

## 平成 28 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：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、准教授・常定芳基、名誉教授（林嘉夫、川上三郎）、研究員（B.K. Shin）、技官・松山利夫、院生（R. Mayta、大野木瞭太、岸上翔一、高橋優一、佐原涼介、高木芳紀）；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；KEK・教授・田中真伸、助教・芝田達伸、技官・山岡広；高知大・教授・中村亨、院生・中田祥順；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・名誉教授・垣本史雄；東大宇宙線研・名誉教授・福島正己、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、池田大輔、木戸英治）、特任研究員・榎直人、技官（大岡秀行、下平英明）、技能補佐員（関野幸市）、協力研究員・藤井俊博、院生（武石隆治、申興秀、斉藤公紀、伊藤駿吾）；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・教授・斉藤保典、助教・富田孝幸；院生・林幹樹、学部学生（関皓月、中村凌、山本真周）；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）、特任助教（R. Cady、T. Abu-Zayyad）、研究員（R. U. Abbasi、W. Hanlon、T. A. Stroman、D. Ivanov）、技官（S. B. Thomas、J. D. Smith）、院生（J. H. Kim、J. P. Lundquist、G. Furlich）；漢陽大・教授（B. G. Cheon、H. B. Kim）、院生（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；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）、研修生・Y. Zhezher；ブリュッセル自由大・教授・P. Tinyakov、研究員・A. di Matteo

### 研究成果概要

#### 1) エネルギースペクトルの異方性

##### 1-1) 超銀河面からの角度の依存性

超銀河面を用いた物質分布との相関からエネルギースペクトルの異方性を調べた[1]。TAの5年間のデータを用いて、 $10^{19}\text{eV}$ 以上で超銀河面から $30^\circ$ 以内（ON）の宇宙線のスペクトルと $30^\circ$ より離れた（OFF）領域の宇宙線のスペクトルを図1に示した。2つのスペクトルのbreak pointの差の統計的な有意度は $3.2\sigma$ である。

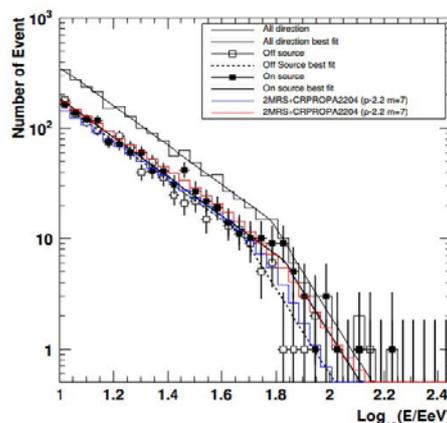


図1：ON領域のエネルギー分布（■）とOFF領域のエネルギー分布（□）

##### 1-2) 赤緯依存性

図2にTAの7年間のデータを用いたa) 赤緯 $\delta > 26^\circ$ のスペクトル、b)  $\delta < 26^\circ$ のスペクトルを示した[2]。a)とb)のbreak pointの差の有意度は $3.9\sigma$ である。

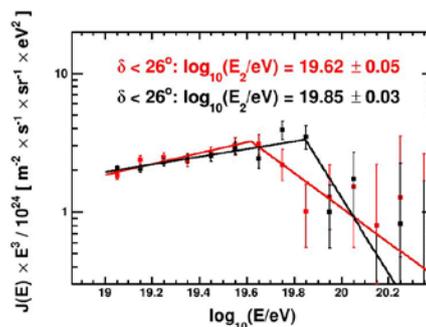


図2：TAの $\delta < 26^\circ$ のスペクトル（●）、 $\delta > 26^\circ$ のスペクトル（●）

#### 2) 中規模角度スケールでのスペクトル異方性

TAでは5年間の $5.7 \times 10^{19}\text{eV}$ 以上のデータを用いてR.A. (赤経) =  $146^\circ$ 、 $\delta = 43.2^\circ$ を中心とした $20^\circ$ の半径の円の中に最大の有意度をもった異方性を捉えた[3]。7年間のデータを用いても

同様の有意度を得た。図3は赤緯10°以上のTAの視野内で oversampling して、 $10^{19.2}\text{eV}$ 以上の宇宙線に対して、赤緯に関して平均的な半径が30°の円内と円外で求めたエネルギー分布の差の統計的な有意度 (local pre-trial significance) の分布である。Local pre-trial significance が最大になるのは、[3]の hot spot の中心から7°離れたところにあり、その場合の円の内外のエネルギー分布を図4に示す。最大の値が、 $6.7\sigma$ であり、一様分布の場合に偶然この値を超える確率は $4\sigma$ である。 $10^{19.2} < E < 10^{19.75}\text{eV}$ の宇宙線の deficit (cold spot)が見られる。

### 3) 質量組成

TAの3つの大気蛍光望遠鏡(FD)サイトのうちのBRまたはLRサイトのFDと地表検出器(SD)で観測したハイブリッド事象解析で求めた $X_{\text{max}}$ の平均のエネルギーとの関係を図5に示した[5]。モデルはQGSJET II-03またはQGSJET II-04ハドロン相互作用モデルである。 $10^{18.2}\text{eV}$ 以上の宇宙線では軽い組成と矛盾がない。

### 参考文献

[1] T. Nonaka, “Anisotropy search in energy distribution using the Telescope Array surface detector data”, UHECR2016

(<https://indico.cern.ch/event/504078/>)

[2] D. Ivanov, “TA Spectrum Summary”, UHECR2016

[3] R.U. Abbasi, *Astrophys. J.* 790 (2014) L21.

[4] P. Tinyakov, “TA ANISOTROPY SUMMARY”, UHECR2016

[5] W. Hanlon, “Composition Measurements via Depth of Air Shower Maximum at the Telescope Array”, UHECR2016

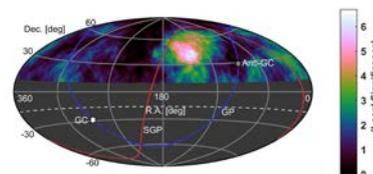


図3:  $E > 10^{19.2}\text{eV}$ で緯度に関して平均的な円の半径が30°の場合の local pre-trial スペクトル異方性の significance の分布を赤道座標で示す。

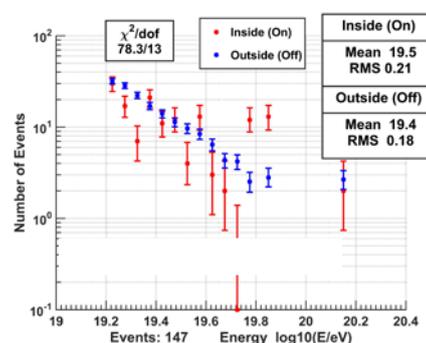


図4: 最大 local pre-trial significance を得た場合の円内(■)と円外(■)のエネルギー分布

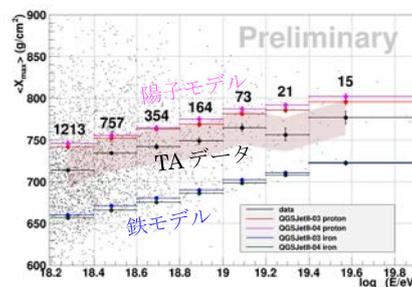


図5: TAのBRまたはLRサイトのFDとSDで観測したハイブリッド事象を用いて求めた平均 $X_{\text{max}}$ のエネルギー依存性。斜線部分は系統的な誤差を表す。TAデータとともに陽子モデルと鉄モデルの結果を示す。使っているモデルはQGSJET II-03とQGSJET II-04ハドロン相互作用である。