

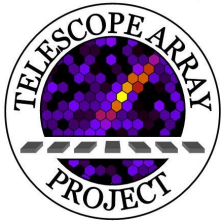
# 宇宙線望遠鏡による 極高エネルギー宇宙線の研究

---

川田 和正

東京大学 宇宙線研究所

For the Telescope Array Collaboration



# Telescope Array Collaboration

T Abu-Zayyad<sup>1</sup>, R Aida<sup>2</sup>, M Allen<sup>1</sup>, R Azuma<sup>3</sup>, E Barcikowski<sup>1</sup>, JW Belz<sup>1</sup>, T Benno<sup>4</sup>, DR Bergman<sup>1</sup>, SA Blake<sup>1</sup>, O Brusova<sup>1</sup>, R Cady<sup>1</sup>, BG Cheon<sup>6</sup>, J Chiba<sup>7</sup>, M Chikawa<sup>4</sup>, EJ Cho<sup>6</sup>, LS Cho<sup>8</sup>, WR Cho<sup>8</sup>, F Cohen<sup>9</sup>, K Doura<sup>4</sup>, C Ebeling<sup>1</sup>, H Fujii<sup>10</sup>, T Fujii<sup>11</sup>, T Fukuda<sup>3</sup>, M Fukushima<sup>9,22</sup>, D Gorbunov<sup>12</sup>, W Hanlon<sup>1</sup>, K Hayashi<sup>3</sup>, Y Hayashi<sup>11</sup>, N Hayashida<sup>9</sup>, K Hibino<sup>13</sup>, K Hiyama<sup>9</sup>, K Honda<sup>2</sup>, G Hughes<sup>5</sup>, T Iguchi<sup>3</sup>, D Ikeda<sup>9</sup>, K Ikuta<sup>2</sup>, SJJ Innemee<sup>5</sup>, N Inoue<sup>14</sup>, T Ishii<sup>2</sup>, R Ishimori<sup>3</sup>, D Ivanov<sup>5</sup>, S Iwamoto<sup>2</sup>, CCH Jui<sup>1</sup>, K Kadota<sup>15</sup>, F Kakimoto<sup>3</sup>, O Kalashev<sup>12</sup>, T Kanbe<sup>2</sup>, H Kang<sup>16</sup>, K Kasahara<sup>17</sup>, H Kawai<sup>18</sup>, S Kawakami<sup>11</sup>, S Kawana<sup>14</sup>, E Kido<sup>9</sup>, BG Kim<sup>19</sup>, HB Kim<sup>6</sup>, JH Kim<sup>6</sup>, JH Kim<sup>20</sup>, A Kitsugi<sup>9</sup>, K Kobayashi<sup>7</sup>, H Koers<sup>21</sup>, Y Kondo<sup>9</sup>, V Kuzmin<sup>12</sup>, YJ Kwon<sup>8</sup>, JH Lim<sup>16</sup>, SI Lim<sup>19</sup>, S Machida<sup>3</sup>, K Martens<sup>22</sup>, J Martineau<sup>1</sup>, T Matsuda<sup>10</sup>, T Matsuyama<sup>11</sup>, JN Matthews<sup>1</sup>, M Minamino<sup>11</sup>, K Miyata<sup>7</sup>, H Miyauchi<sup>11</sup>, Y Murano<sup>3</sup>, T Nakamura<sup>23</sup>, SW Nam<sup>19</sup>, T Nonaka<sup>9</sup>, S Ogio<sup>11</sup>, M Ohnishi<sup>9</sup>, H Ohoka<sup>9</sup>, T Okuda<sup>11</sup>, A Oshima<sup>11</sup>, S Ozawa<sup>17</sup>, IH Park<sup>19</sup>, D Rodriguez<sup>1</sup>, SY Roh<sup>20</sup>, G Rubtsov<sup>12</sup>, D Ryu<sup>20</sup>, H Sagawa<sup>9</sup>, N Sakurai<sup>9</sup>, LM Scott<sup>5</sup>, PD Shah<sup>1</sup>, T Shibata<sup>9</sup>, H Shimodaira<sup>9</sup>, BK Shin<sup>6</sup>, JD Smith<sup>1</sup>, P Sokolsky<sup>1</sup>, TJ Sonley<sup>1</sup>, RW Springer<sup>1</sup>, BT Stokes<sup>1</sup>, TA Stroman<sup>1</sup>, SR Stratton<sup>5</sup>, S Suzuki<sup>10</sup>, Y Takahashi<sup>9</sup>, M Takeda<sup>9</sup>, A Taketa<sup>9</sup>, M Takita<sup>9</sup>, Y Tameda<sup>3</sup>, H Tanaka<sup>11</sup>, K Tanaka<sup>24</sup>, M Tanaka<sup>10</sup>, JR Thomas<sup>1</sup>, SB Thomas<sup>1</sup>, GB Thomson<sup>1</sup>, P Tinyakov<sup>12,21</sup>, I Tkachev<sup>12</sup>, H Tokuno<sup>9</sup>, T Tomida<sup>2</sup>, R Torii<sup>9</sup>, S Troitsky<sup>12</sup>, Y Tsunesada<sup>3</sup>, Y Tsuyuguchi<sup>2</sup>, Y Uchihori<sup>25</sup>, S Udo<sup>13</sup>, H Ukai<sup>2</sup>, B Van Klaveren<sup>1</sup>, Y Wada<sup>14</sup>, M Wood<sup>1</sup>, T Yamakawa<sup>9</sup>, Y Yamakawa<sup>9</sup>, H Yamaoka<sup>10</sup>, J Yang<sup>19</sup>, S Yoshida<sup>18</sup>, H Yoshii<sup>26</sup>, Z Zundel<sup>1</sup>

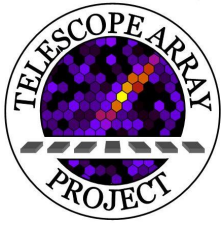
<sup>1</sup>University of Utah, <sup>2</sup>University of Yamanashi, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>Kinki University,  
<sup>5</sup>Rutgers University, <sup>6</sup>Hanyang University, <sup>7</sup>Tokyo University of Science, <sup>8</sup>Yonsei University,  
<sup>9</sup>Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, <sup>10</sup>Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK,  
<sup>11</sup>Osaka City University, <sup>12</sup>Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences,  
<sup>13</sup>Kanagawa University, <sup>14</sup>Saitama University, <sup>15</sup>Tokyo City University, <sup>16</sup>Pusan National University,  
<sup>17</sup>Waseda University, <sup>18</sup>Chiba University <sup>19</sup>Ewha Womans University, <sup>20</sup>Chungnam National University,  
<sup>21</sup>University Libre de Bruxelles, <sup>22</sup>University of Tokyo, <sup>23</sup>Kochi University, <sup>24</sup>Hiroshima City University,  
<sup>25</sup>National Institute of Radiological Science, Japan, <sup>26</sup>Ehime University

日本、米国、韓国、ロシア、ベルギー  
～140名、26機関

# 24年度共同利用研究採択課題

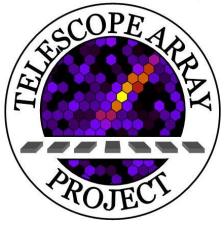
課題名	申請者	研究費 (千円)	旅費 (千円)	合計 (千円)
最高エネルギー宇宙線の 電波的観測の研究	池田大輔	600	300	900
空気シャワーからのマイクロ波の 検出と検出器開発	荻尾彰一	300	300	600
宇宙線望遠鏡による 極高エネルギー宇宙線の研究	佐川宏行	0	1000	1000
小型電子加速器による空気シャワー エネルギーの絶対較正の研究	芝田達伸	1000	300	1300
ラジコンヘリコプターによる TA大気蛍光望遠鏡のキャリブレーション	多米田裕一郎	400	200	600
絶対光量測定による 新型大気モニタ装置の開発	千川道幸	200	400	600
TA実験サイトでの超高エネルギー 宇宙線のための新型検出器の開発	野中敏幸	400	200	600
	合計	2900	2700	5600

