

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18740153
 研究課題名 (和文) ガンマ線バースト・超新星残骸の放射機構の解明と高エネルギー宇宙線の起源の研究
 研究課題名 (英文) Study of Emission Mechanism of Gamma-ray Bursts and Supernova Remnants and the Origin of High-Energy Cosmic-rays
 研究代表者
 山崎 了 (YAMAZAKI RYO)
 広島大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：40420509

研究成果の概要：ガンマ線バースト (GRB) の放射機構を探ることで、その中心天体やジェット of 構造に対する考察を行った。また、我々の銀河系内にある超新星残骸や超高エネルギーガンマ線天体に関する理論的研究および観測的研究を行い、宇宙線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、被加速粒子の注入過程について検討を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	300,000	3,500,000

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：高エネルギー宇宙物理学、ガンマ線バースト、宇宙線、超新星残骸、相対論ジェット、衝撃波、宇宙線粒子加速

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の加速機構や起源は未解明の問題である。宇宙線のエネルギーは最大で 10^{20} eV にも達し、エネルギー密度は宇宙背景放射や星光、星間磁場のエネルギー密度と同程度である。つまり宇宙線は、我々の銀河の基本構成要素である。エネルギーが 10^{15} eV 以下の宇宙線は我々の銀河内で起こる超新星爆発後にこの残骸 (超新星残骸、SNR) が、エネルギーが 10^{20} eV 付近の宇宙線は銀河系外で起こる ガン

マ線バースト (GRB) がそれぞれ有力な起源天体と考えられている。SNR には秒速数千 km 以上で膨張する強い衝撃波があり、そこで加速された高エネルギー電子がシンクロトロン放射を行っている。GRB とは1日1回の頻度で、宇宙論的距離から、数秒～数百秒間ガンマ線が観測される天体現象で、エネルギー解放率は宇宙にある全銀河の明るさに匹敵する。GRB の正体や放射機構は未解明であるが、何らかのプロセスで生成された光速に近い速度の衝撃波が SNR と同様の過程でガンマ線

放射を行っているものと考えられている。

本研究では、GRB と SNR の放射機構、及び、宇宙線粒子の加速過程や衝撃波の基礎課程の解明をめざした。

2. 研究の目的

GRB と SNR の放射機構を詳細に検討することによって、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(インジェクションの問題)なために導入されている、高エネルギー粒子の生成率や磁場に関する未知パラメータを GRB や SNR に対して様々な方法で決定する。さらに、得られた結果を数値実験や線形解析の手法を駆使して物理の第一原理から説明する。そのために以下の3課題の遂行を研究目的とした。

(1) GRB の放射機構の現象論的解釈: 我々はこれまで GRB に対する独自の運動学的ジェットモデルを構築し、ジェットが非一様な内部構造を持つことと相対論的ビーミング効果が GRB の観測的多様性を導く要因であることを明らかにした。本研究ではさらにジェット放射モデルを改良し、GRB の様々な統計的観測量を無矛盾に説明できるようなジェットの内部構造や加速理論のパラメータを推定する。それらを作り出す中心天体に制限を加えることで、GRB の正体にせまる。

(2) 高エネルギー宇宙線の加速効率の定量的評価: 近年、複数の SNR の衝撃波領域からシンクロトロン X 線放射が発見され、SNR の衝撃波が電子加速の現場であることが示唆された。しかし宇宙線の主成分である陽子に関する情報は皆無で、その加速機構・起源は未解明である。現在では高エネルギー陽子は衝撃波の構造に反作用を及ぼすまでに効率良く生成されると考えられるようになった。この仮説を吟味、検証することは衝撃波粒子加速を議論する上で重要である。陽子の加速効率が上がると、背景プラズマのエネルギーが宇宙線陽子に持ち出されるので背景プラズマの温度が下がる。この効果を理論的に詳細に計算し、宇宙線粒子加速 SNR の X 線・ガンマ線観測の結果と比較し、陽子加速の効率について検討を行う。

