

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247027

研究課題名(和文) 巨大口径望遠鏡を用いたGeVガンマ線観測による天体高エネルギー現象の解明

研究課題名(英文) Understanding high-energy phenomena through multi-GeV gamma-ray observations with H.E.S.S.

研究代表者

内山 泰伸 (UCHIYAMA, Yasunobu)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：00435801

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：大気チェレンコフ望遠鏡H.E.S.S.による地上からの超高エネルギーガンマ線観測とフェルミ衛星による全天ガンマ線サーベイ観測に、X線天文衛星による観測を組み合わせることで、高エネルギー粒子加速メカニズムの解明を進めた。特に粒子加速天体として注目される超新星残骸 RXJ1713.7-3946 を重点的に観測し、X線シェルよりも外側に広がるガンマ線の発見、膨張速度の測定、そしてシンクロトロンX線放射の硬X線撮像に成功するなどの成果を得た。

研究成果の概要(英文)：We have studied the acceleration mechanisms of high energy particles in various galactic objects such as supernova remnants, microquasars, pulsar winds, by combining very-high-energy (VHE) gamma-ray observations with the atmospheric Cherenkov telescope H.E.S.S., gamma-ray observations by the Fermi satellite, and X-ray observations. We focused on observations of the supernova remnant RXJ 1713.7-3946 which is one of the strongest gamma-ray sources on the VHE gamma-ray sky, and discovered gamma rays extending beyond the X-ray shell. Also we have measured the expansion rate of the remnant, and performed the first hard X-ray imaging using NuSTAR.

研究分野：高エネルギー天文学

キーワード：宇宙線 ガンマ線 超新星残骸 パルサー星雲 衝撃波統計加速

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ガンマ線観測技術の著しい向上により、ガンマ線天文学は近年、急速な発展を遂げた。その結果、宇宙線の起源の解明、宇宙における高エネルギー粒子の加速機構の研究、相対論的アウトフローの研究などが大きく進展し、天文学において重要な位置を占めつつある。

H.E.S.S.やMAGICなどの地上大気チェレンコフ望遠鏡によって140個以上のTeVガンマ線天体が発見され、2008年に打ち上げられたフェルミ衛星は60 MeVから300 GeVのエネルギー帯域を観測し、1800を超えるGeVガンマ線天体を検出した。

フェルミ衛星のガンマ線観測では、一般に、50 GeV程度以上のエネルギーでは検出器の有効面積に対して到来ガンマ線光子数が少ないことが問題になる。この問題を解決する手段として有望視されたのが、2012年に稼働したH.E.S.S.の28-m大口径望遠鏡(H.E.S.S.-II)である。我々はこれまで大気チェレンコフ望遠鏡では観測ができなかった100 GeV以下のGeVガンマ線をH.E.S.S.-IIが測定できることに注目した。

(2) 日本が主導して2015年に打ち上げる予定であった国際X線天文衛星ASTRO-Hは、X線マイクロカロリメータによって撮像精密X線分光に革新をもたらすことが期待された。例えば超新星残骸ではガンマ線放射天体のX線観測から、高エネルギー粒子の衝撃波加速と衝撃波加熱の関係を定量化することで、衝撃波統計加速理論の詳細な検証が可能になると期待された。

## 2. 研究の目的

(1) 国際H.E.S.S.コラボレーションに新たに参画し、時間変動天体に焦点をあてて、H.E.S.S.-II大口径望遠鏡とフェルミ衛星による観測を組み合わせ、活動銀河核やマイクロクエーサーの相対論的ジェット、そしてパルサー風の相対論的アウトフローにおける粒子加速の解明を進める。また、超新星残骸のガンマ線観測から宇宙線の起源の解明を進める。

(2) 前項の観測的研究を発展させるために、H.E.S.S.-IIの光検出器の光電子増倍管を高量子効率の新型に換装し、観測のエネルギー閾値をさらに下げる。

(3) ガンマ線放射天体について、多波長観測の一貫としてX線観測を推進する。特に国際X線天文衛星ASTRO-Hに搭載されるX線マイクロカロリメータによる撮像精密分光と硬X線ミラーによる硬X線撮像観測を実施する。X線・ガンマ線観測を有機的に連携させることで、高エネルギー粒子加速とガス・ダイナミクスを同時にプローブする。

