



# テレスコープアレイ実験による 超高エネルギー宇宙線観測の現状と将来計画



多米田裕一郎

大阪電気通信大学 工学部 基礎理工学科

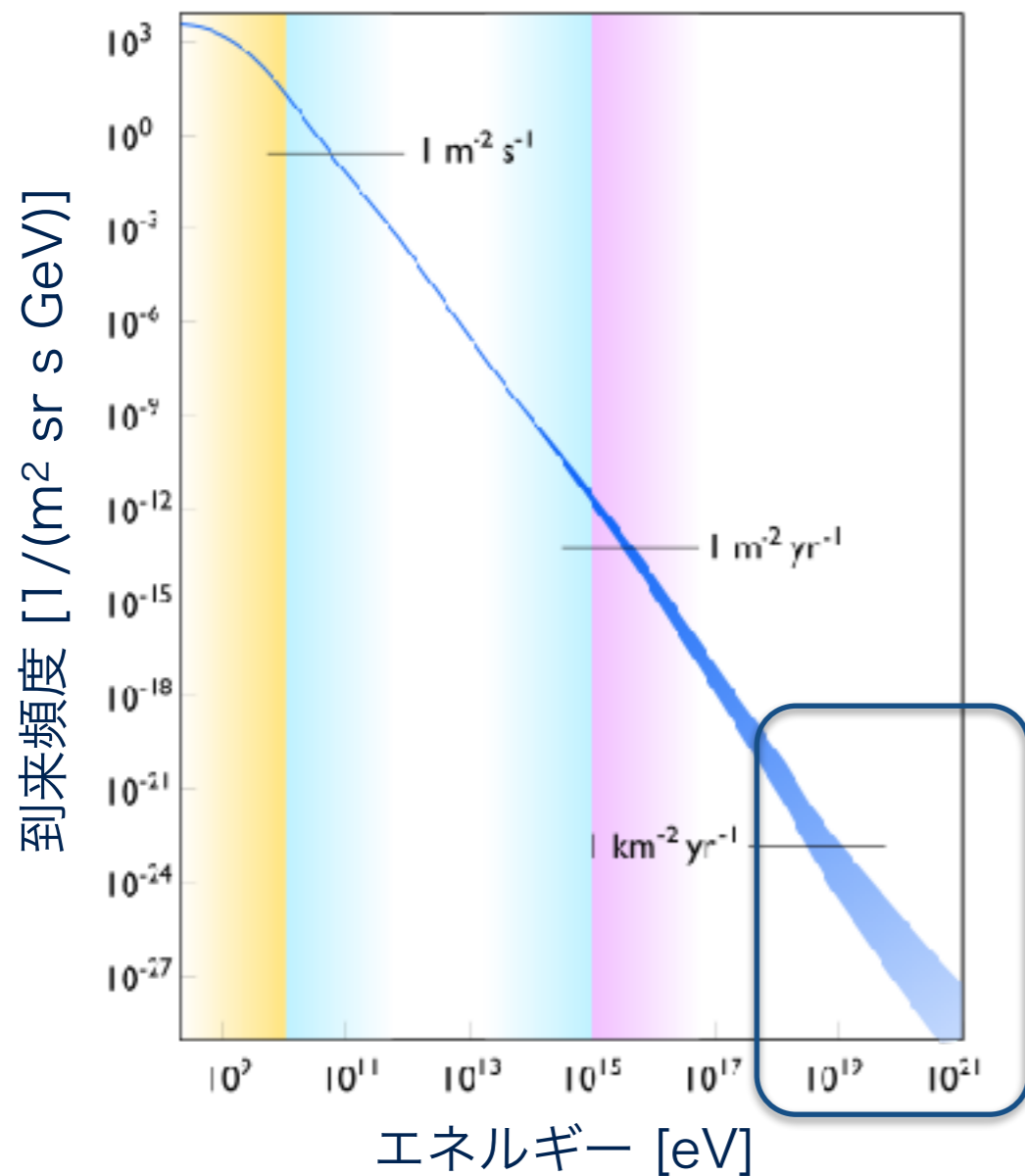


# 目次

- ・ 超高エネルギー宇宙線
- ・ テレスコープアレイ (TA) 実験
- ・ TA実験での物理結果
- ・ 超高エネルギー宇宙線観測の将来

# 超高エネルギー宇宙線

宇宙線のエネルギースペクトル



## 宇宙線

宇宙空間から到来する高エネルギー粒子  
エネルギーが高いほど、到来頻度が小さい

## 超高エネルギー宇宙線

~10<sup>18</sup>eVを超えるエネルギー  
到来する宇宙線エネルギーには上限有?(GZK効果)  
磁場による影響が少なく、到来方向の同定が可能?

## 宇宙線の起源解明

エネルギー  
スペクトル

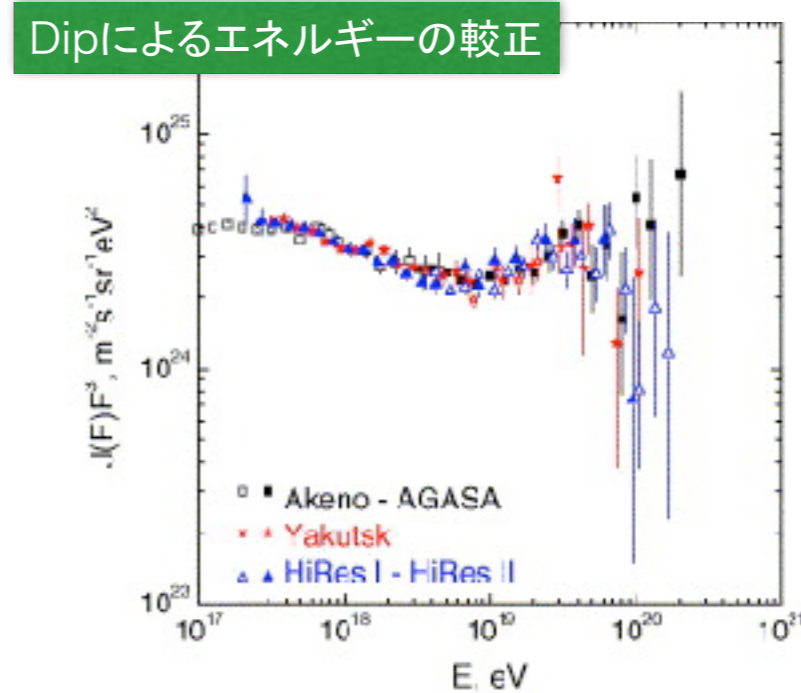
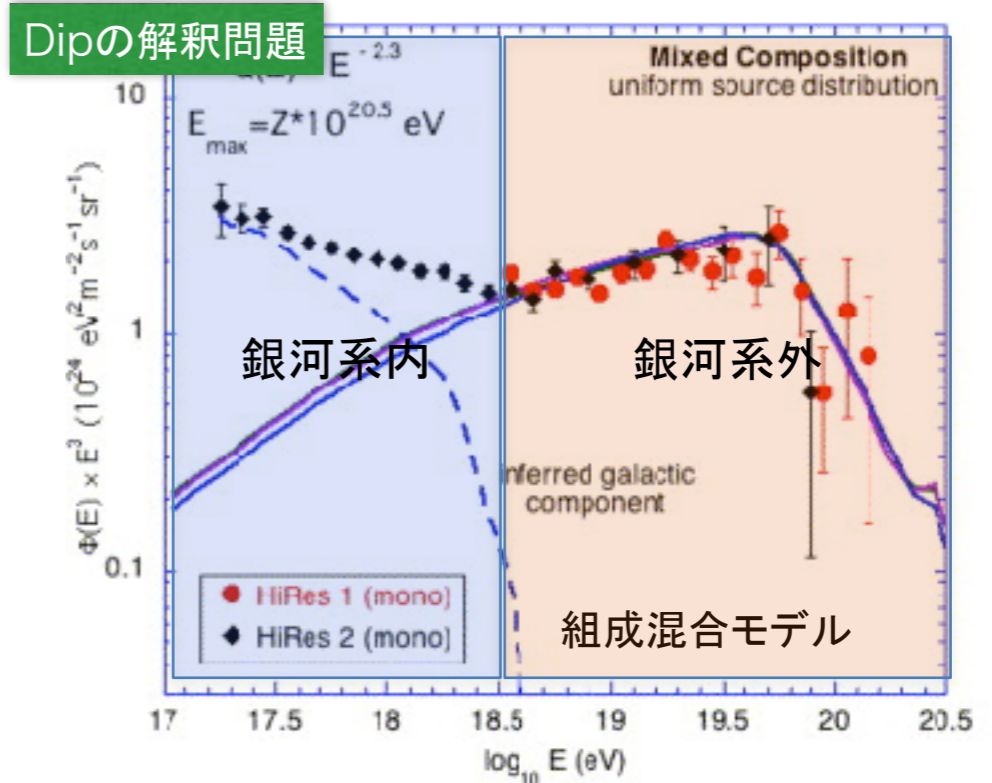
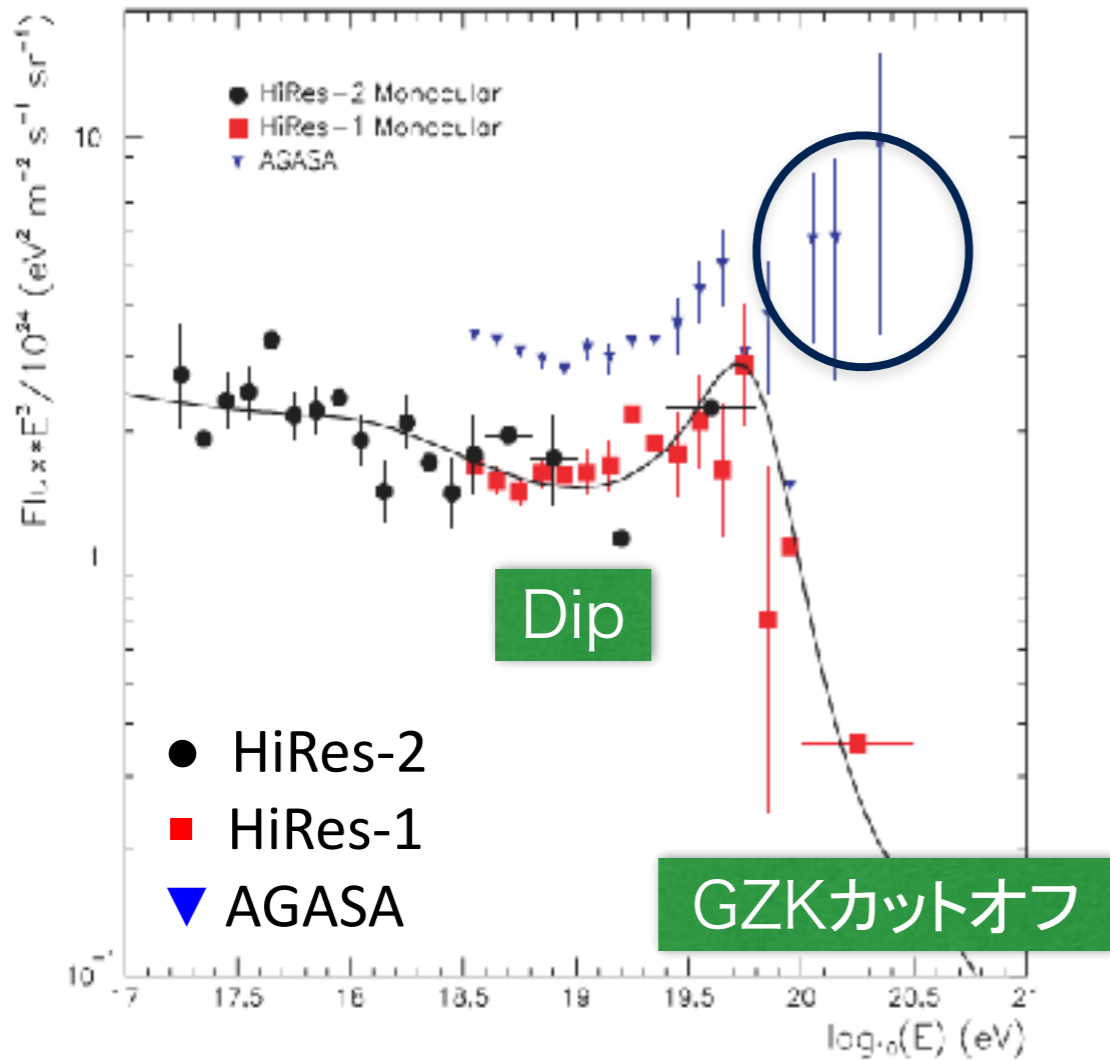
質量組成

到来方向

(\*) 10<sup>19</sup> eV = 1.6 J

# 超高エネルギー宇宙線

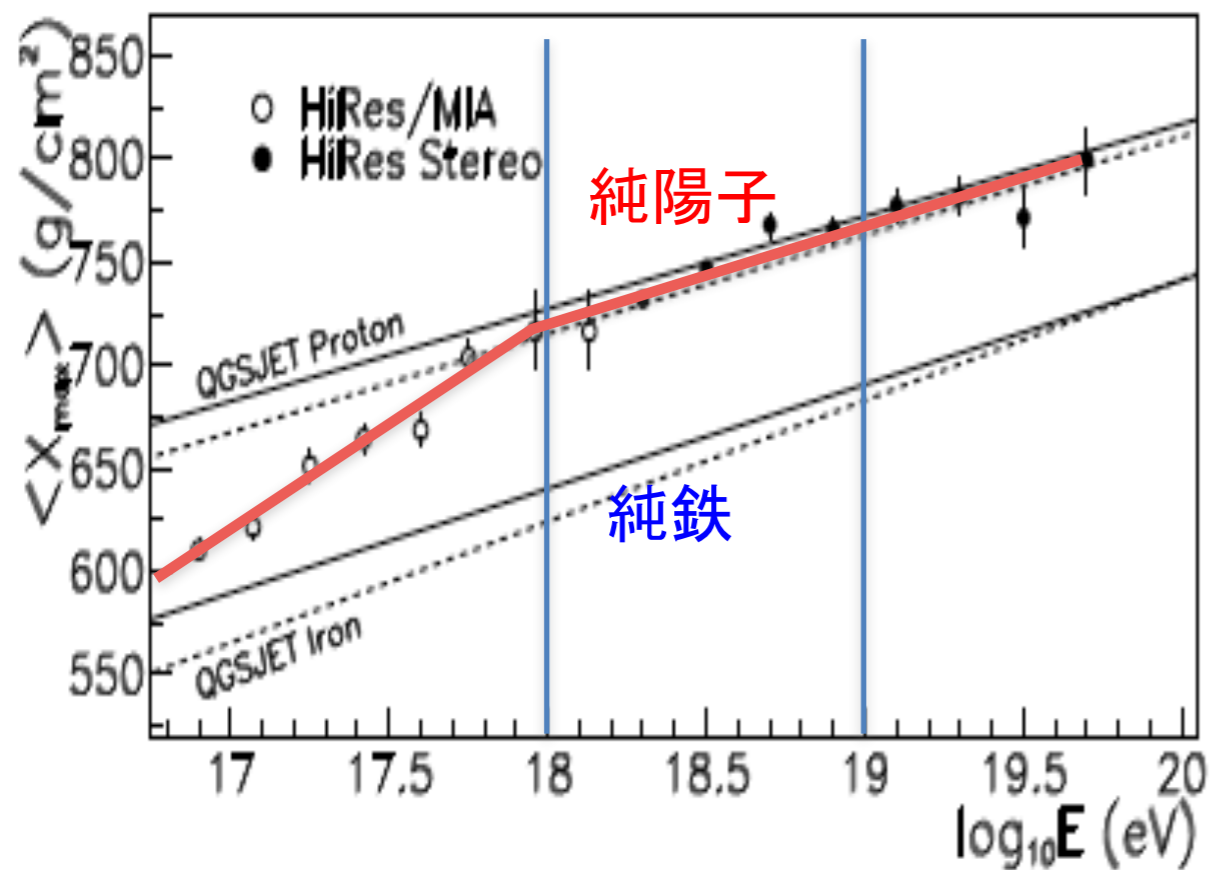
1. エネルギースペクトル
2. 質量組成
3. 到来方向



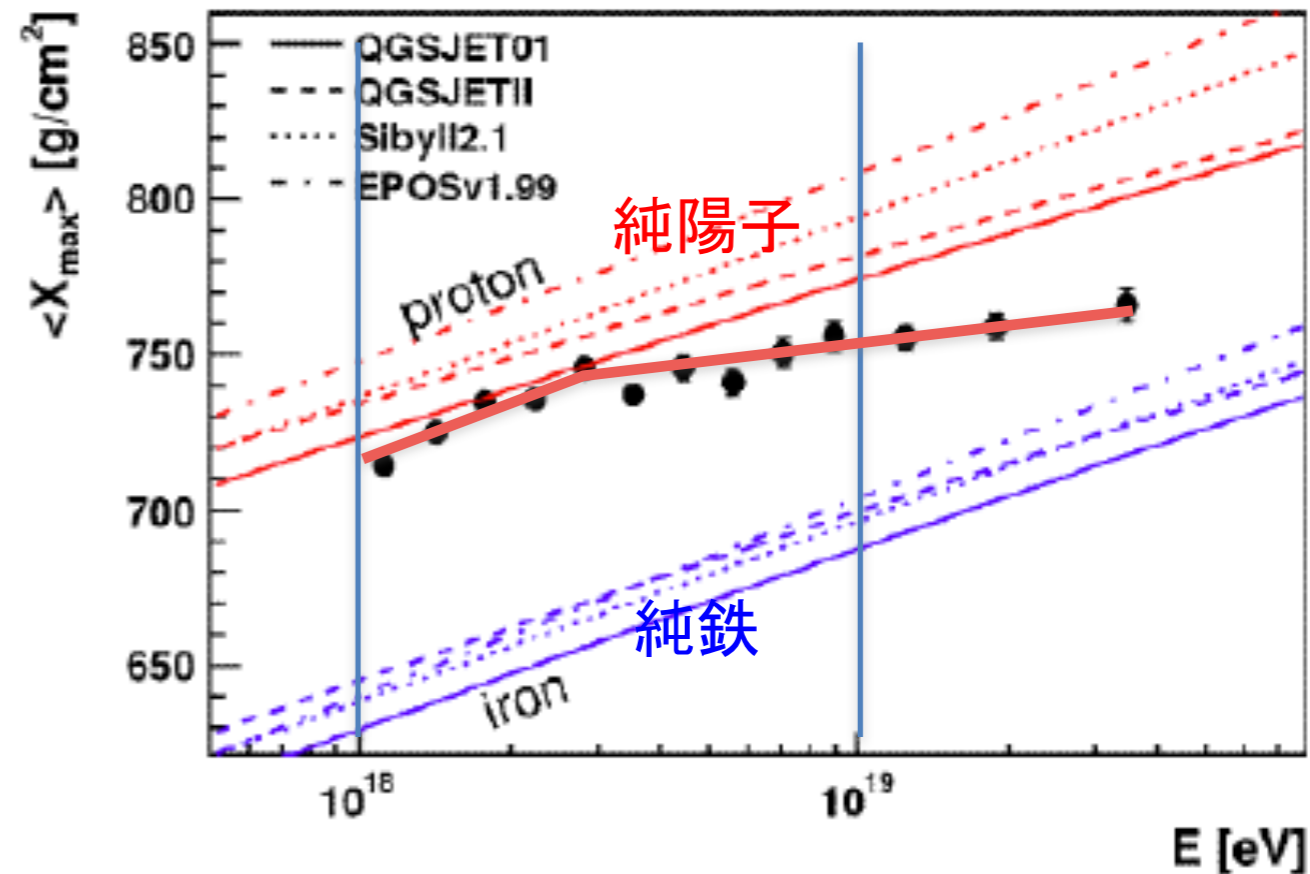
# 超高エネルギー宇宙線

1. エネルギースペクトル
2. 質量組成
3. 到来方向

HiRes

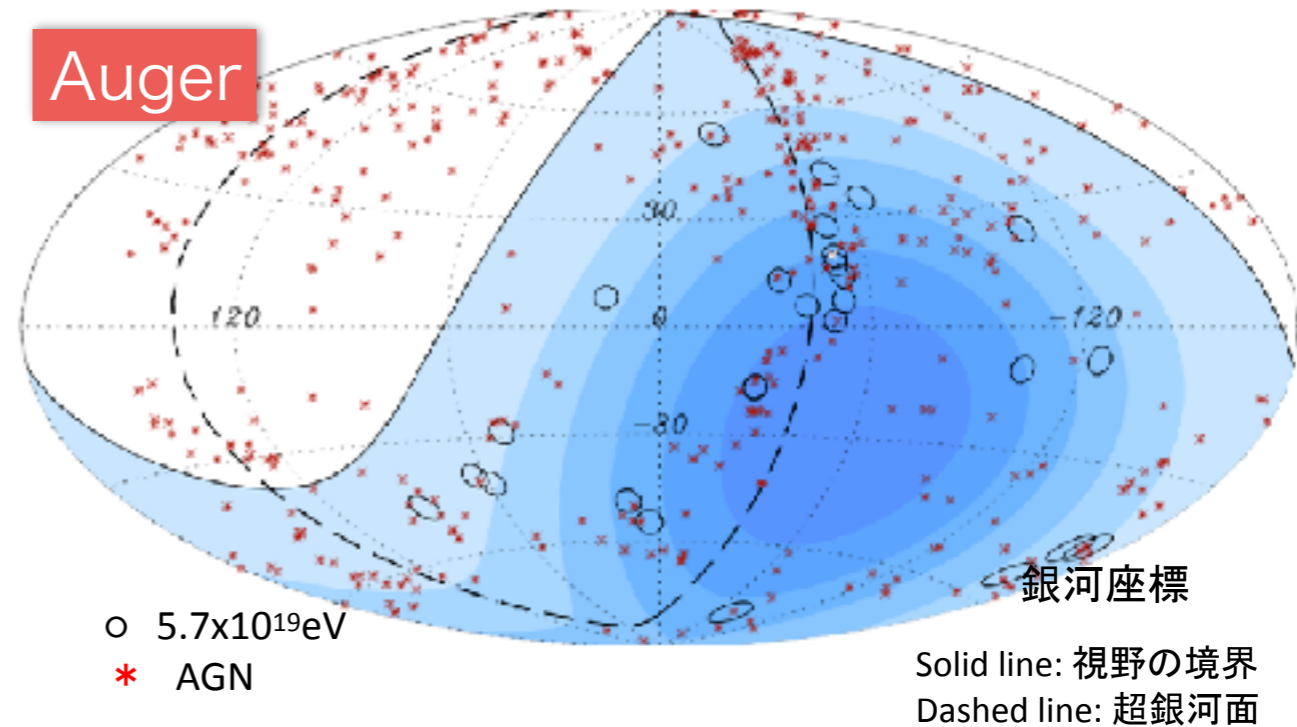
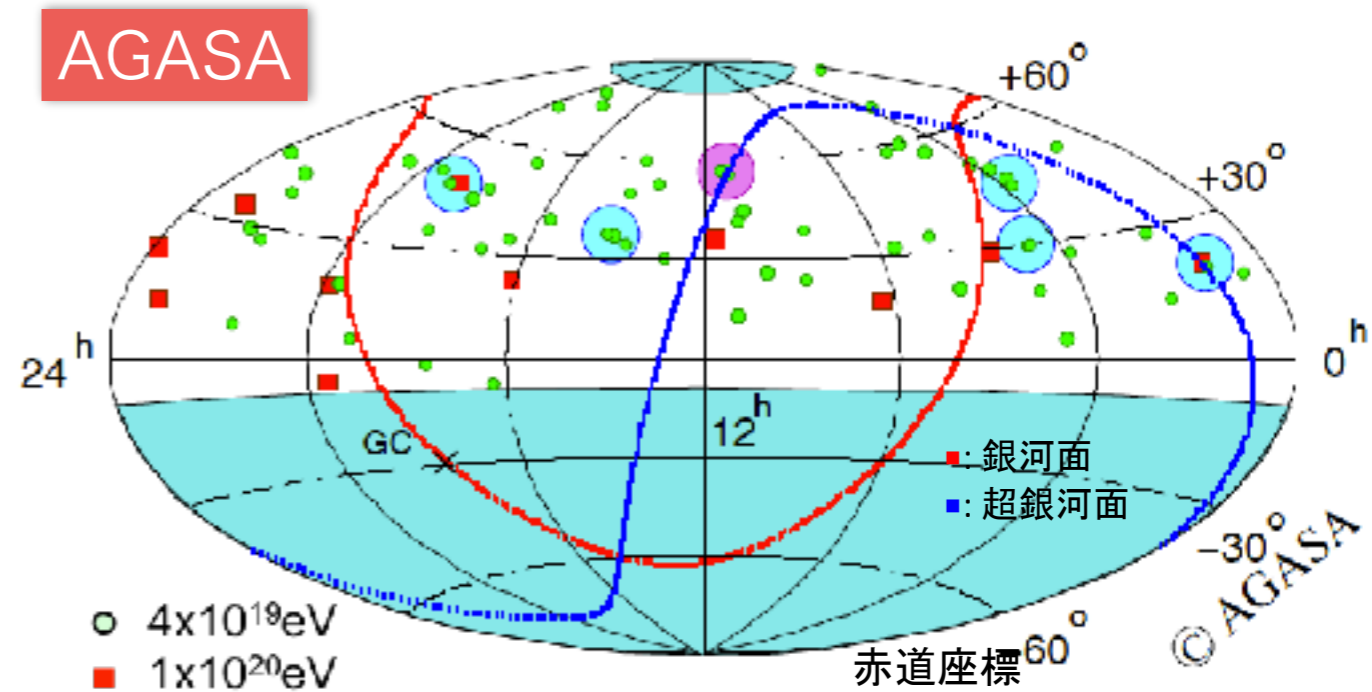
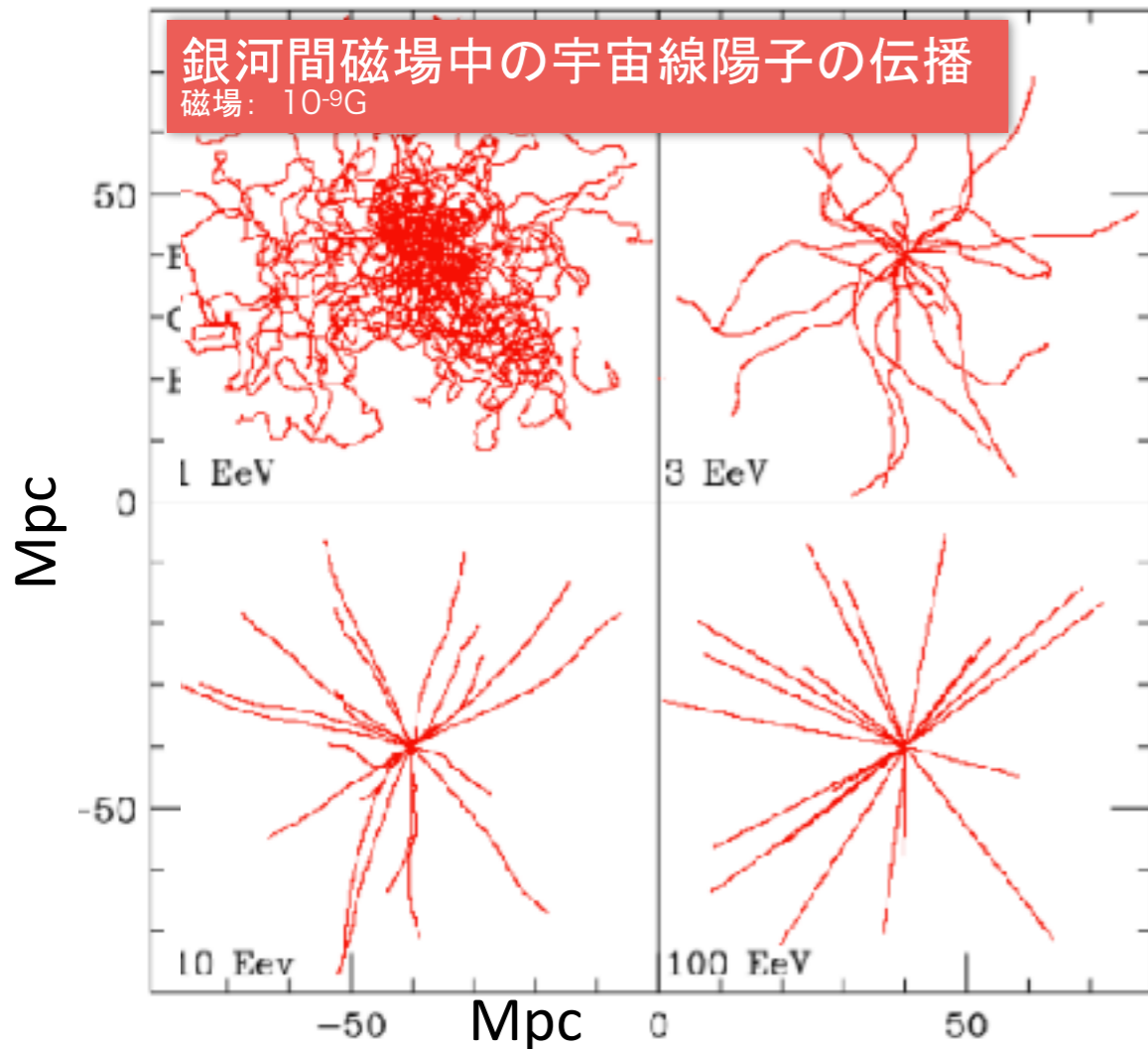


Pierre Auger Observatory



# 超高エネルギー宇宙線

1. エネルギースペクトル
2. 質量組成
3. 到来方向



The logo for the Telescope Array Project is a circular emblem. It features a central grid of colored dots in shades of purple, blue, and yellow. The words "TELESCOPE ARRAY" are written in a semi-circle at the top, and "PROJECT" is written in a semi-circle at the bottom. The entire logo is rendered in a light gray, semi-transparent style.

