

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05443

研究課題名(和文) 新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線観測手法の確立

研究課題名(英文) An establishment of new technique to observe ultra-high energy cosmic rays with new-type fluorescence telescopes

研究代表者

藤井 俊博 (Fujii, Toshihiro)

京都大学・白眉センター・特定助教

研究者番号：50706877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の宇宙線観測実験を目指した開発研究として、直径1.6 mの複合鏡と4本の大口径光電子増倍管(直径20 cm)からなる低コスト型の新型大気蛍光望遠鏡を製作した。この望遠鏡を、米国ユタ州で稼働中の宇宙線観測実験であるテレスコープアレイ実験サイトに3基設置し、日本からの遠隔操作によって到来する極高エネルギー宇宙線の2年間の定常観測を実施した。得られた測定データの解析により、テレスコープアレイ実験の大気蛍光望遠鏡と新型大気蛍光望遠鏡の両方で同時観測された宇宙線事象や紫外線レーザー光源を使って、新型大気蛍光望遠鏡が宇宙線を捉える性能を持つことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極高エネルギー宇宙線は宇宙空間で最も高いエネルギーを有する宇宙線であり、その起源には宇宙空間における極限物理現象が深く関連していると推測されているが、その起源および加速機構は全く明らかになっていない。本研究では、極高エネルギー宇宙線への感度を10倍に増やすため、極高エネルギー宇宙線観測に特化し、必要最低限な機能のみを実装した低コスト型の新型大気蛍光望遠鏡を開発している。将来計画では、この低コスト型の望遠鏡を広範囲に展開することで極高エネルギー宇宙線の年間観測事象数を10倍に増やし、宇宙空間最大の加速機構の解明を目指す。

研究成果の概要(英文)：For the sake of a development for next-generation observatories to detect ultrahigh-energy cosmic rays, we constructed an economical and simplified fluorescence detector consisting of a segmented mirror in a diameter of 1.6 m and four 20-cm photomultiplier tubes at its focal plane. Total three telescopes have been installed at the Telescope Array site in Utah, USA. The stable observation was established via remote controlling from Japan. In data analysis, we clarified a performance of new fluorescence detectors using cosmic-ray events and vertical ultraviolet lasers in a time coincidence between Telescope Array fluorescence detectors and new ones.

研究分野：宇宙線観測

キーワード：宇宙線 極高エネルギー 空気シャワー 大気蛍光 テレスコープアレイ実験 FAST実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間に存在する高エネルギーの陽子や原子核(宇宙線)は、 10^{10} 電子ボルト(以下 eV)からエネルギーのべき乗に従って減少し、 10^{20} eV まで延びているエネルギースペクトルを持つ。 10^{20} eV を越える極高エネルギー宇宙線は宇宙空間において最も高いエネルギーを持つ粒子であり、そのエネルギーは世界最大の粒子加速器の到達可能なエネルギーよりも7桁も大きい。そのためこの巨視的なエネルギーを持つ宇宙線は、ガンマ線バーストや活動銀河核といった爆発的な宇宙極高事象によって加速されているか、または超重粒子の崩壊や宇宙初期の残骸である位相欠陥の崩壊といったエキゾチックな物理を起源に持つと考えられている。しかし、現在までの観測では極高エネルギー宇宙線の起源・加速機構についての決定的な証拠は得られていない。

宇宙線の到来頻度はエネルギーとともに急激に減少するため、極高エネルギー宇宙線は年間 100 km^2 あたり 1 粒子と非常に少ない。そのため起源解明には、極端に到来頻度が少ない極高エネルギー宇宙線を数多く観測することが重要である。この目的達成のため、北半球で 700 km^2 の検出面積を持つテレスコープアレイ実験(Telescope Array Experiment 以下 TA)、南半球で $3,000 \text{ km}^2$ を有するピエールオージュ観測所(Pierre Auger Observatory, 以下 Auger)が南北で定常観測を続けている。しかし、現在までの測定では TA、Auger とともに近傍天体と極高エネルギー宇宙線の到来方向の強い相関はみられず、また等方的とも主張できない結果となっており、起源解明のための統計量が不足していることは明らかである。

