



研究会「グローバルな宇宙天文観測」  
テレスコープアレイ実験

東京大学宇宙線研究所 野中敏幸  
Telescope Array Collaboration

# 観測対象

- 宇宙線エネルギースペクトル

$$J(E) \propto \sim E^{-3}$$

高エネルギーでは  
地表で空気シャワー現象として観測される

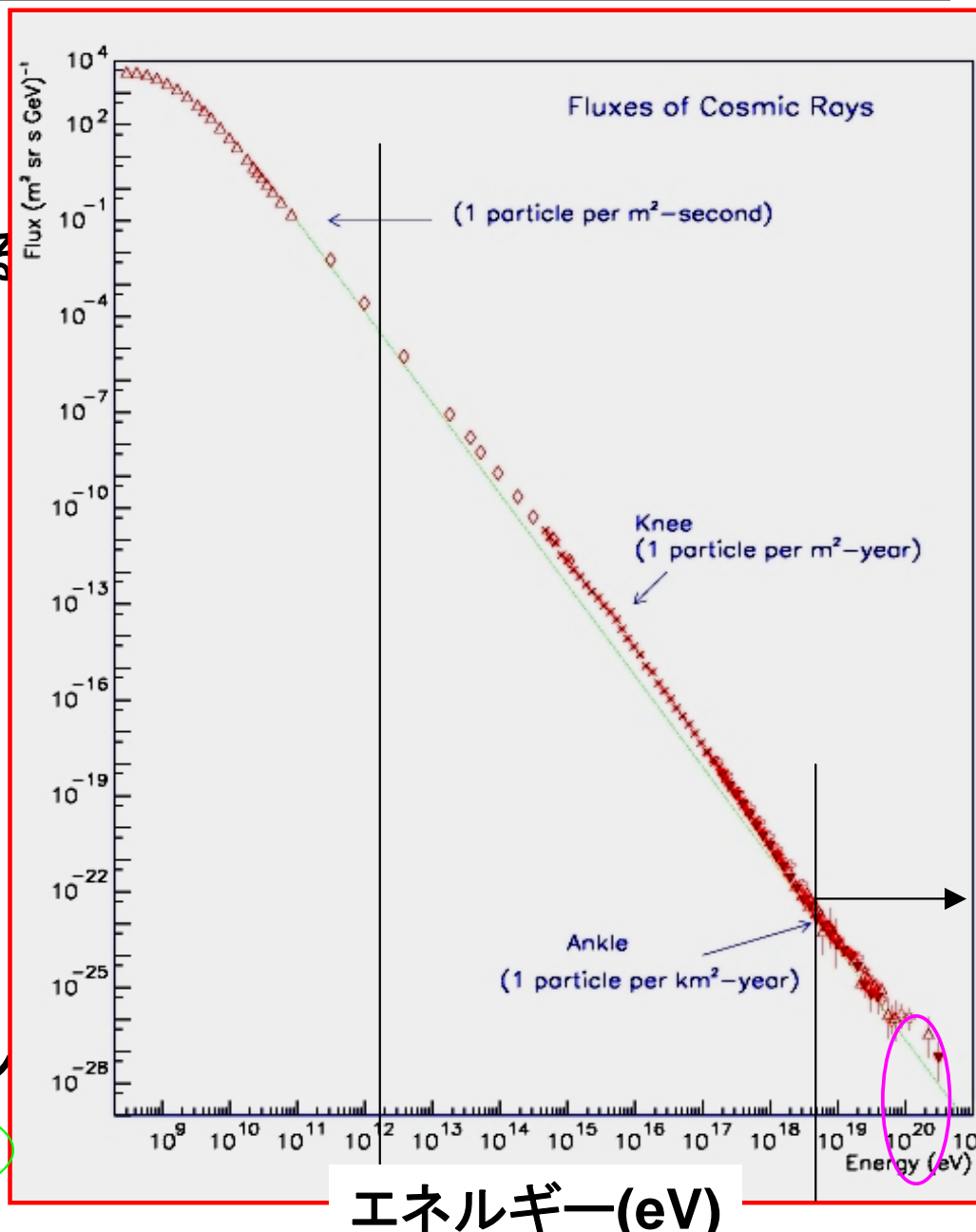
~10TeV 付近以降の主な観測手段は  
地上での空気シャワー観測

- 地表の粒子検出器アレイ
- 大気蛍光望遠鏡

最高エネルギー(~10<sup>19</sup>eV)に於いては  
到来頻度が少なく装置は大広域

例:

Pierr Auger Observatry (アルゼンチン)  
**Telescope Array (米国ユタ州)**



高山, 晴天率の高い気候 + 大規模 → 国際協力実験: グローバル ■

# 物理目標

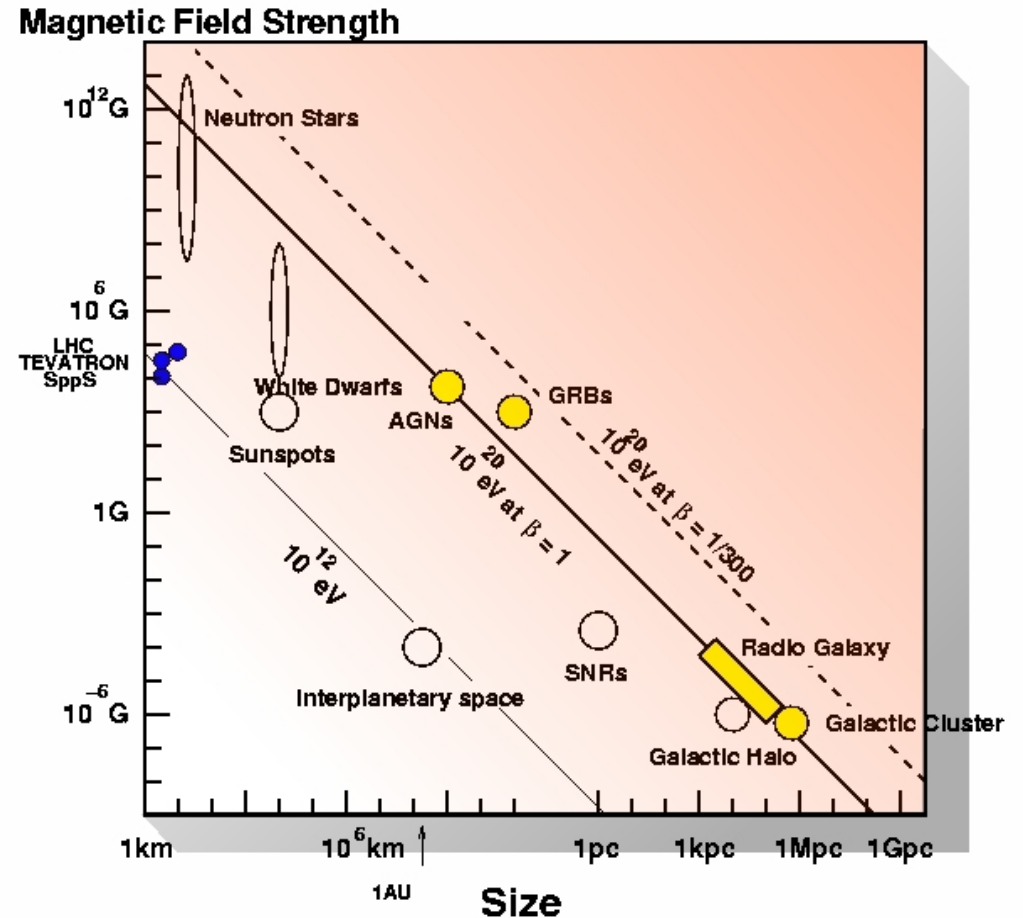
- 極高エネルギー粒子( $\sim 10^{20}\text{eV}$ )の発生機構、(発生源)の特定

→ スペクトル、到来方向、化学組成から迫る

際立ったソース!? : 加速天体特定、  
粒子線天文学可能性

銀河団等の  
大規模構造との相関!? : 銀河間磁場強度  
生成源密度  
→ 加速天体種の推定

空気シャワー粒子の観測から、  
陽子 Total cross section  
→  
超高エネルギー原子核相互作用のモデル制限



理論的に予想される加速天体候補

# 最高エネルギー領域での空気シャワー観測

典型的なシャワー:

$10^{19}$  eV  $750\text{g}/\text{cm}^2$  付近で最大発達

TAサイトでの見え方

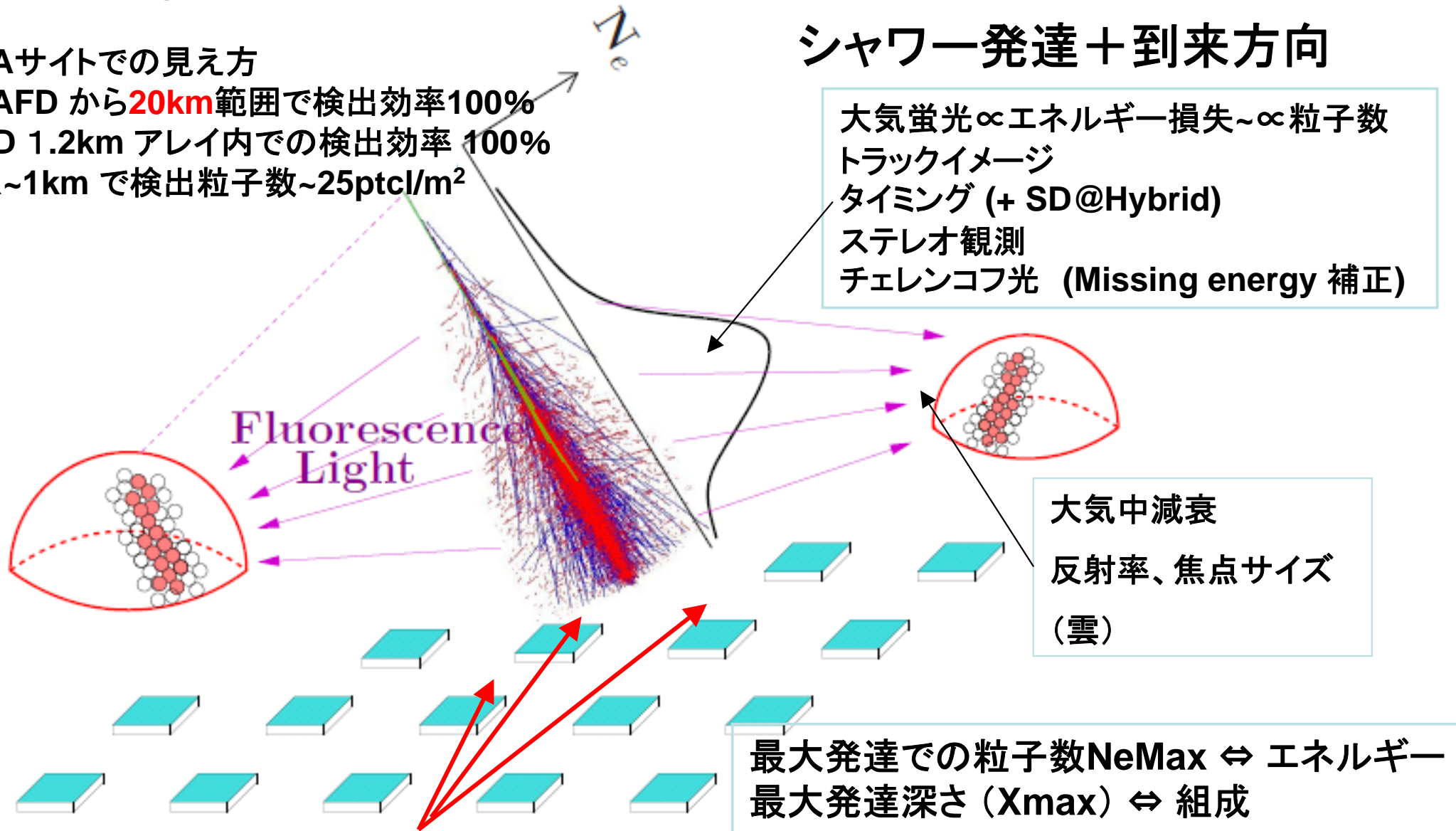
TAFD から **20km** 範囲で検出効率100%

SD 1.2km アレイ内での検出効率 100%

R~1km で検出粒子数~25ptcl/m<sup>2</sup>

## シャワー発達+到来方向

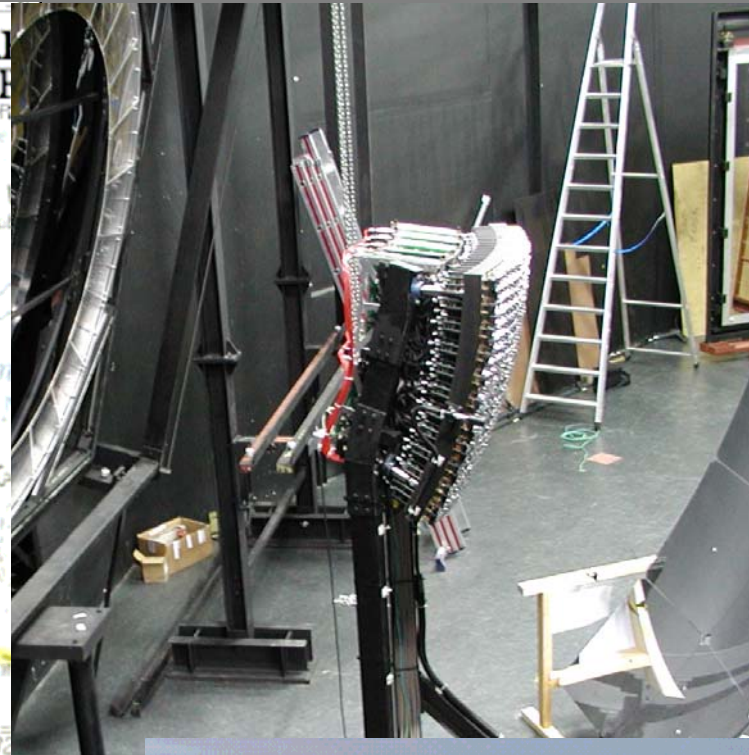
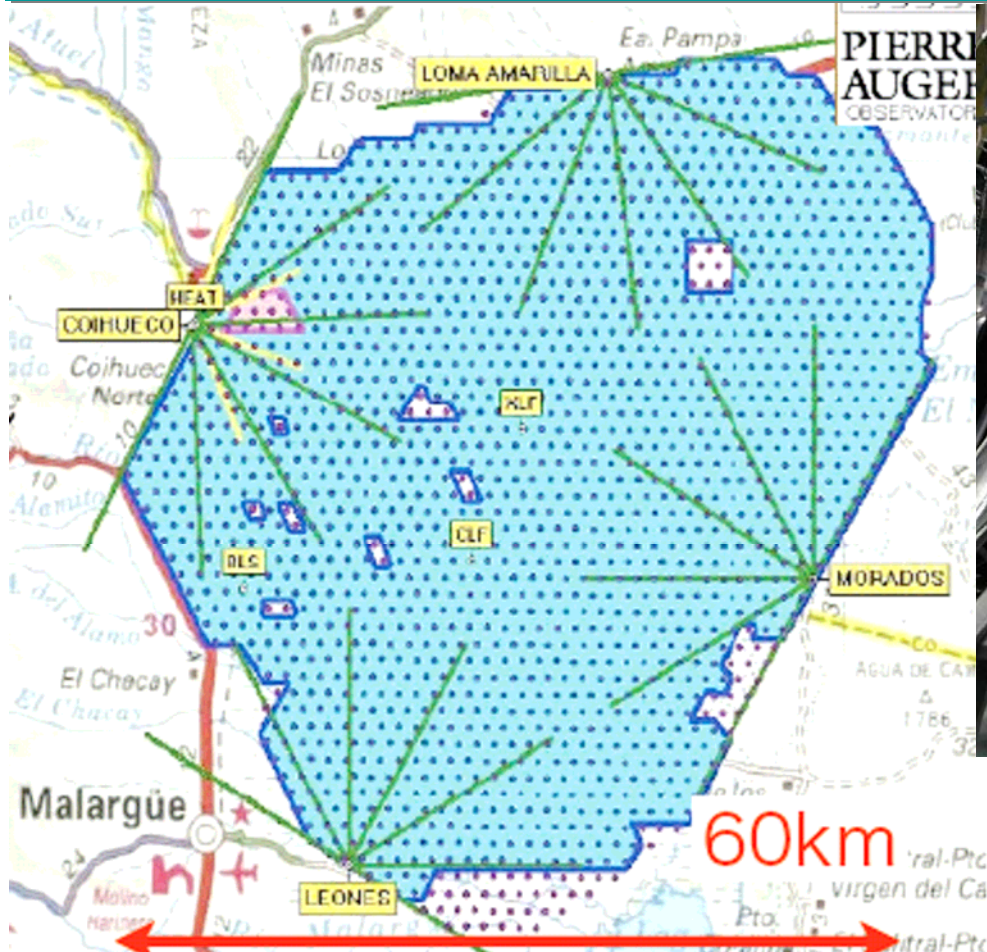
大気蛍光  $\propto$  エネルギー損失  $\sim \propto$  粒子数  
トラックイメージ  
タイミング (+ SD@Hybrid)  
ステレオ観測  
チェレンコフ光 (Missing energy 補正)



