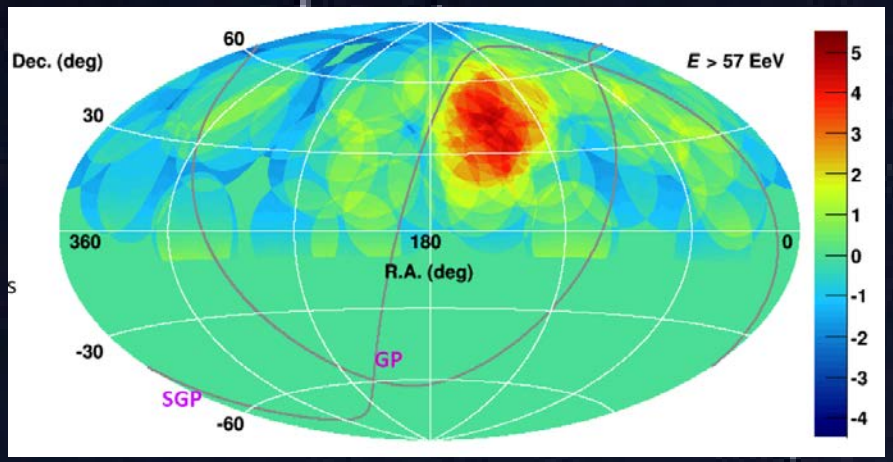
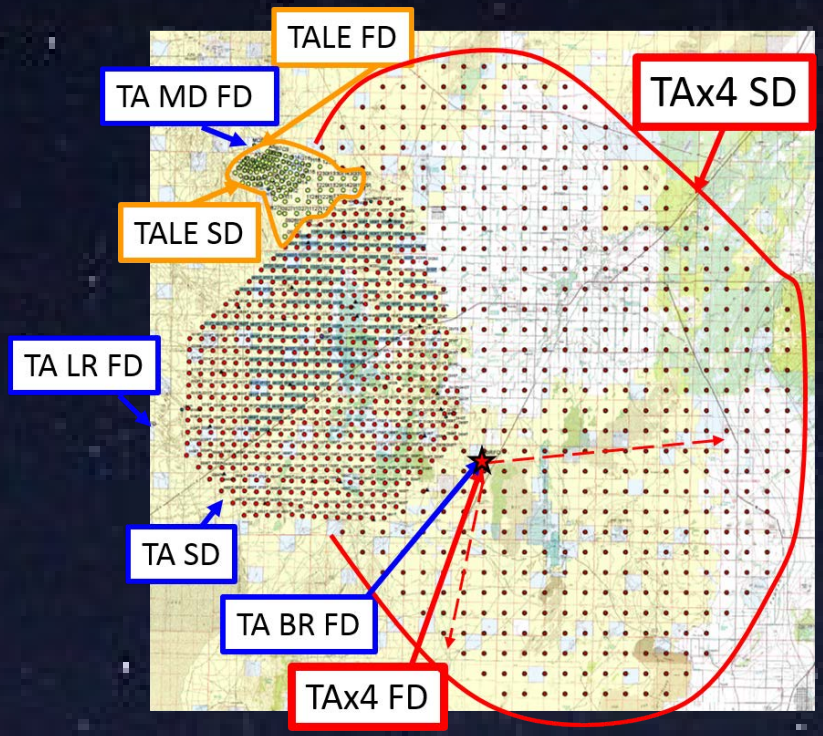
TA×4

（TA SD 4倍拡張計画）

- 最高エネルギー宇宙線で解明する宇宙 -





佐川　宏行

東京大学　宇宙線研究所

まとめ

- TAの5年間のデータの結果
  - エネルギースペクトル
    - 宇宙線頻度が最高エネルギー領域でGZK cutoff予想と矛盾がない急激な減少の確認　・$10^{19.8}$eV以上で5.7σ
  - 組成：陽子と矛盾なし
  - 異方性
    - 異方性のヒント: 3σ程度の有意度
- TA×4の拡張計画
  - TAx4: TA SD apertureを4倍にする提案
    - 建設開始後5年で計20年分のTASDデータ→5σ程度の異方性の観測が期待される
    - エネルギースペクトル、質量組成の高統計測定、UHEγ, ν探索

⇩

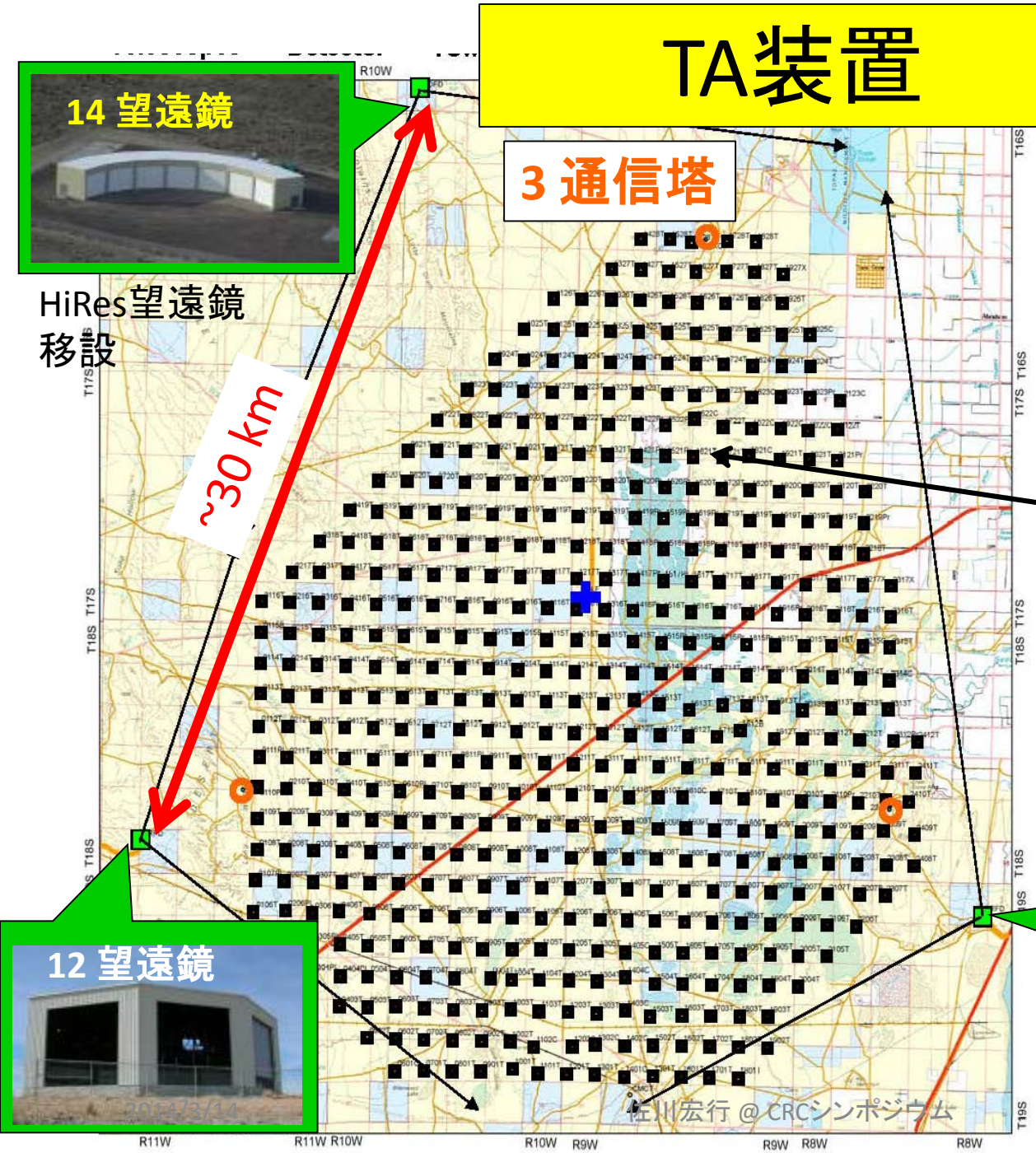
- 最高エネルギー宇宙線物理の描像を明らかにする

概要

- TA
  - 装置
  - 最近の結果
- TA×4
  - 装置
  - スケジュール

TA装置

米国ユタ州
～1,400 m a.s.l.