そのため次世代の宇宙線観測実験では一桁大きい有効検出面積を達成し、起源解明へ十分な統計量で極高エネルギー宇宙線を観測することが必要である。さらには、宇宙線が極高エネルギー領域まで加速されたときに生成される極高エネルギーのニュートリノやガンマ線といった中性粒子の初検出も重要である。なぜなら、もし極高エネルギー領域の中性粒子が観測されたとすると、磁場で曲げられないためにその到来方向は極高エネルギーへの加速機構が存在する決定的な証拠となり、起源解明への大きな近道となるためである。現在、TA と Auger で使われている大気蛍光望遠鏡は、中性粒子に対する感度も高いが Auger の 10 倍である $30,000 \text{ km}^2$ の有効検出面積へ拡張することは予算の面から現実的ではない。将来の大型宇宙線観測実験を実現させるために極端に簡素化、最適化した新型大気蛍光望遠鏡を開発し、その観測手法の確立が喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では現在より 1 桁大きい有効検出面積を将来計画で実現するため、極高エネルギー宇宙線と同様にニュートリノやガンマ線への感度が高い、次世代の大規模宇宙線観測実験の基盤となる極高エネルギー宇宙線観測に特化した新型大気蛍光望遠鏡を製作し、定常的な観測運用および解析手法を確立する。

3. 研究の方法

小型の複合鏡(直径 1.6 m)と 4 本の大口径光電子増倍管(直径 20 cm)を用いた新型大気蛍光望遠鏡を製作する。この新型大気蛍光望遠鏡 3 基を TA の観測サイトである米国ユタ州に設置し、仰角 30 度と方位角 90 度を視野に持つ検出器を設置する。その後日本からの遠隔操作方法を確立し、新型大気蛍光望遠鏡を使った極高エネルギー宇宙線観測の定常観測を実施する。その後、検出器の安定運用と平行して測定データの解析手法を開発し、TA と同時観測された極高エネルギー宇宙線情報の比較や紫外線垂直レーザーや較正用光源を観測することによって検出器の理解を進める。その後、定常観測で得られたデータを解析することで、新型大気蛍光望遠鏡の開発、較正、定常観測そして解析までの包括的な手法を確立する。

4. 研究成果

2016 年から 2018 年までの 3 年間に、米国ユタ州にある TA サイトに新型大気蛍光望遠鏡を合計 3 基の望遠鏡を設置し、到来する極高エネルギー宇宙線の観測を開始した。図 1 に、設置した 3 基の新型大気蛍光望遠鏡を示す。この 3 基の望遠鏡を合わせた視野角は仰角 30 度と方位角 90 度であり、併設されたテレスコープアレイ大気蛍光望遠鏡ステーションの視野角の 80%に相当する。これらの望遠鏡は日本からの遠隔操作によって定常観測を続けており、2019 年 3 月までに累計 515 時間の夜間観測時間を達成した。

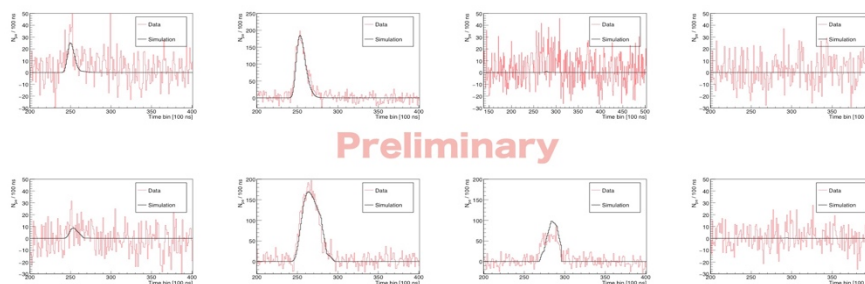
図 1. テレスコープアレイ観測サイトに設置した 3 基の新型大気蛍光望遠鏡。日本からの遠隔操作により定常観測を続けている