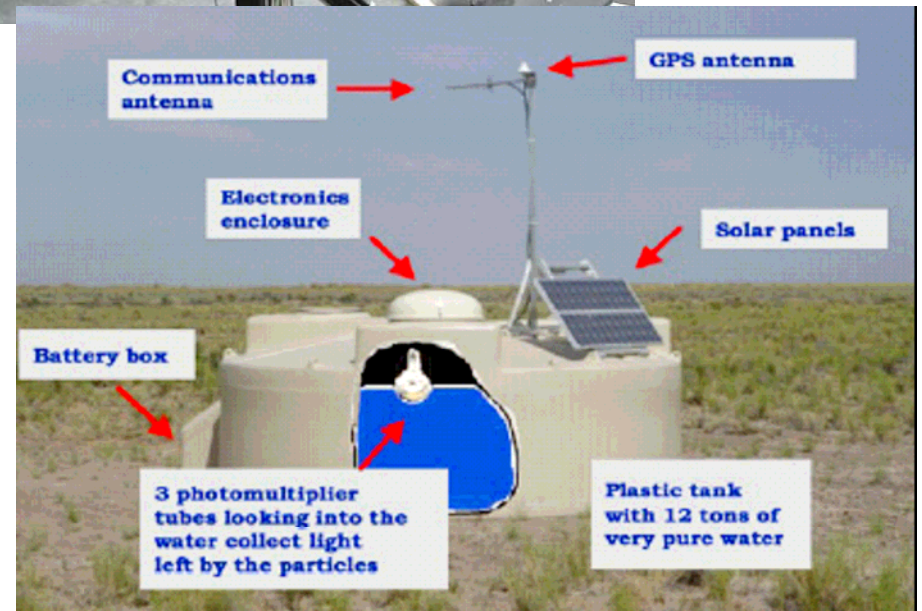
粒子横方向分布 S(800)  $\Leftrightarrow$  エネルギー

最大発達での粒子数  $N_{eMax}$   $\Leftrightarrow$  エネルギー  
最大発達深さ ( $X_{max}$ )  $\Leftrightarrow$  組成

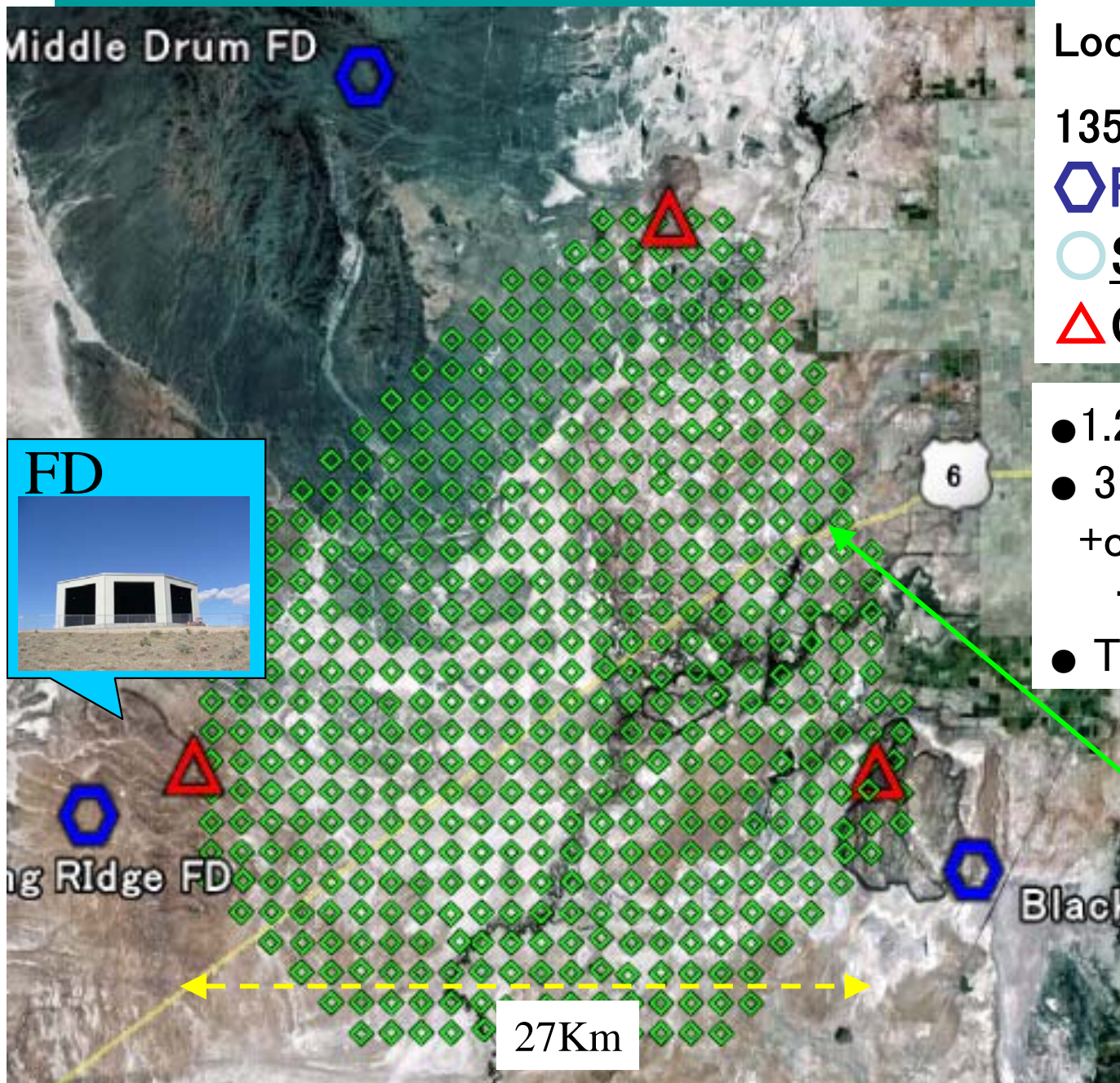
# Pierre Auger Observatory



アルゼンチン(南半球)SD 1600基  
1.5 km spacing  
3000 km<sup>2</sup>  
FD望遠鏡4サイト 24基



# Telescope Array Experiment



Location: N39.3° W112.9°

1350–1500m asl

⬡ FD station (× 3station)

○ Surface Array (507 SD)

△ Communication tower

● 1.2 km grid SD (3m<sup>2</sup>)

● 3 sub array :

+cross boundary trigger

→ Total 507 SD

● Total detection area ~700km<sup>2</sup>

FD



SD





# Telescope Array Collaboration

T. Abu-Zayyad<sup>1</sup>, R. Aida<sup>2</sup>, M. Allen<sup>1</sup>, T. Arai<sup>4</sup>, R. Azuma<sup>3</sup>, E. Barcikowski<sup>1</sup>, J.W. Belz<sup>1</sup>, T. Benno<sup>4</sup>, D.R. Bergman<sup>5</sup>, S.A. Blake<sup>1</sup>, O. Brusova<sup>1</sup>, R. Cady<sup>1</sup>, B.G. Cheon<sup>6</sup>, J. Chiba<sup>7</sup>, M. Chikawa<sup>4</sup>, E.J. Cho<sup>6</sup>, L.S. Cho<sup>8</sup>, W.R. 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</sup>,<sup>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>, S.J.J. 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>, C.C.H. 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>, B.G. Kim<sup>19</sup>, H.B. Kim<sup>6</sup>, J.H. Kim<sup>6</sup>, J.H. 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>, Y.J. Kwon<sup>8</sup>, J.H. Lim<sup>16</sup>, S.I. 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>, J.N. 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>, S.W. 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>, I.H. Park<sup>19</sup>, D. Rodriguez<sup>1</sup>, S.Y. Roh<sup>20</sup>, G. Rubtsov<sup>12</sup>, D. Ryu<sup>20</sup>, H. Sagawa<sup>9</sup>, N. Sakurai<sup>9</sup>, L.M. Scott<sup>5</sup>, P.D. Shah<sup>1</sup>, T. Shibata<sup>9</sup>, H. Shimodaira<sup>9</sup>, B.K. Shin<sup>6</sup>, J.D. Smith<sup>1</sup>, P. Sokolsky<sup>1</sup>, T.J. Sonley<sup>1</sup>, R.W. Springer<sup>1</sup>, B.T. Stokes<sup>5</sup>, S.R. 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>, J.R. Thomas<sup>1</sup>, S.B. Thomas<sup>1</sup>, G.B. Thomson<sup>5</sup>, P. Tinyakov<sup>12</sup>,<sup>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>

*1University of Utah, High Energy Astrophysics Institute, Salt Lake City, Utah, USA*

*2University of Yamanashi, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, Kofu, Yamanashi, Japan*

*3Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo, Japan*

*4Kinki University, Higashi Osaka, Osaka, Japan*

*5Rutgers University, Piscataway, USA*

*6Hanyang University, Seongdong-gu, Seoul, Korea*

*7Tokyo University of Science, Noda, Chiba, Japan*

*8Yonsei University, Seodaemun-gu, Seoul, Korea*

*9Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, Japan*

*10Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan*

*11Osaka City University, Osaka, Osaka, Japan*

*12Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*13Kanagawa University, Yokohama, Kanagawa, Japan*

*14Saitama University, Saitama, Saitama, Japan*

*15Tokyo City University, Setagaya-ku, Tokyo, Japan*

*16Pusan National University, GeumJeong-gu, Busan, Korea*

*17Waseda University, Advanced Research Institute for Science and Engineering, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan*

*18Chiba University, Chiba, Chiba, Japan*

*19Ewha Womans University, Seodaemun-gu, Seoul, Korea*

*20Chungnam National University, Yuseong-gu, Daejeon, Korea*

*21University Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium*

*22University of Tokyo, Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, Kashiwa, Chiba, Japan*

*23Kochi University, Kochi, Kochi, Japan*

*24Hiroshima City University, Hiroshima, Hiroshima, Japan*

*25National Institute of Radiological Science, Chiba, Chiba, Japan*

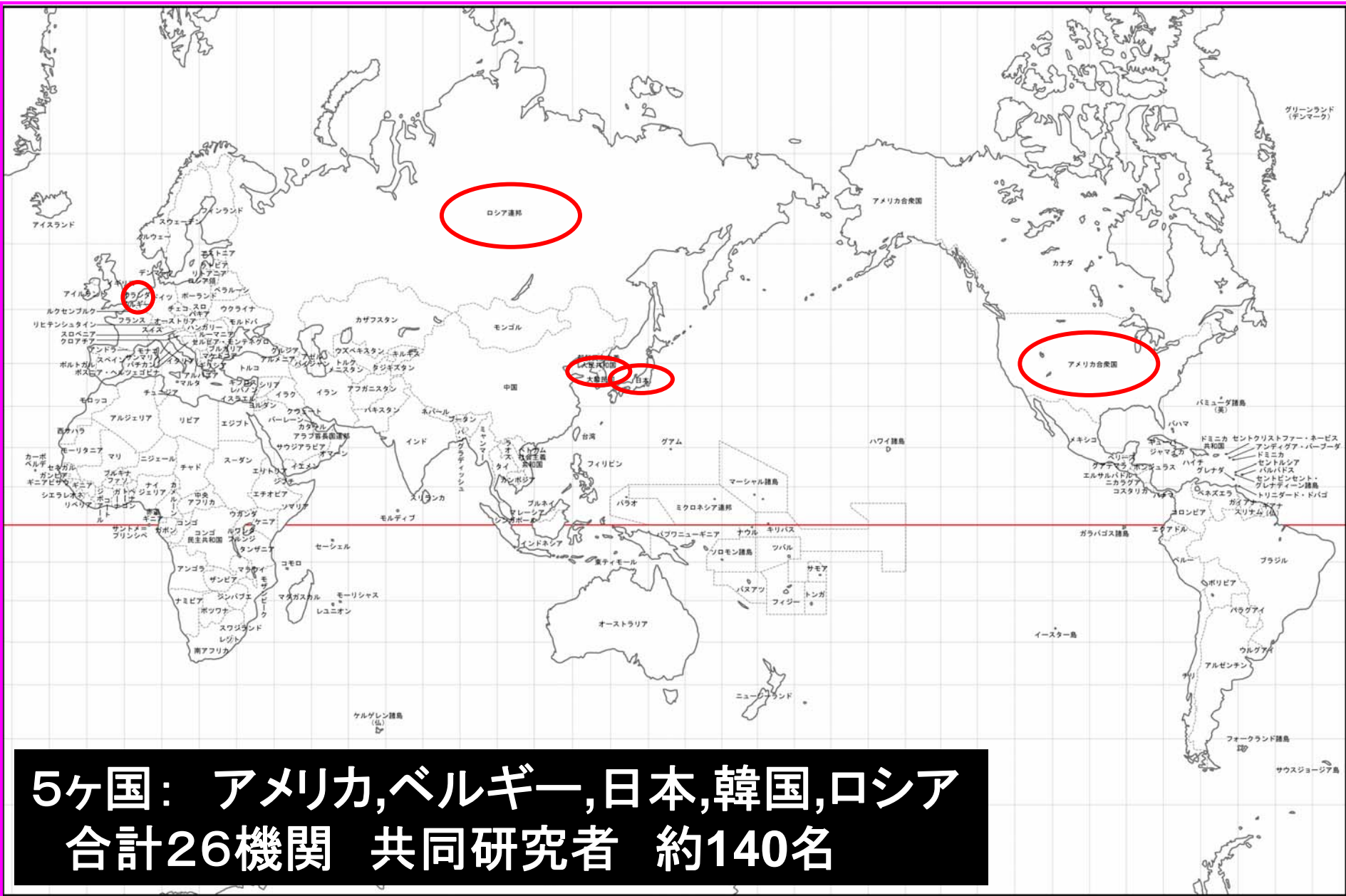
*26Ehime University, Matsuyama, Ehime, Japan*