HiRes望遠鏡
移設

地表粒子検出器

(Surface Detector: SD)

507台(1.2 km 間隔)

700 km²

大気蛍光望遠鏡

(Fluorescence Detector: FD)

3ステーション

Telescope Array Collaboration

T. Abu-Zayyad[a], M. Allen[a], R. Anderson[a], R. Azuma[b], E. Barcikowski[a], J. W. Belz[a], D. R. Bergman[a], S. A. Blake[a], R. Cady[a], M. J. Chae[c], B. G. Cheon[d], J. Chiba[e], M. Chikawa[f], W. R. Cho[g], T. Fujii[h], M. Fukushima[h,i], K. Goto[j], W. Hanlon[a], Y. Hayashi[j], N. Hayashida[k], K. Hibino[k], K. Honda[l], D. Ikeda[h], N. Inoue[m], T. Ishii[l], R. Ishimori[b], H. Ito[n], D. Ivanov[a,o], C. C. H. Jui[a], K. Kadota[p], F. Kakimoto[b], O. Kalashev[q], K. Kasahara[r], H. Kawai[s], S. Kawakami[j], S. K[illegible]ra[b], Y. Kitamura[b], V. Kuzmin[q], Y. J. K[illegible]tsuyama[j], J. N. Matthews[a], [illegible]ura[u], H. Nanpei[j], T. Nonaka[h], A. Nc[illegible], A. Oshima[j], S. Ozawa[r], I. H. Pa[illegible]. Sakurai[j], A. L. Sampson[a], L[illegible], T. Shirahama[m], J. D. Smith[a], P. So[illegible]Takamura[e], A. Taketa[z], M. Takita[h], Y. Tameda[k], H. Tanaka[j], K. Tanaka[aa], M. Tanaka[t], S. B. Thomas[a], G. B. Thomson[a], P. Tinyakov[q,x], I. Tkachev[q], H. Tokuno[b], T. Tomida[ab], S. Troitsky[q], Y. Tsunesada[b], K. Tsutsumi[b], Y. Uchihori[ac], F. Urban[x], G. Vasiloff[a], Y. Wada[m], T. Wong[a], H. Yamaoka[t], K. Yamazaki[j], J. Yang[c], K. Yashiro[e], Y. Yoneda[j], S. Yoshida[s], H. Yoshii[ad], R. Zollinger[a], Z. Zundel[a]

[a]University of Utah, [b]Tokyo Institute of Technology, [c]Ewha Womans University, [d]Hanyang University, [e]Tokyo University of Science, [f]Kinki University, [g]Yonsei University, [h]Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, [i]Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), Todai Institutes for Advanced Study, the University of Tokyo, [j]Osaka City University, [k]Kanagawa University, [l]Univ. of Yamanashi, [m]Saitama University, [n]Astrophysical Big Bang Laboratory, RIKEN, [o]Rutgers University, [p]Tokyo City University, [q]Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, [r]Waseda University, [s]Chiba University, [t]Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, [u]Kochi University, [v]Ritsumeikan University, [w]Sungkyunkwan University, [x]Universite Libre de Bruxelles, [y]Chungnam National University, [z]Earthquake Research Institute, University of Tokyo, [aa]Hiroshima City University, [ab]Advanced Science Institute, RIKEN, [ac]National Institute of Radiological Science, [ad]Ehime University

~120 collaborators in 5 countries

Japan, USA, Korea, Russia, Belgium

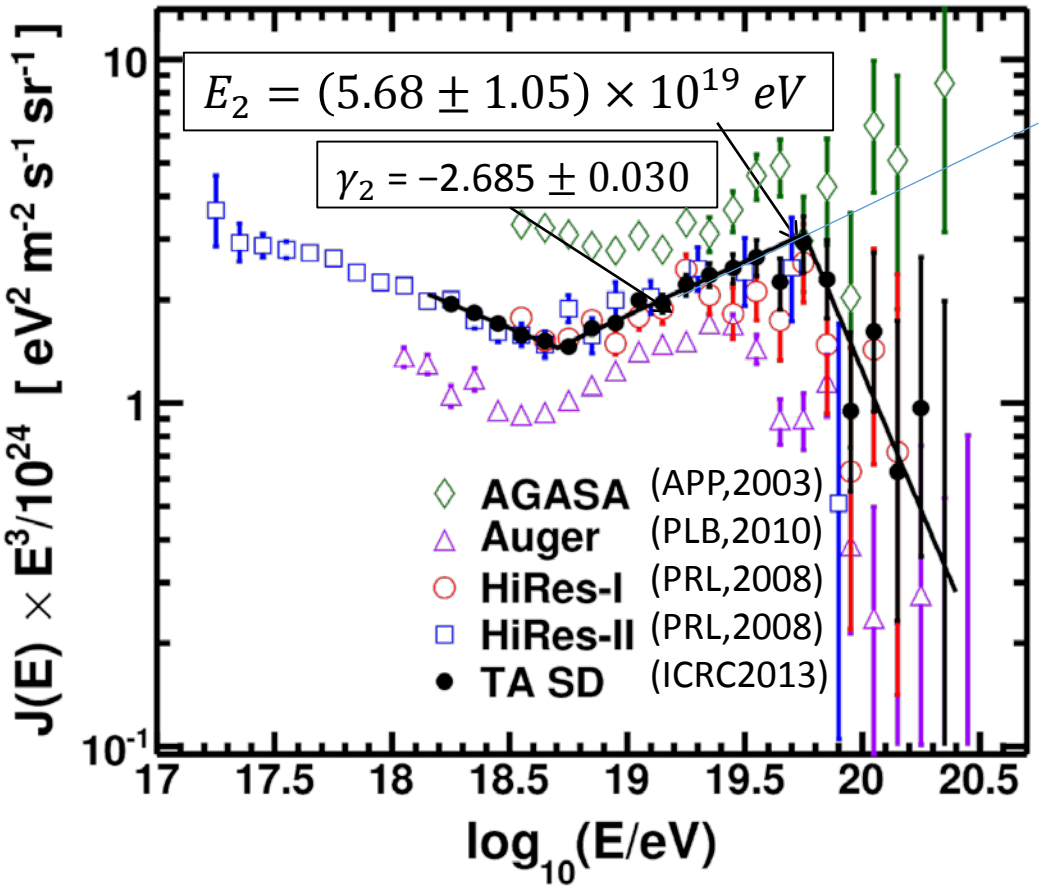
エネルギースペクトル

TA SD エネルギースペクトル (5年間のデータ)