(3) プラズマ粒子シミュレーションを用いた加速注入過程の理解: 粒子加速の注入過程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的数値実験を行うことが必要不可欠である。インジェクション問題に挑むには、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。我々は独自の計算手法を開発し、1次元ではあるが、これまでのものよりもはるかに

長い衝撃波滞在時間を作ることに成功した。しかし、注入過程において多次元の効果は本質的に重要であると予想されるので、いまの計算スキームを2次元、3次元へと拡張する。計算結果が得られたらその物理的解釈の議論を行う。

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) GRB に関する研究成果

① GRB 発生後数百秒くらいに観測される急激な X 線減光期およびそれに続いて数千秒間続く緩やかな減衰期を非一様ジェットモデルで説明した(論文 20, 21)。

② X 線残光の緩やかな減衰期の別のモデルとして衝撃波に関するパラメータが時間変化するモデル、時間差をおいた2成分のジェットモデルを提唱した(論文 7, 19)。

③ GRB 本体と同時に光る可視光放射の多様性の起源を相対論的ジェットモデルで説明した(論文 15)。

④ GRB の早期 X 線残光に見られる急激な減衰の様子を調べることで、GRB を引き起こす相対論的ジェットのエネルギー分布について知見が得られることを示した(論文 12, 14)。

⑤ GRB 発生から1日後程度の X 線・可視光同時観測し、従来の標準モデルで説明不可能なイベントがあることを発見した(論文 13)。

⑥ GRB よりもソフトだが起源は同族と考えられる天体現象である X-ray flash および X-ray rich GRB の X 線残光の性質は GRB のものと異なることを示した(論文 9)。

⑦ GRB 080916C から GeV ガンマ線が到来してきていることを Fermi 衛星の観測により明らかにした(論文 1)。

(2) 宇宙線加速天体に関する研究成果

① 超新星残骸 RCW 86 北東部の X 線観測を行い、この部分は分子雲と相互作用すること及び効率の良い宇宙線加速の現場であることを発見した(論文 11, 16)。

② 超高エネルギーガンマ線天体 HESS J1614-518, J1745-303, 及び CTB 37B を X 線で追観測し、これらの天体における電子加速が非効率であることを発見した(論文 5, 6, 10)。

③ 銀河系内の TeV ガンマ線未同定天体の起源として年齢 10 万年程度の古い超新星残骸説を提唱した(論文 18)。

④ RX J1713.7-3946 に代表される若い超新

星残骸のGeV-TeV帯域のガンマ線の放射機構について考察し、宇宙線加速の非線形モデルの枠組みでは、ガンマ線の放射機構はニュートリノ観測と比較することではじめて同定することができることを示した(論文4)。
⑤若い超新星残骸で起こる磁場増幅現象を電磁流体モデルの枠組みで説明した(論文3)。

(3) プラズマ粒子シミュレーションに関する研究成果

① 粒子法で無衝突衝撃波を生成する数値実験法で、メモリを大幅に節約できる手法を新たに開発した(論文17)。

②2次元Particle-in-cellコードを用いて無衝突衝撃波の数値実験を行い、高マッハ数の場合では1次元コードに比べて電子波乗り加速の効率が落ちること、低マッハ数の場合でも波乗り加速が起こりうることをそれぞれ指摘した(論文3,8)。

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 2 1 件)