# Telescope Array Collaboration

T. Ab  
O. Br  
H. Fu  
K. Hi  
S. Iwa  
S. Ka  
Y.J. H  
M. M  
T. Ok  
P.D. S  
S. Suz  
S.B.T  
Tsuy  
J. Ya

1Unive  
2Unive  
Engine  
Japan  
3Tokyo  
4Kinki  
5Rutge  
6Hanyo  
7Tokyo  
8Yonse  
9Institu  
10Institu  
11Osaka  
12Institut  
Russia  
13Kana



ino<sup>13</sup>,  
i<sup>11</sup>,  
12,  
9,  
Scott<sup>5</sup>,  
ton<sup>5</sup>,  
ka<sup>10</sup>,  
ring,  
erse,



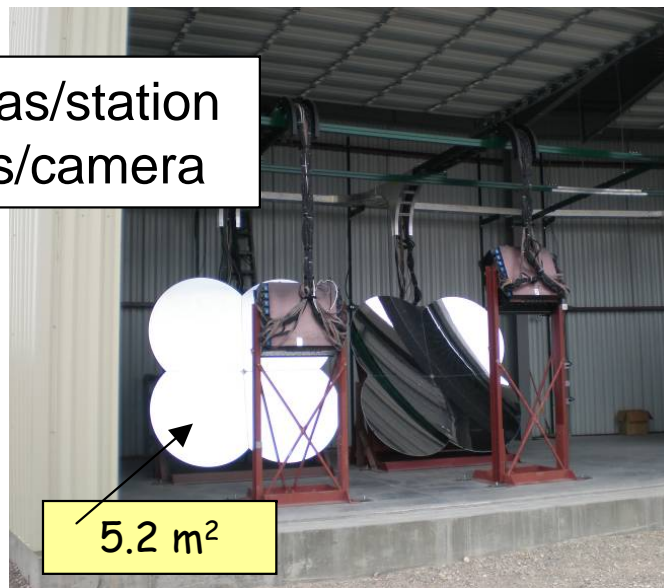
# 大氣螢光望遠鏡

From HiRes

Middle Drum

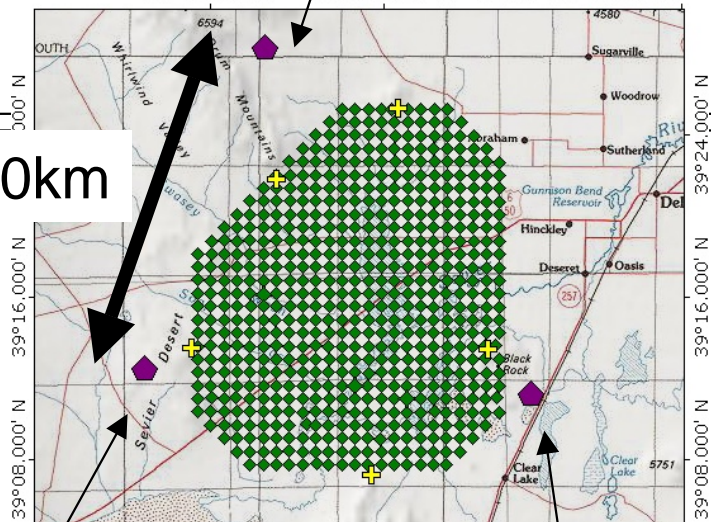


14 cameras/station  
256 PMTs/camera



5.2 m<sup>2</sup>

TOPO! map printed on 07/12/04 from "StakeJun04-01.tpo" and "Untitled.tpg"  
113°03.000' W 112°52.000' W NAD27 112°33.000' W



~30km

New FDs

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

Long Ridge



Black Rock Mesa

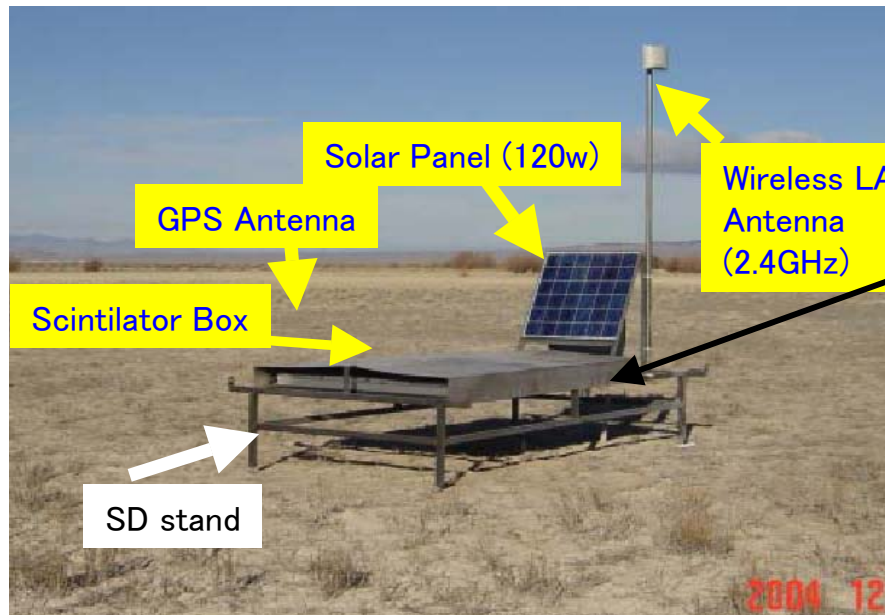


~1 m<sup>2</sup>



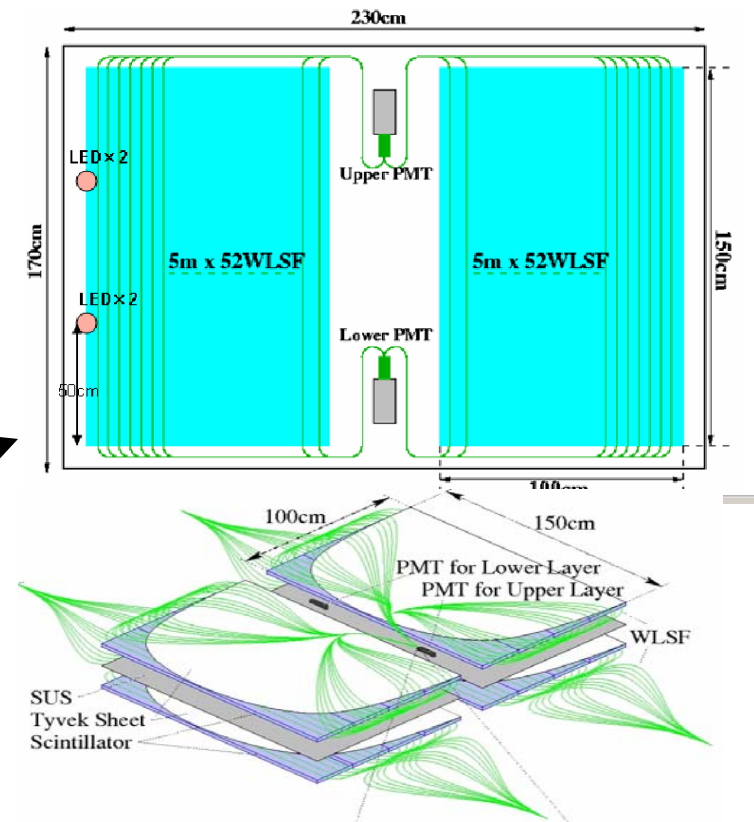
6.8 m<sup>2</sup>

# 地表粒子検出器



- Solar cell+ Battery
- Wireless LAN (2.4GHz) communication
- GPS 1pps pulse are common clock for SDs.
- 50Msps FADC recording

- Scintillator :  
2layer of  $3\text{m}^2 \times 1.2\text{cm}$  (t)
- WLF read out of scintillation light
- PMT:  $2 \times$  "ETL 9124SA"
- Power Base:  
 $2 \times$  "ETL PS1806-2"
- Temperature /Humidity sensors.



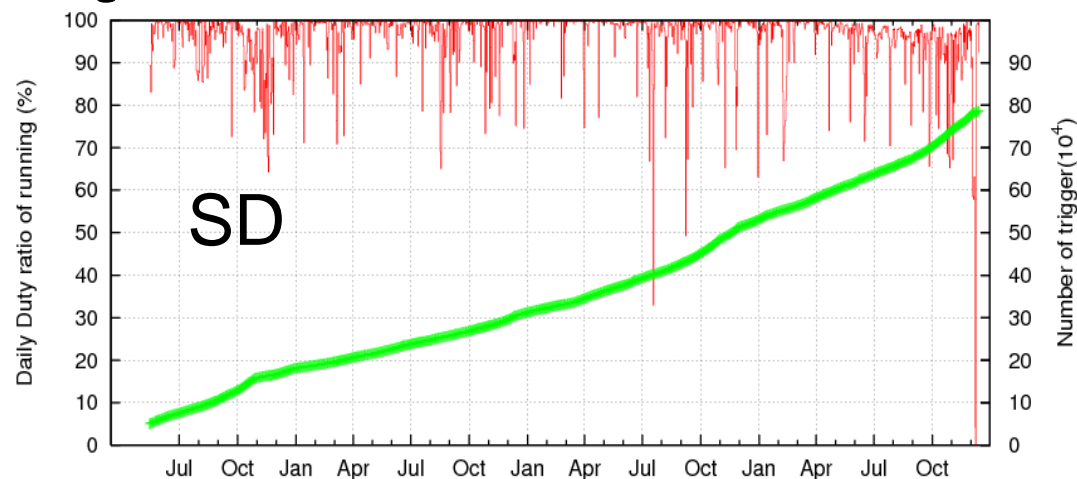
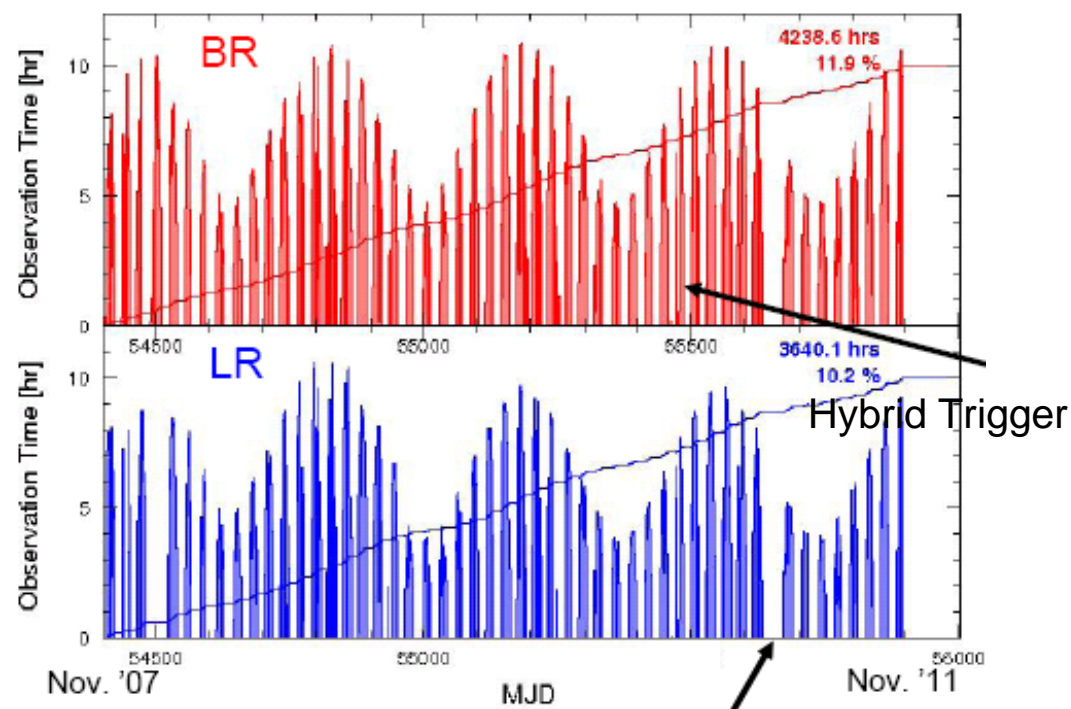
# 動作状況

- ◇ FD full observation 2007 Dec ~
- ◇ SD full observation Mar.2008 ~  
→ ~700km<sup>2</sup> 検出面積  
 $\theta_{\text{zenith}} < 45^\circ$  ~100% efficiency at  $E > 10^{18.9} \text{eV}$
- ◇ Cross boundary Trigger Nov.2008
- ◇ Hybrid Trigger Sep.2010
- ◇ Monitoring

SD : 1MIP gain , 10min 毎  
Linearity calibration by LED  
Continuous monitor.

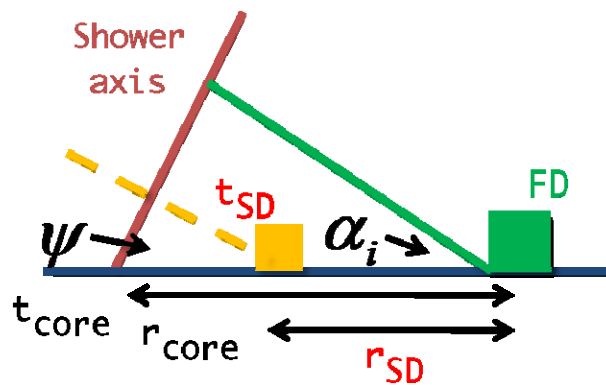
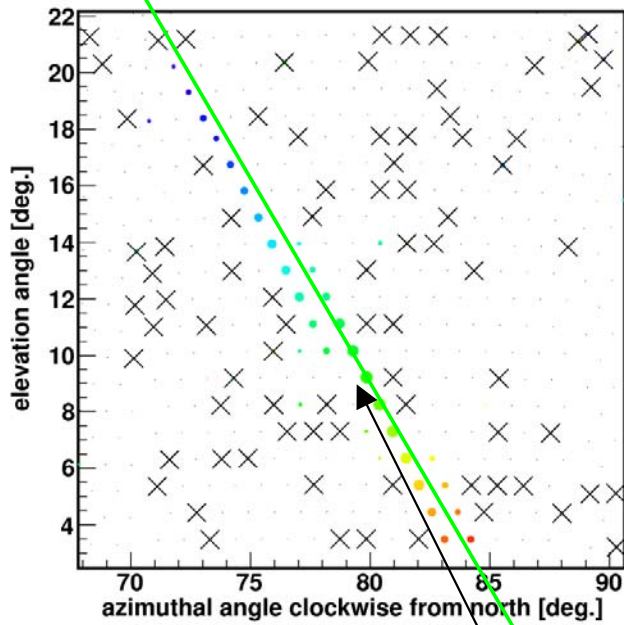
FD : Atmospheric monitoring, PMT Gain monitoring  
with Xenon light source, YAP pulser.

