

TA実験地表検出器アレイによる
極高エネルギー宇宙線空気シャワー中の
ミューオン数の解析

Ryuji Takeishi

ICRR

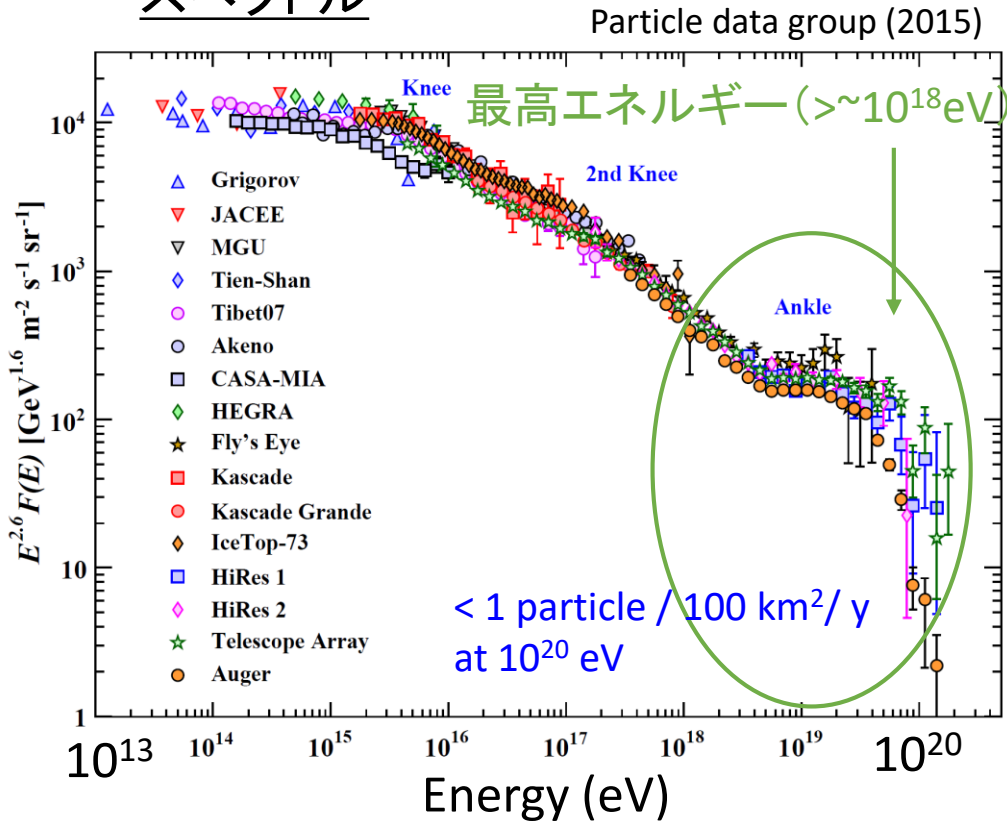
2016.10.30 YMAP meeting

Outline

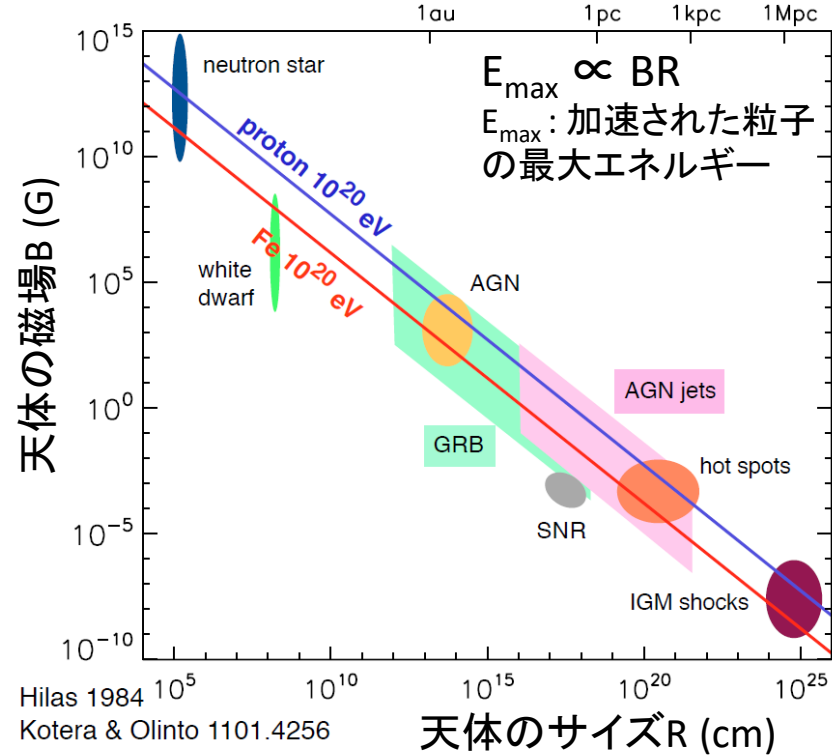
- 最高エネルギー宇宙線
- TA実験概要
- TA実験の最近の成果
- ミューオン過剰問題
- TA地表検出器を用いたミューオンの研究

