

2019(令和元)年度 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：萩尾彰一、常定芳基、J.H.Kim、松山利夫、R. Mayta、尾村勇吾、田上裕太、松宮弘幸；大阪電気通信大学：多米田裕一郎、養性光明、奥悠弥、笠見沙織（石原詢也、岩見祐吾、乙守慎太郎、鍵谷 鷹、柴田規迪、吉田風吾）；神奈川大学：日比野欣也、垣本史雄、林田直明、有働慈治；京都大学：藤井俊博；近畿大学：千川道幸；KEK：田中真伸、芝田達伸、山岡広；高知大学：中村亨；埼玉大学：井上直也、仲田海人；芝浦工大：笠原克昌；情通機構：小澤俊介；信州大学：齊藤保典、富田孝幸、上濱隆文、岩倉広和、中村雄也、曾根直宙（窪田悠人、柴崎悠馬、中澤新、中村智之）；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：福島正己、瀧田正人、塚隆志、竹田成宏、野中敏幸、大西宗博、川田和正、木戸英治、A. Fedynitch、Y. Zhezher、大岡秀行、下平英明、関野幸市、申興秀、樋口諒、矢田浩平；藤末紘三；東京大学地震研究所：武多昭道、池田大輔；東京都市大学：門多顕司；東京理科大学：千葉順成；徳島大学：櫻井信之；広島市立大学：田中公一；放医研：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、榎直人；立命館大学：奥田剛司；ユタ大学：P. Sokolsky、C.C.H. Jui、G.B. Thomson、J.N. Matthews、J.W. Belz、D.R. Bergman、R. Cady、T. Abu-Zayyad、R.U. Abbasi、W. Hanlon、D. Ivanov、S.B. Thomas、J.D. Smith、J.H. Kim、J.P. Lundquist、G. Furlich、J. Remington、M. Potts、E. Bassett、I. Buckland；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、S. Jeong、R. Takeishi、H.M. Jeong、K.H. Lee、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. Tkachev、G. Rubtsov、S. Troitsky、O. Kalashev、M.S. Pshirkov、M. Kuznetsov、I.S. Karpikov；ブリュッセル自由大学：P. Tinyakov、A. di Matteo；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

本研究課題により、テレスコープアレイ (TA) 実験の日本グループの研究者が基本隔月に宇宙線研究所に一堂に会して、TA で取得したデータの解析および TA の運用に関する報告および議論を行った。令和元年度には、TA グループ全体としては、超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル、到来方向の異方性、質量組成、超高エネルギー光子・ニュートリノなどに関する研究結果を学術雑誌に発表し、またいくつかの国内・国際学会で発表した。以下に概要を述べる。

(TA のエネルギースペクトル) TA 11 年間の地表検出器 (SD) で取得した $10^{18.2}$ eV 以上の宇宙線のエネルギースペクトルを求め、ankle と cut-off のエネルギー E はそれぞれ $\log_{10}(E/eV) = 18.69 \pm 0.11$ と 19.81 ± 0.03 であった[1]。

(TA の異方性) TA と Auger の cut-off の違いから、TA 11 年間の SD で取得した 10^{19} eV 以上の宇宙線のエネルギースペクトルの銀緯 (δ) を調べた。銀緯 $\delta < 24.8^\circ$ と $\delta > 24.8^\circ$ に対する cut-off はそれぞれ 19.64 ± 0.48 と 19.84 ± 0.02 であり、この差が偶然起こる確率は 8.5×10^{-6} 、または 4.3σ であった[1]。

これまで TA の 5 年間のデータを用いて、 57 EeV 以上の宇宙線の到来方向の偏り (Hotspot) の兆候を捉えた。11 年間のデータに対して、oversampling の円の大きさをスキャンを行い、 25° の半径で、最大の pretrial significance 5.1σ を得た。等方的な到来分布の場合にこの significance を偶然超える確率は 2.1×10^{-3} (2.9σ) であった[2]。

(TALE FD の質量組成：Xmax) $10^{15.3} - 10^{18.3}$ eV のエネルギー領域で、約 4 年間の TALE の大気蛍光望遠鏡 (FD) で測定したデータで、空気シャワーの最大発達大気深さ Xmax のエネルギー依存性を初めて示した[3]。 $10^{17.2}$ eV 付近に折れ曲がりが見られ、これは、TALE FD で測定したエネルギースペクトル[4]の折れ曲がり ($10^{16.2}$ eV、 $10^{17.04}$ eV) のうちの 2 番目の折れ曲がり (second Knee) と関連がある可能性があり、興味深い。

