

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 野中敏幸

For Telescope Array Collaboration

今年度採択されている課題

課題名	申請者	研究費 (千円)
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
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	775
T A 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	550
T A × 4 及び T A L E 実験 地表検出器の時間及び位置の較正	木戸英治	550
T A 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	500
T A L E 実験用地表検出器の開発と性能試験	荻尾彰一	450
最高エネルギー宇宙線の電波的観測の研究	池田大輔	450
ラジコンヘリコプターによる T A 大気蛍光望遠鏡キャリブレーション	多米田裕一郎	250
T A 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	有働慈治	250
大気蛍光望遠鏡の較正のための大気透明度計測	中村亨	1000
大気蛍光望遠鏡の自動観測を目指した夜間雲量測定用 C C D カメラの開発と解析	富田孝幸	950

今年度これまでの主な用途

旅費

電源架台の製作, PMT較正装置のための窒素ガス

温度ロガー等、資材の輸送 梱包費などに使用

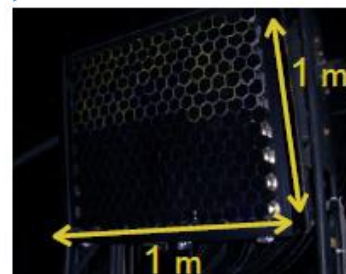
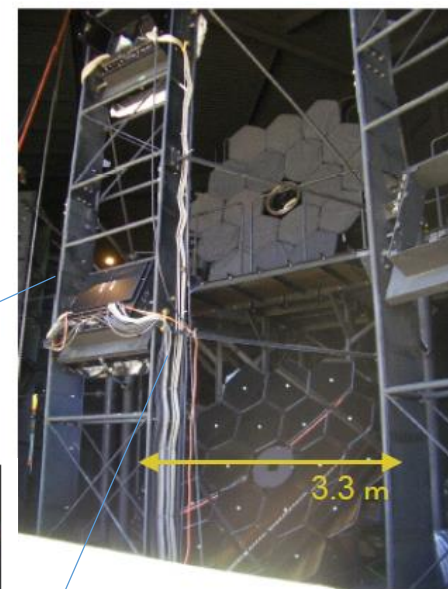
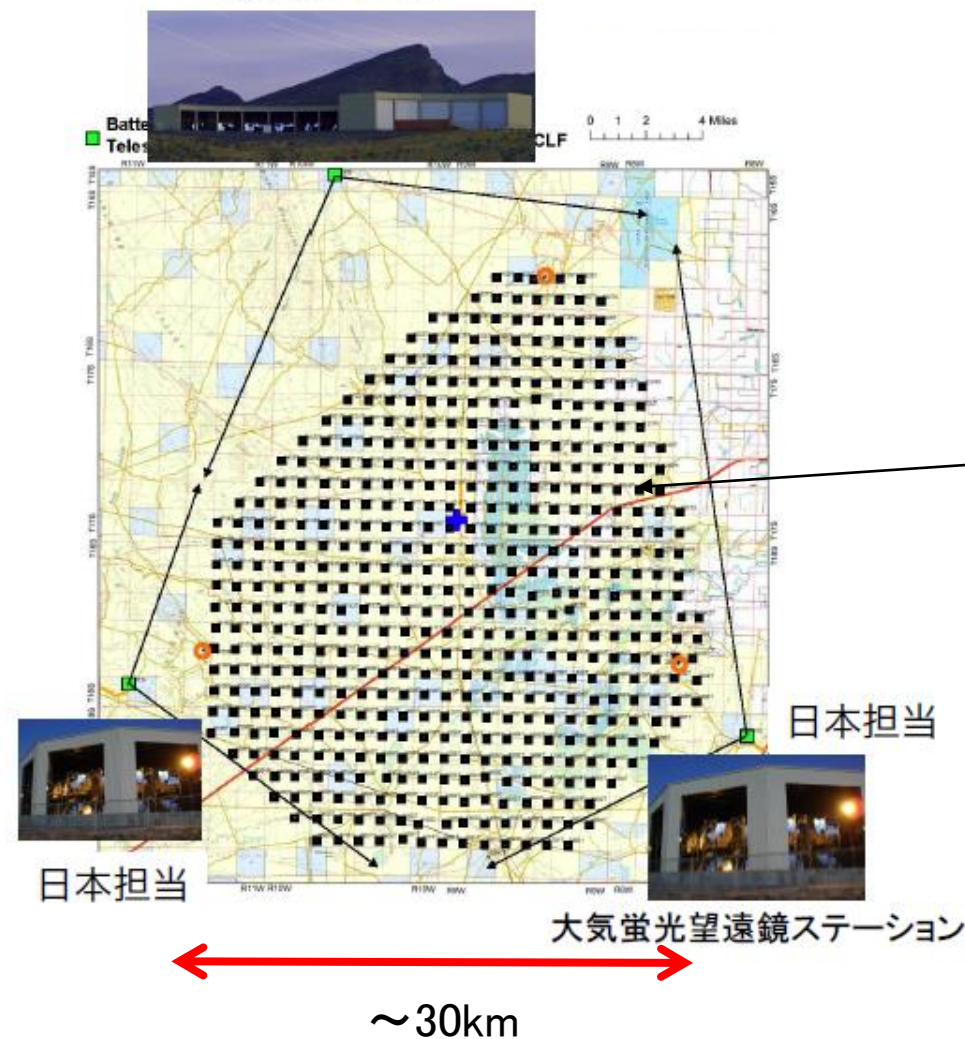
11件 合計 6625千円

ご支援ありがとうございます。

Telescope Array実験

アメリカ ユタ州 デルタ市
N39, W129 1450m asl
HiRes 移設

- $10^{17} \text{eV} - 10^{20} \text{eV}$ の宇宙線観測
- 大気蛍光望遠鏡 x 3 地点
- 地表検出器 507 台 1.2km 間隔
- 約700km²
- 2008年- Hybrid 観測
地表検出器 (3m²)



PMT | 1カメラ256本
HAMAMATSU R9508
12カメラ/ステーション

Telescope Array Collaboration

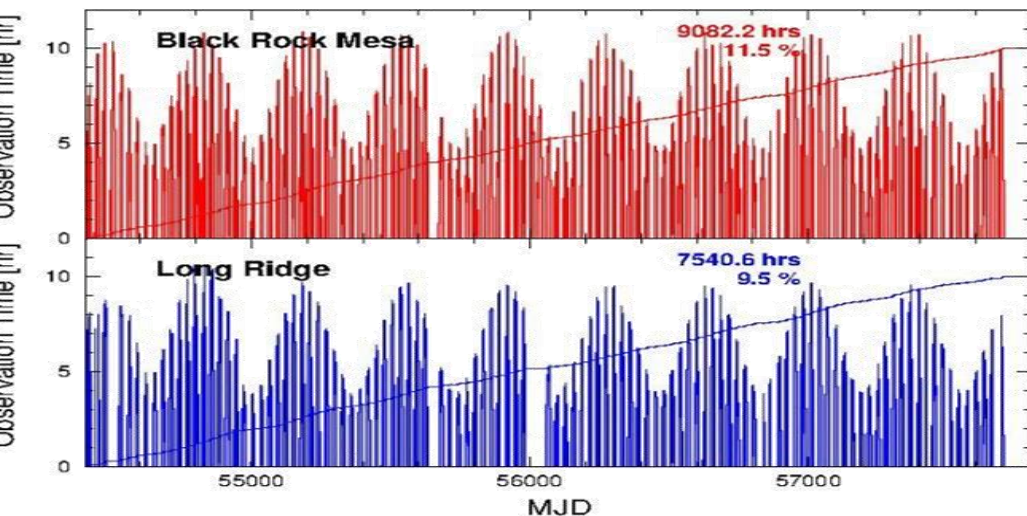
約130名の共同研究者

R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, T. Fujii, M. Fukushima, T. Goto, W. Hanlon, Y. Hayashi, M. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D. Ivanov, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, S. Kishigami, S. Kitamura, Y. Kitamura, Y. J. Kwon, J. Lan, B. Lubsandorzhiev, J. P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuda, T. Matsuyama, J. N. Matthews, M. Minamino, K. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, T. Nakamura, T. Nonaka, A. Nozato, S. Ogio, J. Ogura, M. Ohnishi, H. Ohoka, K. Oki, T. Okuda, M. Ono, R. Onogi, A. Oshima, S. Ozawa, H. Park, M. S. Pshirkov, D. C. Rodriguez, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, K. Saito, Y. Saito, N. Sakaki, N. Sakurai, L. M. Scott, K. Sekino, P. D. Shah, T. Shibata, F. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, H. S. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, T. Suzawa, Y. Takahashi, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, M. Tanaka, K. Tanaka, H. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, T. Wong, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, R. Zollinger, Z. Zundel

35機関 6力国 の参加

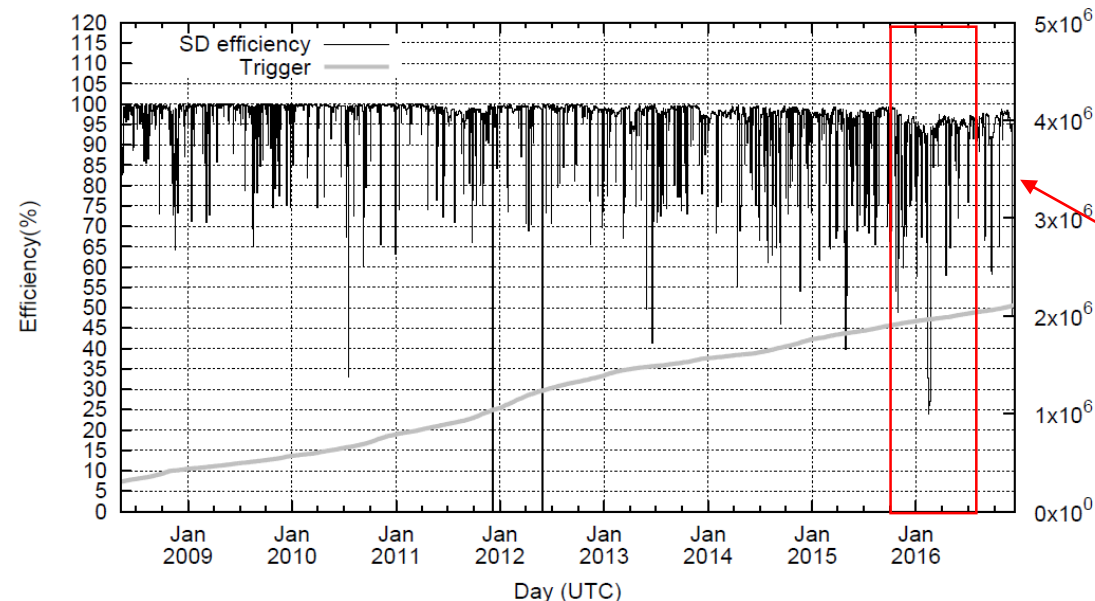
University of Utah Saitama University, Tokyo Institute of Technology, Hanyang University, Tokyo University of Science Kinki University
University of Tokyo Todai Institutes for Advanced Study Osaka City University Shinshu University Kanagawa University University of Yamanashi
RIKEN Tokyo City University Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences Waseda University Chiba University
School of Natural Sciences Yonsei University KEK Kochi University Ritsumeikan University Sungkyunkwan University Moscow M.V. Lomonosov
State University Shinshu University Rutgers University University of Tokyo Hiroshima City University Universit Libre de Bruxelles
National Institute of Radiological Science National Institute of Chemical Physics and Biophysics Ewha Womans University Ehime University

稼働状況 (SD8.5年間,FD 9年間)



FD 稼働率(%)

- 平均稼働率 ~11%(BR)
10%(LR)
- 主な停止原因
- 天候 発電機トラブル



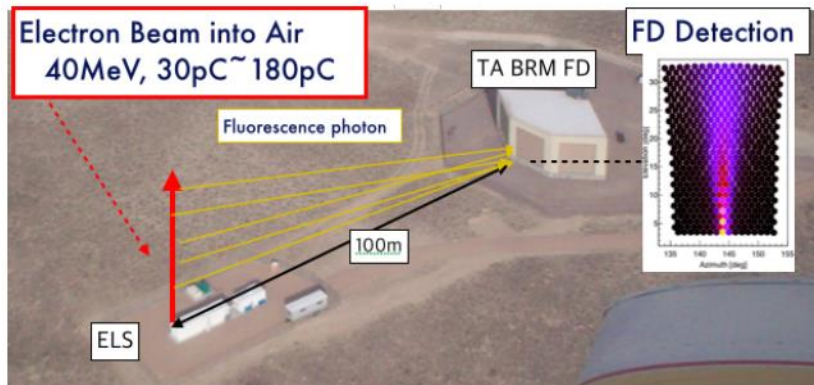
SD 稼働率(%)

- 平均稼働率 ~95%
- 8年目稼働率 約 88%
 - 通信塔の電源交換
 - 北側領域での通信不良 (2015/11-2016/3)
- MCでの再現性の確認

大きな不具合無く、安定に稼働

稼働状況 (ELS・大気・雲モニター)

小型線形加速器による大気蛍光の絶対較正 Electron Light Source (ELS)

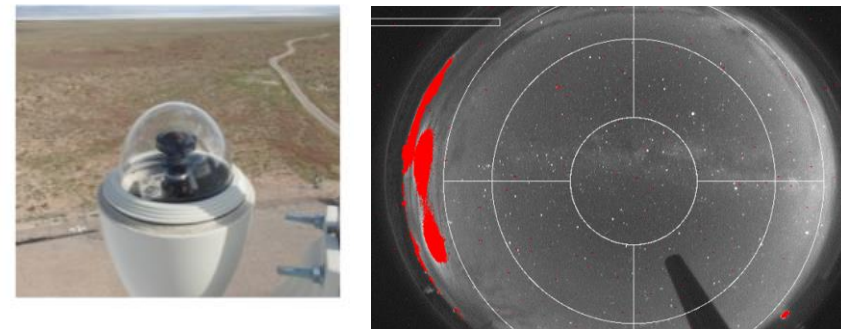


大気中に 40MeVの電子ビームを射出し大気蛍光効率を測定する

運転状況

- ELSビームを用いた 電波観測
- これまでの観測は 気温 $-5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ の大気
2016 年5月 21°C 付近でデータ取得
(高温では蛍光効率の湿度依存性が大きい)

