宇宙線望遠鏡による
極高エネルギー宇宙線の研究

東京大学宇宙線研究所
木戸　英治

テレスコープアレイ(TA)実験関連共同利用採択研究

E14 佐川宏行：宇宙線望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の研究 (0千円, 900千円)

E15 藤井俊博： TA実験サイトでの新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線観測 (0千円, 250千円)

E16 木戸英治： TAx4及びTALE実験 地表検出器の時間及び位置の較正 (0千円, 250千円)

E17 荻尾彰一： TALE実験用地表検出器の開発と性能試験 (100千円, 450千円)

E18 有働慈治：最高エネルギー宇宙線の電波的観測の研究 (200千円, 250千円)

E19 多米田裕一郎：次世代の超高エネルギー宇宙線観測のためのフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の開発研究 (200千円, 300千円)

E20 野中敏幸： TA地表粒子検出器による雷と関連する特異事象観測 (300千円, 250千円)

E21 冨田孝幸：新型大気蛍光望遠鏡における電力自給システム・検出器保護システムの開発 (0千円, 250千円)

E22 冨田孝幸：ドローンに搭載された標準光源による大気蛍光望遠鏡の検出器応答および光学系の較正 (0千円, 250千円)

E23 山崎勝也：大気蛍光望遠鏡の自動観測を目指した夜間雲量測定用CCDカメラの開発と解析 (150千円, 250千円)

E25 野中敏幸： 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 (300千円, 300千円)

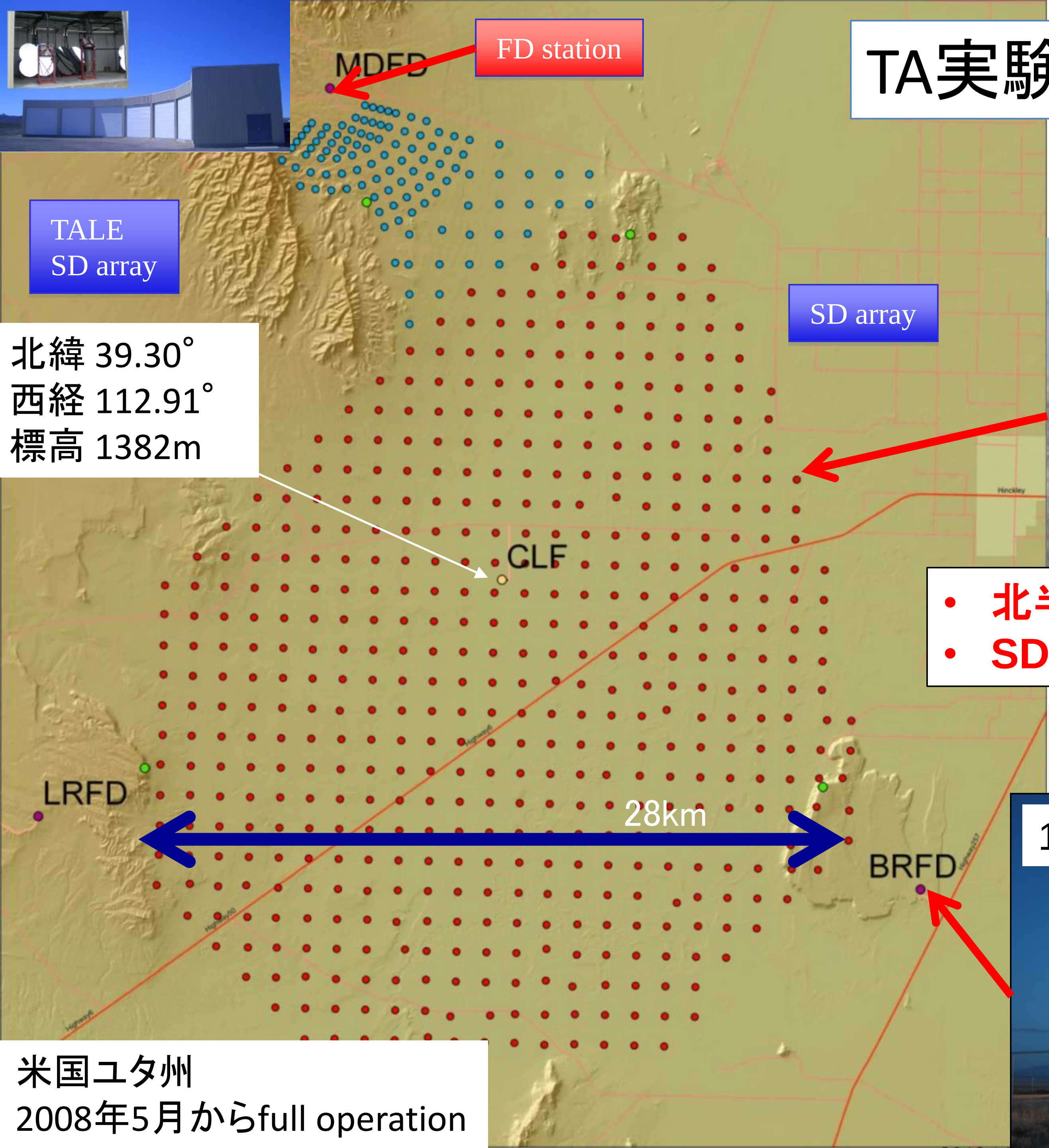
E37 埣隆志：ミュー粒子を用いた宇宙線化学組成研究 (380千円, 300千円)

12件，5,580千円

ご支援どうもありがとうございました。

TA実験 検出器

FD station



TALE
SD array

SD array

北緯 39.30°
西経 112.91°
標高 1382m

米国ユタ州
2008年5月からfull operation

Surface Detector
(SD)

1.2 km spacing
～700 km²
507 SDs

- **北半球最大の検出面積**
- **SDFDハイブリッド観測**

Fluorescence Detector
(FD) station

12 telescopes

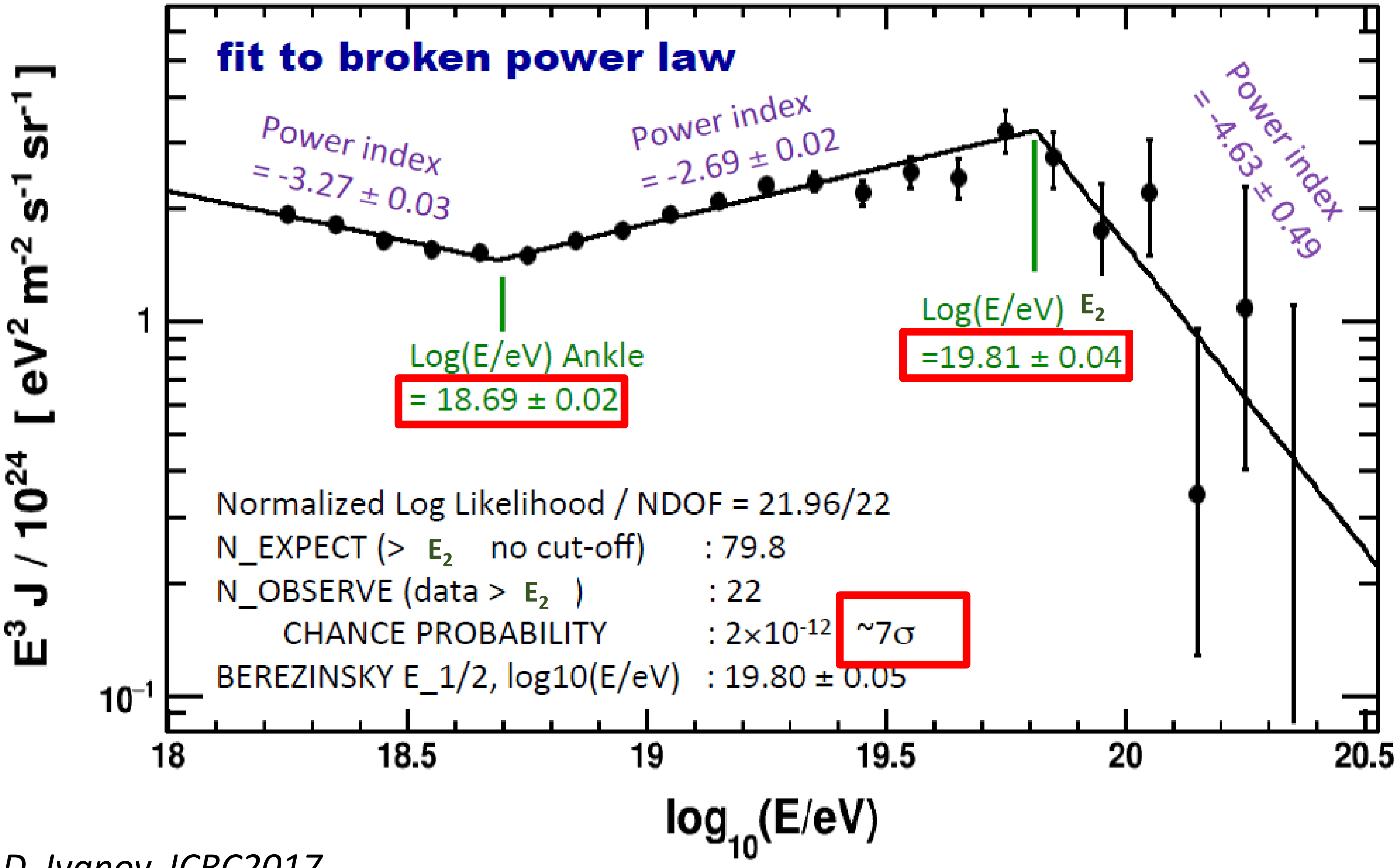
2018年 TA実験関連論文

- 掲載決定された論文: 6編，投稿中の論文: 4編

- エネルギースペクトル
  - TALE実験 FD単眼解析 *R. Abbasi et al., ApJ, **865**, 74 (2018)*
- 異方性
  - エネルギースペクトルの到来方向による違い
    - *R. Abbasi et al., ArXiv: 1707.04967v3*
    - *R. Abbasi et al., ArXiv: 1801.07820v01*
    - *R. Abbasi et al., ApJ, **862**, 91 (2018)*
  - Auger実験で報告された、Starburst galaxyとの相関の検証
    - *R. Abbasi et al., ApJ, **867**, 27 (2018)*
- 化学組成
  - TA SDFD ハイブリッド観測結果 *R. Abbasi et al., ApJ, **858**, 76 (2018)*
  - SD による観測結果 *R. Abbasi et al., ArXiv: 1808.03680*
- ガンマ線探査 *R. Abbasi et al., ArXiv: 1811.03920*
- 空気シャワー中のミューオン成分の研究 *R. Abbasi et al., Phys. Rev. D, **98**, 022002 (2018)*
- 雷と同期して発生するガンマ線シャワーの研究 *R. Abbasi et al., JGRD, **123**, 6864 (2018)*

エネルギースペクトル

TA SD 9年間のデータ

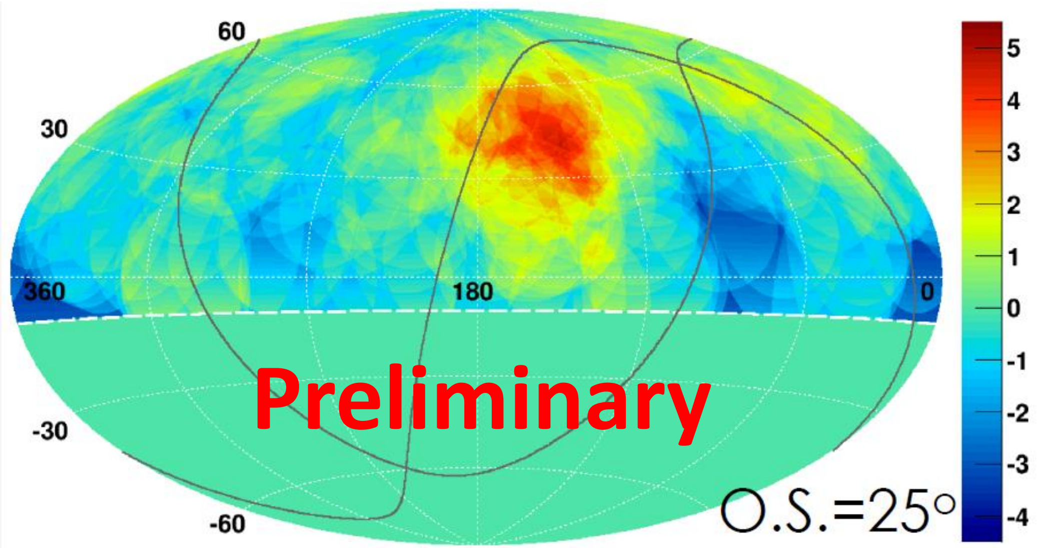


D. Ivanov, ICRC2017

Hotspot (> 57 EeV)