最高エネルギー宇宙線

スペクトル

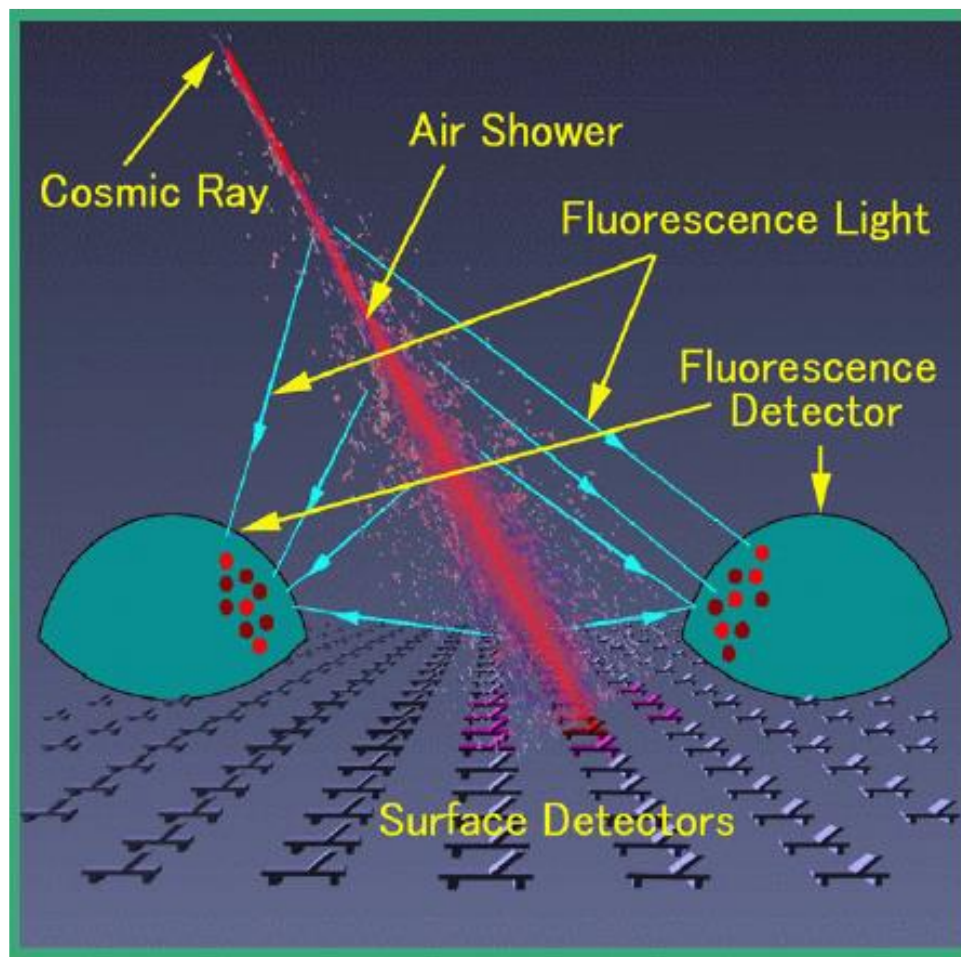


Hillas diagram



- スペクトルから発生源の天体の情報(発生源からの伝搬・発生源での加速機構)が得られる
- 発生源の候補はGRB, AGN等がある
- 宇宙背景放射の光子との相互作用 $p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow N + \pi$ により、 $10^{19.8}$ eV 以上のエネルギーではフラックスがカットオフ
 → 発生源の天体への距離は <~250Mpc

最高エネルギー宇宙線の観測手法



シャワーサイズ：数km

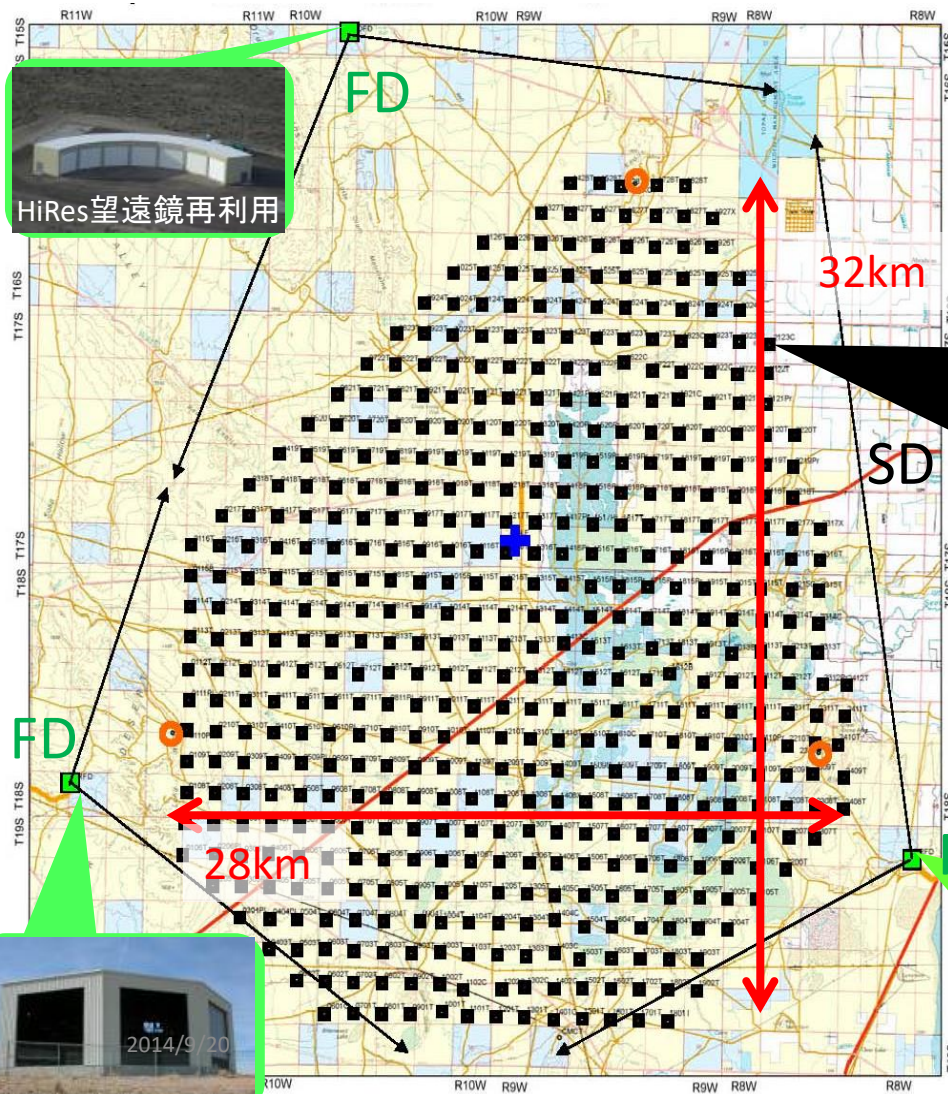
- 到来頻度が少ないため、一次宇宙線から発生する空気シャワーで観測する
- 地表粒子検出器アレイ (SD) : シャワー粒子の横方向分布からエネルギー、到来方向を観測
(24時間稼働)
- 大気蛍光望遠鏡 (FD) : 空気シャワーの縦方向発達からエネルギー、組成を観測
(稼働時間は年間の10%だが、SDより精度よくエネルギーが求まる)



テレスコープアレイ実験

• 米国ユタ州デルタ

-39.30°N, 112.91°W, 標高1400m



HiRes望遠鏡再利用



地表検出器アレイ (SD)
3m²のシンチレータ検出器
507台、1.2km間隔
有効検出面積700km²



大気蛍光望遠鏡 (FD)

仰角方向: 3~33°

2008年3月よりハイブリッド観測



Telescope Array collaboration

5か国・約120名の国際共同実験(日本・アメリカ・韓国・ロシア・ベルギー)

川田和正, 阿部理彦^D, 池田大輔, 石井孝明^A, 石森理愛^B, 伊藤裕貴^C, 井上直也^D, 今岡慧^P, 内堀幸夫^E, 有働慈治^F, 大岡秀行, 大木薫, 大嶋晃敏^d, 大西宗博, 大野木瞭太^G, 荻尾彰一^G, 奥田剛司^H, 小倉潤^B, 小澤俊介^I, 小野勝臣^e, 垣本史雄^F, 笠原克昌^I, 門多顕司^J, 亀井啓太^P, 河合秀幸^K, 川上三郎^G, 川名進吾^D, 岸上翔一^G, 北村星爾^B, 北村雄基^B, 木戸英治, 小西翔吾^G, 齊藤公紀, 齊藤保典^C, 榊直人, 佐川宏行, 佐久間康二^B, 櫻井信之^G, 佐原涼介^G, 芝田達伸^R, 下平英明, 申興秀, 須澤拓光^D, 高木芳紀^G, 高橋優一^G, 高村茉衣^O, 瀧田正人, 武石隆治, 武多昭道^L, 竹田成宏, 田中公一^M, 田中秀樹^G, 田中真伸^R, 多米田裕一郎^F, 千川道幸^N, 千葉順成^O, 辻本まい^O, 堤一樹^B, 常定芳基^G, 得能久生, 富田孝幸^C, 永澤啓介^D, 長滝重博^C, 中村亨^P, 西本義樹^G, 野里明香^N, 野中敏幸, 林幹樹^C, 林嘉夫^G, 林田直明^F, 日比野欣也^F, 福島正己, 藤井俊博, 本田建^A, 松平知也^P, 松山利夫^G, K. Martens^Q, 屋代健太^O, 山岡広^R, 山崎勝也^L, 吉井尚^S, 吉田滋^K, 和知慎吾^G, R. U. Abbasi^T, T. Abu-Zayyad^T, M. Allen^T, R. Anderson^T, E. Barcikowski^T, J. W. Belz^T, D. R. Bergman^T, S. A. Blake^T, R. Cady^T, M. J. Chae^Y, B. G. Cheon^U, W. R. Cho^V, W. Hanlon^T, D. Ivanov^T, C. C. H. Jui^T, O. Kalashev^X, H. B. Kim^U, J. H. Kim^T, J. H. Kim^a, V. Kuzmin^X, Y. J. Kwon^V, J. Lan^T, S. I. Lim^Y, J. P. Lundquist^T, J. N. Matthews^T, I. Myers^T, I. H. Park^b, M. S. Pshirkov^Z, D. C. Rodriguez^T, G. Rubtsov^X, D. Ryu^a, L. M. Scott^W, P. D. Shah^T, B. K. Shin^U, J. D. Smith^T, P. Sokolsky^T, R. W. Springer^T, B. T. Stokes^T, S. R. Stratton^{T, W}, T. A. Stroman^T, S. B. Thomas^T, G. B. Thomson^T, P. Tinyakov^{X, Z}, I. Tkachev^X, S. Troitsky^X, F. Urban^Z, G. Vasiloff^T, T. Wong^T, J. Yang^Y, R. Zollinger^T, Z. Zundel^T