夜間雲量測定用 CCD カメラの開発



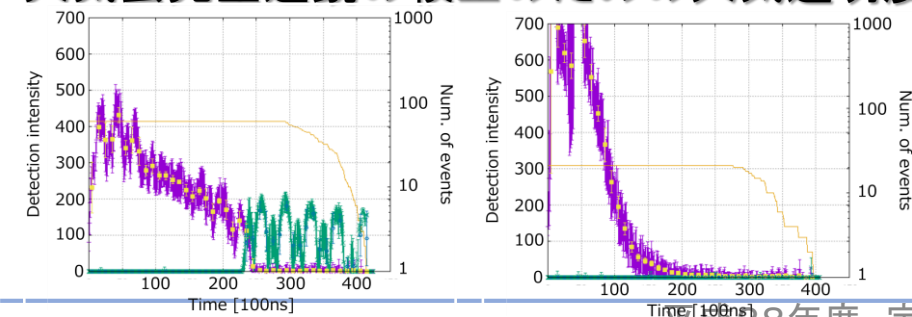
CCD 雲モニター

全天をCCDで撮影し天候を評価

運転状況

- BR, LR, CLF で安定して運転
- 画像の星の数をカウントして雲量を評価する
アルゴリズムを開発 ライダー計測と整合
→ 運用方針検討中

大気蛍光望遠鏡の較正のための大気透明度計測

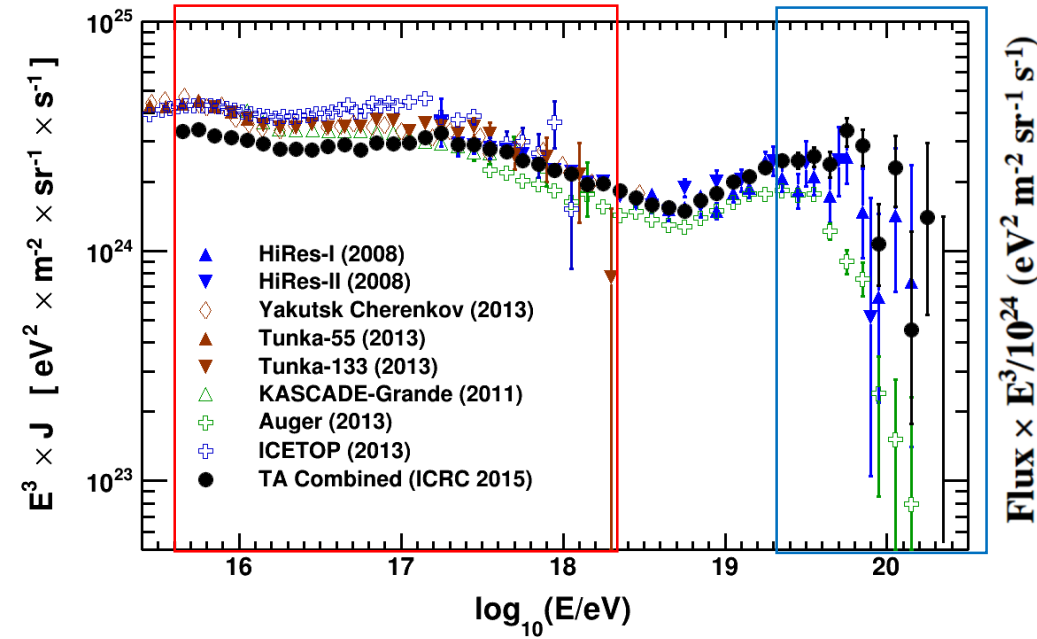


CLF 観測

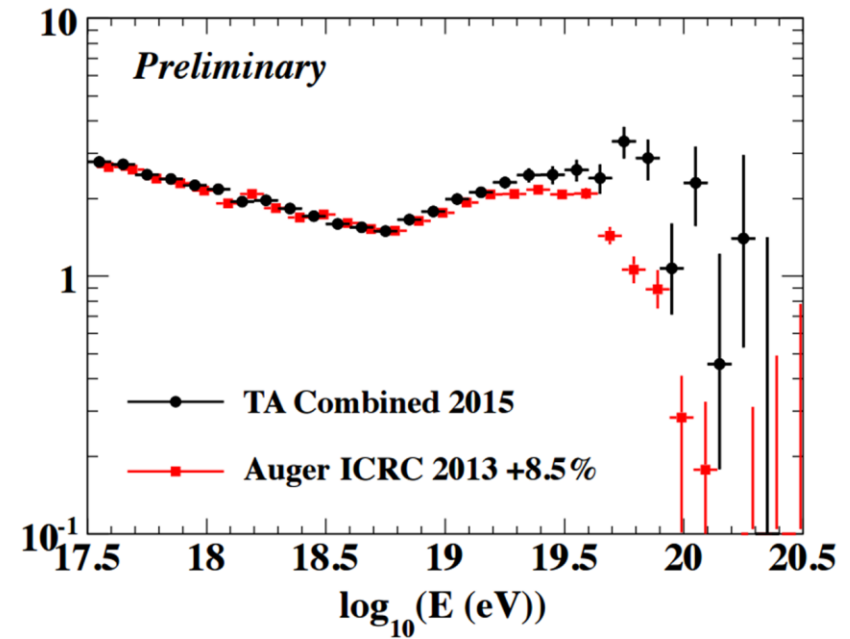
- CLFから射出されるレーザーを用いて大気透明度測定

TA+TALE(FD)エネルギースペクトル

スペクトル全体 他の実験と比較



高エネルギー側 Auger(南半球と比較)



スペクトル

- TA+TALE(FD) で $10^{15.6} - 10^{20.3}$ eV) の範囲のスペクトルを測定
- スペクトルには4箇所の構造: “low energy ankle” @ $10^{16.34}$ eV “2nd Knee” @ $10^{17.3}$ eV
“Ankle” @ $10^{18.72}$ eV “Suppression” @ $10^{19.8}$ eV
- $E > 10^{19.3}$ eV 以上でAuger実験と形状が異なる。

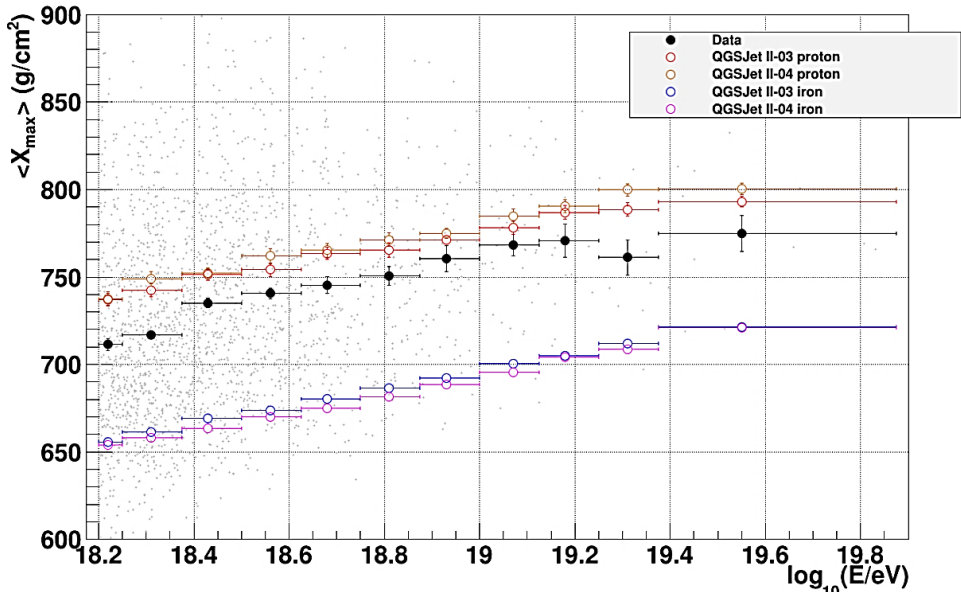
拡張計画



TALE hybrid
TAx4

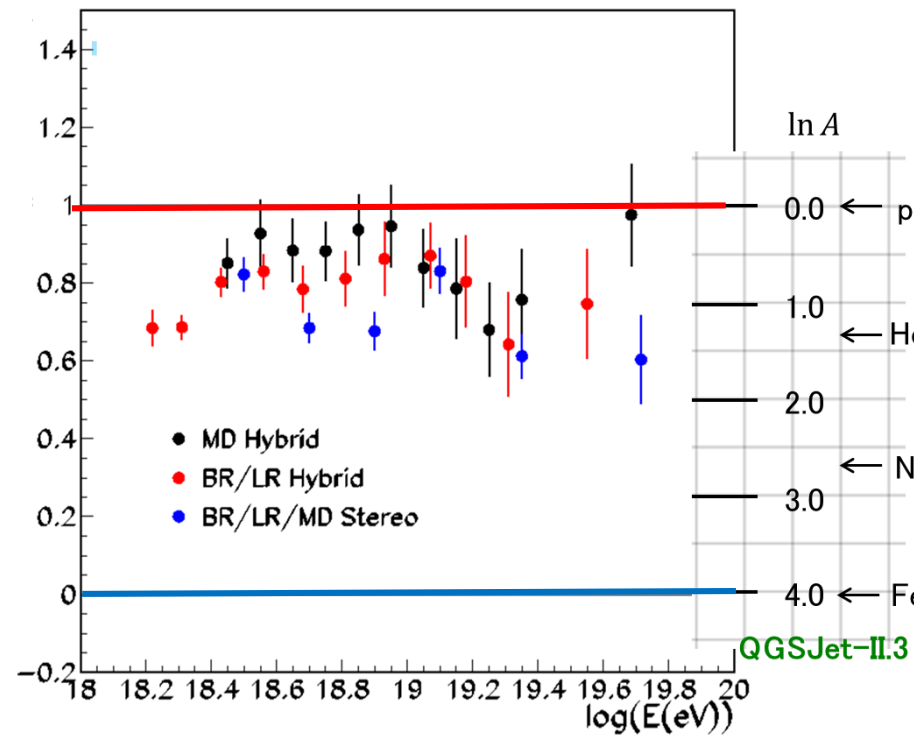
化学組成 (X_{\max})

Red: Proton
Blue: Iron



ICRC2015 [906 -PoS 362]
Daisuke IKEDA, Dr. William HANLON

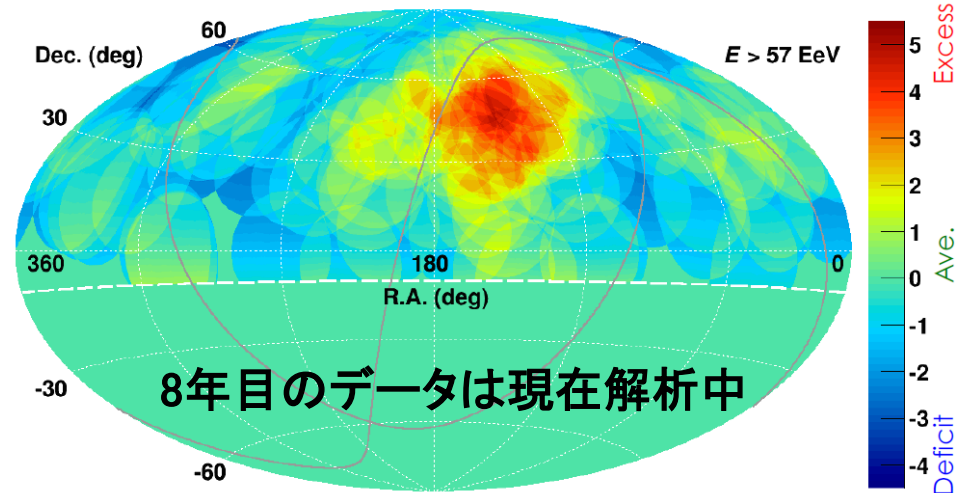
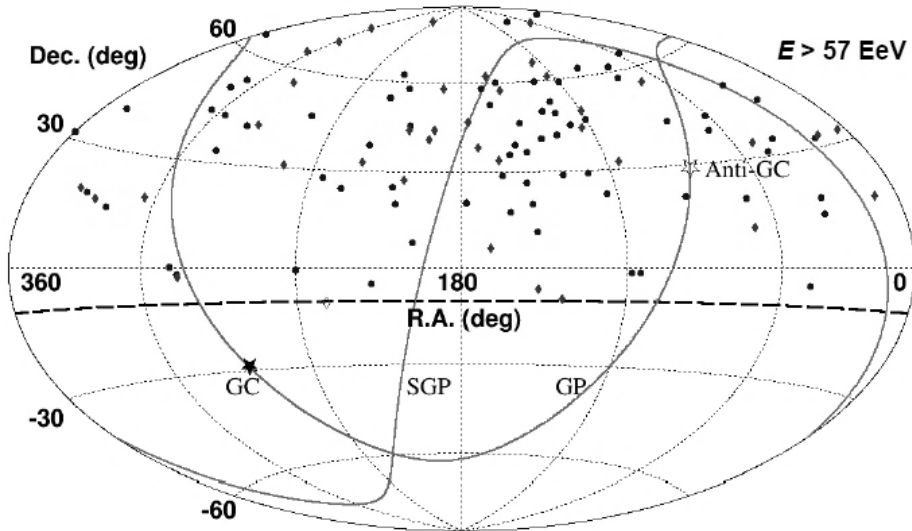
$$\frac{(\text{Data}X_{\max} - \text{Iron}X_{\max})}{(\text{Proton}X_{\max} - \text{Iron}X_{\max})}$$



- 平均 X_{\max} はLight Composition
- 複数の望遠鏡(3ステーション、2タイプの望遠鏡) 2タイプの再構成

異方性 (57EeV)

5.7x10¹⁹eV 以上のエネルギーの宇宙線の到来方向



K.Kawata ICRC2015, PoS414
Rotational coordinate

- 20° の範囲内にあるイベント
- Loose cut data, 7 年 E>57EeV 天頂角 <55° total 109 events
- Nobs = 24 events Nbg = 6.88 events → 5.1 σ (Li-Ma)
- 偶然確率 0.037 % 3.4 σ (post-trial) (15, 20, 25, 30, 35 (deg.) radius circles are searched.)
- ApJL 790, L21 (2014) 5年データ : 3.4 σ

発表論文(2016)

銀河面からの異方性の大きさから銀河起源 10^{18} eV陽子の上限値:

Search for EeV protons of galactic origin, Astroparticle Physics, Volume 86, January 2017, Pages 21-26, ISSN 0927-6505,