# テレスコープアレイ (TA) 実験

~超高エネルギー宇宙線観測~



# Telescope Array Collaboration

R.U. Abbasi<sup>1</sup>, M. Abe<sup>2</sup>, T. Abu-Zayyad<sup>1</sup>, M. Allen<sup>1</sup>, R. Azuma<sup>3</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>4</sup>, B.G. Cheon<sup>5</sup>, J. Chiba<sup>6</sup>, M. Chikawa<sup>7</sup>, W.R. Cho<sup>8</sup>, T. Fujii<sup>9</sup>, M. Fukushima<sup>9,10</sup>, T. Goto<sup>11</sup>, W. Hanlon<sup>1</sup>, Y. Hayashi<sup>11</sup>, N. Hayashida<sup>12</sup>, K. Hibino<sup>12</sup>, K. Honda<sup>13</sup>, D. Ikeda<sup>9</sup>, N. Inoue<sup>2</sup>, T. Ishii<sup>13</sup>, R. Ishimori<sup>3</sup>, H. Ito<sup>14</sup>, D. Ivanov<sup>1</sup>, C.C.H. Jui<sup>1</sup>, K. Kadota<sup>15</sup>, F. Kakimoto<sup>3</sup>, O. Kalashev<sup>16</sup>, K. Kasahara<sup>17</sup>, H. Kawai<sup>18</sup>, S. Kawakami<sup>11</sup>, S. Kawana<sup>2</sup>, K. Kawata<sup>9</sup>, E. Kido<sup>9</sup>, H.B. Kim<sup>5</sup>, J.H. Kim<sup>1</sup>, J.H. Kim<sup>19</sup>, S. Kitamura<sup>3</sup>, Y. Kitamura<sup>3</sup>, V. Kuzmin<sup>16</sup>, Y.J. Kwon<sup>8</sup>, J. Lan<sup>1</sup>, S.I. Lim<sup>4</sup>, J.P. Lundquist<sup>1</sup>, K. Machida<sup>13</sup>, K. Martens<sup>10</sup>, T. Matsuda<sup>20</sup>, T. Matsuyama<sup>11</sup>, J.N. Matthews<sup>1</sup>, M. Minamino<sup>11</sup>, Y. Mukai<sup>13</sup>, I. Myers<sup>1</sup>, K. Nagasawa<sup>2</sup>, S. Nagataki<sup>14</sup>, T. Nakamura<sup>21</sup>, T. Nonaka<sup>9</sup>, A. Nozato<sup>7</sup>, S. Ogio<sup>11</sup>, J. Ogura<sup>3</sup>, M. Ohnishi<sup>9</sup>, H. Ohoka<sup>9</sup>, K. Oki<sup>9</sup>, T. Okuda<sup>22</sup>, M. Ono<sup>23</sup>, A. Oshima<sup>24</sup>, S. Ozawa<sup>17</sup>, I.H. Park<sup>25</sup>, M.S. Pshirkov<sup>16,26</sup>, D.C. Rodriguez<sup>1</sup>, G. Rubtsov<sup>16</sup>, D. Ryu<sup>19</sup>, H. Sagawa<sup>9</sup>, N. Sakurai<sup>11</sup>, L.M. Scott<sup>27</sup>, P.D. Shah<sup>1</sup>, F. Shibata<sup>13</sup>, T. Shibata<sup>9</sup>, H. Shimodaira<sup>9</sup>, B.K. Shin<sup>5</sup>, H.S. Shin<sup>9</sup>, J.D. Smith<sup>1</sup>, P. Sokolsky<sup>1</sup>, R.W. Springer<sup>1</sup>, B.T. Stokes<sup>1</sup>, S.R. Stratton<sup>1,27</sup>, T.A. Stroman<sup>1</sup>, T. Suzawa<sup>2</sup>, M. Takamura<sup>6</sup>, M. Takeda<sup>9</sup>, R. Takeishi<sup>9</sup>, A. Taketa<sup>28</sup>, M. Takita<sup>9</sup>, Y. Tameda<sup>34</sup>, H. Tanaka<sup>11</sup>, K. Tanaka<sup>29</sup>, M. Tanaka<sup>20</sup>, S.B. Thomas<sup>1</sup>, G.B. Thomson<sup>1</sup>, P. Tinyakov<sup>30,16</sup>, I. Tkachev<sup>16</sup>, H. Tokuno<sup>3</sup>, T. Tomida<sup>31</sup>, S. Troitsky<sup>16</sup>, Y. Tsunesada<sup>3</sup>, K. Tsutsumi<sup>3</sup>, Y. Uchihori<sup>32</sup>, S. Udo<sup>12</sup>, F. Urban<sup>30</sup>, G. Vasiloff<sup>1</sup>, T. Wong<sup>1</sup>, R. Yamane<sup>11</sup>, H. Yamaoka<sup>20</sup>, K. Yamazaki<sup>28</sup>, J. Yang<sup>4</sup>, K. Yashiro<sup>6</sup>, Y. Yoneda<sup>11</sup>, S. Yoshida<sup>18</sup>, H. Yoshii<sup>33</sup>, R. Zollinger<sup>1</sup>, and Z. Zundel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Utah, <sup>2</sup>Saitama University, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>Ewha Womans University, <sup>5</sup>Hanyang University, <sup>6</sup>Tokyo University of Science, <sup>7</sup>Kinki University, <sup>8</sup>Yonsei University, <sup>9</sup>ICRR University of Tokyo, <sup>10</sup>Kavli IPMU the University of Tokyo, <sup>11</sup>Osaka City University, <sup>12</sup>Kanagawa University, <sup>13</sup>University of Yamanashi, <sup>14</sup>RIKEN, <sup>15</sup>Tokyo City University, <sup>16</sup>INR of the Russian Academy of Sciences, <sup>17</sup>Waseda University, <sup>18</sup>Chiba University, <sup>19</sup>Ulsan National Institute of Science and Technology, <sup>20</sup>KEK, <sup>21</sup>Kochi University, <sup>22</sup>Ritsumeikan University, <sup>23</sup>Kyushu University, <sup>24</sup>Chubu University, <sup>25</sup>Sungkyunkwan University, <sup>26</sup>Moscow M.V. Lomonosov State University, <sup>27</sup>Rutgers University, <sup>28</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>29</sup>Hiroshima City University, <sup>30</sup>Universit'e Libre de Bruxelles, <sup>31</sup>Shinshu University, <sup>32</sup>National Institute of Radiological Science, <sup>33</sup>Ehime University, <sup>34</sup>Osaka Electro-Comm. Univ.

5カ国、33研究機関、125名



日本



アメリカ



韓国



ロシア



ベルギー

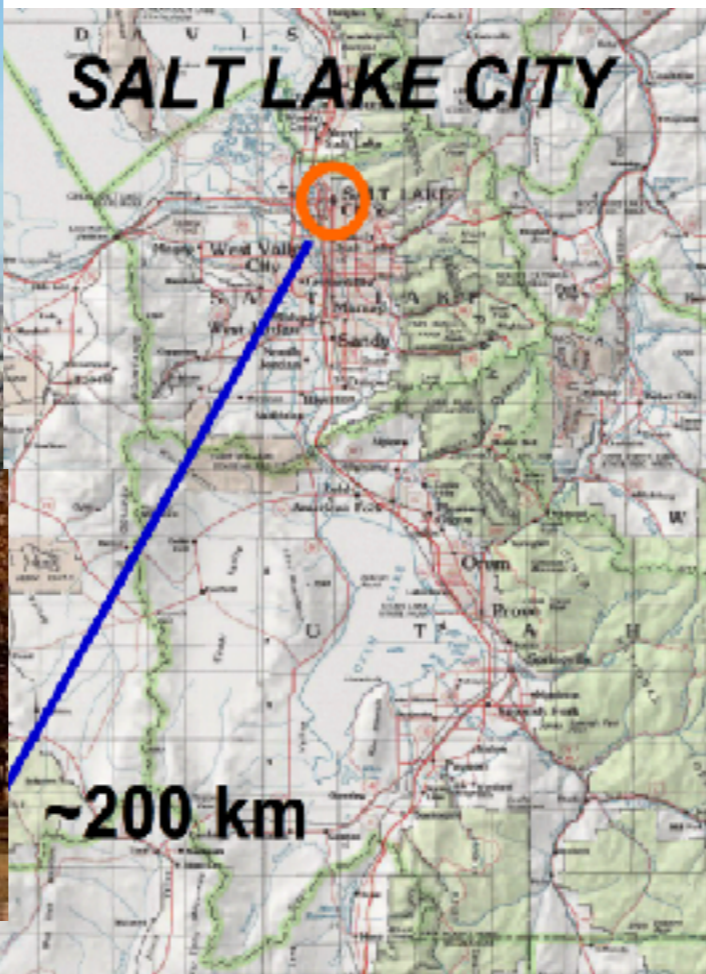




# Telescope Array(TA)実験



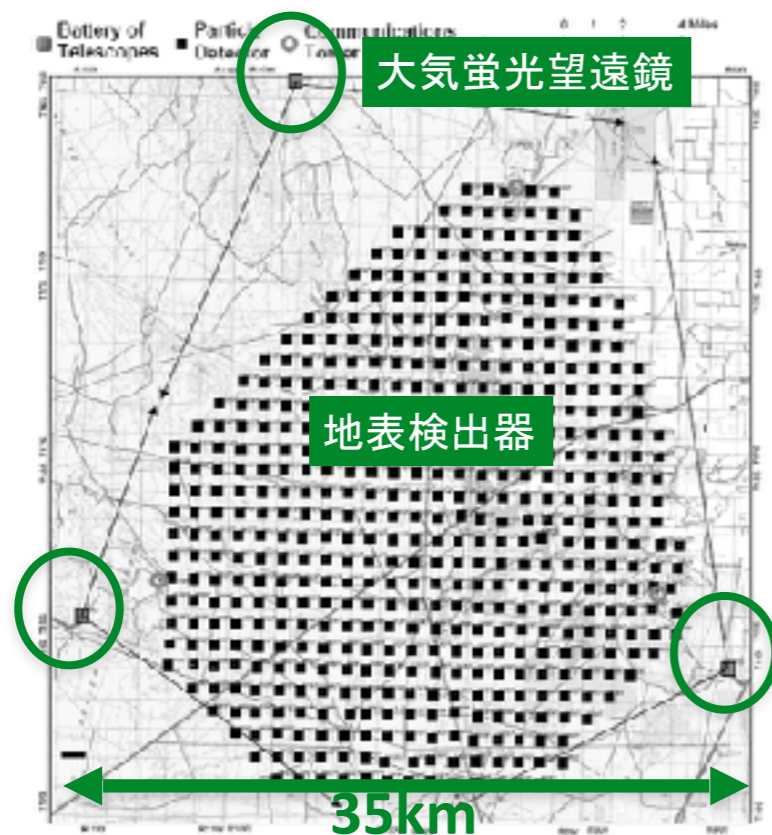
Salt lake city  
University of Utah



Millard county Cosmic Ray Center



# TA 実験



- ・ 米国ユタ州ミラード郡南西部砂漠地帯
- ・ 大気蛍光望遠鏡ステーション 3カ所  
北サイトはHiRes-Iから移設
- ・ 地表検出器 507台  
敷地面積約 678 km<sup>2</sup>
- ・ 2007年11月よりステレオ観測開始
- ・ 2008年3月よりハイブリッド観測開始



Telescope Array Locations  
General Reference Map

地表粒子検出器(SD)群  
507台のSDで校正

校正用レーザー

校正用レーザー

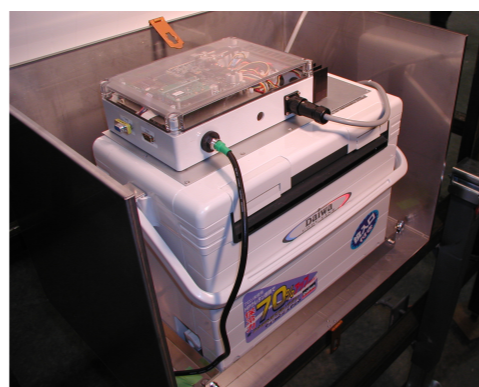
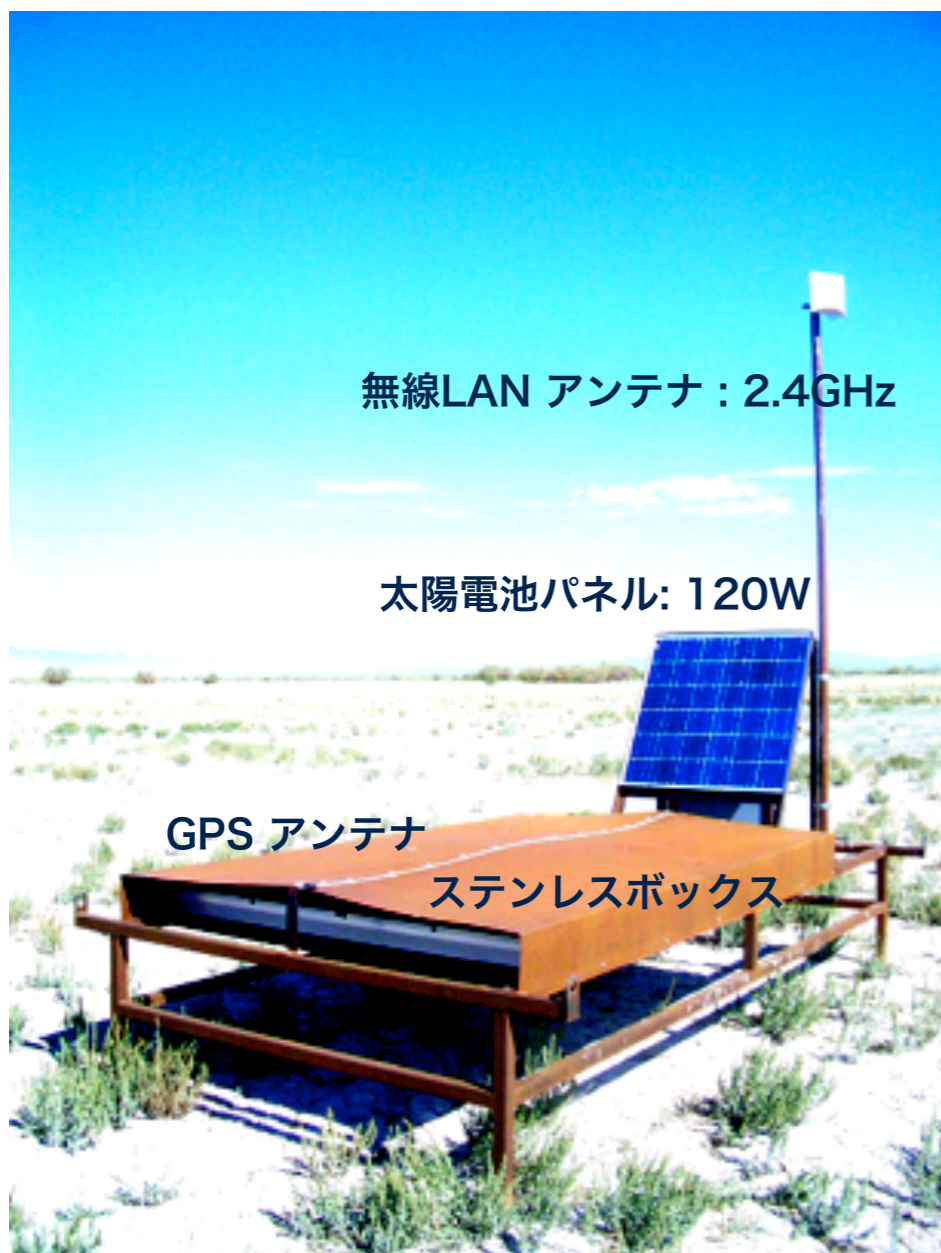
大気蛍光望遠鏡(FD)

滞在している街  
人口：3,000人

30km

- TA Locations
- Communication Towers
- Fluorescence Locations
- ▲ Central Laser Facility
- Streams
- Lakes
- Town Boundaries
- State Land
- Land
- Land
- Military Airspace: Sevier B

# 地表検出器 (SD)

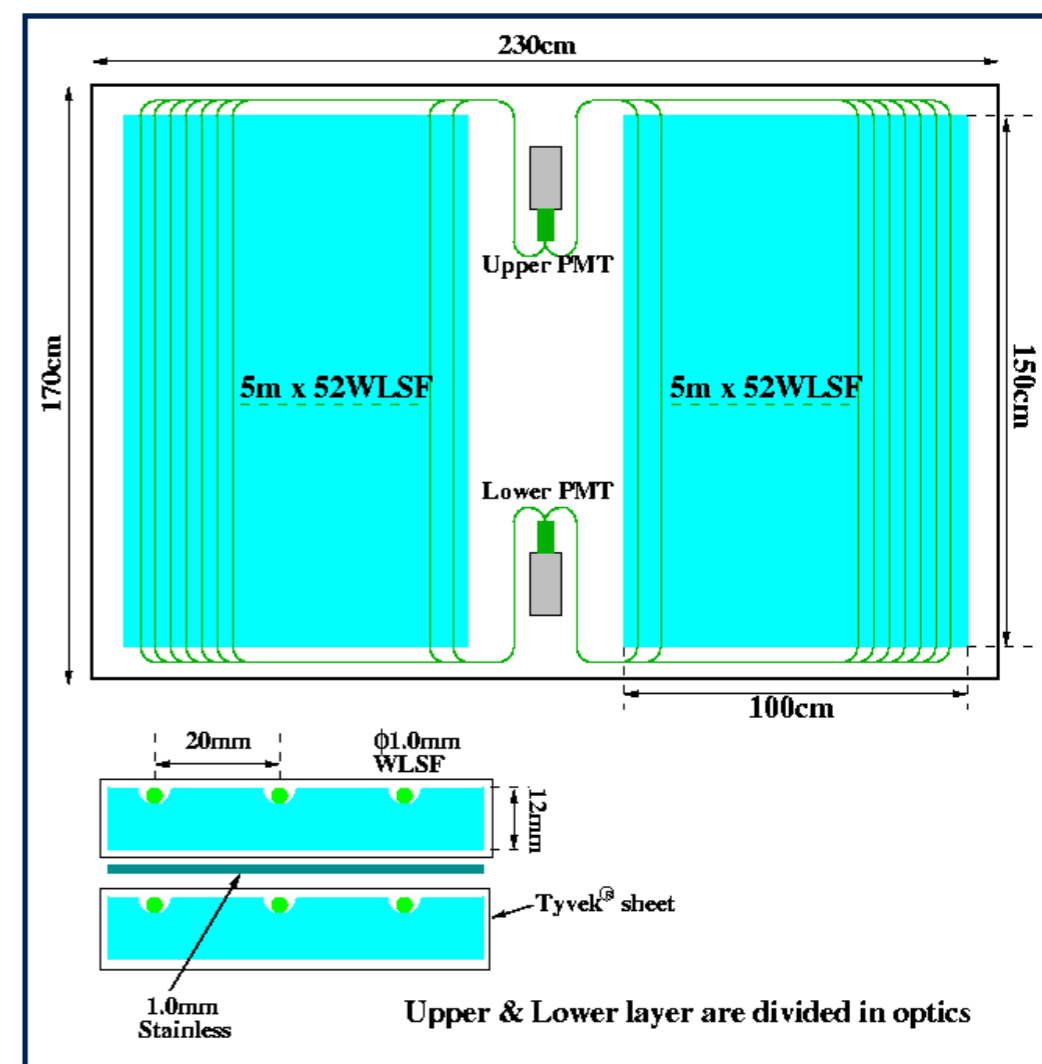


FADC 12bit 50MHz  
GPS  
LAN-MODEM  
Charge Controller  
Battery

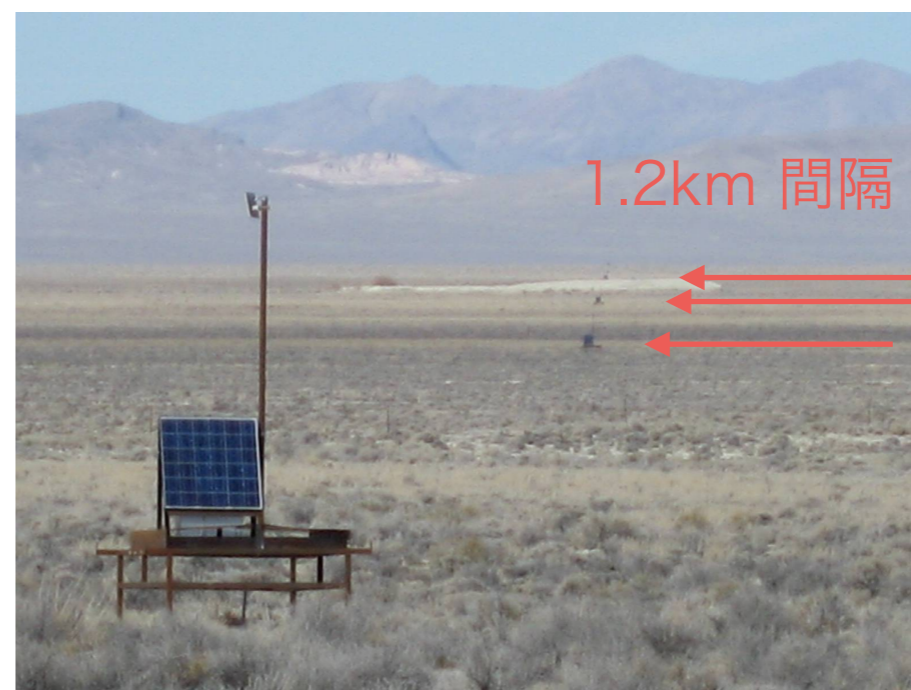
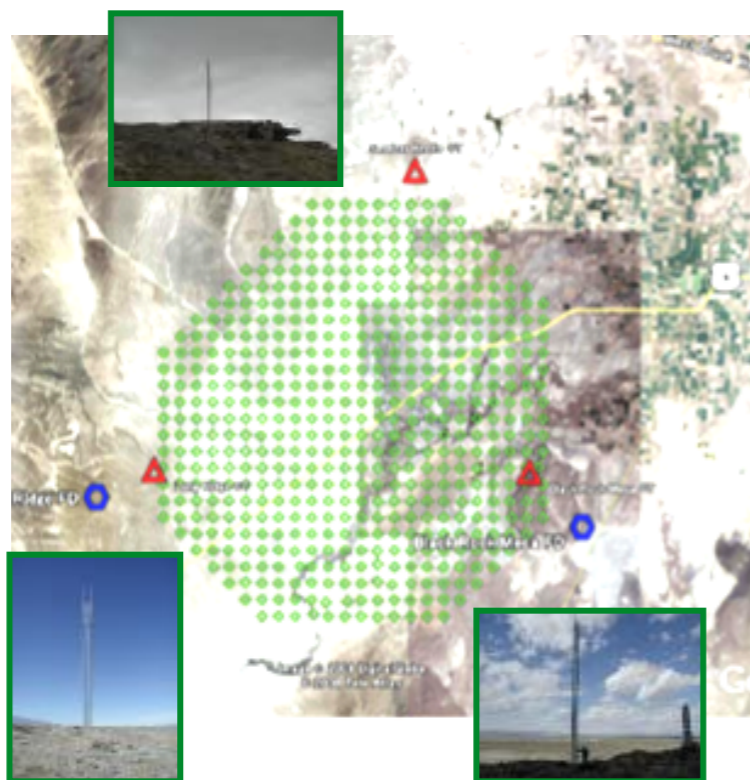
シンチレータ : 3m<sup>2</sup> x 1.2cm x 2層