K. Kawata, UHECR2018

一様分布からの有意度マップ



赤道座標

- TA SD **10年間**のデータ
- 157イベント(天頂角55度以下)
- 各到来方向からサーチ半径内のイベント数を加算→一様分布からの有意度を計算
- サーチ半径: 15, 20, 25, 30, 35度

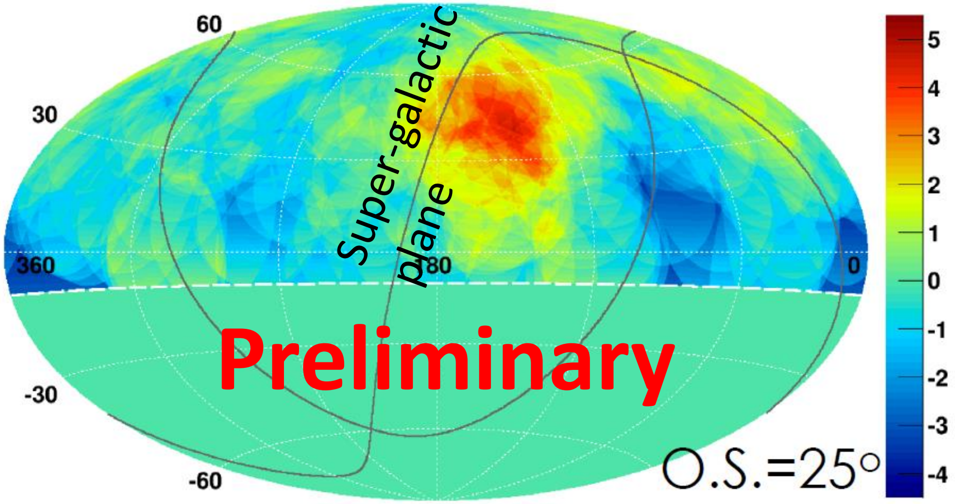
→ **最大有意度 5.0σ** (サーチ半径: 25度)

- 有意度最大の方向:
  赤経: 144.3度 赤緯: 40.3度
- 観測: 36イベント,
- 一様分布: 12.6イベント

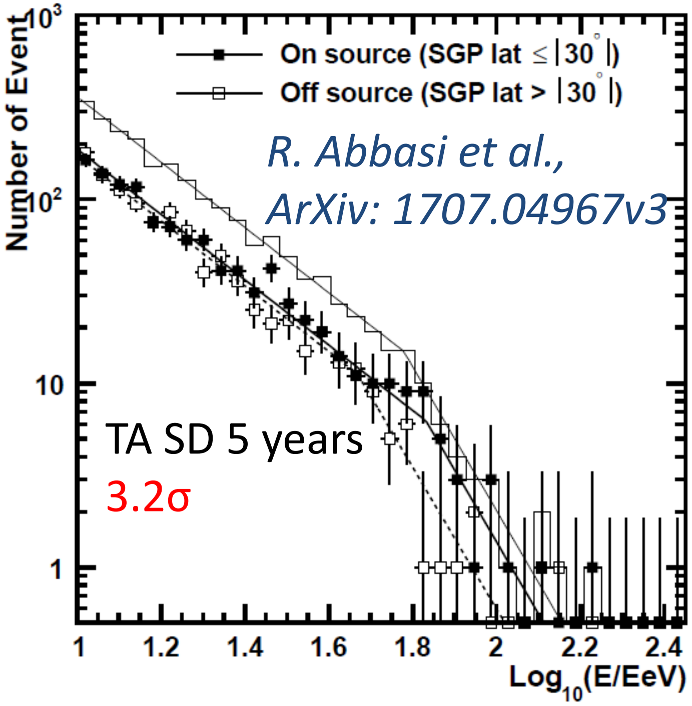
- それぞれのサーチ半径で視野内で有意度の最大を計算

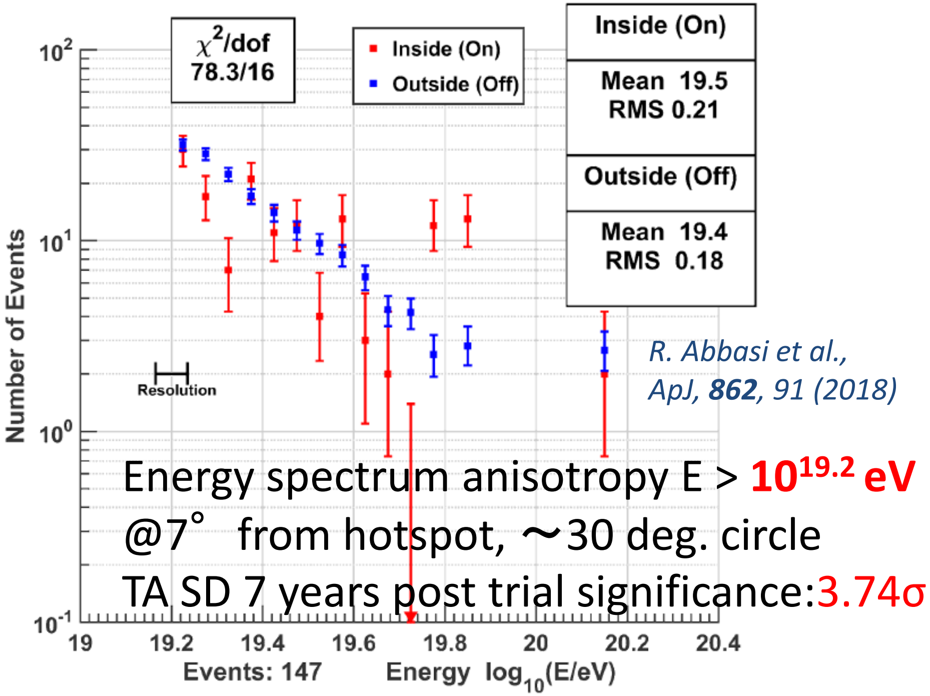
→偶然確率～3σ
詳細な計算は現在検討中

Significance map from isotropy

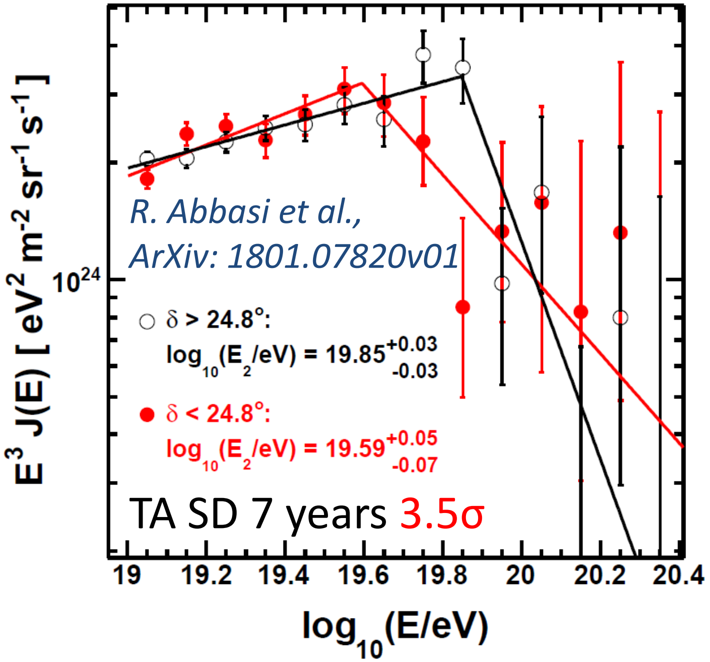


TA SD 10 years E > 57 EeV 157 events
25 deg. from each events are counted.
Global significance: ~3σ



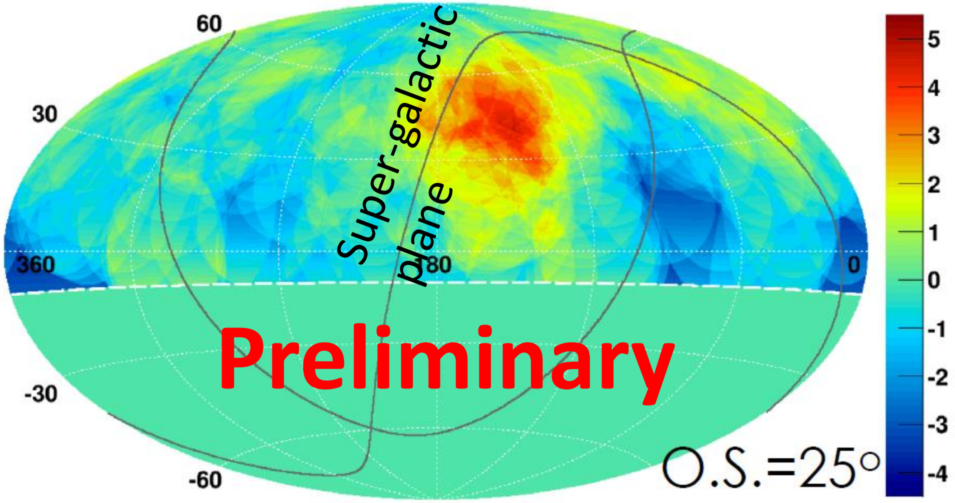


Energy spectrum anisotropy E > $10^{19.2}$ eV
@7° from hotspot, ～30 deg. circle
TA SD 7 years post trial significance:3.74σ

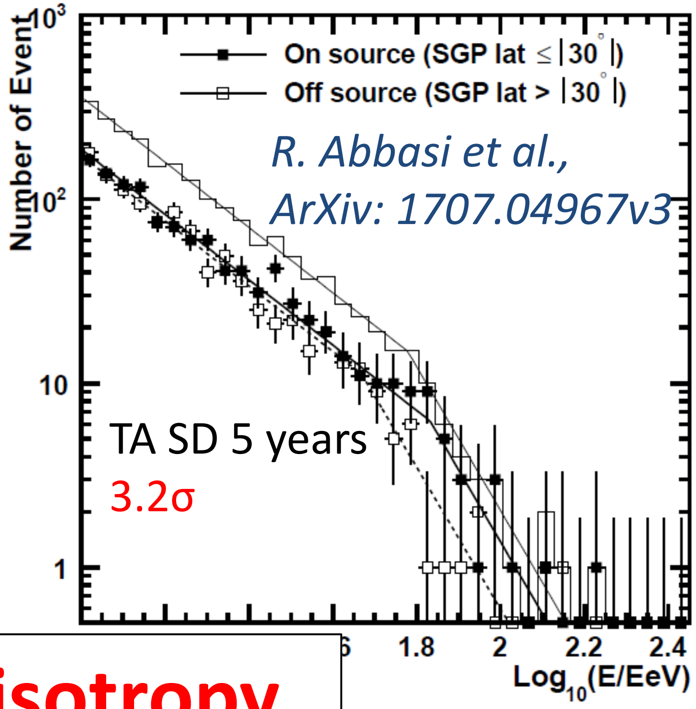


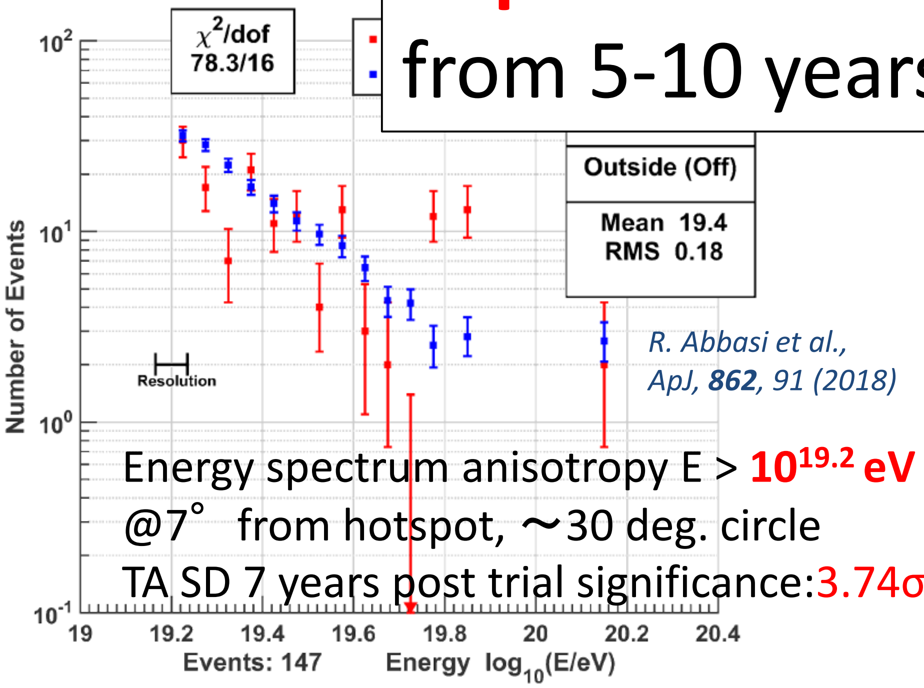
Implications of anisotropy from 5-10 years TA SD data