- ◇ 動作安定性
- SD: Running > 95% of duty cycle  
> 98% of counter is fine.
- FD: ~ 7% of duty cycle,  
→ Hybrid exposure ~2.0 × AGASA @2012

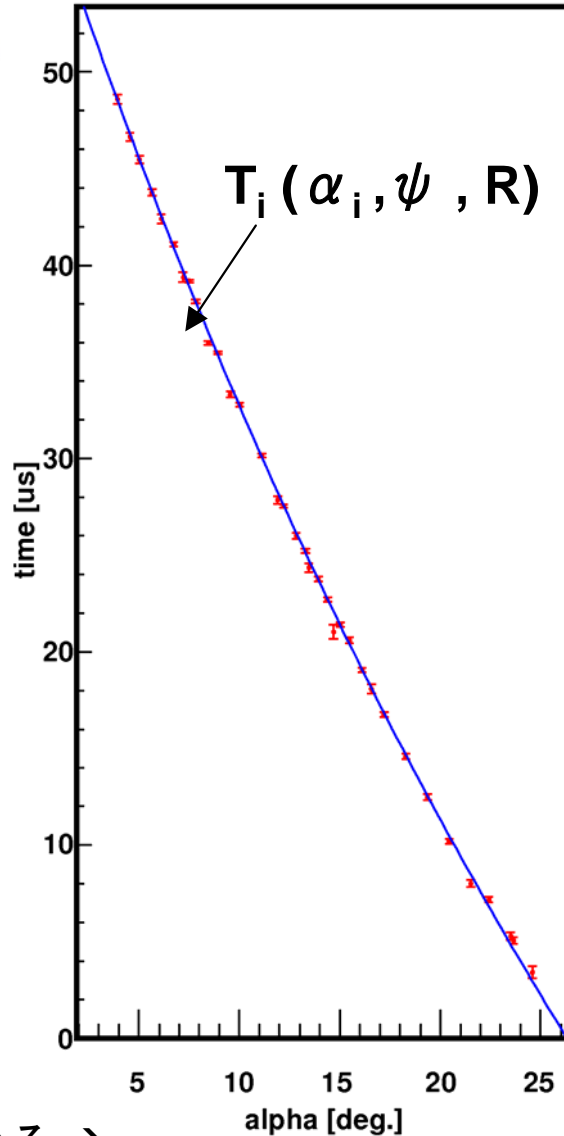


# FD 再構成

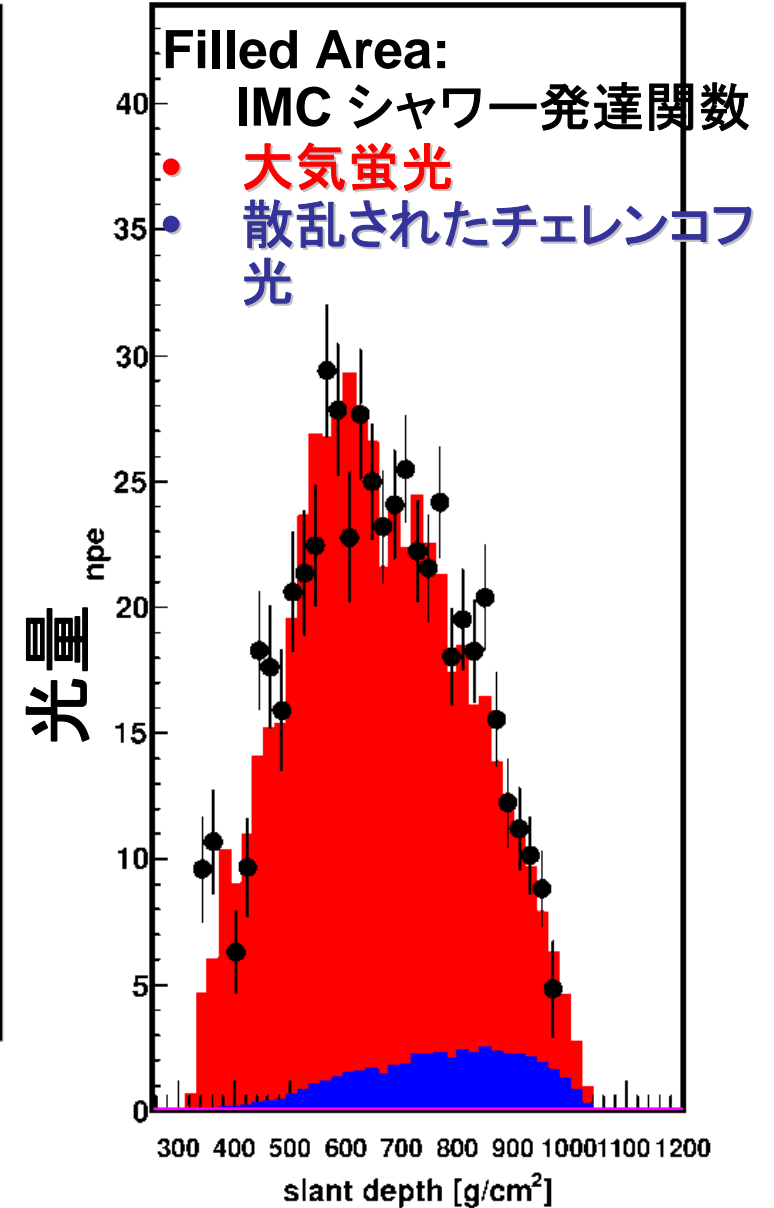
## 到来方向、コア位置推定



SDの時刻情報を用いる →  
ψ、軸距離の決定精度向上 (Hybrid 解析)



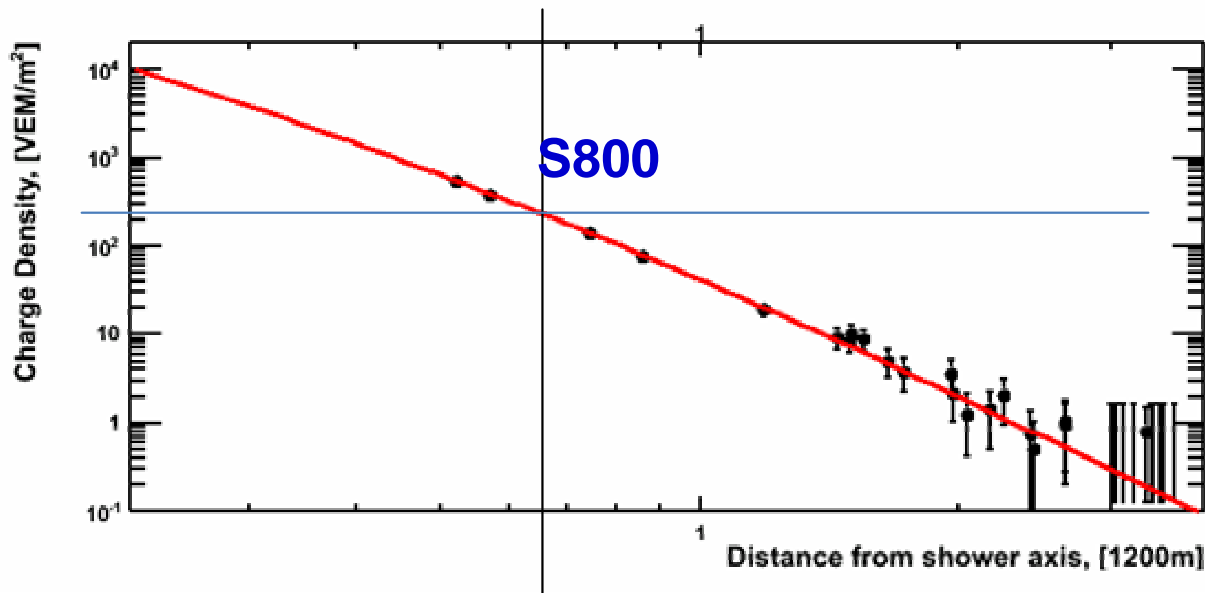
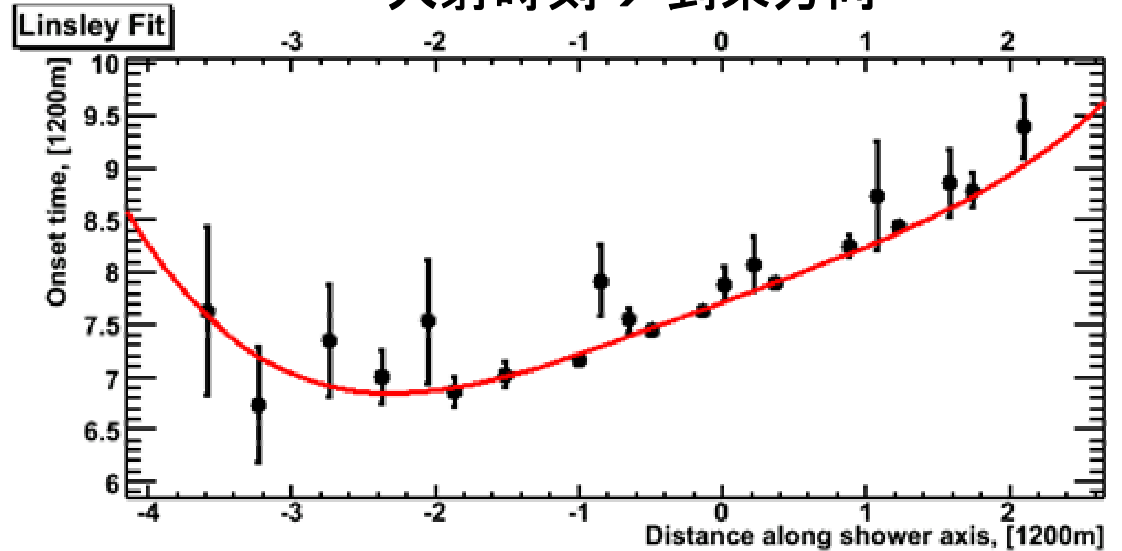
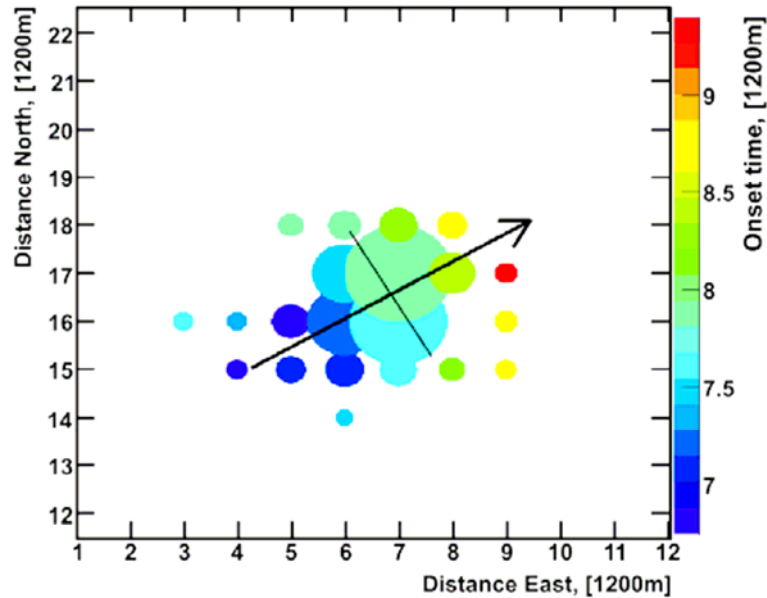
## エネルギー推定



# SD 再構成

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

入射時刻 → 到来方向



S800 横分布の予想曲線とデータの  
フィットで求める

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

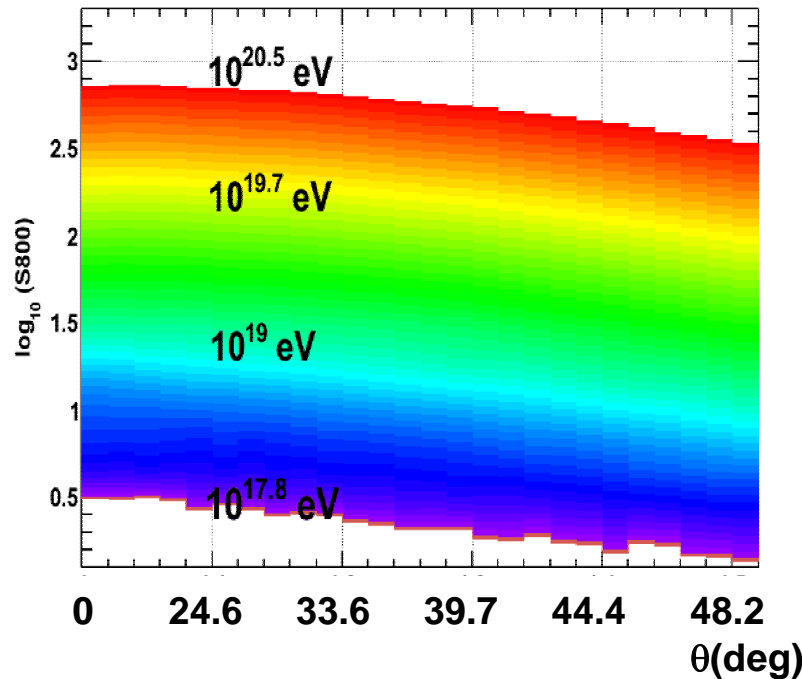
$$\eta = (3.97 \pm 0.13) - (1.79 \pm 0.62) (\sec \theta - 1)$$

S(800) → (Primary Energy)

