

令和 3 年度 (2021) 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	大阪市立大学：荻尾彰一、常定芳基、R. Mayta、尾村勇吾、藤田慧太郎、荒井優斗、佐藤光希、福島涼、木村優介、津田涼輔、有村龍平、岩崎葵；大阪電気通信大学：多米田裕一郎、柴田規迪、吉田風吾、神藤大輝、西尾瑛司、(石本康樹、甲斐仁武、佐藤聖真、清水将介、高木勇太郎、藤岡桃歌、坊峻弥、森下智也、村上実哉斗)；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；京都大学：藤井俊博；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：齊藤保典、富田孝幸、中澤新、窪田悠人、中村智行、柴崎悠馬、齊藤亮介、(日比亮佑、阿部泰明)；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：埜隆志、竹田成宏、野中敏幸、川田和正、A. Fedynitch、Y. Zhezher、瀧田正人、大西宗博、福島正己、千川道幸、武石隆治、大岡秀行、下平英明、関野幸市、小林良一、申興秀、樋口諒、藤末紘三；辻真邦、高橋薫；東京大学地震研究所：武多昭道、池田大輔；東京都市大学：門多頭司；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、榊直人；立命館大学：奥田剛司；ユタ大学：C.C.H. Jui、J.N. Matthews、J.W. Belz、D.R. Bergman、R. Cady、W. Hanlon、D. Ivanov、S.B. Thomas、J.D. Smith、G.B. Thomson、P. Sokolsky、W. Springer、J.H. Kim、J.H. Kim、J.P. Lundquist、G. Furlich、J. Remington、M. Potts、I. Buckland、R. Gonzalez；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、H.M. Jeong、S.W. Kim、M.H. Kim、J. Yang；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、；ブリュッセル自由大学：P. Tinyakov、M. Kuznetsov；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 とその拡張 (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。COVID-19 感染拡大前には、TA の日本グループの隔月の全体会議、海外のメンバーを含めた TA グループ全体での会議を年に数回一堂に会してデータ解析および TA 運用に関する報告および議論を行ったが、R3 年度も引き続きオンラインで開催した。これをもとに、超高エネルギー宇宙線のエネルギー、到来方向の異方性、質量組成などに関する研究結果を日本物理学会、ICRC2021 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>【TA のエネルギーと異方性】</p> <p>2014 年に最初の 5 年の TA データで 57EeV ($10^{19.76}\text{eV}$) 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。12 年間の 179 事象で解析の更新を行い、25° の半径の円での oversampling で最大の pretrial significance を得て、その significance は 5.1σ であった。これが偶然起こる確率が 6.8×10^{-4} (3.2σ) であった。この hotspot の他に、20° の半径の円で oversampling search を行ったところ、やや低いエネルギー閾値で、過剰な領域があり、それがペルセウスうお座超銀河団の方向にある兆候を得た[1]。</p> <p>南半球にある Auger は $1.3 \times 10^{19}\text{eV}$ ($10^{19.11}\text{eV}$) 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 TAsD、TA FD、HiRes のエネルギースペクトルに同時フィットしたところ、5.3σ の significance で $10^{19.25 \pm 0.03}\text{eV}$ において softening がある結果を得た[2]。</p> <p>【TA と TALE の組成解析】</p> <p>$10^{15.3} - 10^{18.3}\text{eV}$ において約 7 年間の TALE の FD で観測したデータで、X_{max} の平均のエネルギー依存性を求め[3]、$\log_{10}(E/\text{eV})=17.20 \pm 0.03$ で折れ曲がりが見られた。また $10^{16.6} - 10^{18.3}\text{eV}$ において TALE FD と SD を合わせた hybrid データでは $\log_{10}(E/\text{eV})=17.07 \pm 0.09$ で折れ曲がりを得た[4]。さらに、$10^{18} - 10^{20}\text{eV}$ において TA の SD データを用いて、一次宇宙線の質量組成に感度のある観測のセットを再構成して Boosted Decision Trees による解析で、TA hybrid データの X_{max} 解析と同様に軽い組成と矛盾のない結果を得た[5]。</p>

【雷雲時の宇宙線シングルカウントレート変動の観測】

宇宙線シングルカウントレートの変動が TA 地表検出器サイズ (約 700km²) で初めて観測された。変動の広がりが直径 6km-24km であること、強度の変動が最大で 2% であること、カウントレートの増加と減少の両方があること、雷との相関および雷のない雷雲との相関の両方があること、変動が雷雨と同じ方向に移動すること、簡単な電場モデルによる CORSIKA を用いたシミュレーションで再現できることなどがわかった[6]。

【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 4 倍の有効観測面積への拡張を目指す計画 (TA_{x4}) において、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[7]。ICRC2021 において SD および FD を用いたエネルギースペクトルの preliminary な結果を発表した[8, 9]。

また TALE hybrid のエネルギー閾値をさらに下げするための TALE infill SD の検出器本体の組み立て 50 台を明野観測所で行った[10]。R4 年度に米国へ輸送予定である。

令和 2 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 2 か所の FD 観測は停止したままであった。TA、TALE、TA_{x4} SD は基本的に太陽光発電と無線通信で自立稼働しており、日本から遠隔による観測モニターを行った。令和 3 年度は、日本から人員を派遣して、令和 3 年 11 月には停止していた TA BRM FD と LR FD のテスト観測を行い、令和 4 年 2 月にはヘリコプターを使っての SD の回収・修理・再設置および保守を行った[11]。またこれまで BRM FD サイトは発電機によって電源供給をしていたが、商用送電線の引き込み建設を行った。

参考文献

1. J.H. Kim et al., “Hotspot Update, and a new Excess of Events on the Sky Seen by the Telescope Array Experiment”, PoS (ICRC2021) 395
2. D. Ivanov et al., “Recent measurement of the Telescope Array energy spectrum and observation of the shoulder feature in the Northern Hemisphere”, PoS (ICRC2021) 341
3. T. AbuZayyad et al., “Cosmic Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV measured by the TALE Fluorescence Detector”, PoS (ICRC2021) 341
4. R. Abbasi, K. Fujita et al., “Cosmic Ray Composition in the Second Knee Region as Measured by the TALE Hybrid Detector”, PoS (ICRC2021) 353
5. Y. Zhezher et al., “Cosmic-ray mass composition with the TA SD 12-year data”, PoS (ICRC2021) 300
6. R.U. Abbasi et al., “Observation of variations in cosmic ray single count rates during thunderstorms and implications for large-scale electric field changes”, Phys. Rev. D 105, 062002 (2022)
7. R.U. Abbasi, E. Kido, H. Sagawa et al., “Surface detectors of the TA_{x4} experiment”, NIM, A 1019 (2021) 165726
8. H. Jeong et al., “Reconstruction of Air Shower Events Measured by the Surface Detectors of the TA_{x4} Experiment”, PoS (ICRC2021) 331
9. M. Potts et al., “Monocular Energy Spectrum using the TA_{x4} Fluorescence Detector”, PoS (ICRC2021) 343
10. 岩崎葵 他、 “TA 実験 377 : TALE infill SD の製作状況と TALE infill ハイブリッド検出器の測定精度”、日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月)
11. 木戸英治 他、 “TA 実験 374 : TA_{x4} 実験全体報告 10”、日本物理学会 2022 年年次大会 (2022 年 3 月)