ご支援ありがとうございます



# 2012年 博士論文

- Measurements of the Energy Spectrum and the Mass Composition of Ultra-High Energy Cosmic Rays with Telescope Array Fluorescence Detectors in Monocular Mode,  
T. Fujii, PhD Thesis (Osaka City University) (2012)
- Energy Spectrum Measured by the Telescope Array Surface Detector,  
D. Ivanov, PhD Thesis (Rutgers, The State University of New Jersey) (2012)
- Measurement of the Flux of Ultra-High Energy Cosmic Rays by the Telescope Array FADC Fluorescence Detectors,  
S. Stratton, PhD thesis (Rutgers, The State University of New Jersey) (2012)
- Ultra High Energy Cosmic Ray Energy Spectrum and Composition using Hybrid Analysis with Telescope Array,  
M. Allen, PhD thesis (University of Utah) (2012)

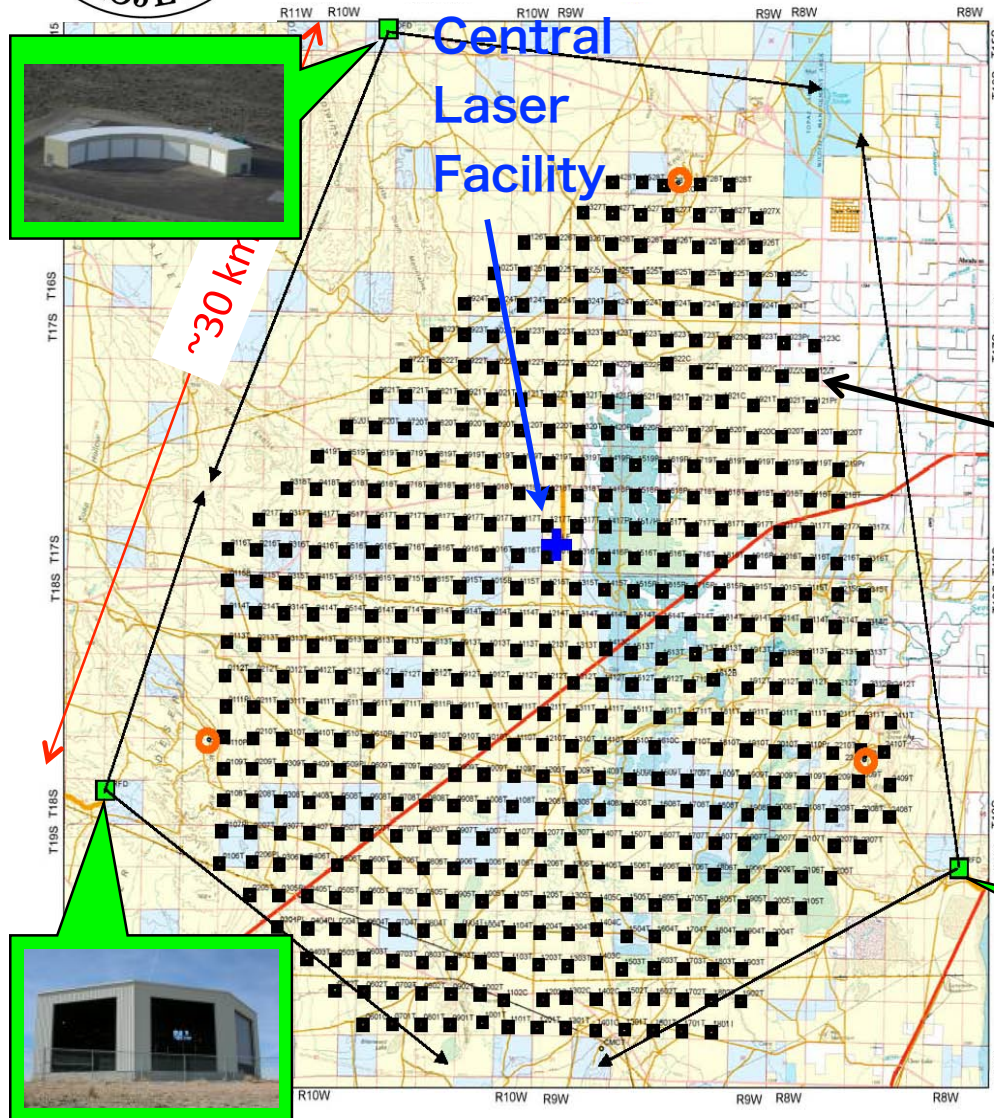


# 2012年 査読論文

- The Energy Spectrum of Telescope Array's Middle Drum Detector and the Direct Comparison to the High Resolution Fly's Eye Experiment, Abu-Zayyad et al., Astroparticle Physics, 39-40, 109-119 (2012)
- The Surface Detector Array of the Telescope Array Experiment, Abu-Zayyad et al. NIM A, 689, 87-97 (2012)
- New Air Fluorescence Detectors Employed in the Telescope Array Experiment, Tokuno et al., NIM A, 676, 54-65 (2012)
- Search for Anisotropy of Ultrahigh Energy Cosmic Rays with the Telescope Array Experiment. Abu-Zayyad et al., ApJ, 757, 26 (2012)
- The Cosmic Ray Energy Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment, Abu-Zayyad et al., submitted (2012) (arXiv:1205.5067)



# Telescope Array Configuration



## ● Location

- Utah, USA
- 39.3oN., 112.9oW.
- ~1400 m a.s.l.

地表シンチ検出器

## ● Surface Detectors (SD)

- 507 scintillator detectors
- 1.2 km spacing, 680 km<sup>2</sup>



## ● Fluorescence Detectors (FD)

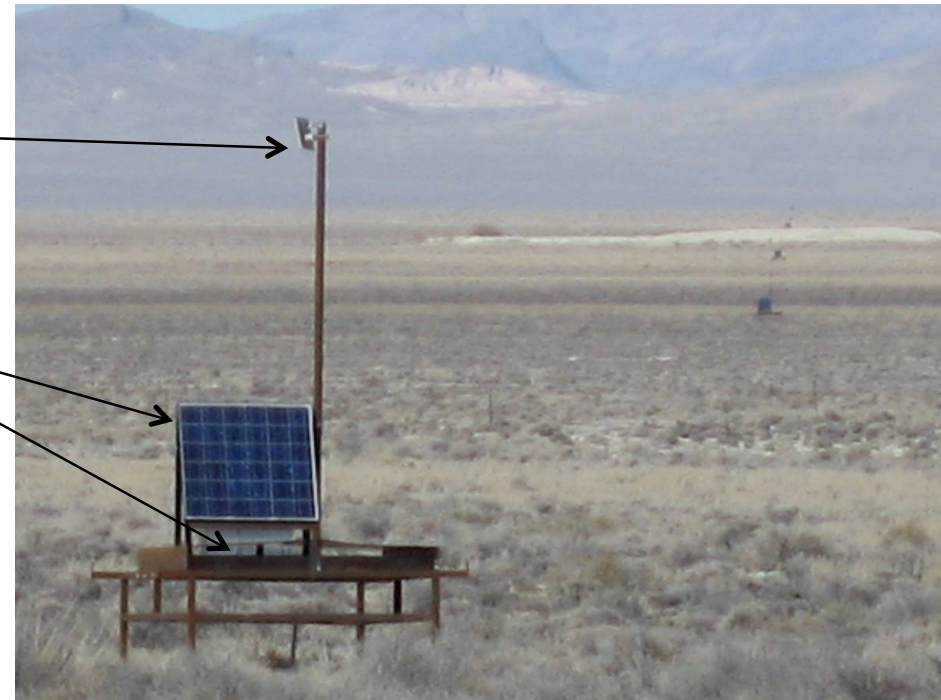
- 3 FD stations 大気蛍光望遠鏡





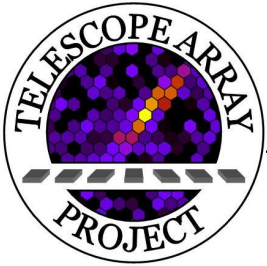
# TA Surface Detector

- Radio readout
- Powered by solar cells
- Plastic scintillator
  - 2 layers
  - 3 m<sup>2</sup>, 1.2 cm t
- Self-calibration using single muons
- In operation since May, 2008



