

平成25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、特任助教・桜井信之、技官・松本利夫、院生・山崎勝也、院生・米田泰久、院生・後藤昂司、院生・南平兵衛；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、院生・峪中良介、院生・野里明香、学部学生・河野翔、学部学生・西本義樹、学部学生・滝隆浩、学部学生・為久幸哉、学部学生・木本圭祐、学部学生・尾崎漢；KEK・准教授・田中真伸、技官・山岡広；高知大・准教授・中村亨；埼玉大・教授・井上直也；院生・須澤拓光、院生・阿部理彦、学部学生・阿部鉄也；早稲田大・教授・笠原克昌、講師・小澤俊介；千葉大学・准教授・河合秀幸、准教授・吉田滋；東工大・教授・垣本史雄、助教・常定芳基、特任助教・得能久生、院生・北村雄基、院生・小倉潤；東大宇宙線研・教授・福島正己、准教授・瀧田正人、助教・大西宗博、助教・竹田成宏、助教・野中敏幸、特任助教・芝田達伸、技官・大岡秀行、技官・下平英行、特任助教・池田大輔、研究員・木戸英治、院生・武石隆治；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・教授・本田建、准教授・石井孝明、院生・町田和広、院生・向井啓児郎、学部学生・幾瀬高志、学部学生・今村真太郎、学部学生・松下裕紀；東京理科大・教授・千葉順成、院生・高村茉衣、院生・屋代健太、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、研究員・富田孝幸；ユタ大・教授・P.Sokolsky、教授・C.C.H. Jui、教授・G.B. Thomson、准教授・J.N.Matthews、准教授・R.W. Springer、助教・J.W. Belz、助教・D.R. Bergman、助教・R. Cady、研究員・T.Abu-Zayyad、研究員・W. Hanlon、研究員・B.T. Stokes、研究員・T.A.Stroman、技官・S.B. Thomas、技官・J.D. Smith、院生・M. Allen、院生・W. Hanlon、院生・D. Ivanov、院生・J.H.Kim、院生・J.P.Lundquist、院生・I.Myers、院生・P.D. Shah、院生・Z. Zundel；漢陽大 教授・B.G.Cheon、教授・H.B. Kim、院生・J.H. Kim、院生・B.K. Shin；延世大・教授・Y.J. Kwon、院生・W.R. Cho；INR・教授・V. Kuzmin、教授・I.Tkachev、教授・P. Tinyakov、研究員・S. Troitsky、研究員・O. Kalashev、研究員・G. Rubtsov；梨花女子大・教授・J. Yang、院生・S.I. Lim；忠南大・教授・D. Ryu；成均館大学・教授・I.H. Park；IPMU・准教授・K.Martens；ブリュッセル自由大・研究員・M.S.Pshirkov

研究成果概要

TA の 5 年間のデータによる結果を示す。

【エネルギースペクトル】

図 1 に TA の地表検出器 (SD) によるエネルギースペクトルを示した。5.7 σ の有意度で GZK suppression と一致する flux の急激な減少を確認した。

【質量組成】

図 2 に大気蛍光望遠鏡 (FD) のステレオ解析での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示した。10^{18.2} eV 以上で陽子と一致している。なお SD と

HiRes 望遠鏡を移設した MD サイト FD とのハイブリッド事象の解析による X_{max} とエネルギーの関係でもエネルギーが 10^{18.2} eV 以上で陽子と一致している。

【異方性】

E > 57 EeV 以上の宇宙線 (loose cut で 72 事象) の到来方向を 20° の半径で oversampling して求めた significance map を図 3 に示した。最大の significance S_{max} が 5.1 σ (赤経 146.7°、赤緯 43.2°) である。一様分布の場合に S_{max} 以上が偶然起きる確率は 1.4 $\times 10^{-4}$ (3.6 σ) である。また 57 EeV 以上の宇宙線 (standard cut で 42 事象)