東大宇宙線研, 山梨大工^A, 東工大理工^B, 理研^C, 埼玉大理^D, 放医研^E, 神奈川大工^F, 大阪市大理^G, 立命館大理工^H, 早大理工^I, 東京都市大工^J, 千葉大理^K, 東大地震研^L, 広島市大情報^M, 近大理工^N, 東理大理工^O, 高知大理^P, 東大カブリ数物^Q, 高工研^R, 愛媛大^S, Univ. of Utah^T, Hanyang Univ.^U, Yonsei Univ.^V, Rutgers Univ.^W, INR^X, Ewha Womans Univ.^Y, Univ. Libre de Bruxelles^Z, Ulsan Nat'l. Inst. of Sci. and Tech.^a, Sungkyunkwan Univ.^b, 信州大工^c, 中部大工^d, 九大院理^e



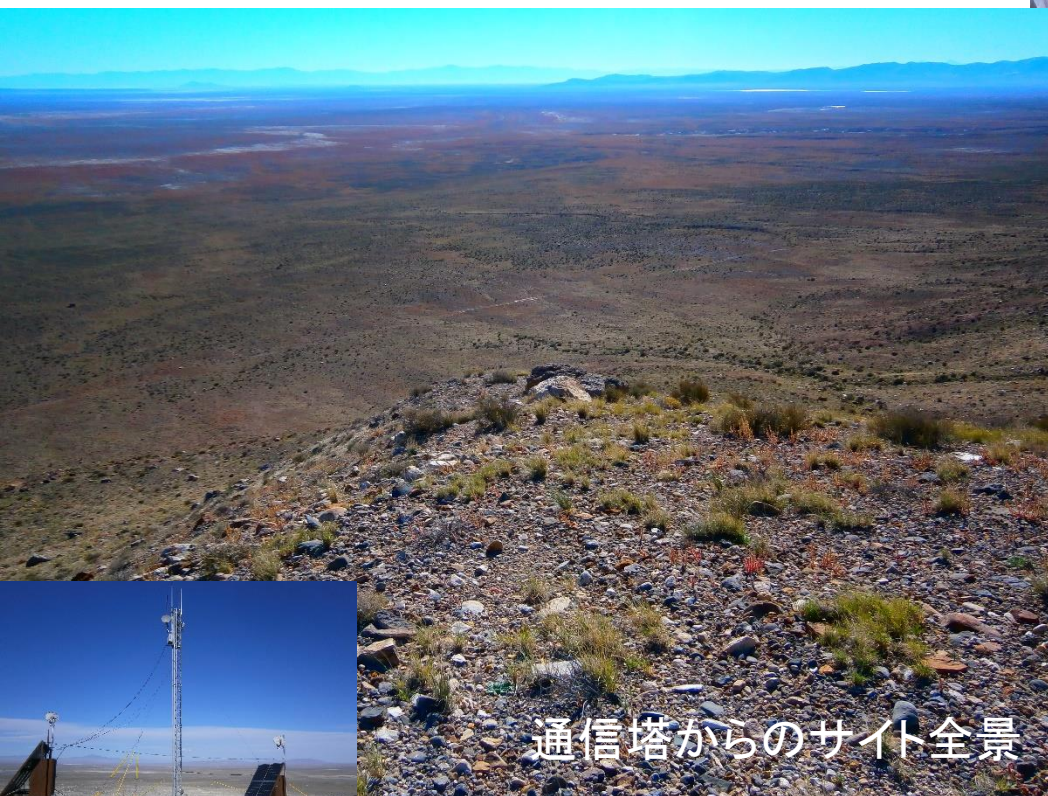
05/18/2014 10:49 AM
サイト近隣の宇宙線センター



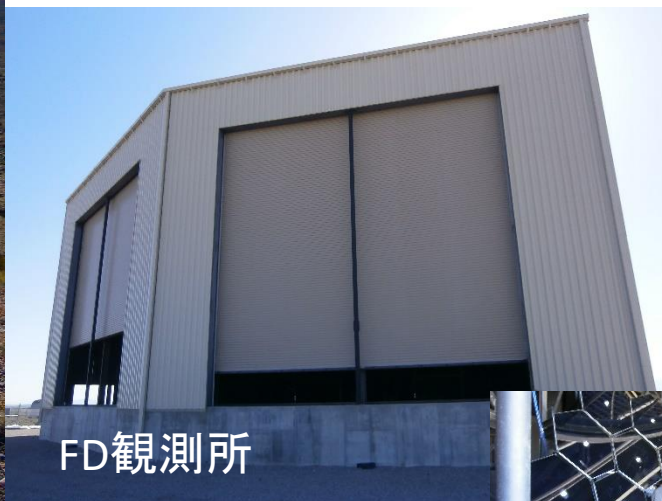
アルパカ