ICRC2013
preliminary

SDエネルギーは
FDエネルギーに
スケール

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



Suppression : GZK cutoffの予想とconsistent

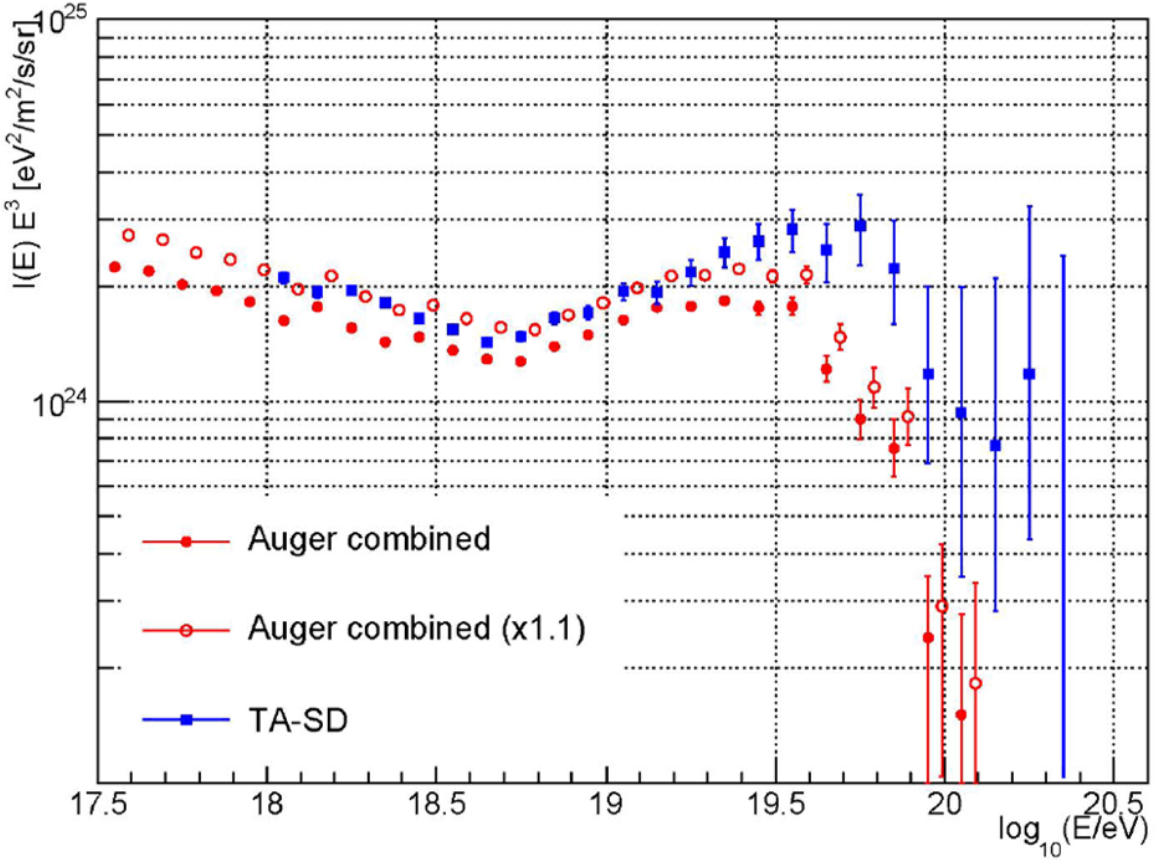
Suppressionの有意度

E > $10^{19.8}$ eVに対して
N(連続スペクトル) = 68.1
N(観測) = 26

連続スペクトルは5.74σで棄却

TA と Augerの fluxはエネルギースケールで25%違っていたが

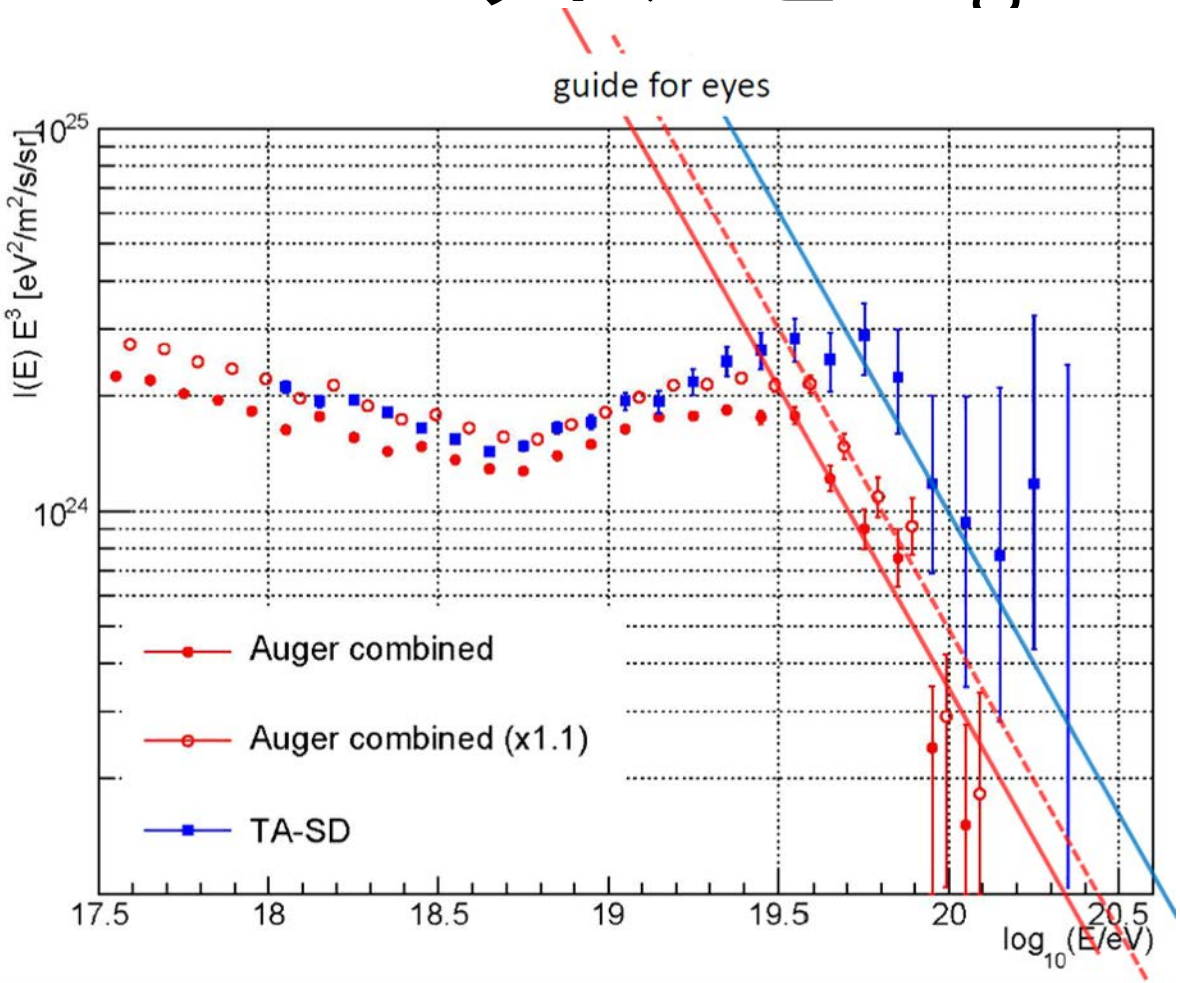
TAスペクトルとAugerスペクトル



Rapporteur talk by Y.Tsunesada at ICRC2013

Energy scaleの不確定性
. TA: 21%
. Auger: 14%

TAスペクトルとAugerスペクトル



Rapporteur talk by Y.Tsunesada at ICRC2013

Energy scaleの不確定性
. TA: 21%
. Auger: 14%

TA (■) と Auger (Ex1.1) (○)
・$10^{19.4}$ eV以下でshapeが一致
・cutoffの位置が違う

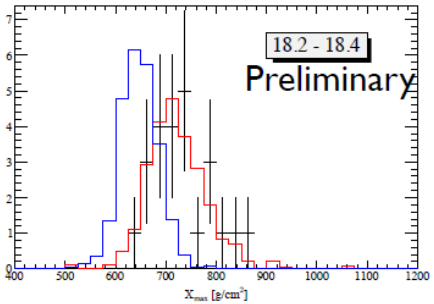
組成

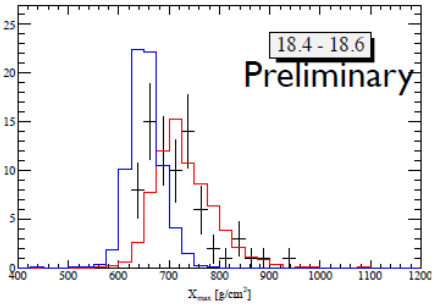
FDステレオ Xmax

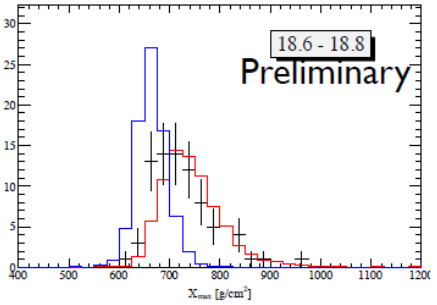
ICRC2013
preliminary

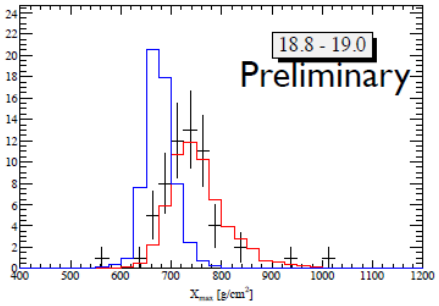
- FD ステレオ 5年のデータ (2007年11月 – 2011年11月)
  - Data: TA
  - 赤: QGSJET-II-03 陽子モデル
  - 青: QGSJET-II-03　　鉄モデル

