

TA実験の紹介

武石 隆治

2017.3.30

空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会

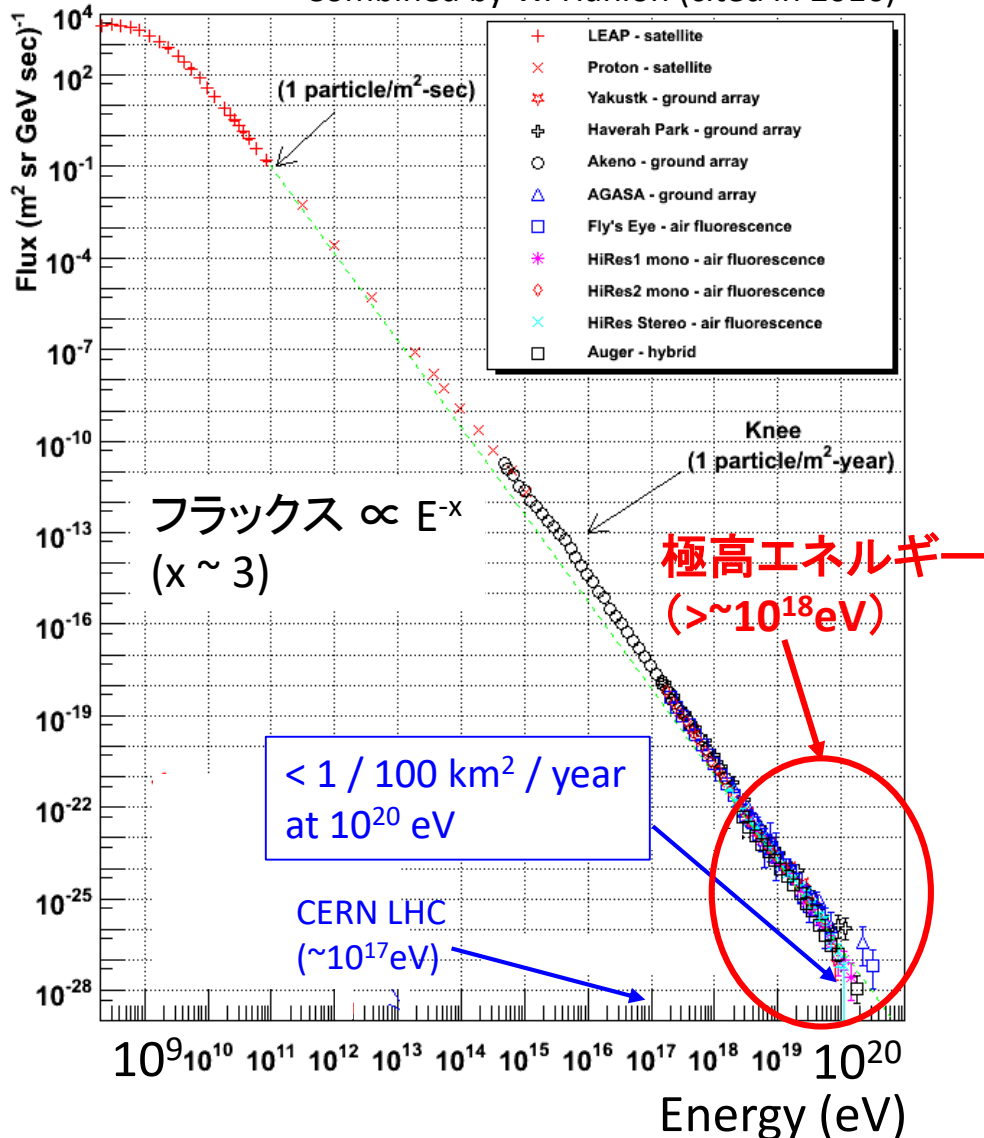
発表内容

1. 極高エネルギー宇宙線の研究の背景
2. テレスコープアレイ(TA)実験
3. 空気シャワー中のミュオンの研究

極高エネルギー宇宙線(UHECR)

地球に到来する宇宙線のスペクトル

Combined by W. Hanlon (cited in 2016)

