

## 令和 4 年度 (2022) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：宇宙線望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の研究 英文：Study of Extremely-high Energy Cosmic Rays by Telescope Array
研究代表者	東京大学宇宙線研究所：佐川宏行
参加研究者	大阪公立大学：常定芳基、藤井俊博、有村龍平、岩崎葵、古前老朗、敷田淳；大阪電気通信大学：多米田裕一郎、西尾瑛司、佐藤聖真、高木勇太郎、(岩上拓生、上野 愛莉、片山 智貴、楠森優貴、小林 悠雅、小森 康平、森 瑞季)；神奈川大学：日比野欣也、垣本史雄、林田直明、有働慈治、池田大輔；KEK：田中真伸、芝田達伸；高知大学：中村亨；埼玉大学：井上直也；芝浦工大：笠原克昌；未来 ICT 研究所：小澤俊介；信州大学：富田孝幸、齊藤亮介、日比亮佑、阿部泰明、(佐藤大輝、水野航太)；千葉大学：河合秀幸；中部大学：大嶋晃敏、山崎勝也；東京大学宇宙線研究所：荻尾彰一、塚隆志、竹田成宏、野中敏幸、川田和正、大島仁、藤田慧太郎、瀧田正人、大西宗博、福島正己、大岡秀行、下平英明、関野幸市、小林良一、申興秀、藤末紘三、高橋薫；東京大学地震研究所：武多昭道；東京都市大学：門多顕司；大阪産業大学：櫻井信之；広島市立大学：田中公一；量子科学技術研究開発機構：内堀幸夫；山梨大学：石井孝明、本田建；理化学研究所：長瀧重博、伊藤祐貴、小野勝臣、木戸英治、樋口諒、N. Globus、H. He、D. Warren、榊直人；立命館大学：奥田剛司；京都大学：難波宏樹；ユタ大学：C.C.H. Jui、Carsten Rott、J.N. Matthews、J.W. Belz、D.R. Bergman、W. Springer、D. Ivanov、S.B. Thomas、J.D. Smith、G.B. Thomson、P. Sokolsky、J.H.Kim、J.P. Lundquist、Z. Gerber、J. Remington、M. Potts、I. Buckland；シカゴロヨラ大学：T. Abu-Zayyad、R. Abbasi；蔚山科学技術大学校：D. Ryu、B.K. Shin；延世大学：Y.J. Kwon；漢陽大学：B.G. Cheon、H.B. Kim；成均館大学：I.H. Park、M.J. Lee、H.M. Jeong、S.W. Kim；ロシア科学アカデミー原子核研究所：I.I. Tkachev、G.I. Rubtsov、S.V. Troitsky、O.E. Kalashev、B.K. Lubsandorzhiev、M.S. Pshirkov、I.V. Kharuk、Y. Zhezher、I.A. Vaiman、(Maria Kudenko)；ブリュッセル自由大学：P. Tinyakov、M. Kuznetsov；Academia Sinica：A. Fedynitch；チェコ科学アカデミー宇宙論と基礎物理学中央ヨーロッパ研究所：F. Urban；() 内は学部学生
研究成果概要	<p>テレスコープアレイ (TA) 実験では、米国ユタ州に TA およびその拡張 (TAx4、TALE) として地表検出器 (SD) と大気蛍光望遠鏡 (FD) を設置して超高エネルギー宇宙線の観測を行っている。R4 年度は TA 日本グループの会議を柏キャンパスに一堂に会して行い、データ解析および TA 運用に関する報告および議論を行った。さらに TA グループ全体会議も踏まえて、超高エネルギー宇宙線のエネルギー、到来方向、質量組成などに関する研究結果を日本物理学会、UHECR2022 などの国際学会、学術雑誌で発表した。以下に概要を述べる。</p> <p><b>【TA の異方性とエネルギースペクトル】</b></p> <p>2014 年に最初の 5 年間に取得した TA データを用いて、57EeV (<math>10^{19.76}\text{eV}</math>) 以上の最高エネルギー宇宙線がおおぐま座の近傍から過剰に到来する hotspot の兆候を捉えた。14 年間の 205 事象で解析の更新を行い、<math>25^\circ</math> の半径の円での oversampling で最大の pretrial significance を得て、その local significance (<math>\sigma_{\text{local}}</math>) は <math>5.1\sigma</math> であった。到来方向が isotropic な場合に <math>\sigma_{\text{local}}</math> が偶然 <math>5.1\sigma</math> を超える確率は <math>7.4 \times 10^{-4}</math> (<math>\sim 3.2\sigma</math>) であった。この hotspot の他に、<math>E \geq 10^{19.4}\text{eV}</math>、<math>10^{19.5}\text{eV}</math>、<math>10^{19.6}\text{eV}</math> において <math>20^\circ</math> の半径の円での oversampling search を行ったところ、ペルセウスうお座超銀河団の方向に過剰な領域がある兆候を得た[1]。</p> <p>また、南半球にある Auger は ankle と最高エネルギー領域の cutoff の間に <math>1.3 \times 10^{19}\text{eV}</math> (<math>10^{19.11}\text{eV}</math>) でエネルギースペクトルの softening があることを発表した。北半球の TA の 14 年間に取得した SD データを用いたエネルギースペクトルに対して、<math>10^{19.22 \pm 0.08}\text{eV}</math> において softening がある結果を <math>4.0\sigma</math> に相当する偶然の確率で得た[2]。</p> <p>さらに、2021 年 5 月 27 日 10:35:56 UTC に TA 地表検出器によって <math>244 \pm 29(\text{stat.}) \pm 51(\text{syst.})\text{EeV}</math> の宇宙線を観測した。このエネルギーは、これまで AGASA、Auger および TA が地表検出器で観測した宇宙線の中で最高のエネルギーであった[3]。</p> <p><b>【TALE ハイブリッド解析によるエネルギースペクトル・組成解析】</b></p> <p><math>\sim 10^{16.7} \sim 10^{18.3}\text{eV}</math> において 2018 年 11 月から 2020 年 2 月までの期間で TALE FD と</p>