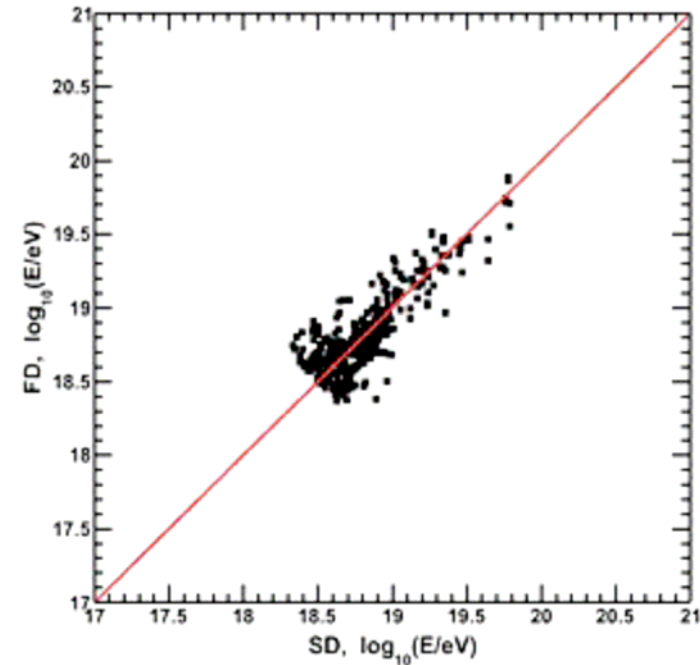
$r = 800m$

# SDエネルギースケール較正

MCで得られた $S_{800}$ -Energy 対応表



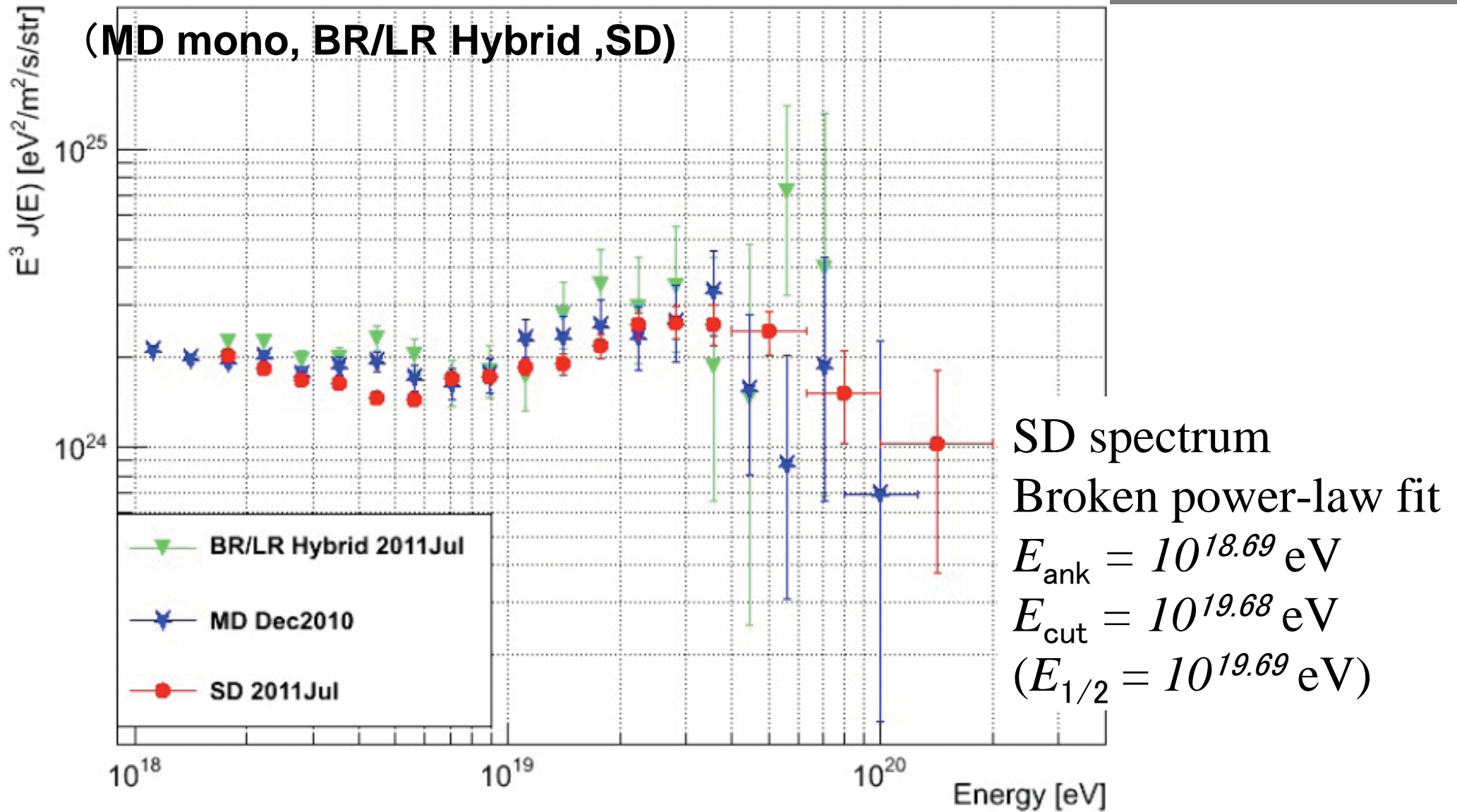
$$E_{SD}^* / E_{FD} = 1.27$$



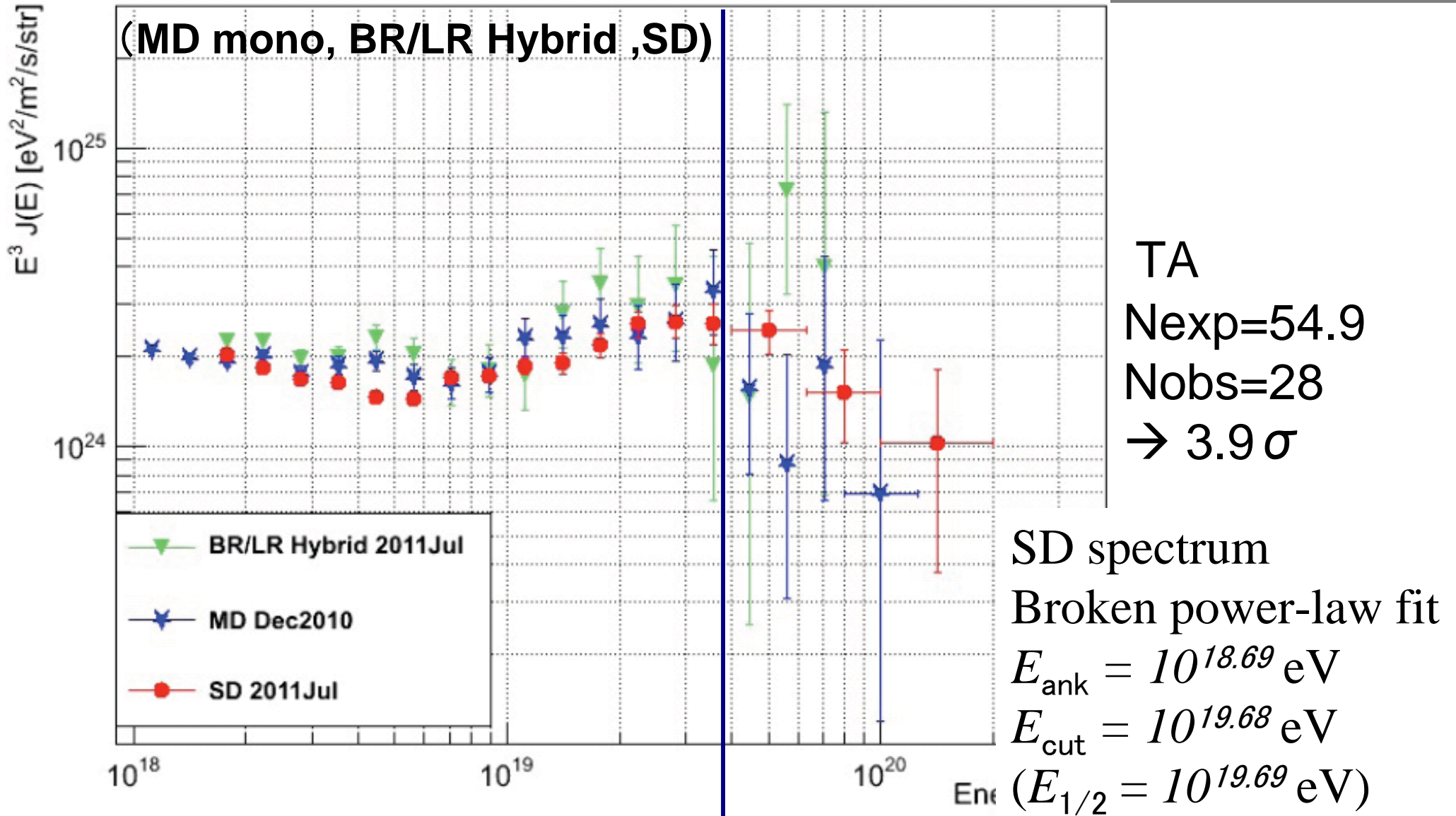
FD(hybrid)で得られたエネルギーで、  
SDでのエネルギーを較正

$$E_{SD} = E_{SD}^* / 1.27$$

# エネルギースペクトル



# エネルギースペクトル

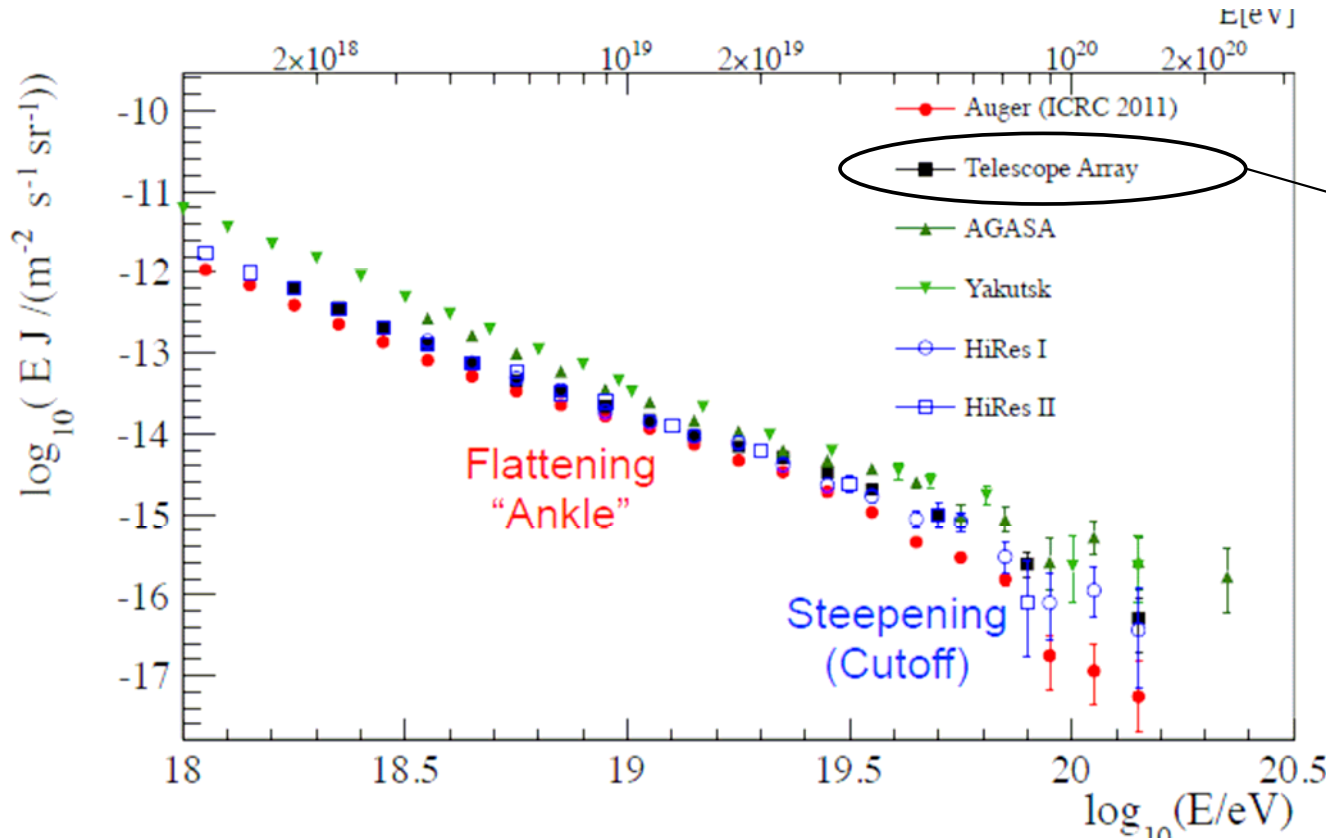


D. Ikeda et.al ICRC2011 HE1.3 ID1264  
 D.Ivanov et.al ICRC2011 HE1.3 ID1297  
 Y.Tsunesada ICRC2011 HL talk



# エネルギースペクトル

(他実験との比較)



## 系統誤差

Fluorescence yield: 11%  
Detector 10%  
Atmosphere 11%  
Reconstruction 10%  
(include model dependence of missing energy)  
**Total 21%**

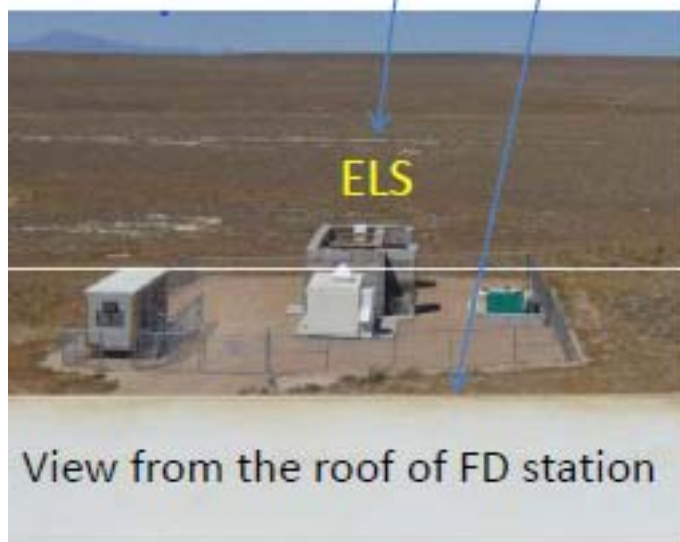
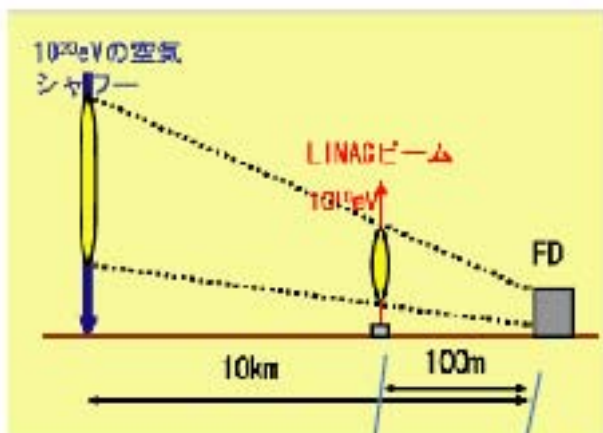
Y.Tsunesada, Energy spectrum WG report at UHECR2012