Significance map from isotropy

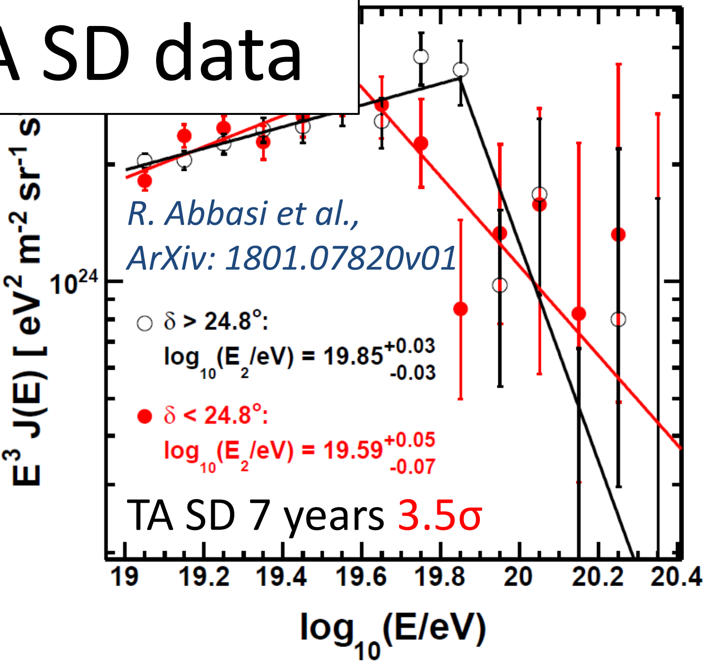


TA SD 10 years E > 57 EeV 157 events
25 deg. from each ev[...]
Global significance: ~[...]



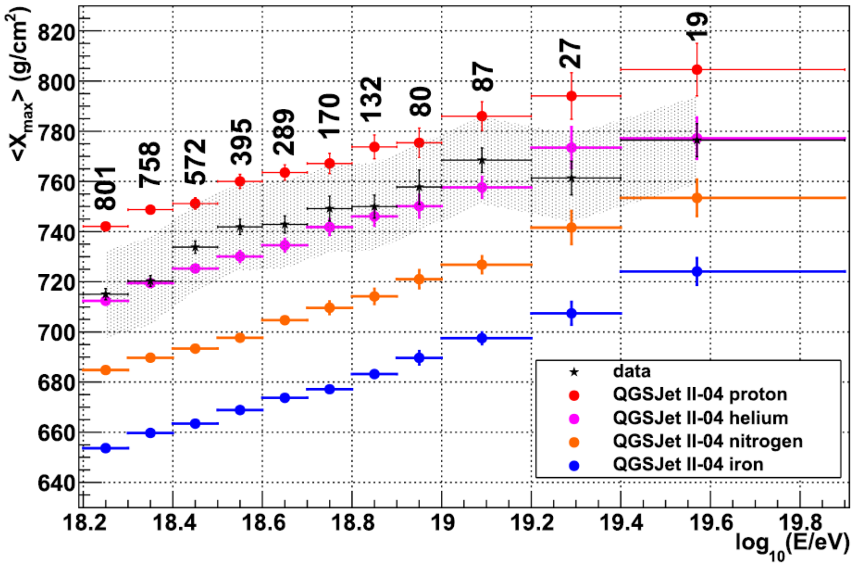


Energy spectrum anisotropy E > $10^{19.2}$ eV
@7° from hotspot, ～30 deg. circle
TA SD 7 years post trial significance:3.74σ

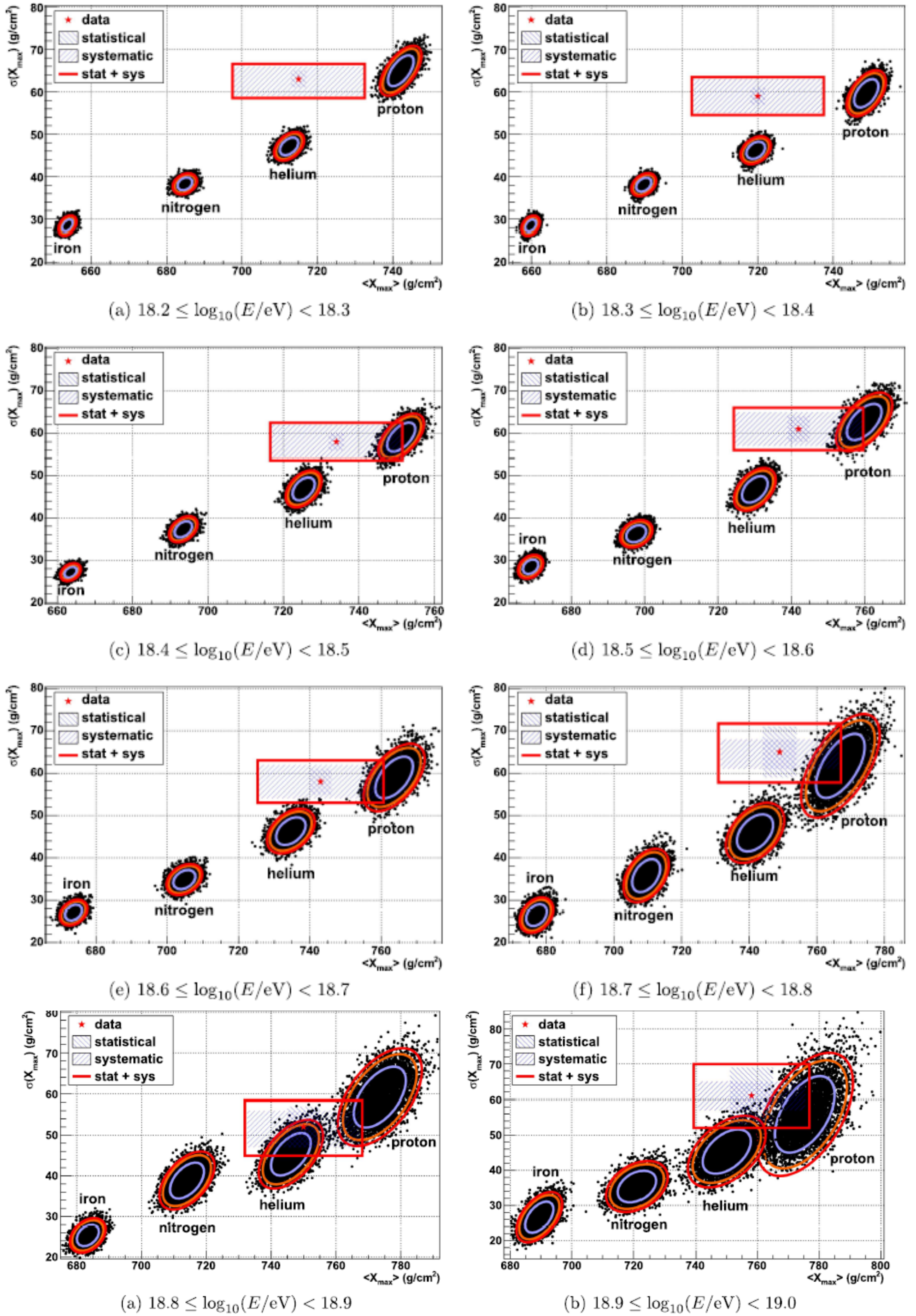


TA: Xmax results and interpretation

*R. Abbasi et al., ApJ, **858**, 76 (2018)*



- qgsjetII-04
- Mean Xmax: close to He
- σ(Xmax): close to p



(a) $18.2 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 18.3$

(b) $18.3 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 18.4$

(c) $18.4 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 18.5$

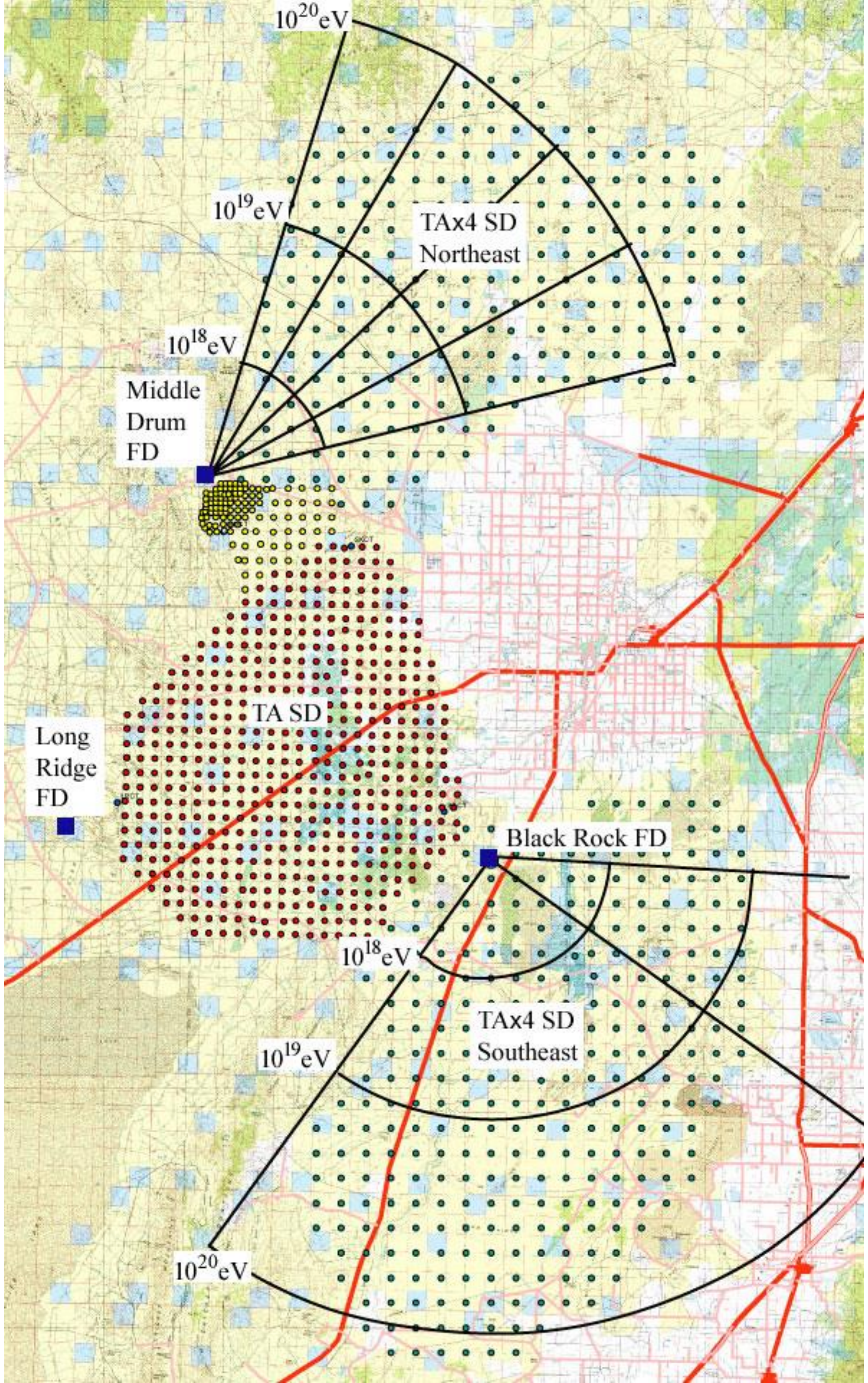
(d) $18.5 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 18.6$

(e) $18.6 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 18.7$

(f) $18.7 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 18.8$

(a) $18.8 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 18.9$

(b) $18.9 \leq \log_{10}(E/\mathrm{eV}) < 19.0$



TAx4実験

特に異方性の兆候を検証するために

500 台SD, **2.08 km** 間隔 拡張アレイ

E > 57 EeV: イベント再構成効率 > 95%
角度分解能: 2.2°
エネルギー分解能: 〜25%

→ TA SDと合わせて

TA SDの**4倍**の検出面積(〜3000 km^2)