今年度は約270台分の寿命が近づいているバッテリーを交換した。

(average efficiency: 96%)



# TA Fluorescence Detectors

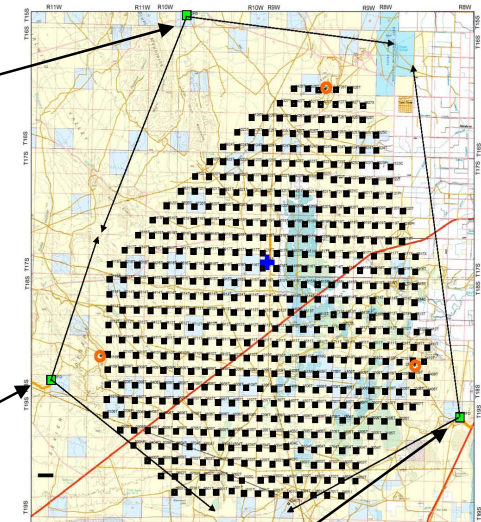
## Middle Drum

Refurbished  
from HiRes

Observation  
started Dec.  
2007



14 cameras/station  
256 PMTs/camera



~30km

Observation  
started Nov.  
2007

## Long Ridge



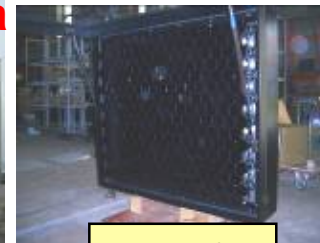
256 PMTs/camera  
HAMAMATSU R9508  
FOV~15x18deg  
12 cameras/station

Observation  
started Jun.  
2007

## Black Rock Mesa



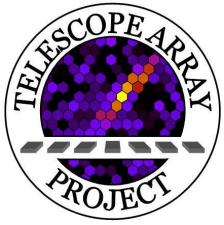
## New FDs



~1 m<sup>2</sup>



6.8 m<sup>2</sup>



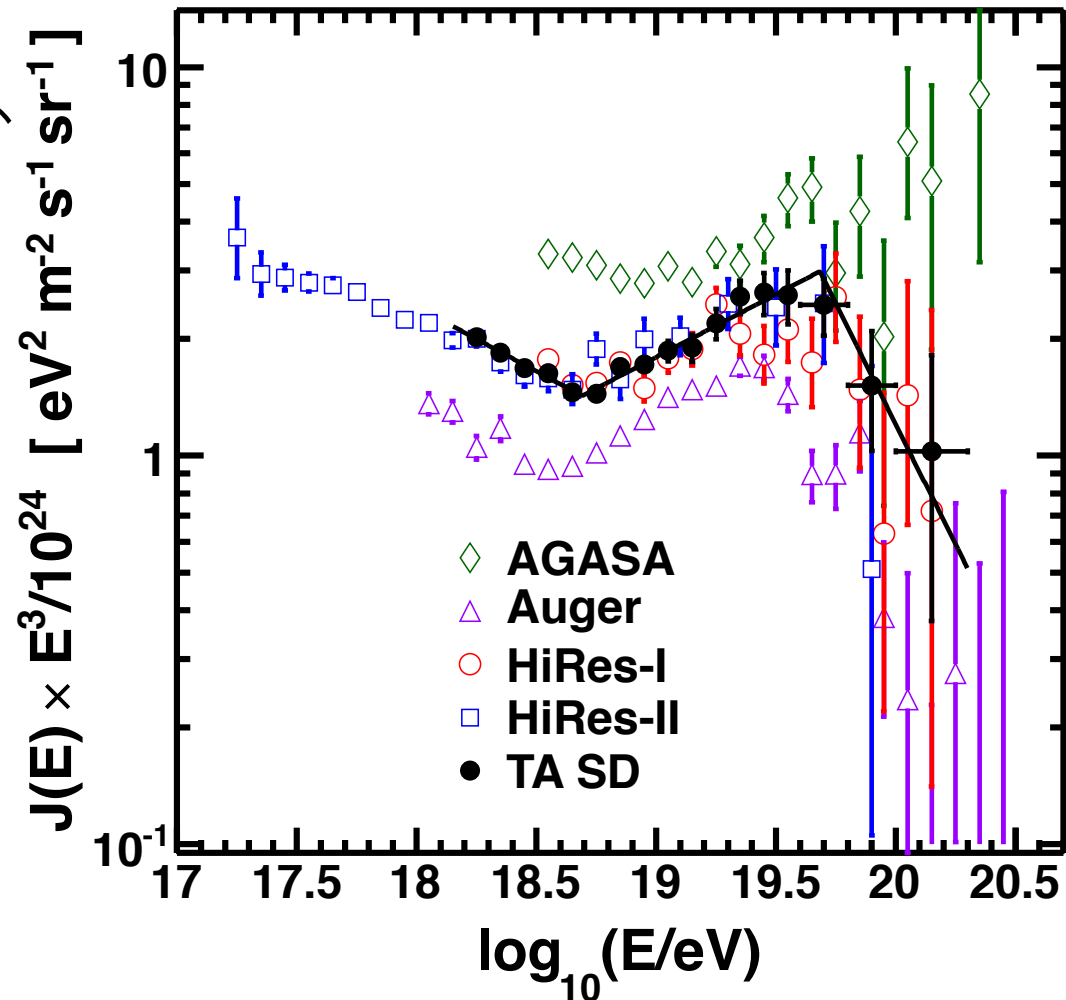
# SD: エネルギースペクトル

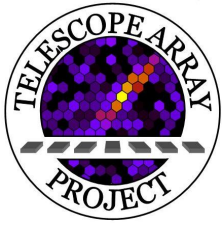
Abu-Zayyad et al., arXiv:1205.5067 (2012)

Rescale  
SD Energy

$$E_{SD} = \frac{1}{\left\langle \frac{E'_{SD}}{E_{FD}} \right\rangle_{hyb}} E'_{SD} = \frac{1}{1.27} E'_{SD}$$

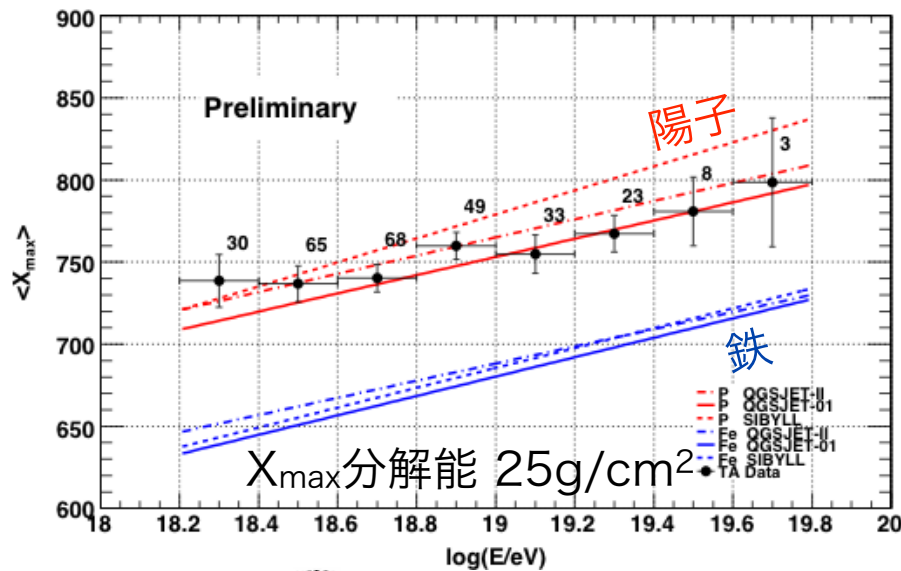
- Suppression:  
5x10<sup>19</sup>eVで折れ曲がり、  
延長は3.9σで否定
- エネルギースケール:  
AGASA (-20%)  
Auger (+20%)
- エネルギー系統誤差  
TAとAuger共に~20%