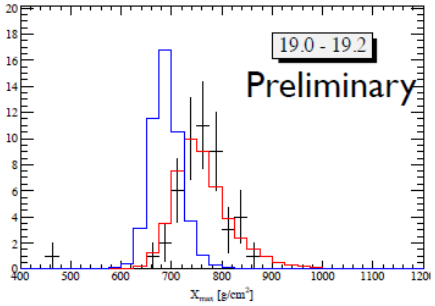
データとMCともに
. 再構成
. カット
のbiasを含む

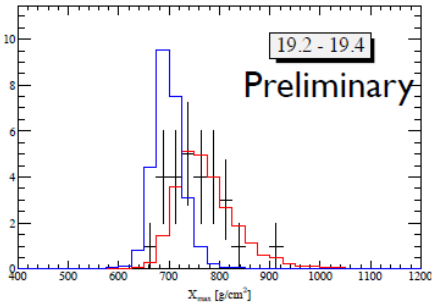


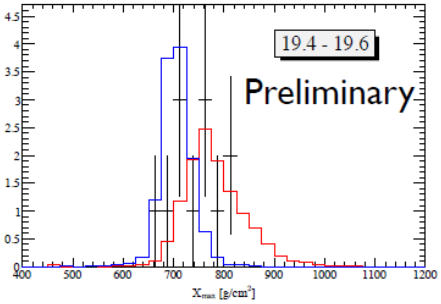


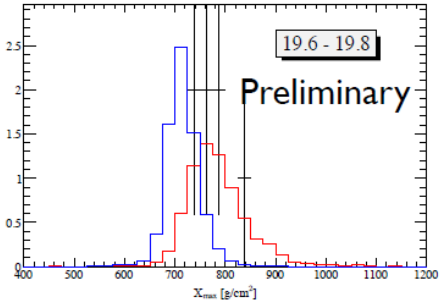








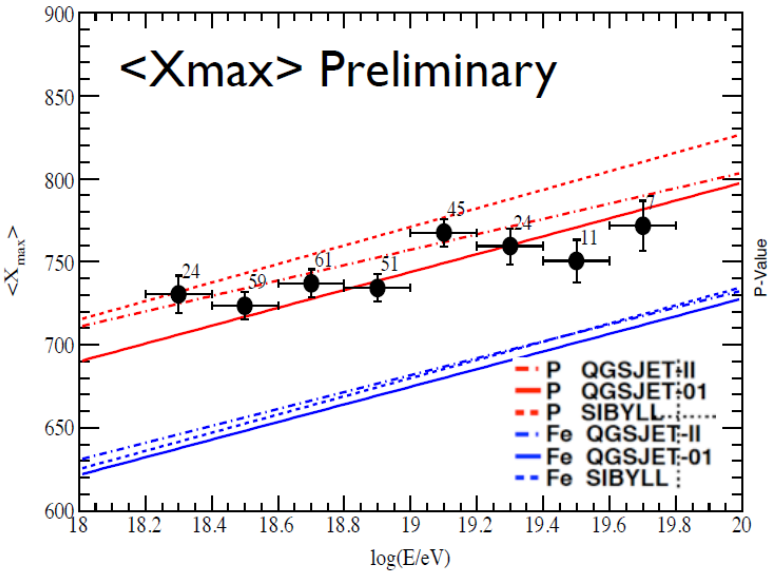


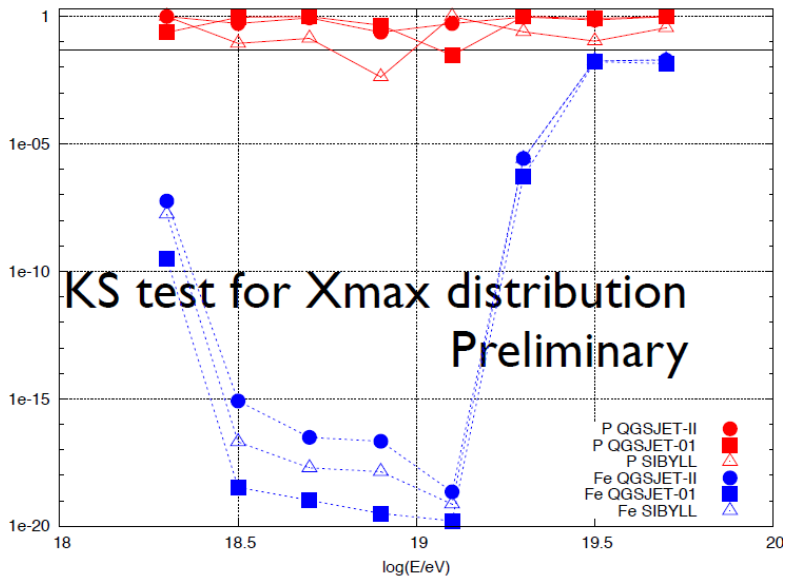


⇨ TAデータはQGSJET-II-03 陽子モデルと一致

FD ステレオ Xmax

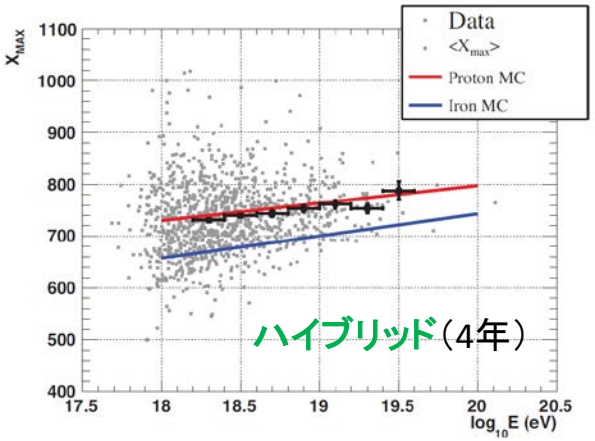
ICRC2013
preliminary



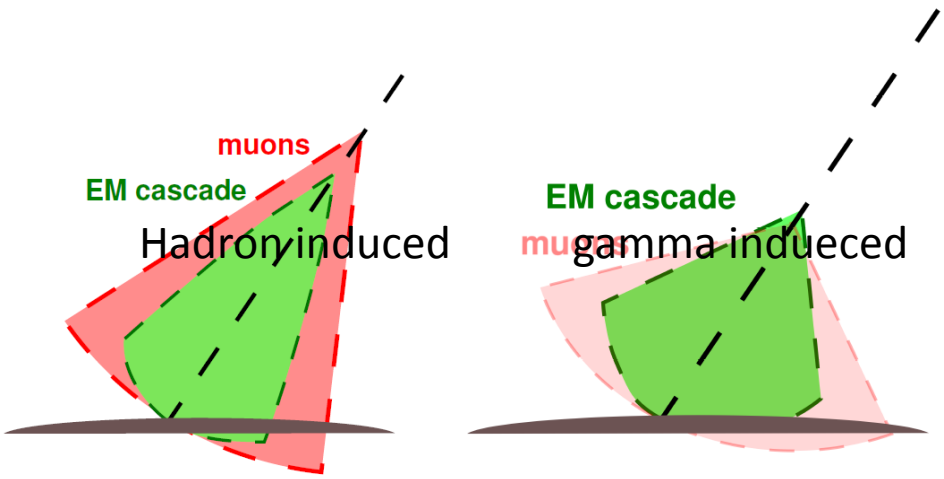


TA data: QGSJET-II-03 陽子モデルと一致 ($E > 10^{18.2}$ eV)
$E > 10^{19.4}$ eVではもっとデータが必要