現在建設中

2019年初め、完成したSDをサイトに設置予定

2 FD ステーション(4+8 HiRes Telescopes)の建設 US NSFに申請

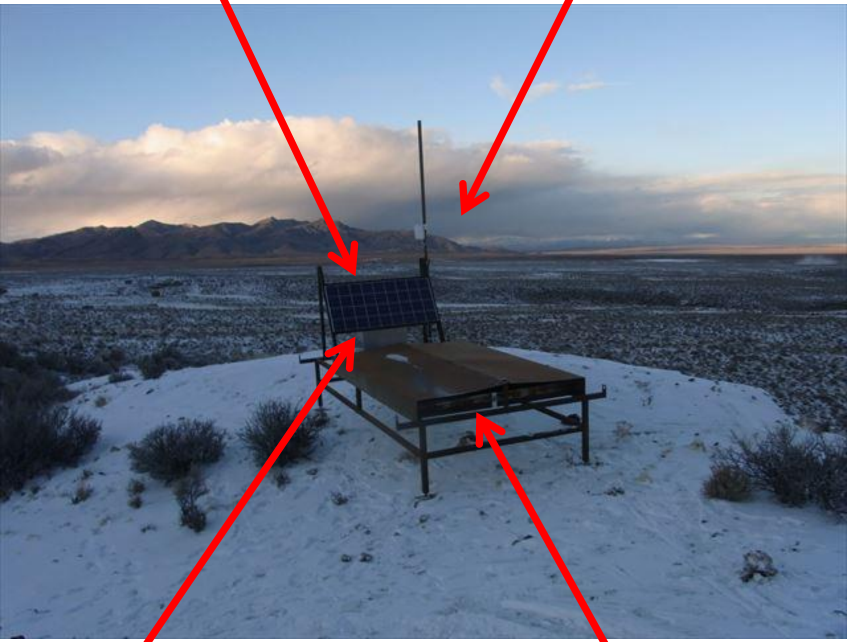
1 FD ステーション(4 HiRes Telescope)でファーストライトを観測

1 FD ステーション(8 HiRes Telescope)を現在建設中

TAx4実験用SD

ソーラーパネル

無線通信用アンテナ



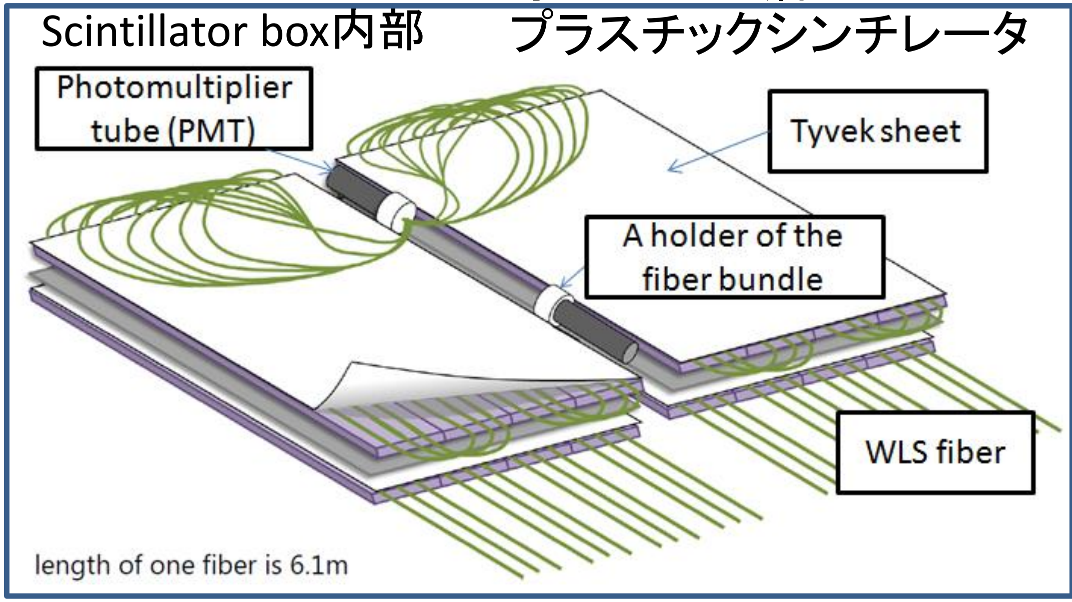
ステンレスボックス: エレクトロニクス、バッテリなどを収納

シンチレータボックス

2.4 GHz 無線通信でデータ収集

厚さ1.2cm 2層 3 m^2

プラスチックシンチレータ



PMT:浜松ホトニクスR8619

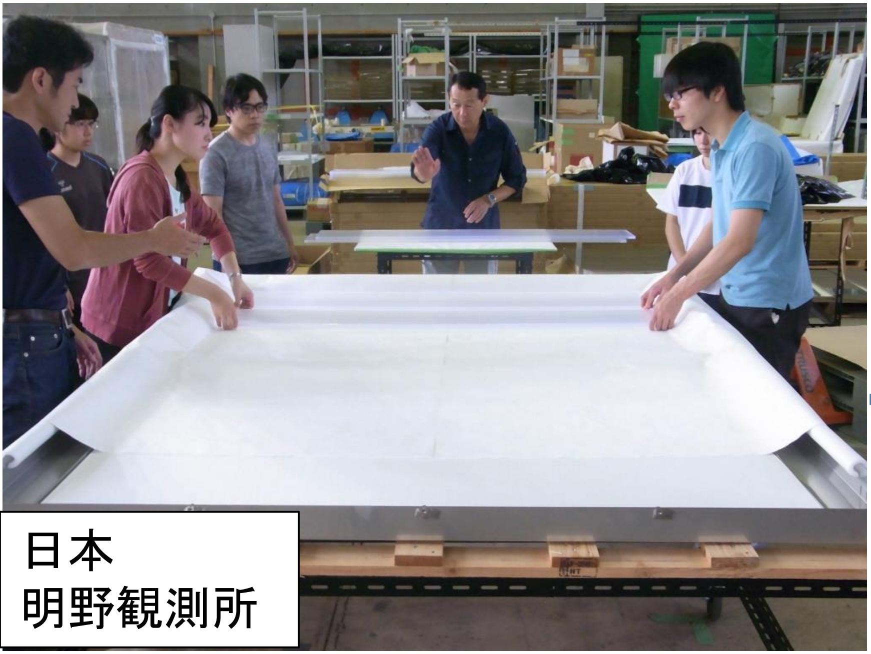
(PMTs in TA SD: ET9124)

- 量子効率～20 % at 500 nm (～10% ET9124)
- パルスリニアリティ ～50 mA (25 mA ET9124)
- 光電面の位置依存性 < ～ 10%

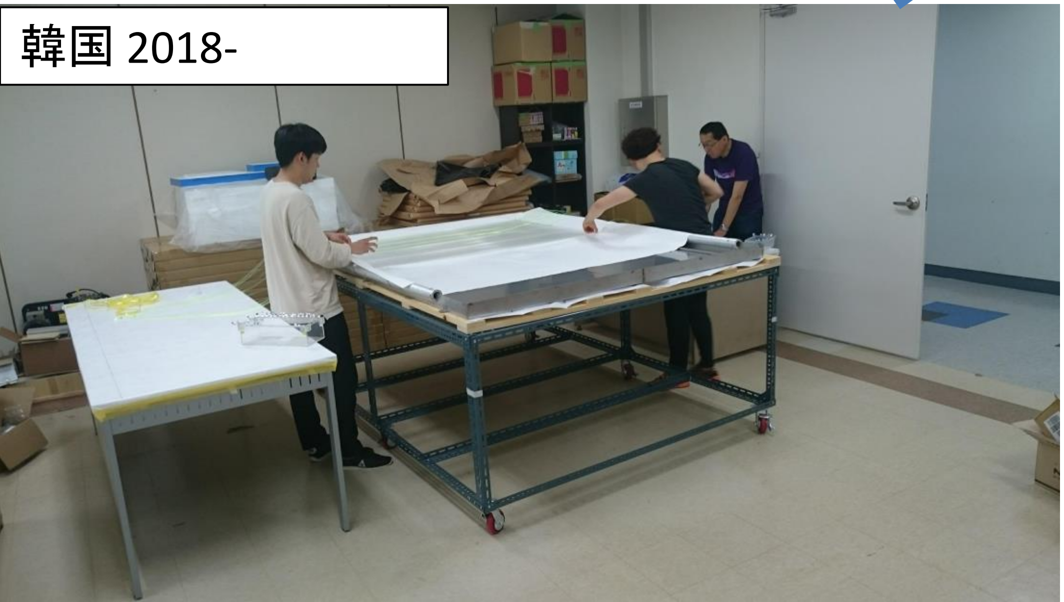
→波長変換ファイバーの構成を変更

Total length of fibers～33% of TA SD

TAx4実験用SDの建設



日本
明野観測所



韓国 2018-

Scintillator
Boxの
輸送

Utah

2015年建設開始

CAPITAL

来年のSD建設予定

- ヘリコプターでSDの設置
- 通信塔の建設
- SDのアンテナの方向、高さを調整

→ SDのデータ収集を開始!

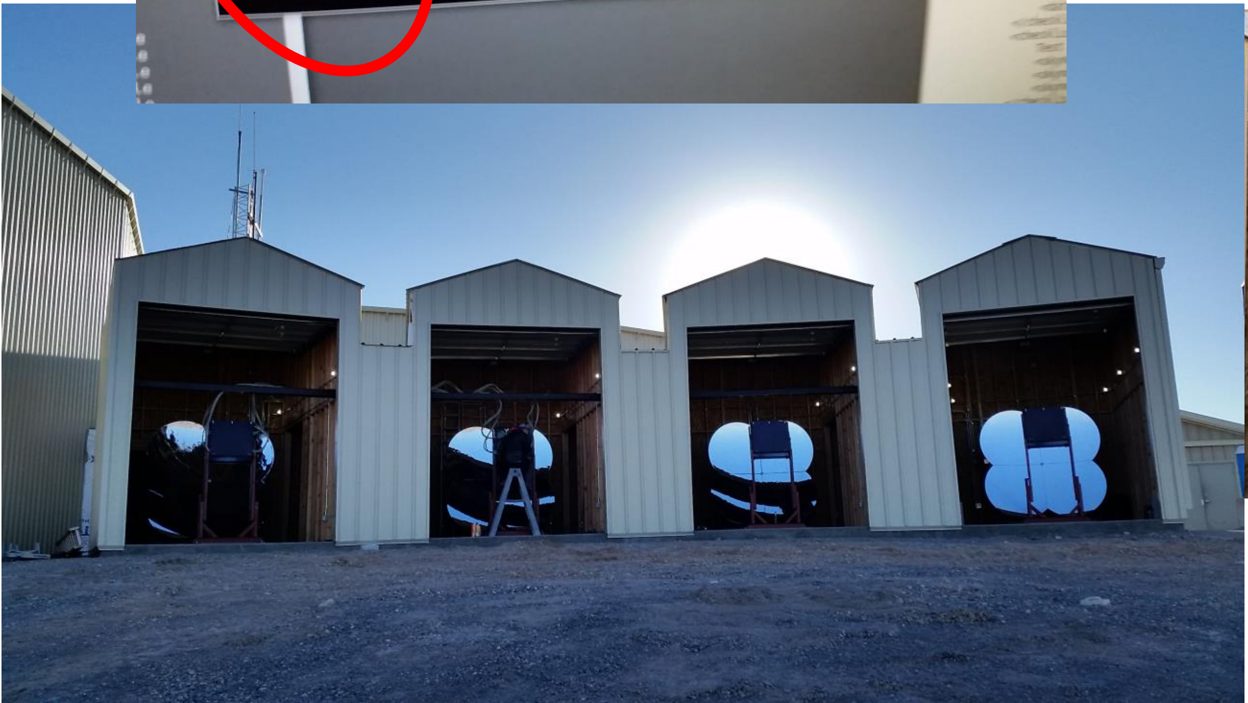
写真: TALE SDの設置時

北側 FD ステーションの建設

Feb. 16th, 2018

ファーストライトを観測

(camera 28: Xe Flasher)