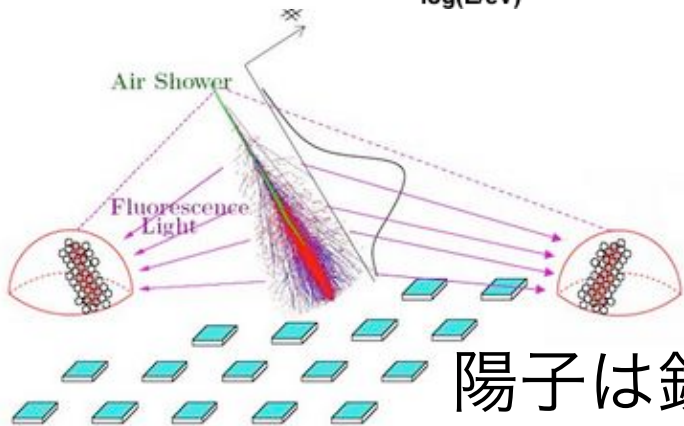
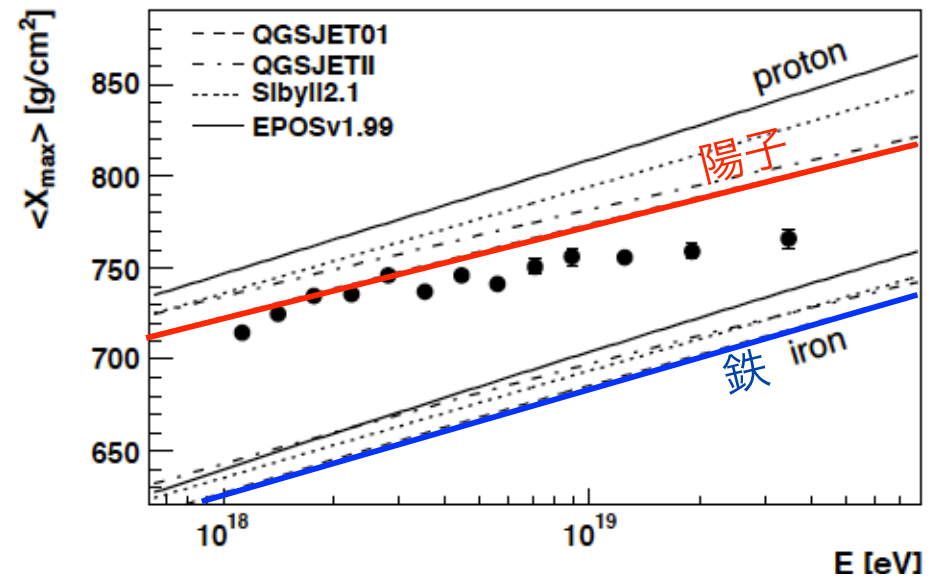


# FD: 質量組成(陽子/鉄) A paper in preparation

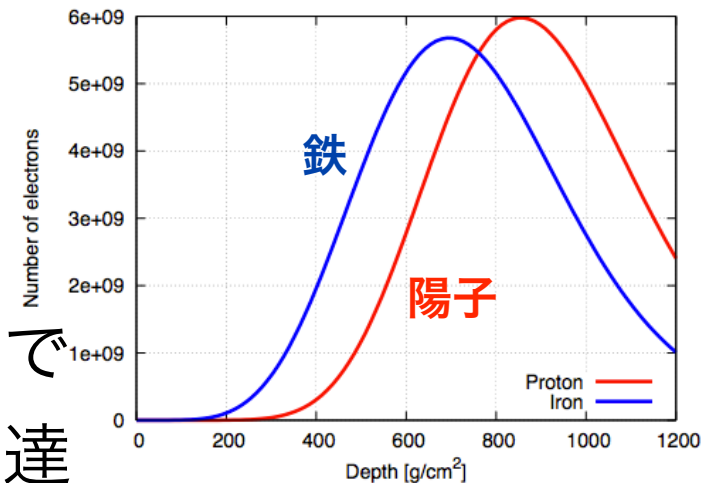
TA 観測 2.9年

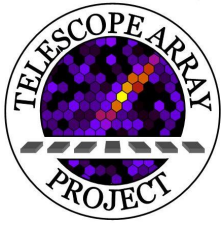


Auger 観測 4.3年



陽子は鉄より大気深くで  
空気シャワーが最大発達





# SD: AGNとの相関

Abu-Zayyad et al., ApJ, 757, 26 (2012)

$>10\text{EeV}$ ,  $40\text{EeV}$ ,  $57\text{EeV}$

一様分布と一致

$>57\text{ EeV}$  25イベント

11イベント相関あり ● (半径  $3.1^\circ$ 窓)

14イベント相関なし ○

VCV AGN( $<75\text{Mpc}$ ) •

ランダム相関 5.9イベント

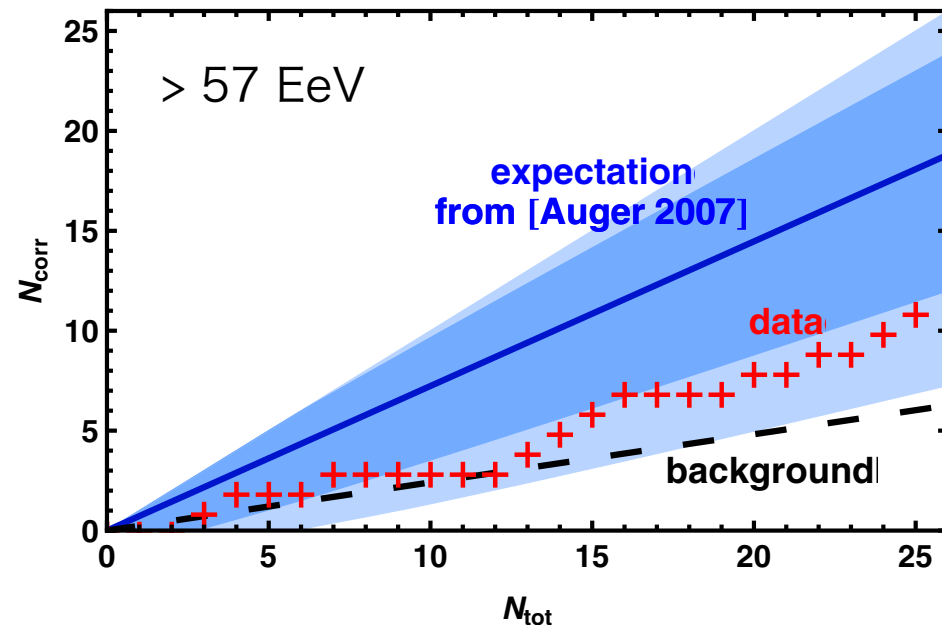
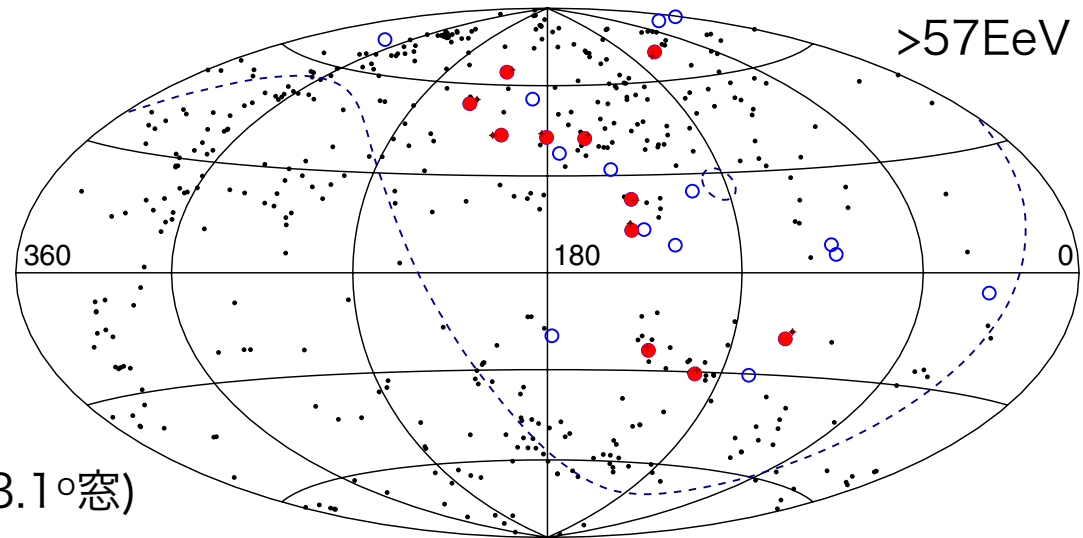
11イベントの確率  $\sim 2\%$

