, Japan)

2. 山崎 了, 「天文コミュニティー側から実験室宇宙物理に期待すること」日本天文学会 2012年春季年会 (2012年3月19日-22日, 龍谷大学)

3. 山崎 了, 「超新星残骸のシンクロトロン放射スペクトル再考」宇宙線研究会 (2012年3月1日-2日, 東京大学宇宙線研究所)

4. 山崎 了, 「宇宙線加速過程に対するガンマ線観測からの示唆」研究会「超新星残骸」(2012年1月13日, 名古屋大学)

5. 山崎 了, 「超新星残骸 SN 1006 のシンクロトロン放射スペクトル再考」, 「高エネルギー宇宙物理」研究会 (2011年12月15日-17

日, 大阪大学)

6. 山崎 了, 「X 線フラッシュの観測の現状と将来展望」ガンマ線バースト将来衛星検討会議 (2011 年 12 月 6 日-7 日, 東京大学)

7. 山崎 了, 中島 良介, 柳田 昭平, 吉田 龍生, 寺澤 敏夫, 郡 和範「確率微分方程式を用いた宇宙線粒子加速シミュレーション・コードの開発」日本天文学会 2011 年秋季年会 (2011 年 9 月 19 日-22 日, 鹿児島大学)

8. 山崎 了, 「多波長で探るガンマ線バースト」高エネルギー宇宙物理学連絡会 第 11 回研究会「多波長で探る高エネルギー現象」(2011 年 3 月 29 日-31 日, 早稲田大学)

9. 山崎 了, 「X 線フラッシュの起源に関する理論研究」科研費特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第 4 回領域シンポジウム (2011 年 2 月 7 日-9 日, 東京工業大学)

10. 山崎 了, 「超新星残骸 RX J1713.7-3946 のガンマ線放射について」HEAP2010 「高エネルギー宇宙物理学研究会」(2010 年 10 月 13 日-16 日, 高エネルギー加速器研究機構)

11. 井上 剛志, 山崎 了, 犬塚 修一郎, 「Fermi 衛星が観測した超新星残骸における折れ曲がった宇宙線スペクトルの起源」日本天文学会 2010 年秋季年会 (2010 年 9 月 22 日-24 日, 金沢大学)

12. 山崎 了, 「超新星残骸での粒子加速と銀河宇宙線の起源」第 140 回生存圏シンポジウム/SGEPSS 波動分科会「相対論的プラズマシンポジウム」(2010 年 3 月 8-9 日, 九州大学筑紫キャンパス)

13. 山崎 了, 「超新星残骸からのガンマ線放射と宇宙線起源の同定」宇宙線研究所共同利用研究会「高エネルギー宇宙物理学の将来とCTA」(2010 年 1 月 9 日, 東京大学柏キャンパス)

14. 山崎 了, 「Fermi 衛星で探る高エネルギー宇宙物理学」理論天文学懇談会シンポジウム「2010 年代の理論天文学」(2009 年 12 月 20-22 日, 名古屋大学)

15. Yamazaki, R., "Cosmic-ray Acceleration at RCW 86", 5th Korean Astrophysics Workshop on Shock Waves, Turbulence, and Particle Acceleration (November 18-21,

2009, Pohang, Korea)

[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: 40420509