波長シフトファイバ : 1.0mmφ 2cm spacing

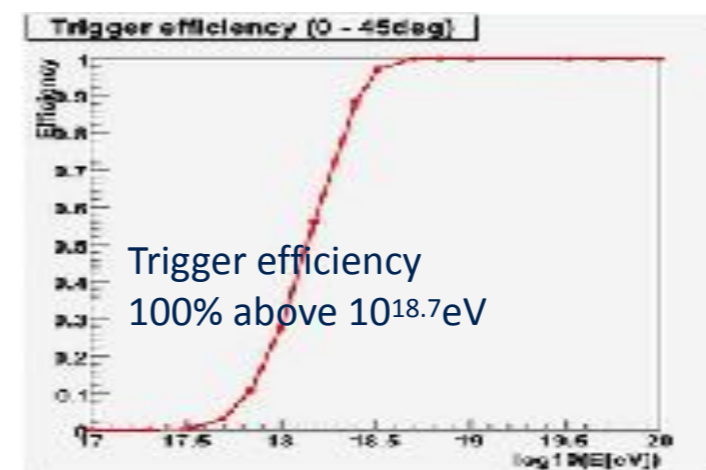
光電子増倍管 : Electrontubes 9124SA x 2



# 地表検出器(SD)

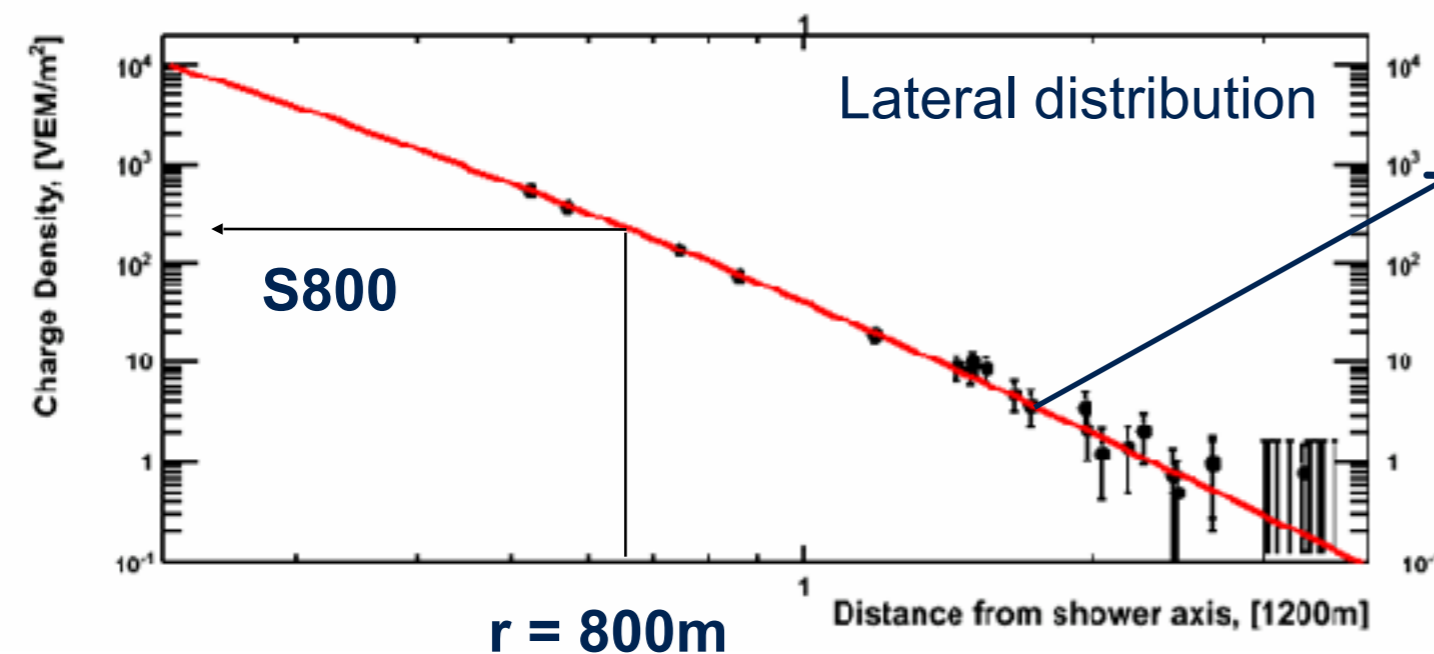
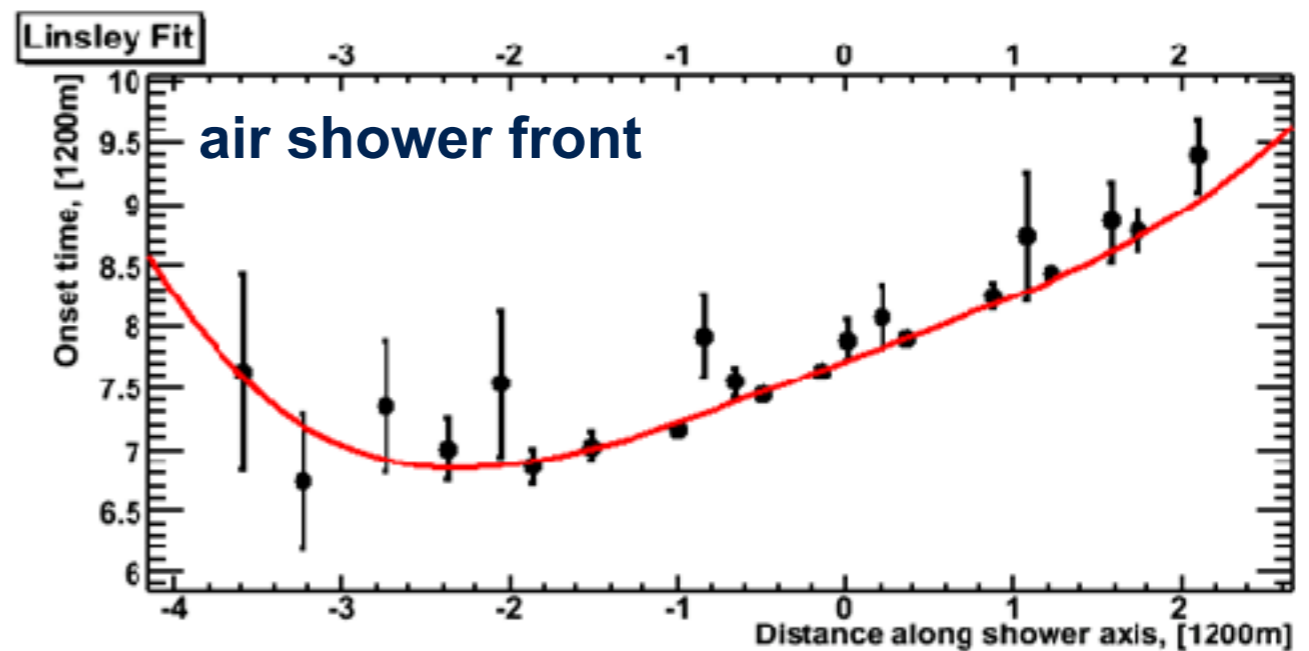
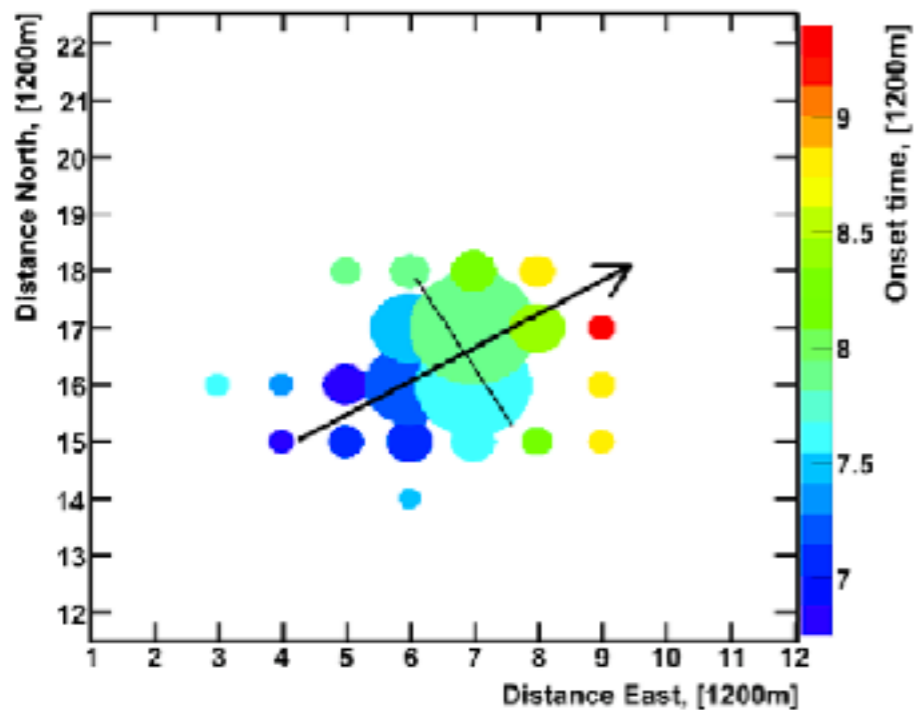


トリガー条件  
 3粒子以上  
 3台以上の地表検出器  
 8us以内に2条件を満たす  
 各通信等でトリガー条件判定



# SDイベントの例

2008/Jun/25 - 19:45:52.588670 UTC



AGASA fitting function

$$\rho(r) \propto \left(\frac{r}{R_M}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{r}{R_M}\right)^{-(\eta-1.2)} \left\{1 + \left(\frac{r}{1000}\right)^2\right\}^{-0.6}$$

$$\eta = (3.97 \pm 0.13) - (1.79 \pm 0.62) (\sec \theta - 1)$$

S800 : energy estimator

Telescope Array Locations  
General Reference Map



Middle Drum

地表粒子検出器(SD)群  
507台のSDで校正

校正用レーザー

滞在している街  
人口：3,000人

Hinckley

Delta



校正用



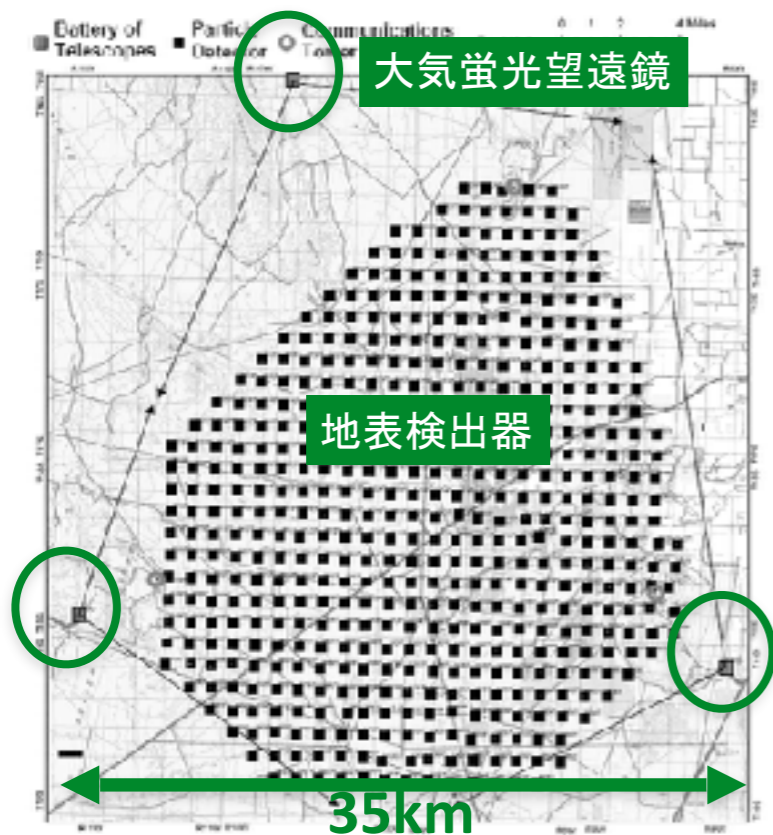
大気蛍光望遠鏡(FD)

30km

ns  
ation Towers  
ce Locations  
ser Facility  
daries  
Land  
nd  
Military Airspace: Sevier B



# 大気蛍光望遠鏡(FD)



望遠鏡ステーション @ Black Rock



各ステーションの間隔 ~35km

12台の望遠鏡を収納

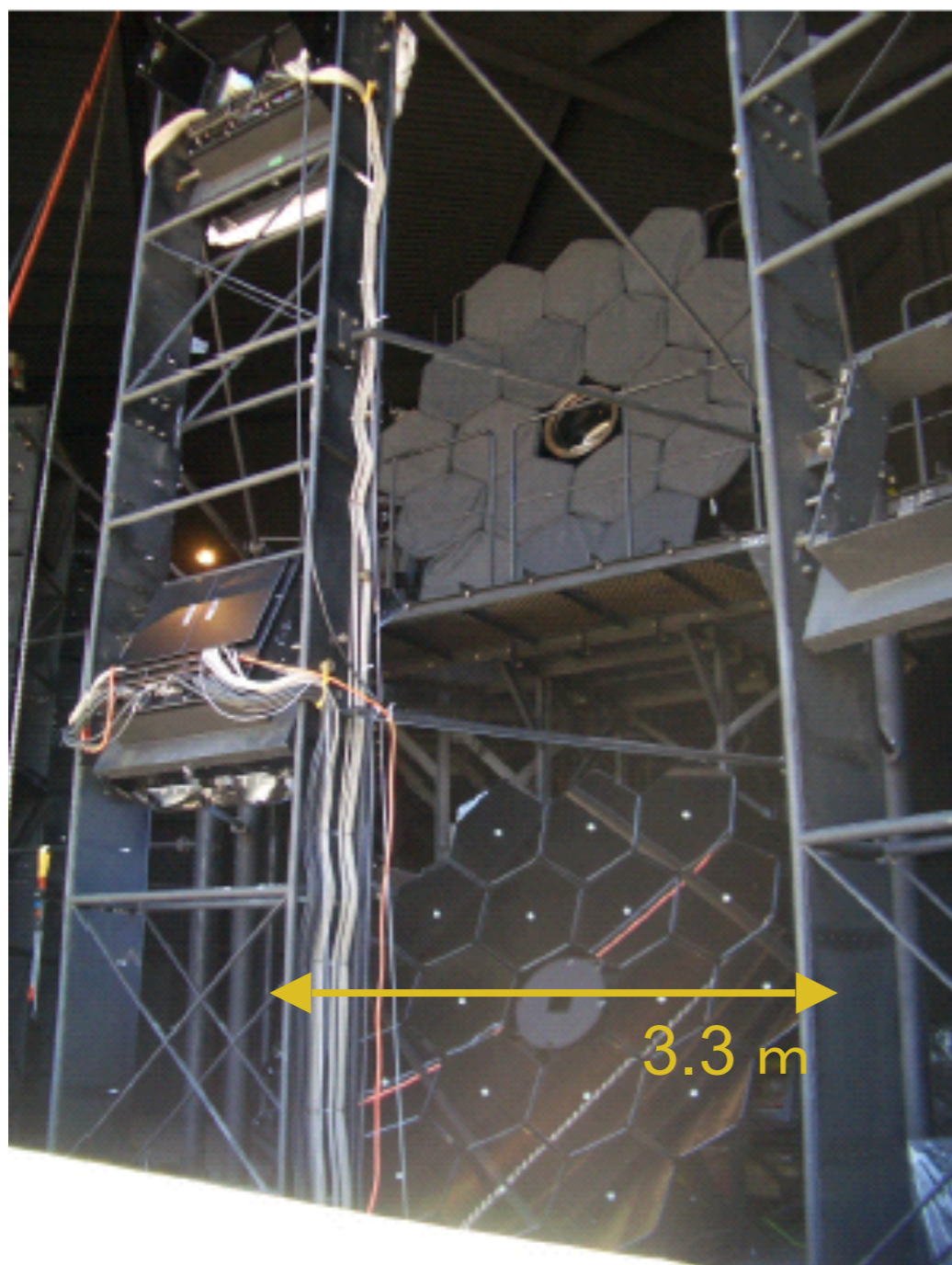
視野 方位角 :  $108^\circ$

仰角 :  $32^\circ$

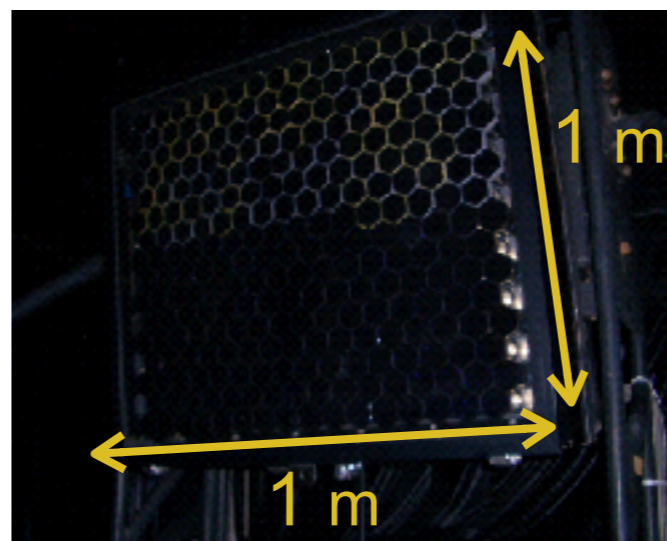


# 大気蛍光望遠鏡(FD)

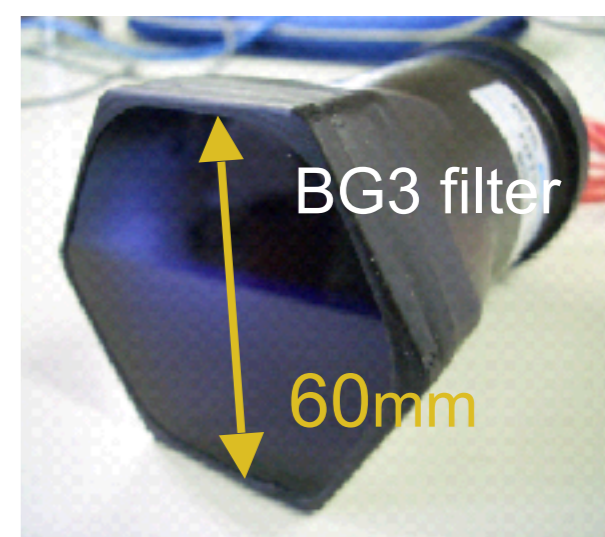
2段重ねで設置された望遠鏡



PMTカメラ



PMT



PMT | 1カメラ256本  
 HAMAMATSU R9508  
 Hexagonal bialkali photocathode  
 Borosilicate glass window, 8dynodes  
 Q.E. | 30% (350nm), Gain |  $8.0 \times 10^4$  (800V)  
 視野 | PMT  $1.1^\circ \times 1.0^\circ$ , Camera  $18^\circ \times 15.6^\circ$

## 球面反射鏡

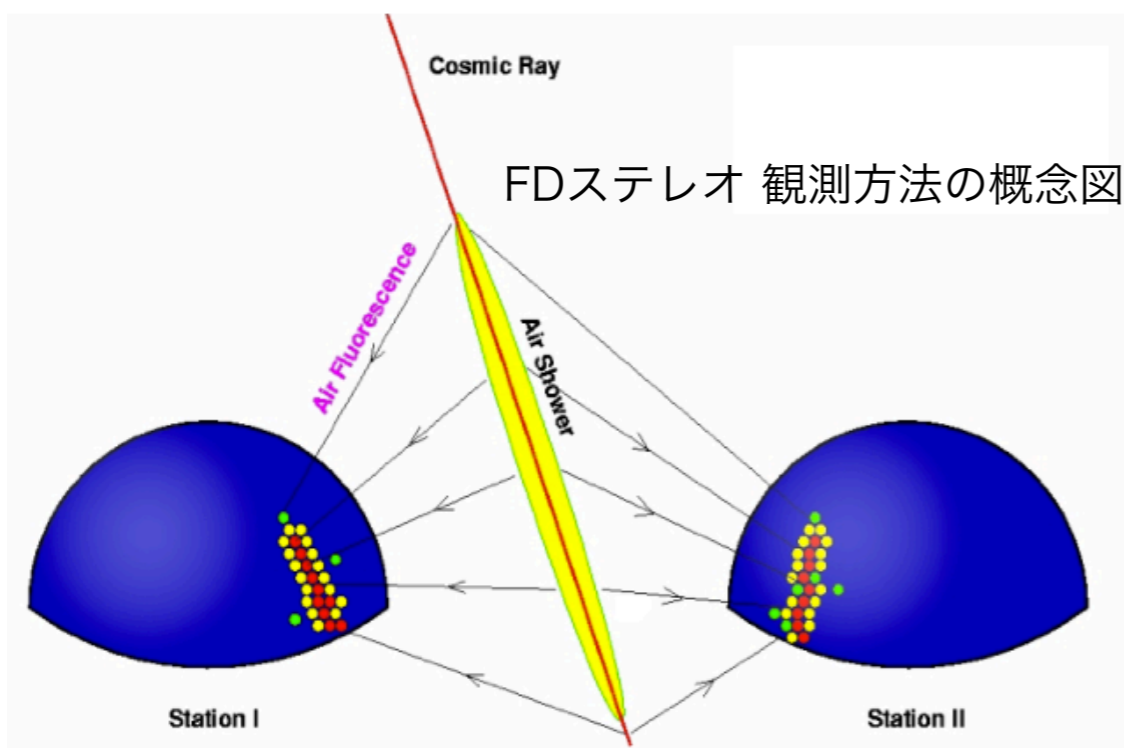
口径 | ~3.3 m (18枚から成る合成鏡)  
 曲率半径 | 6067 mm

