

## 宇宙線望遠鏡による 極高エネルギー宇宙線の研究

### 東大 宇宙線研 得能久生

### TA関連 平成26年度共同利用研究採択課題

整理 番号	課題名	研究代表者	合計額 (千円)
F11	宇宙線望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の研究	佐川宏行	900
F12	TA地表粒子検出器による雷と関連する特異事象観測	奥田剛司	500
F13	小型電子線形加速器による空気シャワーエネルギーの絶対較正の研究	芝田達伸	700
F14	TA-EUSO64chマルチアノードPMTの較正とCRAYSとの比較	竹田成宏	500
F15	TALE実験用地表検出器の開発と性能試験	荻尾彰一	200
F16	最高エネルギー宇宙線の電波的観測の研究	池田大輔	700
F17	大気分子制動放射マイクロ波の検出と検出器開発	山本常夏	300
F18	TA実験サイトでの超高エネルギー宇宙線観測のための新型検出器の開発	野中敏幸	600
F19	紫外線撮像望遠鏡によるTAサイトでの空気シャワー蛍光光の観測	川崎賀也	400
F31	ARA検出器較正のためのビーム実験	吉田滋	400
計	10課題		5,200

ご支援ありがとうございます



- 宇宙線望遠鏡 (TA) 実験
- 最近の解析結果
  - 到来方向
  - 組成
  - エネルギースペクトル
- TA実験の拡張計画
- 関連観測、R&D
- ・まとめ

### The Telescope Array Collaboration

R.U.Abbasi<sup>1</sup>, M.Abe<sup>13</sup>, T.Abu-Zayyad<sup>1</sup>, M.Allen<sup>1</sup>, R.Anderson<sup>1</sup>, R.Azuma<sup>2</sup>, E.Barcikowski<sup>1</sup>, J.W.Belz<sup>1</sup>, D.R.Bergman<sup>1</sup>, S.A.Blake<sup>1</sup>, R.Cady<sup>1</sup>, M.J.Chae<sup>3</sup>, B.G.Cheon<sup>4</sup>, J.Chiba<sup>5</sup>, M.Chikawa<sup>6</sup>, W.R.Cho<sup>7</sup>, T.Fujii<sup>8</sup>, M.Fukushima<sup>8,9</sup>, T.Goto<sup>10</sup>, W.Hanlon<sup>1</sup>, Y.Hayashi<sup>10</sup>, N.Hayashida<sup>11</sup>, K.Hibino<sup>11</sup>, K.Honda<sup>12</sup>, D.Ikeda<sup>8</sup>, N.Inoue<sup>13</sup>, T.Ishii<sup>12</sup>, R.Ishimori<sup>2</sup>, H.Ito<sup>14</sup>, D.Ivanov<sup>1</sup>, C.C.H.Jui<sup>1</sup>, K.Kadota<sup>16</sup>, F.Kakimoto<sup>2</sup>, O.Kalashev<sup>17</sup>, K.Kasahara<sup>18</sup>, H.Kawai<sup>19</sup>, S.Kawakami<sup>10</sup>, S.Kawana<sup>13</sup>, K.Kawata<sup>8</sup>, E.Kido<sup>8</sup>, H.B.Kim<sup>4</sup>, J.H.Kim<sup>1</sup>, J.H.Kim<sup>25</sup>, S.Kitamura<sup>2</sup>, Y.Kitamura<sup>2</sup>, V.Kuzmin<sup>17</sup>, Y.J.Kwon<sup>7</sup>, J.Lan<sup>1</sup>, S.I.Lim<sup>3</sup>, J.P.Lundquist<sup>1</sup>, K.Machida<sup>12</sup>, K.Martens<sup>9</sup>, T.Matsuda<sup>20</sup>, T.Matsuyama<sup>10</sup>, J.N.Matthews<sup>1</sup>, M.Minamino<sup>10</sup>, K.Mukai<sup>12</sup>, I.Myers<sup>1</sup>, K.Nagasawa<sup>13</sup>, S.Nagataki<sup>14</sup>, T.Nakamura<sup>21</sup>, T.Nonaka<sup>8</sup>, A.Nozato<sup>6</sup>, S.Ogio<sup>10</sup>, J.Ogura<sup>2</sup>, M.Ohnishi<sup>8</sup>, H.Ohoka<sup>8</sup>, K.Oki<sup>8</sup>, T.Okuda<sup>22</sup>, M.Ono<sup>14</sup>, A.Oshima<sup>10</sup>, S.Ozawa<sup>18</sup>, I.H.Park<sup>23</sup>, M.S.Pshirkov<sup>24</sup>, D.C.Rodriguez<sup>1</sup>, G.Rubtsov<sup>17</sup>, D.Ryu<sup>25</sup>, H.Sagawa<sup>8</sup>, N.Sakurai<sup>10</sup>, A.L.Sampson<sup>1</sup>, S.R.Stratton<sup>1,15</sup>, T.A.Stroman<sup>1</sup>, T.Suzawa<sup>13</sup>, M.Takamura<sup>5</sup>, M.Takeda<sup>8</sup>, R.Takeishi<sup>8</sup>, A.Taketa<sup>26</sup>, M.Takita<sup>8</sup>, Y.Tameda<sup>11</sup>, H.Tanaka<sup>10</sup>, K.Tanaka<sup>27</sup>, M.Tanaka<sup>20</sup>, S.B.Thomas<sup>1</sup>, G.B.Thomson<sup>1</sup>, P.Tinyakov<sup>17,24</sup>, I.Tkachev<sup>17</sup>, H.Tokuno<sup>2</sup>, T.Tomida<sup>28</sup>, S.Troitsky<sup>17</sup>, Y.Tsunesada<sup>2</sup>, K.Tsutsumi<sup>2</sup>, Y.Uchihori<sup>29</sup>, S.Udo<sup>11</sup>, F.Urban<sup>24</sup>, G.Vasiloff<sup>1</sup>, T.Wong<sup>1</sup>, R.Yamane<sup>10</sup>, H.Yamaoka<sup>20</sup>, K.Yamazaki<sup>10</sup>, J.Yang<sup>3</sup>, K.Yashiro<sup>5</sup>, Y.Yoneda<sup>10</sup>, S.Yoshida<sup>19</sup>, H.Yoshii<sup>30</sup>, R.Zollinger<sup>1</sup>, Z.Zundel<sup>1</sup>