TA, Auger HiRes の結果では Steepening は間違いなく起きている

# 電子ビームによる校正

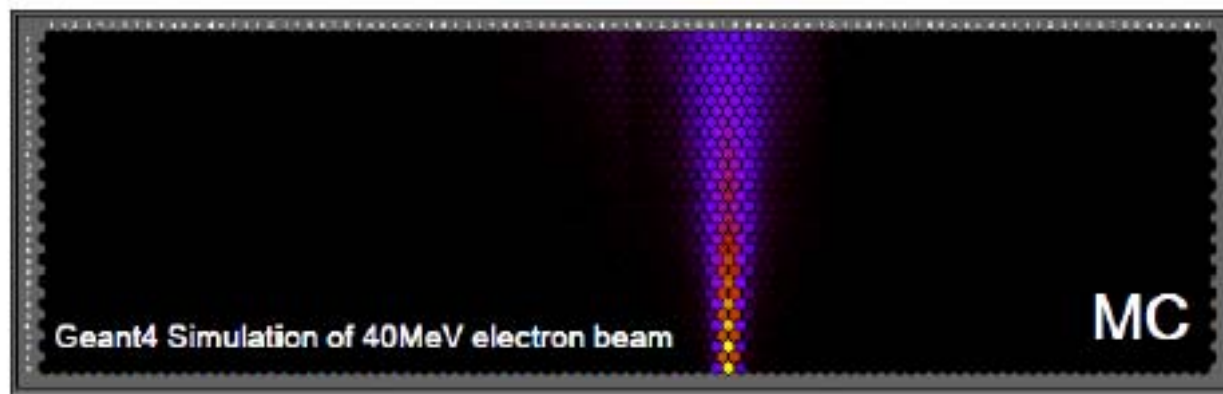
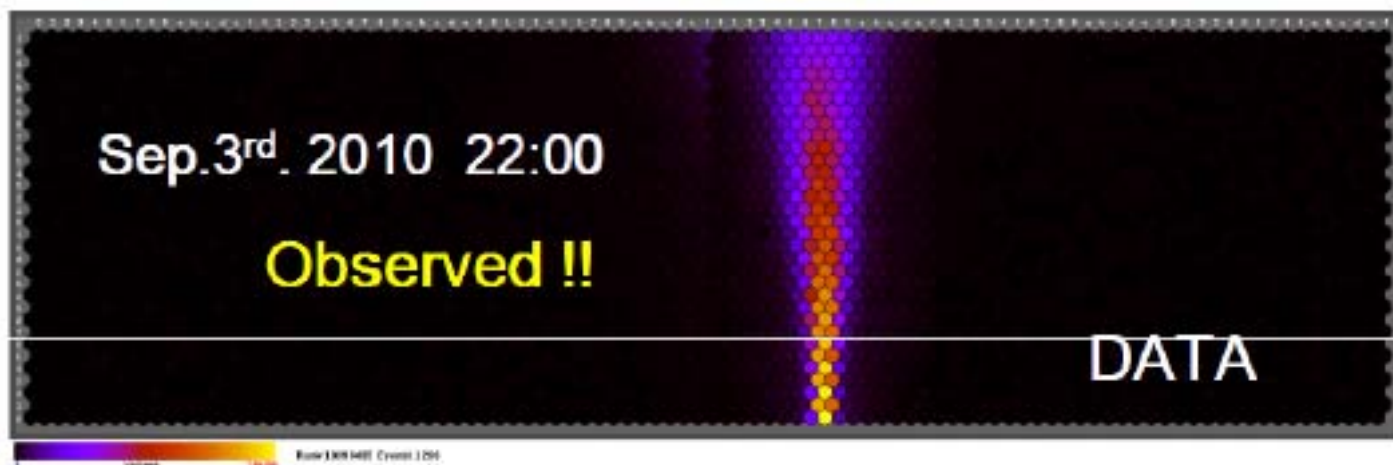
## Electron Light Source

既知の量の $\sim 40\text{MeV}$ の電子を放出し、大気蛍光と望遠鏡の応答を校正  
系統誤差の主要部分を校正することが可能。



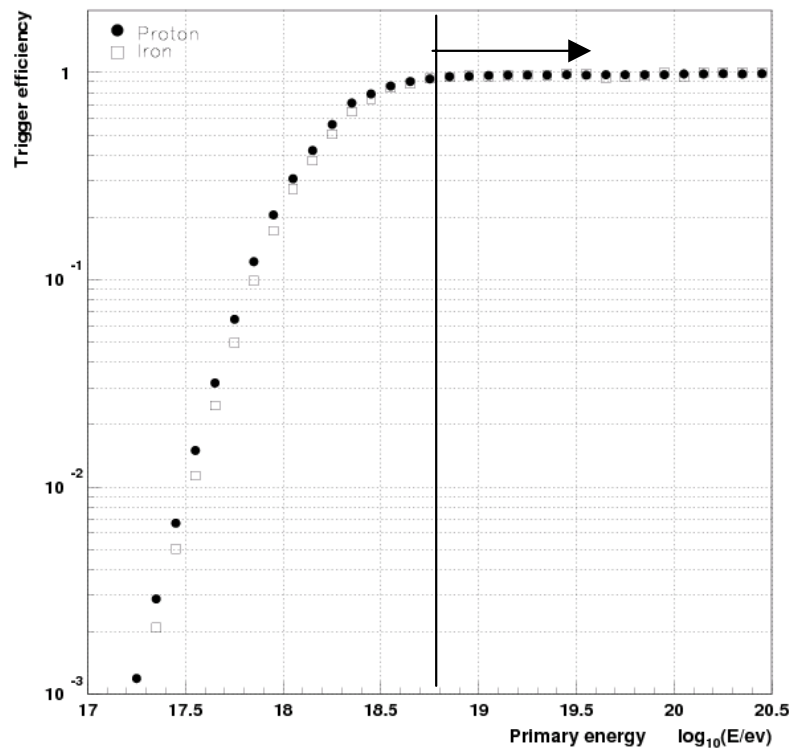
## FD Observation

Sep.3<sup>rd</sup>.2010 Beam Shot into the Sky, and Observed by FD



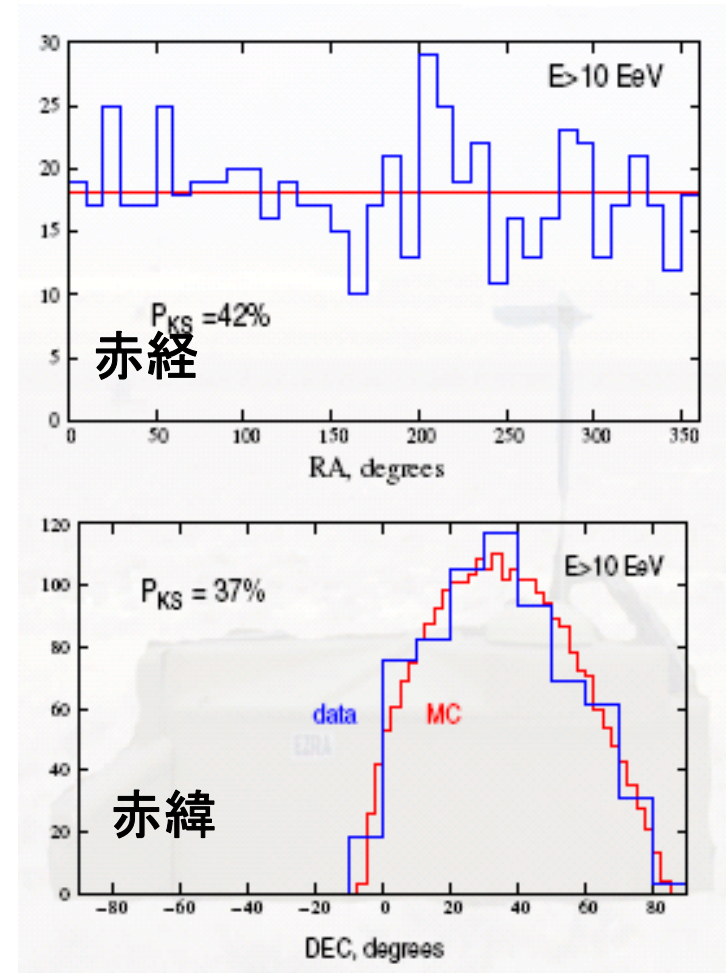
# 到来方向

異方性の探索にはSDのデータを用いる。 Duty Cycle~100%



トリガー効率~100% @ E>10<sup>19</sup>eV

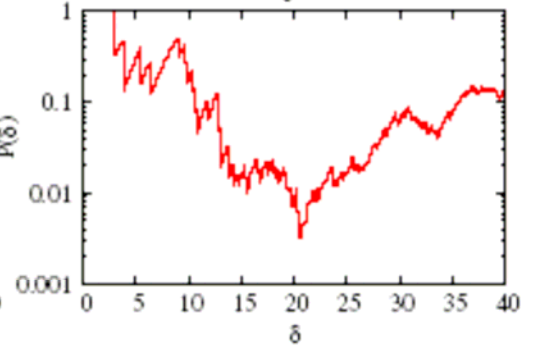
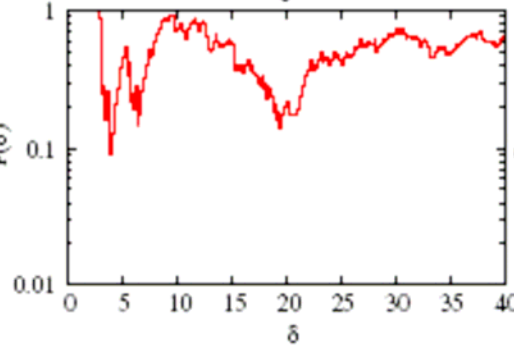
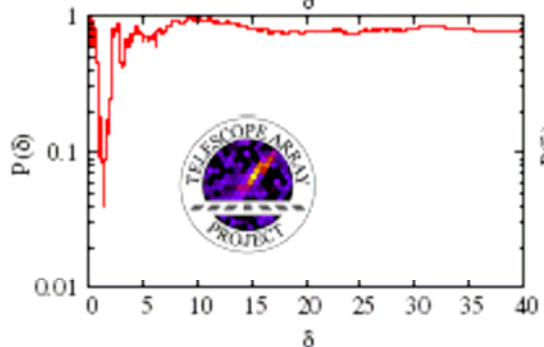
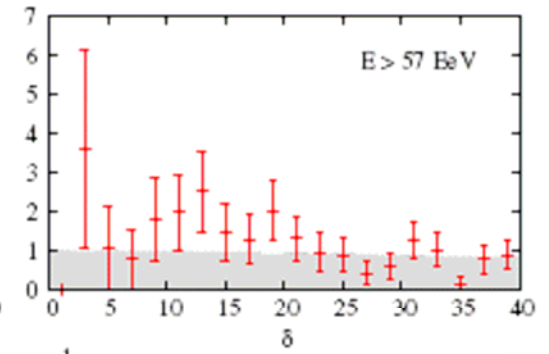
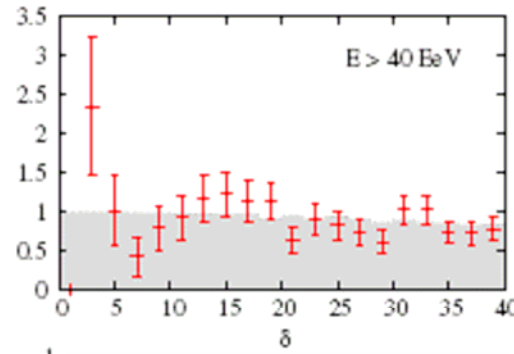
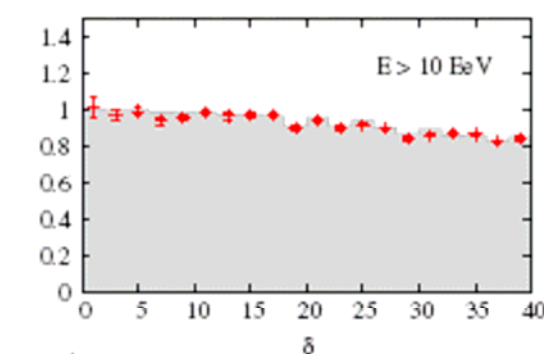
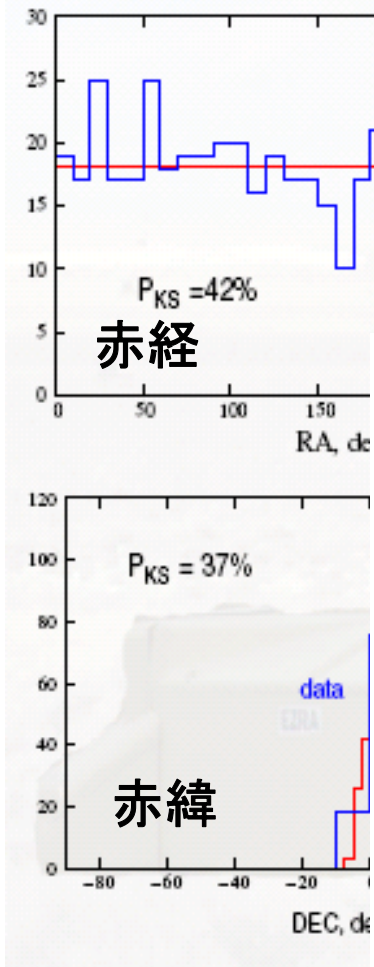
一様に近い到来方向分布  
> 10EeV



P.Tineacov et.al WG review of Anisotropy data UHECR2012

# 到来方向

イベントのクラスタリング探索:  
2イベント間の開角を $2^\circ$  毎に集計  
一様等方を仮定した場合の期待値とデータを比較

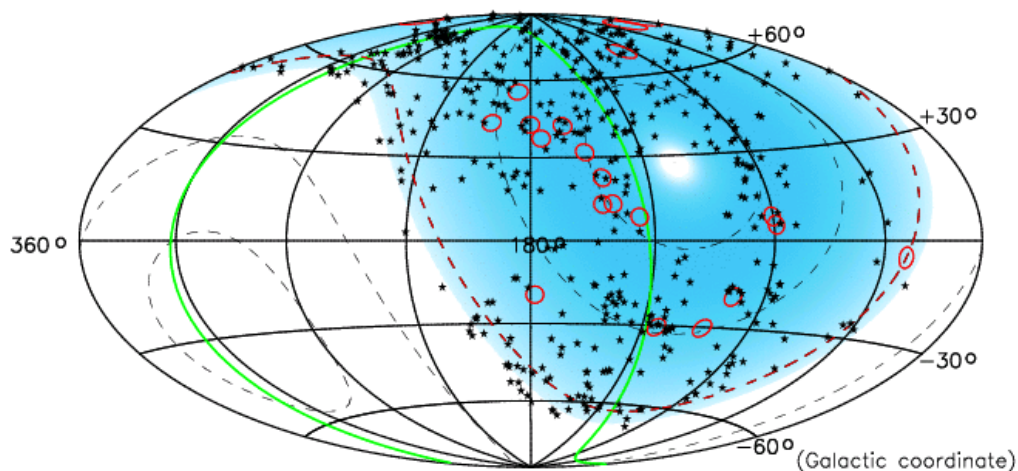


⇒ no significant excess at any scale

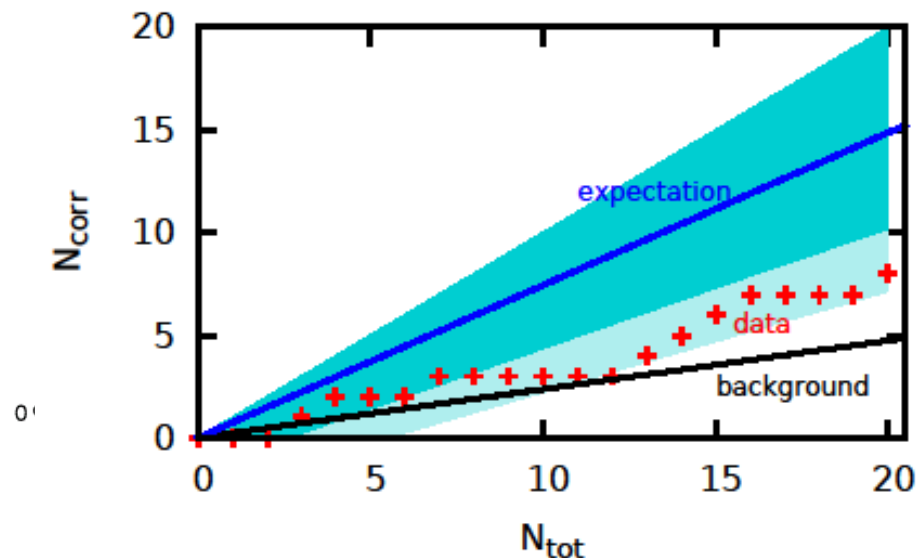
# AGN との相関

$E > 57 \text{ EeV}$  解析期間 2008/05/11– 2011/05/01

20 event



In Veron AGN 12th in  $Z_{\text{max}}=0.018$ ,  
295 AGNs in  $3.1^\circ$



縦軸: AGNから $3.1^\circ$  以内に落ちたイベント数

横軸: 積算イベント数

Expectation:

Auger (*Science* 9 November 2007: 938-943.)に基づいて計算

Back ground:

等方分布と視野内のAGNから期待される  
イベント数 (eventの73%)

Isotropic に到来している場合 に矛盾しない

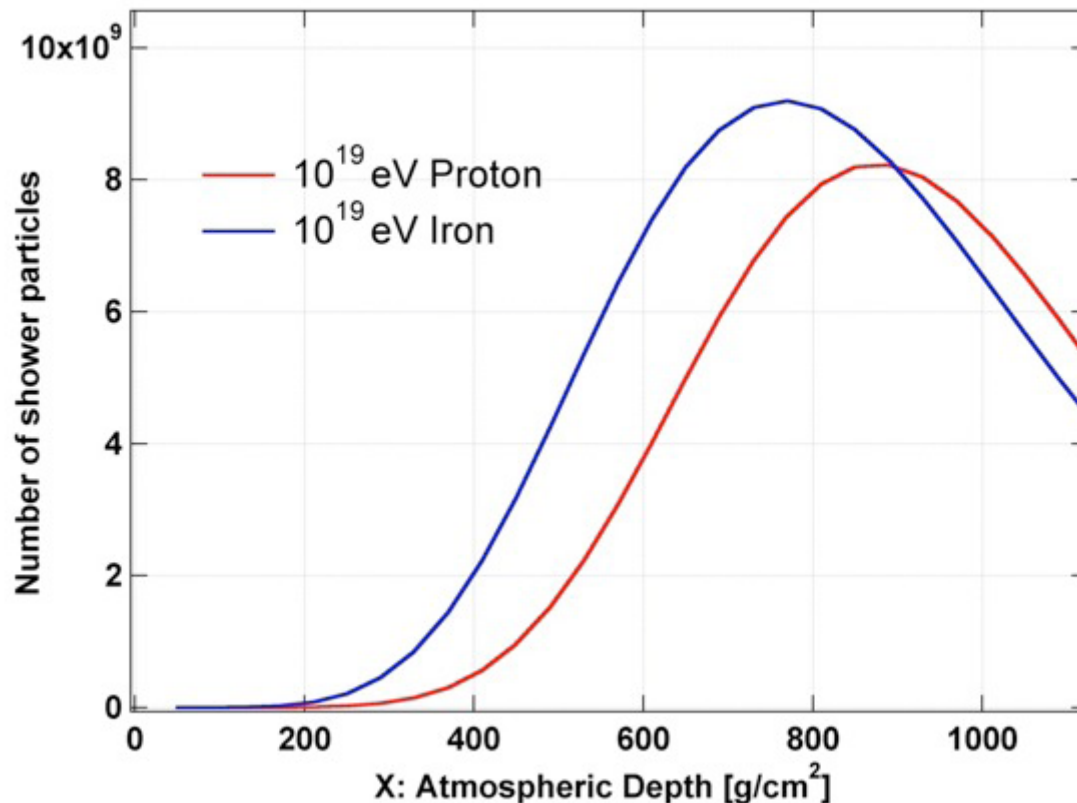
# 宇宙線化学組成

断面積: 鉄 > 陽子

核子あたりエネルギー: 鉄 < 陽子

→ 最大発達深さ (Xmax):

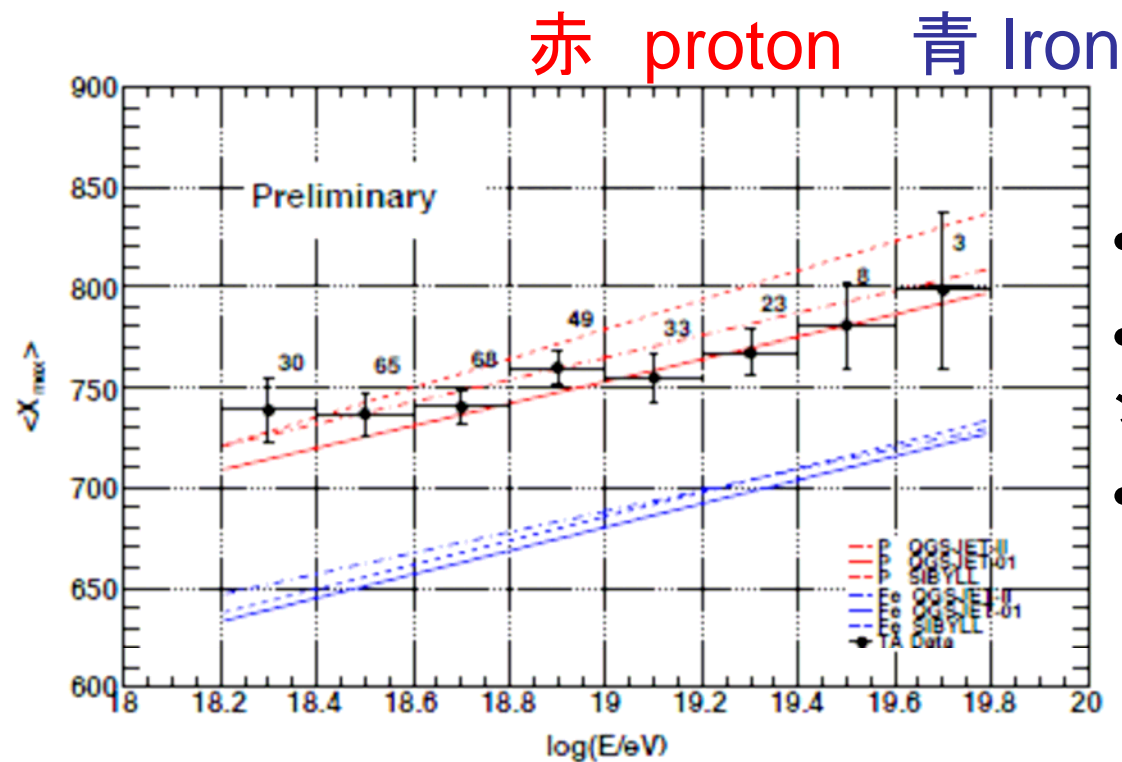
1st interaction, 発達のエネルギーの細分化が早く終わるため、  
同じエネルギーでは重い組成の方が浅くなる。



エネルギー毎に 分布の平均  
をとって比較

# 宇宙線化学組成

組成別のモンテカルロ - イベント で得られる平均 $X_{max}$ を比較

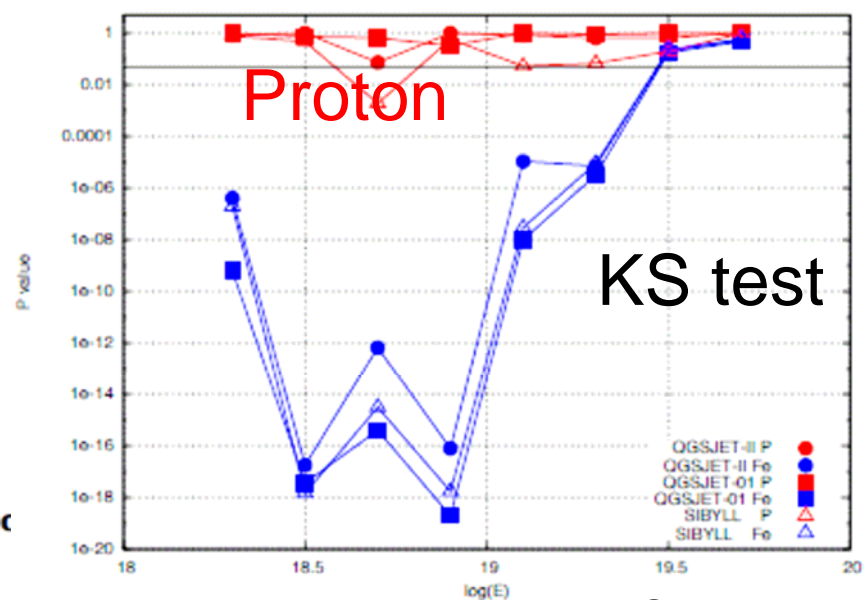
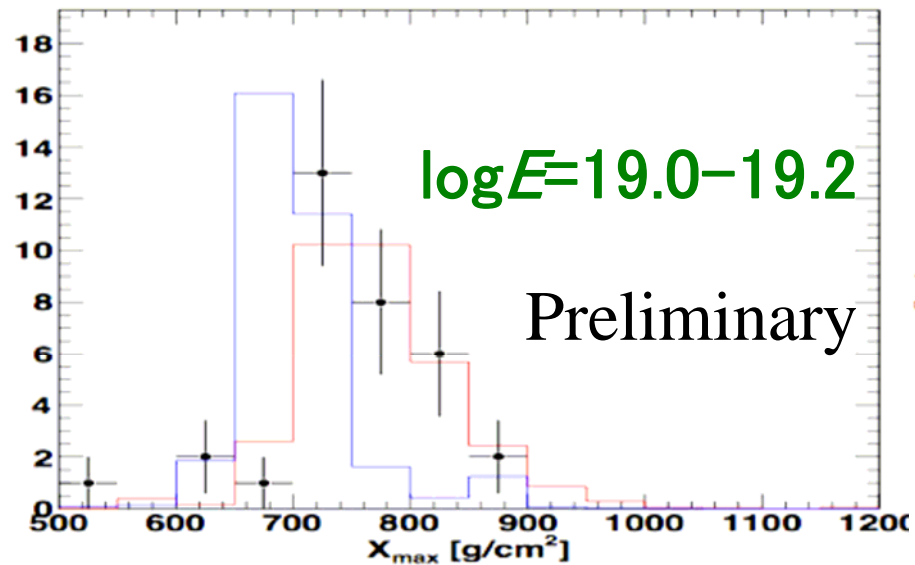
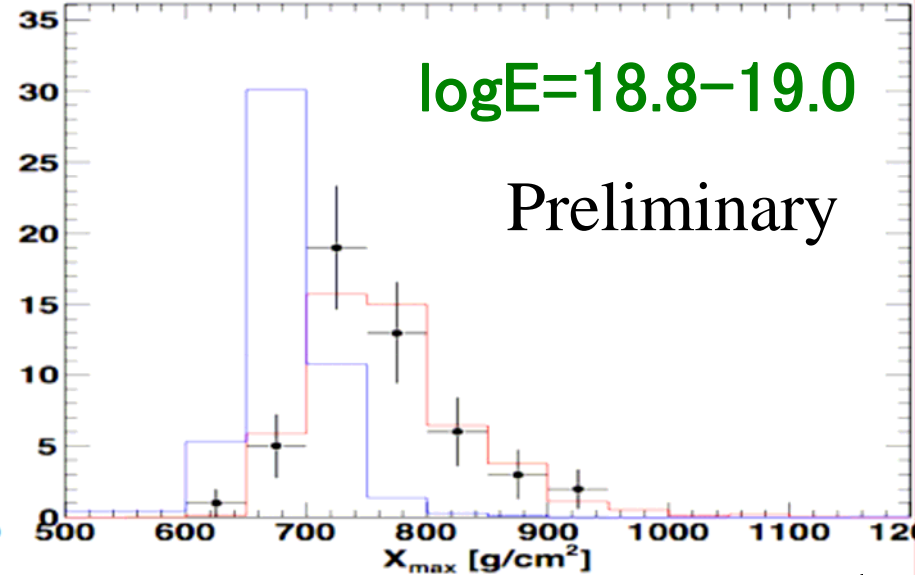
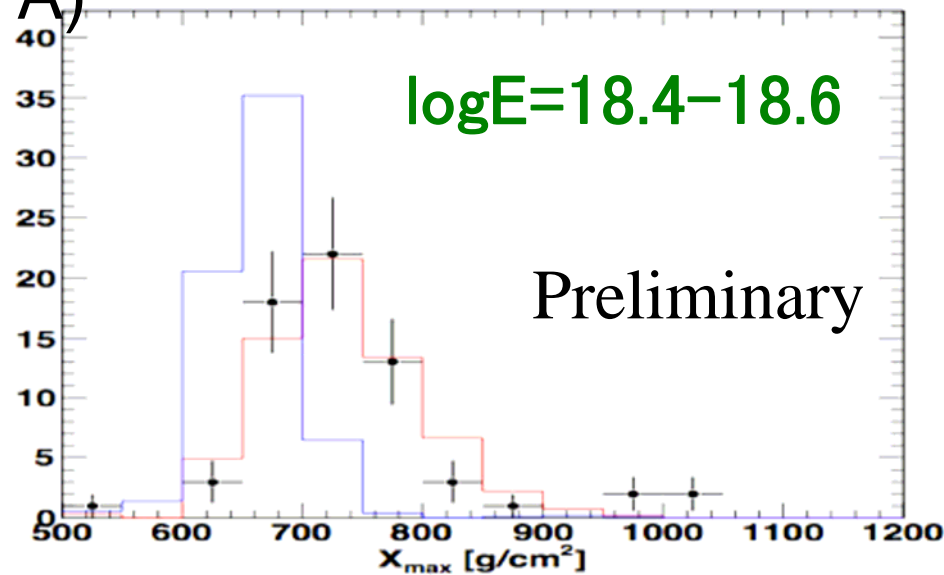


- Airshower simulation (CORSIKA)
- Full detector simulation, キャリブレーション
- MCとデータで同じ再構成手順

Y.Tameda et.al International Symposium on Future Directions in UHECR Physics  
(<https://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=152124>)