# 大気蛍光望遠鏡 (FD)

空気シャワーの縦方向発達を測定

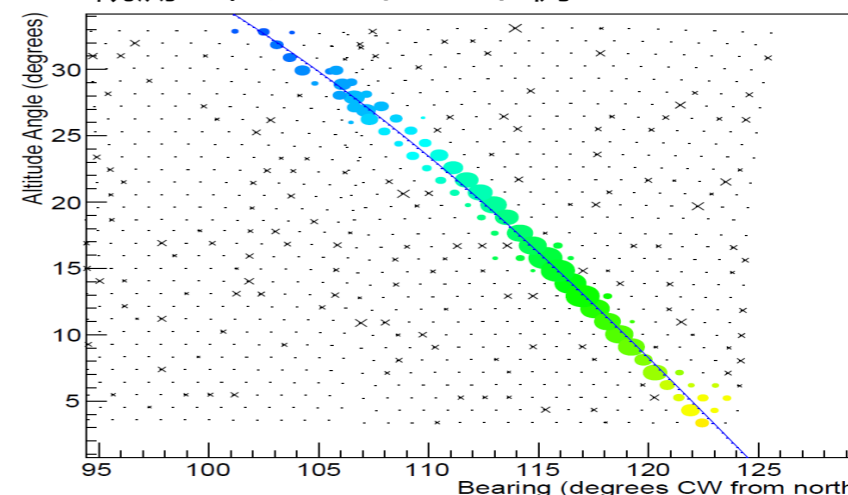
エネルギーをカロリメトリックに決定

Xmaxから質量組成を決定する

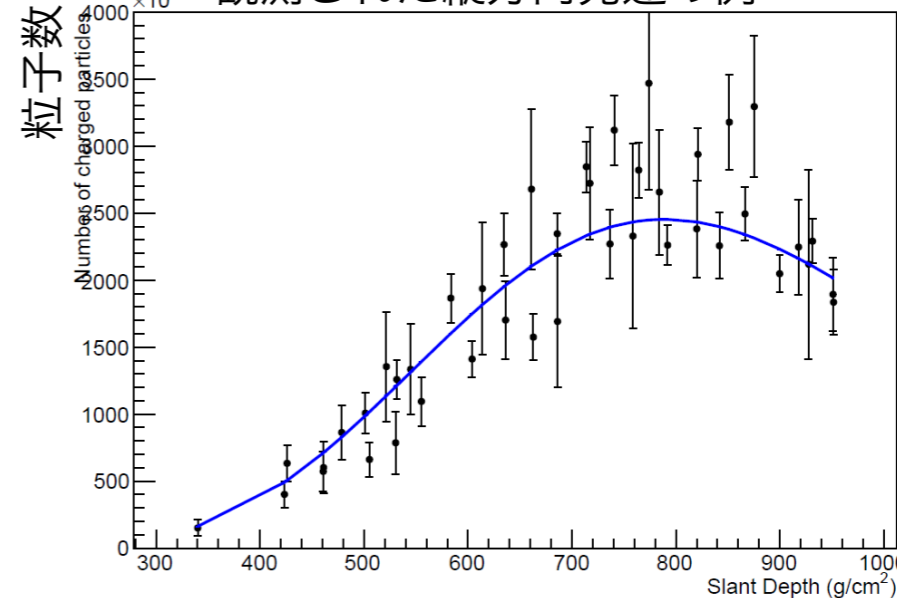


- ・ 望遠鏡 1 箇所：FD モノ
- ・ 望遠鏡 2 箇所：FD ステレオ
- ・ 望遠鏡と地表検出器：FD SD ハイブリッド

観測されたFDイベント例



観測された縦方向発達の例



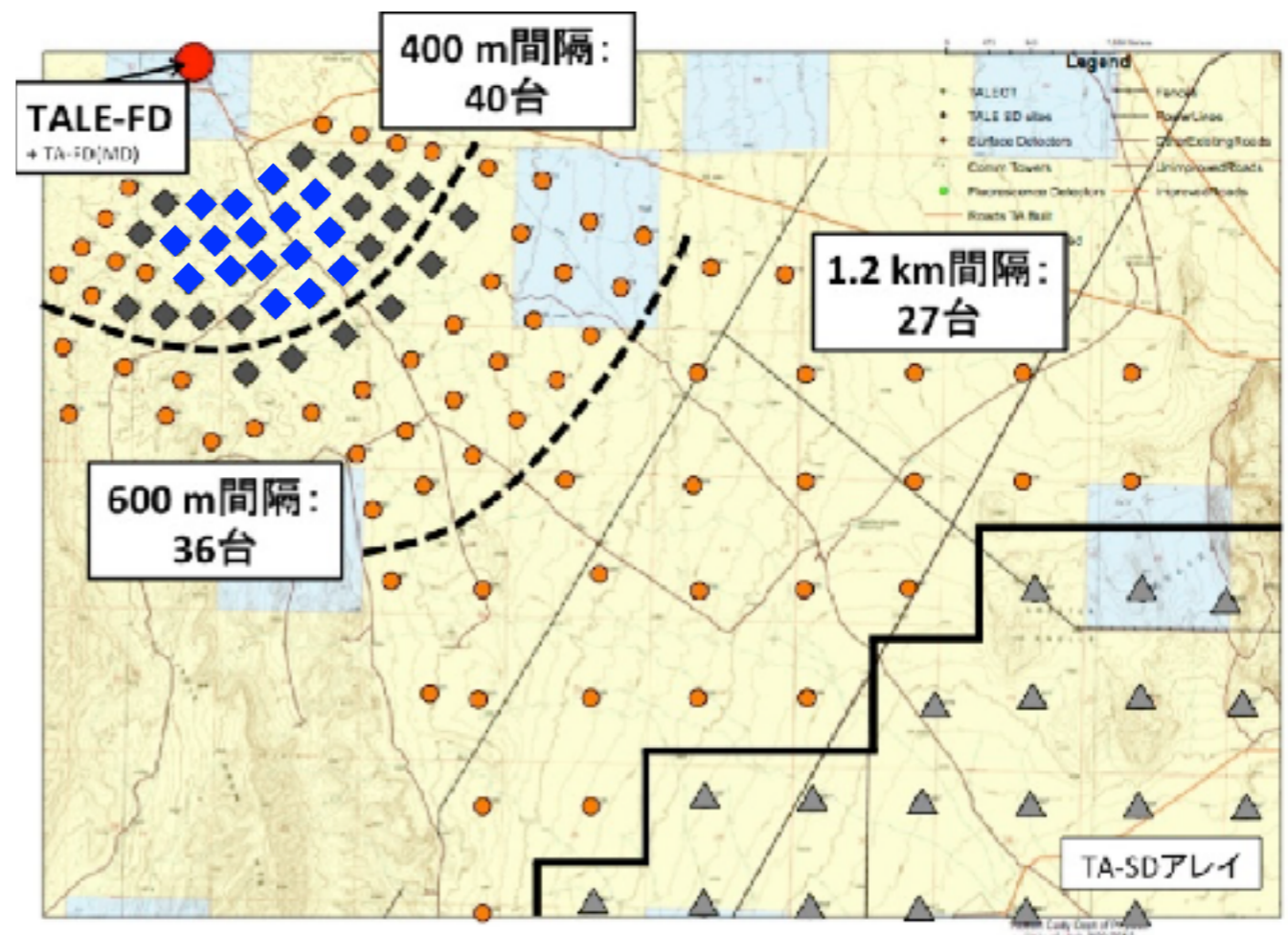
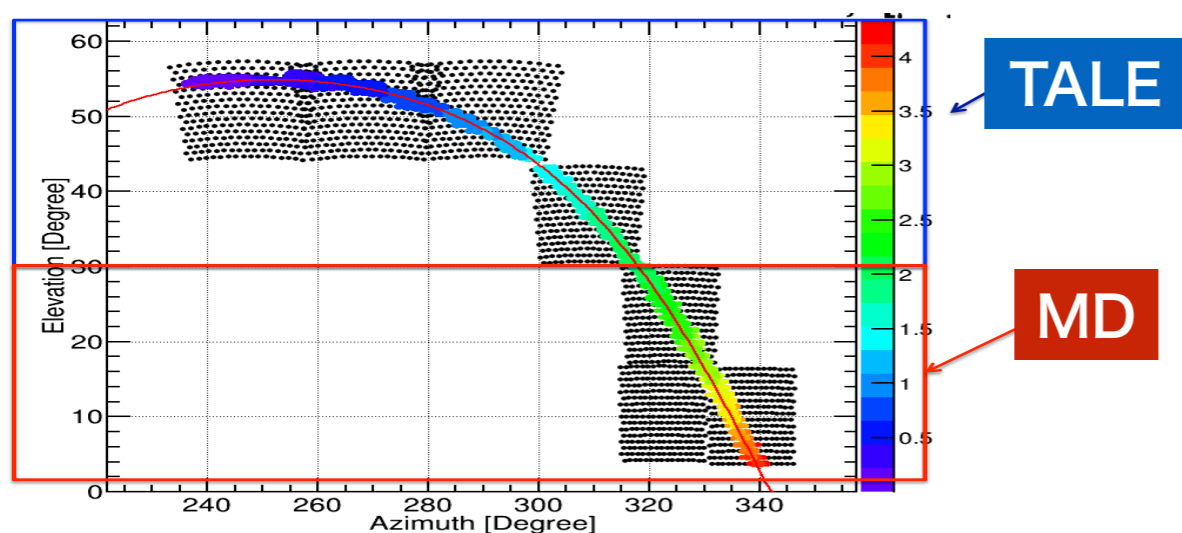
縦方向発達のフィッティング関数 (G.H.関数)

$$N(X) = N_{\max} \left( \frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{X}} \exp \left( \frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right)$$



# TALE : TA Low Energy Extension

- ・ TAの低エネルギー拡張実験
- ・ 宇宙線の銀河系内から銀河系外への遷移が期待されるエネルギー領域の観測
- ・ 大気蛍光望遠鏡
  - ・ 高仰角 (30 - 57deg.)
  - ・ 2013年9月より稼働
- ・ 地表検出器 (基盤研究(S), 2015-2020)
  - ・ 103台, 400m, 600m, 1.2km 間隔
  - ・ 35台設置済(黒), 16台が稼働(青)



The logo for the Telescope Array Project is a circular emblem. It features a central cluster of colorful hexagons in shades of purple, blue, and orange, representing the detector array. The words "TELESCOPE ARRAY" are written in a semi-circle above the cluster, and "PROJECT" is written in a semi-circle below it. The entire emblem is set against a light gray background.

# TA実験の成果

エネルギー  
スペクトル

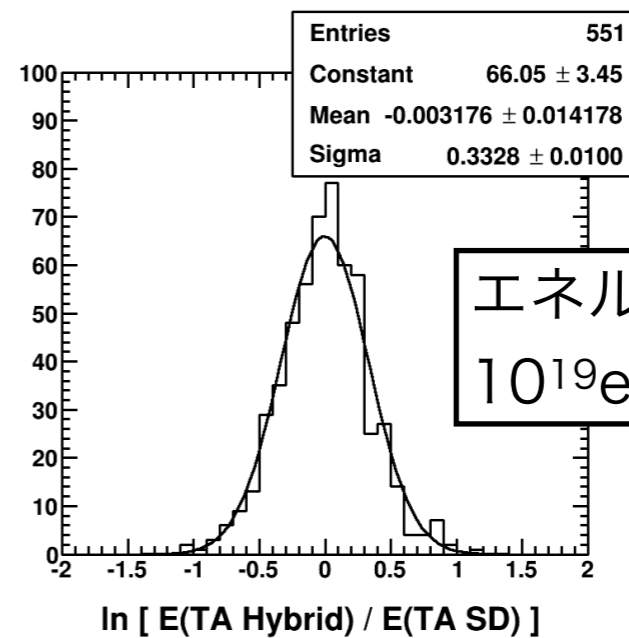
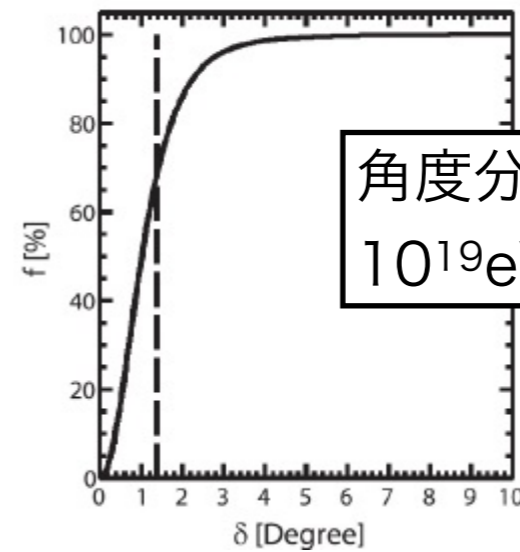
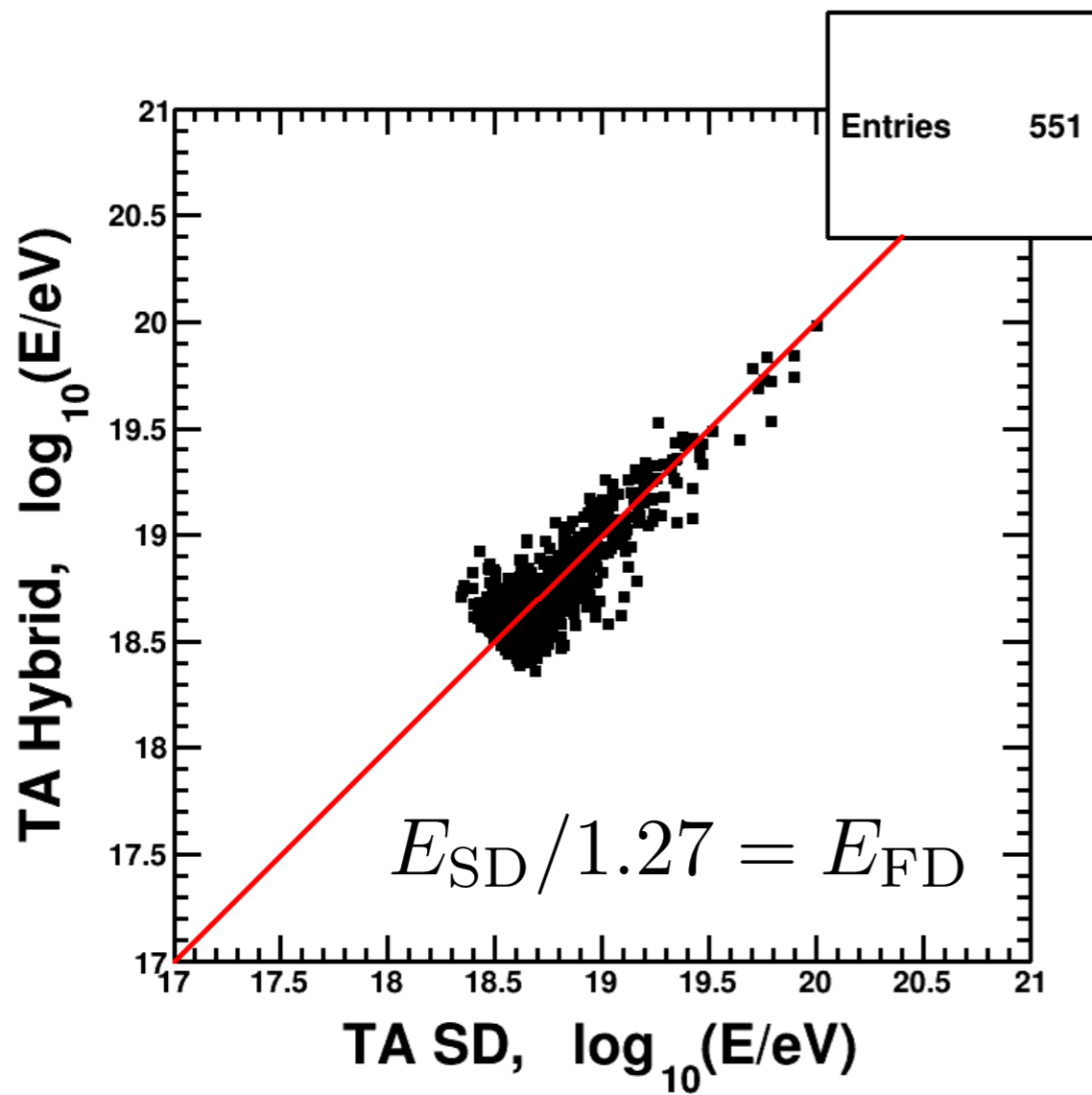
質量組成

到来方向

# エネルギースペクトル

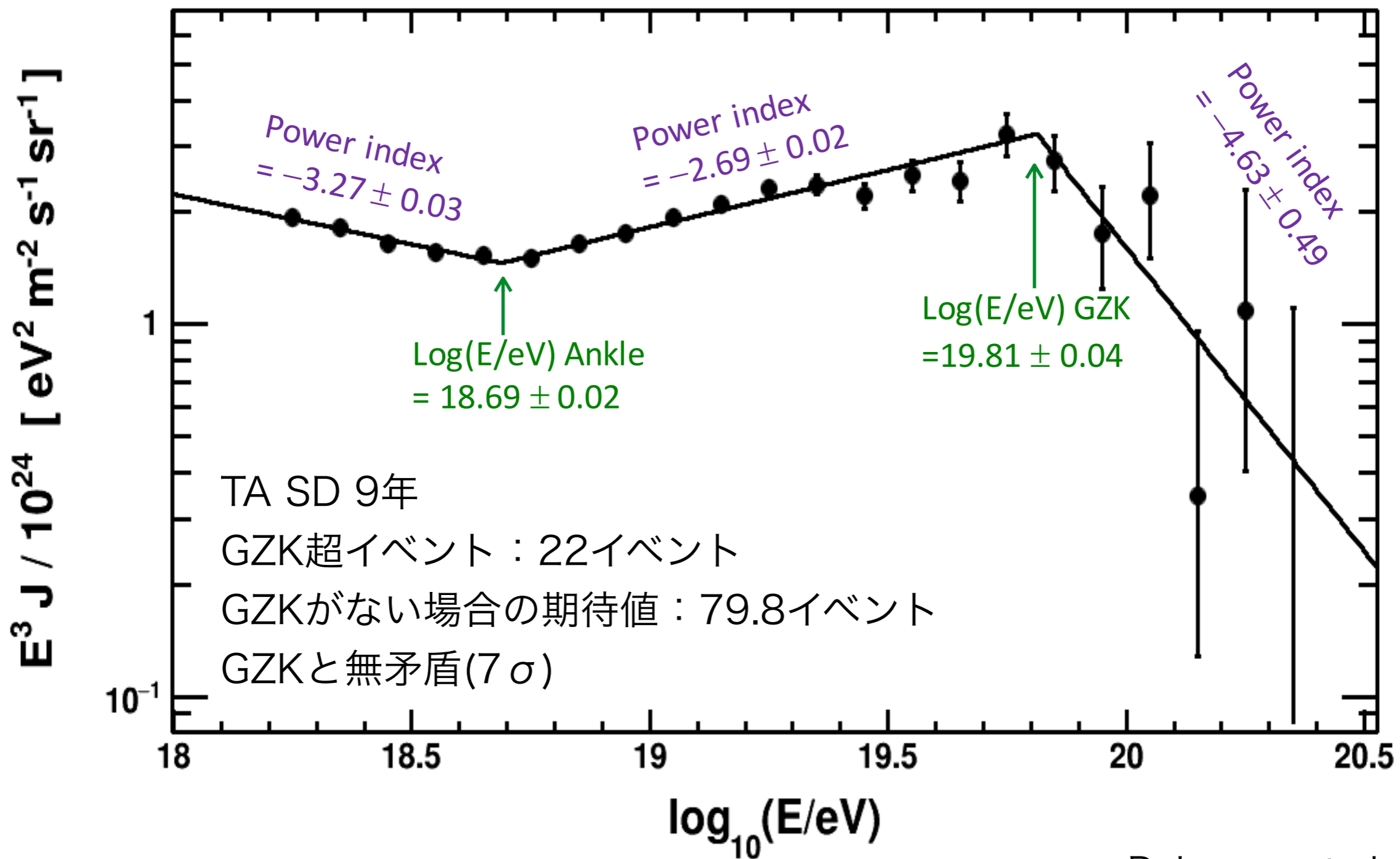


# エネルギースケール





# TA SD : エネルギースペクトル

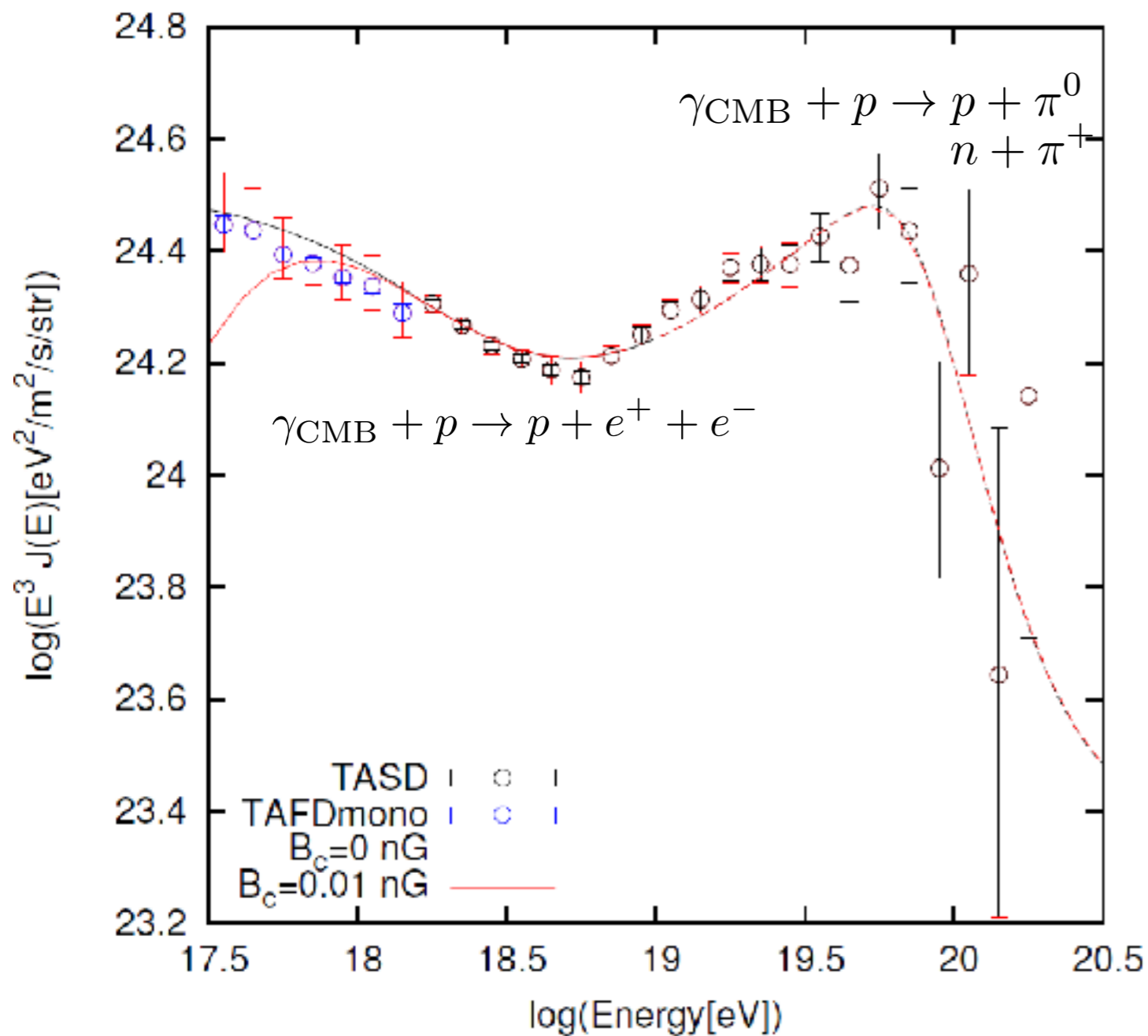


D. Ivanov et al. ICRC2017



# エネルギースペクトルの解釈

地表検出器 7年分



エネルギースペクトルをフィット

陽子組成モデル

$E > 10^{17.5} \text{eV}$

Injection spectrum:  $E^{-p}$

Source density:  $(1+z)^m$

p	2.34
m	4.1
$\Delta \log_{10} E$	-0.11 (-21%)

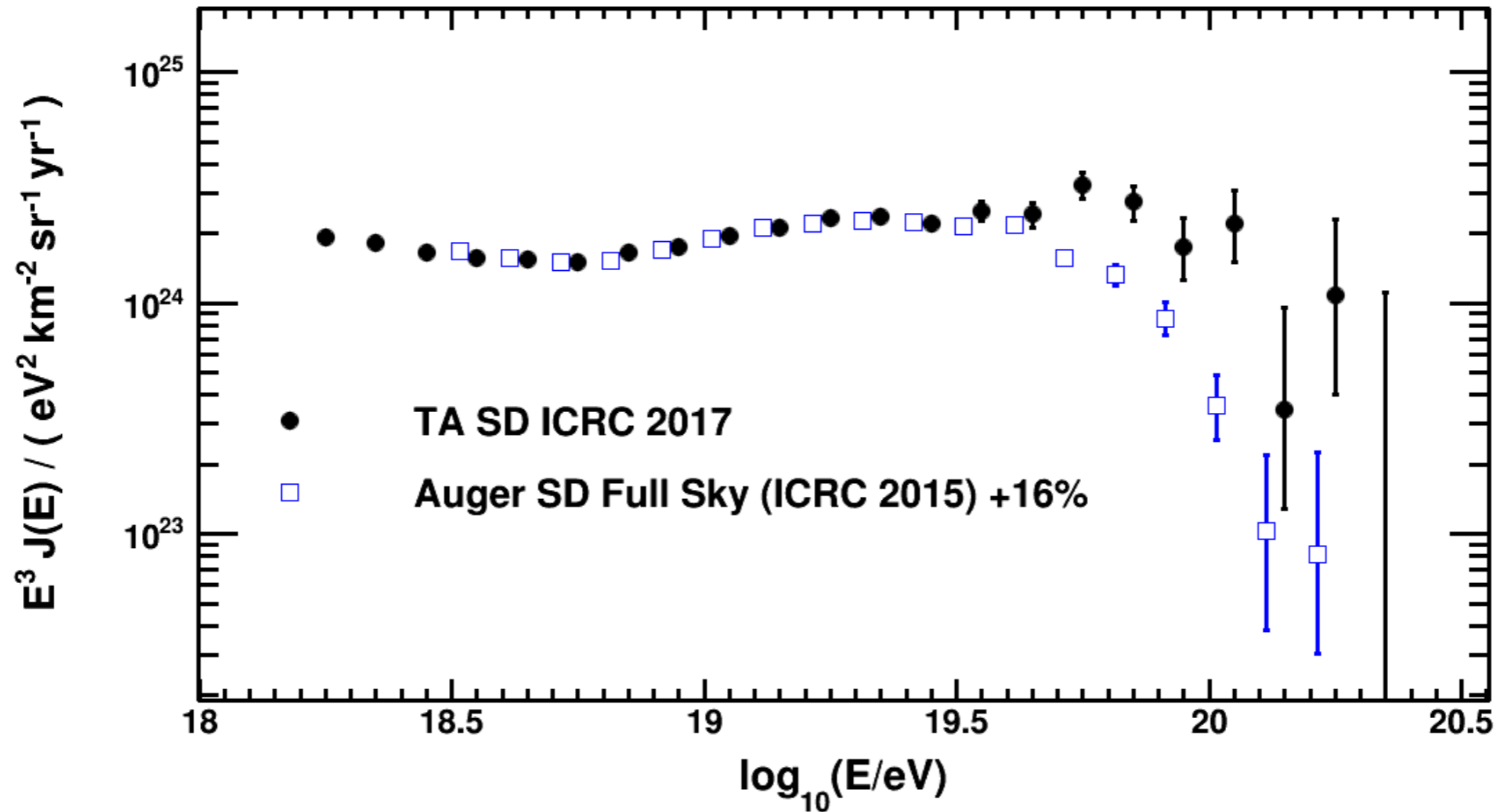
陽子組成モデルと無矛盾 ( $> 10^{18} \text{eV}$ )

