

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01225

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の系統誤差の研究

研究課題名(英文) A study of systematic uncertainties on ultrahigh-energy cosmic ray observation using new fluorescence detector

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) 11,100,000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の製作を進めている。本研究では、現在南北半球それぞれで稼働中の極高エネルギー宇宙線観測実験であるテレスコープアレイ実験とピエールオージェ観測所の系統誤差を調べるため、双方の実験サイトに同型の新型大気蛍光望遠鏡を設置し、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定常観測を開始した。これまでの観測運用の中で、設置した望遠鏡によって極高エネルギー宇宙線から期待通りの信号の検出を達成することができた。

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持つ粒子であり、その起源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、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、新型の大気蛍光望遠鏡を開発している。その望遠鏡は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望遠鏡となっている。本研究は、この低コスト型の望遠鏡を現在南北半球それぞれで稼働中の宇宙線観測装置に設置することで、双方の実験の系統誤差を検証する計画である。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of a development for the next-generation observatories of ultrahigh-energy cosmic rays, we developed new economical fluorescence telescope consisting of a segment mirror in 1.6 m diameter and four large photomultiplier tubes in 20 cm diameter. To investigate the systematic uncertainties between the Telescope Array Experiment and the Pierre Auger Observatory, which are currently operating in the northern and southern hemispheres, respectively, we installed the identical fluorescence telescope at both experiment sites and started the steady operation to detect ultrahigh-energy cosmic rays by a remote control from Japan. Observations of extremely high-energy cosmic rays were started by remote control from Japan. In the operation thus far, we have accomplished the expected signal detection from the ultrahigh-energy cosmic rays by the installed telescopes.

研究分野：宇宙線観測

キーワード：宇宙線 空気シャワー 大気蛍光 エネルギースペクトル 質量組成 FAST テレスコープアレイ実験
ピエールオージェ観測所

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙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のべき乗に沿って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。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に、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) と、南半球で $3,000 \text{ km}^2$ を有するピエールオージェ観測所 (Pierre Auger Observatory, 以下 Auger) が南北でそれぞれ定常観測を続けている。

宇宙線起源を解明する上で重要な測定として、エネルギースペクトルと質量組成が挙げられる。TA と Auger で測定されたエネルギースペクトルは、単純なべき関数ではなく折れ曲がり構造と、宇宙背景放射との相互作用から期待されるカットオフ構造を持つ。しかし、系統的なスペクトル全体のずれを補正しても、 $10^{19.0}$ eV 以上で TA と Auger のスペクトルに違いが見られている。もし仮にこのエネルギースペクトルの違いがエネルギー推定から由来するものだとすると、 $10^{19.7}$ eV で 35% のエネルギー推定の差に相当するが、この違いの成因はこれまで明らかになっていない。一方、質量組成は、極高エネルギー宇宙線が大気分子との相互作用によって生成される二次粒子（空気シャワー）の粒子数が最大になる大気深さ (X_{max}) によって推定できる。測定された X_{max} は TA では軽い組成と一致した結果を示し、Auger では $10^{18.5}$ eV 以上で陽子より重い原子核に遷移していく結果が報告されている。これらのエネルギースペクトルおよび質量組成が北半球と南半球で本当に異なっているのか、もしくは観測機器や解析手法に起因する何かであるかを検証することが、極高エネルギー宇宙線観測分野の喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、TA と Auger の双方の観測サイトに小型（直径 1.6 m）の光学系と 4 本の大口径光電子増倍管（直径 20 cm）からなる新型大気蛍光望遠鏡を設置し、双方のサイトで宇宙線の定常観測を実施し、同型の検出器によって実験間の系統誤差を検証する。本研究で使用する新型大気蛍光望遠鏡は、極高エネルギー宇宙線への感度を飛躍的に高める将来計画 (Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes, 以下 FAST) の開発研究を兼ねている。FAST とは、20 km 間隔でこの新型大気蛍光望遠鏡を 500 地点に設置し、現在の TA の有効検出面積を 50 倍にまで向上させる計画である。本研究は、この将来計画の実現可能性を確認するための技術実証としても位置づけられている。同型の望遠鏡によって TA と Auger の大気蛍光望遠鏡の解析結果を検証することは、複雑な構造を持つ TA および Auger の大気蛍光望遠鏡の検出器特性を理解し、さらには、エネルギーおよび質量組成に感度が高い X_{max} の推定に対する系統誤差をまとめて検証できる唯一の方法となっている。