1. Abdo, A. A. (他 252 名, アルファベット順に 250 番目), “Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C”, 2009, Science, 323, 1688-1693, 査読有
2. Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., “Turbulence and Magnetic Field Amplification in Supernova Remnants: Interactions between a Strong Shock Waves and Multi-Phase Interstellar Medium”, 2009, The Astrophysical Journal, 695, 825-833, 査読有
3. Umeda, T., Yamazaki, R., Yamao, M., “Electron acceleration at a low-Mach-number perpendicular collisionless shock”, 2009, The Astrophysical Journal, 695, 574-579, 査読有
4. Yamazaki, R., Kohri, K., Katagiri, H., “Gamma-Ray Spectrum of RX J1713.7-3946 in the Fermi era and Future Detection of Neutrinos”, 2009, Astronomy and Astrophysics, 495, 9-13, 査読有
5. Bamba, A. (他 6 名, 2 番目), “X-ray Observations of Very High Energy Gamma-ray Source, HESS J1745-303, with Suzaku”, 2009, The Astrophysical Journal, 691, 1854-1861, 査読有
6. Nakamura, R. (他 7 名, 5 番目), “The Nature of a Cosmic-ray Accelerator CTB37B Observed with Suzaku and Chandra”, 2009, Publication of Astronomical Society of Japan, 61, S197-S207, 査読有
7. Yamazaki, R., “Prior Emission Model for X-ray Plateau Phase of GRB Afterglows”, 2009, The Astrophysical Journal Letters, 690, L118-L121, 査読有
8. Umeda, T., Yamazaki, R., Yamao, M., “Two-Dimensional Full Particle Simulation of a Perpendicular Collisionless Shock with a Shock-Rest-Frame Model”, 2008, The Astrophysical Journal Letters, 681, L85-L88, 査読有
9. Sakamoto, T. (他 16 名, 4 番目), “Global Properties of X-ray Flashes and X-ray-rich Gamma-ray Bursts Observed by Swift”, 2008, The Astrophysical Journal, 679, 570-586, 査読有
10. Matsumoto, H. (他 10 名, 7 番目), “Discovery of Extended X-Ray Emission from an Unidentified TeV Source, HESS J1614-518, Using the Suzaku Satellite”, 2008, Publication of Astronomical Society of Japan, 60, S163-S172, 査読有
11. Yamaguchi, H. (他 6 名, 5 番目), “Suzaku Observation of RCW 86 Northeastern Shell”, 2008, Publication of Astronomical Society of Japan, 60, S123-S130, 査読有
12. Sakamoto, T. (他 8 名, 3 番目), “Evidence of Exponential Decay Emission in the Swift Gamma-Ray Bursts”, 2007, The Astrophysical Journal, 669, 1115-1129, 査読有
13. Urata, Y., Yamazaki, R. (他 23 名, 2 番目), “Testing the External Shock Model of GRBs using the Late-Time Simultaneous Optical and X-ray Afterglows”, 2007, The Astrophysical Journal Letters, 668, L95-L98, 査読有

14. Takami, K. (他 3 名, 2 番目), “Probing the Structure of GRB Jets with Steep Decay Phase of their Early X-ray Afterglows”, 2007, The Astrophysical Journal, 663, 1118-1124, 査読有
15. Doi, H., Takami, K., Yamazaki, R., “A Unified Model of the Prompt Optical Emission of GRBs”, 2007, The Astrophysical Journal Letters, 659, L95-L97, 査読有
16. Vink, J. (他 5 名, 6 番目), “The X-ray Synchrotron Emission of RCW 86 and the Implications for its Age”, 2006, The Astrophysical Journal Letters, 648, L33-L37, 査読有
17. Umeda, T., Yamazaki, R., “Full particle simulation of a perpendicular collisionless shock: A shock-rest-frame model”, 2006, Earth, Planets and Space, 58, e41-e44, 査読有
18. Yamazaki, R. (他 5 名, 1 番目), “TeV Gamma-Rays from Old Supernova Remnants”, 2006, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 371, 1975-1982, 査読有
19. Ioka, K. (他 3 名, 3 番目), “Efficiency crisis of Swift GRBs with shallow X-ray afterglows: prior activity or time-dependent microphysics?”, 2006, Astronomy & Astrophysics, 458, 7-12, 査読有
20. Toma, K. (他 3 名, 3 番目), “Shallow decay of Early X-ray Afterglows from Inhomogeneous Gamma-ray Burst Jets”, 2006, The Astrophysical Journal Letters, 640, L139-L142, 査読有
21. Yamazaki, R. (他 3 名, 1 番目), “Tail Emission of Prompt Gamma-Ray Burst Jets”, 2006, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 369, 311-316, 査読有

[学会発表] (計 20 件)

1. 山崎 了, 「X-ray plateau phase の起源について」, 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 2 回領域シンポジウム (2008 年 11 月 27 日-29 日, 国立天文台)