E. Kido et al. ICRC 2017



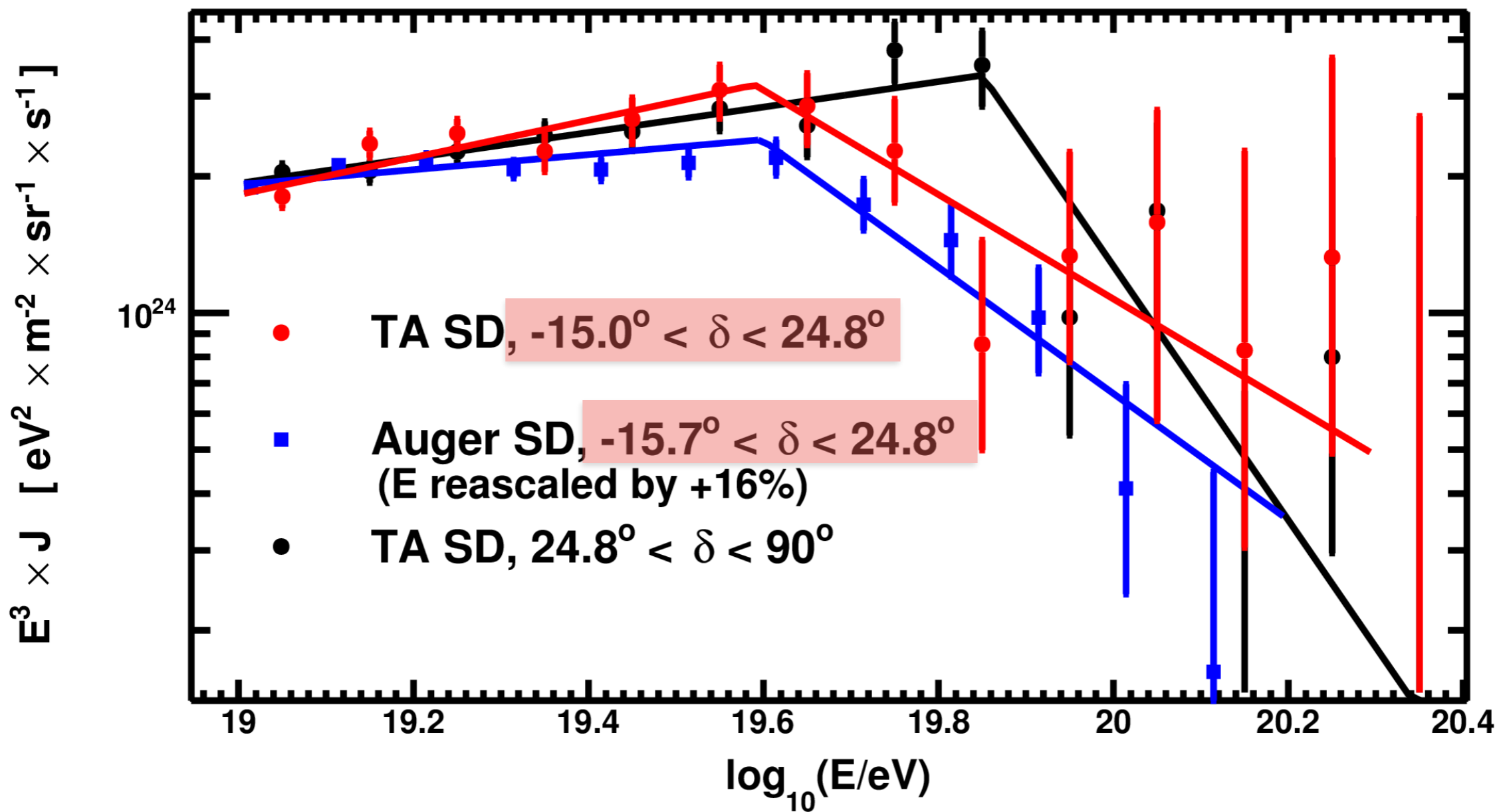


# エネルギースペクトルの比較：TA実験/Auger実験(1)



D. Ivanov et al. ICRC2017

# エネルギースペクトルの比較：TA実験/Auger実験(2)

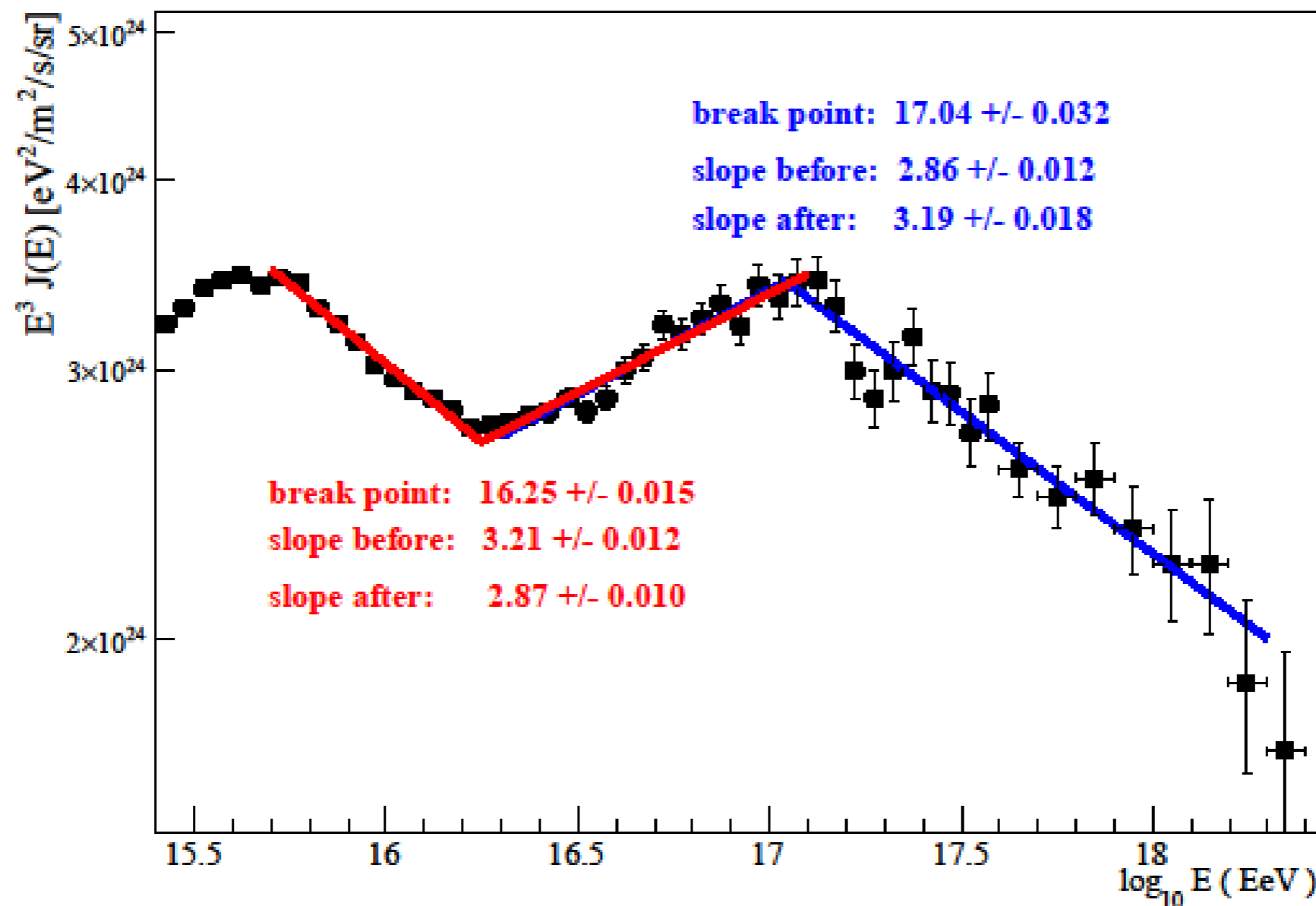


D. Ivanov et al. ICRC2017



# TALE : エネルギーースペクトル

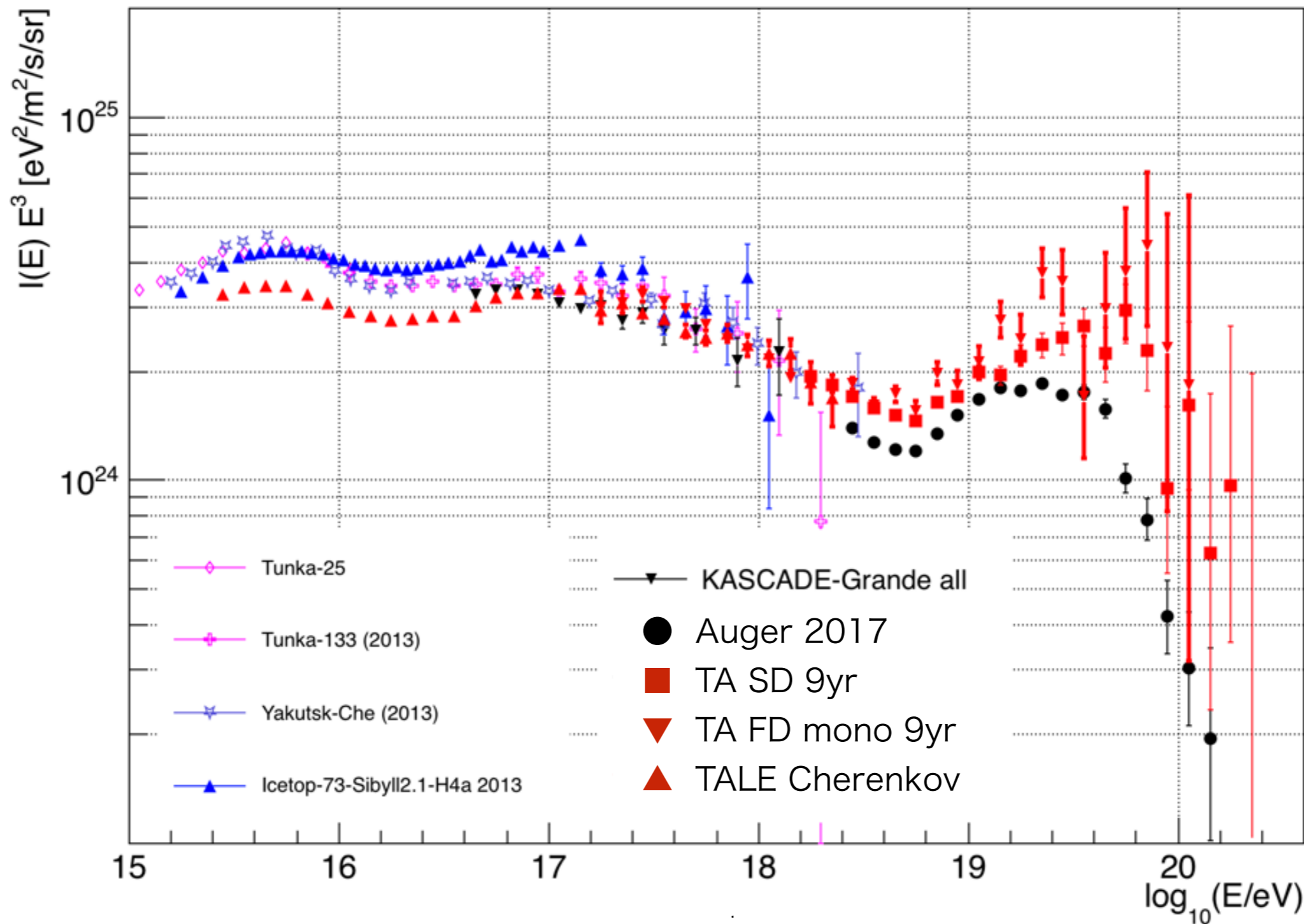
TALE Energy spectrum (Monocular)