3. 研究の方法

本研究では TA と Auger に同型の新型大気蛍光望遠鏡を設置し、次世代実験を見据えた技術実証を実施しつつ、両実験のエネルギーと X_{max} 測定の系統誤差を検証する。新型大気蛍光望遠鏡の特性を理解するため、TA では地球大気に入射した極高エネルギー宇宙線が大気中で発する紫外線蛍光を擬似的に生成できる電子線形加速器を使い、新型大気蛍光望遠鏡の光学系・光電子増倍管の応答・大気蛍光発光効率を一括較正する。また 21 km 離れた遠方で 30 分毎に射出される紫外線垂直レーザー光を測定することで、大気透明度を測定する。

研究方法としては TA で新型大気蛍光望遠鏡の定常観測を継続しながら、Auger に同一の新型大気蛍光望遠鏡を設置する。今回設置した新型大気蛍光望遠鏡で収集された波形情報から、宇宙線の到来方向と縦方向発達を一括で再構成する手法を開発し、エネルギーと X_{max} を推定する。開発した解析結果と通常の大気蛍光望遠鏡で解析されるエネルギーと X_{max} の再構成結果を比較することで、エネルギーと X_{max} の系統誤差を調べる。

4. 研究成果

米国ユタ州の TA サイトにこれまでに設置した合計 3 基の新型大気蛍光望遠鏡を日本からの遠隔操作によって運用し、到来する極高エネルギー宇宙線の定常観測を実施した。2019 年には 1 基目の新型大気蛍光望遠鏡を Auger サイトに設置し、宇宙線観測を開始した。図 1 には、TA と Auger サイトに設置した合計 4 基の新型大気蛍光望遠鏡である。Auger サイトに設置した望遠鏡も、日本からの遠隔操作によって宇宙線の観測を続けている。



図 1 TA と Auger に設置した合計 4 基の新型大気蛍光望遠鏡

図 2 は、新型大気蛍光望遠鏡で計測された 21 km 遠方で射出された紫外線垂直レーザー信号と、全天カメラによって撮像された雲モニター用の画像を示す。シミュレーションから期待される信号を概ね一致しており、望遠鏡の特性を理解できていることが分かる。また信号波形の形から大気透明度を推定することができ、全天カメラの画像と照らし合わせることで雲量の推定もでき、現地の天候状態を把握できるシステムを構築した。

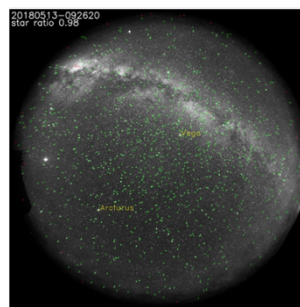
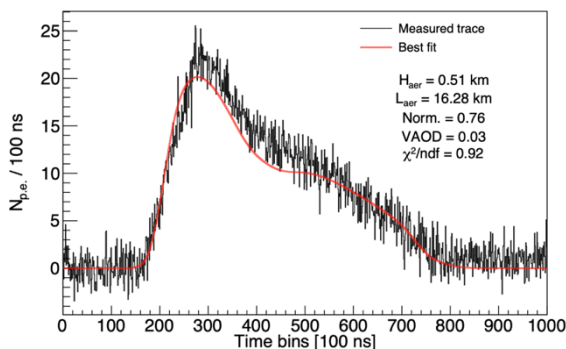


図 2 新型大気蛍光望遠鏡で検出された 21 km 先の紫外線垂直レーザー信号(左)と全天カメラで撮像された写真(右)

新型大気蛍光望遠鏡は TA 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、それぞれの望遠鏡は同じ方向に視野を持つため、到来する宇宙線を双方の望遠鏡で同時観測できる。図 3 左は TA 大気蛍光望遠鏡で観測された宇宙線事象のエネルギーと距離を示しており、それらの宇宙線のうち新型大気蛍光望遠鏡で有意な信号を持つものを表した。この中で 10^{18} eV 以上の 2 本以上の光電子増倍管に信号を持つイベントのみを抽出し、新型大気蛍光望遠鏡による解析を実施した。解析手法は、新型大気蛍光望遠鏡で得られた波形を最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を実装した。この手法によって得られたエネルギーと X_{max} の推定結果を図 3 右に示し、TA 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明らかにした。

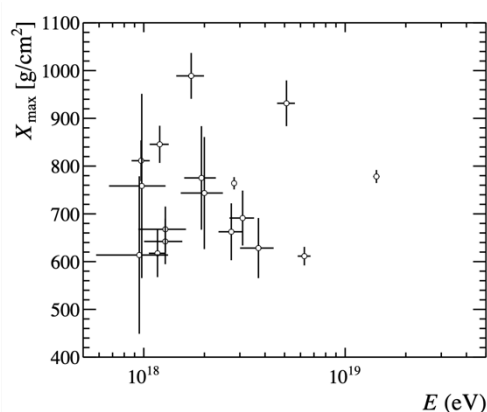
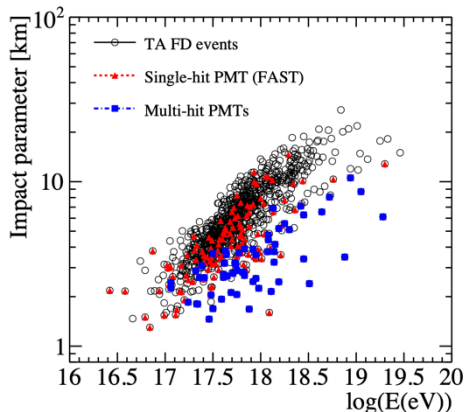