レーダー法による空気シャワーからの反射測定によるRadar Cross Sectionの上限値:

"First Upper Limits on the Radar Cross Section of Cosmic-Ray Induced Extensive Air Showers", Astroparticle Physics 87 (2017)
p1-17. DOI information: 10.1016/j.astropartphys.2016.11.006

FD単眼解析による $10^{17.2}$ eV 以上の宇宙線スペクトル:

"The energy spectrum of cosmic rays above $10^{17.2}$ eV measured by the fluorescence detectors of the Telescope Array experiment in seven years"
Astroparticle Physics, Volume 80, July 2016, Pages 131-140

(他 スペクトルの異方性、Auger-TA WGからの論文など準備中)

執筆中 博士論文*

Study of muons from ultra-high energy cosmic ray air showers measured with the Telescope Array experiment

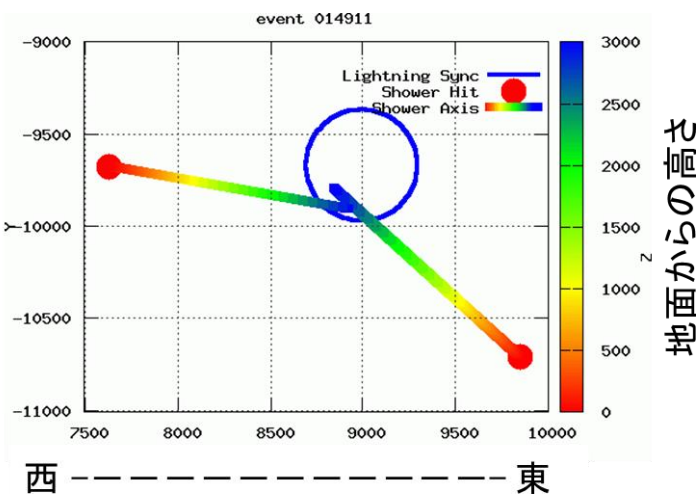
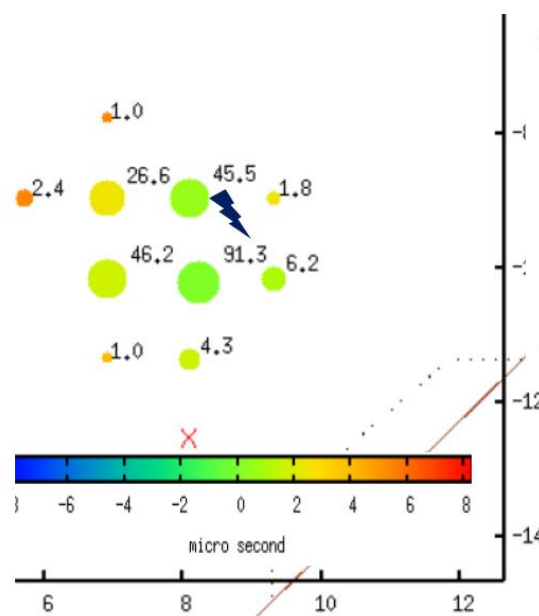
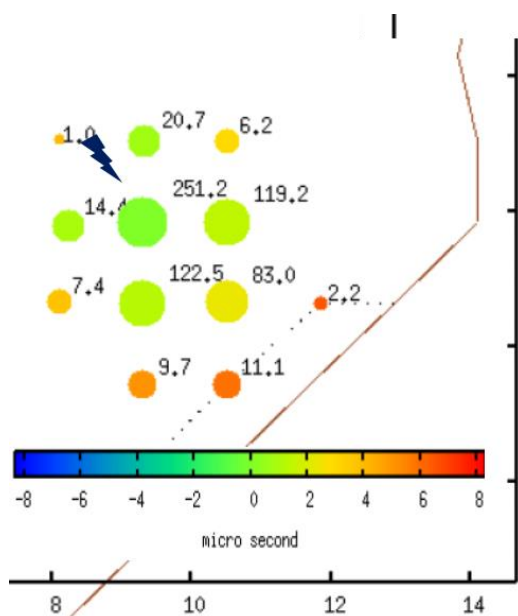
(テレスコープアレイ実験による極高エネルギー宇宙線空気シャワー中のミュオンの研究)
武石 (ICRR)

TASDでの雷と関連する特異事象観測

- SDアレイトリガーが1ms以内に3回以上 → **トリガーバースト**
- 5年間のデータから10個のバーストイベントを検出（偶然期待値 $< 10^{-4}$ 回）
- 北米雷探知網(NLDN)で記録されている放電と時間・位置ともに相関。
- バーストトリガー中のイベントを再構成すると、シャワー軸は概ね発雷位置を通る

date	time	usec	X[m]	Y[m]
AS 120706	014911	184219	9847	-10702
AS 120706	014911	184307	7635	-9674
LG 120706	014911	184122	8997	-9670

赤: SDで記録されたトリガー時刻と再構成コア位置
 青: NLDNで記録された発雷時刻と位置

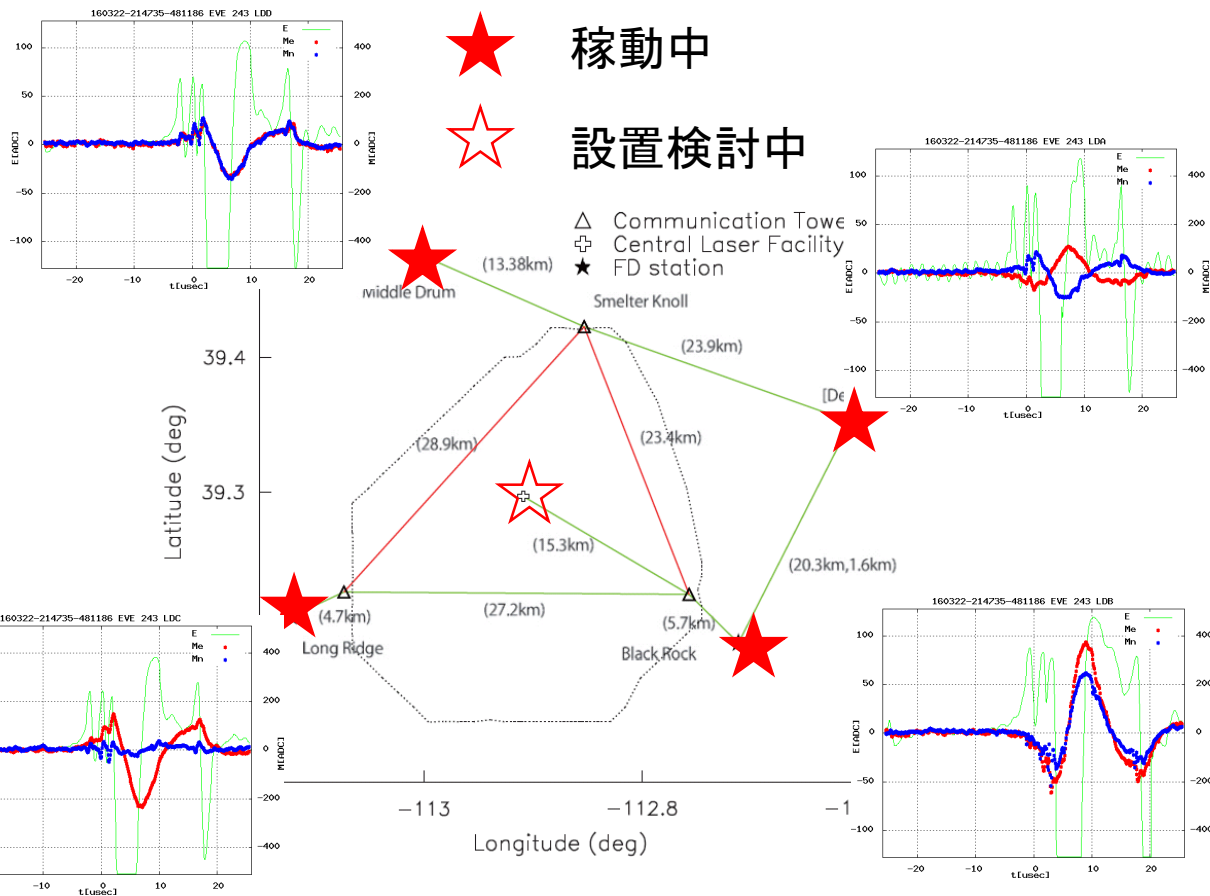


雷雲からの放射がトリガーバーストを起していると思われる。

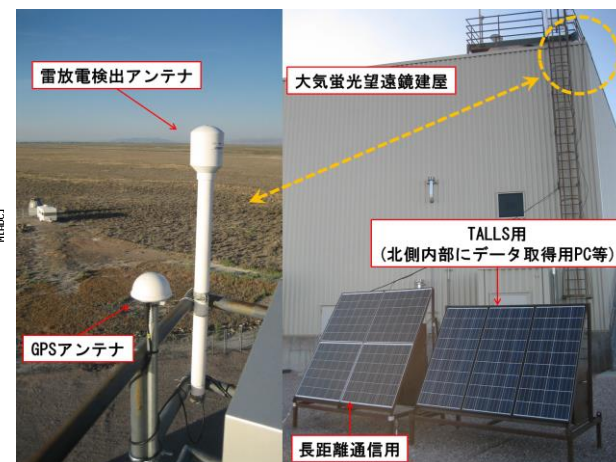
TASDでの雷と関連する特異事象観測

雷放電とバースト粒子の関係をより高統計で調べるため
サイト内に雷位置検出システムを構築

発雷からの電波のタイミングと方位を測定 観測例



太陽電池で連続稼働
現在4地点に設置,稼働中



2016年
システムのインストール
安定に測定を継続

データ解析を進めている

拡張計画

TAx4 : 高エネルギー拡張

TALE : 低エネルギー拡張

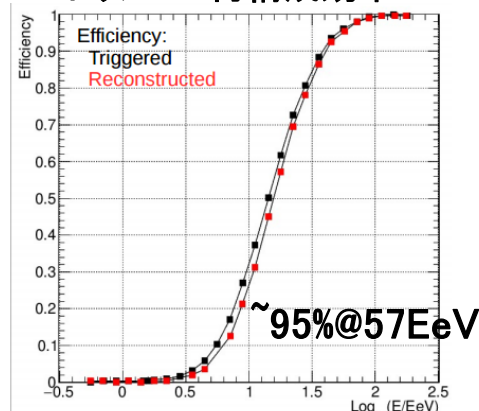
TAx4 拡張計画

既存TAアレイの南北2領域に2.08 km 間隔で新規SDを追加。
TA地表アレイとあわせて、合計3000 km² の観測面積 (~Auger) の面積で観測

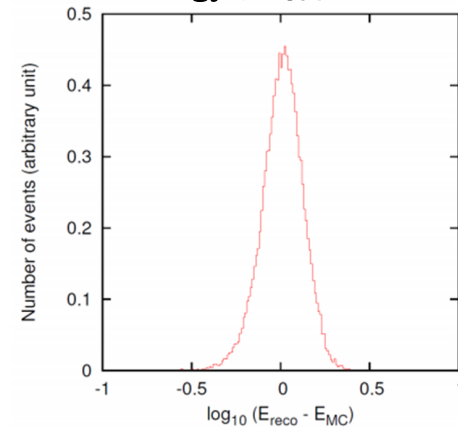
北半球の異方性の精査観測
エネルギースペクトルの詳細な測定
質量組成の特定

- HiRes II 望遠鏡を移設 ハイブリッド観測
- 広い検出器間隔 エネルギー分解能
- 角度分解能 ~2.2度

トリガー・再構成効率

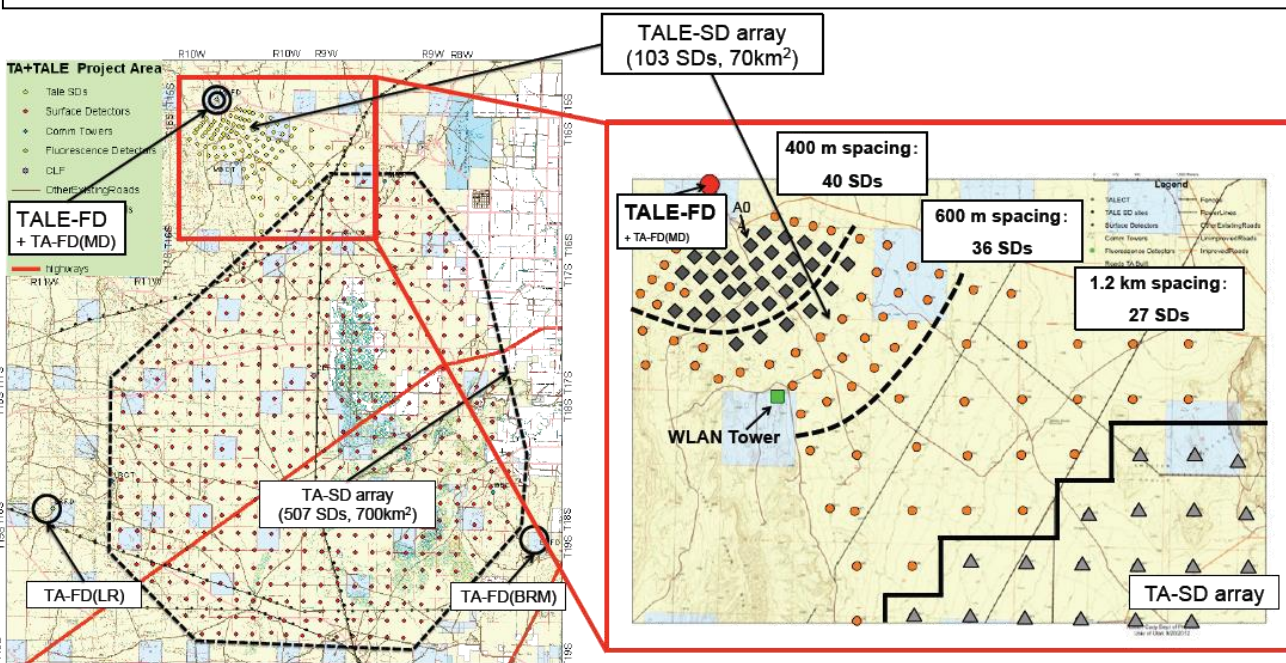


Energy 分解能 -29% +22%



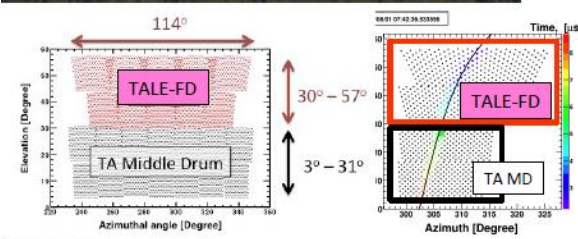
TA Low Energy Extension (TALE)