T. AbuZayyad et al. ICRC2017



# TA+TALE : エネルギースペクトル



Y. Tsunesada et al. ICRC2017



# 質量組成



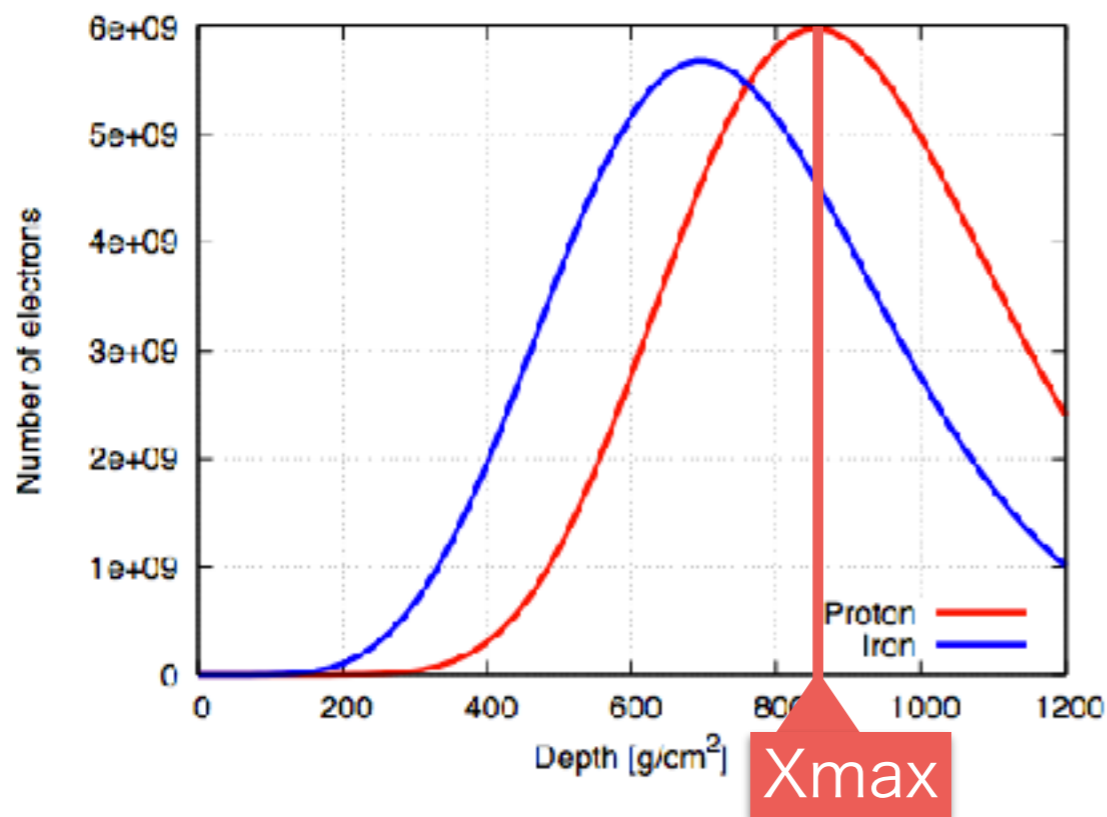
# Xmaxを用いた質量組成解析

シャワー発達の違いから核種を同定

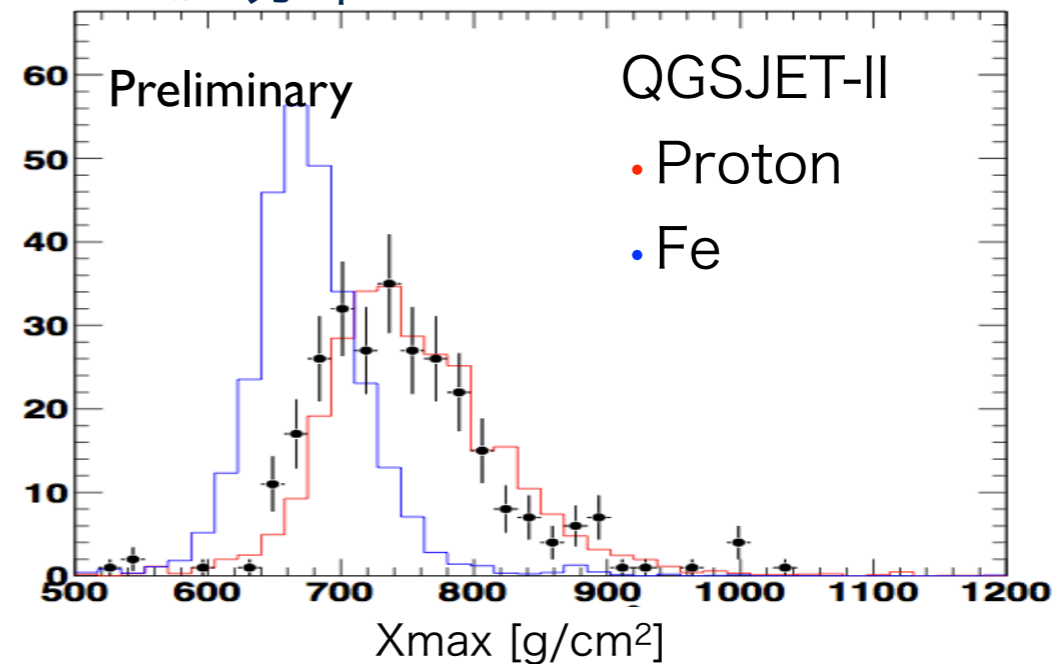
Xmax | 空気シャワーの最大発達深さ

予想されるXmaxの分布をデータと比較

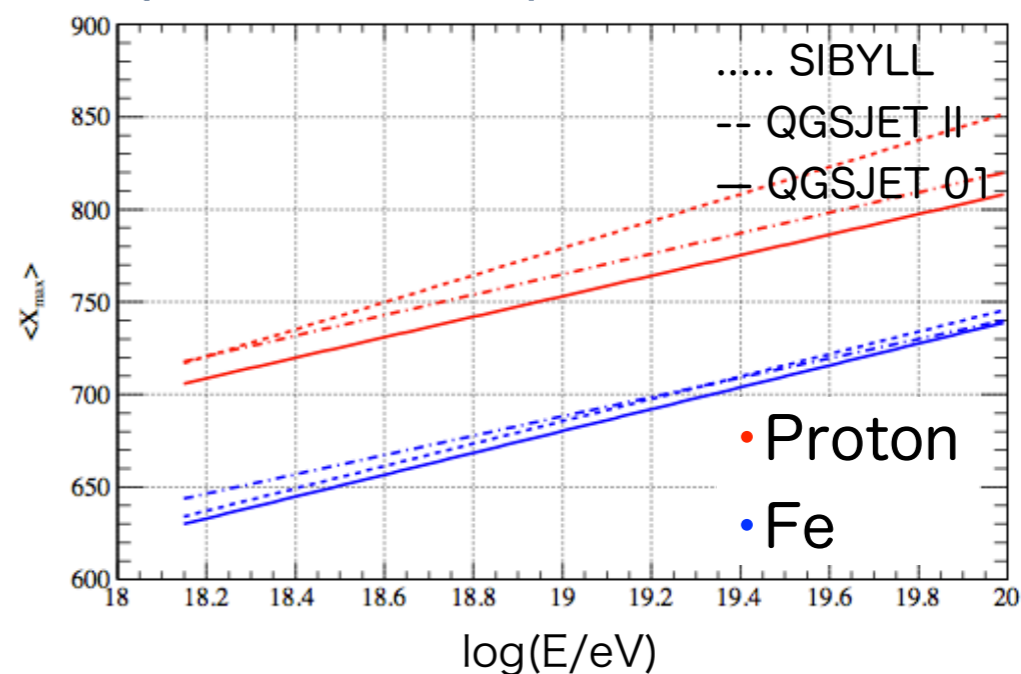
陽子、鉄原子核によるシャワー発達



### Xmax 分布



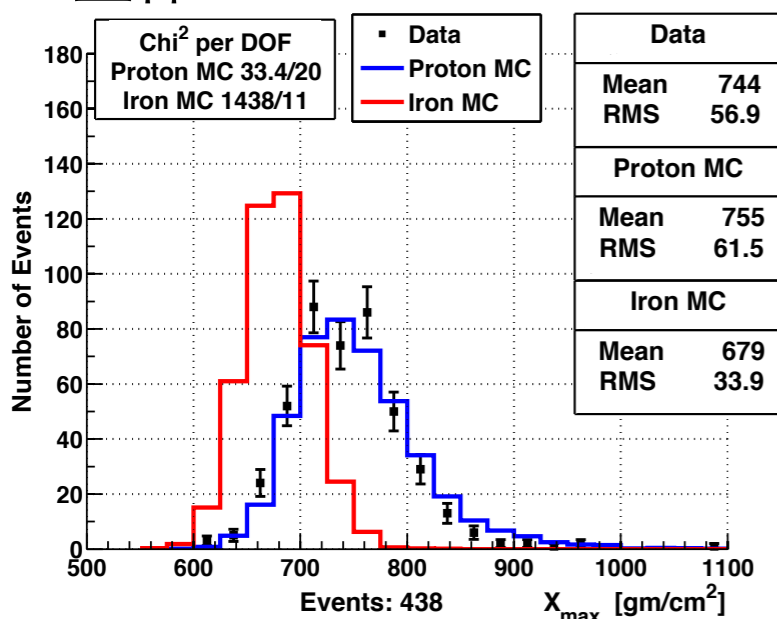
### 平均 Xmax 分布



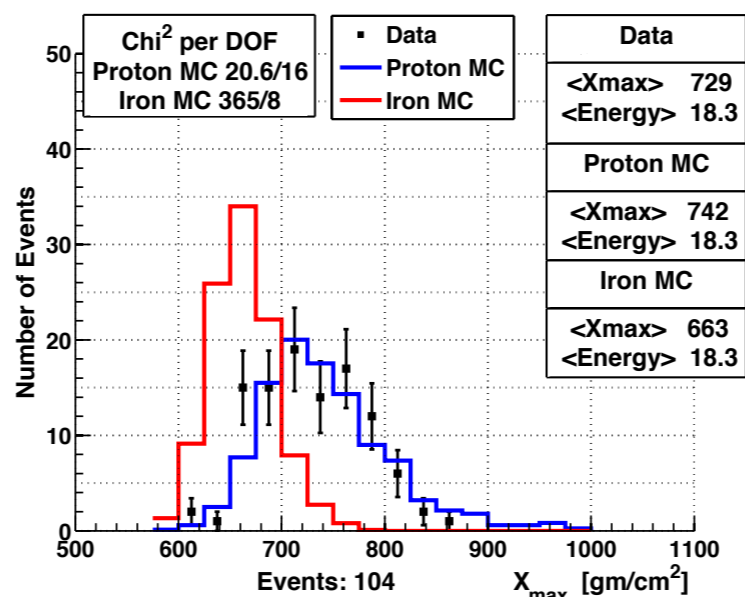


# TA MD hybrid : Xmax分布

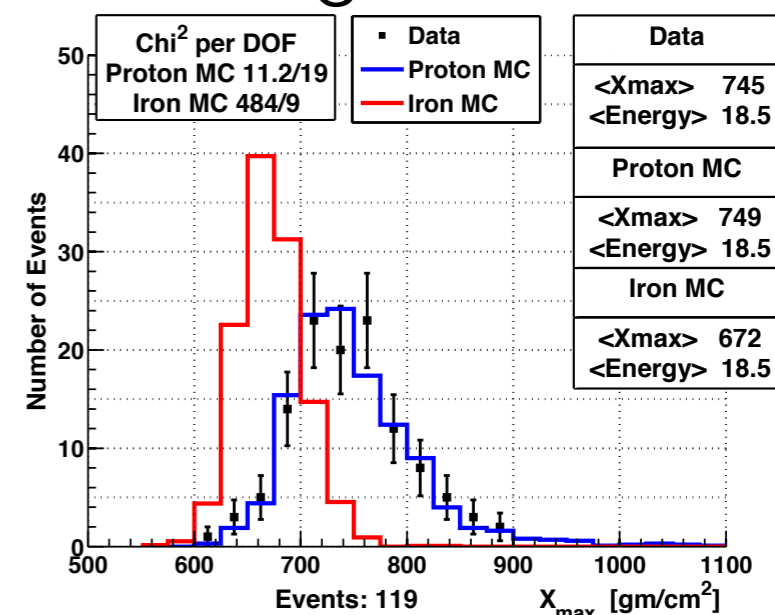
全体



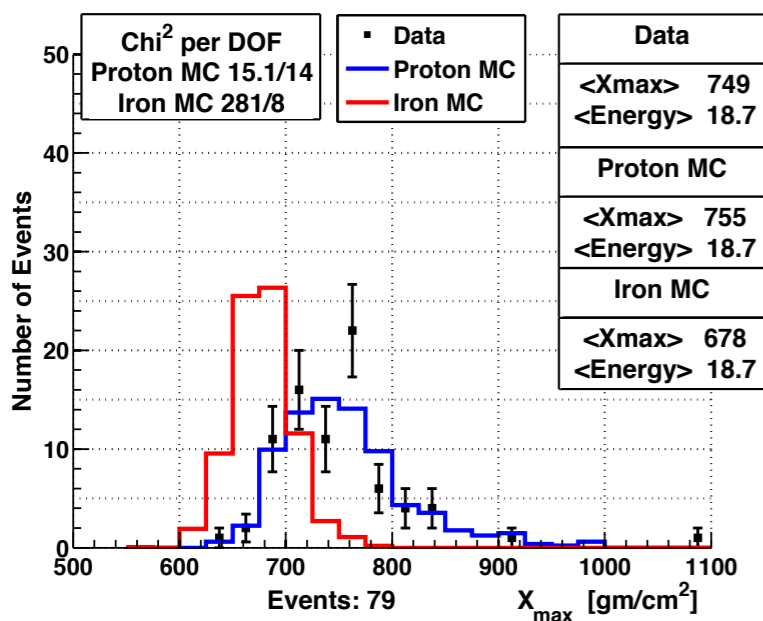
18.4 > logE > 18.2



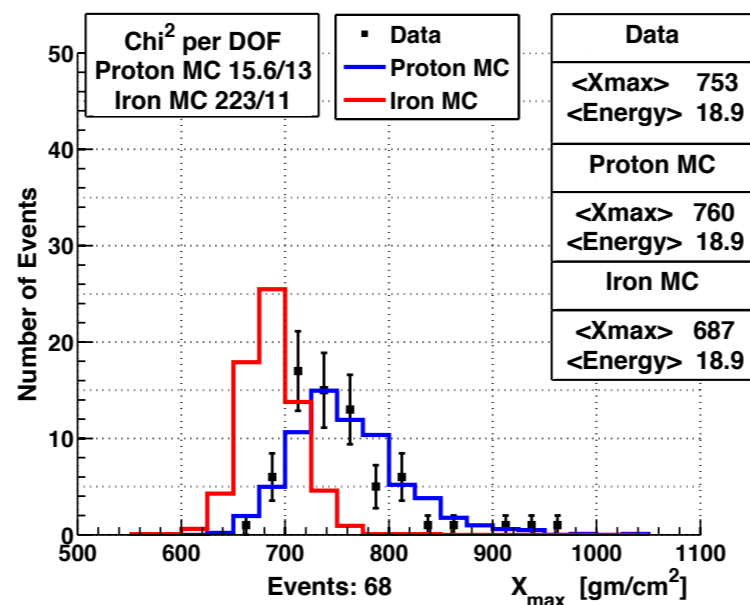
18.6 > logE > 18.4



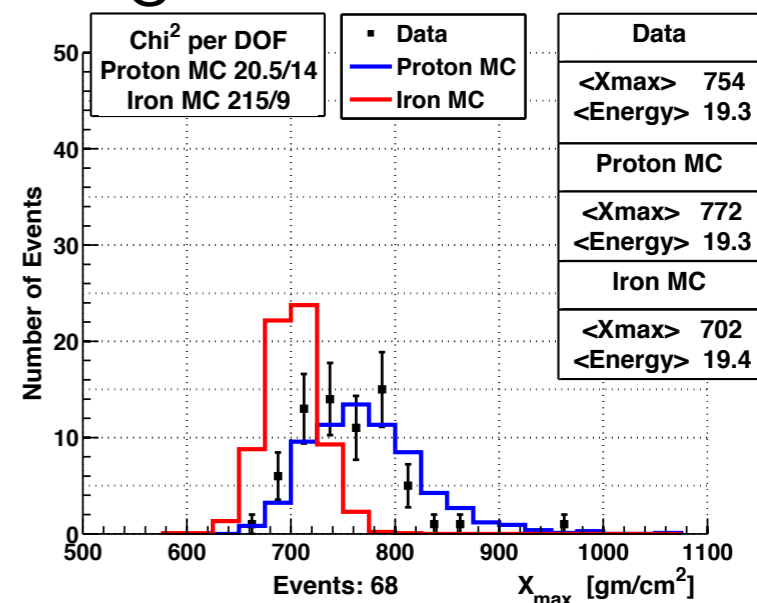
18.8 > logE > 18.6



19.0 > logE > 18.8



logE > 19.0

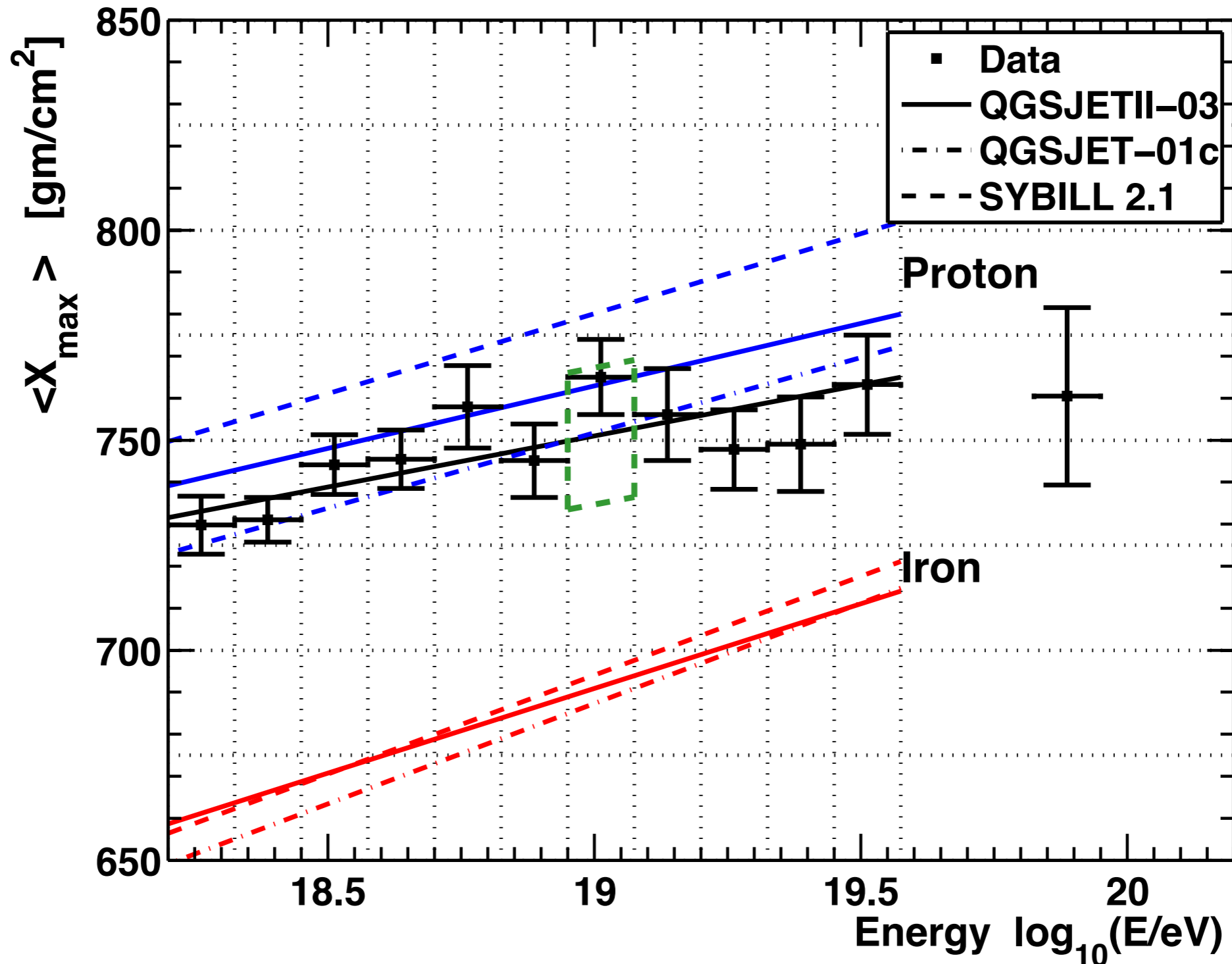


MC : QGSjet II 03 (—陽子 —鉄)

R.U. Abbasi et al. 2014



# TA MD hybrid : Xmax分布

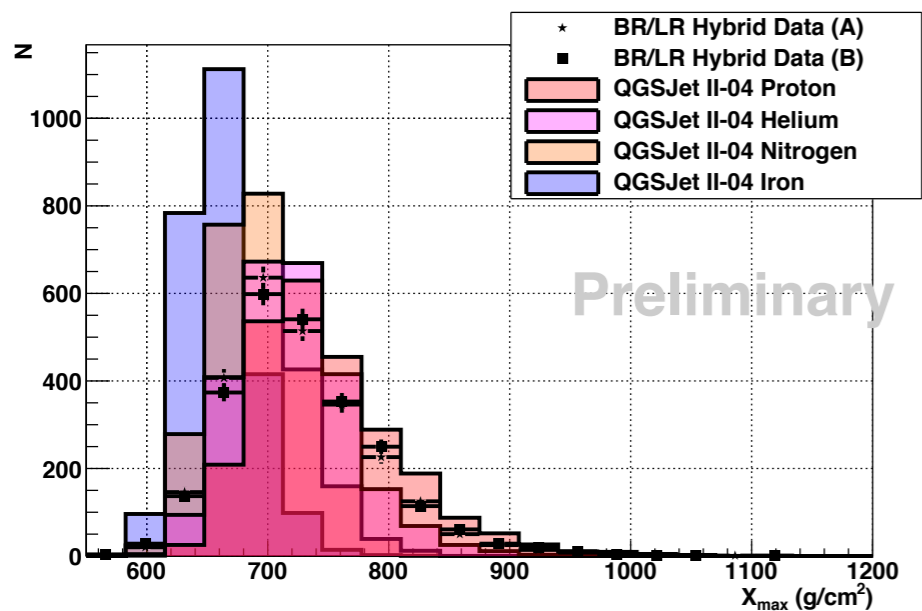


MC : QGSjet II 03 (—陽子 —鉄)