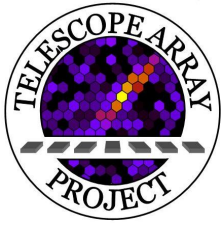
論文中に

時間, エネルギー, 方向を掲載

銀河座標系

$>57\text{EeV}$





# SD: 大規模構造との相関

Abu-Zayyad et al., ApJ, 757, 26 (2012)

2MASS (5-250Mpc)

~10万銀河 (物質分布)

銀河団 V:Virgo Co:Coma...

観測効率を考慮

>10EeV 988イベントと比較

(>40EeV, 50EeVは大規模構造と一致)

宇宙線の伝搬をシミュレーション

銀河磁場を仮定して一致度を検証

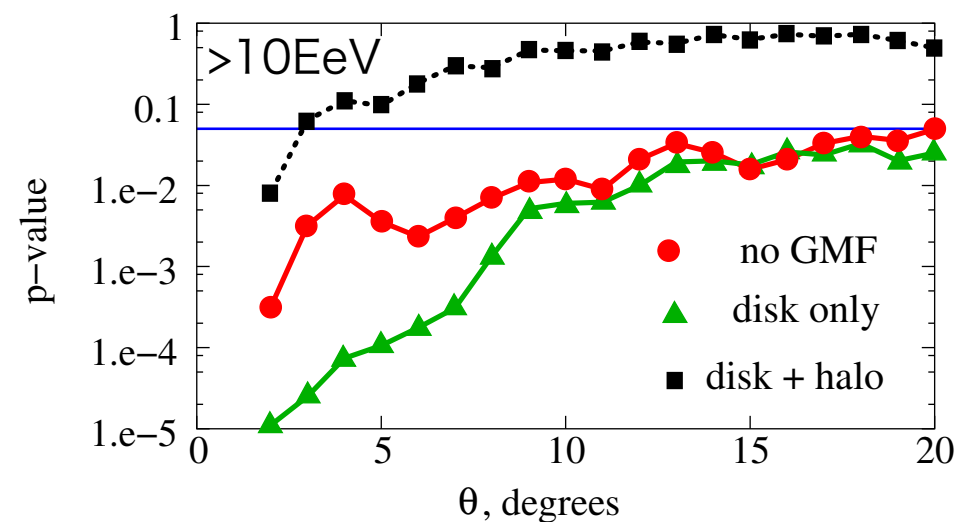
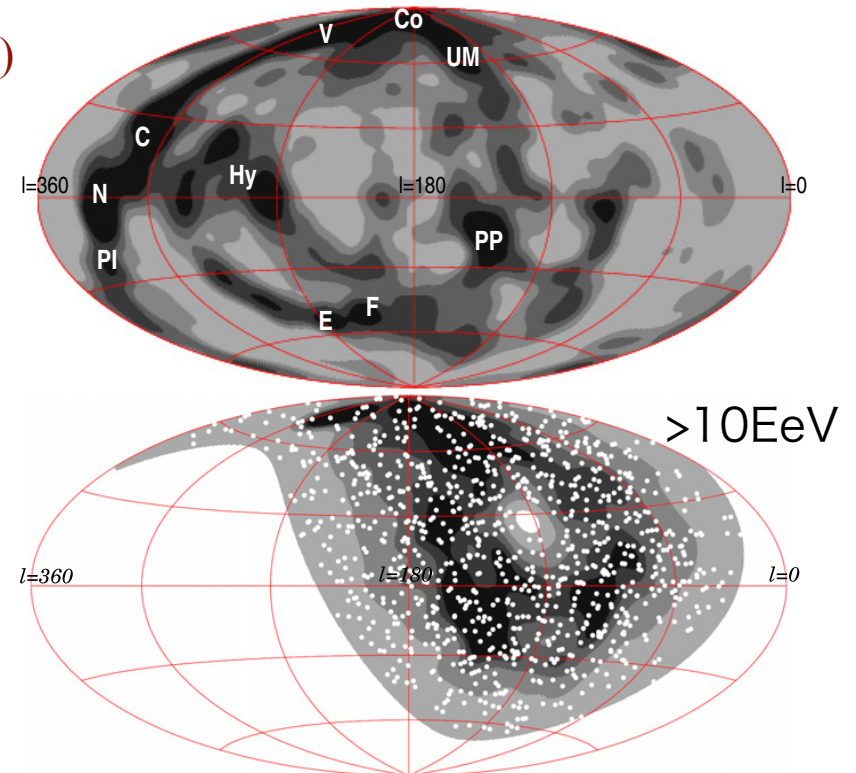
■ 銀河磁場ハロー( $4\mu\text{G}$ )+ディスク

● 銀河磁場なし

▲ 銀河磁場ディスクのみ

(横軸:Smearing angle:

ランダムな磁場を想定)

