

平成 27 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：准教授・佐川宏行（東大宇宙線研）；参加研究者：大阪市大・教授・荻尾彰一、名誉教授（林嘉夫、川上三郎）、技官・松本利夫、院生（小西翔吾、和知慎吾、西本義樹、大野木瞭太、岸上翔一、高橋優一）；徳島大学・櫻井信之；神奈川大・教授（日比野欣也、林田直明）、助教・有働慈治；特別助教・多米田裕一郎；近畿大・教授・千川道幸、学部学生（浦里 拓嗣、明石 光正）；KEK・教授・田中真伸、助教・芝田達伸、技官・山岡広、松田武；高知大・教授・中村亨、院生（松平知也、亀井啓太、今岡慧）、埼玉大・教授・井上直也；早稲田大・招聘研究員・笠原克昌、次席研究員・小澤俊介；千葉大学・教授・吉田滋、准教授・河合秀幸；東工大・教授・垣本史雄、助教・常定芳基、院生（北村雄基、小倉潤）、学部学生（伊藤駿吾）；東大宇宙線研・教授・福島正己、准教授・瀧田正人、助教（竹田成宏、野中敏幸、大西宗博）、特任助教（川田和正、得能久生、池田大輔、木戸英治）、技官（大岡秀行、下平英行）、技能補佐員（大木薫、関野幸市）、院生（武石隆治、申興秀、斉藤公紀）、協力研究員・藤井俊博；広島市立大学・准教授・田中公一；放医研・課長・内堀幸夫；東京都市大・講師・門多頭司；山梨大学・名誉教授・本田建、教授・石井孝明；東京理科大・教授・千葉順成；東大地震研・助教・武多昭道、研究員・山崎勝也；立命館大学 特任助教・奥田剛司；理研・准主任研究員・長瀧重博、特別研究員・伊藤祐貴；九州大学・助教・小野勝臣；信州大学・助教・富田孝幸；院生・林幹樹；IPMU・准教授・K. Martens；ユタ大・教授（P. Sokolsky, C. C. H. Jui, G. B. Thomson, J. N. Matthews）、准教授（R. W. Springer, J. W. Belz, D. R. Bergman）、助教・R. Cady、研究員（T. Abu-Zayyad, W. Hanlon, B. T. Stokes, T. A. Stroman, D. Ivanov）、技官（S. B. Thomas, J. D. Smith）、院生（J. H. Kim, J. P. Lundquist, I. Myers, Z. Zundel）；漢陽大・教授（B. G. Cheon, H. B. Kim）、院生（B. K. Shin, I. S. Jeong）；延世大・教授・Y. J. Kwon；UNIST・教授（D. Ryu）、研究員（J. H. Kim）；梨花女子大・教授・J. Yang、院生・M. J. Chae；成均館大学・教授・I. H. Park；INR・教授（V. Kuzmin, I. Tkachev）、副所長・G. Rubtsov、研究員（S. Troitsky, O. Kalashev, M. S. Pshirkov）；ブリュッセル自由大・教授・P. Tinyakov、研究員・F Urban

研究成果概要

2015 年の宇宙線国際会議（ICRC2015）で発表したテレスコープアレイ（TA）実験のエネルギースペクトル、質量組成、異方性（ホットスポット）の最新の preliminary な結果の概要を以下に示した。

【エネルギースペクトル】

図 1 に TA の地表検出器（SD）7 年分のデータによるエネルギースペクトルを示した [1]。 $10^{18.70}$ eV にアンクルが、 $10^{19.78}$ eV にカットオフが観測され、 $\sim 6\sigma$ の有意度で GZK suppression と一致する宇宙線強度の急激な減少を確認した。

図 2 に TA 低エネルギー拡張実験（TALE 実験）の大気蛍光望遠鏡（FD）と TA 単眼（mono）FD の解析結果を加えたエネルギースペクトルを示した [1]。TA の結果と合わせて、 $10^{15.6}$ eV 以上から $10^{20.3}$ eV まで 4 桁以上のエネルギー範囲にわたる測定結果である。 $10^{16.3}$ eV と $10^{17.3}$ eV 付近にも折れ曲がり観測された。他の実験でも同じようなエネルギーで折れ曲がり