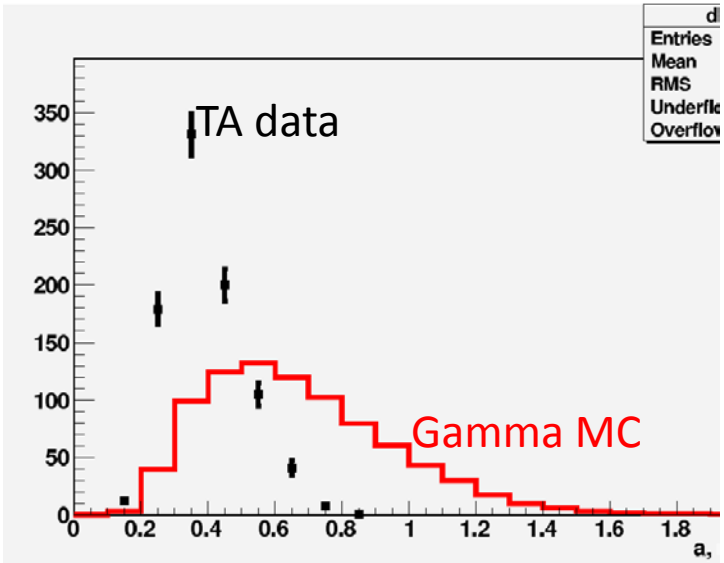
MD ハイブリッド (FD+SD) Xmax解析でも同様な結果
(右図)

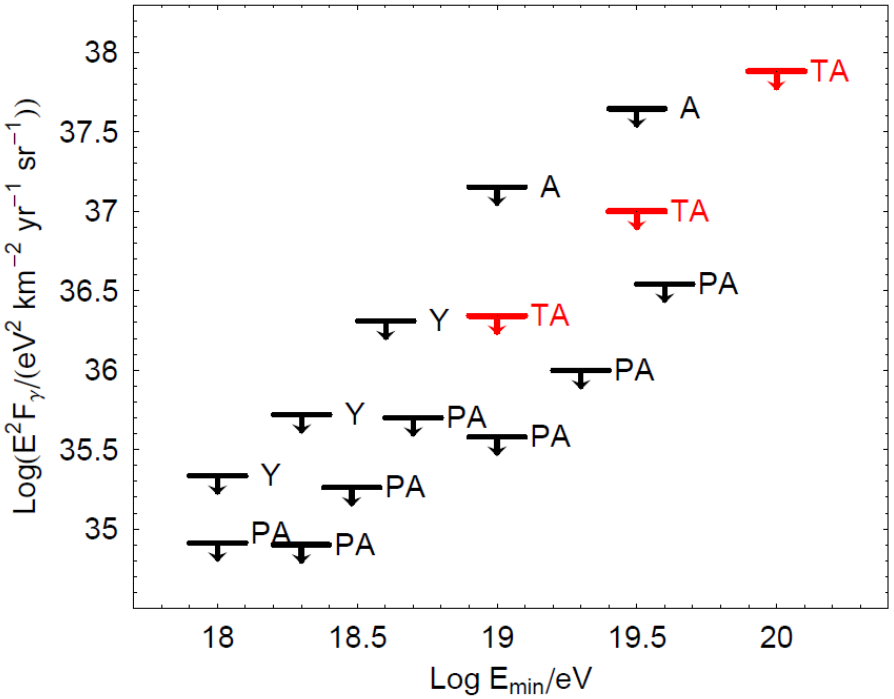


UHE γ 探索



$45^\circ < \theta < 60^\circ$

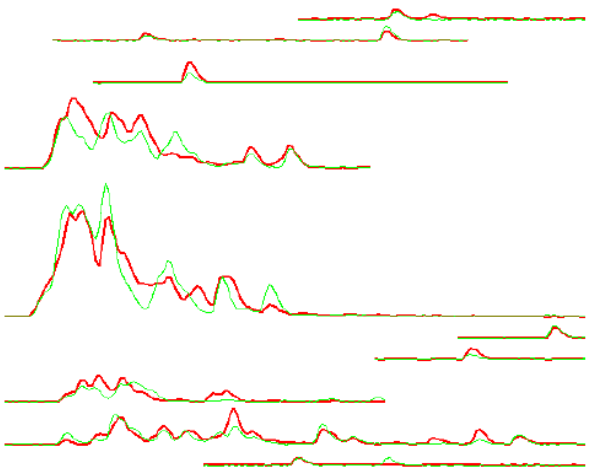




UHE ν 探索

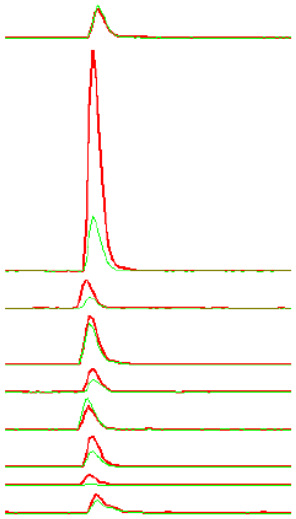
- Neutrino produces very inclined young shower

young shower, $\theta = 19.5°$

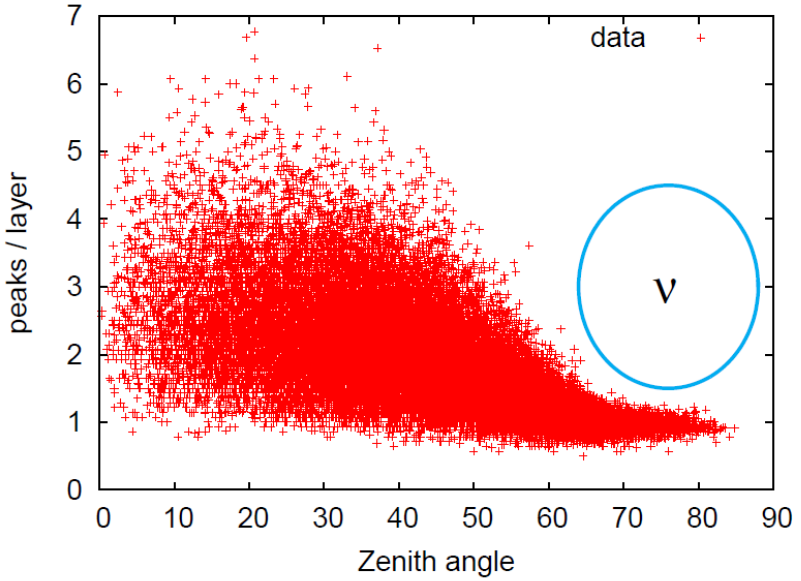


long, indented wafeforms

old shower, 78.3°



one peak



No young inclined showers in the dataset
$\Rightarrow$ no neutrino candidates.