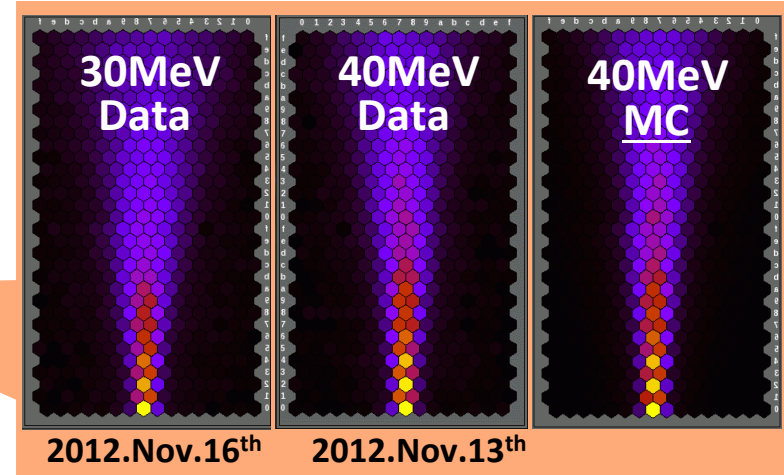
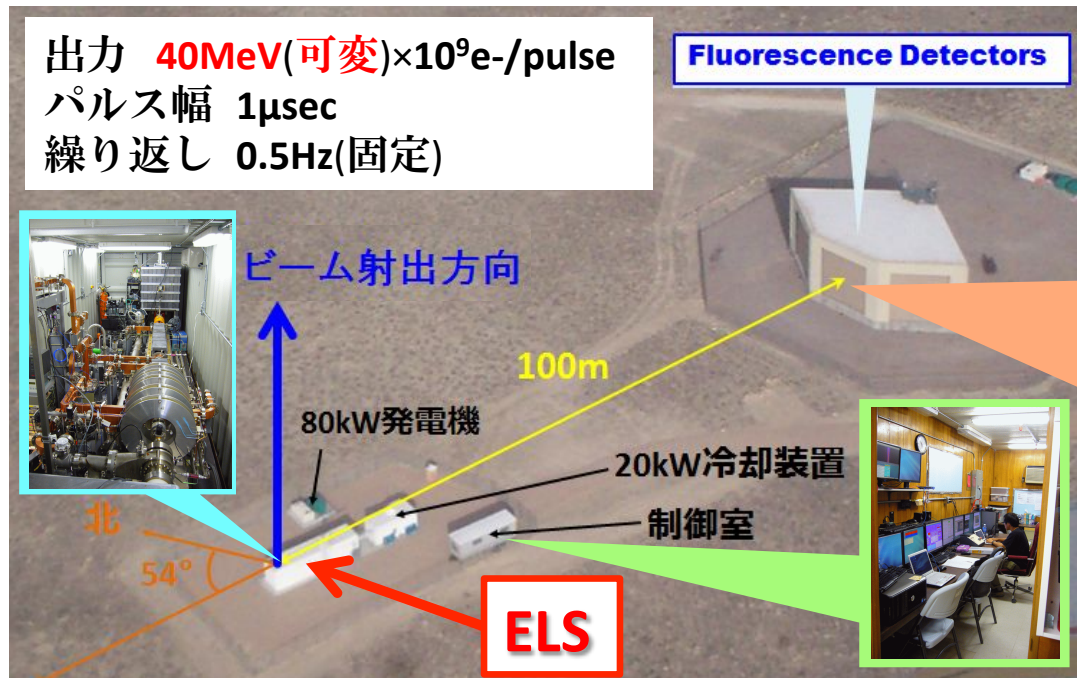


# Electron Light Source

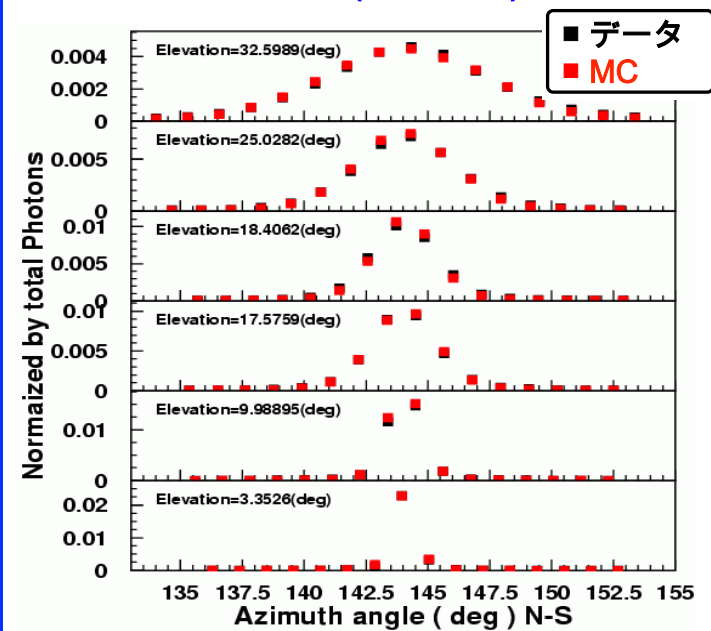
共同利用研究 : F22

「小型電子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」

申請者 芝田達伸

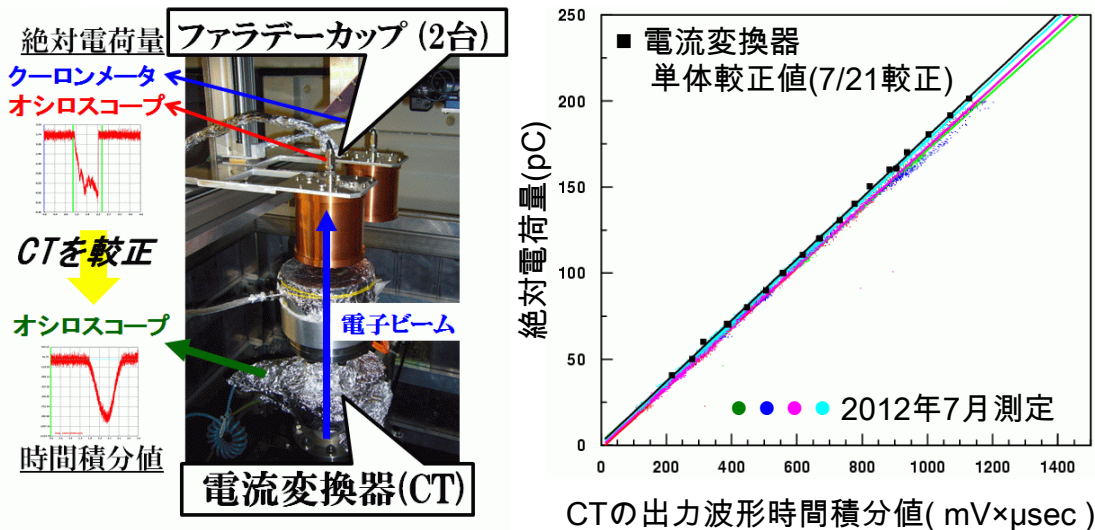


## FD較正の途中結果(相対比較)



2012年7月16日の実データとMC  
 の横方向広がり相対比較

## ELC電子ビーム電荷量測定(FD較正における最重要量)



# ELSによる電子ビームのMBR検出実験 (空気シャワーからのマイクロ波の検出と検出器開発)



- ELSにより $\sim 10^{17}$  eVの空気シャワーを作り、そこからのマイクロ波放射を測定する。
- 甲南大学で使っている1.2m口径MBR望遠鏡をFD stationに設置する(望遠鏡は輸送済み)。
- 12GHz帯の電磁放射を測定するが、200m程度の距離で測定するため、速い回路が必要。
- R&K社と共同で高速検波器を開発した。  
(R&K-CDE1500-KU)  
立ち上がり15ns。
- 3月中に測定予定

