

2020 (令和二) 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：荻尾彰一、常定芳基、J. H. Kim、松山利夫、R. Mayta、尾村勇吾、藤田慧太郎、松宮弘幸、荒井優斗、佐藤光希、福島涼、木村優介、津田涼輔；大阪電気通信大学：多米田裕一郎、奥悠弥、笠見沙織、柴田規迪、吉田風吾、(西尾瑛司、山下太地)；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、山岡広；高知大学：中村亨；埼玉大学：井上直也；芝浦工大：笠原克昌；情通機構：小澤俊介；信州大学：斎藤保典、富田孝幸、中村雄也、佐野賢吾、曾根直宙、窪田悠人、柴崎悠馬、中澤新、中村智行；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：埴隆志、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、申興秀、樋口諒、藤末紘三；東京大学地震研究所：武多昭道；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、Haoning He、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、T. Abu-Zayyad、R. U. Abbasi、W. Hanlon、D. Ivanov、S. B. Thomas、J. D. Smith、G. B. Thomson、P. Sokolsky、J. H. Kim、J. P. Lundquist、G. Furlich、J. Remington、M. Potts、(A. Christopherson、O. Acosta、Z. Gerber、L. Kaneko、R. Ulbarri)；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. Tkachev、G. Rubtsov、S. Troitsky、O. Kalashev、B. K. Lubsandorzhiyev、M. S. Pshirkov、I. S. Karpikov；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

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。TA の日本グループの研究者は隔月に全体会議を、また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 3 回 (通常全体会議 2 回および解析全体会議 1 回) を開催し、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 2 年度は COVID-19 の感染拡大の影響でオンラインによる会議を行った。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、到来方向の異方性、質量組成、超高エネルギー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 のエネルギーと異方性】

電荷をもった宇宙線はそのエネルギーが高いほど宇宙磁場による発生源からのずれが小さいという仮定のもとに、TA の 7 年間の SD データ (と 10 年間の更新データ) を用いて 10^{19} eV 以上の宇宙線の到来方向のクラスターリングとその中でのエネルギーの流れ (依存性) の情報から、宇宙線の発生源が近傍の銀河団が集中する超銀河面に存在する兆候を約 4σ の有意度で捉えた [1]。

南半球にある Pierre Auger Observatory (Auger) が 8 EeV 以上の宇宙線の到来方向に対して有意な双極構造を捉えた。TA の SD データに対して解析を行ったところ、TA の 11 年間の統計では、一様分布にも Auger が発表した双極構造にも矛盾しないという結果を得た [2]。

【TA の X_{max} 】

空気シャワーの最大発達大気深さ X_{max} は一次宇宙線のエネルギーと質量に関係する。 X_{max} 分布の tail (X_{max} が大きい側) では陽子が多く占めると考えられる。そこで 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 で取得した約 9 年間のデータを用いて、LHC の重心系エネルギーを超える $\sqrt{s} = 73 \text{ TeV}$ の陽子-空気の非弾性散乱断面積を測定し ($520.1 \pm 35.8 [\text{stat}]^{+25.3}_{-42.9} [\text{sys}] \text{ mb}$)、さらにクラウドモデルを用いて陽子陽子全断面積を求めた ($139.4^{+23.4}_{-21.3} [\text{stat}]^{+15.7}_{-25.4} [\text{sys}] \text{ mb}$) [3]。この結果は LHC データに tune された断面積のモデルと一致する。また以前の宇宙線のデータもそのモデルに一致して、エネルギーが大きくなるにしたがって断面積が大きくなっている。

【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 FD で観測したデータで、Xmax の平均のエネルギー依存性を求めた[4]。 $10^{17.2}$ eV 付近に折れ曲がりが見られる。これは、TALE FD で測定したエネルギースペクトルの折れ曲がり ($10^{16.2}$ eV、 $10^{17.04}$ eV) のうちの 2 番目の折れ曲がり (second Knee) との関連性を示唆する。

【超高エネルギーニュートリノ探索】

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かかわる 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) を用いた多変数解析により、 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を 4.2×10^{-6} GeV $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ と得た[5]。

【下向きの地球由来のガンマ線放射の起源の観測】

雷放電を観測する広帯域 VHF 干渉計と速い電場変化測定器を併用して、広領域をカバーする TA の地表検出器によって地球起源の突発的ガンマ線放射 (TGF) を初めて詳細に高分解能で観測した[6]。

【TA と TA 拡張 [4 倍拡張 (TAx4) と低エネルギーへの拡張 (TALE)] の運用】

ユタで TA の 4 倍の有効観測面積への拡張を目指す計画 (TAx4) において、2019 年 2 月と 3 月に 257 台の TAx4 用 SD を設置し、TA を含めて約 2.5 倍に観測面積を拡張し、データ収集を開始した[7]。TALE SD アレイは安定稼働を継続中である。ハイブリッドトリガー (FD で空気シャワーを検出した場合に、SD アレイからのトリガーに関わらず、SD のデータを取得するために SD アレイに送るトリガー) によるデータも取得し、エネルギースペクトルの解析状況および Xmax に関する preliminary な結果などを発表した [8]。また一時的に全 FD の稼働を停止した時期があるが、全 6 か所の FD のうち、4 か所 (TA MD FD、2 か所の TAx4 FD と TALE FD) の観測を再開した。令和 2 年度は COVID-19 感染拡大の影響で日本からの派遣ができなかったが、遠隔による観測モニターを行い、ユタの人員で現地保守を行った。

参考文献

1. R.U. Abbasi et al., “Evidence for a Supergalactic Structure of Magnetic Deflection Multiplets of Ultra-high-energy Cosmic Rays”, ApJ, 899:86 (2020).
2. R.U. Abbasi et al., “Search for Large-scale Anisotropy on Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Experiment”, ApJ Lett., 898:L28 (2020).
3. R.U. Abbasi et al., “Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array’s Black Rock Mesa and Long Ridge fluorescence detectors, and surface array in hybrid mode”, Phys. Rev. D102, 062004 (2020).
4. R.U. Abbasi et al., “The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode”, ApJ, 909:178 (2021).
5. R.U. Abbasi et al., “Search for Ultra-High-Energy Neutrinos with the Telescope Array Surface Detector”, JETP, 131, 255-264 (2020).
6. J.W. Belz et al., “Observations of the Origin of Downward Terrestrial Gamma-Ray Flashes”, JGR Atmosphere, 125, 1-26 (2020).
7. 木戸英治 他, “TA 実験 340 : TAx4 実験全体報告 7”, 日本物理学会 2020 年秋季大会 ; 木戸英治、佐川宏行 他, “TA 実験 352 : TAx4 実験全体報告 8”, 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年) など。
8. 荒井優斗、荻尾彰一 他, “TA 実験 355 : TALE 実験全体報告 8” ; 藤田慧太郎 他, “TA 実験 356 : TALE 実験ハイブリッド観測によるデータ解析” ; 佐藤光希 他, “TA 実験 357 : TALE-SD アレイで測定された 2nd knee 領域宇宙線のエネルギースペクトル”。以上は日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年)