 <sup>1</sup>University of Utah, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Ewha Womans University, <sup>4</sup>Hanyang University, <sup>5</sup>Tokyo University of Science, <sup>6</sup>Kinki University, <sup>7</sup>Yonsei University, <sup>8</sup>ICRR University of Tokyo, <sup>9</sup>Kavli IPMU University of Tokyo, <sup>10</sup>Osaka City University, <sup>11</sup>Kanagawa University, <sup>12</sup>University of Yamanashi, <sup>13</sup>Saitama University, <sup>14</sup>Astrophysical Big Bang Laboratory, RIKEN, <sup>15</sup>Rutgers University - The State University of New Jersey, <sup>16</sup>Tokyo City University, <sup>17</sup>INR of the Russian Academy of Sciences, <sup>18</sup>Waseda University, <sup>19</sup>Chiba University, <sup>20</sup>KEK, <sup>21</sup>Kochi University, <sup>22</sup>Ritsumeikan University, <sup>23</sup>Sungkyunkwan University,
 <sup>24</sup>University Libre de Bruxelles, <sup>25</sup>Ulsan National Institute of Science and Technology, <sup>26</sup>Earthquake Research Institute University of Tokyo, <sup>27</sup>Hiroshima City University, <sup>28</sup>Advanced Science Institute, RIKEN, <sup>29</sup>National Institute of Radiological Science, <sup>30</sup>Ehime University







Distance North, [1200m]

### 地表粒子検出器



### プラスチックシンチレータ2層

検出器間の時刻差 - <del>到来方向</del> 粒子数の横方向分布 - エネルギー推定









空気シャワーのトラック







大気蛍光望遠鏡

撮像カメラ: 1m<sup>2</sup> (PMT256本) 球面鏡: 6.8 m<sup>2</sup> 日本担当: 南側 2つのサイト 2013年7月より 近郊の街から遠隔操作 視野中を横切る空気シャワーのトラック タイミング情報からジオメトリ決定

• 到来方向

空気シャワーの縦方向発達を再構成

- エネルギー
  - ・ X<sub>max</sub>(粒子種情報)

# 2014年 査読付論文

### アクセプト5, 査読中2

### 到来方向

- 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
  - R.U. Abbasi et al., The Astrophysical Journal Letters, v790, (2014), article id. L21, 5 pp.
- A northern sky survey for point-like sources of EeV neutral particles with the Telescope Array Experiment
  - R.U. Abbasi et al., 査読中 (arXiv:1407.6145)
- Searches for large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays detected above energy of 10<sup>19</sup> eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array
  - A.Aab et al. (Auger & TA) The Astrophysical Journal, v794, (2014) article id. 172, 15 pp.
- Study of ultra-high energy cosmic ray composition using Telescope Array's Middle Drum detector and surface array in hybrid mode
  - R.U. Abbasi et al., Astroparticle physics in press doi:10.1016/j.astropartphys.2014.11.004
  - Energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays observed with the Telescope Array using a hybrid technique
    - T. Abu-Zayyad et al. Astroparticle physics v61 (2015) 93-101
  - The hybrid energy spectrum of TA's Middle Drum detector and surface array
    - R.U. Abbasi et al., 査読中 (arXiv:1410.3151)
- Gain monitoring of telescope array photomultiplier cameras for the first 4 years of operation
  - B.K. Shin et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 768 (2014) 96-103