## 3. 研究の方法

次のそれぞれの天体についてX線ガンマ線観測を推進する。

### (1) マイクロクエーサー

ガンマ線放射が明確に観測されたマイクロクエーサーとしてCyg X-3に着目し、ガンマ線放射の起源を探る。降着円盤の特定の状態、特に電波バーストを起こす直前の硬X線が弱く軟X線が強い状態、においてガンマ線フレアが検出されているので、その他の降着円盤の状態でのガンマ線検出を目指す。

### (2) 活動銀河核ジェット

エネルギー閾値を下げることによって高赤方偏移のブレーザーを検出できる可能性が拓ける。短時間変動の解析から相対論的ジェットの放射領域と放射メカニズム、そして中心巨大ブラックホールのサイズを制限する。PKS 2155-304ではTeVガンマ線放射の分スケールの時間変動がH.E.S.S.によって観測され、非常にコンパクトな放射領域が明らかになったが、本研究ではさらに秒スケールの時間変動を探索する。X線から軟ガンマ線にわたる広帯域高感度観測を実現するASTRO-H衛星との同時観測を行い、放射モデルを構築する。

### (3) 超新星残骸

H.E.S.S.-IIによる定常放射天体の100 GeV以下の観測では検出感度がバックグラウンドの系統誤差に支配されるが、統計誤差で制限されるフェルミ衛星と相補的な役割を果たすことができる。本研究では超新星残骸から「逃走」している宇宙線粒子が放射するガンマ線を探査し、まだ理解が進んでいない逃走宇宙線についての知見を得る。さらに電子陽子比を決定するため、フェルミ衛星の低エネルギーガンマ線の詳細解析を行い、制動放射成分を探査する。

### (4) パルサー星雲

宇宙線電子の加速源として注目されるパルサー星雲における粒子加速機構はよく理解されていない。かに星雲のガンマ線フレア時には、電子がPeVのエネルギーまで数時間のスケールで加速され、磁気リコネクションの役割が注目されている。本研究ではGeVガンマ線フレアに即応してH.E.S.S.望遠鏡による観測を行い、対応する時間変動を探査する。

## 4. 研究成果

大気チェレンコフ望遠鏡H.E.S.S.による地上からの超高エネルギーガンマ線観測と、フェルミ衛星による全天GeVガンマ線サーベイ観測により、高エネルギー粒子加速メカニズムの解明を進めてきた。また、粒子加速現象を包括的に理解することを目指して、X線衛星による天体観測をガンマ線観測と組み合

わせ、多波長観測を推進している。そして将来的に H. E. S. S. 望遠鏡光検出器を改良することを目指した基礎研究として、高い量子効率を持つスーパーバイアルカリ光電子増倍管の特性評価を進めた。以下に本研究で得られた主要成果についてまとめる。

#### (1) マイクロキューサーの観測的研究

Cyg X-3 のフェルミ衛星による 8 年に渡る観測データを詳細に解析した。角度分解能に対して Cyg X-3 から十分に離れていないパルサー (PSR J2032+4127) の影響を除去するためにオフパルス解析を行ない、今までに検出されていなかった小フレアのガンマ線検出に成功した。また、スペクトル解析から、ガンマ線放射機構がパイ中間子崩壊ガンマ線ではなく、逆コンプトン散乱であることを示した。

#### (2) 活動銀河核ジェットの観測的研究

フェルミ衛星で観測されたブレーザーの短時間変動の結果から、内部衝撃波モデルによってジェットの放射機構に制限を与えた。ジェット開口角と放射領域の位置に制限を与えて、放射領域が中心大質量ブラックホールから 0.3-3pc 程度に位置することを示す結果を得た。