SD の情報を用いた TALE hybrid データで、エネルギースペクトルを求めた[3]。また 4 年間の TALE hybrid データを用いて  $X_{\max}$  の平均のエネルギー依存性を求め、 $\sim 10^{17}$  eV で折れ曲がりが見られた。[4]。

### 【TA と TA x4 の運用および TALE のさらなる低エネルギーへの拡張】

TA の有効観測面積を 4 倍にする拡張計画 (TAx4) において、2019 年 11 月から従来の TA を含めて約 2.5 倍に拡張した SD アレイで、データ収集を行っている[5]。UHECR2022 において、この新規に追加した北側 SD 領域で取得した 1.5 年間のデータと南側 SD 領域で取得した 2 年間のデータを用いて preliminary なエネルギースペクトルを発表し、従来の TA SD で取得した 11 年間のデータを用いたエネルギースペクトルと consistent な結果であることを示した[6]。

また、TALE hybrid のエネルギー閾値 ( $\sim 10^{16.5}$  eV) をさらに ( $\sim 10^{15}$  eV まで) 下げのために、2022 年 11 月に、50 台の SD を 100 m 間隔で  $0.36 \text{ km}^2$  の有効面積をカバーするように設置した (TALE infill SD)。今後、SD のエレキを取り付けて稼働させる予定である [7]。

また、これまで BRM FD サイトは現地の発電機を稼働させて電源供給をしていたが、令和 4 年度から、建設が完了した商用送電線によって電源を供給して運用を行っている。2020 年 3 月から COVID-19 感染拡大の影響で全 FD の稼働を停止した時期があったが、全 6 か所の FD のうち、4 か所の観測はすでに再開した。日本から人員派遣ができなかったため、日本担当の FD 観測は停止したままであった。TA、TALE、TAx4 SD は基本的に太陽光発電と無線通信で自立稼働してデータを収集しており、日本から遠隔による観測モニターを行った。令和 4 年度は、日本から人員を派遣して、停止していた FD の鏡洗浄を行い、現地および日本からのリモートによる観測を行った。また夏には SD の保守を行った[8]。さらに、TAx4 SD サブアレイの境界に落ちたためにこれまで取得できなかった宇宙線空気シャワーのデータを取得する境界トリガーを導入し、2022 年 11 月より安定に稼働している [5]。

### 参考文献

1. J.H. Kim et al. (Telescope Array Collaboration), “Updates on the Hotspot and the Perseus-Pisces supercluster Excess Observed by the Telescope Array Experiment”, EPJ Web Conf. **283** (2023) 03005
2. J.H. Kim et al. (Telescope Array Collaboration), “Energy spectrum Measured by the Telescope Array Surface Detectors”, EPJ Web Conf. **283** (2023) 02005
3. H. Oshima et al. (Telescope Array Collaboration), “Cosmic-ray Energy Spectrum with the TALE Detector in Hybrid Mode”, EPJ Web Conf. **283** (2023) 02006
4. K. Fujita et al. (Telescope Array Collaboration), “Cosmic ray mass composition measurement with the TALE hybrid detector”, EPJ Web Conf. **283** (2023) 02009
5. 木戸英治 その他 Telescope Array Collaboration, 「TA 実験 393 : TAx4 実験全体報告 12」、日本物理学会 2023 年春季大会
6. K. Fujisue et al. (Telescope Array Collaboration), “TAx4 surface detectors data analysis”, EPJ Web Conf. **283** (2023) 06004
7. 古前壱朗 その他 Telescope Array Collaboration, 「TA 実験 395 : TALE 実験全体報告 9」、日本物理学会 2023 年春季大会
8. 大島仁 その他 Telescope Array Collaboration, 「宇宙線望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の研究」、令和 4 年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表会

整理番号 F1