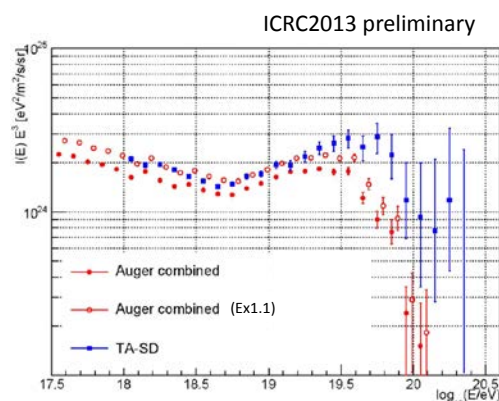


図 1 TA の SD によるスペクトル(●)と Auger によるスペクトル(●)の結果。○は Auger のエネルギーを 10%大きくした場合のスペクトル。

のうち AGN と 3.1 度以内で相関があるのは 17 事象 (40%) であり、一様分布の場合に 40% 相関する偶然の確率は 1.4% である。さらに 57EeV 以上の宇宙線の到来方向の大規模構造 (LSS : Large-Scale Structure) との p 値は 10% 程度であるのに対して、一様分布の場合は 0.1% 程度であった (6° の smearing で)。

[SD バースト事象と雷との相関]

5 年間の SD データで、1 ミリ秒以内に三つ以上の shower trigger が起った場合を 10 例見つけた (通常の SD shower trigger rate は 200 秒に 1 trigger 程度である)。そのうち air shower 再構成プログラムで再構成された例が 5 例あった。そのうち全米雷観測ネットワークで観測された雷と時間的に相関 (< 200 ミリ秒) がある場合が 4 例あり、それらは場所的にも 1-2km 程度の相関があった。図 4 にその一例を示す。

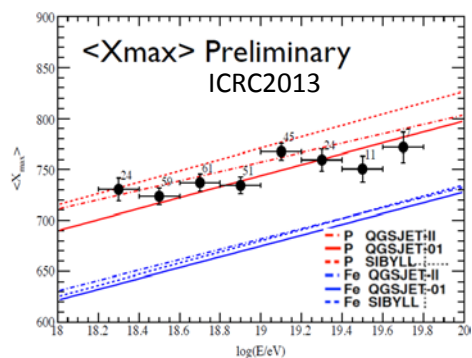


図 2 FD ステレオ解析による preliminary な X_{max} の平均値とエネルギーの関係。黒丸が観測結果で、赤線は陽子モデル、青線は鉄モデル。

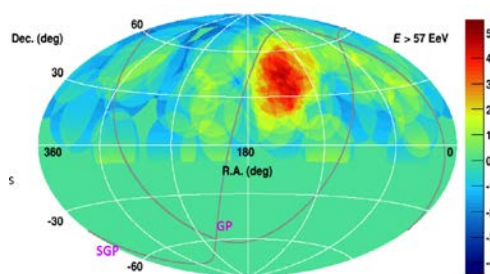


図 3 赤道座標で表示した TA の 57 EeV 以上の宇宙線 (72 事象) の到来方向を 20° の半径で oversampling した場合の significance map。

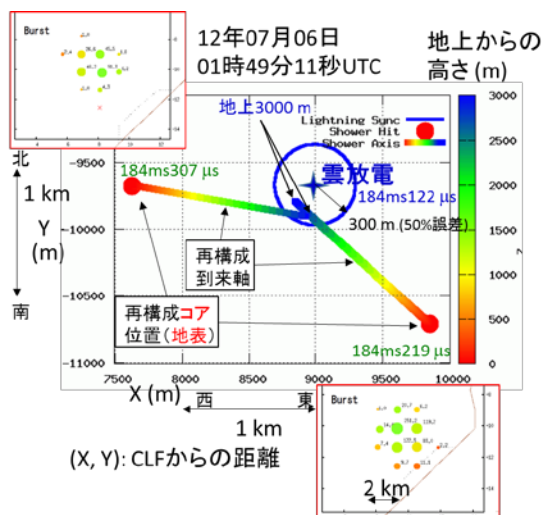


図 4 再構成された SD バースト事象と雷の例。