#### (3) 超新星残骸の観測的研究

①ガンマ線放射が卓越している超新星残骸として有名な RXJ1713.7-3946 における粒子加速の研究を進めるため、H. E. S. S. 望遠鏡による長時間観測と X 線観測を組み合わせる共同研究を推進した。その結果、X 線放射より外に広がったガンマ線放射を発見する成果をあげた(我々のグループは主に X 線解析を担当)。これは超新星残骸シェルから脱出する宇宙線の兆候を捉えた可能性として注目されている。またチャンドラ衛星による X 線観測からは、衝撃波速度の測定に成功し、力学的進化について新しい制限を得て、RX J1713.7-3946 がセドフ期に移行していない可能性を示した。そして NuSTAR 衛星を用いて硬 X 線撮像観測をはじめて実施し、10 keV 以上の硬 X 線帯域での撮像観測に成功した。広帯域のシンクロトロン X 線放射スペクトルを空間分解して測定することで、衝撃波加速についての新しい制限を与えることができた。

②超新星残骸 Vela Jr のフェルミ衛星による観測データの解析を行ない、H. E. S. S. 望遠鏡による TeV ガンマ線の強度分布と同様にシェル部分からガンマ線が強く放射されていることを確認した。フェルミチームが用意した銀河面放射モデルに修正が必要であることが判明した。修正モデルを用いてガンマ線スペクトルを測定し、逆コンプトン散乱起源であることを示唆する結果を得た。

③熱的 X 線が支配的なセドフ期の SNR である Puppis A の GeV ガンマ線データ解析を進めた。

超新星残骸における宇宙線加速の効率 SNR の年齢とともに変化し、衝撃波が伝播する媒質の物理状態にも影響を受ける。特に分子雲との相互作用は GeV ガンマ線の強度を高くする一方で、系が複雑になるため衝撃波加速理論の検証を困難にする。Puppis A のように分子雲と相互作用をせず、空間分解可能な SNR は加速理論を検証するうえで重要な役割を果たしうる。フェルミチームによる Puppis A の GeV ガンマ線解析の結果、スペクトルは光子指数が 2.1 の単純なべき関数であると示されたが、H. E. S. S. 望遠鏡による TeV ガンマ線観測では Puppis A からのガンマ線は検出されず、高エネルギー側にスペクトルのカットオフあるいは折れ曲がりが存在すると考えられている。

我々はフェルミ衛星による約 8 年分の観測データを使用し、Puppis A から放射される GeV ガンマ線を詳細に解析した。先行研究に比べて光子統計が向上したことで、GeV ガンマ線と熱的 X 線に強い空間相関があることが示された。さらに GeV ガンマ線の強度は X 線強度の平方根に比例することがわかった。また、ガンマ線スペクトルは単純なべき関数ではなく、折れ曲がりを持つスペクトル形状を持つことがわかった。SNR に今回はじめて見出された熱的 X 線とガンマ線の空間相関が、衝撃波統計加速の検証の新たな手段となることを示した。

#### 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 44 件)

① H. E. S. S. Collaboration (Berge, D.; Eger, P; Aharonian, F.; Uchiyama, Y., et al.)

H. E. S. S. observations of RX J1713.7-3946 with improved angular and spectral resolution; evidence for gamma-ray emission extending beyond the X-ray emitting shell

Astronomy and Astrophysics 印刷中, 査読有り

② Katsuta, J; Uchiyama, Y; Funk, S, Extended Gamma-ray Emission from the G25.0+0.0 Region: Star Forming Region Powered by the Newly-Found OB Association? The Astrophysical Journal, 印刷中, 査読有り

③ H. E. S. S. Collaboration (Aharonian, F; Berge, D.; Uchiyama, Y., et al.)

Gamma-ray blazar spectra with H. E. S. S. II mono analysis: The case of PKS 2155-304 and PG 1553+113

Astronomy and Astrophysics, 600, id.A89

(2017) 査読有り

④ H. E. S. S. Collaboration (Aharonian, F.; Berge, D.; Uchiyama, Y., et al.)

First limits on the very-high energy gamma-ray afterglow emission of a fast radio burst. H. E. S. S. observations of FRB 150418. *Astronomy and Astrophysics*, 597, id. A115 (2017) 査読有り

⑤ Tsuji, N.; Uchiyama, Y.,

Expansion measurements of supernova remnant RX J1713.7-3946, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, 6, id.108 (2016) 査読有り

⑥ Hampton, E.; Rowell, G.; Hofmann, W.; Horns, D.; Uchiyama, Y.; Wagner, S.