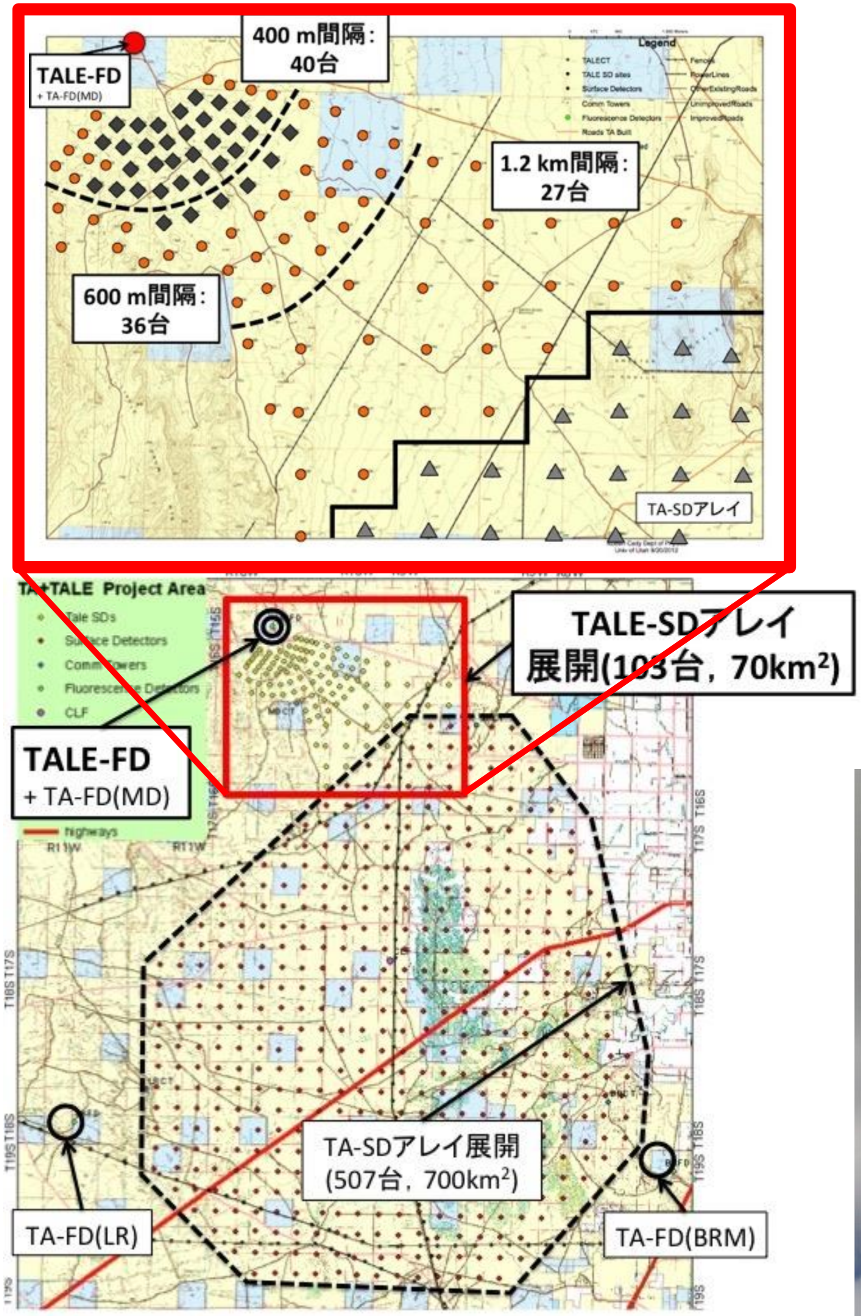


南側 **FD** ステーションの建設

Aug, 2018

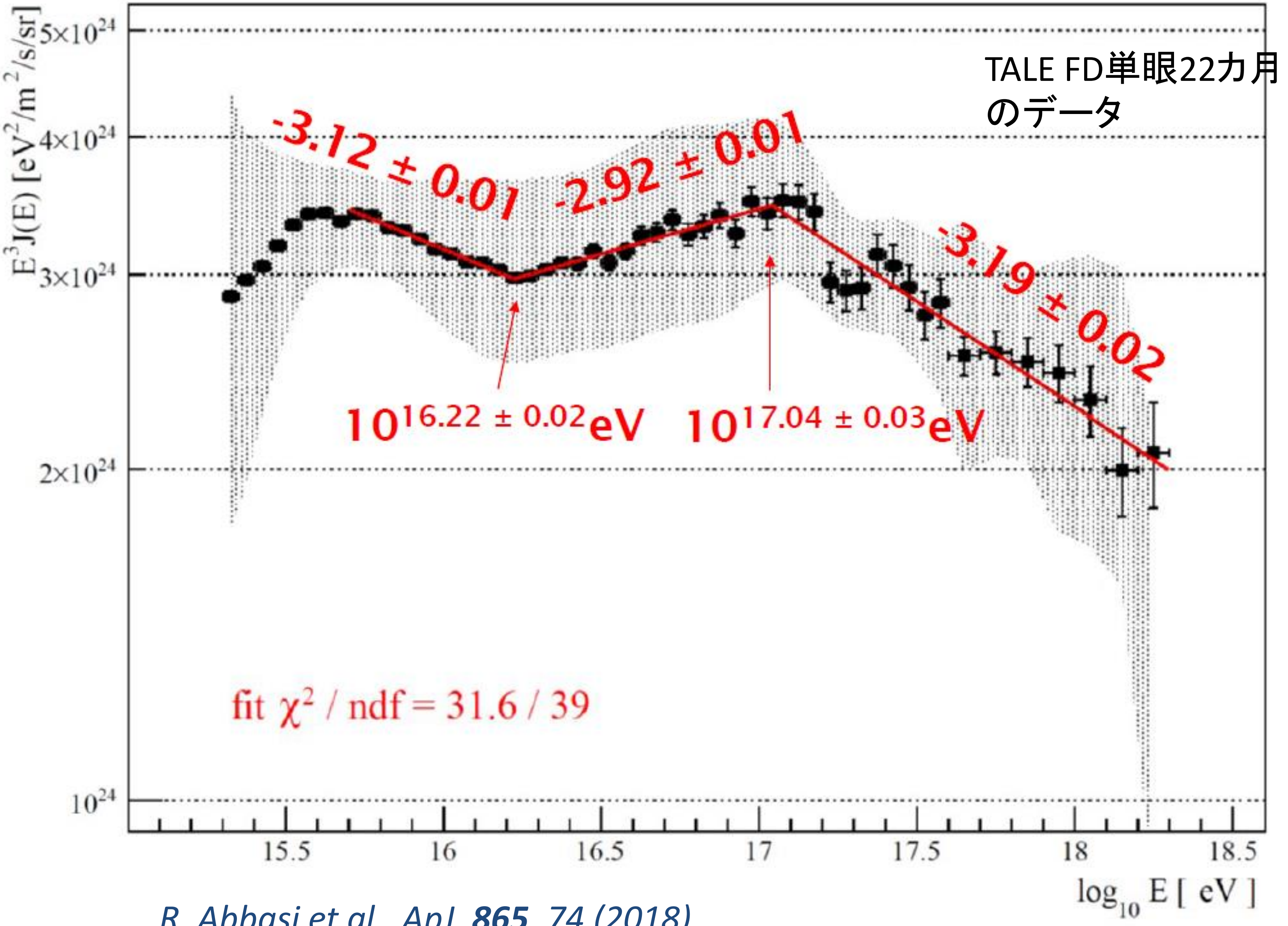
南側 FD ステーション
も現在建設中

TALE実験



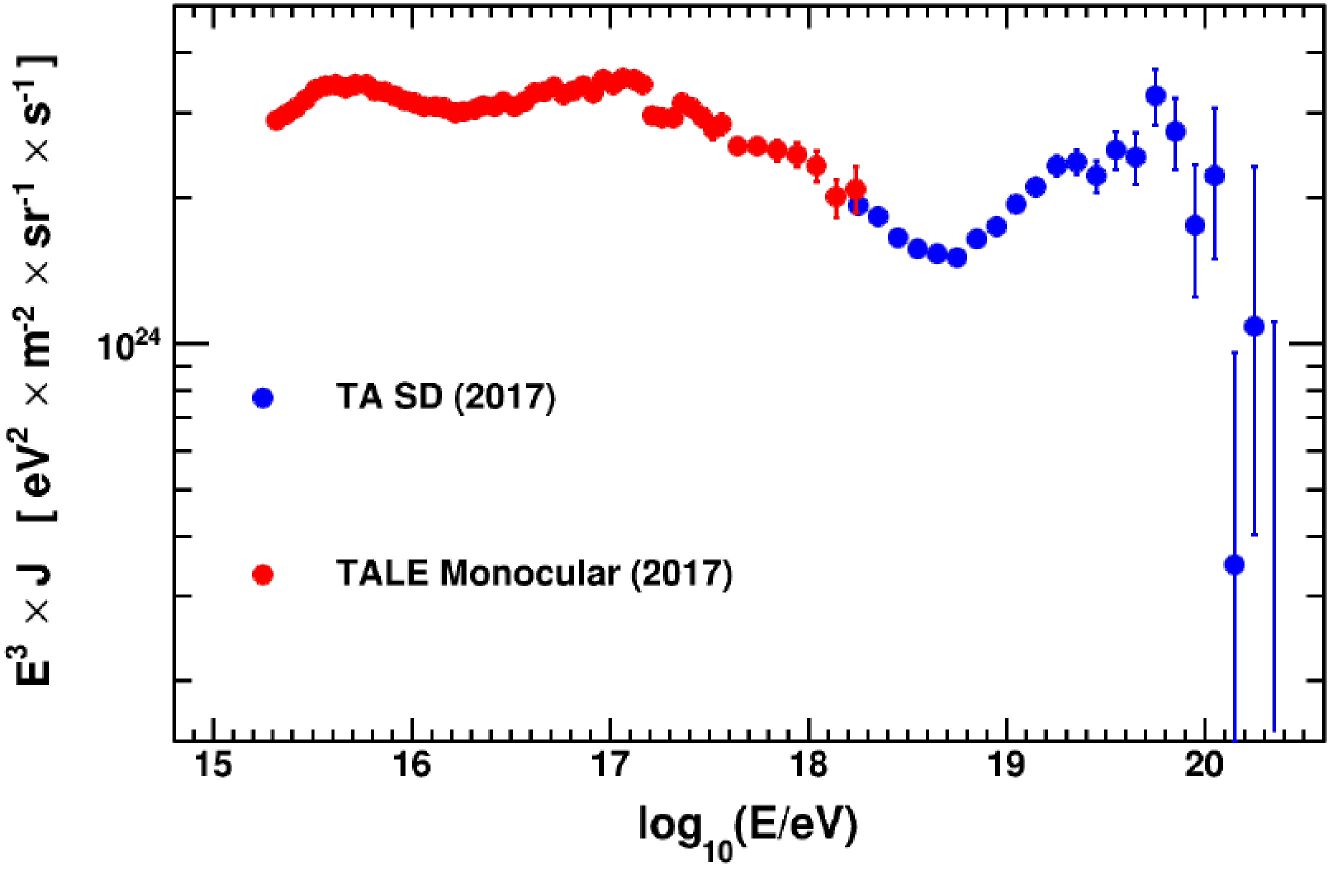
- 高仰角FD 10台+ SD 80台
- SDアレイ: 400m, 600m間隔
- 昨年3月新たにSDを設置
  データ収集を開始
- エネルギー: 10^{16} eV - 10^{18} eV
- 今年9月から新たにハイブリッドトリガーシステムを導入