10基の高仰角望遠鏡(31-59°)で低エネルギー側の浅く発達するシャワーを観測
 Hybrid観測のために密集した地表粒子検出器を配置(400m, 600m, 1200m 間隔)



35台設置済み
 SDは残り 約75台の設置待ち

望遠鏡は先行して稼動

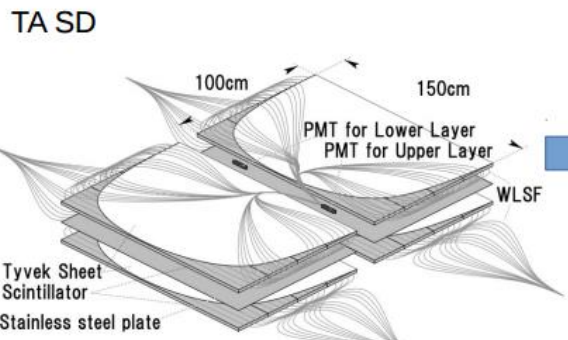


HiRes実験(1993年~2006年)のFDシステムを改良して再利用
 TA実験MDステーションに隣接

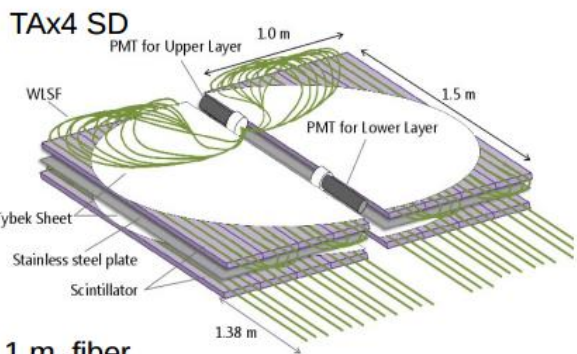
- $10^{16} \text{eV} - 10^{18} \text{eV}$ の範囲
- スペクトルと X_{max} (化学組成)の高統計・精密観測
- $\sim \Delta E_{\text{fd}} 16\% @ 10^{16} \text{eV}, 11\% @ 10^{18.5} \text{eV} \sim \Delta X_{\text{max}} 10 \text{g/cm}^2$

検出器開発・アセンブリ

ファイバーレイアウトのR&D



5 m fiber
Spacing 2cm



6.1 m fiber
Spacing 4cm
1 fiber route on scintillator 2 tim



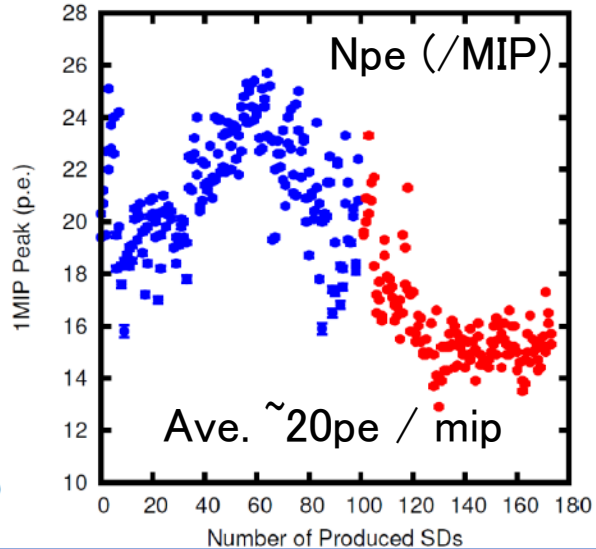
PMT → Hamamatsu (R8619)

量子効率ばらつき小@475nm
管面の一様性向上

8月に行われた明野観測所での作業風景
国内大学・ロシアからの研究者学生が参加
ファイバーを張っているところ



製作したSDのMIP count (Npe)



2016年

01月 PMT輸送振動試験 → OK

02月 100 台製作@明星電気

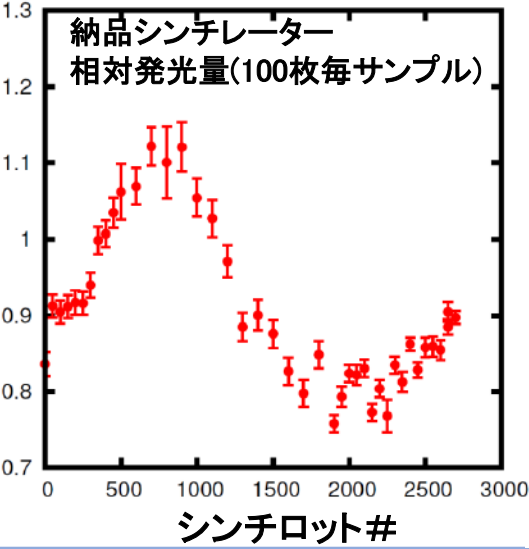
03月 アメリカへ輸送

輸送後の状態確認 → OK

08月 75 台製作@明野観測所

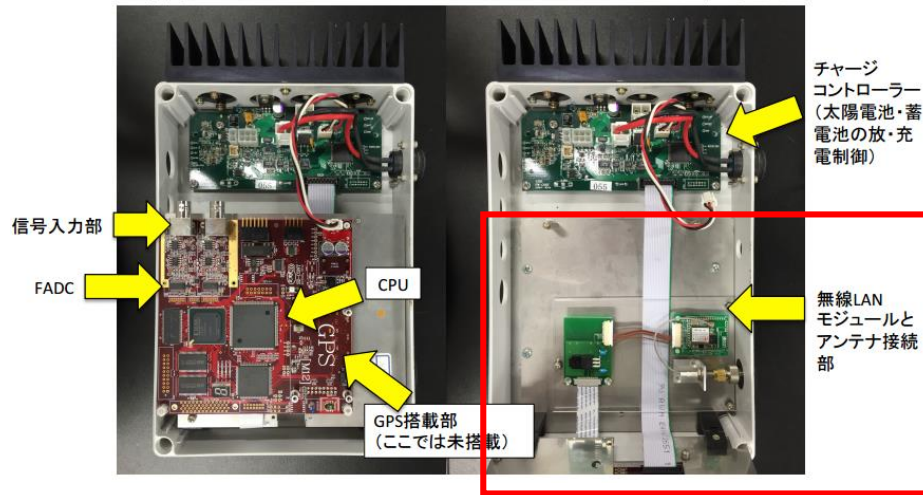
11月 アメリカへ輸送

17/01月-02月 最終アセンブリ予定



エレクトロニクス・DAQの更新準備

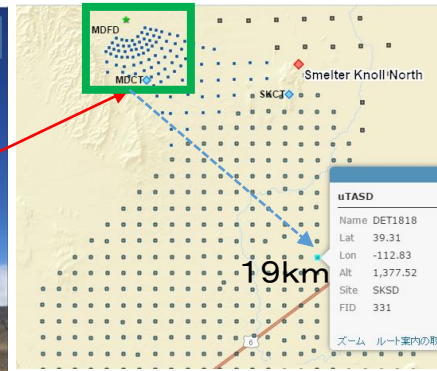
エレクトロニクス更新 (大阪市立大学)



- エレクトロニクスファームウェア 更新
 - 新規無線モジュール(生産中止による)
- DAQ方式の更新 (TCP/IP 通信)

2016/10月-11月

- 新規無線モジュールとDAQシステムを用い現在設置されているTALE-SDに対して長期間DAQを行なった。
- 長距離(TAx4)でのDAQ可能距離を確認するためTA SDの内 18-19km にある検出器2台を用いたDAQ試験を行なった。
- エレクトロニクス100台の製作(基盤+実装)
- 組み立てと試験を準備中



TA×4及びTALE実験 地表検出器の時間及び位置の較正

- 複数のGPSモジュールを同じ場所で運用
- 同時信号入力を与え相互比較

設置計画

- TAx4の用地に対しての米国土地管理局への許可申請中
- TALEサイトへの許可は取得済み

→ 今年度2月下旬にTALEサイトへの新規SDと更新済みエレキの設置

12月-1月 エレクトロニクス100台のアセンブリ・試験

1月-2月 ユタへ輸送済みのSD100台の最終アセンブリ

R&D

ラジコンヘリコプターを用いた較正用光源

シャワー粒子精密測定のための Auger SD・ミュオン検出器との同時観測

ELSと電波検出器を用いたシャワーの電波的観測

大規模アレイのための新型大気蛍光望遠鏡の開発

ラジコンヘリコプターによる TA大気蛍光望遠鏡キャリブレーション

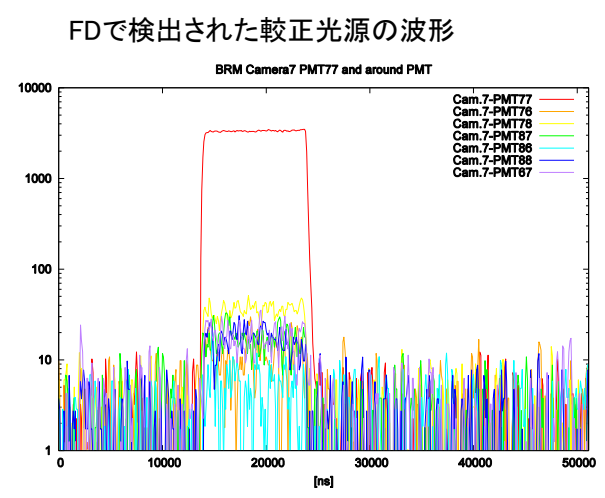
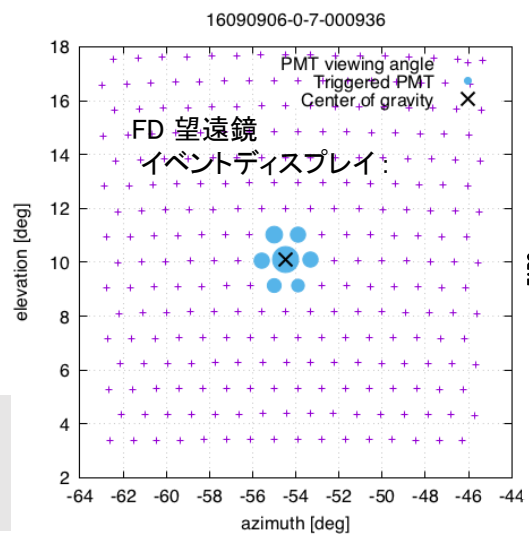
ラジコンヘリ → 位置の精度が保障された点光源として用いる
写真のような光源と光源にコントロール回路をぶら下げたドローンを作成。

Optics + Octocopter = Opt-copter

高性能GPS搭載: 位置決定制度
±10cm

本体重量 : 4.4 kg
最大積載量 : 6.6 kg
飛行時間 : 11分

ピーク波長 : 375 nm
FWHM : 15 nm
パルス幅 : 10 μ sec.

十二面体光源とデフューザー

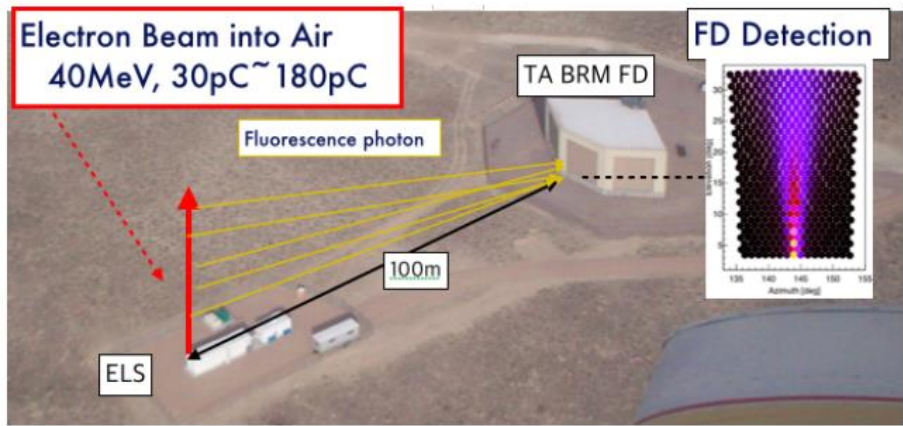
2016年、TAサイトにて飛行性能が評価された

- 平均位置精度 0.03 m
- ホバリング時の位置揺らぎ実測値+0.34 m/-0.44 m
(スペック値±1.58 m)

距離200mで最適な光量に調整
FDのセルフトリガーを用いて測定が可能に。

最高エネルギー宇宙線の電波的観測の研究

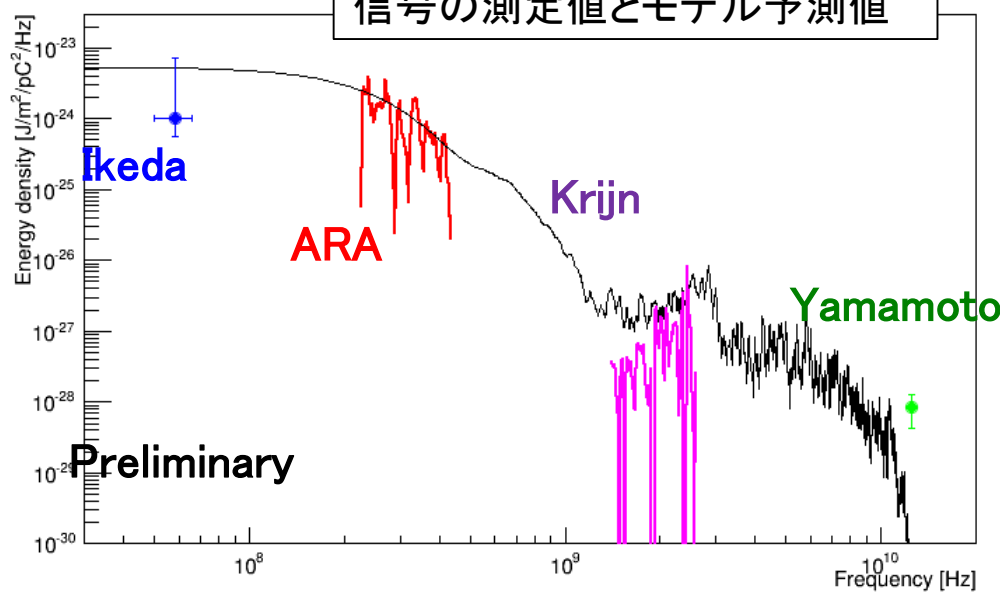
Electron Light Source (ELS)