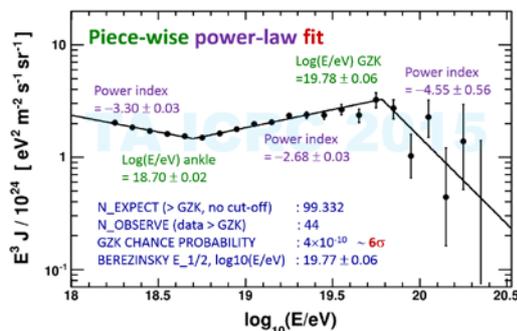


図 1 TA の SD 7 年分のデータによるエネルギースペクトル

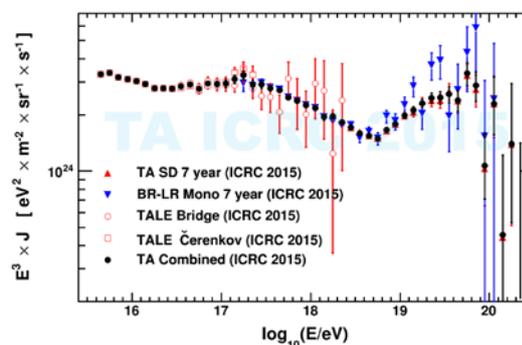


図 2 TA SD (▲)と TALE FD のデータを用いたエネルギースペクトルを TA mono FD の結果 (▼)とともに示した。TALE FD のデータで、チェレンコフ光が主成分となる解析 (□)と大気蛍光が主成分となる解析 (●)の結果を示した。すべてを合わせた結果を●印で示した。

見られており、今後、TALE FD によるエネルギースペクトル測定 of 系統的な誤差を確認し、また、TALE SD 拡張によるハイブリッドデータを用いた精密な組成解析を行い、その物理的描像を解明することが重要な課題である。

【質量組成】

HiRes FD を移設した TA MD サイトの FD と SD とのハイブリッドデータ 7 年分の解析による空気シャワー最大発達深さ X_{max} の平均をエネルギーの関数として図 3 に示した [2]。 $10^{18.2}$ eV 以上で軽い組成と一致した。ただし、 10^{19} eV 以上のエネルギーに対しては統計がもっと必要である。

【異方性】

7 年間の SD データを用いて、 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線 109 事象の到来方向を 20° の半径の円で oversampling して求めた significance map を図 4 に示した [1, 3]。最大の significance S_{max} が 5.07σ (赤経 148.4° 、赤緯 44.5°) であった。その方向の 20° の半径の円には、一様到来方向分布の場合の期待値が 6.88 事象であるのに対して 24 事象観測された。一様到来方向分布の場合に S_{max} 以上が偶然起きる確率は 3.7×10^{-4} (3.4σ) であった。

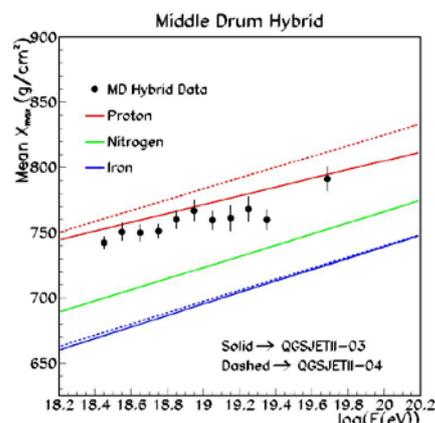


図 3 TA MD サイトの FD と SD のハイブリッドデータ解析による X_{max} の平均値とエネルギーの関係。黒印が TA のデータで、赤線、緑線、青線がそれぞれ陽子、窒素、鉄モデル。実線が QGSJETII-03 モデルで、破線が QGSJETII-04 モデル。

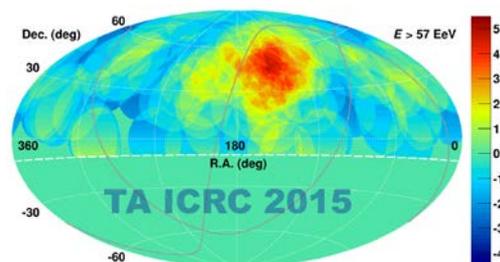


図 4 赤道座標で表示した TA の 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線 (109 事象) の到来方向を 20° の半径の円で oversampling した場合の significance map。カラーコードが significance を表し、一番濃い赤色が 5.1σ と最大である。

参考文献

[1] C. Jui for the Telescope Array Collaboration, “Summary of Results from the Telescope Array Experiment”, International Cosmic Ray Conference, 2015 (ICRC2015), The Hague, Netherlands
 [2] J. Belz for the Telescope Array Collaboration, “Summary of UHECR Composition Measurements by the Telescope Array Experiment”, ICRC2015
 [3] K. Kawata for the Telescope Array Collaboration, “Ultra-High-Energy Cosmic-Ray Hotspot Observed with the Telescope Array Surface Detectors”, ICRC2015