TALE FD energy spectrum



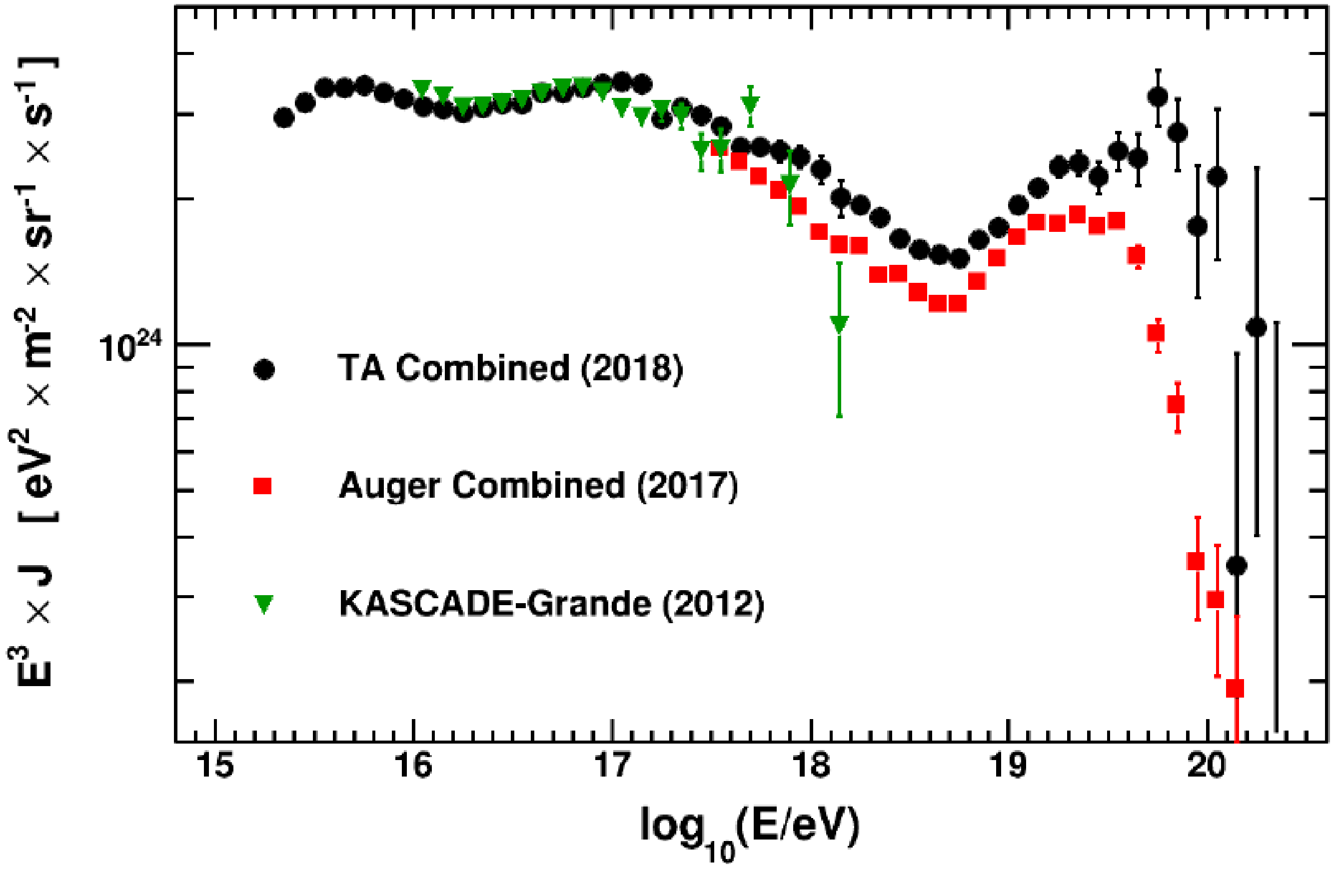
R. Abbasi et al., ApJ, ***865****, 74 (2018)*

TA and TALE energy spectrum



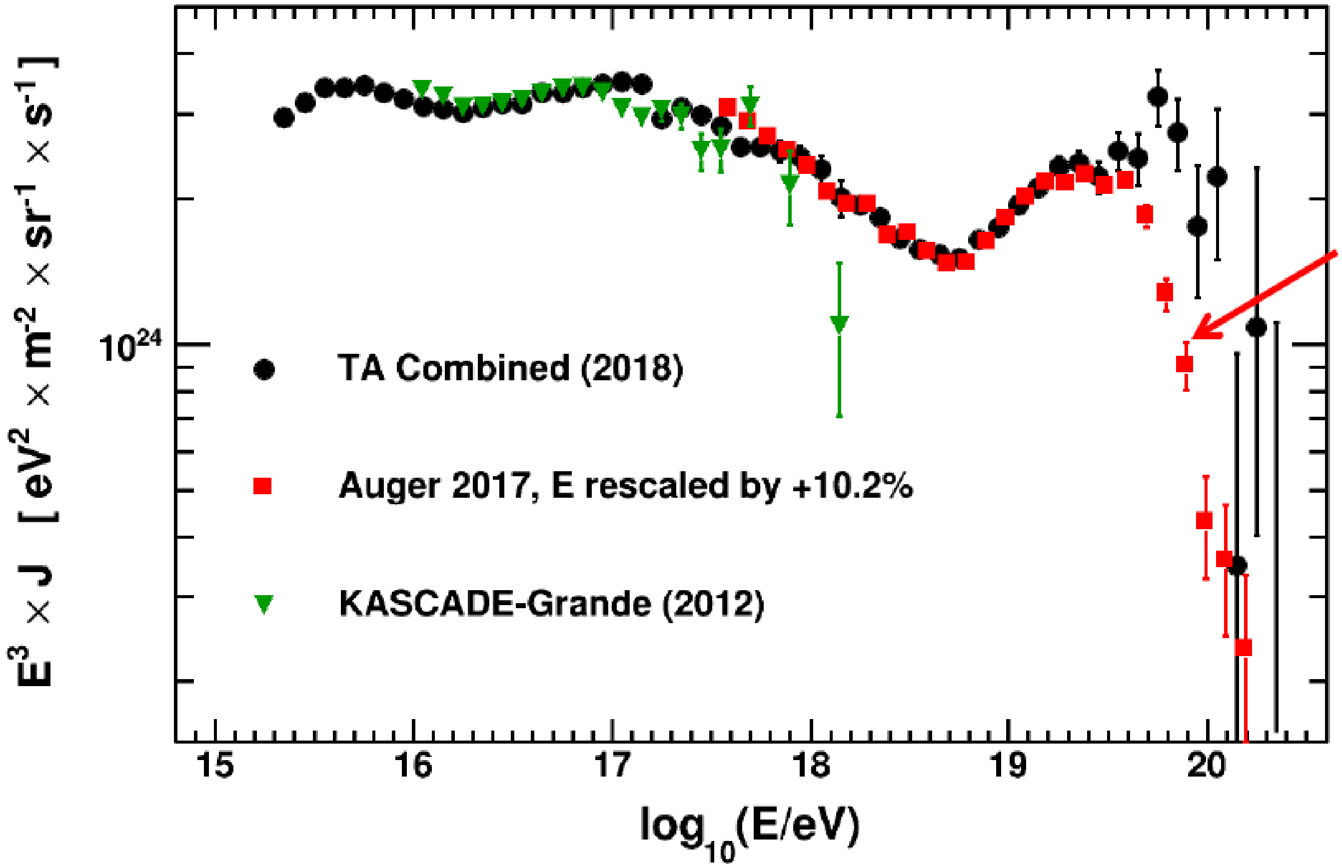
D. Ivanov, UHECR2018

TA, Auger and KASCADE-Grande



D. Ivanov, UHECR2018

TA, Auger and KASCADE-Grande

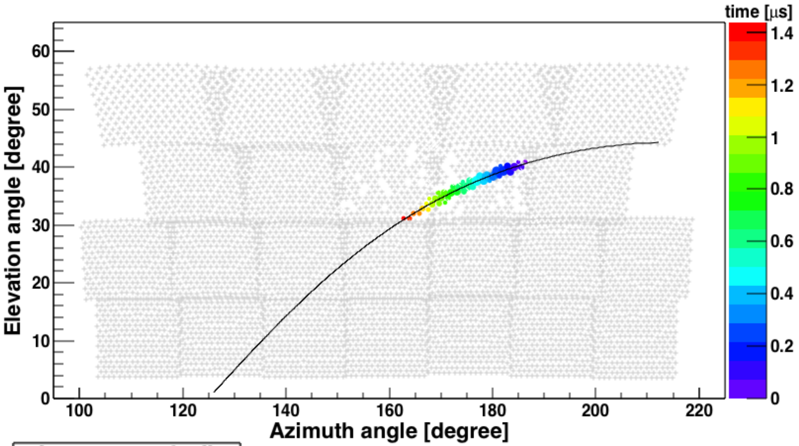


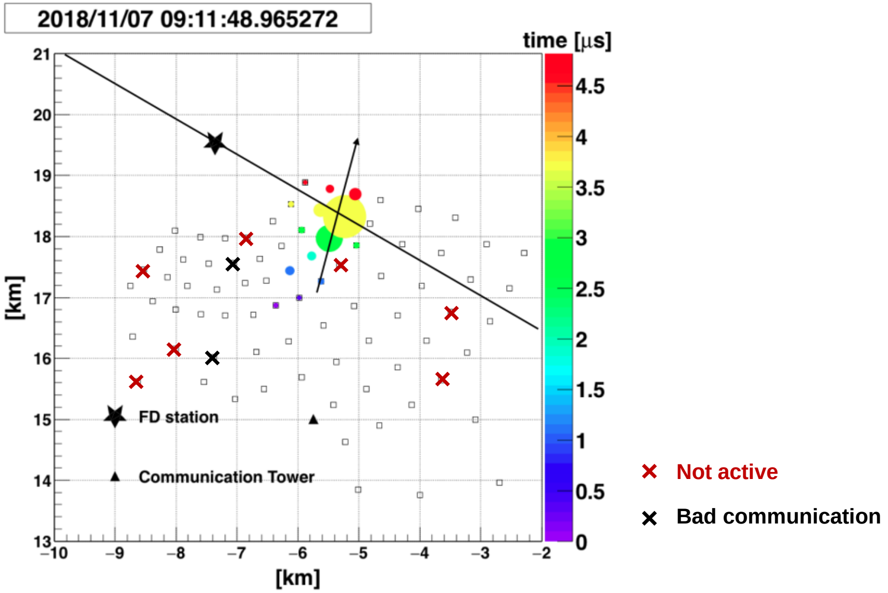
Discrepancy between TA and Auger investigated further

D. Ivanov, UHECR2018

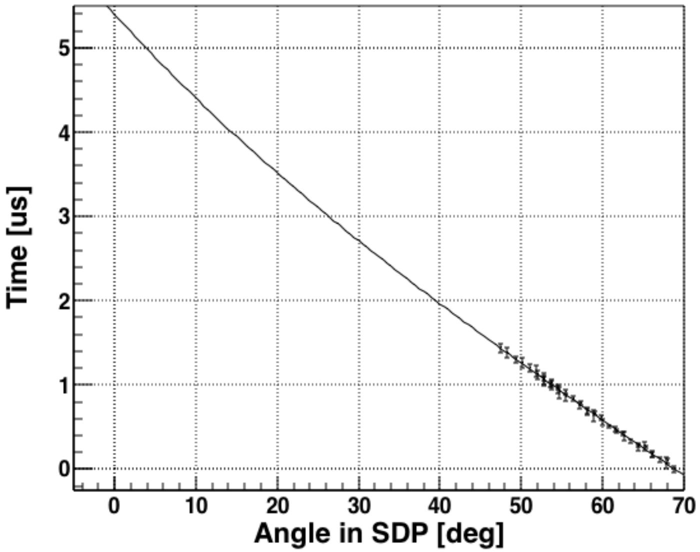
TALE hybrid event 例

No.1 2018/11/07 09:11:48

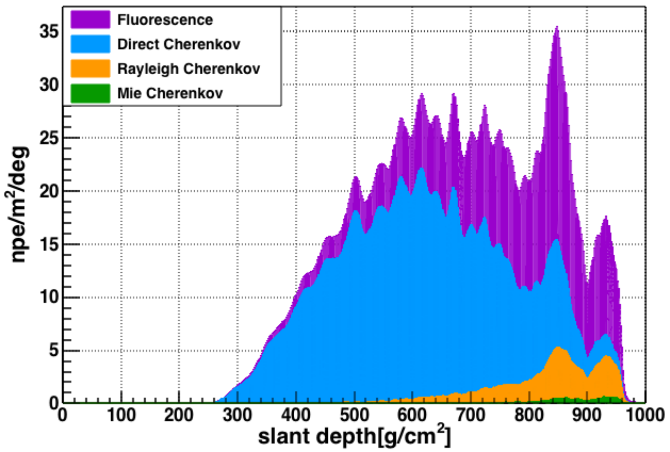




time vs angle fit



shower profile recon.

