

平成 30 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、J.H. Kim、林嘉夫、川上三郎、松山利夫、R. Mayta、尾村勇吾、藤田慧太郎、織田浩行、中井慧、藤原亮太、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)；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、仲田海人；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(曾根直宙)；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、埜隆志、竹田成宏、野中敏幸、大西宗博、川田和正、木戸英治、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、池田大輔；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、榎直人；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、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 30 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、いくつかの研究結果を学術雑誌に発表した。以下に概要を述べる。

(スペクトルの異方性) TA 7 年間の地表検出器 (SD) で取得した $10^{19.2}$ eV 以上の宇宙線のエネルギーと到来方向を用いてエネルギースペクトルに異方性があるかを調べた。2014 年に TA が 57EeV 以上のエネルギーをもつ宇宙線の到来方向の過剰領域 (hotspot) がおおぐま座の近くにあるという兆候を発表したが、その hotspot 付近の(赤経 9h16m, 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、それ以外の領域のスペクトルと比較して、差が最も有意であり、 $10^{19.75}$ 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 4)。

(スターバースト銀河との相関) 2018 年に Auger が 39EeV 以上のエネルギーをもつ宇宙線の到来方向と近傍のスターバースト銀河 (SBG) との相関 (SBG モデルとの比較よって一様分布が 4σ で棄却されること) を報告した。Auger の仮定 (12.9 度の角度相関スケールと非一様性の割合を 9.7%) を用いた場合に、Auger とのエネルギースケールの違いを補正した 43EeV 以上の宇宙線に対して、TA 9 年のデータは 1.1σ で一様分布と compatible であり、また、 1.4σ で Auger の結果と compatible であるという結果で、どちらの仮定に一致するかの結論はまだ出なかった。(文献 6)

(TALE スペクトル) TA サイトの北側にある 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大気蛍光に加えてチェレンコフ光観測にも感度がある。2 PeV から 2 EeV のエネルギー領域のスペクトルを測定して、 $10^{17.1}$ 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 5)。

(質量組成: Xmax) 大気蛍光望遠鏡を用いて取得したデータの空気シャワー最大発達深さ Xmax は一次宇宙線の質量組成と関係がある。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 さいとの東南の BRM と西南の LR サイト) の 8.5 年間のデータと Monte Carlo の Xmax 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 Xmax 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 (He、N、Fe) では限られたエネルギー領域で compatible ではなかった。(文献 1)

(質量組成: 地表検出器データ) 地表検出器を用いて、空気シャワーのフロントの曲率など横広がりに関するさまざまな量を測定でき、これらは一次宇宙線の質量組成と関係がある。TA 9 年間のデータでこれらのうち 14 の観測量を組み合わせた Boosted Decision Tree (BDT) 多変量解析により、 10^{18} - 10^{20} eV において平均的な原子質量 A は $\langle \ln A \rangle = 2.0 + 0.1(\text{stat.}) + 0.44(\text{syst.})$ であった。定性的に大気蛍光望遠鏡による Xmax の結果と consistent であった。(文献 7)

(ミュオン過剰) 南米アルゼンチンの Pierre Auger Observatory が、超高エネルギー宇宙線の空気シャワー中のミュオン数に関して、MC シミュレーションのミュオン数が観測数の 30-80% だけ少ないという結果を報告した。TA 7 年間の地表検出器データで 10^{19} eV 付近の空気シャワーの軸が天頂から傾いた空気シャワーを用いた、ミュオンリッチなサンプルで粒子数の観測量が過剰であるという、Auger と定性的に consistent な結果を得た。(文献 2)

(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 0.067, 0.012, 0.0036, 0.0013, 0.0013 $\text{km}^2\text{yr}^{-1}\text{sr}^{-1}$ という 95% C.L. のフラックスの制限を与えた。(文献 8)

(雷との相関) 学際的な研究として、TA 地表検出器のデータと雷との相関を調べている。雷の情報を TA の近場で観測するために、TA サイトの 9 か所に 3 次元 lightning mapping array (LMA) と電場変化測定器を設置した。これにより、高エネルギーの空気シャワー的 (数百マイクロ秒程度継続する) 短時間バースト現象を観測した。それが、下向きの負 breakdown の初めの 1-2ms に、地上より 4-5km 以下の高さで始まる雷のリーダと同期していることを見出した。シャワーの footprint、地表検出器データの波形を MC シミュレーションと比較して、シャワーは主として下向きにビーム状に発生したガンマ線からなり、これは下向きの TGF (地球起源のガンマ線放射) によって生成されたものに対応することを示唆した。(文献 3)

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

ユタ州で最終的に TA の 4 倍の有効観測面積を目指す計画 (TAx4) のために、シンチレータ検出器を、山梨県の明野観測所において、25 台組み立て、また、韓国の成均館大学で 30 台組み立てて、それぞれ米国に輸送した。2018 年末より、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を行った。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。詳細調整を継続中である。また、既に稼働中の MD サイトの TAx4 FD は運用継続中であり、月の出ていない夜間にデータ収集を行っている。BRM サイトの TAx4 FD は現在建設中である。

TA 低エネルギー拡張 TALE 地表検出器アレイのデータ収集を継続中である。また、 X_{max} 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) をインストールして運用している。

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”, *Astrophysical Journal*, 858:76 (2018).
2. R.U. Abbasi et al., “Study of muons from ultra-high energy cosmic ray air showers measured with the Telescope Array experiment”, *Physical Review D* 98, 022002 (2018).
3. R.U. Abbasi et al., “Gamma Ray Showers Observed at Ground Level in Coincidence With Downward Lightning Leaders”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 6864-6879 (2018).
4. R.U. Abbasi et al., “Evidence of Intermediate-scale Energy Spectrum Anisotropy of Cosmic Rays $E > 10^{19.2}$ eV with the Telescope Array Surface Detector”, *Astrophysical Journal* 862:91(2018).
5. 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* 865-74 (2018).
6. R.U. Abbasi et al., “Testing a Reported Correlation between Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays and a Flux Pattern from nearby Starburst Galaxies using Telescope Array Data”, *Astrophysical Journal Lett.* 867:L27 (2018).
7. R.U. Abbasi et al., “Mass composition of ultra-high-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector Data”, *Physical Review D* 99, 022002 (2019).
8. R.U. Abbasi et al., “Constraints on the diffuse photon flux with energies above 10^{18} eV using the surface detector of the Telescope Array experiment”, arXiv:1811.03920, submitted to *Astroparticle Physics*.

整理番号 E14