$E^2 < 5 \times 10^{-5}$ GeV cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} (90% CL)

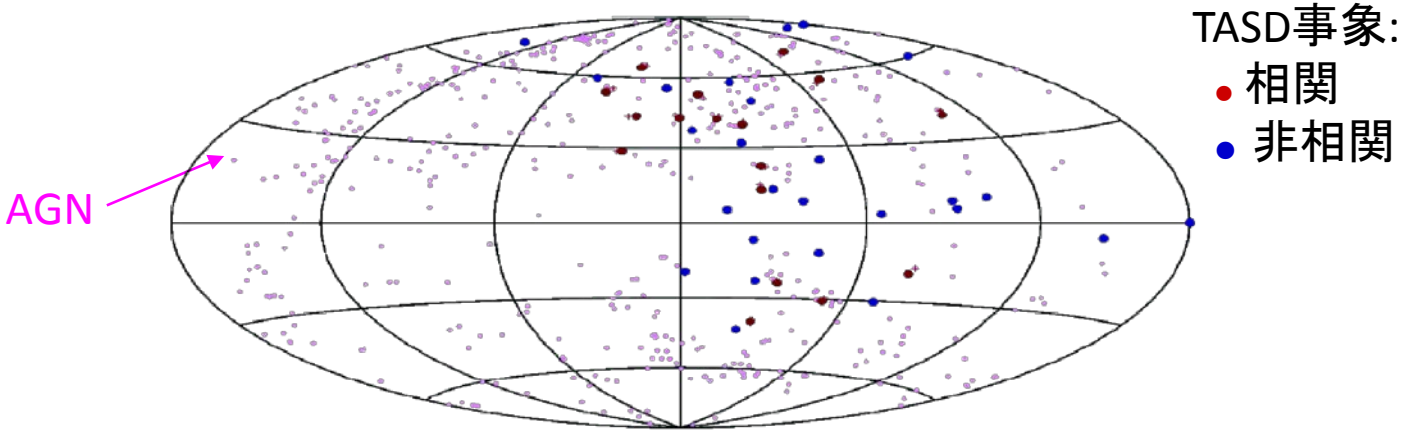
到来方向の
異方性

TA 5年 SD データ

AGNとの相関

ICRC2013
preliminary

- 472 AGN (2006 Veronカタログ+ z < 0.018)
- 42 TASD事象: E > 57 EeV, 天頂角 < 45°
- 相関:分離角 < 3.1^o

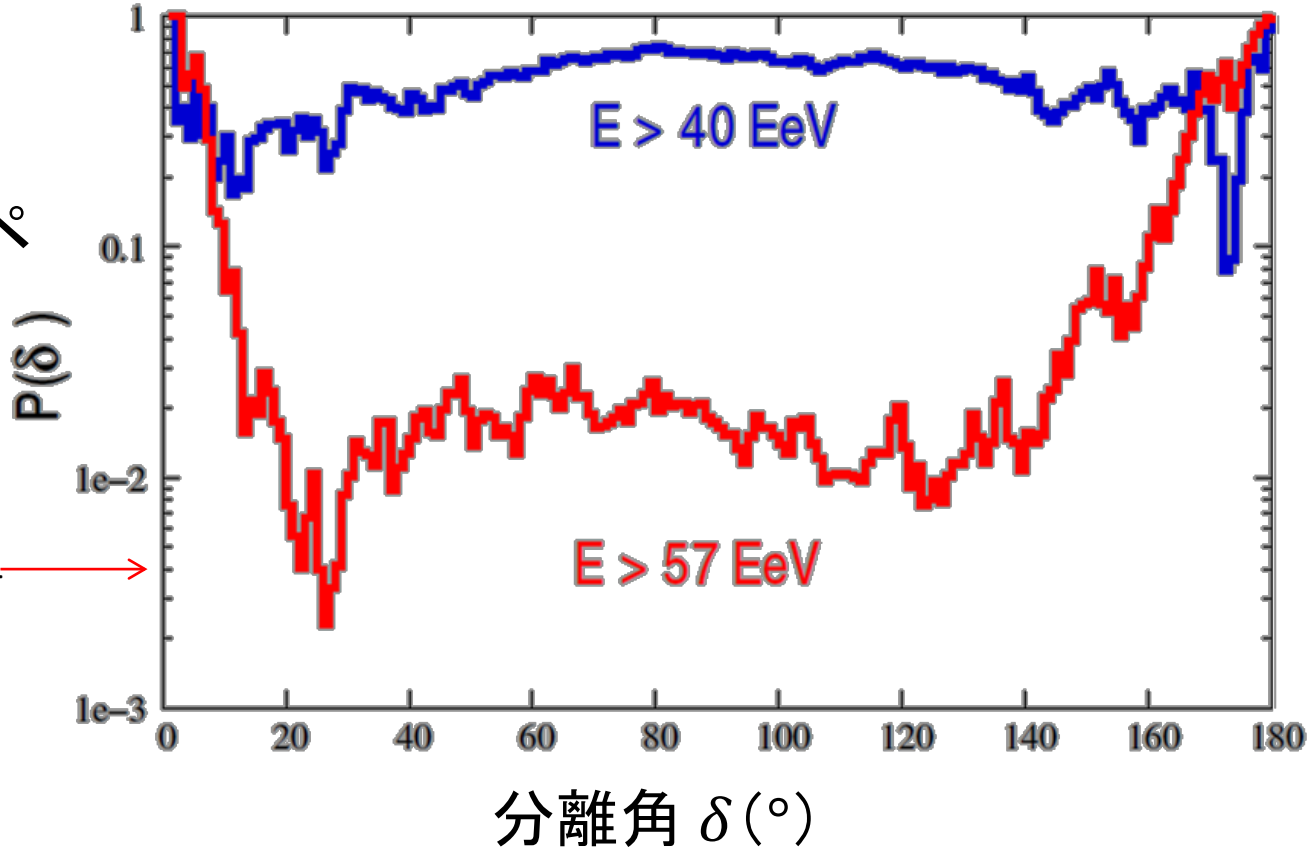


- 一様到来分布の場合にAGNと偶然相関する割合
  - p_o = 0.24
- 42SD事象中17事象相関(17/40=0.40)→ p = 1.4%

ICRC2013
preliminary

Autocorrelations

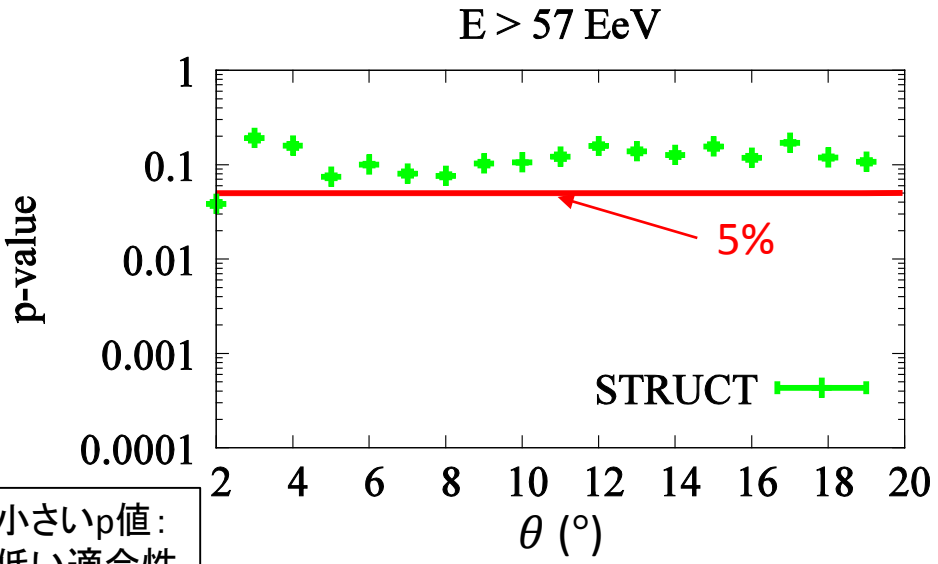
- P(δ):
  - 一様分布の場合にδ以下のペア観測数を超える確率
- 小さいP(δ): 0.004
  - 一様分布からずれ