2. 山崎 了, 「On the Gamma-ray Spectrum of RX J1713.7-3946 in the Fermi era」, 高エネルギー宇宙物理学研究会 (2008 年 11 月 14 日-16 日, 天橋立 宮津ロイヤルホテル)
3. 山崎 了, 「超新星残骸 RX J1713.7-3946 のガンマ線スペクトル」, 日本天文学会 2008 年秋季年会 (2008 年 9 月 11 日-13 日, 岡山大学)
4. R. Yamazaki, “On the origin of TeV unidentified sources”, 37th COSPAR Scientific Assembly (July 13-20, 2008, Montreal, Canada)
5. R. Yamazaki, “Recent topics on particle acceleration at supernova remnants”, American Physical Society Special Conference (April 11-15, 2008, St Louis, USA)
6. R. Yamazaki, “Recent Progress on Theories of Particle Acceleration”, International Workshop on Advances in Cosmic Ray Science (March 17-19, 2008, Waseda University, Japan)
7. 山崎 了, 「Swift 時代の X-ray Flashes/X-ray-rich GRBs」, 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」 第一回領域シンポジウム (2008 年 1 月 21 日-23 日, 東京工業大学)
8. 山崎 了, 「銀河系内 TeV unID」研究会 「高エネルギー天体現象と粒子加速の理論 2007」, (2007 年 12 月 21 日-24 日, 大阪大学)
9. 山崎 了, 「天体プラズマの粒子加速の理論に関する最近の話題」, 日本天文学会 2007 年秋季年会 (2007 年 9 月 26 日-28 日, 岐阜大学)
10. R. Yamazaki, “On the Energy Partition in Astrophysical Collisionless Shocks”, Japan-Korea Mini-Workshop 2007 on Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas (April 5-6, 2007, Daejeon, Korea)
11. 山崎 了, 「古い超新星残骸からの TeV ガンマ線放射と TeV ガンマ線未同定天体」, 日本天文学会 2007 年春季年会 (2007 年 3 月 28 日-30 日, 東海大学)
12. 山崎 了, 「TeV ガンマ線未同定天体の起源について」, 高エネルギー宇宙物理連絡会 第 7 回研究会「高エネルギー宇宙物理学の将来計画」 (2007 年 3 月 12-14

日, 宇宙線研)

13. 山崎 了, 「A Unified Model of Prompt Optical Emission of GRBs」, 研究会「多波長・多モード連携観測で探る高エネルギー天体现象」(2007年3月1日-2日, 広島大学)
14. 山崎 了, 「TeV Gamma-rays from Old Supernova Remnants」, 研究会「多波長・多モード連携観測で探る高エネルギー天体现象」(2007年3月1日-2日, 広島大学)
15. R. Yamazaki, “Energy Partition at Shocks in Young Supernova Remnants”, Shock Formation under Extreme Environments in the Universe (February 20-22, 2007, TokyoTech, Japan)
16. 山崎 了, 「A Unified Model of Prompt Optical Emission of GRBs」, 基研研究会「ガンマ線バーストの新しいフロンティア」(2007年1月16日-18日, 京大基研)
17. R. Yamazaki, “TeV Gamma-rays from Old Supernova Remnants”, The Extreme Universe in the Suzaku Era (December 4-8, 2006, Kyoto, Japan)
18. 山崎 了, 「Origin of TeV unID Sources -Old Supernova Remnants?-」, 研究会「高エネルギー天体现象と粒子加速の理論」(2006年11月9日-11日, 大阪大学)
19. 山崎 了, 「古い超新星残骸からの TeV ガンマ線の放射」, 日本物理学会 2006年秋季大会(2006年9月20日-23日, 奈良女子大学)
20. 山崎 了, 「Particle simulation of collisionless shocks with a shock-rest-frame model. I」, 日本地球惑星科学連合 2006年大会(2006年5月14日-18日, 幕張メッセ)

[図書] (計1件)

1. 山崎 了, 福井康雄他編, 日本評論社, 「星間物質と星形成」, 2008年, p.101-p.125

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 了 (YAMAZAKI RYO)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 40420509

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者