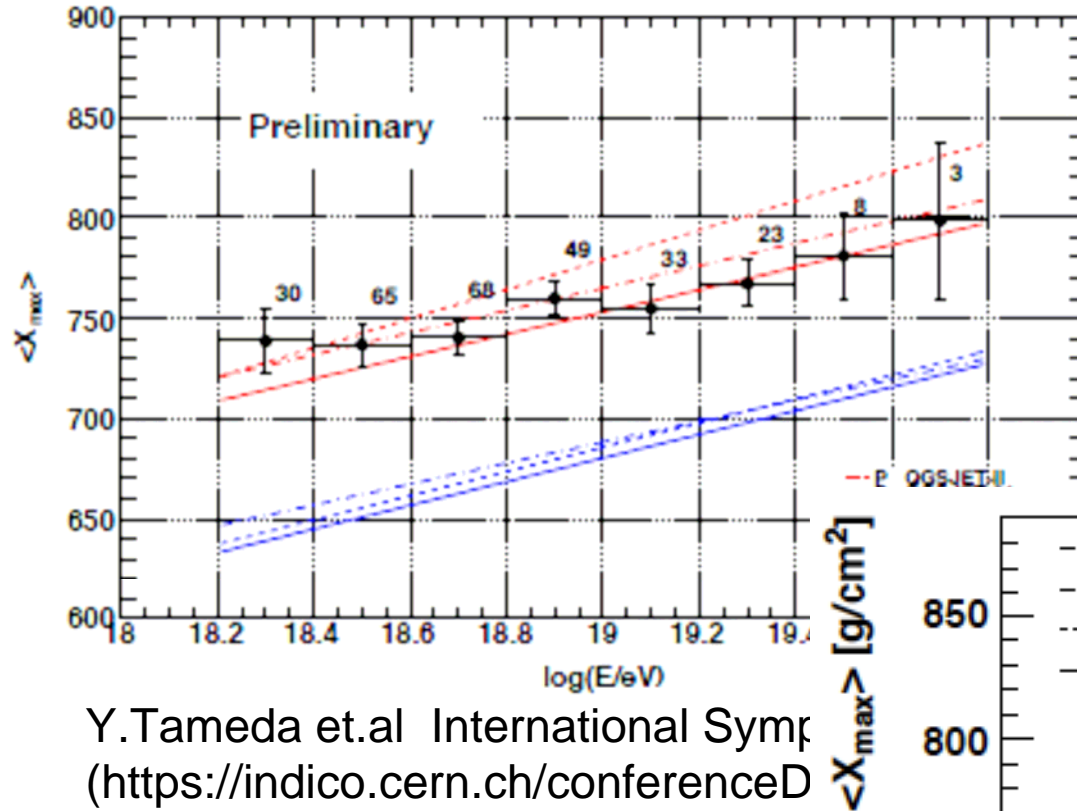
# 宇宙線化学組成

(TA)



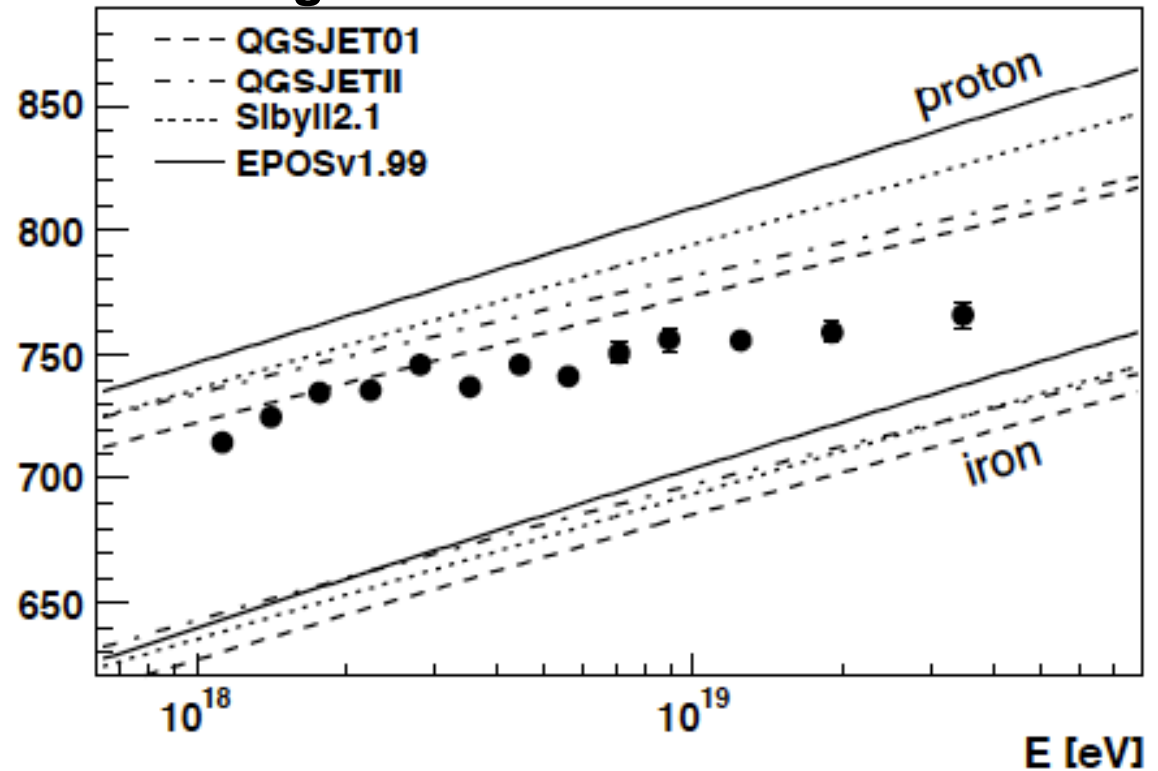


# 宇宙線化学組成



- Auger 実験とは高エネルギー側で相違。
- 実験を横断した WGが立ち上がり相互理解が始まっている。

## Auger



# 宇宙線化学組成

TA:

統計的に言及できる $10^{19.5}$ eVより下のエネルギーでは陽子  
HiResの結果と矛盾しない

Auger :

徐々に重い組成へ遷移

低エネルギー側:

$10^{18}$ eV 付近で両実験共に陽子

重い原子核からの遷移が 18乗までに起きている。

→ TALE

高エネルギー側: 鉄か陽子かで何が変わってくるのか。

- 鉄ならスペクトルの減少の意味が変わる。  
陽子なら 減少は GZK cut off と矛盾しない
- 異方性にも影響 (鉄→ 磁場により方向をより失う)

# 現状、と展望

---

スペクトルの折れ曲がりには TA, HiRes Auger 実験ともに確認

GZK効果 として期待されるエネルギー付近に存在  
実験間の Energy 決定の系統誤差の解決が必要。  
→ + “Electron Light Source”

組成に関して TA, HiRes と Auger との間では傾向が異なる

- ・ Auger と TA で  $X_{\max}$  の定義が異なる。
- ・ 南北半球の違い？

→ MC が実データをよく反映しているかどうか確認することが重要

---

# 現状、と展望

TA、Auger共に

局所的な異方性は見えていない。

大規模構造との相関は銀河磁場を考慮。

原因： 大きな系外磁場、たくさんの宇宙線源？

→ 統計が必要。

より高エネルギーへ拡張することで  
ソース候補の数を減らすことも有効

将来の検出器をどのようにするのか

大規模地表アレイ

電波を使った観測、（マイクロ波、レーダーエコー）

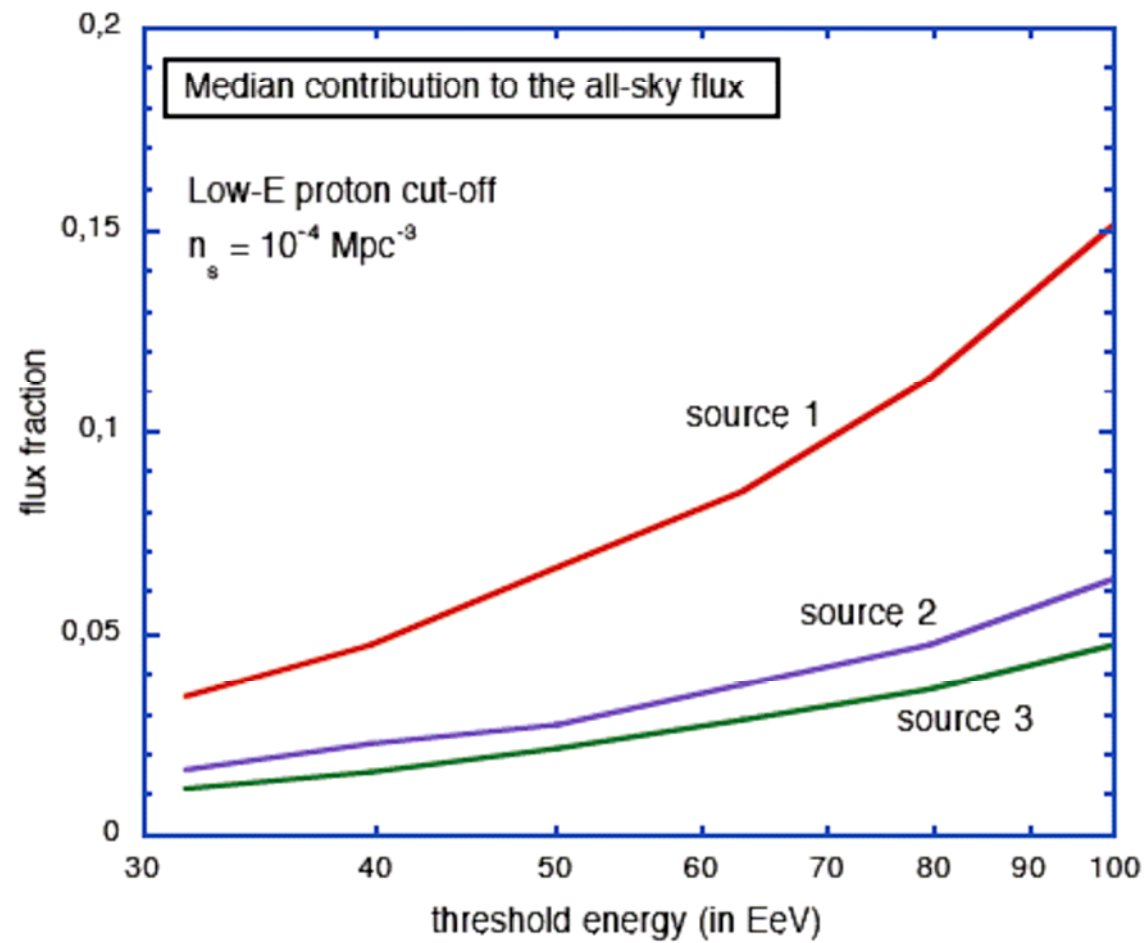
→ 今後はさらに国際間の協力が必要になりそう

---

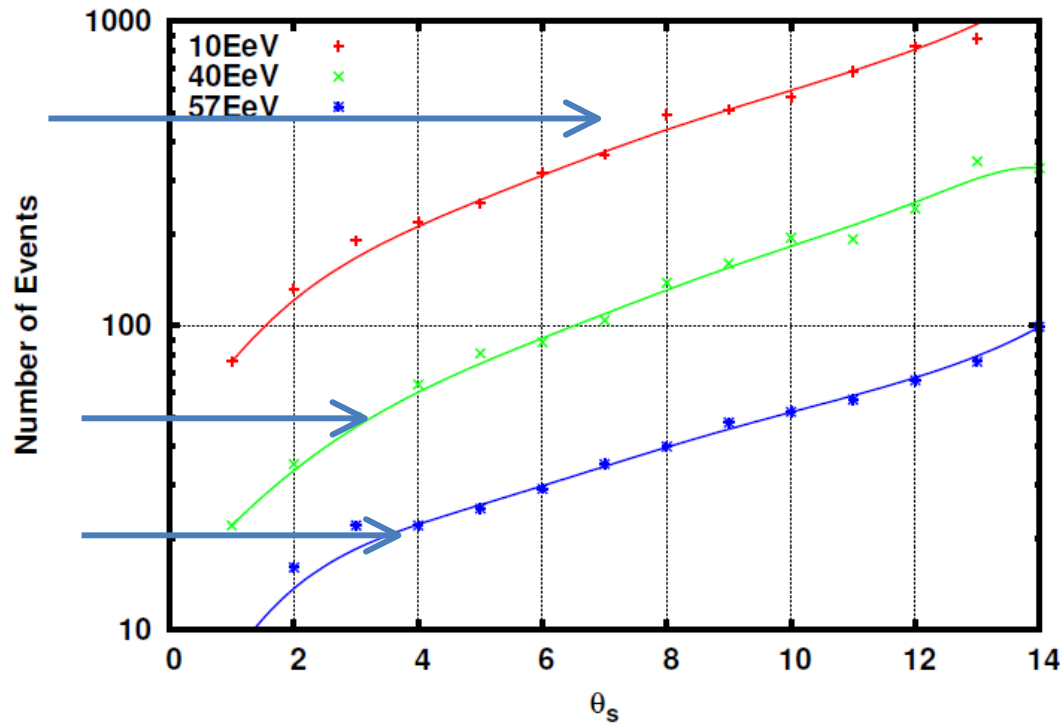
Back Up

---

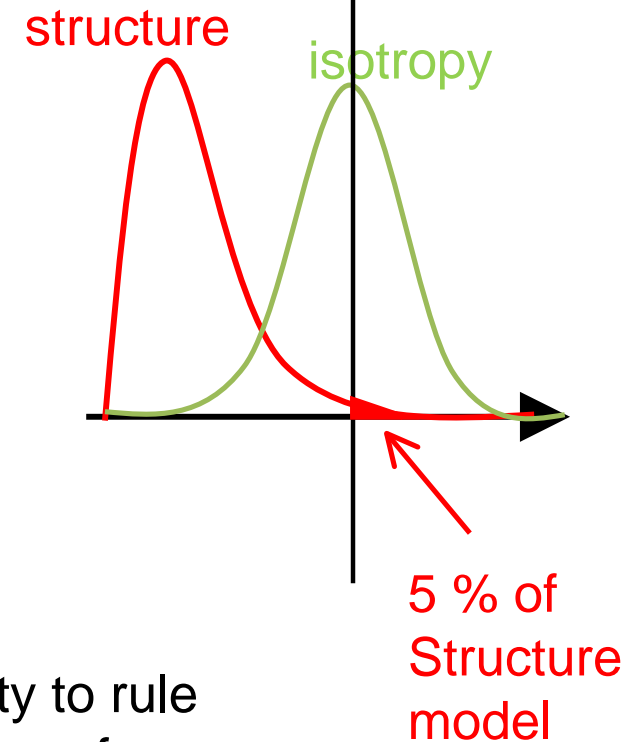
# Single source contribution



# Expected Discrimination Power



Typical data point from isotropy



Number of events required for 50% probability to rule out a source distribution tracing the distribution of matter at 95% C.L. when the true distribution is isotropic.