図 3 左図は TA 大気蛍光望遠鏡で検出した宇宙線のエネルギーと宇宙線までの距離を示し、新型大気蛍光望遠鏡で有意な信号が同時検出された光電子増倍管の本数を示す (0 本が丸、1 本は三角、2 本以上は四角)。右図は、新型大気蛍光望遠鏡で解析したエネルギーと X_{max} の解析結果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chytka L., Mandat D., Albury J., Bellido J.A., Farmerh J., Fujii T., Hamal P., Horvath P., Hrabovsky M., Kvita J., Malacari M., Mastrodicasa M., Matthews J.N., Michal S., Ni X., Nozka L., Palatka M., Pech M., Privitera P., Schovaneck P., Salamida F., Smida R., Thomas S.B., Travnicek P., Vacula M.	4. 巻 15
2. 論文標題 An automated all-sky atmospheric monitoring camera for a next-generation ultrahigh-energy cosmic-ray observatory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 T10009 ~ T10009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/10/t10009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Malacari M., Farmer J., Fujii T., Albury J., Bellido J.A., Chytka L., Hamal P., Horvath P., Hrabovsk? M., Mandat D., Matthews J.N., Nozka L., Palatka M., Pech M., Privitera P., Schov?nek P., ?m?da R., Thomas S.B., Travnicek P.	4. 巻 119
2. 論文標題 The first full-scale prototypes of the fluorescence detector array of single-pixel telescopes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102430 ~ 102430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2020.102430	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Abbasi R. U., Abe M., Abu-Zayyad T., Allen M., Azuma R., Barcikowski E., Belz J. W., Bergman D. R., Blake S. A., Cady R., Cheon B. G., Chiba J., Chikawa M., Matteo A. di, Fujii T., et al. (Telescope Array Collaboration)	4. 巻 898
2. 論文標題 Search for Large-scale Anisotropy on Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L28 ~ L28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aba0bc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Fujii et al.	4. 巻 19
2. 論文標題 The full-scale prototype for the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.19.011047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Fujii et al.	4. 巻 ICRC2019
2. 論文標題 Observing ultra-high energy cosmic rays with prototypes of Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) in both hemispheres	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 36th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0259	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計13件(うち招待講演 4件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Toshihiro Fujii
2. 発表標題 Overview and Summary: Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives
3. 学会等名 YITP Workshop: Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshihiro Fujii
2. 発表標題 Extragalactic cosmic ray observations
3. 学会等名 International Research Network Extragalactic Astrophysics and Cosmology (NECO) Online Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井俊博
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fujii
2. 発表標題 A next-generation ground array for the detection of ultrahigh-energy cosmic rays: the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)
3. 学会等名 Ultra High Energy Cosmic Ray 2018, Paris, France, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井俊博
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会，信州大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fujii
2. 発表標題 A next-generation ground array for ultrahigh-energy cosmic rays: Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST)
3. 学会等名 TeV Particle Astrophysics 2018, Berlin, Germany (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fujii
2. 発表標題 Future ground arrays for ultrahigh-energy cosmic rays: recent updates and perspectives
3. 学会等名 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Nagoya, Japan, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fujii
2. 発表標題 Observing ultra-high energy cosmic rays with prototypes of the Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) in both hemispheres
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference, Madison, WI, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井俊博
2. 発表標題 FAST実験8：新型大気蛍光望遠鏡による南北半球での 極高エネルギー宇宙線観測報告
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井俊博
2. 発表標題 FAST実験9：新型大気蛍光望遠鏡による南北半球での 極高エネルギー宇宙線観測と同一光源による較正
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Seokhyun Yoo
2. 発表標題 FAST実験10：南北半球での新型大気蛍光望遠鏡による最高エネルギー宇宙線観測
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Seokhyun Yoo
2. 発表標題 FAST実験11：新型大気蛍光望遠鏡の観測報告と光電子増倍管の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺内健太
2. 発表標題 新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の観測状況及び波形収集回路の開発
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 YITP Workshop: Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives	開催年 2020年～2020年
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
チェコ	光学研究所			
米国	シカゴ大学			
オーストラリア	アデレード大学			