ELS:
 TA FD キャリブレーション装置・
 電子ビームを空中射出・
 空気シャワーを生成しFDで蛍光を観測

→ ビームに同期した信号を観測

50MHz - 12GHzのSudden birth
 信号の測定値とモデル予測値



電子ビーム発生時の急激な電場の変化由来 “Sudden Birth” 現象・

左の図は周波数感度の異なる複数の実験のアンテナでの測定をまとめたもの。

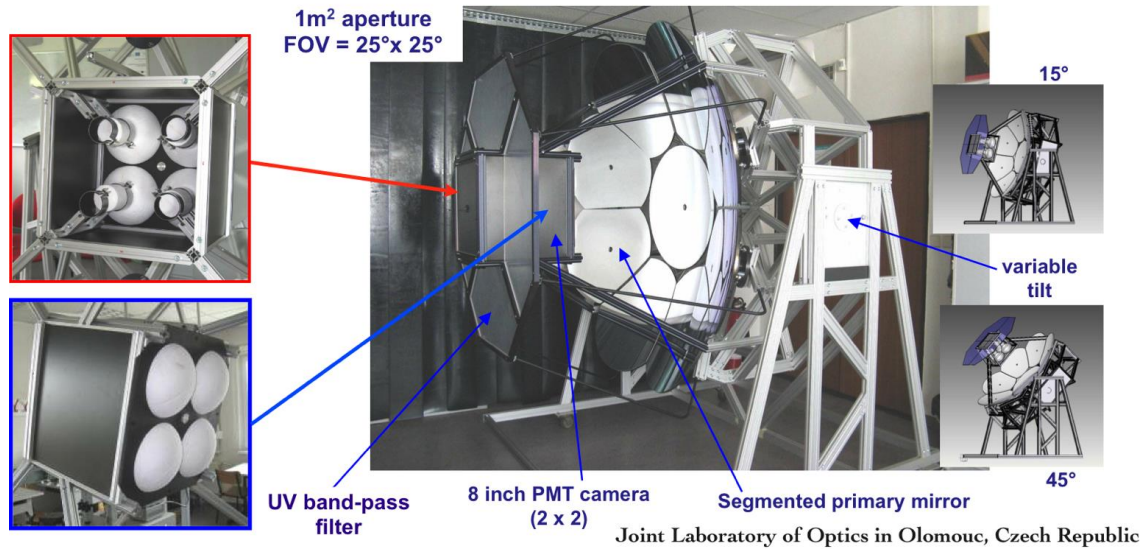
多波長測定結果と”Sudden Birth”モデルによる予測は良くあっている



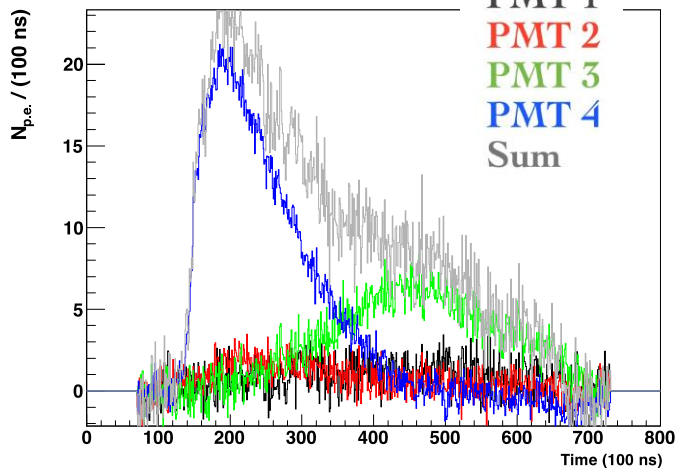
現在この結果を論文執筆中

新型大気蛍光望遠鏡R&D

TAFD 約 4カメラ分の視野を光電子増倍管 4 本で観測



250事象の平均波形



<http://www.fast-project.org>

- 4本の8インチPMTと直径1.6 mの複合鏡
- TA大気蛍光望遠鏡脇に1基設置
- 新型大気蛍光望遠鏡を設置し、観測を開始した
 - 21 km先の垂直紫外線レーザー光を観測
- 次回の観測の準備中

まとめ

- 2008年から順調に観測を継続することが出来た。
- 観測結果
 - $10^{15.6}$ - $10^{20.3}$ eVで宇宙線スペクトルの測定
 - Xmax の測定結果は 陽子 (または軽元素)と無矛盾
 - 到来方向、 5.7×10^{19} で異方性の兆候(Hot Spot) 現在 8年目データは解析中
- 拡張計画
 - TAx4 : 高統計で高エネルギーでの異方性を調べる。
 - TALE: 低エネルギーで精密測定 宇宙線源の遷移を見る
- 関連観測 R&D
 - 雷との相関観測
 - ELSによる大気蛍光モデルの研究
 - μ 粒子検出器、Augerとの共同観測 空気シャワーの詳細測定
 - CCDによる雲モニター 天候の自動的な把握
 - 電磁シャワーからの電波測定 将来の測定方法のR&D
 - 新型大気蛍光望遠鏡 将来の測定方法のR&D
- TAサイト 国際的な共同実験施設としての役割

EUSO team at TA site



平成28年度 宇宙線研究所共同利用
成果発表会

Back Up

μ粒子検出器・Auger地表検出器との同時観測



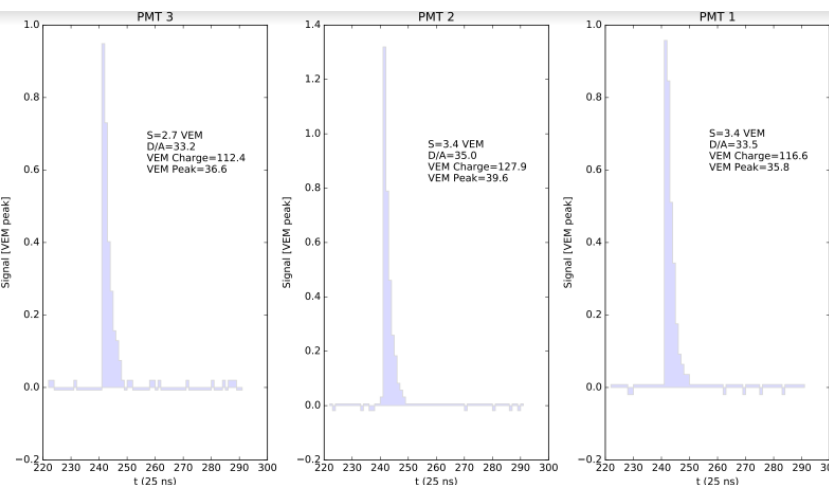
TAとAugerの共同実験
水タンク(Muonにより感度)

TA SD と同期したイベントの取得
(2013- 継続)
概ね安定に稼動

2016年度

- TAアレイからのトリガー配信
 - TCP/IP接続で取得することができる。
 - TAサイトでの他の測定でも利用可能。
- アレイのDAQに負荷をかけずに測定を付加できる。

導入したトリガー配信によって
TAに同期してAuger検出器で波形が取得されていることを確認



Auger team at TA site

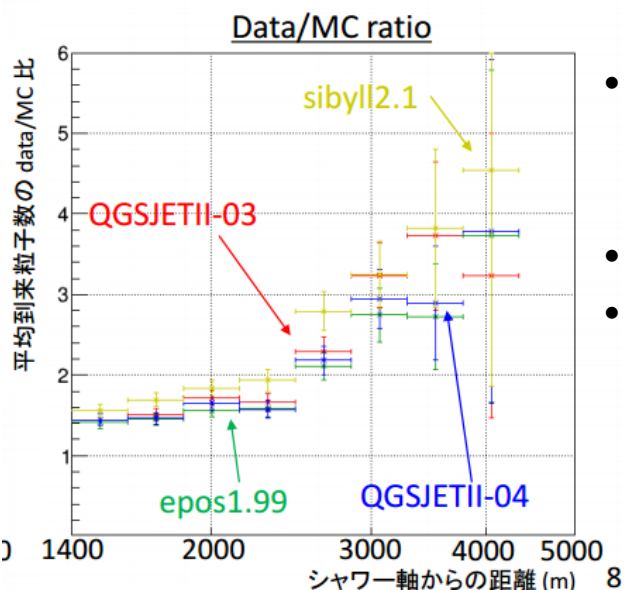


TAサイト内でのMuon 検出器と Auger 水タンク検出器との同時観測



- 異なる物質厚みの検出器で詳細にMCとの違いを測定する目的
- Auger/TA の検出器応答の確認

空気シャワーMCとTASDの応答の比較



- Muon の割合が大きくなる観測条件で地表検出器で測定した信号とMCが予想する信号を比較
- MC が予想する信号より実測の信号は大きい
- Muon超過 (Auger)
R.Takeisi (JPSmeeting)

NICHE

地表の広い範囲に展開された検出器で空気シャワーからのチェレンコフ光を観測
低エネルギーのシャワーでXmax測定。

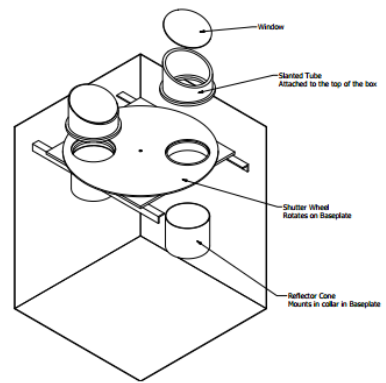
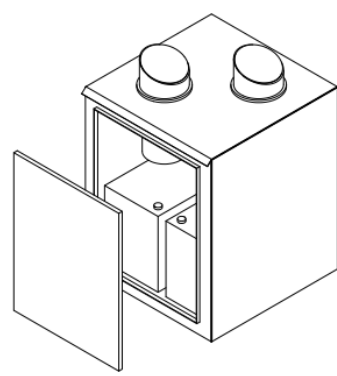
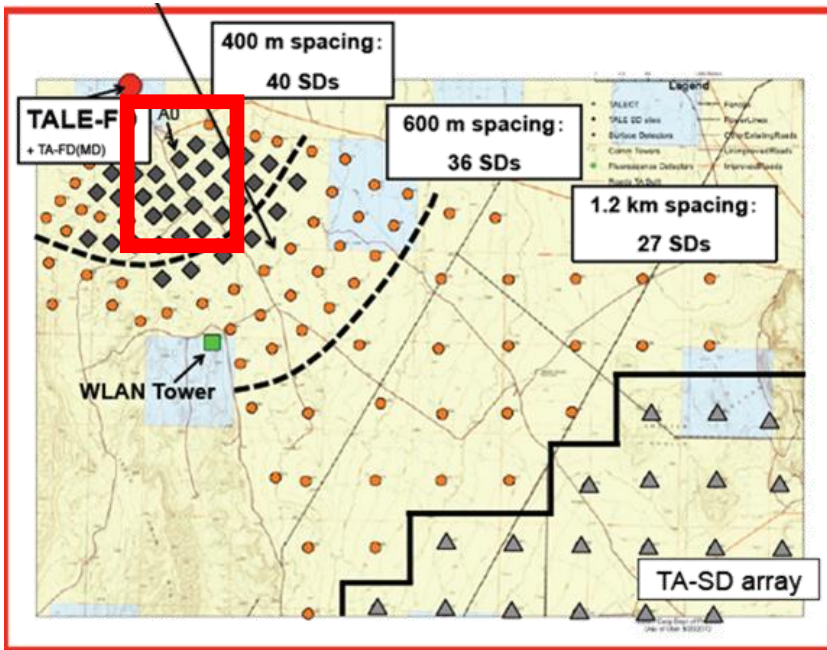


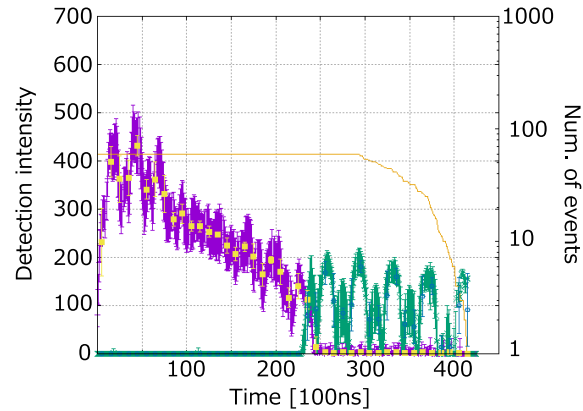
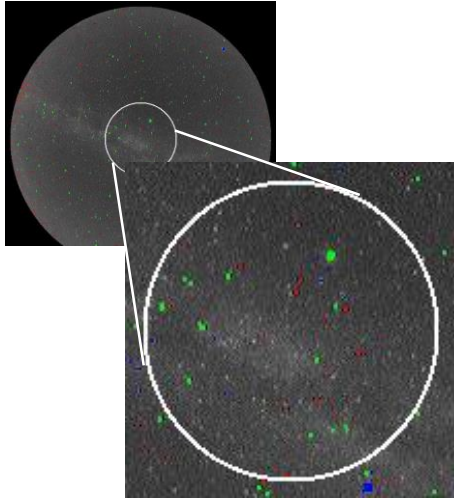
Figure 4: Rough schematic of the counter design. j-NICHE counters would have only one PMT installed per counter. The two-PMT design for the NICHE hybrid array will allow for a local coincidence trigger and thus a lower threshold and/or a lower trigger rate.