#### 組成

エネルギ-

スペクトル

#### 技術論文

# 到来方向

- E>10<sup>18</sup>eV 点源探索など
- E>10<sup>19</sup>eV 全天の事象を使った異方性解析
- E>5.7x10<sup>19</sup>eV Hot Spot

### 全天の事象(E>10<sup>19</sup>eV)を使った 異方性解析

### TA-Auger 合同解析



TA: 天頂角 55度まで E > 10<sup>19</sup>eV Auger: 天頂角 60度まで E > 8.5x10<sup>18</sup>eV 視野の重なっている領域の Flux は 等しいと仮定する

#### Significance map



#### 有意な excess はみられない

A.Aab et al. (Auger & TA) The Astrophysical Journal, v794, (2014) article id. 172, 15 pp.

E>10<sup>19</sup>eV で到来方向は一様等方仮定に無矛盾

# Hot Spot (5年間)

- エネルギー閾値: E> 5.7 x 10<sup>19</sup>eV
- 半径20度の円
- 400%の異方性 (観測事象数 /一様等方の場合の期待値 = 19 / 4.5)
- Pre-trial significance: 5.1σ
- Post-trial significance: 3.7x10<sup>-4</sup> (3.4σ)
- ・ 異方性の兆候



R.U. Abbasi et al., The Astrophysical Journal Letters, v790, (2014), article id. L21, 5 pp. プレスリリース: 川田、佐川ほか

# Hot Spot (6年間)

- エネルギー閾値: E> 5.7 x 10<sup>19</sup>eV
- 半径20度の円
- HotSpot 内事象数/全事象数: 19/72 (5年間) → 23/87 (6年間) 割合変わらず
- Pre-trial significance: 5.55σ
- Post-trial significance: 3.1x10<sup>-4</sup> (4σ)
- 有意度増加 3.7 σ → 4 σ

到来方向(6年間) E> 5.7 x 10<sup>19</sup>eV





P. Tinyakov et al., UHECR2014

### 現在進行中の取組み

- TA Auger, Ice Cube 合同解析
  - 国際会議 UHECR 2014 (2010年 より隔年開催)のworking group として発足
  - 解析手法の確立に向けた議論が始まっている

UHECR そのほかの working group

- Anisotropy
  - TA-Auger
  - TA, Auger, Ice Cube 合同解析
    - 解析手法の確立に向けた議論が始まっている
- Energy Spectrum
  - High Energy
  - Low Energy
- Composition
- Multimessenger
- Hadronic Interactions
- UHECR 2014発表資料は以下のページにあります
  - <u>http://uhecr2014.telescopearray.org/schedule.html</u>

組成

- 大気蛍光望遠鏡による X<sub>max</sub> 測定
  - Mono + 地表検出器のデータを使った測定
    - ・地表検出器からシャワーコア到来時刻 → X<sub>max</sub>高精度化
  - Stereo
  - Mono
  - Mono+地表検出器(外部トリガーモード)

### 空気シャワー縦方向発達深さによる解析

Mono + 地表検出器情報

最大発達点: X<sub>max</sub> 分布





(アップデートされた相互作用モデルを現在解析中)

R.U. Abbasi et al., Astroparticle physics in press doi:10.1016/j.astropartphys.2014.11.004

# エネルギースペクトル

- ・ 地表検出器アレイ(TA最大の統計量)
- 大気蛍光望遠鏡
  - Mono
  - Stereo
  - Mono+地表検出器
  - Mono+地表検出器(外部トリガーモード)

### エネルギースペクトル



モデル計算 Kalashev & Kido JETP accepted arXiv:1406.0735

## 拡張計画

- - TA x 4 (高統計)
- 超高エネルギー宇宙線起源遷移の解明

– TALE (TA Low Energy Extension)

# TA x 4



### GZK cut オフと矛盾のない結果

起源天体は近傍(~100Mpc) 到来方向は近傍天体分布の 非一様性を反映する期待大

事象数の飛躍的な増加によって <mark>異方性の兆候に対する結論を得る</mark> 微細構造が見え始める可能性 点源天体の探索

現在の地表検出器アレイ面積を4倍に 2.1 km spacing 500台 (日本、ロシアほか) 望遠鏡を2カ所に追加(米国)

今後建設2年、観測3年で、これまでの 観測と合わせて 現 TA の21年分 (発表済み6年分事象数の 3.5倍)

### **TALE(TA Low Energy Extension)**

- ・ 銀河系内から銀河系外へと起源の遷移が 期待されるエネルギー領域まで エネルギー閾値を下げる 10<sup>18</sup> eV → 10<sup>16</sup>eV
- 大気蛍光望遠鏡 北ステーション (米国など)
  高仰角 (2013年9月より全台稼働)
- 地表検出器(日本担当)
  - Spacing: 400m, 600m, 1200 m, 計103台
  - 400m:35台設置、16台稼働 (2013年4月)