(TA の Xmax) TA の 3 か所の望遠鏡のうち日本グループが建設した 2 か所 (TA サイトの東南の BRM と西南の LR サイト) の FD で取得した 10 年間のデータと QGSJET II-04 モデルの Xmax の比較を $10^{18.2}$ eV - $10^{19.1}$ eV のエネルギー範囲で行った[5]。TA の Xmax の分布と 1 成分のモデルとの平均と標準偏差の比較から、陽子、ヘリウムといった軽い組成と consistent であった。4 成分 (陽子、ヘリウム、窒素、鉄) の混合モデルの分布のフィットにより、陽子 (57%)、ヘリウム (18%)、窒素 (17%)、鉄 (8%) という軽い組成が主成分である結果を得た。

(超高エネルギーフォトン探索) TA 9 年間の地表検出器データに対して、空気シャワー

の再構成に関わる 16 のパラメータ (シャワーフロントの曲率や幅、波形の時間情報等) の多変数解析により、超高エネルギー光子候補の数はバックグラウンド数と consistent であり、 10^{18} , $10^{18.5}$, 10^{19} と 10^{20} eV 以上に対して 95% C.L. のフラックスの制限を 0.067, 0.012, 0.0036, 0.0013, $0.0013 \text{ km}^{-2}\text{yr}^{-1}\text{sr}^{-1}$ と得た[6]。さらに、フォトンに対する 95% C.L. のフラックスの制限を 0.094, 0.029, 0.010, 0.0073, $0.0058 \text{ km}^{-2}\text{yr}^{-1}$ と得た[7]。Auger の結果と比較すると、TA は北半球での結果であり、また $10^{18.5}$ eV 以上では初めての結果である。

(超高エネルギーニュートリノ探索) フォトン探索と同様に、空気シャワーの再構成に係る 16 のパラメータに対する多変数解析により、 10^{18} eV の下向きのニュートリノに対する 90% C.L. のフラックスの上限 $4.2 \times 10^{-6} \text{ GeV cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ を得た[8]。

【TA の拡張 : 4 倍拡張 (TAx4) と低エネルギーへの拡張 (TALE)】

ユタ州で TA の 4 倍の有効観測面積を目指す計画 (TAx4) において、2019 年 2 月と 3 月にヘリコプターを使って TAx4 用地表検出器 257 台の設置と初期調整を行い、TA を含めて約 2.5 倍に観測面積を拡張した。通信の初期調整を行い、部分的にデータ収集を開始した[9]。令和元年度には、さらに通信、データ収集などで不具合のある SD の調整・修理および通信塔におけるデータ収集の改善作業を行い、データ収集を継続中である。また、既に稼働中の MD サイトの TAx4 FD は安定運用継続中であり、BRM サイトの TAx4 FD は 2019 年 11 月に観測を始めた[10]。SD と FD の同時観測 (hybrid) 事象も得られている。

TA 低エネルギー拡張 TALE SD アレイに関しては、Xmax 測定に有用なハイブリッドトリガー (FD で空気シャワーが検出された場合に、SD のデータを取得するために SD アレイに送るトリガー) によるデータ収集を含めてデータ収集を継続中である[11]。

参考文献

1. D. Ivanov et al., “Energy Spectrum Measured by the Telescope Array Experiment”, PoS(ICRC2019)298 (2020).
2. K. Kawata et al., “Updated Results on the UHECR Hotspot Observed by the Telescope Array Experiment”, PoS(ICRC2019)310 (2020).
3. T. AbuZayyad et al., “TALE FD Cosmic Rays Composition Measurement”, PoS(ICRC2019)169 (2020).
4. R.U. Abbasi et al., “The Cosmic-Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE detector in Monocular Mode”, *Astrophysical Journal* **865** (2018) 74.
5. W. Hanlon et al., “Telescope Array 10 Year Composition”, PoS(ICRC2019)280 (2020).
6. R.U. Abbasi et al., “Constraints on the diffuse photon flux with energies above 1018 eV using the surface detector of the Telescope Array experiment”, *Astrop. Phys.* **110** (2019) 8.
7. R.U. Abbasi et al., “Search for point sources of ultra-high-energy photons with the Telescope Array surface detector”, *MNRAS* **492** (2019) 3984.
8. R.U. Abbasi et al., “Search for Ultra-High-Energy Neutrinos with the Telescope Array Surface Detector”, accepted for JETP in 2020.
9. E. Kido et al., “Status and Prospects of the TAx4 Experiment”, PoS(ICRC2019)312 (2020).
10. 木戸英治他, ”TA 実験 332 : TAx4 実験全体報告 6”, 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年
11. S. Ogio et al., “Telescope Array Low-energy Extension (TALE) hybrid”, PoS(ICRC2019)375 (2020).