D. Bergman, J. F Krizmanic Y. Tsunesada
ICRC2015 proceeding PoS 0837

E ~1-100 PeV の領域で 2つの方法でXmax 測定が可能。
チェレンコフ光量の横広がり Time width の横広がり

All sky picture による天候評価

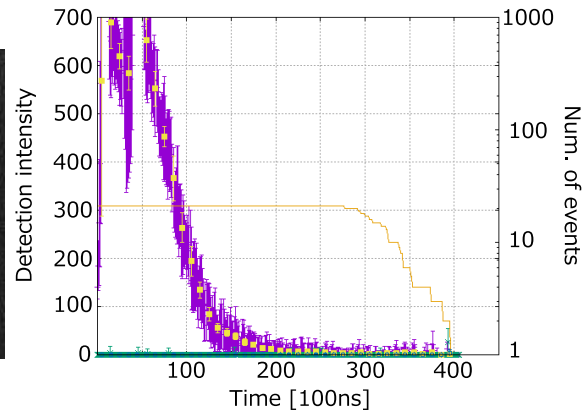
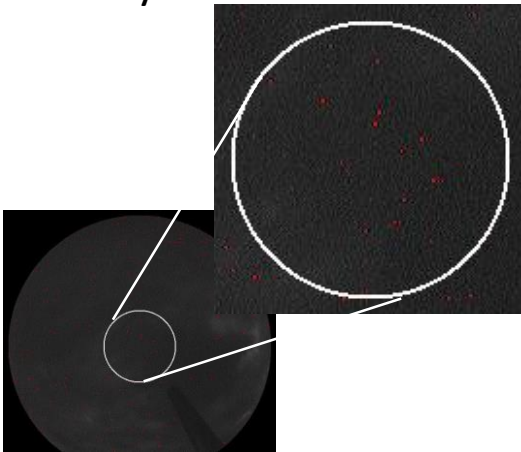
Fine



CLFによるレーザー信号

- 雲量と星の数に相関がある
- レーザーによる大気観測に矛盾しない
- 星を同定するソフトウェアを開発した
- 運用・データ活用法に関して検討中

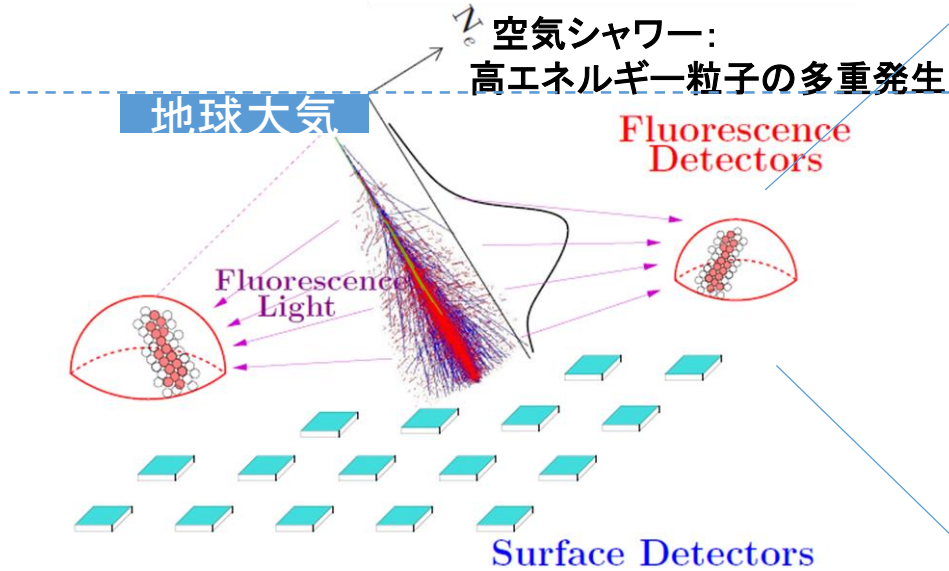
Cloudy



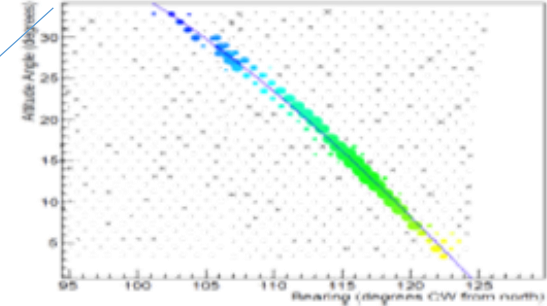
CLFによるレーザー信号

観測原理

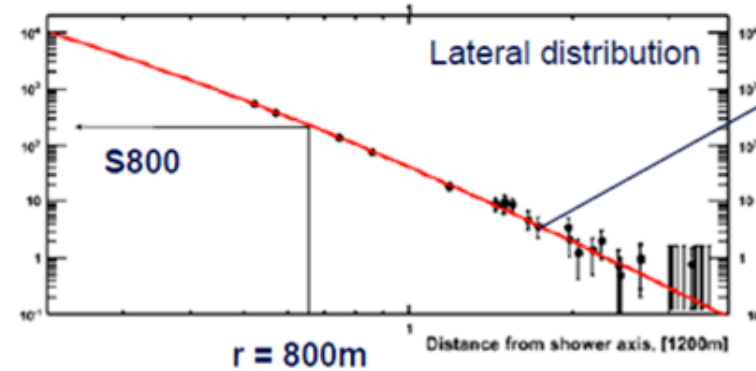
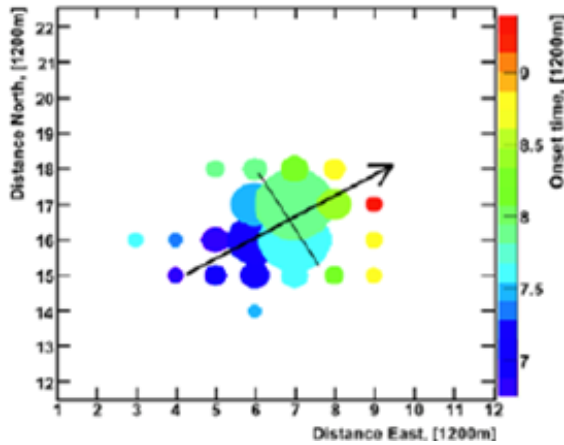
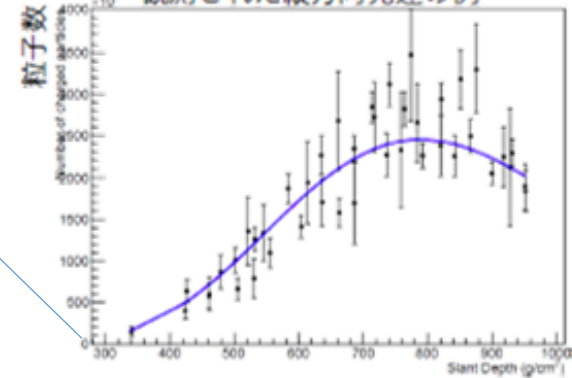
大気を検出器とした測定



観測されたFDイベント例

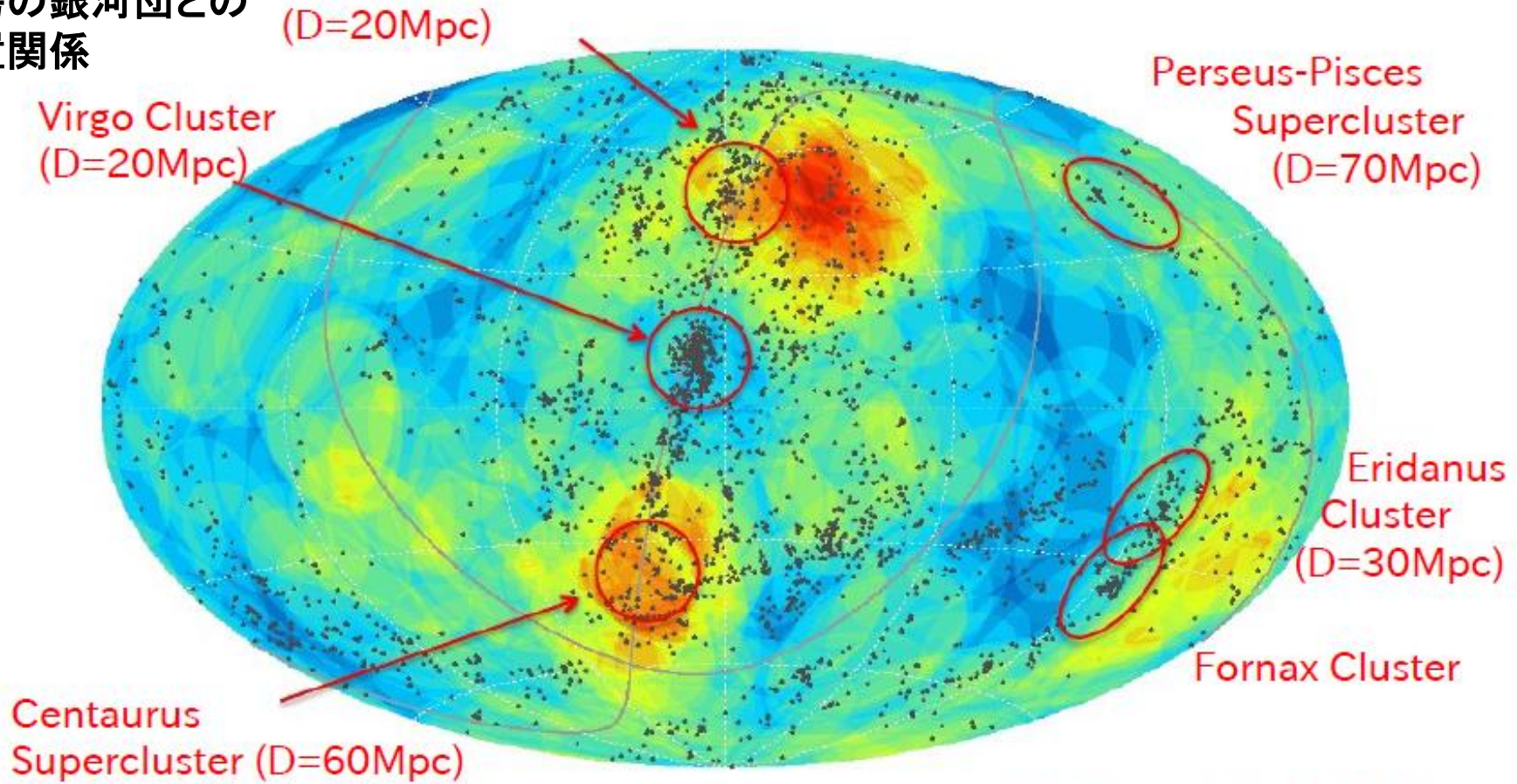


観測された縦方向発達の例



全天Map (TA >57EeV, Auger > 57EeV)

近傍の銀河団との
位置関係

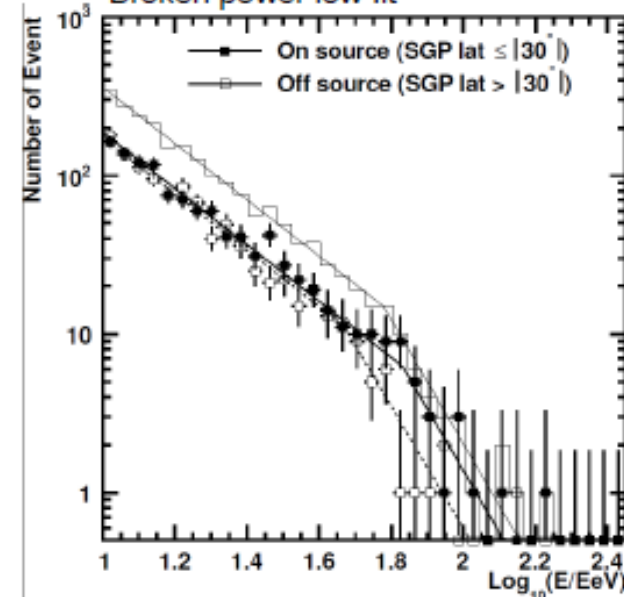


Huchra, et al, ApJ, (2012)

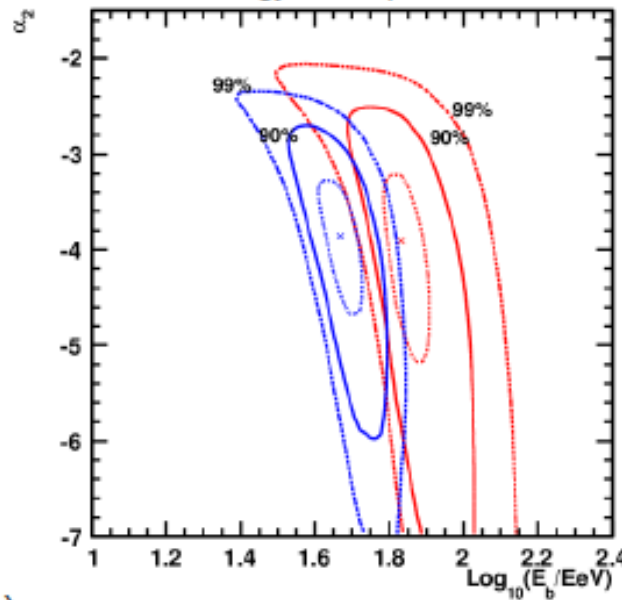
- ◇ Dots : 2MASS catalog Heliocentric velocity <3000 km/s
- ◇ TA hotspot is found near the Ursa Major Cluster
- ◇ TA & Auger found no excess in the direction of Virgo.

Spectrum Anisotropy in TA FOV

Observed Energy distribution
Broken power low fit



Broken power low fit confidence contour
Break Energy and spectrum index at higher energy

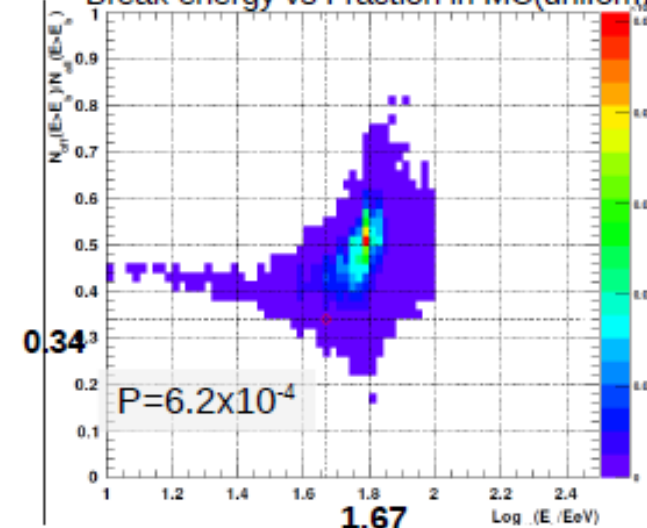


- Exposure ratio is 52:48
(**harf / harf , On/ Off**)
- identical observing condition.
(eg. zenith angle)
- Off source shows early break
and sudden attenuation.