Chandra observations of the HII complex G5.89-0.39 and TeV gamma-ray source HESS J1800-240B

DOI: [10.1016/j.jheap.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jheap.2016.05.001)

*Journal of High Energy Astrophysics*, 11, 1-19 (2016) 査読有り

⑦ Fermi-LAT Collaboration (Acero, F.; Uchiyama, Y. et al.)

The First Fermi LAT Supernova Remnant Catalog

DOI: [10.3847/0067-0049/224/1/8](https://doi.org/10.3847/0067-0049/224/1/8)

*The Astrophysical Journal Supplement Series*, 224, 1, id. 8 (2016) 査読有り

[学会発表] (計 27 件)

① 辻直美, 内山泰伸, 勝田哲, David Berge, Felix Aharonian

NuSTAR 衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7-3946 の観測結果

日本天文学会春季年会, 九州大学 (福岡県・福岡市), 2017年3月15-18日 口頭発表

② Uchiyama, Y.,

Gamma Rays from Supernova Remnants, Cosmic Ray Origin - Beyond the Standard Models, San Vito di Cadore (Italy), September 19-22 (2016) 招待講演

③ Tsuji, N.; Uchiyama, Y.; Katsuda, S.; Berge, D.; Aharonian, F.

Chandra and NuSTAR observations of SNR RXJ1713.7-3946

6<sup>th</sup> International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy, Heidelberg, Germany, July 11-15 (2016) 口頭発表

④ Saito, S.; Khangulyan, D.; Hagiwara, K.; Uchiyama, Y.,

GeV gamma-ray emission from PWN N157B powered by PSR J0537-6910

6<sup>th</sup> International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy, Heidelberg, Germany, July 11-15 (2016) 口頭発表

⑤ 内山泰伸

Fermi ガンマ線観測による宇宙線起源研究, 日本物理学会秋季大会シンポジウム: 宇宙線起源の解明にむけた新展開, 大阪市立大学 (大阪府・大阪市), 2015年9月28日 招待講演

⑥ 齊藤新也, L. Stawarz, 田中康之, 高橋忠幸

ガンマ線短時間変動のモデル化による活動銀河核ジェットの放射への制限

日本天文学会秋季年会, 甲南大学 (兵庫県・神戸市), 2015年9月9-11日 口頭発表

⑦ 辻直美, 荒川真範, 内山泰伸

チャンドラ衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7-3946 の膨張測定

日本天文学会秋季年会特別セッション: ガンマ線天文台 CTA で切り拓く次世代の高エネルギー天文学, 甲南大学 (兵庫県・神戸市), 2015年9月9-11日 口頭発表

⑧ Uchiyama, Y.,

Synergies between X-ray and Gamma-ray Observations of Cosmic Accelerators, Athena Science Conference, European Space Astronomy Centre, Madrid (Spain), September 8-10 (2015) 招待講演

⑨ Uchiyama, Y.,

High Energy and Very High Energy Gamma-rays from Galactic Particle Accelerators,

Symposium on Frontiers of Fundamental Physics 2014, Marseille (France), July 15-18 (2014) 招待講演

[その他]

ホームページ等

[http://www2.rikkyo.ac.jp/web/y\\_uchiyama/index.html](http://www2.rikkyo.ac.jp/web/y_uchiyama/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内山 泰伸 (UCHIYAMA, Yasunobu)

立教大学・理学部物理学科・教授

研究者番号: 00435801

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

高橋 忠幸 (TAKAHASHI, Tadayuki)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・

教授

研究者番号：50183851

(4)研究協力者

ドミトリー カングリヤン (KHANGULYAN,  
Dmitry)

立教大学・先端科学計測研究センター・研究  
員

フェリックス アハロニアン (AHARONIAN,  
Felix)

マックスプランク核物理研究所・教授

ダビッド バーヂ (BERGE, David)

アムステル大学・准教授