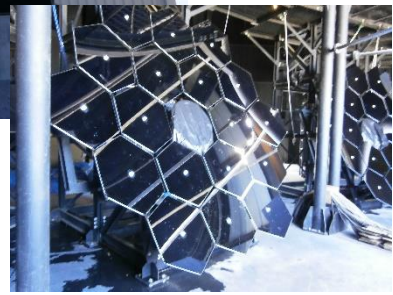
宇宙線センター裏の検出器



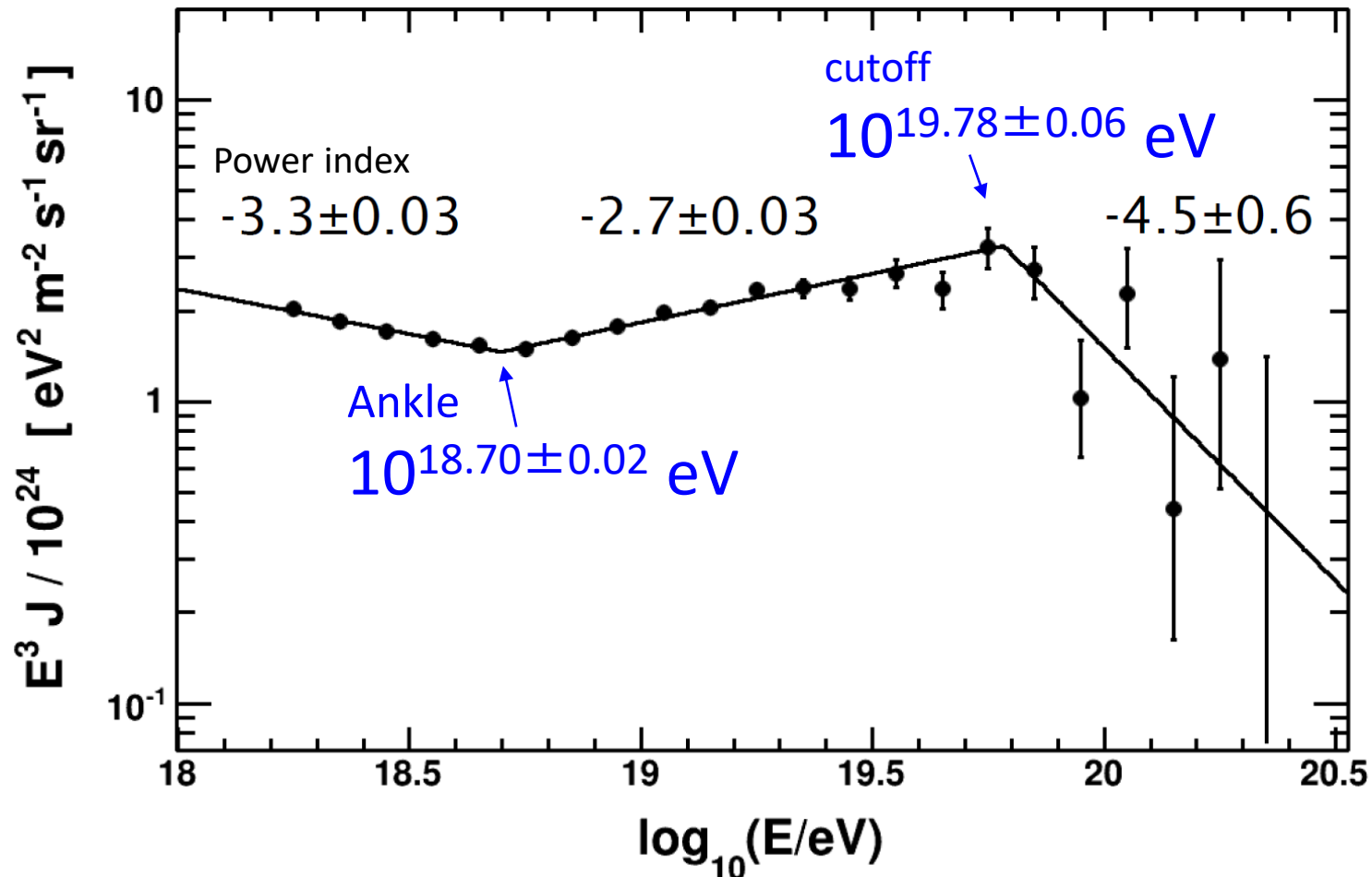
通信塔からのサイト全景



FD観測所



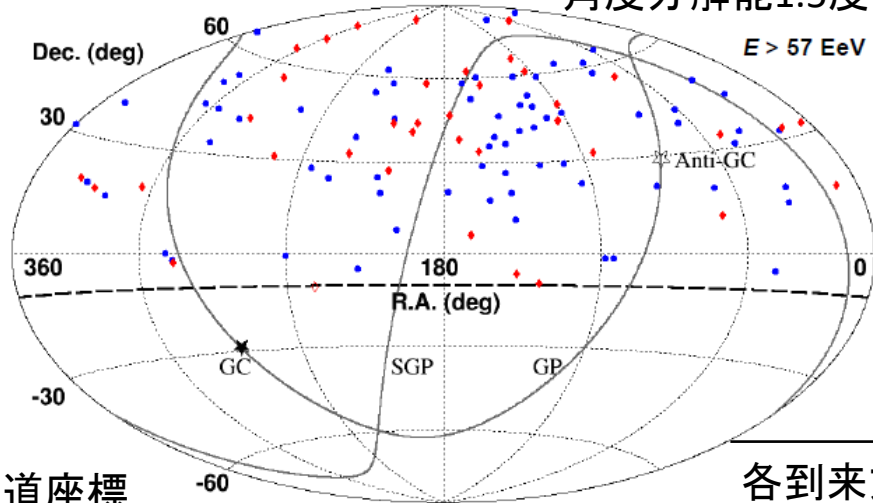
TA エネルギースペクトル



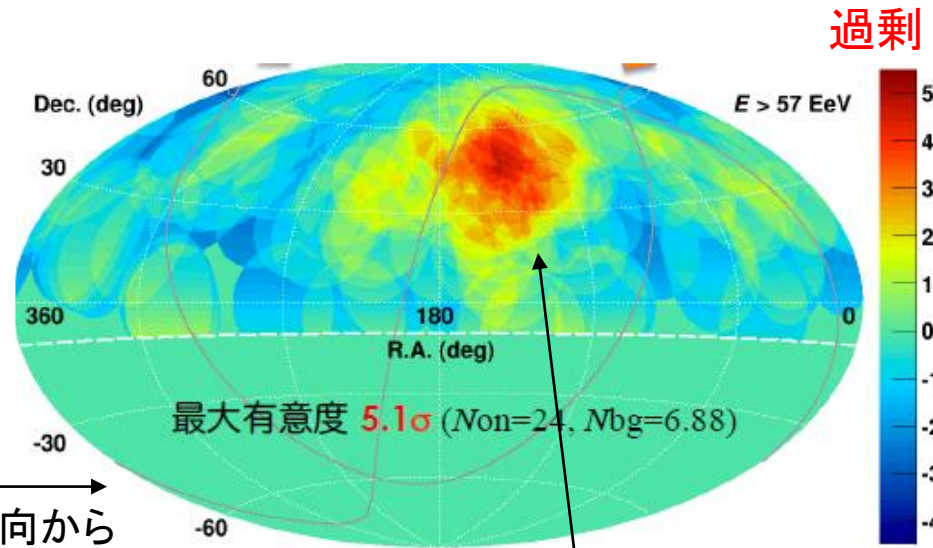
- 7年間データのBroken power law fit
- SDで観測したエネルギーをFDで補正
- $\sim 10^{19.8} \text{ eV}$ でカットオフ(有意度 6σ)

7年間データによる宇宙線源の兆候

E > 57 EeV (1 EeV: 10^{18} eV) 宇宙線の
到来方向 (72 イベント) 角度分解能 1.5 度



一様な到来方向からの有意度マップ



最大有意度 5.1σ (Non=24, Nbg=6.88)

各到来方向から
20度の領域を加算

等方的な分布の場合に 5.1σ 以上の有意度を得る偶然確率: 3.7×10^{-4} (3.4σ)