LSSとの相関
(LSS: Large-Scale Structure)

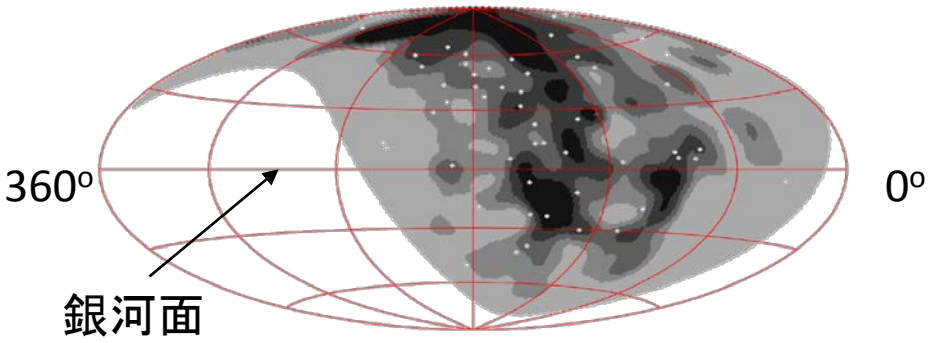
ICRC2013
preliminary

- 陽子LSSモデル:
  - 2MASS銀河redshiftカタログ (XSCz)
  - 下図灰色のパターン
    - E > 57 EeV, 6° smearing
- 白丸: 52 TASD事象
  - E > 57 EeV
  - 天頂角 < 55°



小さいp値:
低い適合性

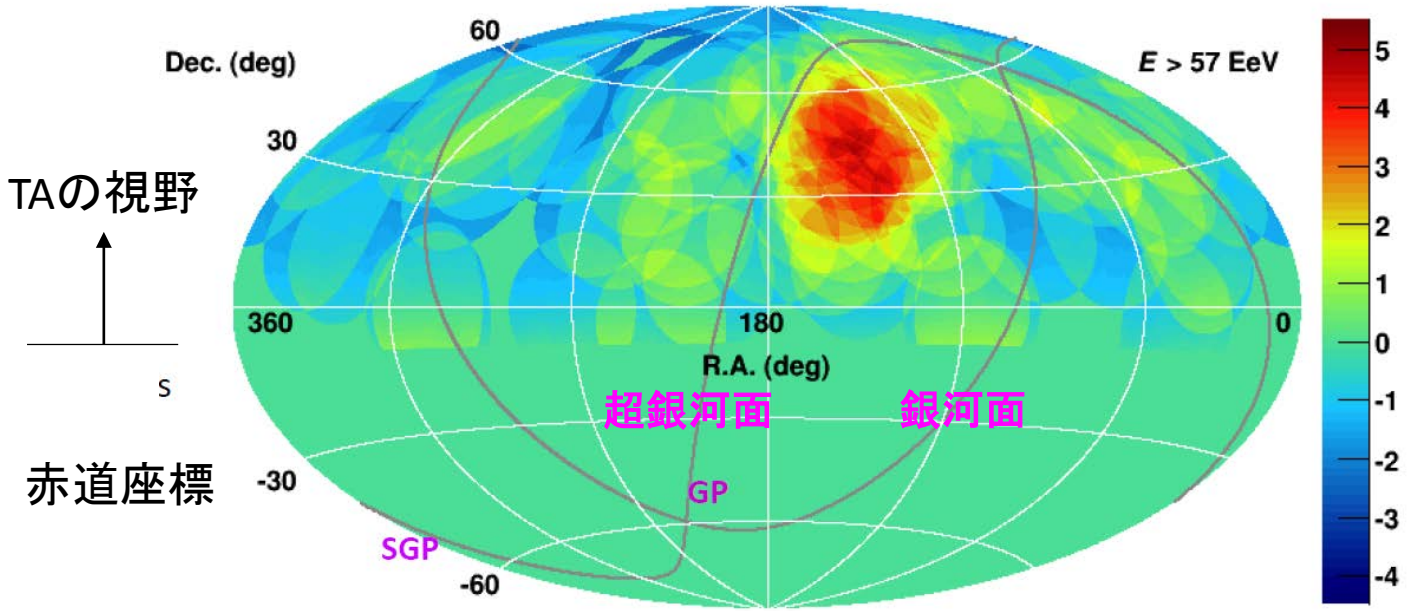
θ: Gaussianでの歪み角



- LSSモデルのp値 ~10%
- 等方モデルのp値 ~0.1%
  (6° smearing)

Large-scale異方性解析

- Loose cut: 52事象 → 72事象 (E > 57 EeV)
  - 角度分解能はあまり変わらず
- 20度の半径の円でのoversampling

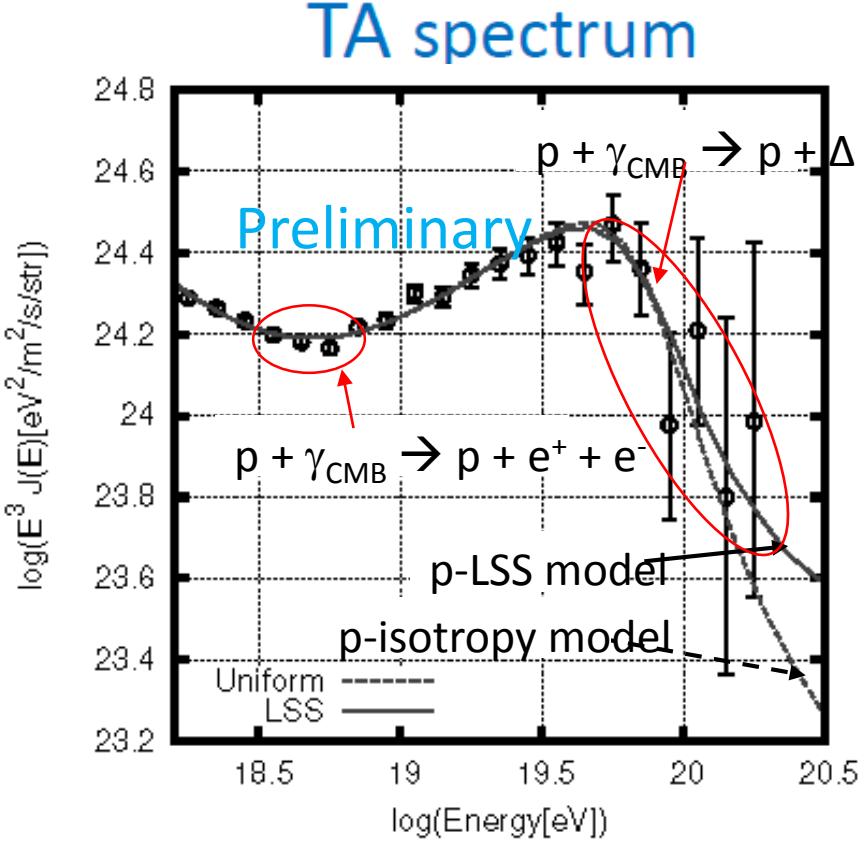


- pretrial significance 5.1σ (20°内の観測数=19; 期待数(一様分布)=4.5)
- Chance probability by isotropy MC : 3.6 σ