	$\text{Log}_{10}(E_b/E\text{eV})$	Fraction ($E > E_{\text{boff}}$)
On	1.83 (1.78)	0.66 (0.52)
Off	1.67 (1.78)	0.34 (0.48)

() expected
@ null hypo

Break energy vs Fraction in MC(uniform)



$$\text{Log}_{10}(E_b/E\text{eV}) = 1.67$$

$$\frac{N_{\text{off}}(E > E_b)}{N_{\text{all}}(E > E_b)} = 0.34$$

- Observed feature agree with assumption from matter distribution qualitatively .
- **Chance probability** was evaluated by repeating same procedure to MC distribution (null hypo)
 $P=6.2 \times 10^{-4}$ (3.2σ)

Spectrum shape differ in TA FOV!

解析: 異方性

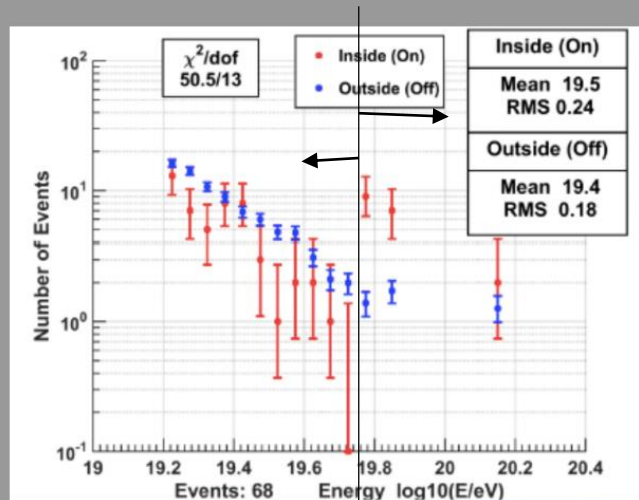
スペクトルの異方性 を取り扱う解析が複数存在 UHECR2016 会議でP.Tinyakov が報告

データから Spectrum の異質な方向を探す解析

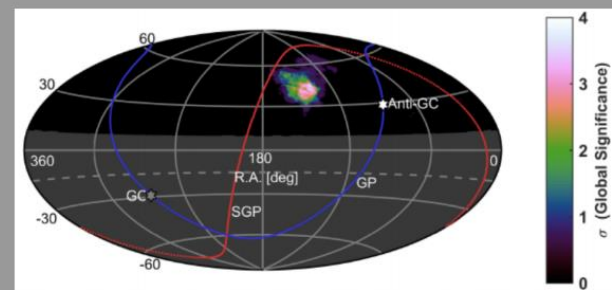
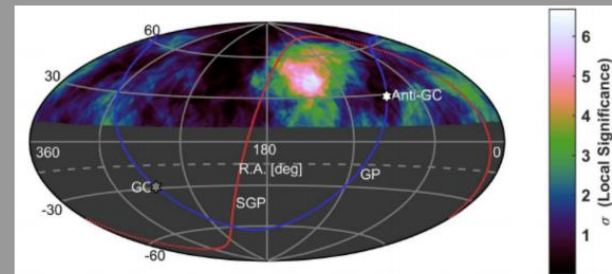
- 観測視野中の各方向で、半径 20° の領域内のイベントのスペクトルと、全方向での平均スペクトルの間のズレを (χ^2 / ndf)としてを計算
- 低エネルギー側($E < 57 \text{EeV}$) と高エネルギー側($E > 57 \text{EeV}$) に分け 確率を得る。

Anisotropy in energy spectrum [method 2]

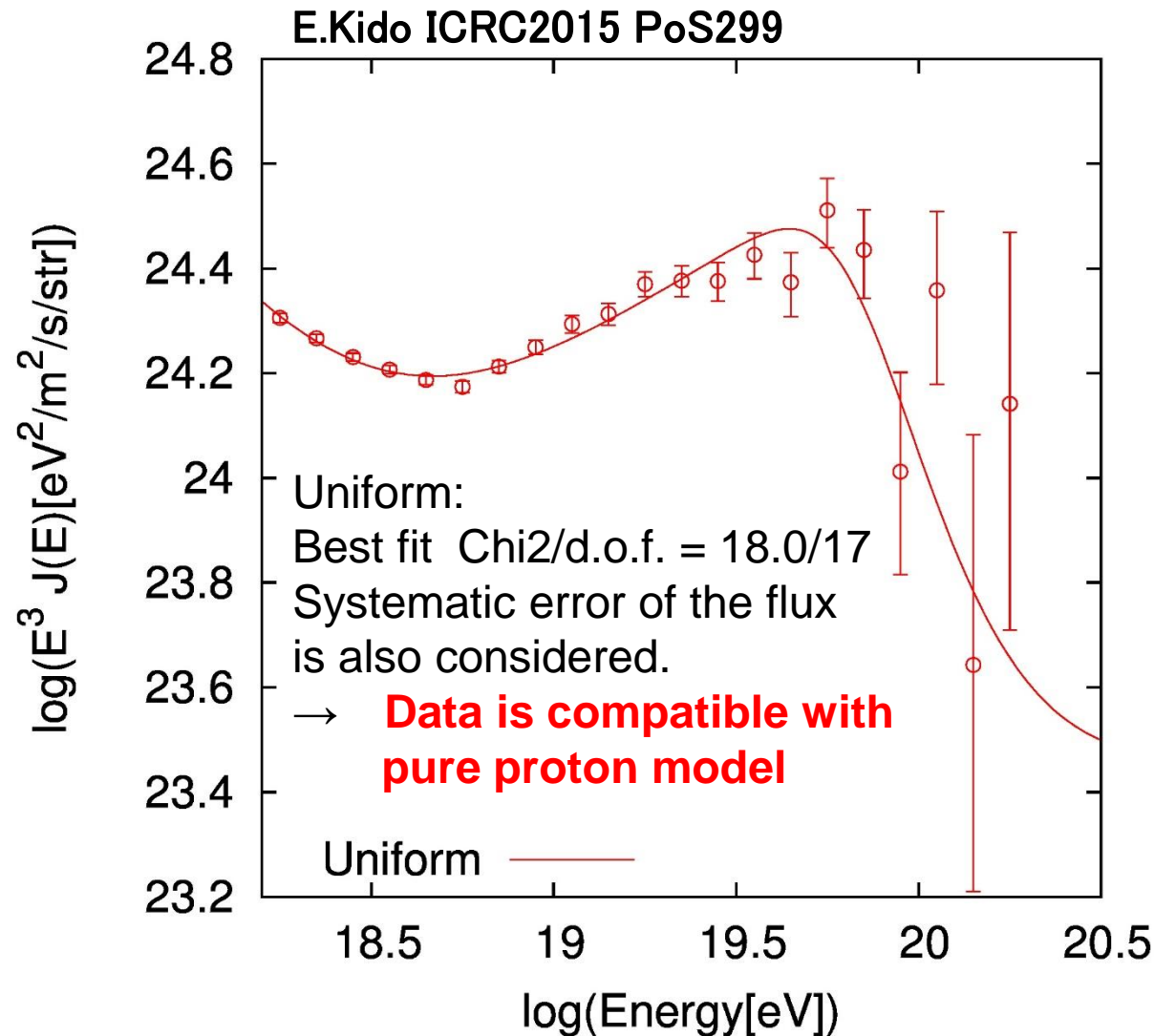
Spectral differences "on" and "off" the hot-spot region



Anisotropy in energy spectrum [method 2]



TASD スペクトル



$\sigma^{\text{SYS}} \sim 3\%$ of the flux for all energies.
Mainly from the calculation of the acceptance
 $\sigma_{\text{TOT}} = \text{Sqrt}(\sigma_{\text{STAT}}^2 + \sigma_{\text{SYS}}^2)$
:Gaussian distribution

	uniform
p	2.18
m	6.8
$\Delta \log_{10} E$	-0.04 (-9%)
Normali- zation	arbitrary

$\Delta \log E = \log E - \log E_{\text{obs}}$
: energy shift of the data

陽子モデルがテストされた。 Best fit を与える条件 P:-2.18 m:6.8

MD Hybrid

[1332 – PoS 441] Poster 1 CR

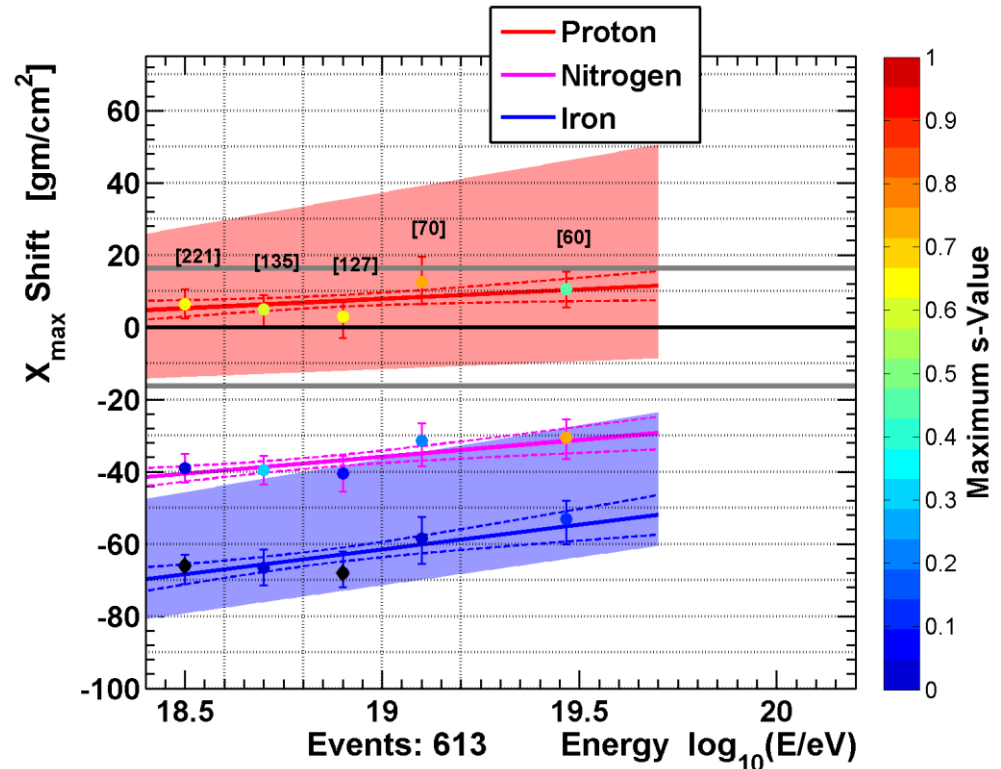
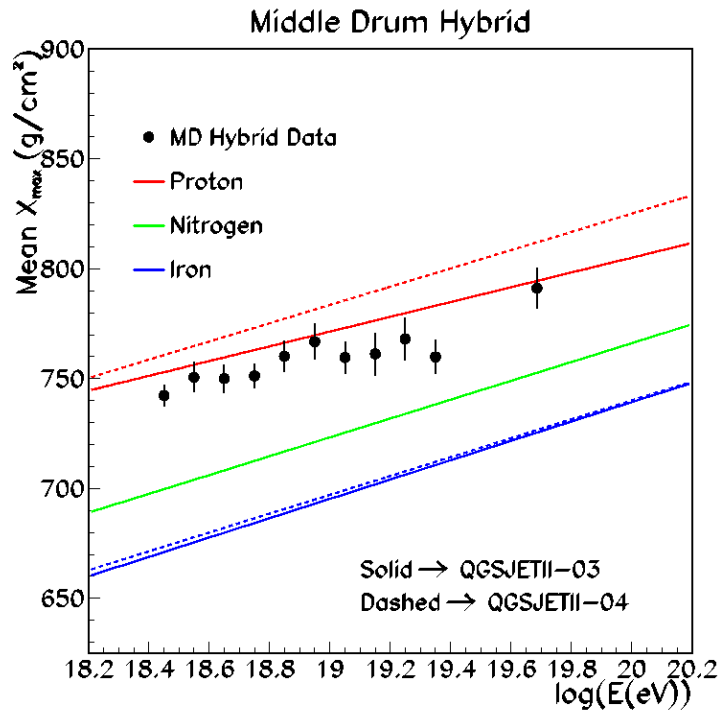
Track:CREX Board #: 247

Presented by Mr. Jon Paul

LUNDQUIST

on 30 Jul 2015 at 15:30

Standard mean vs log(E) plot



“Shift Plot”

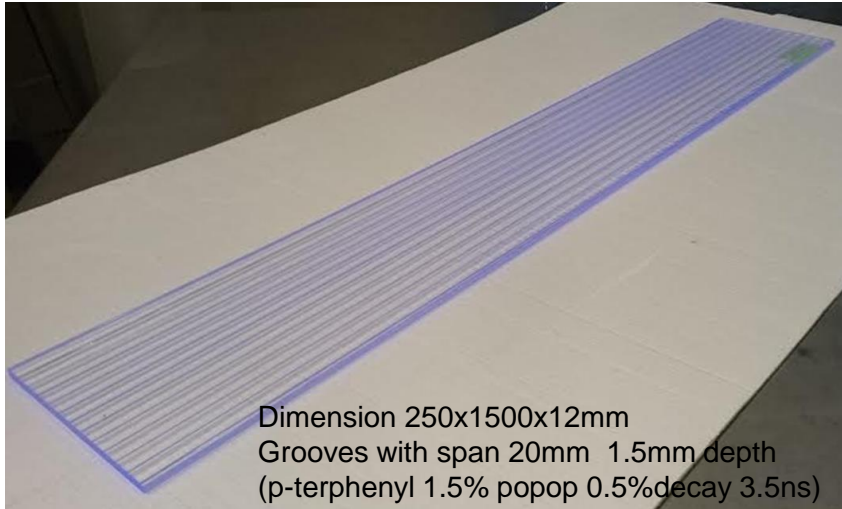
Plot ΔX_{max} required to maximize data/MC agreement (QGSJETII-03).