図2は、新型大気蛍光望遠鏡で計測された 10^{19} eVを越える極高エネルギー宇宙線からの信号の波形（ヒストグラム）とシミュレーションにより計算された信号の期待値（実線）を示す。新型大気蛍光望遠鏡はテレスコープアレイ実験の大気蛍光望遠鏡から外部トリガーを得てデータ収集を行っており、さらには同方向の視野を持つため、到来する宇宙線を双方の望遠鏡で同時観測できる。また、新型大気蛍光望遠鏡で得られた波形をもっともよく再現する宇宙線の到来方向およびエネルギーを推定する新たな再構成手法（Top-down reconstruction）を新たに実装し、新型大気蛍光望遠鏡単独で一次宇宙線のエネルギーおよび粒子種に感度の高い最大発達深さ（ X_{max} ）の再構成が可能となった。この解析によって、この宇宙線のエネルギーは 1.7×10^{19} eVと推定でき、テレスコープアレイ大気蛍光望遠鏡の解析結果と誤差の範囲内で一致していることを確かめた。

これらの成果によって、本研究の目的である新型大気蛍光望遠鏡の開発、較正、定常観測そして測定データ解析を達成し、新型大気蛍光望遠鏡による宇宙線の観測手法を確立した。

図2. 新型大気
蛍光望遠鏡で観
測された極高エ
ネルギー宇宙線
事象



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. “The full-scale prototype for the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii (1/19) et al., Proc. of 2016 International Symposium for Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2016), Kyoto, Japan, JPS Conf. Proc. 19, 011047 (2018), 査読有り, DOI: [10.7566/JPSCP.19.011047](https://doi.org/10.7566/JPSCP.19.011047)
2. “The prototype opto-mechanical system for the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, D. Mandat, T. Fujii (9/19) et al., Journal of Instrumentation 12, T07001 (2017), 査読有り, DOI: [10.1088/1748-0221/12/07/T07001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/T07001)
3. “The FAST Project - A Next Generation UHECR Observatory”, T. Fujii et al., Roma International Conference on Astroparticle Physics (RICAP 2016), EPJ Web of Conferences 136, 02015 (2017), 査読有り DOI: [10.1051/epjconf/201713602015](https://doi.org/10.1051/epjconf/201713602015)
4. “First results from the full-scale prototype for the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii for the FAST Collaboration, Proc. of 35th International Cosmic Ray Conference, Busan, South Korea, PoS (ICRC2017) 468 (2017), 査読無し, DOI: [10.22323/1.301.0468](https://doi.org/10.22323/1.301.0468)
5. “Detection of ultra-high energy cosmic ray showers with a single-pixel fluorescence telescope”, T. Fujii (1/20, Corresponding author) et al., Astroparticle Physics, 74, pp64-72 (2016), 査読有り, DOI: [10.1016/j.astropartphys.2015.10.006](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2015.10.006)
6. “Development of a prototype for the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii (1/20) et al., Proc. of International Symposium for Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2014) Springdale, USA, JPS Conf. Proc. 9, 010017 (2016), 査読有り, DOI: [10.7566/JPSCP.9.010017](https://doi.org/10.7566/JPSCP.9.010017)
7. “First results from a prototype of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii (1/20) et al., Proc. of 34th International Cosmic Ray Conference (Hague, Netherlands), PoS (ICRC2015) 323 (2015), 査読無し DOI: [10.22323/1.236.0323](https://doi.org/10.22323/1.236.0323)

[学会発表] (計 22 件)