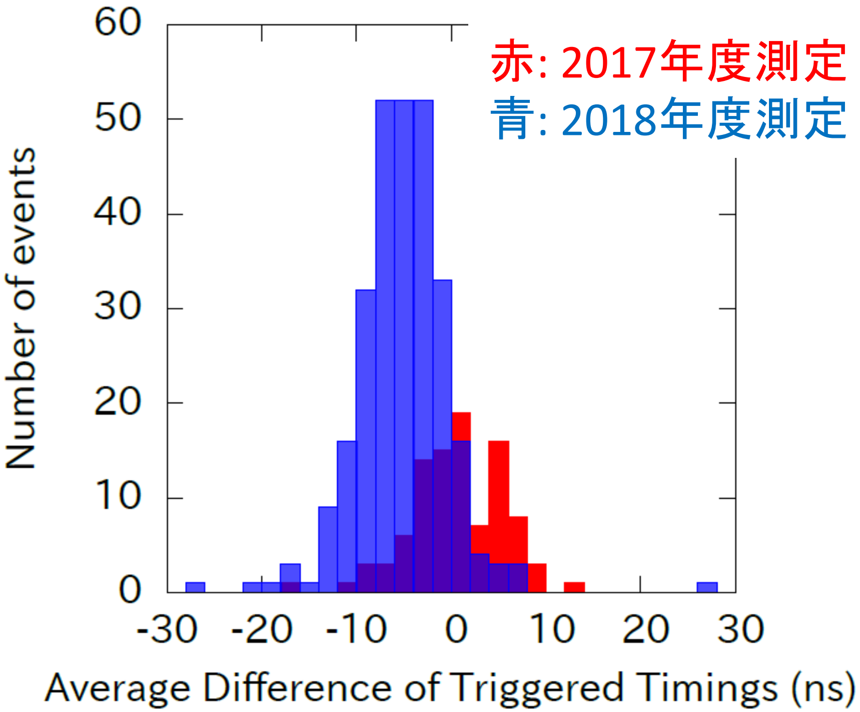


Results	Zen.[deg]	Azi.[deg]	Open angle[deg]	CoreX[km]	CoreY[km]	X_{max}[g/cm^2]	E_0 [eV]
FD	47.0	-162.8	1.8	-5.42	18.41	735	$10^{17.51}$
SD	46.7	-165.2		-5.35	18.39		

TAx4及びTALE実験 地表検出器の時間及び位置の較正(E16)

明野観測所の試験セットアップ

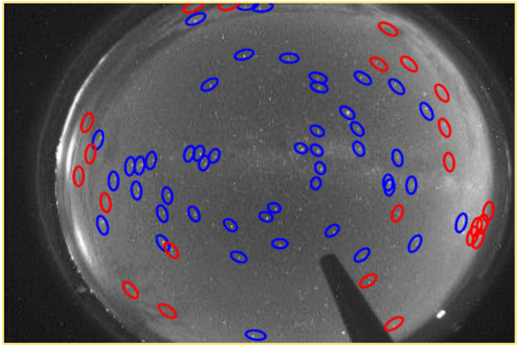
GPSレシーバの1 ppsタイミングの相対的なオフセットの分布



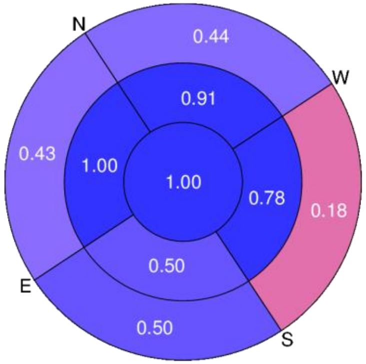
成果:
今後使用する全てのGPSレシーバ378個の1 pps のタイミングのばらつき、オフセットを測定
オフセット: 20 ns以上のものは省いた→問題なし
今後位置の較正を行う予定

大気蛍光望遠鏡の自動観測を目指した夜間雲量測定用CCDカメラの開発と解析(E23)

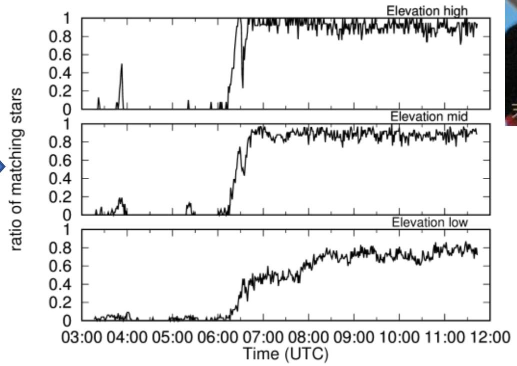
星の検出と有無の判定



方向毎の雲量の推定



雲量推移

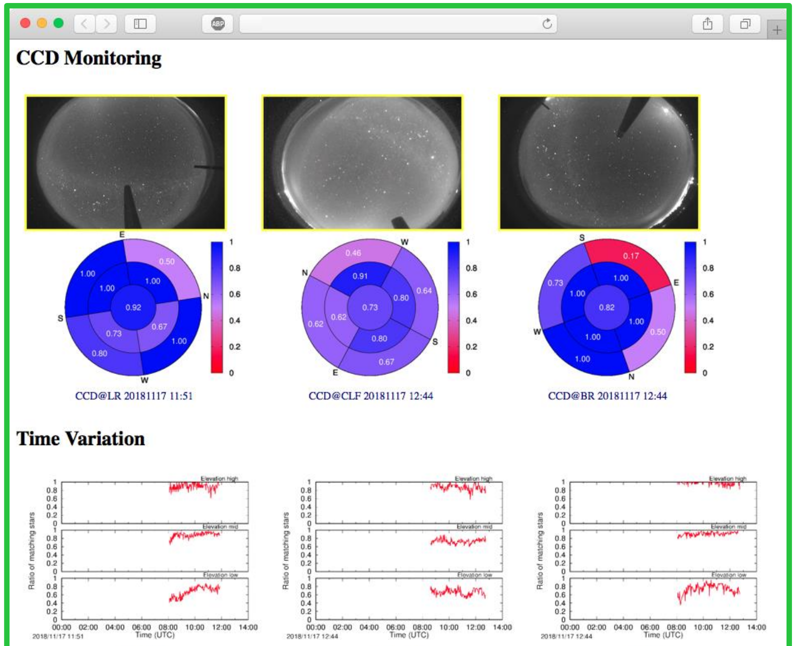


$$R = \frac{N_m}{N_e}$$

R : Clearness
N_m : Num. of matched stars
N_e : Num. of expected stars

毎分の撮影画像から星の有無を判定して方向毎にリアルタイムな雲量を計測
→　**観測モニターへの組み込みを達成**

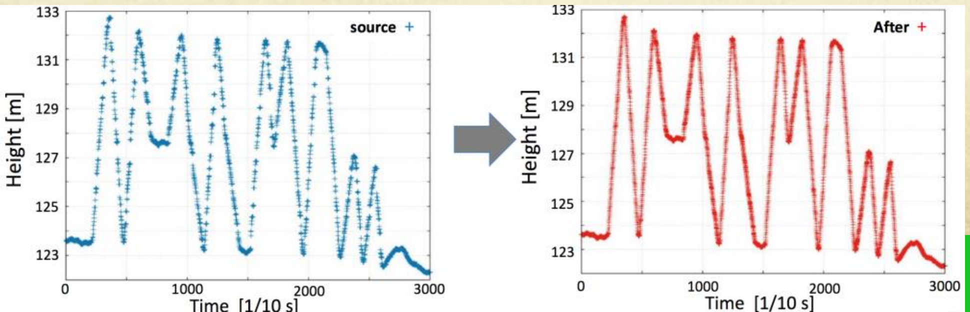
＜次期目標＞
・リアルタイム情報による観測の制御
→　大気蛍光望遠鏡の**完全自律稼働**



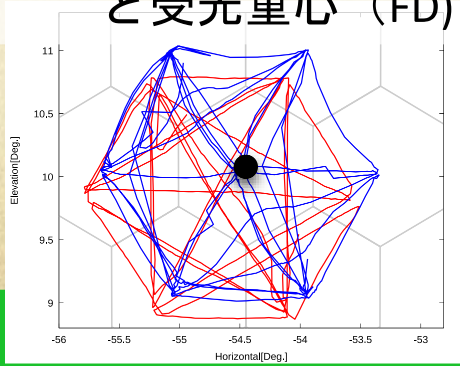
リアルタイム雲量モニター(HTML)

飛行型 望遠鏡 調整光源(E22)

GPSによるドローン位置情報の補間



光源位置（GPS）
と受光重心（FD）



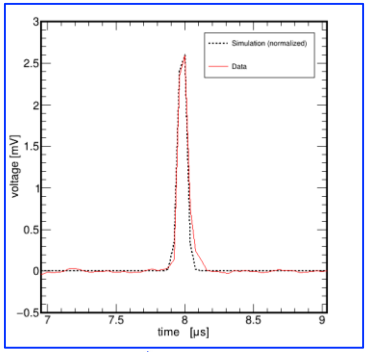
その他TA関連実験の成果
(E15, E18, E20,E25)

最高エネルギー宇宙線の電波的観測の研究(E18)

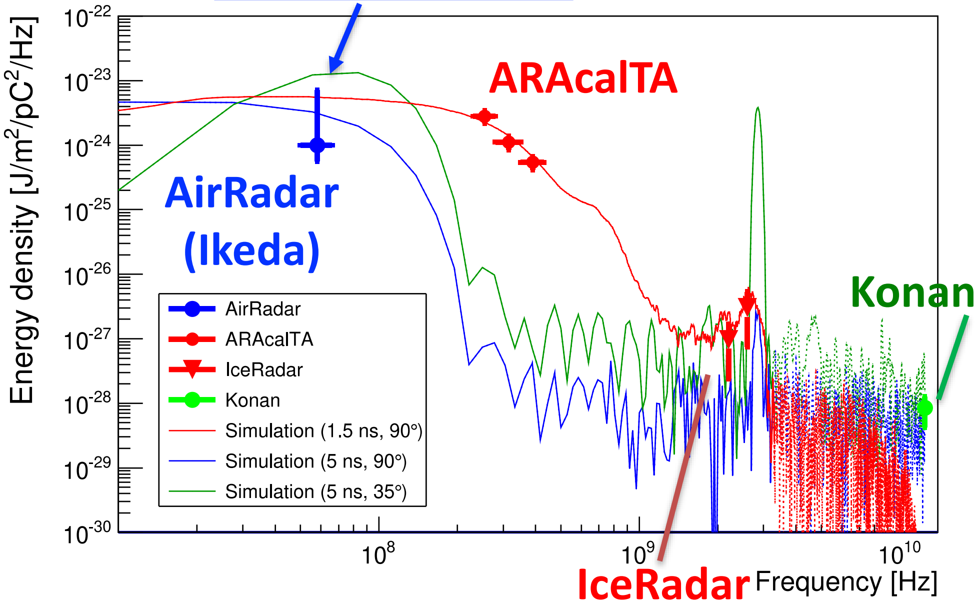
電子ビームから発生した電波信号
に関する研究

- 電子加速器(ELS)を用いた50MHz帯電波エコー信号を測定中、(電波エコーではない)電子ビームに起因する信号を検出
- その後、同ビームを用いて千葉大(300MHz帯)、Krijnら(2GHz帯)、甲南大(12GHz帯)の測定が行われ、全ての実験で同様の電波信号を検出
- 4つのグループで共同研究を行ない、この信号を理解した
  - 電子が視野内に現れた際に生じる電波(**Sudden appearance**)で、Coherentな遷移放射の特殊なケース
  - Geant4で電子ビームを再現し、本モデルで電波を発生させたシミュレーション結果は、50MHz～12GHzの広い周波数帯で測定結果を良く説明する
  - 空気シャワーが地面と衝突した際や、媒質を跨いだ場合(氷等)にも発生するはずで、高エネルギーの宇宙線やニュートリノの新たな測定手法として使える可能性がある

論文は11月末にacceptされた (PRD)