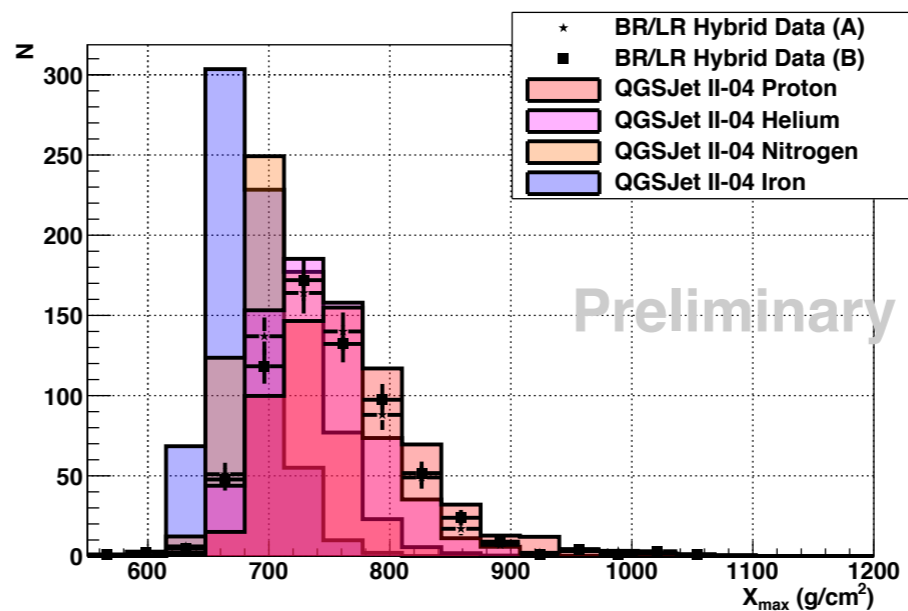
R.U. Abbasi et al. 2014



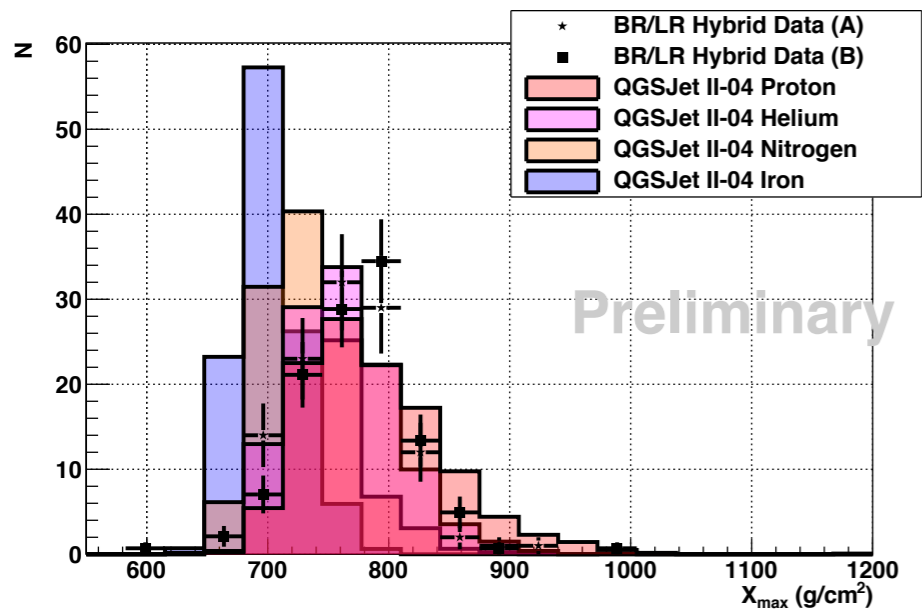
# TA hybrid : Xmax分布



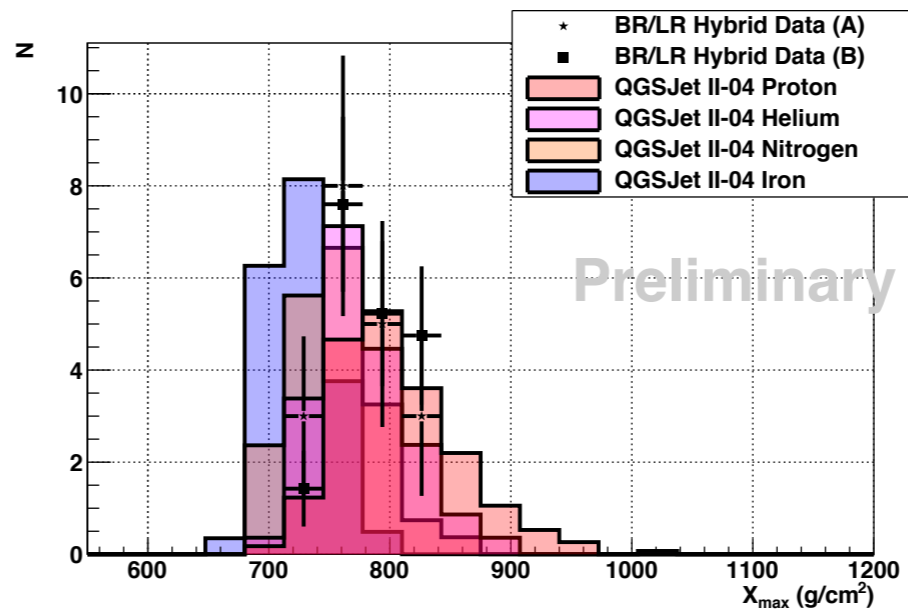
(a)  $18.2 \leq \log_{10}(E/eV) < 18.6$



(b)  $18.6 \leq \log_{10}(E/eV) < 19.0$



(c)  $19.0 \leq \log_{10}(E/eV) < 19.4$

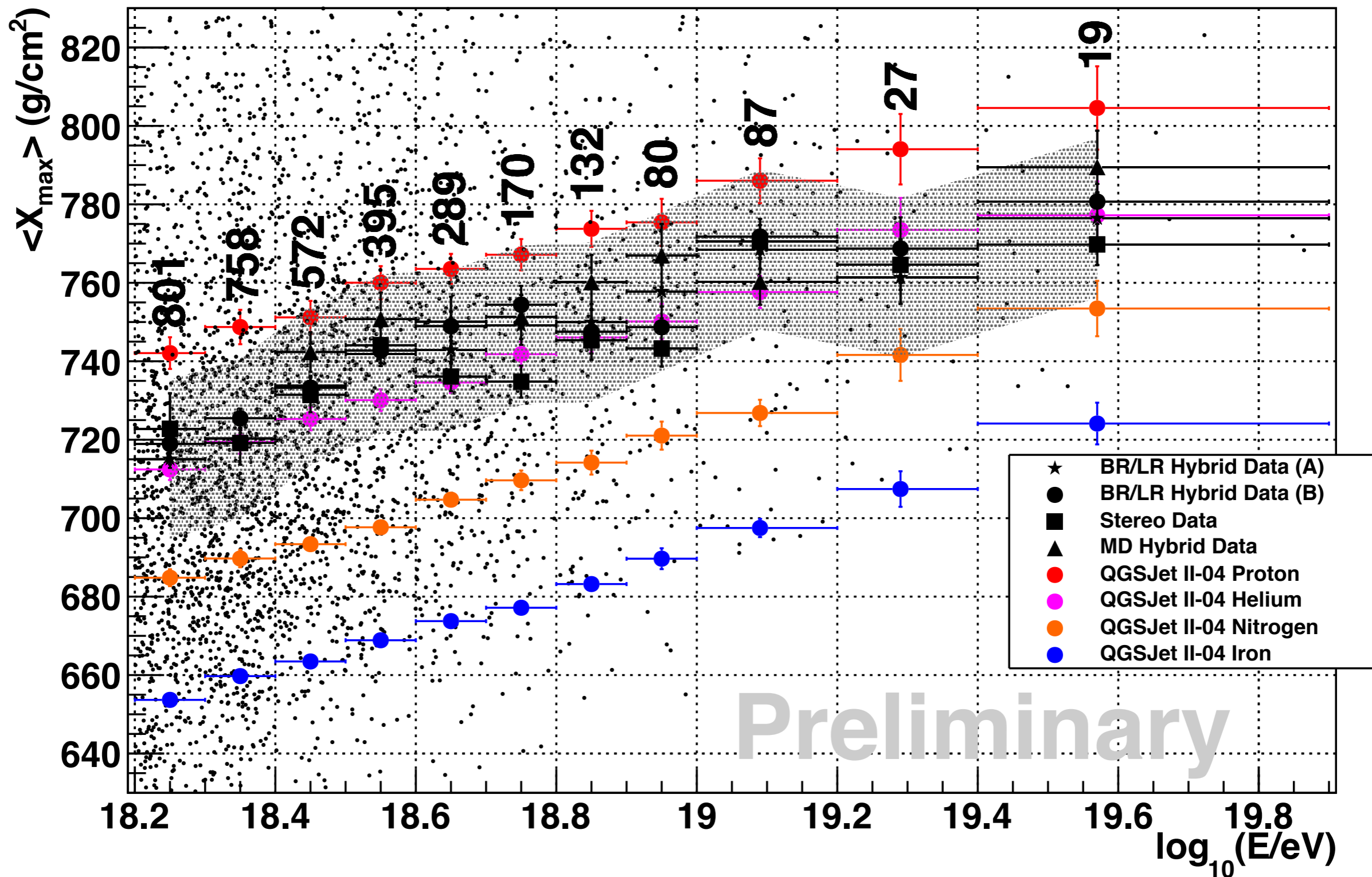


(d)  $\log_{10}(E/eV) \geq 19.4$

MC : QGSjet II 04  
陽子, ヘリウム, 窒素, 鉄

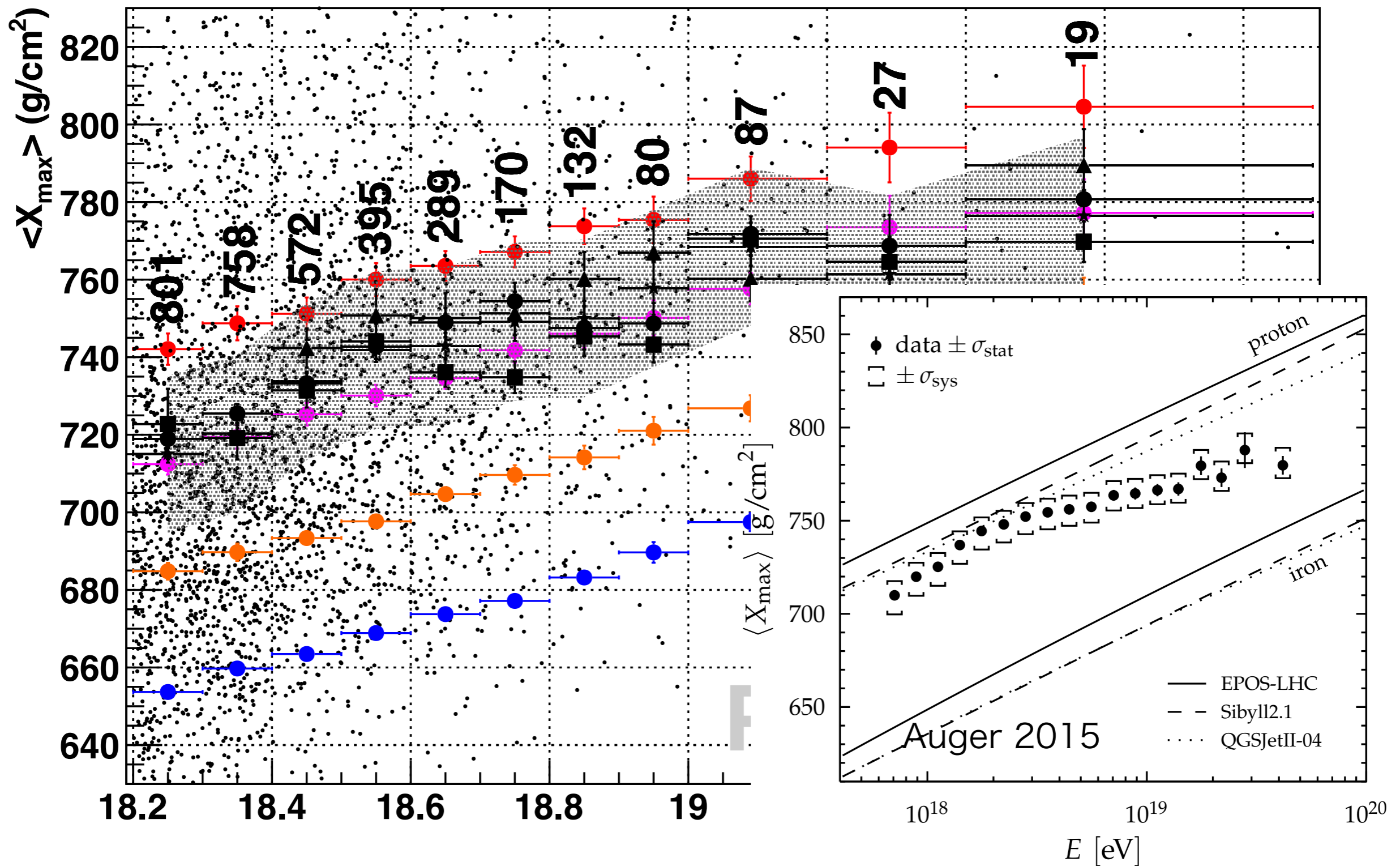
W. Hanlon et al. ICRC2017

# TA FD : 平均 $X_{max}$

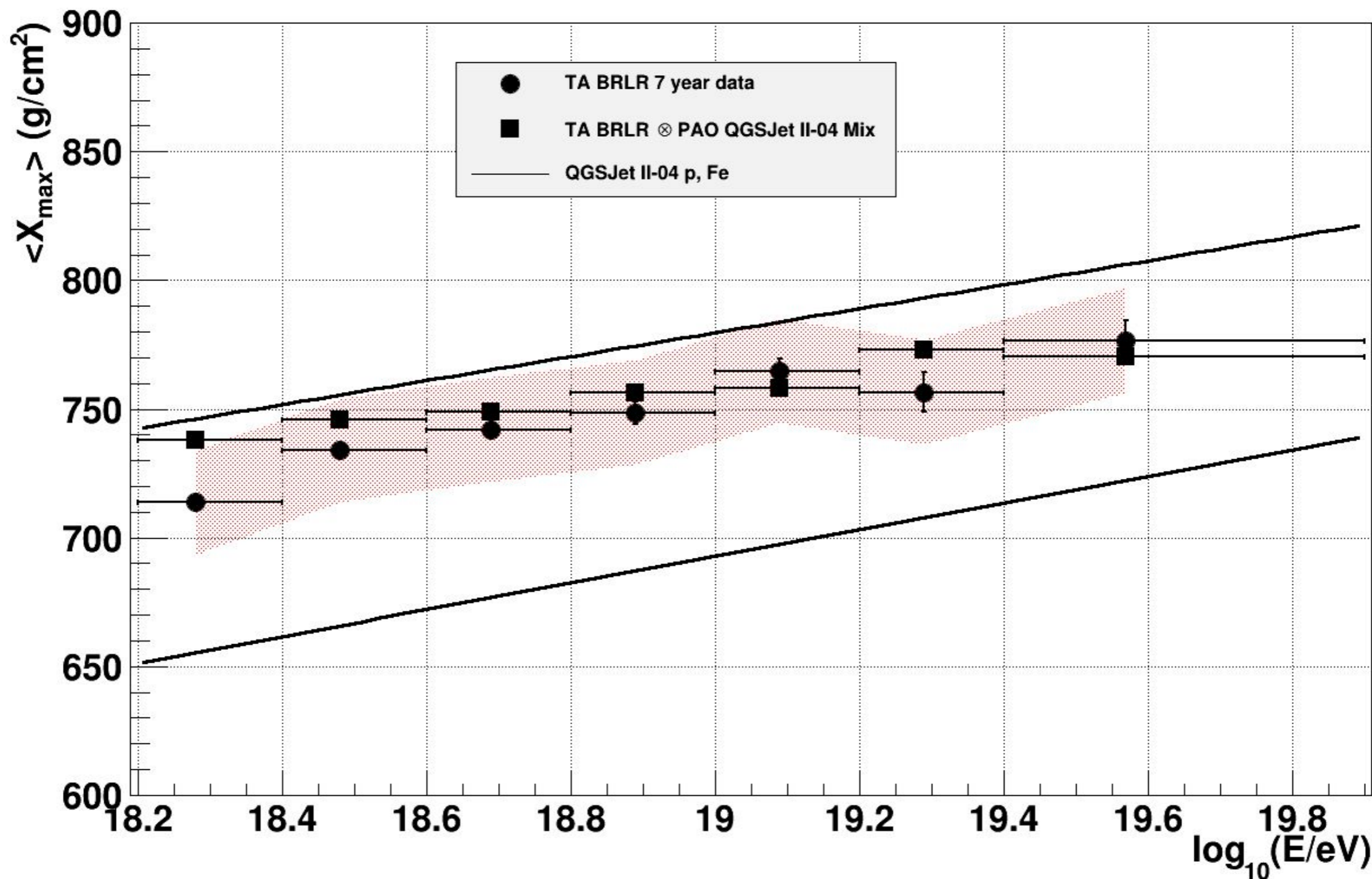


W. Hanlon et al. ICRC2017

# TA FD : 平均 $X_{max}$

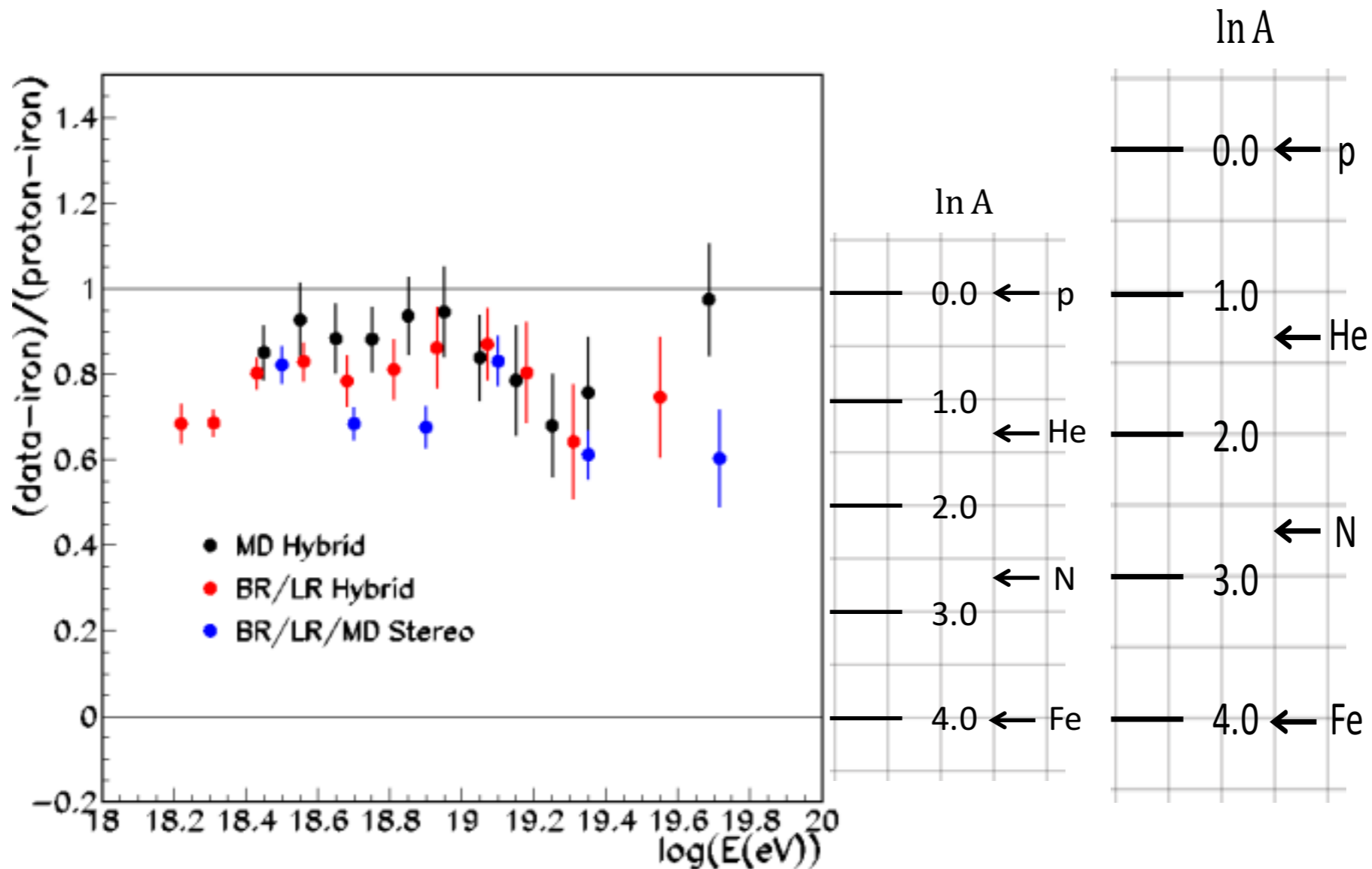


# Xmax : TA vs Auger

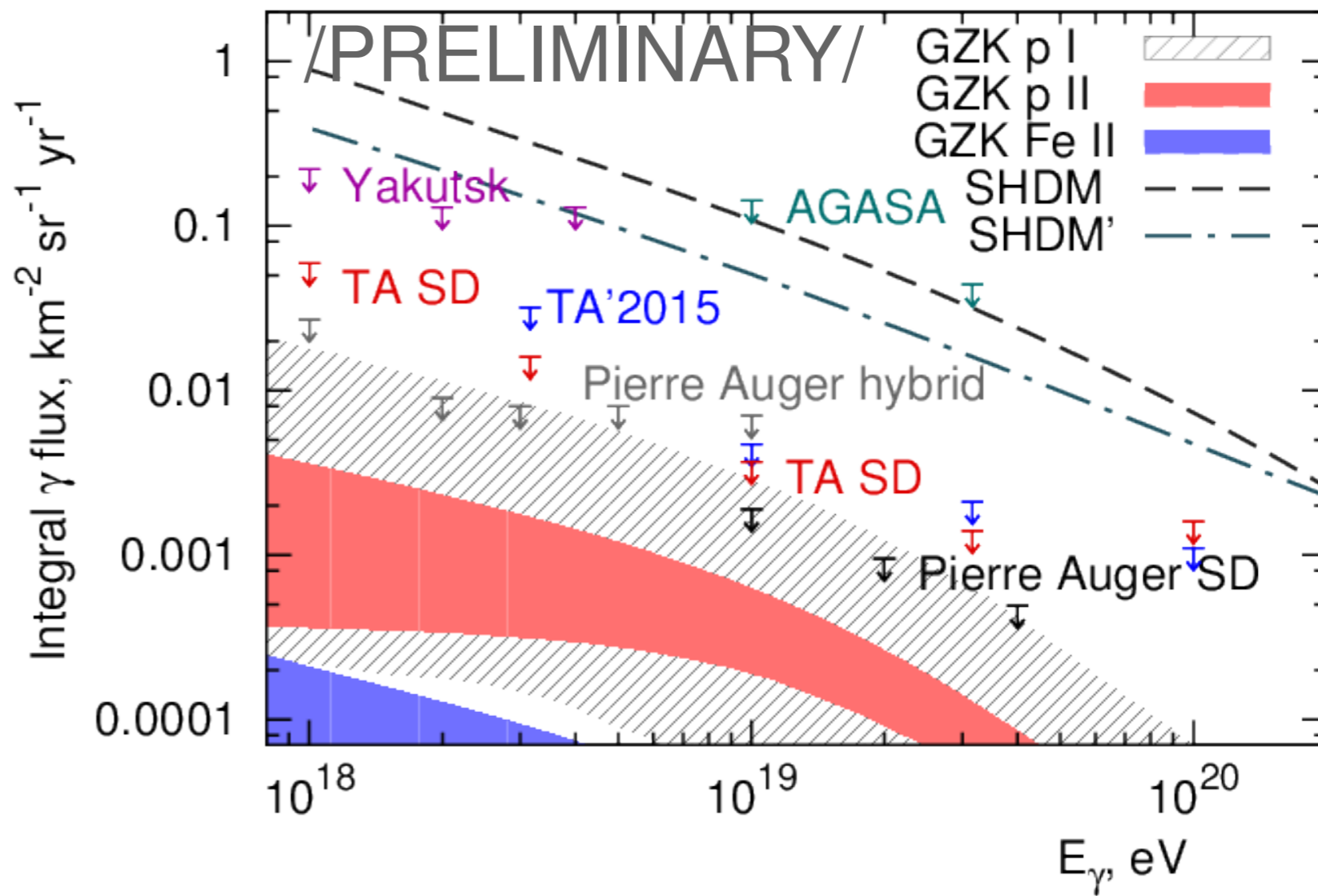
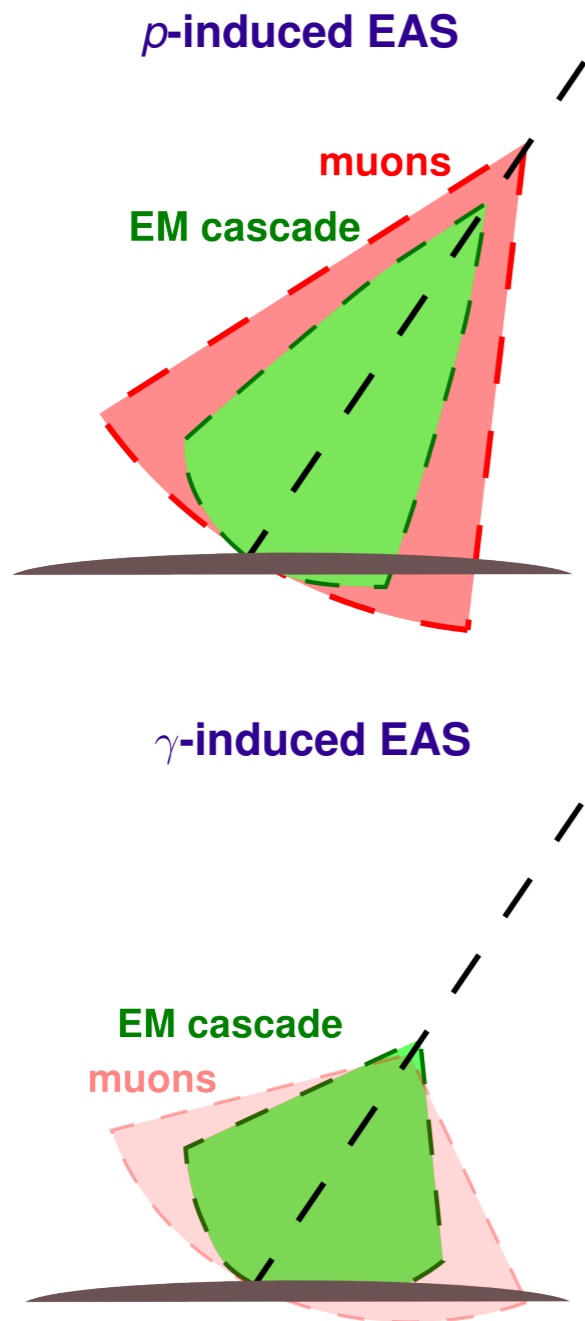


Composition working group UHECR2016

# 平均原子番号 $\langle \ln A \rangle$



# ガンマ線探索



G.I. Rubtsov et al. ICRC2017

# 到来方向解析





# 到来方向解析(データ・セット)

SDデータ9年

Geometrical acceptance; exposure 8600 km<sup>2</sup> yr sr

異方性解析データ・セット

- zenith angle <55°
- core inside array boundary
- angular resolution: <1.5°
- energy resolution: ~20%

10 EeV以上	3691
40 EeV以上	257
57 EeV以上	108

ホットスポット解析データ・セット

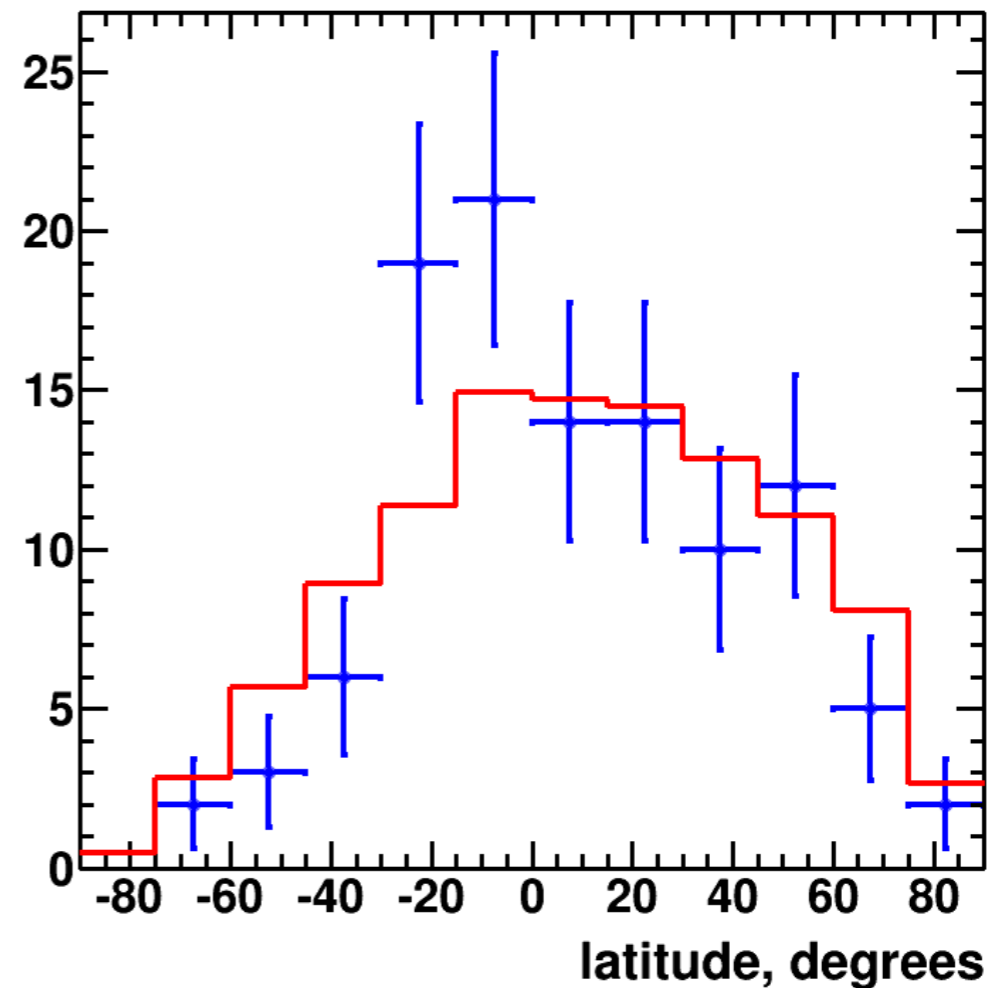
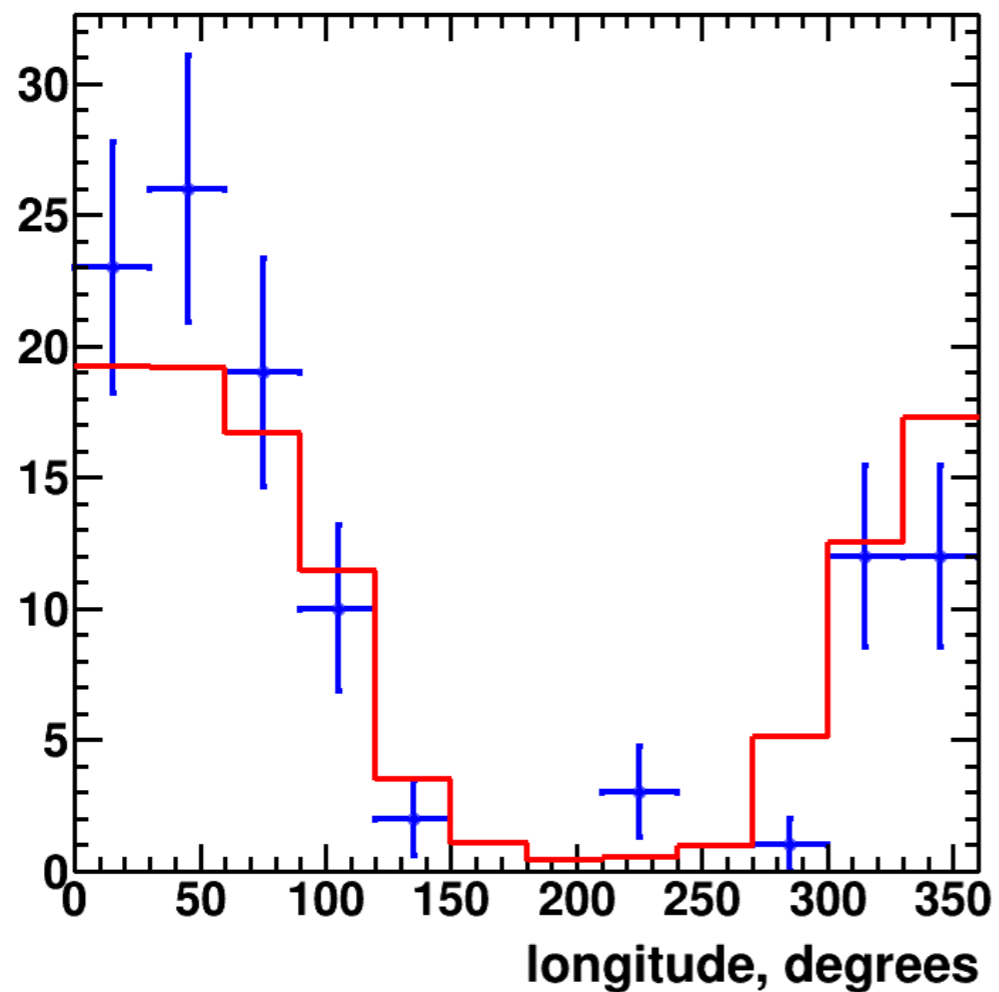
- loose cuts (4 stations)
- angular resolution: <1.7°

57 EeV以上	108
100 EeV以上	23



# 到来方向分布

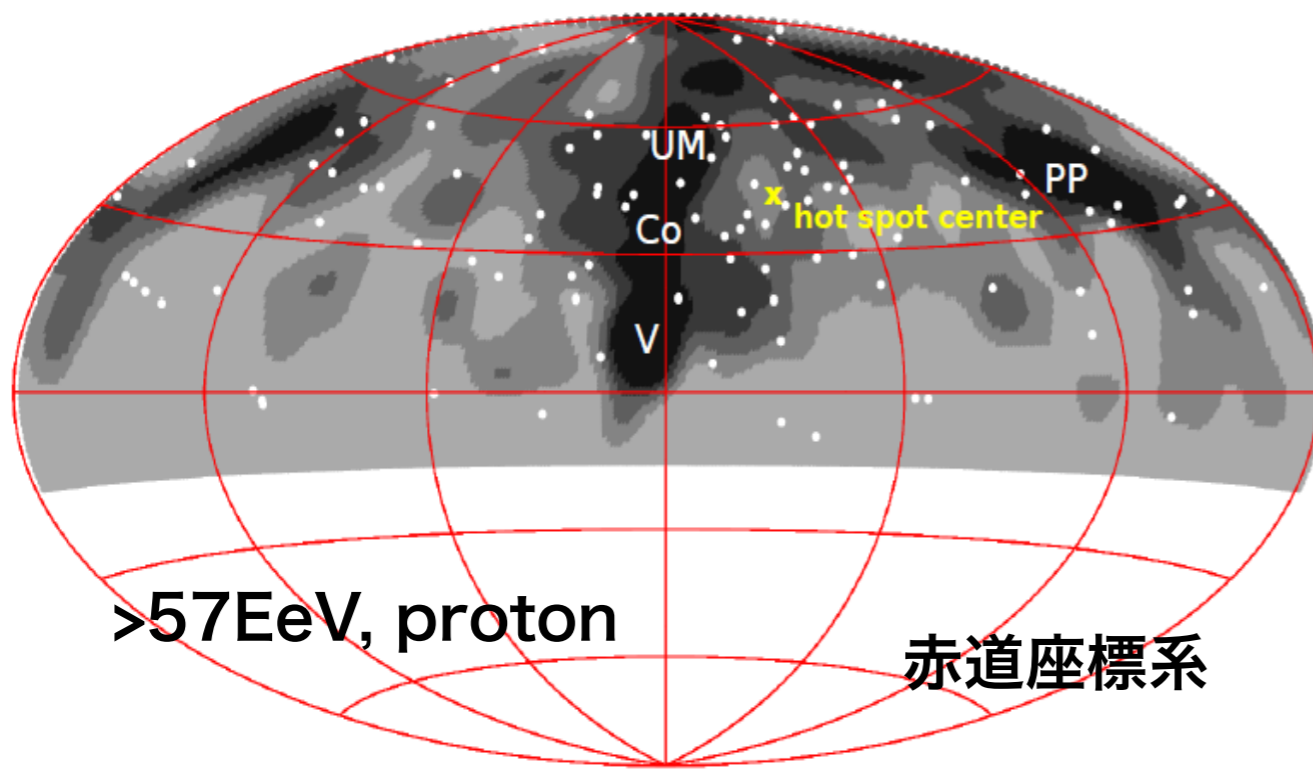
57 EeV以上の到来方向分布 (超銀河座標系)



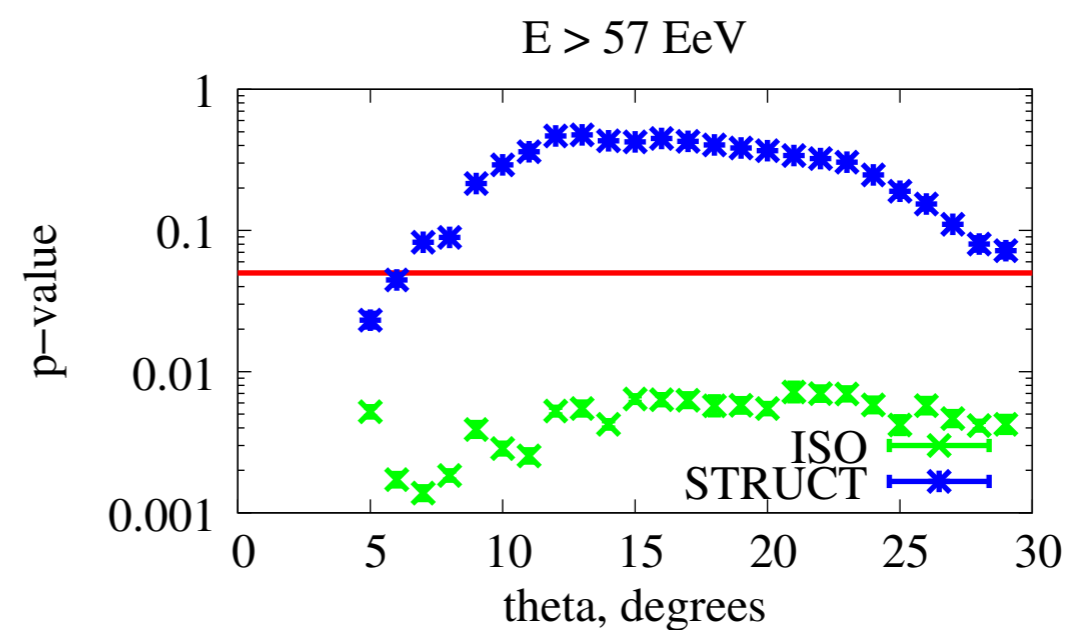
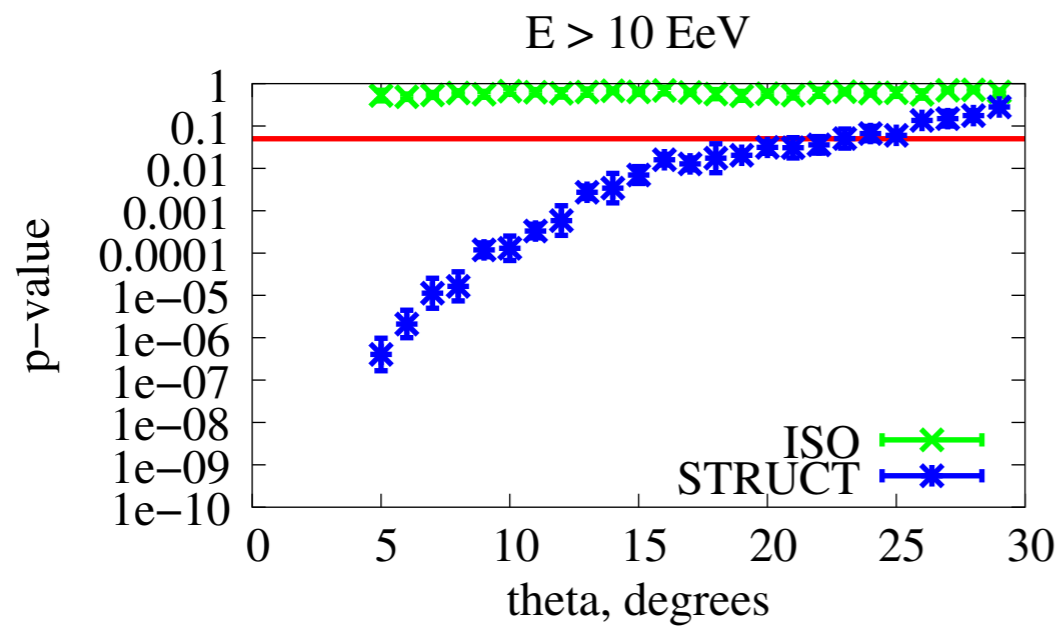
K.S. Test p-value = 0.01