1. 「FAST 実験 7：新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線観測報告」
藤井俊博 他 FAST Collaboration, 口頭発表, 2019年3月15日, 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学
2. “Highlights from ultrahigh-energy cosmic ray measurements and the next-generation observatory: the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)”, T. Fujii, INR Seminar, Institute for Nuclear Physics, Moscow, Russia, October 25

(2018)

3. “A next-generation ground array for the detection of ultrahigh-energy cosmic rays: the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)”, T. Fujii for the FAST Collaboration, Invited Talk, Ultra High Energy Cosmic Ray 2018, Paris, France, October 12 (2018)
4. 「FAST 実験 6: 新型大気蛍光望遠鏡による観測報告とピエールオージェ観測所への設置計画」, 藤井俊博, 他 FAST Collaboration, 口頭発表, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 信州大学, 2018 年 9 月
5. “A next-generation ground array for ultrahigh-energy cosmic rays: Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)”, T. Fujii for the FAST Collaboration, Oral, TeV Particle Astrophysics 2018 (Berlin, Germany), August 28 (2018)
6. “Future ground arrays for ultrahigh-energy cosmic rays: recent updates and perspectives”, T. Fujii, Invited Talk, 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Nagoya, Japan, May 25 (2018)
7. 「大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線スペクトルの研究」, 藤井俊博, 日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演, 東京理科大学, 2018 年 3 月
8. 「FAST 実験 5: 新型大気蛍光望遠鏡の遠隔運用と宇宙線観測報告」, 藤井俊博, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 宇都宮大学, 2017 年 9 月
9. “First results from the full-scale prototype for the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii for the FAST Collaboration, Oral, 35th International Cosmic Ray Conference (Busan, South Korea), July 17 (2017)
10. 「FAST 実験 4: 新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線観測報告」, 藤井俊博, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月
11. “The full-scale prototype for the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii (1/20) et al., Poster Contribution, 2016 International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR 2016), Kyoto, Japan, October 11 (2016)
12. 「FAST 実験 3: 新型大気蛍光望遠鏡の試験観測報告」, 藤井俊博, 日本物理学会 2016 年秋季大会 宮崎大学, 2016 年 9 月
13. “Cosmic rays and Cosmic ray Air-Shower Detectors”, T. Fujii, Invited Talk, Recent Discoveries in Particle and Astroparticle Physics, Special Lectures for SKKU physics 2016 (Suwon, South Korea), August 9 (2016)
14. “The FAST project - Next Generation UHECR Observatory -”, T. Fujii, Oral, Roma International Conference on Astroparticle Physics (Frascati, Italy), June 23 (2016)
15. “Future Prospects on UHECR and UHE Photon”, T. Fujii, Invited Talk, Multi-messenger Approaches to Cosmic Rays: Origin and Space Frontiers (State College, USA), June 20 (2016)
16. 「FAST 実験 2: 新型大気蛍光望遠鏡の性能評価」, 藤井俊博, 日本物理学会 第 71 回年次大会 東北学院大学, 2016 年 3 月
17. “Next-Generation Observatory: Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii, Invited Talk, Next-Generation Technique for UHE Astroparticle Physics 2016 (Chicago, USA), February 29 (2016)
18. “UHECR Astrophysics: Present and Perspectives”, T. Fujii, Invited Talk, Kavli Institute for Cosmological Physics Postdoc Symposium, February 19 (2016)
19. “Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) project”, T. Fujii for the FAST Collaboration, Oral, TeV Particle Astrophysics 2015 (Kashiwa, Japan), October 29 (2015)
20. 「FAST 実験 1: 全体計画と新型大気蛍光望遠鏡の開発」, 藤井俊博, 日本物理学会 2015 年秋季大会 大阪市立大学, 2015 年 9 月
21. “First results from a prototype of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes”, T. Fujii et al., Oral, 34th International Cosmic Ray Conference (Hague, Netherlands), August 4 (2015)

[その他]

ホームページ等

FAST 実験「極高エネルギー宇宙線天文学への挑戦」<https://www.fast-project.org>

6. 研究組織