アンテナ設置用コンクリートパット



高速検波器



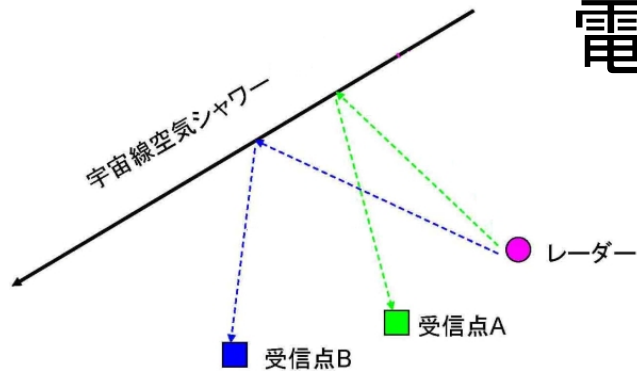
甲南大MBR望遠鏡



☆ 2012年3月 Augerグループ KIT/Univ. of Chicago もMBR検出の試験

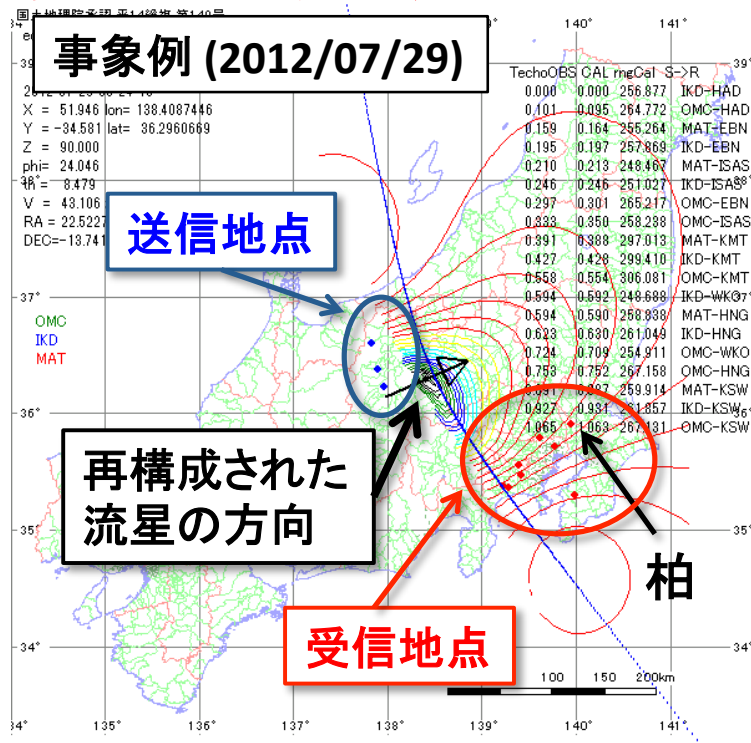
# 電波エコーによる空気シャワー観測

Telescope **A**rray **R**Adar project

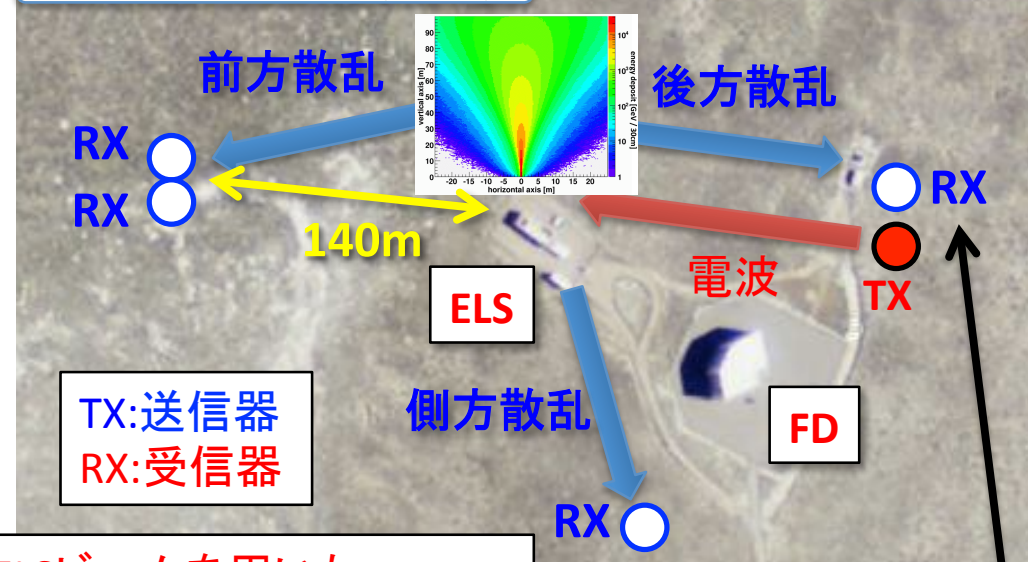


•50MHz帯の電波を送信し、空気シャワー通過後に形成される電子柱における反射を受信

## 多地点同時流星観測プロジェクト

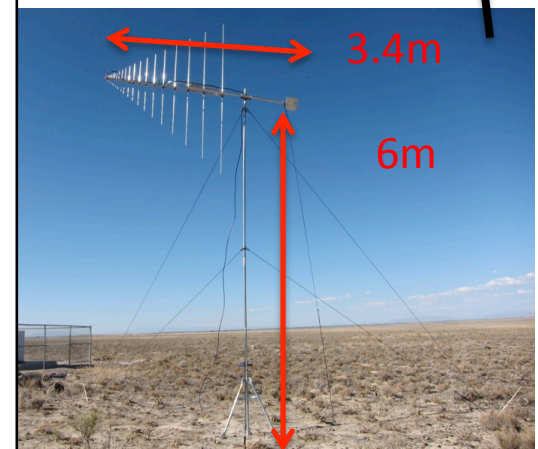


## TA実験 FDサイト(BRM)



## ELSビームを用いた 原理実証実験

- 送信器
  - 55/60MHz, 10W
- 受信器4台
  - 50-66MHz band
  - 25MHz sampling
  - GPS timestamp
  - ELS trigger



2012年7月、11月に現地で測定 データ解析中

# 超高エネルギー宇宙線のための新型検出器開発

筐体:プラスチック樹脂による試作

AM-PVC



Test was made  
cover : 2mm,3mm  
Material 3type

Rid 3type

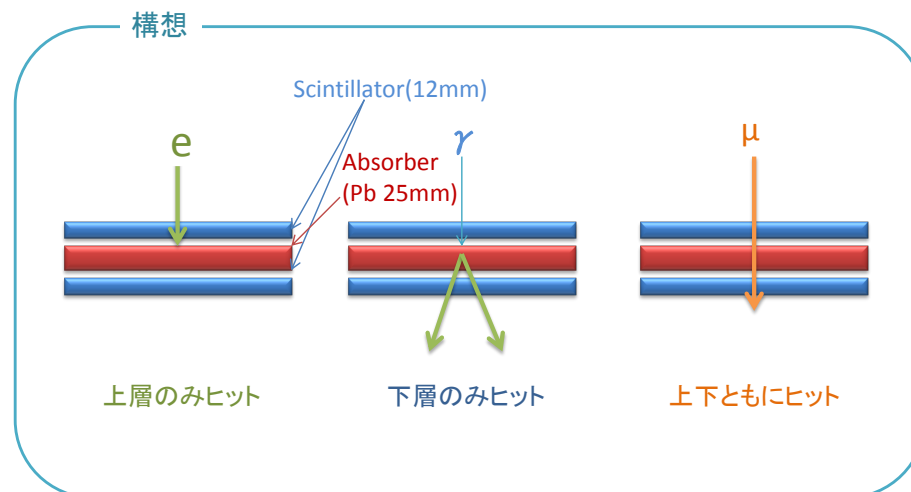
Body 1type

Hand made

(plywood-press + )



• 鉛を挟んだDetector



4

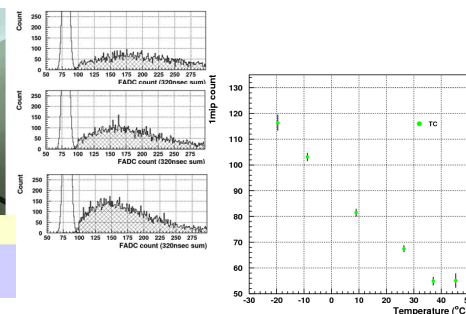
PETシンチレーターを用いた測定

環境温度試験@東葛テクノプラザ:

−25℃〜+45℃まで 雰囲気温度を変えて測定

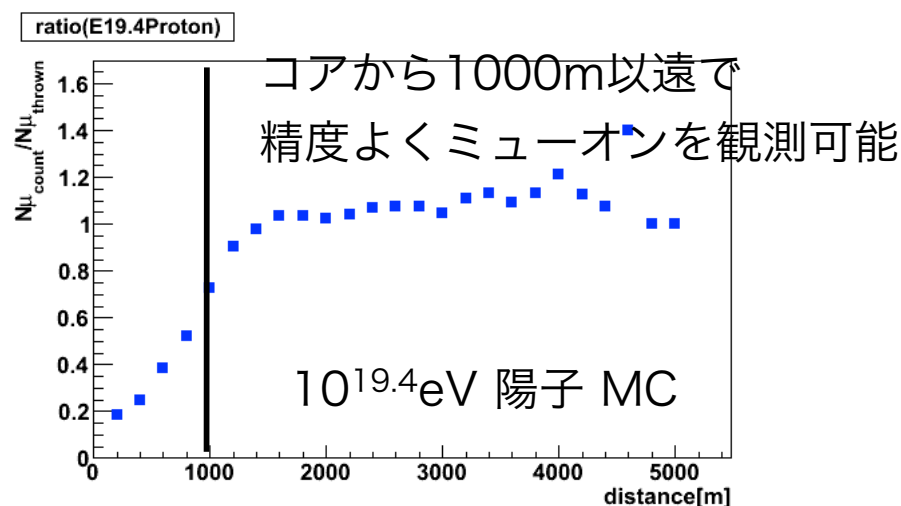


箱体化成(株)  
FX732P00  
試験槽寸法:幅1000×高さ1000×奥行き800(槽内突起部含まず)  
温度制御(温度変動率):70〜180℃  
湿度制御(湿度変動率):10〜85℃  
最大試験重量:20kg×2



0度付近で約−1%/℃の温度係数。  
現在TA実験で使用しているものと同程度。

鉛の手配とシミュレーション  
による弁別の評価を行なっている



# ラジコンヘリ搭載標準光源キャリブレーション(Auger)

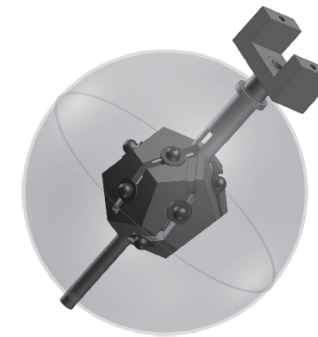
1つの強出力LED標準光源で異なるPMT間、  
さらには異なる望遠鏡 [TA-Auger]を校正



2012年10月 TAサイトにて観測  
2012年11月 Augerサイトにて観測  
(TAメンバー2人 同行)

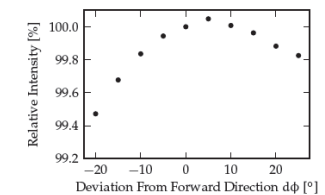
## Light source

### Design of the light source



Homogeneity due to:

- 12 UV-LEDs with silicone lenses
- Dodecahedron (ABS) as body
- Tyvek coating of body
- Ø 10 cm diffuser (polystyrene)



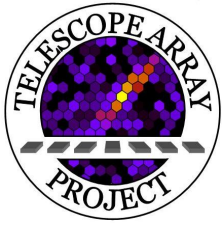
→ Final weight: 150 g

F. Werner – Calibrating the Auger FD Using a Flying Light Source

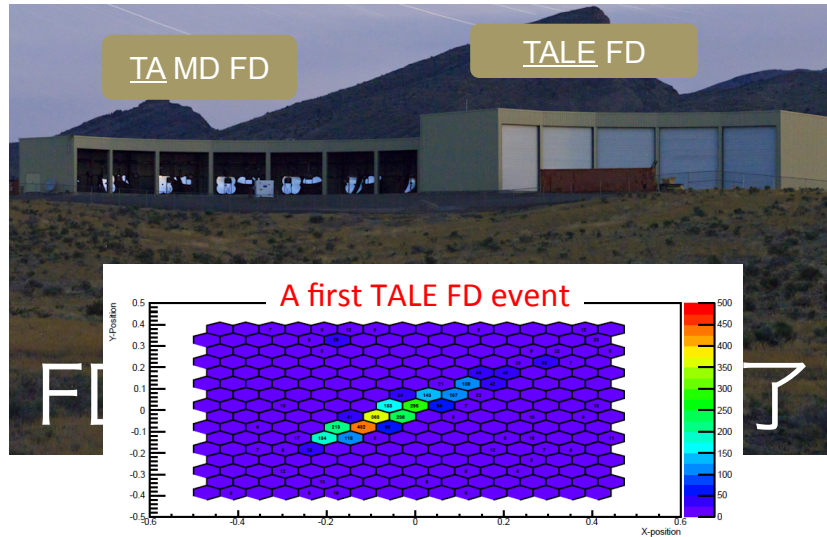
10<sup>th</sup> October 2012

10 of 21





# TALE (TA Low-energy Extension)

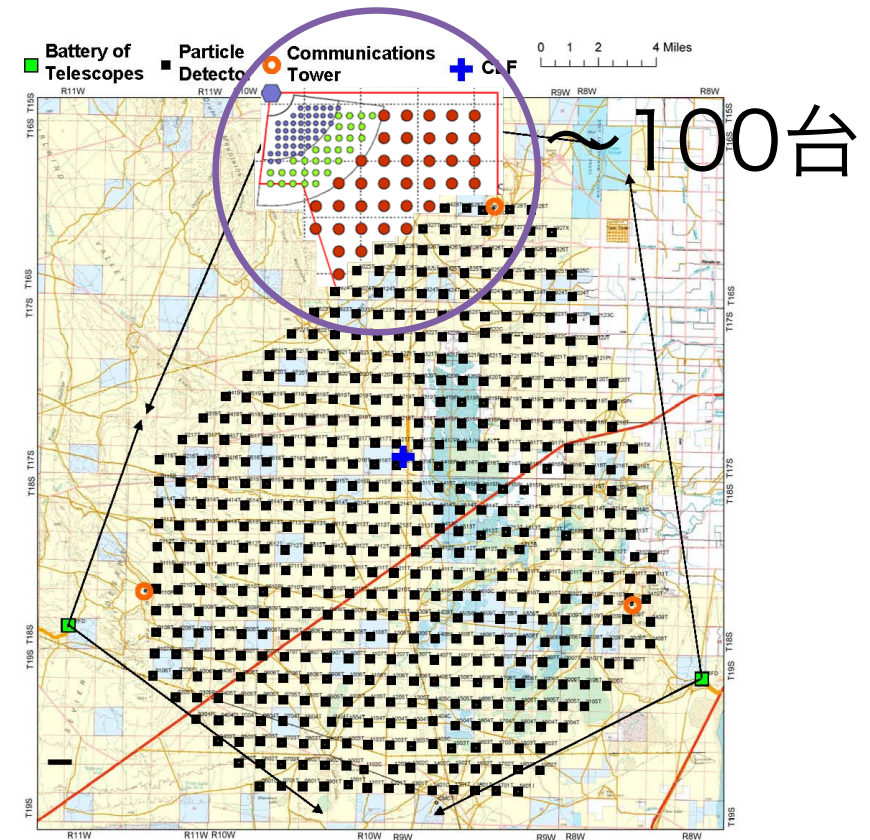


エネルギー範囲  
 $10^{16.5} \text{ eV} - 10^{19} \text{ eV}$

2nd Knee - Ankle

化学組成、異方性、

LHC center of mass ハドロン相互作用



# まとめ

- SD, FD オペレーションは順調 4.5年間
- 物理成果が査読論文／博士論文へ  
異方性 - AGNや大規模構造との相関探索 (ApJ 757, 26)  
エネルギースペクトル Submitted (arXiv:1205.5067)  
化学組成(陽子／鉄) In preparation
- ELS(電子加速器)のビームエネルギー可変が可能に(30MeV, 40MeV)、  
現在ビームモニタのキャリブレーション中
- ELS(電子加速器)の空中射出を利用した電波観測が活発化
- ラジコンヘリ搭載の標準光源によるTA, Augerキャリブレーション開始
- TALE SD FDを建設中 今年度中には一部の観測開始