S. Troitsky et al. ICRC2017

# 大規模構造(LSS)との相関

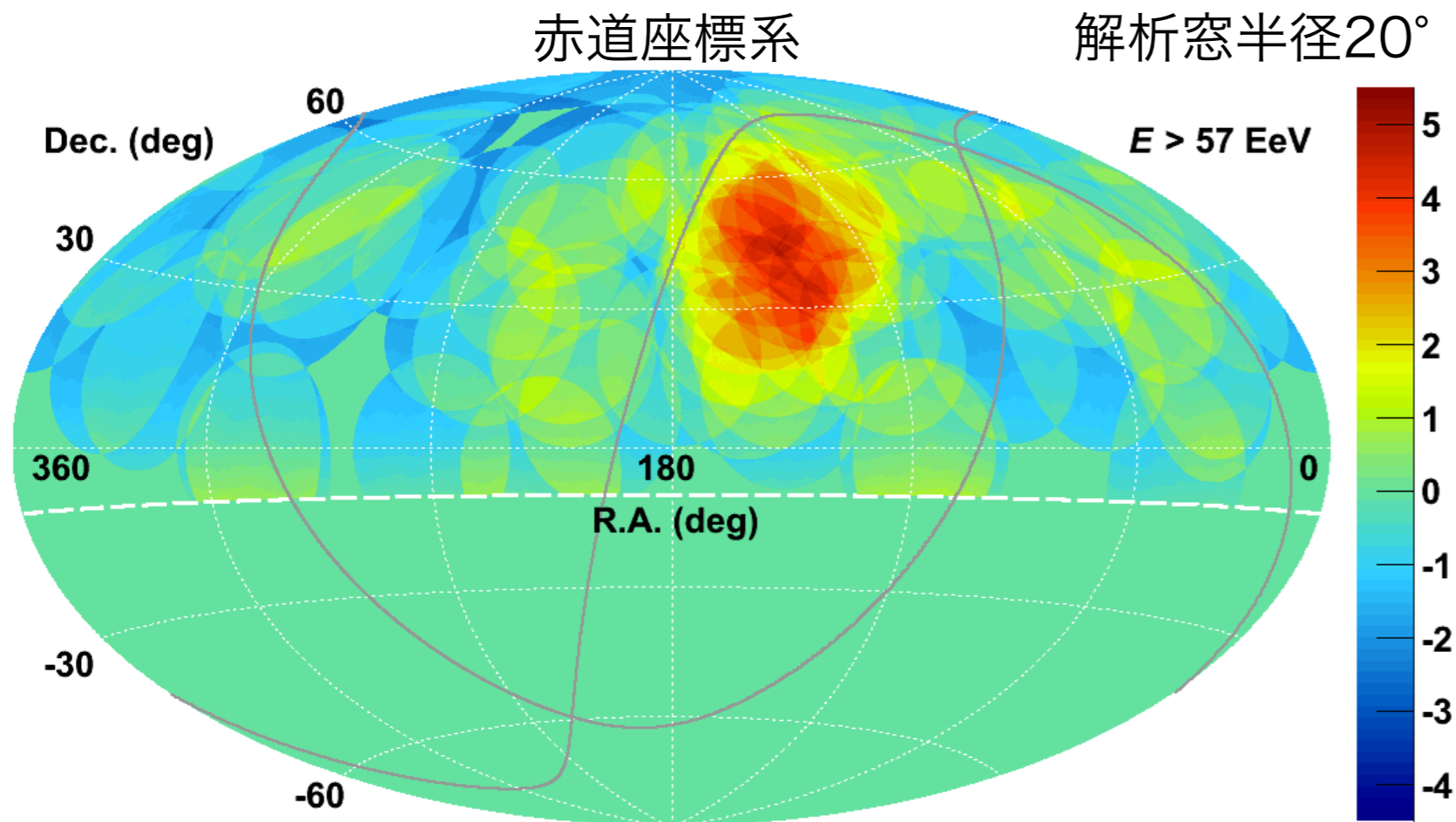


期待されるフラックスマップ  
 smearing angle  $6^\circ$   
 57EeV以上  
 LSSと無矛盾  
 一様等方とは矛盾



S. Troitsky et al. ICRC2017

# ホットスポット



TA SD 5yr

57EeV以上の72イベント

ホットスポット  $5\sigma$

偶然確率  $3\sigma$

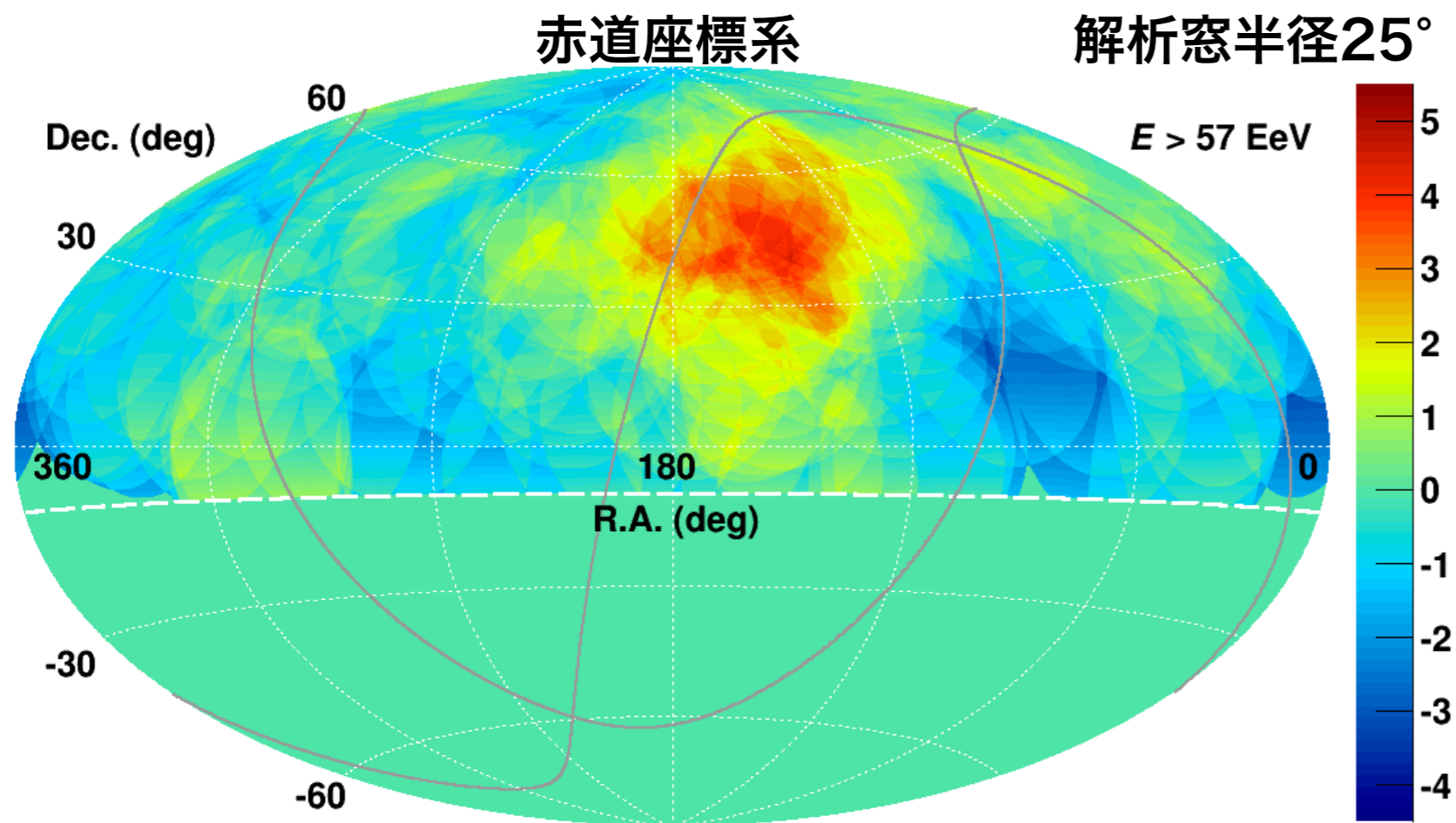
@RA=146.7°, Dec=43.2°

観測数=19

バックグラウンド数=4.5

Abbasi, R.U., et al., ApJL, 790, L21 (2014)

# ホットスポット



TA SD 9yr

57EeV以上の143イベント

ホットスポット  $5\sigma$

偶然確率  $3\sigma$

@RA=144.3°, Dec= $\sim$ -40.3°

観測数=34

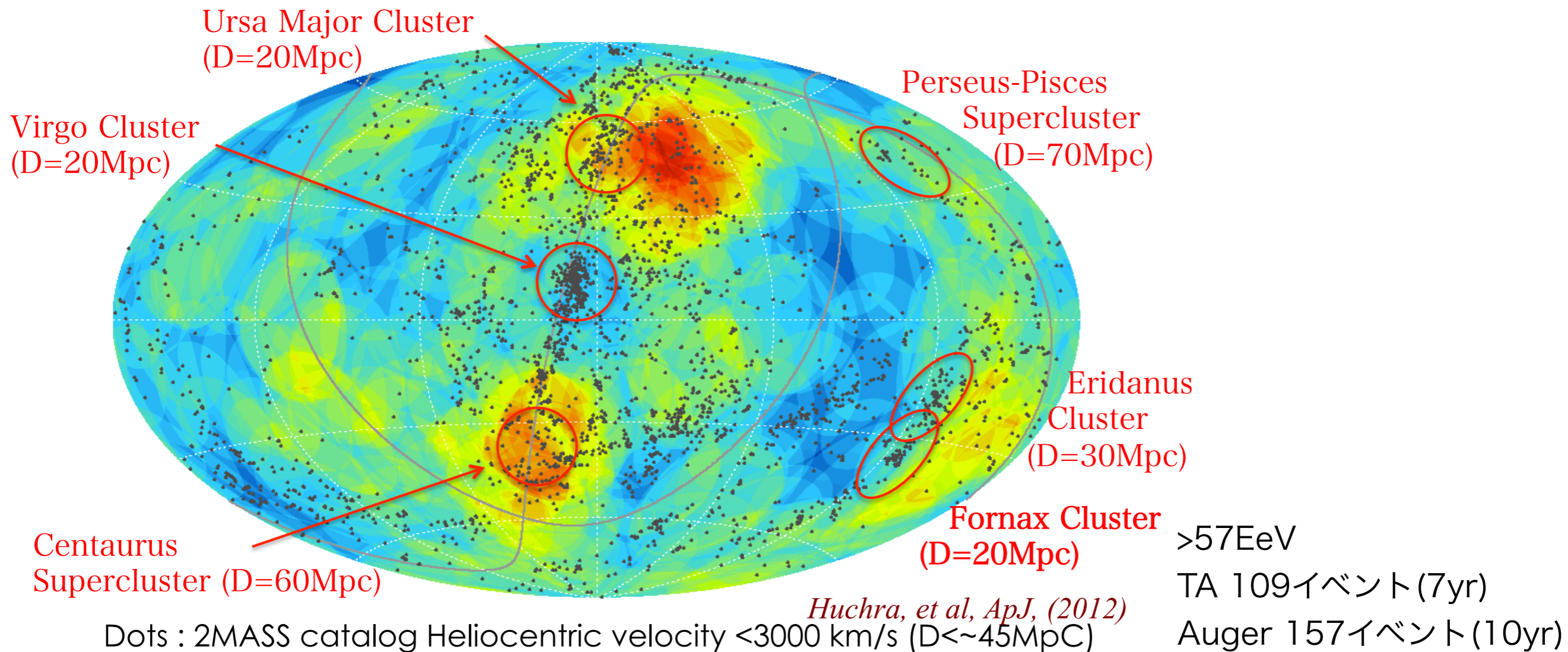
バックグラウンド数=13.5

解析窓 15°, 20°, 25°, 30°, 35°  
25°の時優位度が最大

K. Kawata et al. ICRC2017



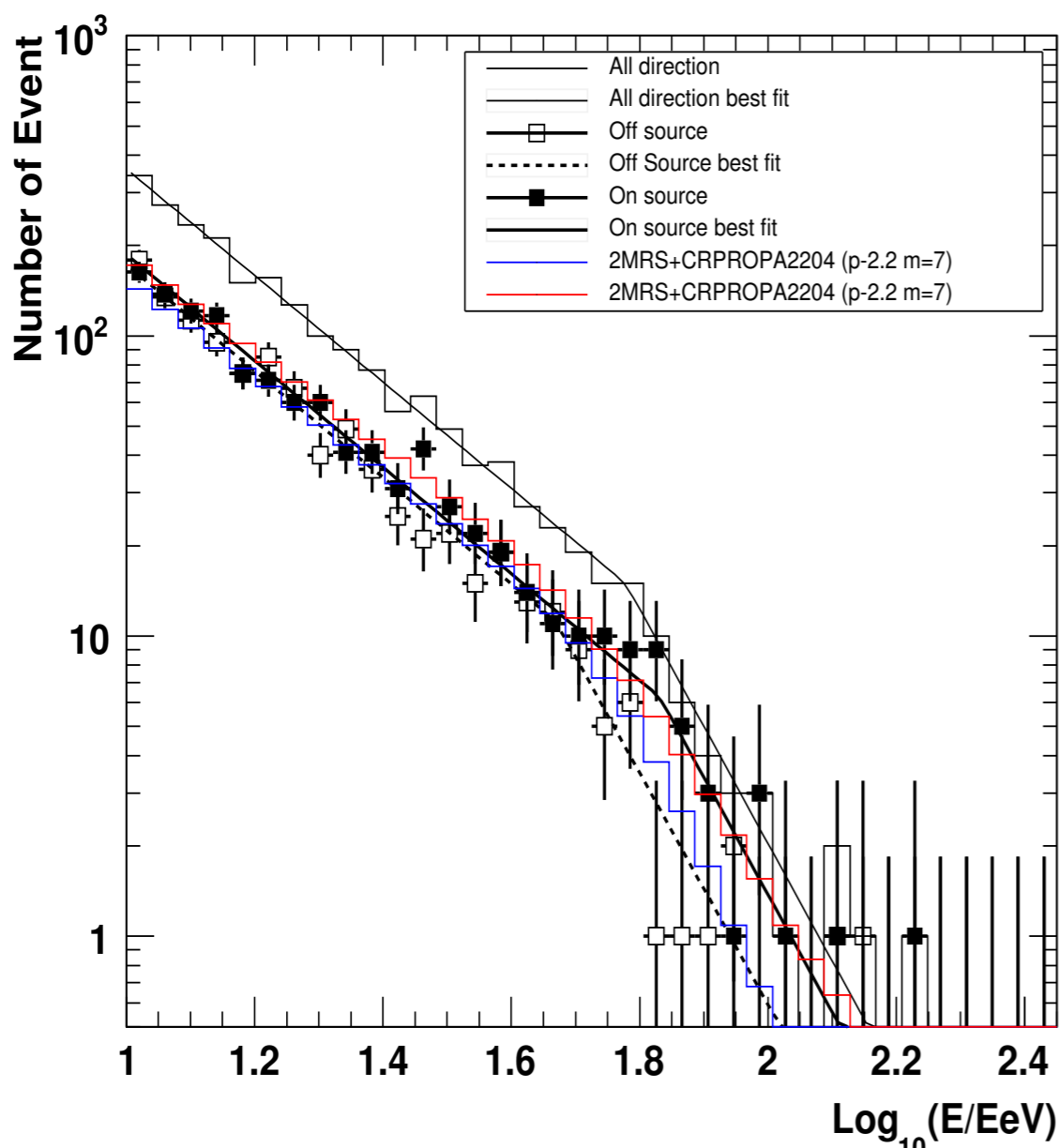
# 超高エネルギー宇宙線全天マップ



TA実験とAuger実験の到来方向分布(57EeV以上)  
 ホットスポット近辺にあるのはおおぐま座銀河団  
 おとめ座銀河団の方向にはエクセスなし



# エネルギースペクトルの異方性



“On source”と”Off source”でイベント数を比較

On source : SGP latitude < 30°

Off source : SGP latitude > 30°

地表検出器 5 年分

イベント数が3.2σの優位度で異なる

	$\alpha_1$	$\log_{10}(E_b/EeV)$	$\alpha_2$
All	-1.78	1.78	-3.91
On source	-1.78	1.83	-3.91
Off source	-1.78	1.67	-3.86

$$\frac{\Delta N(E)}{\Delta \log_{10} \left( \frac{E}{E_o} \right)} = C_0 \left( \varepsilon(E, E_b) \left( \frac{E}{E_o} \right)^{-\alpha_1} + (1 - \varepsilon(E, E_b)) \left( \frac{E}{E_o} \right)^{-\alpha_2} \right)$$

$$\varepsilon(E, E_b) = \{ 1 : (E < E_b), 0 : (E > E_b) \}$$


MCと比較

陽子組成モデルを仮定

ソース分布は2MRSカタログ

陽子組成で予言されるイベント数と無矛盾

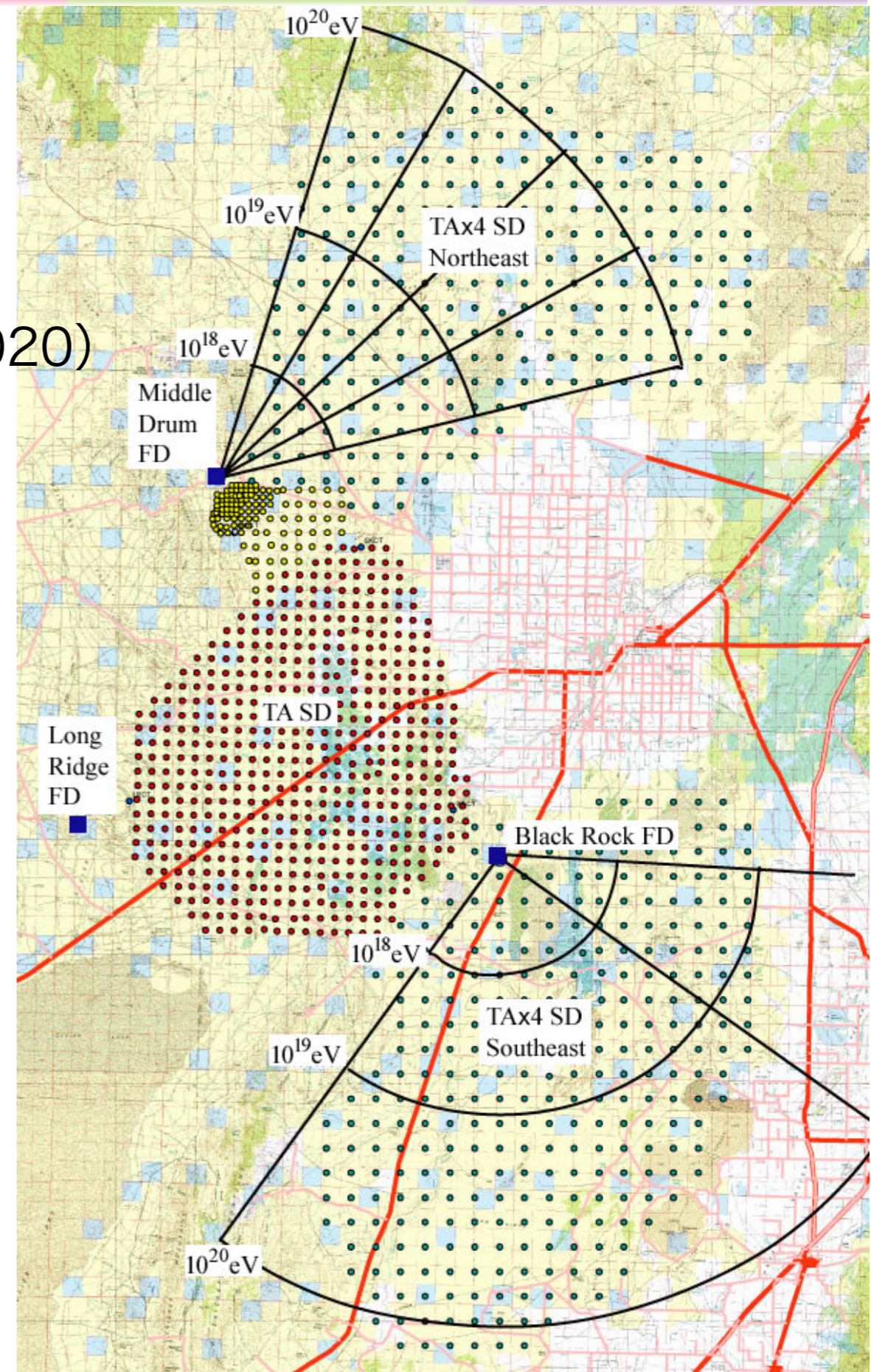
T. Nonaka et al. ICRC 2017

The logo for the Telescope Array Project is a circular emblem. It features a central cluster of colorful dots in shades of purple, blue, orange, and yellow, representing the detector array. The words "TELESCOPE ARRAY" are written in a semi-circle above the cluster, and "PROJECT" is written in a semi-circle below it. The entire emblem is set against a light gray background.

# 超高エネルギー宇宙線観測 の将来

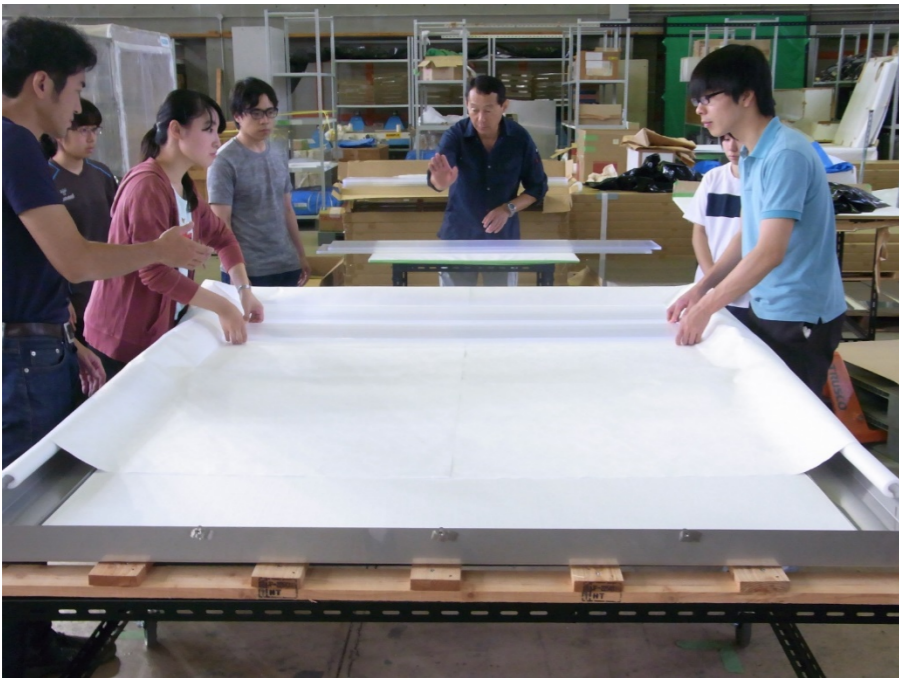
# TA x 4

- 最高エネルギー宇宙線の起源解明  
 地表検出器 500台 (特別推進研究, 2015-2020)  
 2.08 km 間隔, 2100 km<sup>2</sup>  
 大気蛍光望遠鏡ステーション 2箇所 (米国)  
 HiRes II の移設
- 現行 TA SD と合わせて約3000 km<sup>2</sup>  
 TA SD19年分  
 稼働期間 2017 ~ 2020年  
 TAハイブリッド16年分  
 稼働期間 2016 ~ 2020年
- ホットスポットを5 $\sigma$ 以上の優位度で確定  
 ホットスポット構造、点源探索など





# TAx4実験の現状

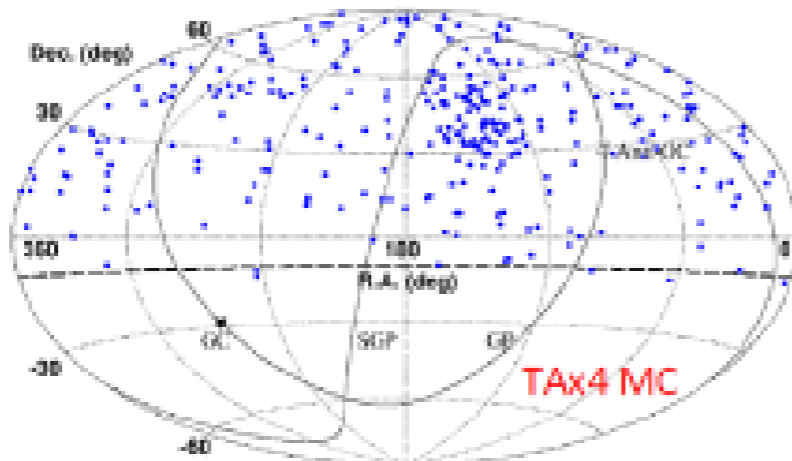


今年度内の設置を目指して  
準備中！！



# TAx4で期待される成果

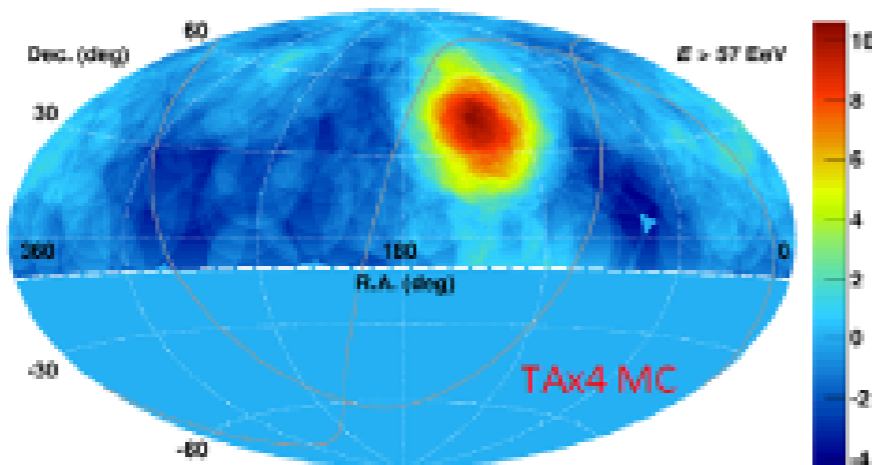
## (1) One Hotspot



Hotspot Signal  
 $80 - 18.9 = 61$  events  
 (RA, Dec) = (145°, 45°)  
 Gaussian  $\sigma = 10^\circ$

Isotropic B.G.  
 $305 - 61 = 244$  events

Oversampling  
 20° radius circle

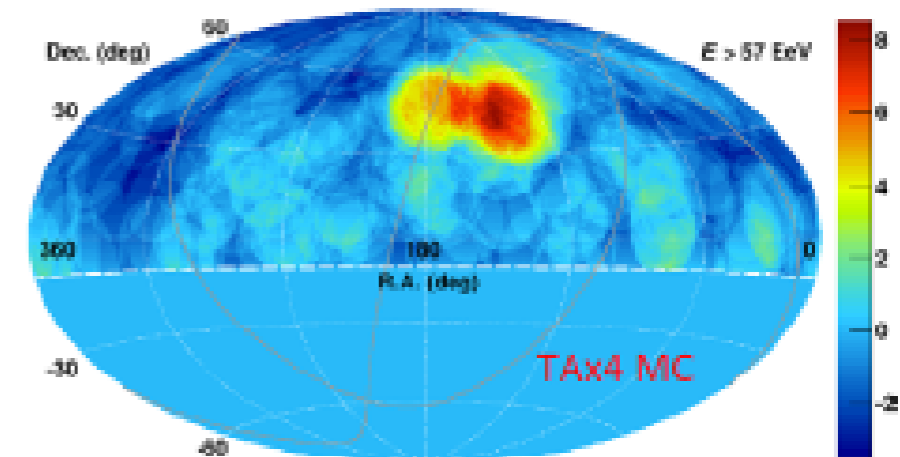
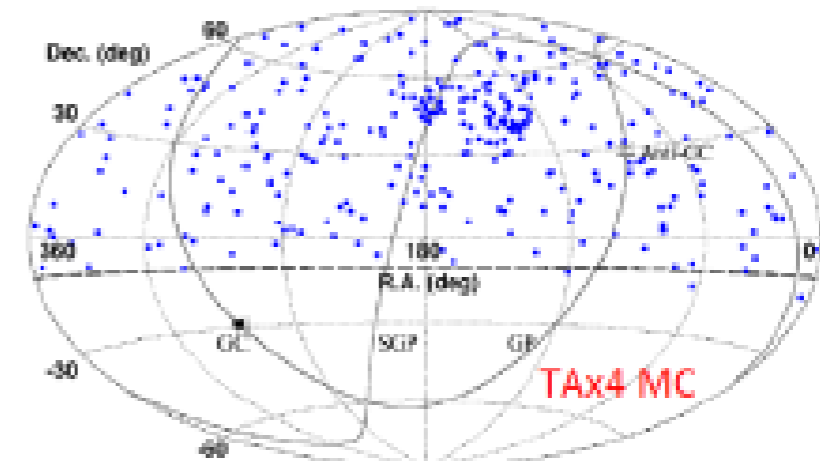


## (2) Double Hotspot

Hotspot Signal  
 Total 61 events  
 1. 41 events  
 (RA, Dec) = (145°, 40°)  
 Gaussian  $\sigma = 10^\circ$   
 2. 20 events  
 (RA, Dec) = (175°, 40°)  
 Gaussian  $\sigma = 5^\circ$

Isotropic B.G.  
 $305 - 61 = 244$  events

Oversampling  
 15° radius circle





# まとめ

## エネルギースペクトル

TALE実験を含め5桁のエネルギー領域で測定  
陽子組成と無矛盾なスペクトル  
異方性もある？

## 質量組成

陽子などの軽い組成  
Auger実験とは系統誤差の範囲内で一致

## 到来方向解析

超銀河面、LSSに相関？  
ホットスポットの兆候あり

## 拡張計画

TA x 4 : より高統計での観測で、ホットスポットなどを確定したい  
さらなる拡張計画を目指してR&Dも活発に行われている