赤道座標
最初の5年間データ
最新の2年間データ

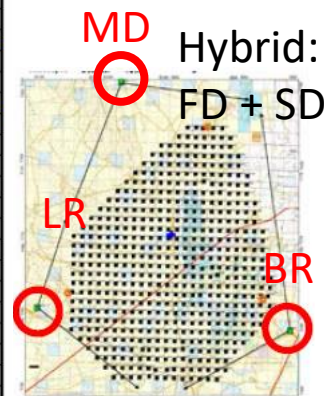
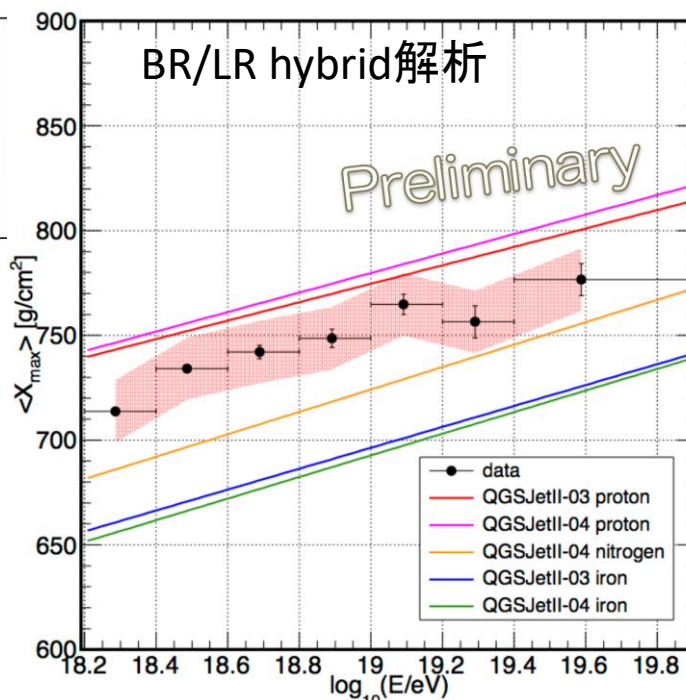
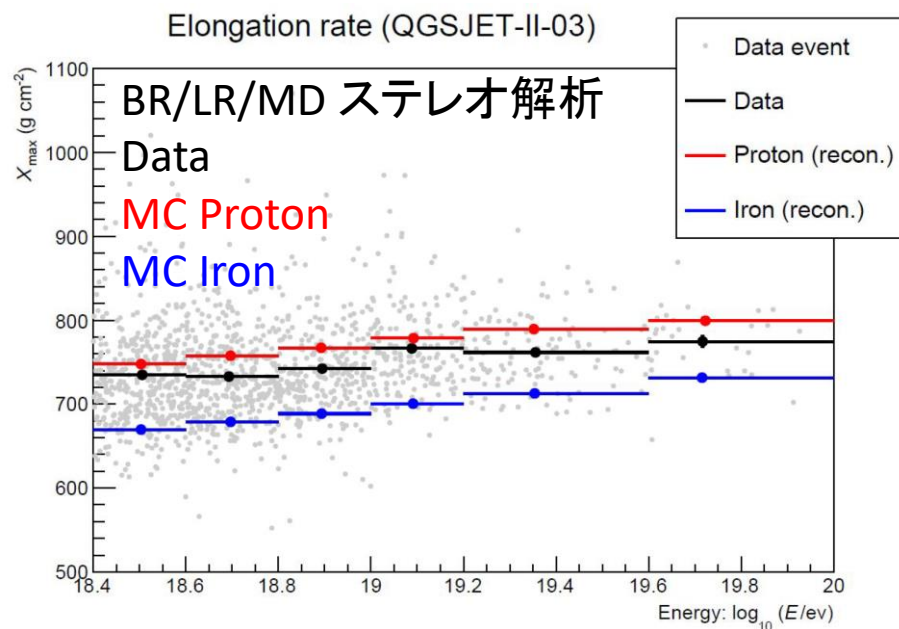
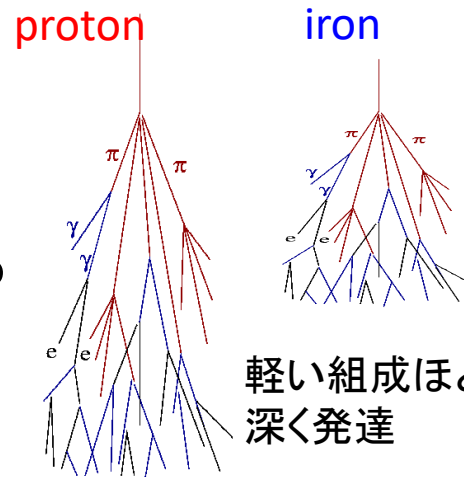
観測期間:
2008年5月11日 - 2015年5月11日: 109 events

TA実験による最高エネルギーで初めて高い有意度での異方性
→ 宇宙線源の兆候?

組成

空気シャワーの最大発達深さ(X_{\max})を組成の指標に用いる

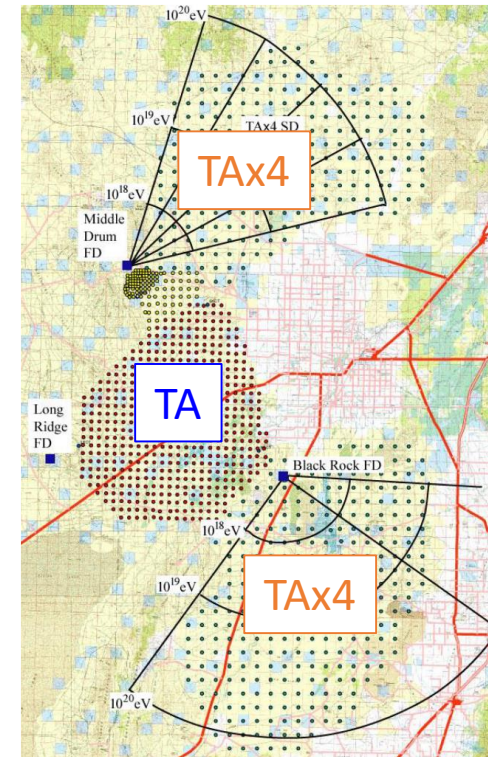
TAではMD, BR, LRという3台のFDに対して、
複数の解析手法を行うことで系統誤差を理解する



観測結果は Light composition を示す

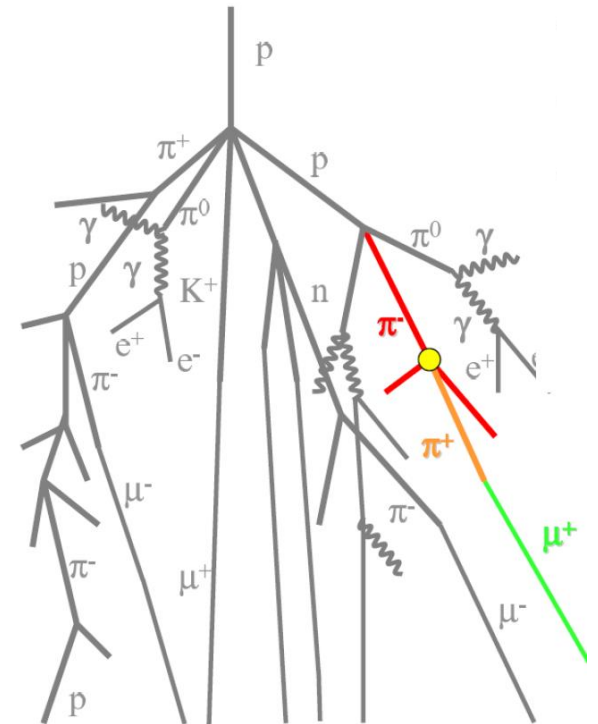
TA観測 現状のまとめ

- 最高エネルギーでのスペクトルのカットオフを確認
- 到来方向の異方性のホットスポットの兆候 ($>3\sigma$)
- スペクトル・ X_{\max} は陽子組成 (または軽元素) を示す観測結果
- ホットスポットの確証を得るため、拡張計画が進行中



