

平成 26 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：佐川宏行（東大宇宙線研）；参加研究者：大阪市大・准教授・荻尾彰一、教授・林嘉夫、名誉教授・川上三郎、技官・松本利夫、院生（山崎勝也、小西翔吾、和知慎吾、西本義樹）；名古屋大学・櫻井信之；神奈川大・特任教授・林田直明、教授・日比野欣也、助教・有働滋治；助手・多米田裕一郎；近畿大・教授・千川道幸、学部学生（岩本浩平、本田真也、恩智克弘、清水翔太、岡本健太）；KEK・准教授・田中真伸、助教・芝田達伸、技官・山岡広、松田武；高知大・准教授・中村亨、院生（松平知也、亀井啓太、今岡慧）、学部学生（大倉貞之、三木太志、藤原大樹、中山啓太）；埼玉大・教授・井上直也、院生（須澤拓光、阿部理彦、小野谷克己）；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）；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）、研究員・木戸英治、技官（大岡秀行、下平英行）、院生（武石隆治、申興秀）、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、准教授・石井孝明、院生（向井啓児郎、幾瀬高志）；東京理科大・教授・千葉順成、院生・辻村まい；東大地震研・助教・武多昭道；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・小野勝臣；信州大学・助教・富田孝幸；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、院生・W. R. Cho；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)、研究員 (S. Troitsky, O. Kalashev, G. Rubtsov, M. S. Pshirkov)；ブリュッセル自由大・教授・P. Tinivakov、研究員・F Urban

研究成果概要

【エネルギースペクトル】

図 1 に TA の地表検出器 (SD) 6 年分のデータによるエネルギースペクトルを示した。10^{18.70} eV にアンクルが、10^{19.74} eV にカットオフが観測され、6.6σ の有意度で GZK suppression と一致する flux の急激な減少を確認した。Auger のエネルギースケールを 8.5% 上げたスペクトルを図に示した。10^{19.3} eV 以下では TA と Auger のスペクトルは非常によく合っているが、それ以上のエネルギーでは合っていない。

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) の結果を加えた preliminary なエネルギースペクトルを示した。TA の結果と合わせて、10^{15.6} eV 以上から 10^{20.3} eV まで 4 桁以上の範囲にわたる測定である。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が見られており、今後の TALE FD によ

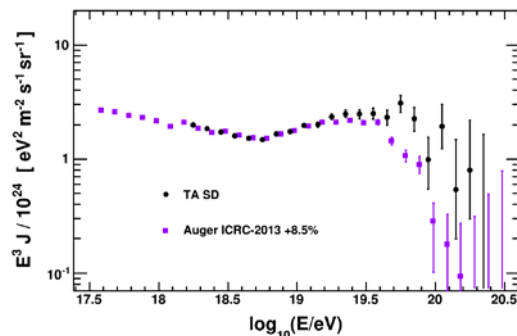


図 1 TA (●) と Auger のエネルギーを 8.5% 大きくした場合 (■) の Auger のエネルギースペクトル

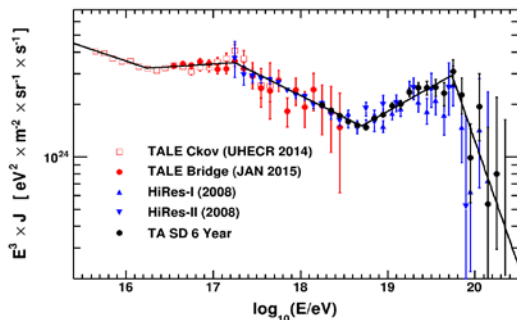


図 2 TA SD (●) と TALE FD のデータを用いたエネルギースペクトルを HiRes の結果 (▲▼) とともに示した。TALE FD の解析で、チェレンコフ光を主成分とした解析 (□) と大気蛍光が主成分となるエネルギー領域までの解析 (●) 結果を示した。

るエネルギースペクトルの系統的な確認と近い将来のハイブリッド精密組成解析による物理的描像の解明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 5 年分の解析で、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。 $10^{18.2}$ eV 以上で軽い組成（陽子が支配的）と一致している [1]。なお FD のステレオ事象の解析でも同様な結果である。ただし、 10^{19} eV 以上のエネルギーの事象に対しては統計がもっと必要である。

【異方性】

5 年間の SD データを用いて、57 EeV 以上の宇宙線 72 事象の到来方向を 20° の半径で oversampling した異方性解析の結果は、昨年発表した [2]。さらに 1 年分を追加して 6 年分の 57 EeV 以上の宇宙線 87 事象に対して求めた significance map を図 4 に示した。最大の significance S_{\max} が 5.55σ （赤経 148.4° 、赤緯 44.5° ）である。一様分布の場合に S_{\max} 以上が偶然起きる確率は 3.1×10^{-5} (4.01σ)であった。

参考文献

[1] R.U. Abbasi et al. (TA Collaboration), “Study of Ultra-High Energy Cosmic Ray composition using Telescope Array’s Middle Drum detector and surface array in hybrid mode”, *Astroparticle Physics* 64 (2015) 49-62.

[2] R.U. Abbasi et al. (TA Collaboration), “INDICATIONS OF INTERMEDIATE-SCALE ANISOTROPY OF COSMIC RAYS WITH ENERGY GREATER THAN 57 EeV IN THE NORTHERN SKY MEASURED WITH THE SURFACE DETECTOR OF THE TELESCOPE ARRAY EXPERIMENT”, *Astrophysical Journal Letters*, 790: L21 (5pp), 2014.

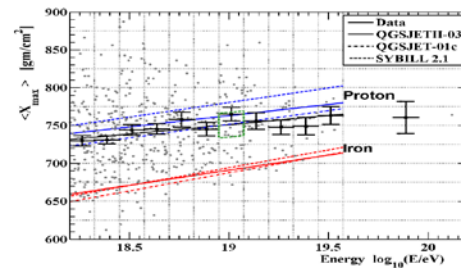


図 3 TA MD サイトの FD と SD のハイブリッド解析による X_{\max} の平均値とエネルギーの関係。黒印が TA の観測結果で、赤線は陽子モデル、青線は鉄モデル。

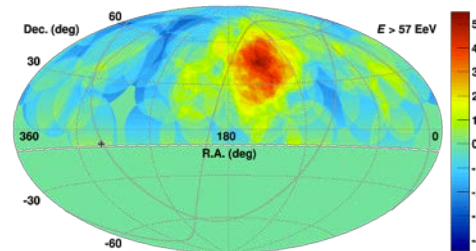


図 4 赤道座標で表示した TA の 57 EeV 以上の宇宙線 (87 事象) の到来方向を 20° の半径で oversampling した場合の significance map。カラーコードが significance を表し、濃い赤色が 5.55σ と最大である。