

平成 29 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 ()内は学部学生

大阪市立大学：荻尾彰一、常定芳基、林嘉夫、川上三郎、B.K. Shin、松山利夫、R. Mayta、尾村勇吾、藤田慧太郎、佐原涼介、高木芳紀、織田浩行(中井慧、藤原亮太、田上裕太)；大阪電気通信大学：多米田裕一郎；神奈川大学：日比野欣也、垣本史雄、林田直明、有働慈治、山崎勝也；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、(安藤智弘、横山平成、河部友貴、工藤俊輔、東海林弦暉、小梁川響子、近藤麻理恵)；信州大学：齊藤保典、富田孝幸、関皓月、中村凌、山本真周、(上濱隆文、岩倉広和、稲富大地)；千葉大学：吉田滋、河合秀幸；東京大学 IPMU：K. Martens；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、池田大輔、木戸英治、榊直人、大岡秀行、下平英明、関野幸市、藤井俊博、申興秀、矢田浩平；東京大学地震研究所：武多昭道；東京都市大学：門多頭司；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；立命館大学：奥田剛司；早稲田大学：笠原克昌、小澤俊介；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；蔚山科学技術大学校：D. Ryu, J. H. Kim；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. Jeong, K. Lee, 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, Y. Zhezher, 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

研究成果概要

平成 29 年度は、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、質量組成などに関する、様々な研究結果に関して発表を行った。以下に概要を述べる。

TA と Auger の energy spectrum の cutoff 値は、それぞれ $10^{19.78 \pm 0.06}$ eV と $10^{19.62 \pm 0.02}$ eV である。11% の energy scale の shift を行うと、 $10^{19.4}$ eV 以下では両者の flux は一致するが、cutoff 値の違いは有意である。 10^{19} eV 以上で両者の視野が共通の赤緯帯 ($-15.7^\circ < \delta < 24.8^\circ$) で調べたところ、両者の cutoff 値は一致した (Auger の全視野の cutoff 値と一致)。TA の視野の北側 (赤緯 $\delta > 24.8^\circ$) の cutoff 値 $\log E = 19.85 \pm 0.03$ が南側 ($\delta < 24.8^\circ$) の値 ($19.59 + 0.05 - 0.07$) より大きく、その偶然の確率は 3.5σ であった (文献 8)。宇宙線源が地球に近いほど伝播中の宇宙線のエネルギーの減衰が小さく cutoff が高いと期待され、南天側で近傍の銀河が少ないことと定性的に合う。また、天球上で超銀河面から $\pm 30^\circ$ 以内から来た超高エネルギー宇宙線の spectrum の cutoff 値 $\log E = 19.83 + 0.07 - 0.04$ がそれ以外から来た宇宙線の spectrum の cutoff 値 (19.67 ± 0.05) より高く、これが偶然起こる確率は 3.2σ であった (文献 7)。近傍銀河が多い超銀河面付近の宇宙線の cutoff 値が高いことが期待されることと定性的に合う。

また、 $10^{19.2}$ eV 以上で到来方向によってエネルギースペクトルに異方性があるかを調べた。いわゆる TA の hotspot 付近の (赤経 139° , 赤緯 45°) を中心とした半径 28.43° の円内の宇宙線スペクトルが、それ以外の領域と比較して、その差が最も有意で、 $10^{19.75}$ eV 以上で過剰で、 $10^{19.75}$ eV 以下で欠損が見られた。これが起こる偶然の確率は 3.74σ であった (文献 6)。

空気シャワー最大発達深さ X_{\max} は一次宇宙線の質量と関係がある。データと Monte Carlo の X_{\max} の平均と標準偏差の比較を行った。特にハドロン相互作用モデルの影響が小さいと考えられる X_{\max} の (値をシフトさせた) 分布の形を比較したところ、QGSJET II-04 proton モデルがどのエネルギー領域でも compatible であった。他の組成では限られたエネルギー領域で compatible ではなかった。(文献 1)

TALE (TA Low-Energy extension) の大気蛍光望遠鏡は空気シャワー粒子からのチェレンコフ光観測にも感度があり、spectrum の測定で、 $10^{17.1}$ eV 付近に knee 的な構造と $10^{16.2}$ eV に ankle 的な構造をとらえた。これらの特徴は銀河宇宙線の起源と伝播モデルを制限する上で重要な結果である(文献 9)。

その他、超高エネルギー宇宙線の研究に関する PTEP の特集が出版された。TA の研究者による執筆論文は文献 2、3、4 である。

また、学際的な研究として、地表検出器で高エネルギー空気シャワー的な事象の短時間バースト現象を観測し、それが、空間のおよび時間的に雷と関連していることを発見した。(文献 5)

【TA の拡張】 山梨県の明野観測所において、ユタ州で TA の有効観測面積を 4 倍にする計画 (TAx4) 用のシンチレータ検出器を 77 台組み立て、米国に輸送した。米国ユタ州の宇宙線センターにおいて TAx4 用地表検出器の最終組み立てあるいは部分組立を行った。TAx4 用地表検出器の設置は米国土地管理局の許可待ちである。また、平成 28 年度末に設置が完了した TALE 地表検出器アレイのデータ収集の調整を行っており、安定稼働へ移行中である。

参考文献

1. R.U. Abbasi et al., “Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode”, accepted for *Astrophys. J.*, arXiv:1801.09784.
2. O. Deligny, K. Kawata, P. Tinyakov, “Measurement of anisotropy and the search for ultra high energy cosmic ray sources”, *Prog. of Theor. and Exp. Phys.*, 2017, 12A104.
3. V. Verzi, D. Ivanov, Y. Tsunesada, “Measurement of energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays”, *Prog. of Theor. and Exp. Phys.*, 2017, 12A103.
4. B.R. Dawson, M. Fukushima, P. Sokolsky, “Past, present, and future of UHECR observations”, *Prog. of Theor. and Exp. Phys.*, 2017, 12A101.
5. R.U. Abbasi et al., “The bursts of high energy events observed by the telescope array surface detector”, *Phys. Lett.*, A381 (2017) 2565-2572.
6. R.U. Abassi et al., “EVIDENCE OF INTERMEDIATE-SCALE ENERGY SPECTRUM ANISOTROPY OF COSMIC RAYS $E \geq 10^{19.2}$ eV WITH THE TELESCOPE ARRAY SURFACE DETECTOR”, submitted to *Astrophys. J. Lett.*, arXiv:1802.05003.
7. R.U. Abassi et al., “Search for Anisotropy in the Ultra High Energy Cosmic Ray Spectrum using the Telescope Array Surface Detector”, submitted to *Phys. Rev. Lett.*, arXiv:1707.04967.
8. R.U. Abassi et al., “Evidence for Declination Dependence of Ultrahigh Energy Cosmic Ray Spectrum in the Northern Hemisphere”, submitted to *Astrophys. J.*, arXiv:1801.07820.
9. R.U. Abbasi et al., “The Cosmic-Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE detector in monocular mode”, arXiv:1803.01288.