μ excess issue

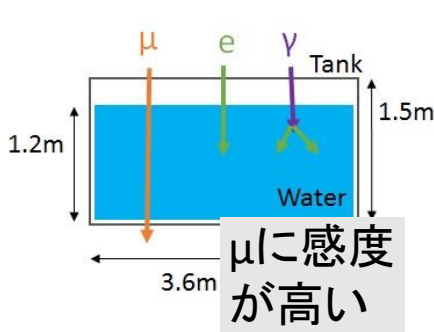
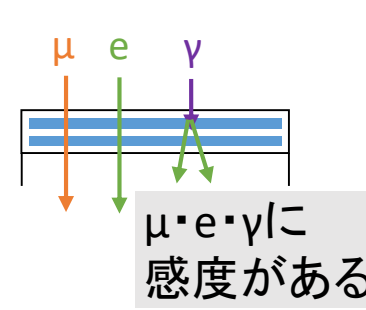
- UHECRは加速器で未到達のエネルギー領域であり、MCのハドロン反応モデルは衝突断面積、発生多重度などに低エネルギーからの外挿値を用いている
 - 空気シャワー粒子には電子・ γ ・ミュオンなどが含まれる
ミュオン数は一次宇宙線の組成に依存
ミュオン数のMCによる期待値は、計算で用いるハドロンモデルにも依存
- ↓
- ミュオン数の観測値とMCの期待値との比較はモデルの制限に有用



μ excess issue

Auger実験におけるミュオン過剰

Auger実験:
南米における極高エネルギー宇宙線の
観測実験

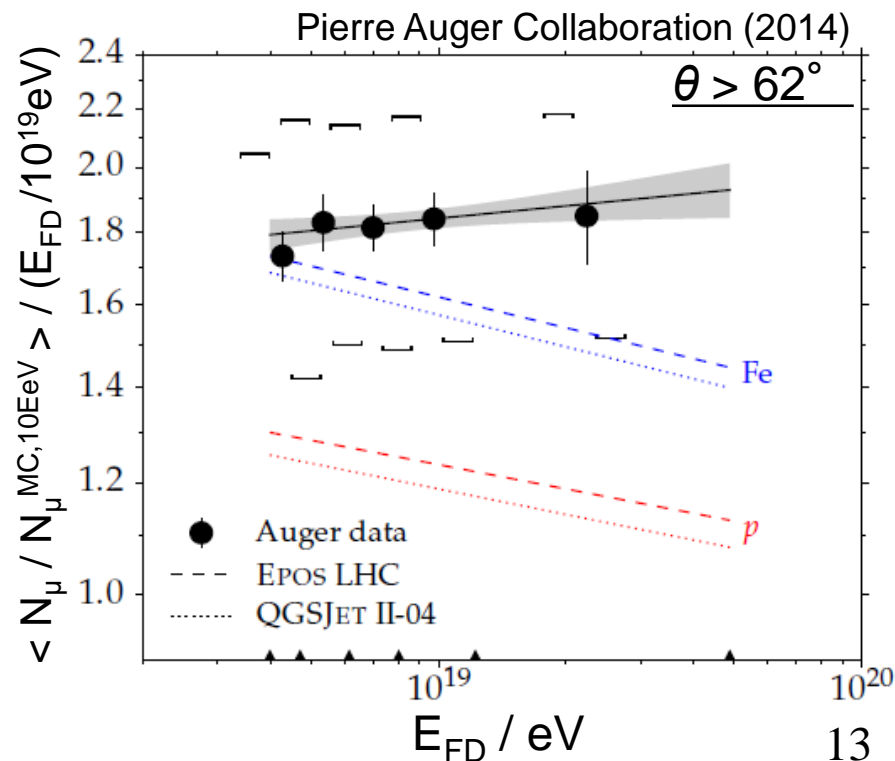


SDで測定した宇宙線空気シャワー
中のミュオン数 N_μ において

$$N_\mu^{\text{data}} \simeq 1.8 N_\mu^{\text{MC}}$$

(MC: proton, QGSJETII-03 model)

MCの計算モデルの期待値が
観測値と合わず、空気シャワー解析の
不定性をもたらしている



Motivation of μ study

TA SD での空気シャワー中のミュオン数を解析する

- ・ 一次宇宙線の組成は陽子と仮定
- ・ ミュオン過剰が起きているか調べる

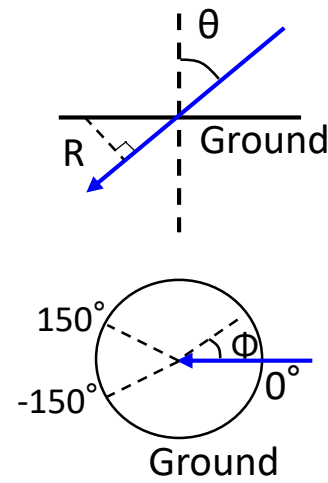
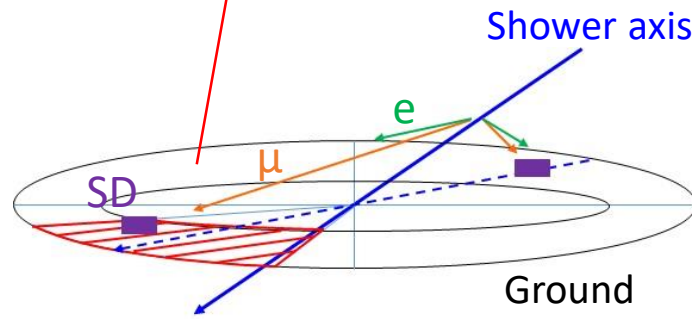
TA SD 信号のほとんどは空気シャワー中の電磁成分が由来
ミュオン数の解析には、独自の手法が必要