“TA based”の物理のモデル

ICRC2013
preliminary

Dip Model



- 10^{18} – 10^{20} eV は系外からの陽子
- GZK(p) Cutoff + Pair Production Dip
- GZK 内の 異方性がみえるはず
- 加速源のベキ、cosmological evol. (m), 銀河系内外磁場などの情報が得られる。

TA×4計画の提案

- 最高エネルギー領域の宇宙線のapertureを4倍に拡張

TA×4の概要

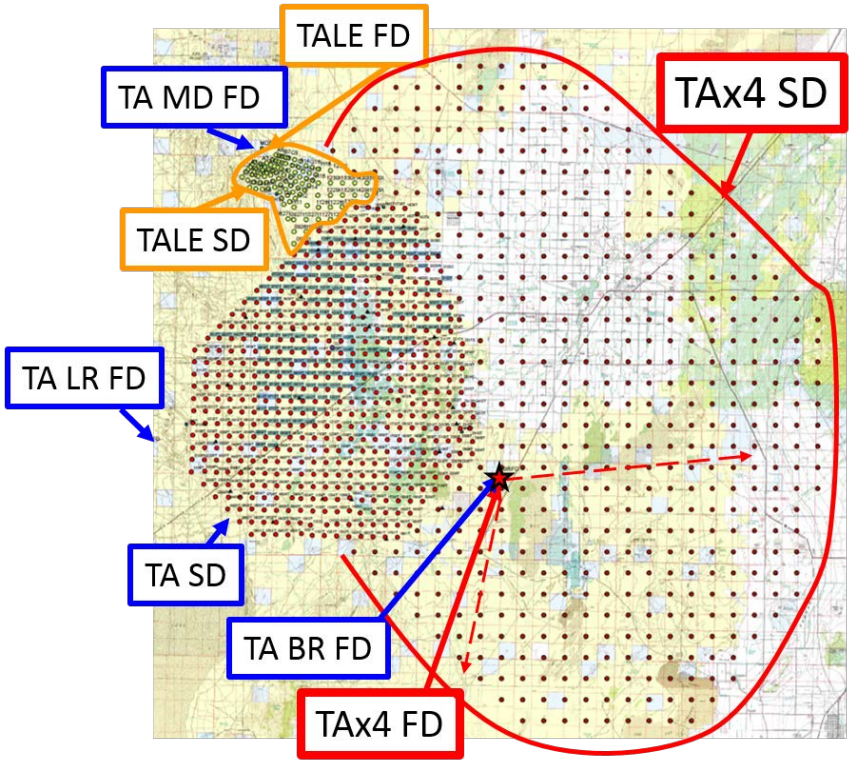
- TASDを4倍(~3000 km^2)に拡張
  - 500台のシンチレータ検出器(3m^2)を2.1 km間隔で設置 (日本担当)

＋

- HiRes望遠鏡を一ヵ所設置（米国）

⇩

- 異方性、スペクトル、組成の高統計測定
- UHE γ, UHE ν 探索



2.1km間隔での性能（E > 57 EeV）

- 角度分解能：2.8度
- エネルギー分解能：～25%
- Reconstruct efficiency:～94%

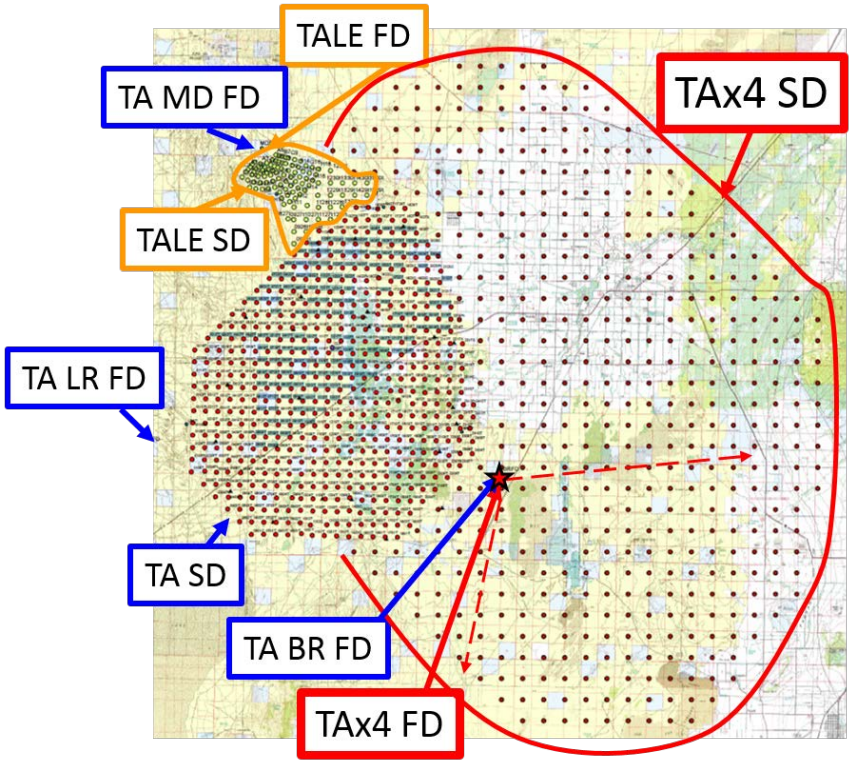
TA×4のタイムスケジュールと期待取得データ

年度	建設/観測	地表検出器（SD）		ハイブリッド（HYB）	
	サイズ	TA SD (=1)	追加 SD (=3)	TA HYB (=1)	追加 HYB (=1)
H20～H25 (TA)	観測	6	0	6	0
2 年間	建設期	2	0	2	0
3 年間	観測	3	9	3	3
小計		11	9	11	3
合計		20 年 TA SD		14 年 TA HYB	

TA×4 の取得データ。SD、HYB データはそれぞれ TA SD、TA ハイブリッドデータの 1 年分を 1 単位とする。

TA×4の概要

- 異方性の測定
  - TAの5年間のデータで~3σの異方性
  - ⇩
  - 2年の建設を含めて5年のスケールで5σ以上の異方性の観測が期待される



組織と予算

- 組織
  - TA
- 予算
  - 日本担当分：約5億円

TAとAugerの結果の理解と関連して

- エネルギースペクトル、質量組成、到来方向
  - TAとAugerとの
    - 解析手法の相互理解、共同解析、共同試験
- エネルギー
  - ELS（電子加速器光源）
    - TAサイトでのFDのenergy end-to-end calibration
  - Auger標準光源をTA FDで観測
  - SD-FDエネルギースケールの違い（TA: E_{SD}/E_{FD}=1.27）
- 質量組成
  - Augerのad hoc 組成モデルをもとにした空気シャワーをTAで再構成
  - Auger muon excess: Auger SD → TAサイト
  - 最近のハドロン相互作用モデルとの比較
  - 地表検出器による質量組成同定
- 到来方向
  - AugerとTAのイベントを合わせた全天解析（これまで$E > 10^{19}$ eV）

まとめ

- TAの5年間のデータの結果
  - エネルギースペクトル
    - 宇宙線頻度が最高エネルギー領域でGZK cutoff予想と矛盾のない急激な減少の確認　・$10^{19.8}$eV以上で5.7σ
  - 組成：陽子と矛盾なし
  - 異方性
    - 異方性のヒント: 3σ程度の有意度　・ホットスポット (20°)　3.6σ
- TA×4の拡張計画
  - TAx4: TA SD apertureを4倍にする提案
    - 建設開始後5年で計20年分のTASDデータ→5σ程度の異方性の観測が期待される
    - エネルギースペクトル、質量組成の高統計測定、UHEγ, ν探索

⇩

- 最高エネルギー宇宙線物理の描像を明らかにする