### TALE 望遠鏡による エネルギースペクトル



### **NICHE: Non Imaging Cherenkov observation**





- エネルギー範囲: 10<sup>15</sup>—10<sup>18</sup>eV
- Spacing: 200m, 400m
- まず400m*,* <mark>15台設置予定</mark> (2015年)
- dX<sub>max</sub>: +/-20g cm<sup>-2</sup>

- PMTで直接上空をみる
- チェレンコフ光波形の時間幅
  → X<sub>max</sub>

(D.Bergman, Y.Tsunesada et al. UHECR2014)

### 関連観測、R&D

### 世界の共同試験施設としてのTAサイト

#### • ミュー粒子検出器

- TA地表検出器を改良したミュー粒子検出器など (宇宙線研 野中 F18)
- 北Auger水タンク (コロラド鉱山大ほか)
- Electron Light Source
  - TA独自の大気蛍光望遠鏡エネルギースケールの確立 (KEK 芝田 F13)
- 地表検出器アレイバースト事象
  - 雷との相関 9地点に VHFアンテナを設置し雷の測定 (New Mexico Techほか)
  - 雷との相関 5地点に定常的な検出器設置予定 (立命館 奥田 F12)
- 電波による空気シャワー検出 R&D
  - 電波エコー法 TARA (TA-RADAR) (宇宙線研 池田 F16)
  - 分子制動放射 (甲南大山本 F17), KIT, シカゴ大
  - ARA 検出器 (千葉大 吉田 F31)
- TA-EUSO (理研 川崎 F19), (宇宙線研 竹田 F14)
- 新規望遠鏡 FAST (シカゴ大ほか)
- Auger で開発されたFD用較正光源を使った試験 (KIT ほか)

### 発表会後の補足

- 発表会にて次ページ(p25)下図の1MIP ヒストグラムに関して西村先生より "この図はミュー粒子数の観測量とMCに矛盾がないことを表すのか?"
- という旨の質問を頂きました。
- それに対する正確な答え
  - この図はPMTゲインキャリブレーションの目的で製作しました。
  - 閾値と 1MIPのshape の一致度をみるために、実データの 1MIP peak 位置と
    MCの1MIP peak 位置をゲインをパラメータとしてフィットしています。
  - 現在、並行して Absolute キャリブレーションは進行中で、 フィットで得られたゲインと矛盾がないかどうかを確認します。
  - 今後、実際のシャワーイベントを観測することで、 空気シャワー中のミュー粒子数の観測量とMCによる値の比較を行います。

## ミュー粒子検出器

目的

- MCシミュレーションと観測データの不一致の原因を探る など

- TA: 地表検出器のMCエネルギースケールを補正 E<sub>FD</sub>=E<sub>SD</sub> / 1.27
- Auger: ミュー粒子数の過剰 観測量は MC の およそ 1.8倍
- 現行TA地表検出器を基にしてミュー粒子検出
  - 2層のシンチレーターの間に 厚さ25mm 鉛
    - 2013年:稼働開始
  - 地表検出器の上に 厚さ 1.2m コンクリート
    - 2015年初旬:稼働開始予定
- Auger 水タンクをTAサイトで運用
  - Auger 水タンク (Auger North 用)
    - 2014年10月:1台目稼働開始

(T.Nonaka, R.Takeishi et al. UHECR2014)

#### MCデータで1MIP 分布をフィットしゲインを推定した

PMT出力波形



# **Electron light source**



<sup>(</sup>T.Shibata et.al. JPS2014Mar)

現在TAで使用している発光効率モデルよりも発光効率が高いことを示唆 ELS による大気蛍光望遠鏡エネルギースケールの確立に向けて バックグラウンドなどの補正量に関する測定や解析が進行中 共同利用施設としても活躍 (さまざまな波長の電波による検出R&D)

# まとめ

- TAは2008年から順調に観測を継続
- 観測結果
  - 到来方向は E>5.7 x 10<sup>19</sup>eV: 異方性の兆候 (Hot Spot)
  - 組成は陽子(軽原子核)モデルと consistent
  - エネルギースペクトルは銀河系外起源陽子モデルと consistent
    - 到来方向が近傍の系外天体分布の非一様性を反映する期待大
- 拡張計画
  - TA x 4: 高統計により、異方性の兆候に結論
  - TALE: 低エネルギー側に拡張し、宇宙線起源遷移の解明
- 世界の共同試験施設としてのTA観測サイト
  - 関連観測やR&D
    - ミュー粒子検出器
    - ・ 雷との相関
    - ・ 電波による空気シャワー検出などのR&D
    - など