- ・ 信号中の空気シャワーのミュオンの純度が高い
TA SD の選別条件を調べる
- ・ その条件で data・MC の到来粒子数の違いを理解する

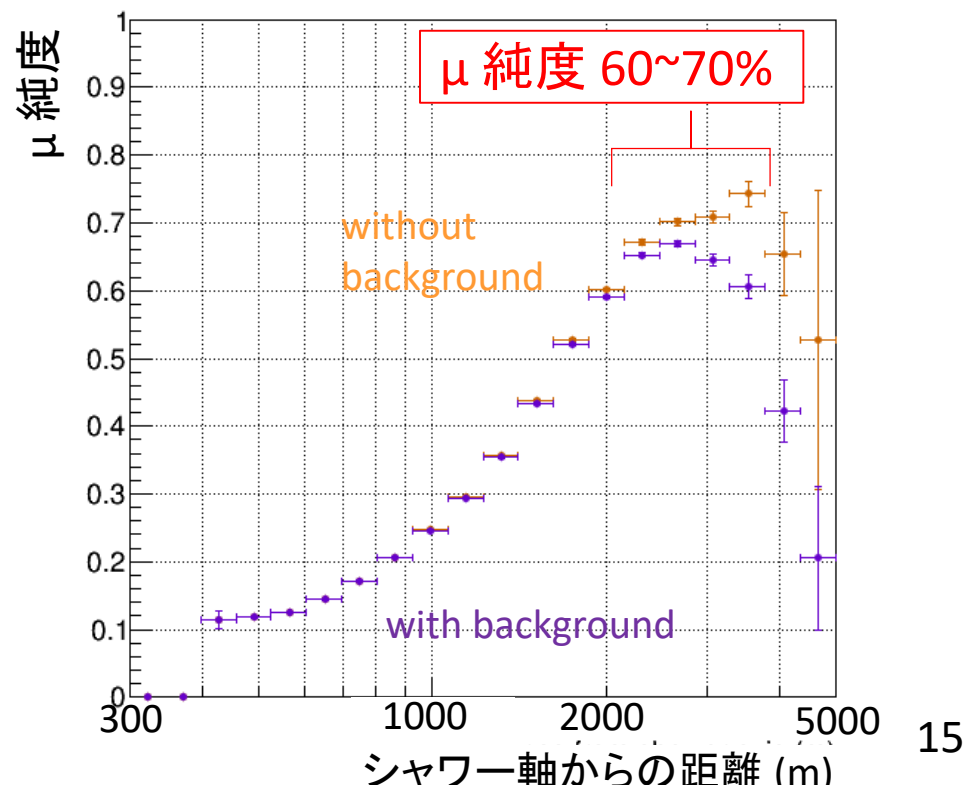
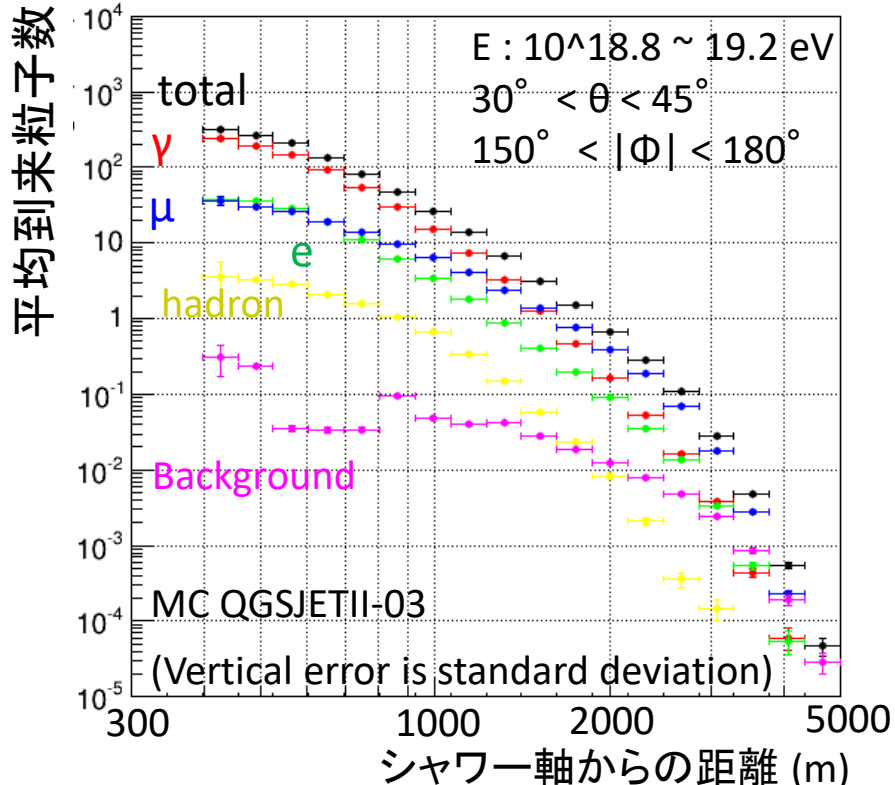
Lateral distribution in each particle types

$30^\circ < \theta < 45^\circ$, $150^\circ < |\Phi| < 180^\circ$
 2000m < R < 4000m に位置する
 SD を解析する

シャワーから遠方で電磁成分が減衰し、SDに届く μ の比率が上がる



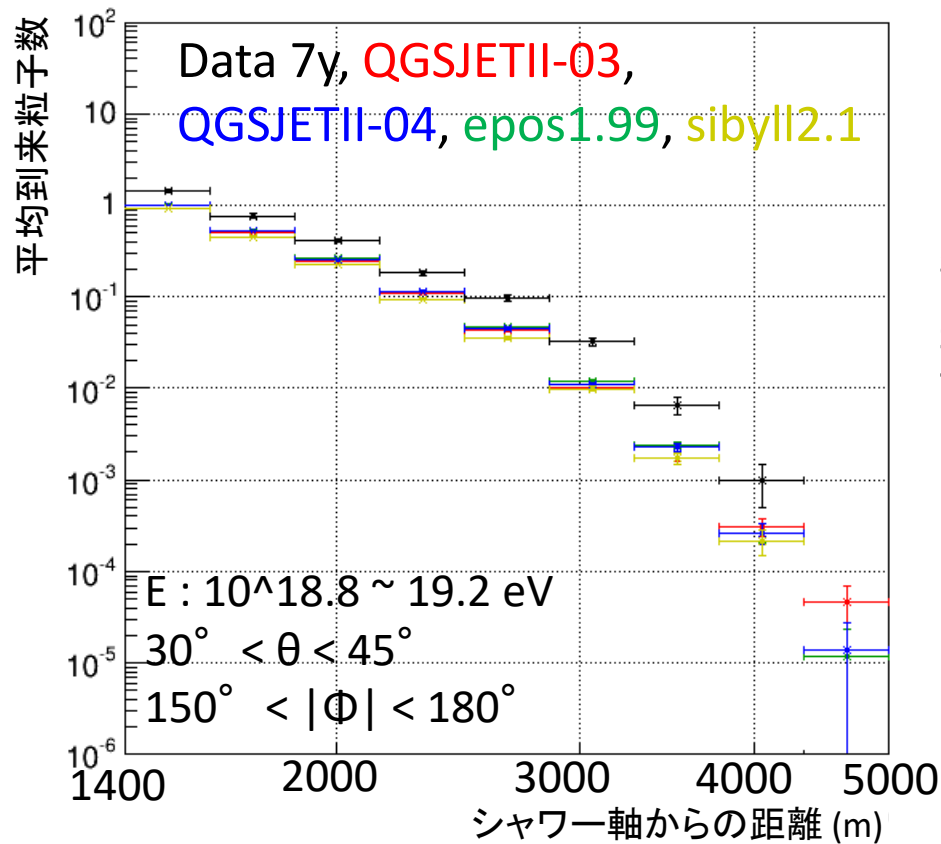
$$\mu \text{ 純度} = \frac{\text{空気シャワーからのミュオン数}}{\text{空気シャワーからの到来粒子数} + \text{バックグラウンド}}$$