50MHz帯測定波形(黒)と下記シミュレーションから得られた波形(赤)の比較



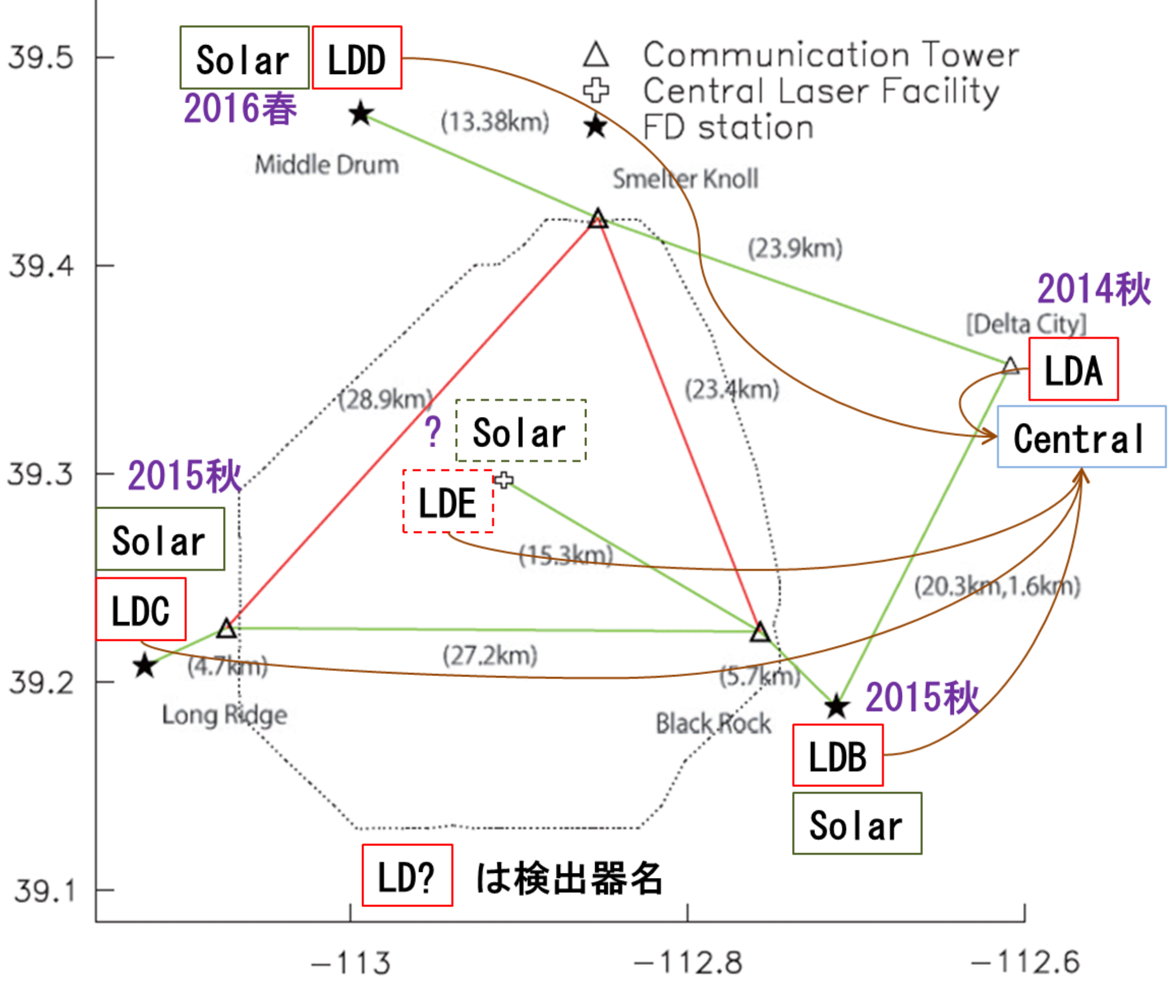
50MHz – 12GHzのSudden appearance信号の測定値とモデル予測値の比較。点が測定値、線がモデル予測値に対応していて、同色の点と線が比較するべき物(実験ごとにコンフィグレーションが違うので、それぞれ予測値を計算している)

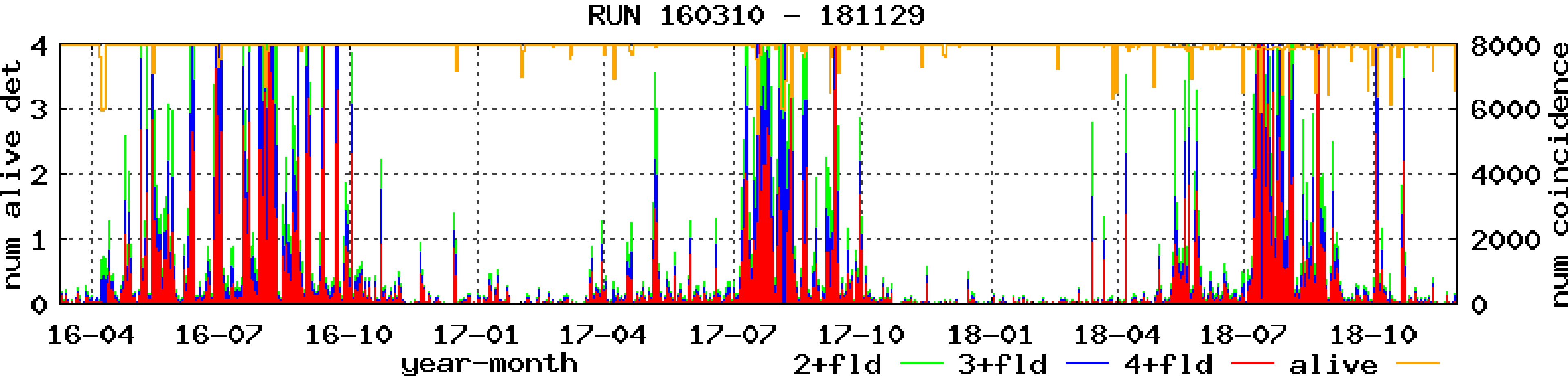
TA地表粒子検出器による雷と関連する特異事象観測(E20)

雷放電検出時刻のみで放電位置を常に一意に決定するために必要な4台目の検出器を設置した2016年春以降、リモートで安定した観測を行っている。

放電検出の閾値を低く設定しているため、データ取得が溢れる場合があるが、自動的にデータ取得を再開する機能を2018年に追加した。

雷事象の解析作業中。





TA実験サイトでの地表検出器 R&D (E25)

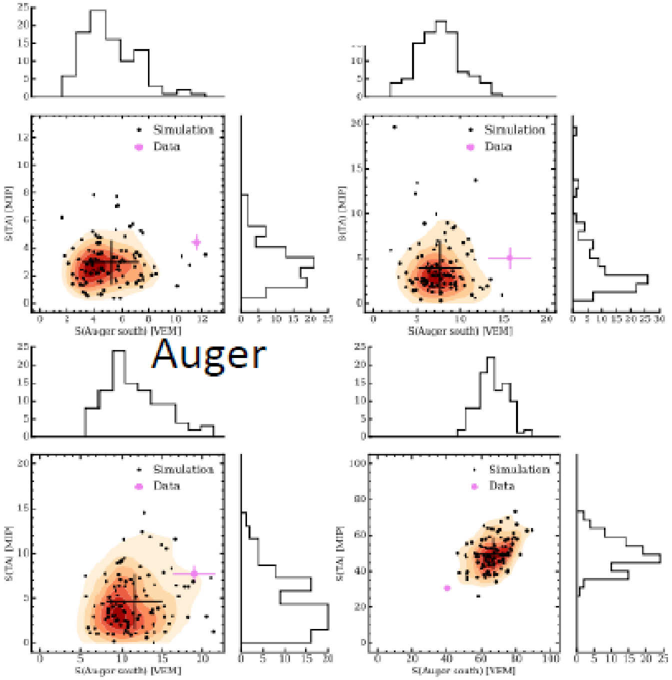


Figure 4: The MIP vs VEM plane for simulated and observed integrated signals. Top left: event 2, top right: event 3, bottom left: event 4, bottom right: event 5. The MIP and VEM simulation populations are also shown in the histograms. The energies are given in terms of the TA FD scale, and the azimuth follows the TA convention.

TAとAugerでの複合装置での観測
TA SD と同期したイベントの取得 (2013- 継続)

- **TAアレイからのトリガー配信モジュール作成**
  - **TCP/IP接続 TAサイトでの他の測定でも利用可能。**
  - **Auger水タンクの信号閾値を南Augerと同じ設定で運用可能に**

- **ミュー粒子検出器 でのデータ取得**
  - **→ 新しいデータ取得システムの製作**

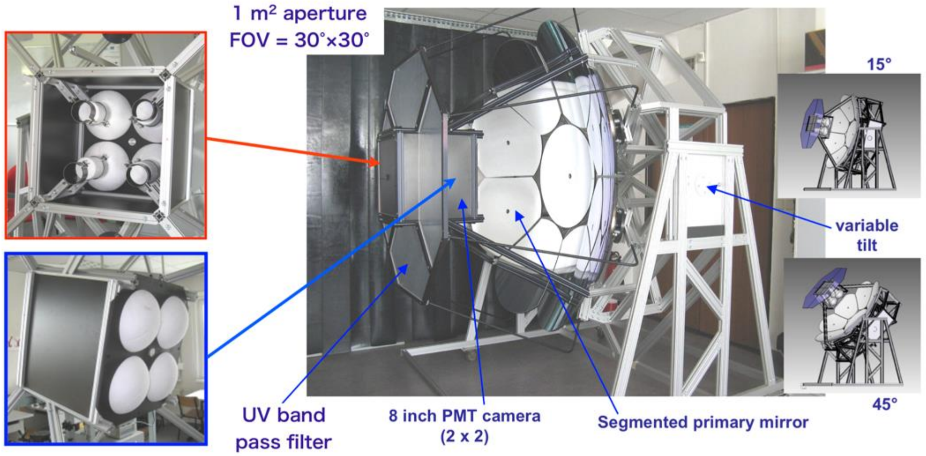
(データ解析)

- **TA実験で再構成された CLF近傍2kmのシャワーイベントに対して、AugerSDとの間で信号量の比較**
  (Sean.P Quinn Case Western Univ)

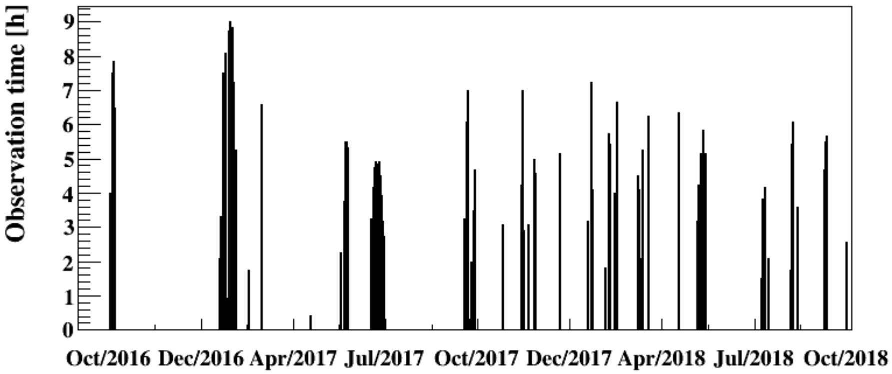
- **左の図は最初の4イベントについて、100EventのMCによる分布と実データの比較。**

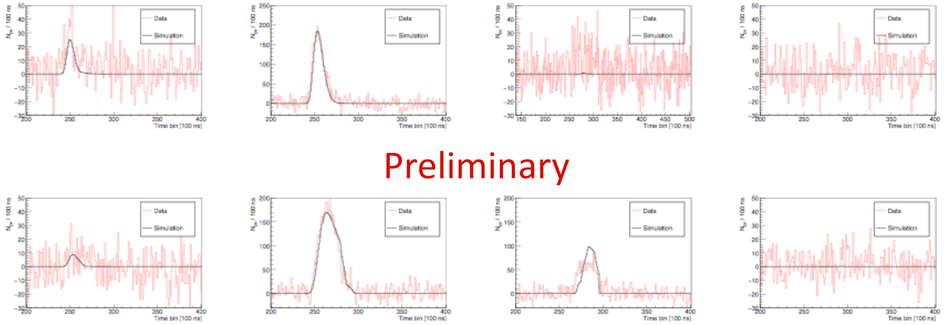
Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes

TA実験サイトでの新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線観測 (E15)



425 hours observation





Reconstruction result: Energy 17.3±0.7 EeV, Xmax: 842±10 g/cm²

まとめ

- TA実験で異方性の兆候が観測されている
  - TA SD 10年間の観測データ→ホットスポット **~3σ**
  - エネルギースペクトルの到来方向による違い
    - 超銀河面から30度以内と30度以上の領域 (TA SD 5年間のデータ): **3.2σ**
    - 赤緯 24.8度以上、24.8度以下(TA SD 7年間のデータ): **3.5σ**
    - ホットスポット付近の$10^{19.2}$ eV以上のスペクトルの形状(TA SD 7年間のデータ): **3.74σ**
- TAx4実験の検出器を現在建設中
  - SD: 半分以上のSDを**来年1月から設置開始**
  - FD: 北側のFDステーションで**ファーストライト観測**、南側FDステーション建設中
- TALE実験
  - エネルギースペクトルの単眼解析結果を発表
  - 新たにハイブリッドトリガーを導入
- 他にも電波，雷，TA&Auger複合装置，FAST実験の研究開発が進行中

- ご支援どうもありがとうございました。
  今後ともよろしくお願い申し上げます。