Standard statistical test on shifted distribution (points)

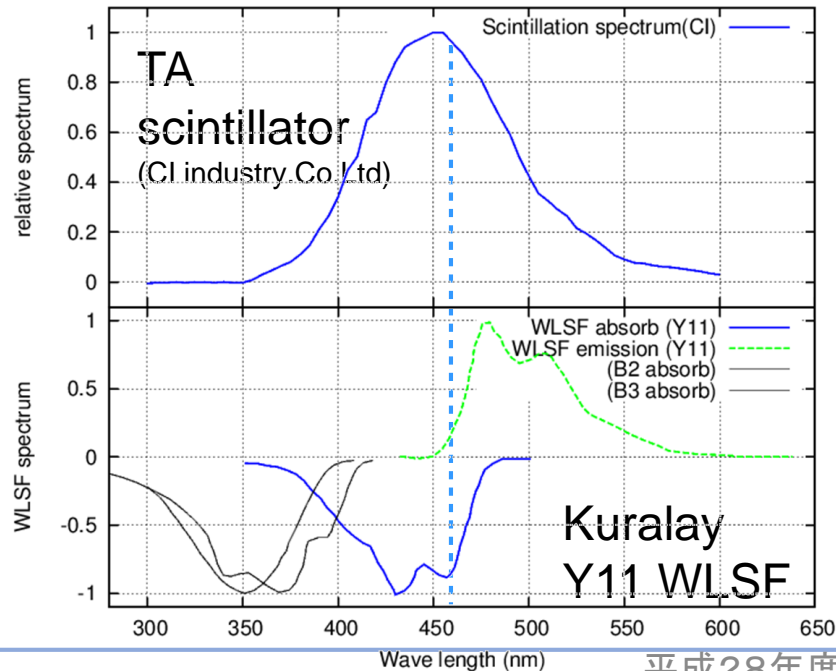
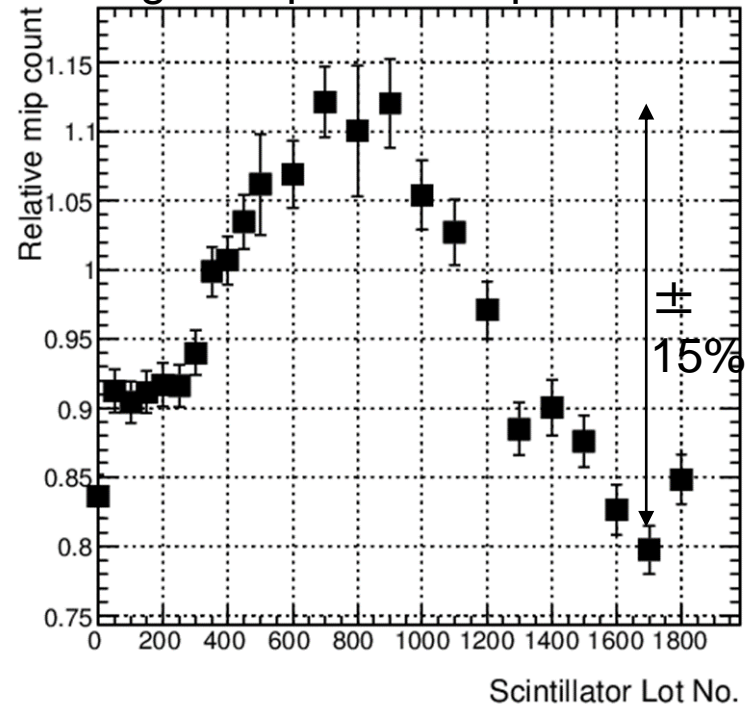
Pink, blue bands for other hadronic models
16 g/cm^2 systematic uncertainty

地表検出器 R&D

Scintillator



Light output of sampled slab



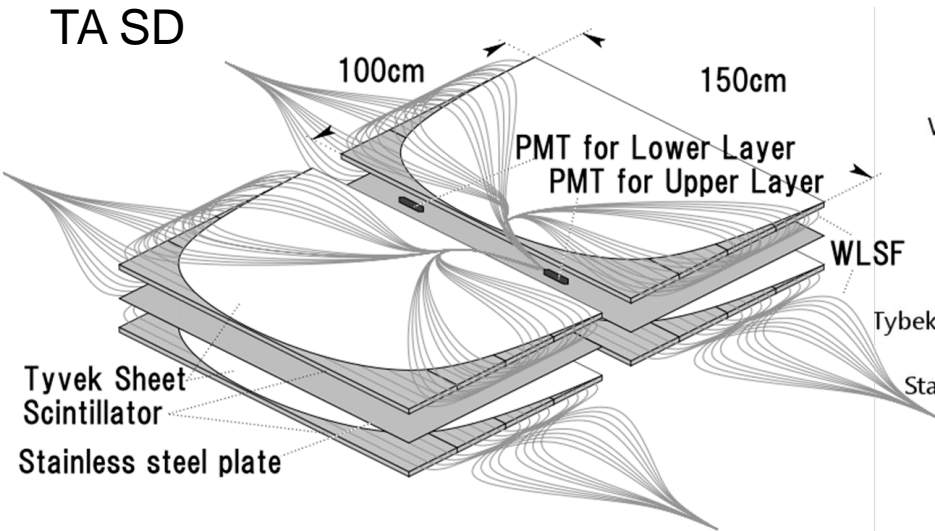
- We use plastic scintillators 12mm thickness
- Made with extrusion method.
- Wavelength match with Y11 fiber.
- Stability of light output quality is $\sim \pm 15\%$
- Slow variation along with serial No exist

Scintillators produced at closer period are used for a SD.

Wave length shifting fiber

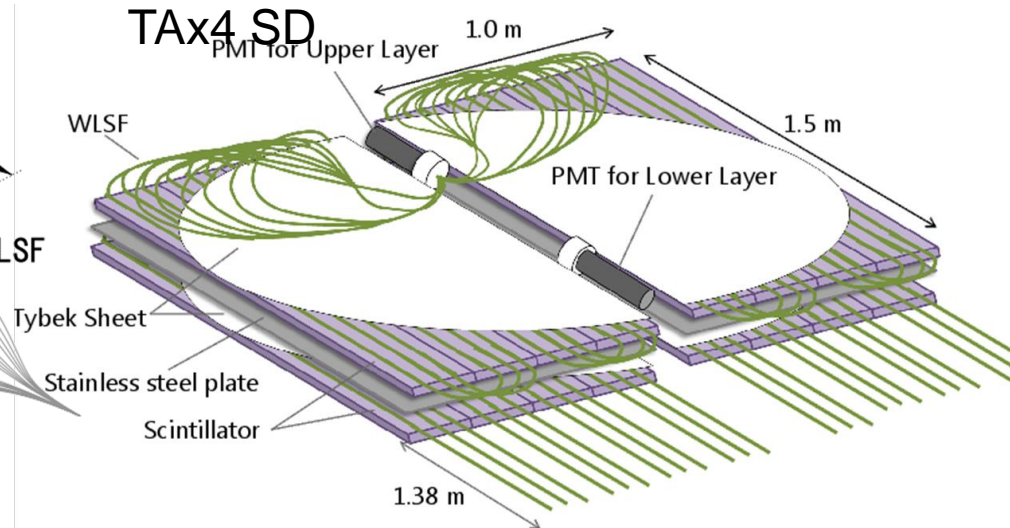
- TAx4 uses WLSFiber , Kuraray Y-11(200). (D=1.2mm L=6.1m $\lambda_{att} \sim 3.7m$) same as TA except length of a fiber
- Fiber layout and number are changed to reduce assembly time and cost.

TA SD



5 m fiber
Spacing 2cm

TAx4 SD



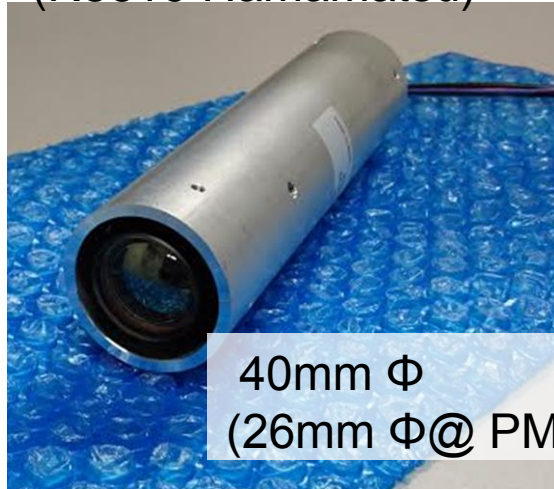
6.1 m fiber
Spacing 4cm
1 fiber route on scintillator 2 time.

- Non uniformity is smaller than $< 15\%$ at measurement with test assembly.
- Less number of fiber to assemble gives shorter assemble time.
- Total length of fiber is $< \sim 1/3$. It gives cost reduction.

R&D by K.Saito (ICRR)

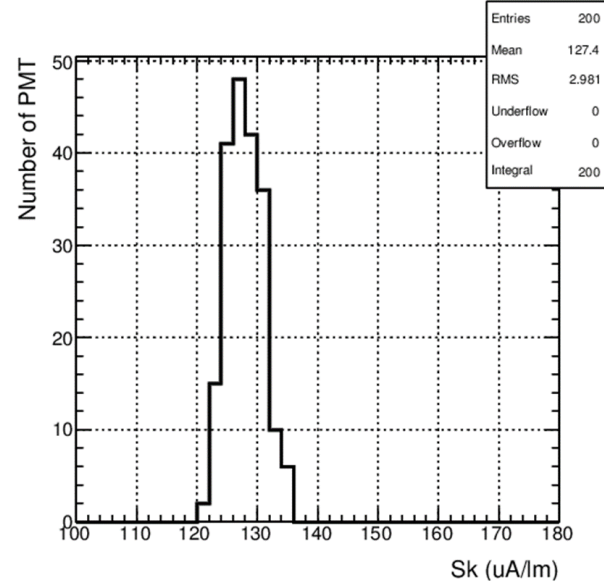
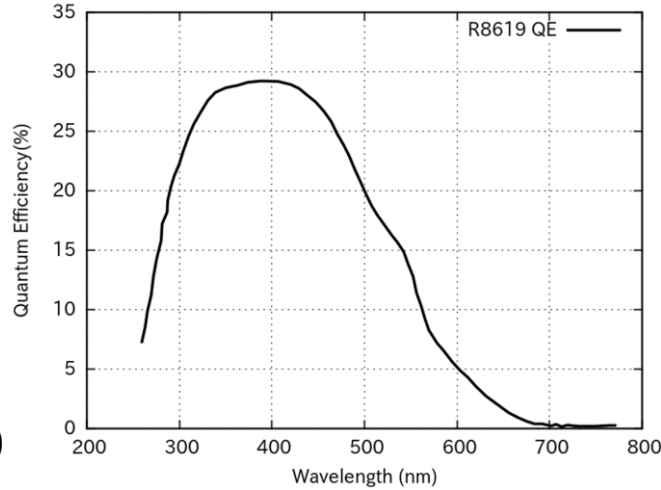
Photomultiplier

(R8619 Hamamatsu)

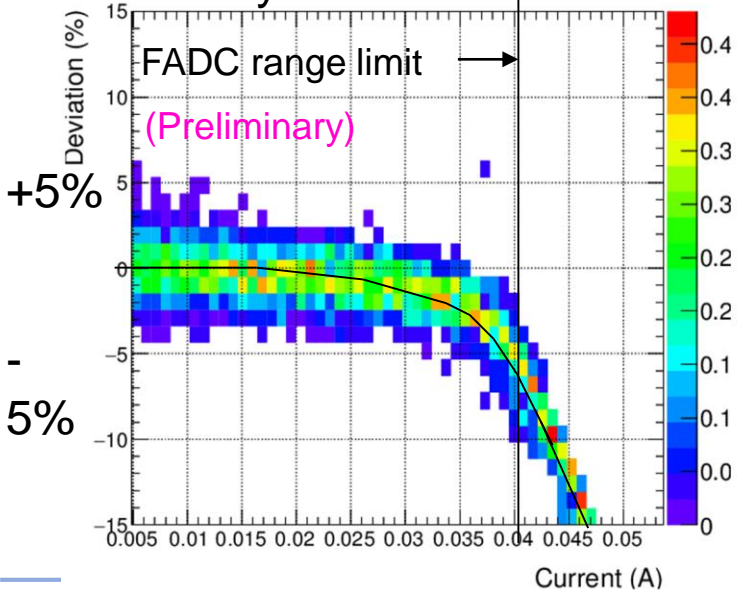


40mm Φ
(26mm Φ @ PMT)

Typical QE curve



Linearity test for 200 tubes



- Hamamatsu PMT : R8619 (TA used ETL PMT)
- QE (~19% @ 500nm) ($\Delta sk = 2.3$, $\Delta QE \pm 2\%$)
- uniform characteristics
- Linearity keeps within <7% level up to FADC limit (Operated with 5×10^6 gain)

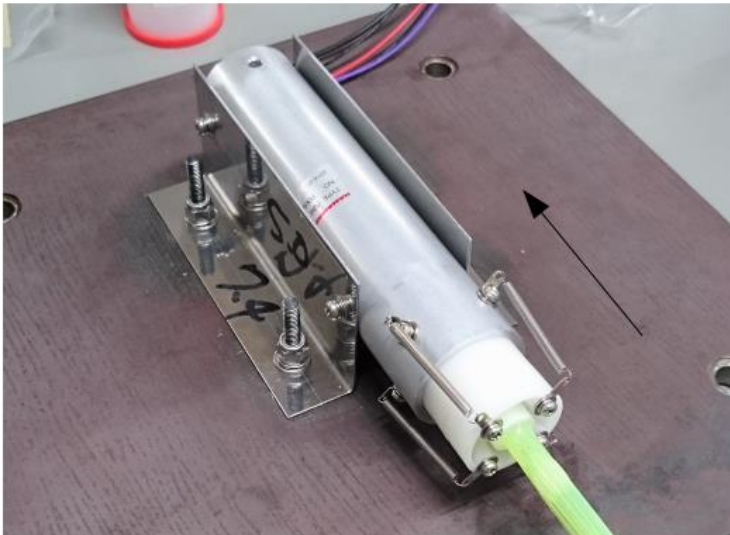
PMT assembly

(R8619 Hamamatsu)



4x $\Phi 3$ thread (depth 3mm)

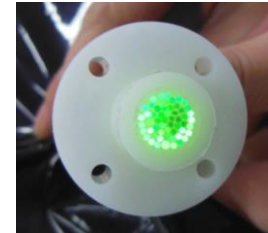
- Fibers are bundled with epoxy glue with this holder.
 - Holder is made of (polyoxymethylene) POM.
 - After epoxy become solid (~8hr), end of fiber are polished, to make the end to be flat and smooth.
 - Attach with PMT as shown in left bottom picture.
 - Vibration test to check effect of long term transportation. No problem in mechanically and also in PMT found.
- + Optical grease



TA fiber bundle



TAx4 fiber bundle



acrylic → polyoxymethylene (POM)

Probably due to transparency of holder, Observed increase of observed photon