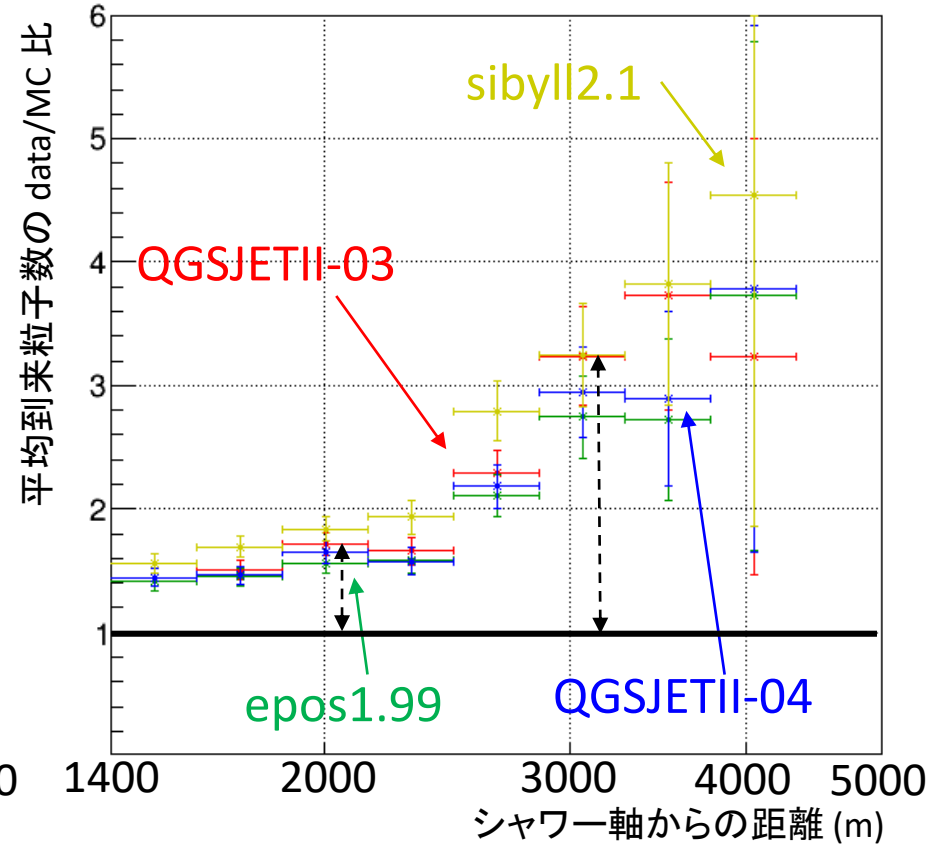
Results

- 異なるハドロンモデルを用いたdata/MC比較
- 複数のモデルにおいて、dataはMCより大きい

Lateral distribution



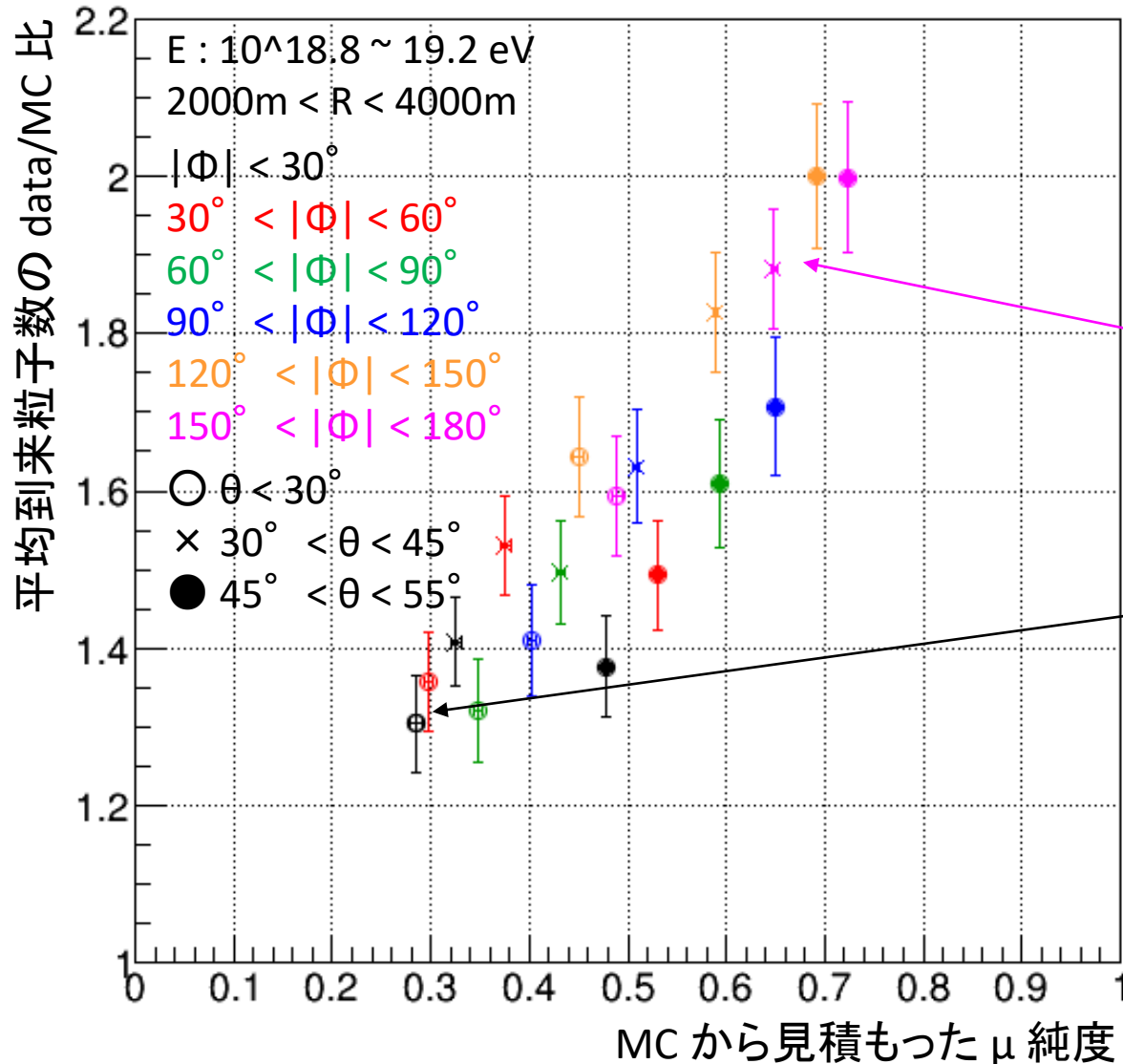
Data/MC ratio



For QGSJETII-03, $1.71 - 0.094 + 0.095$ ($1870 \text{ m} < R < 2150 \text{ m}$)
 $3.24 - 0.40 + 0.40$ ($2850 \text{ m} < R < 3280 \text{ m}$)

(θ, Φ) - μ purity comparison

(θ, Φ) 条件を変えた場合の μ 純度と data/MC 比の相関



- (θ, Φ) 条件によりシャワー軸と検出器の間の大気厚みが変わり、 μ 純度も変わる

• For $30^\circ < \theta < 45^\circ$
 $150^\circ < |\Phi| < 180^\circ$,
 μ purity = $\sim 65\%$ and
 Data/MC = $1.88 - 0.08 + 0.08$

• For $\theta < 30^\circ$
 $|\Phi| < 30^\circ$,
 μ purity = $\sim 28\%$ and
 Data/MC = $1.30 - 0.06 + 0.06$

μ 純度が高いほど
 data/MC 比が大きくなる

\rightarrow dataとMCの違いは
 μ 由来であることを示唆

Summary

TA実験

- 最高エネルギーでのスペクトルのカットオフを確認
- 到来方向の異方性のホットスポットの兆候 ($>3\sigma$)
- スペクトル $\cdot X_{\max}$ は陽子組成 (または軽元素) を示す観測結果

空気シャワー中のミュオン数の解析

- ミュオン純度が高い条件で、TA SD の空気シャワーからの到来粒子数の観測量はMCで期待される数より大きい
 μ purity expected from MC = $\sim 65\%$ の条件に置いて
Data/MC ratio: $1.88 - 0.08 + 0.08$ (stat.)
- ミュオン純度が高い条件での横方向分布の形は data と MC で異なり、軸からの距離が大きいと data/MC 比が大きい傾向がある