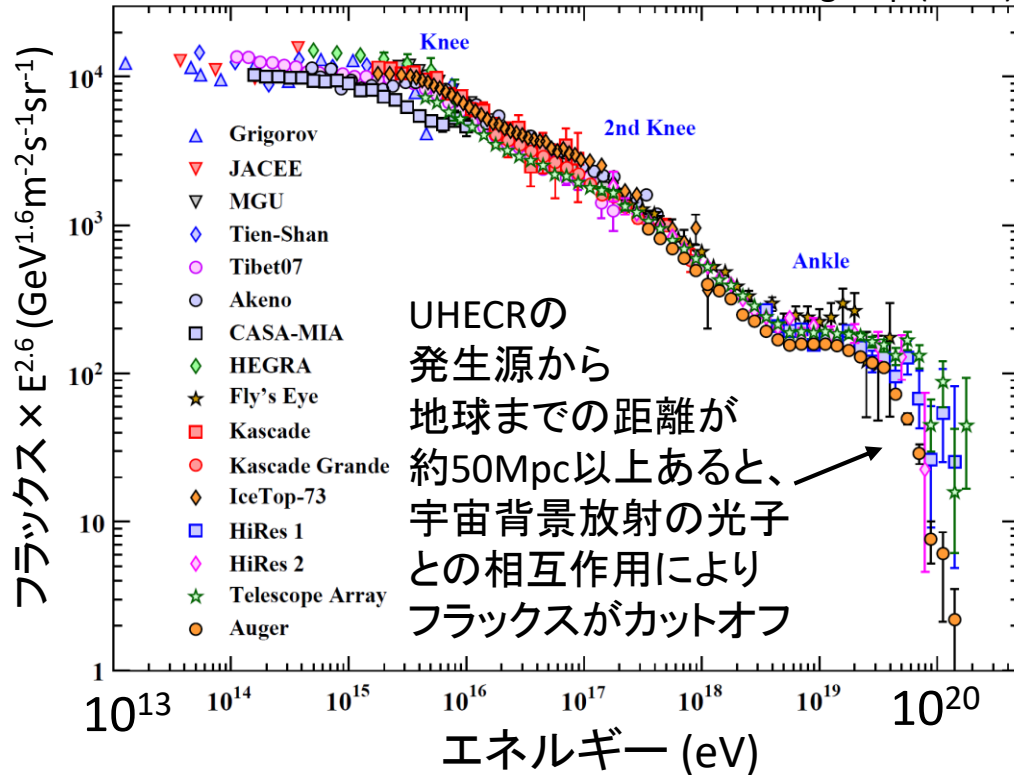


- UHECRは統計量が少なく、発生源は未解明

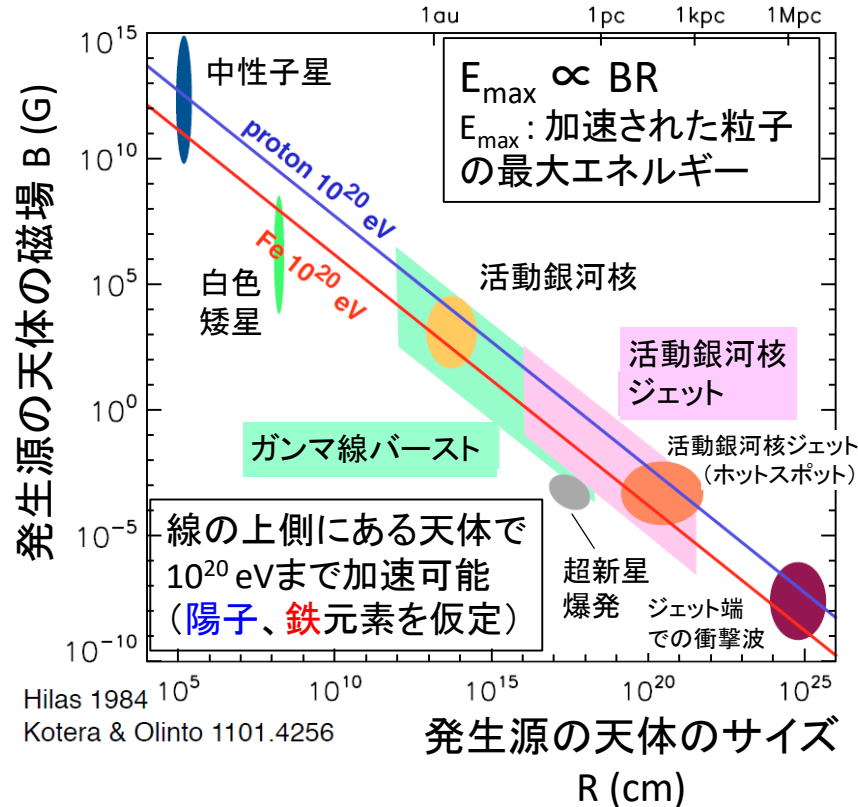
UHECRの発生源

地球に到来する宇宙線のスペクトル

Particle data group (2015)



10²⁰ eVまで加速可能な天体の候補

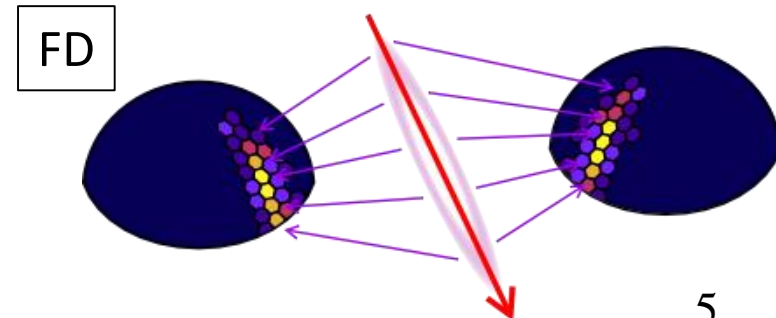
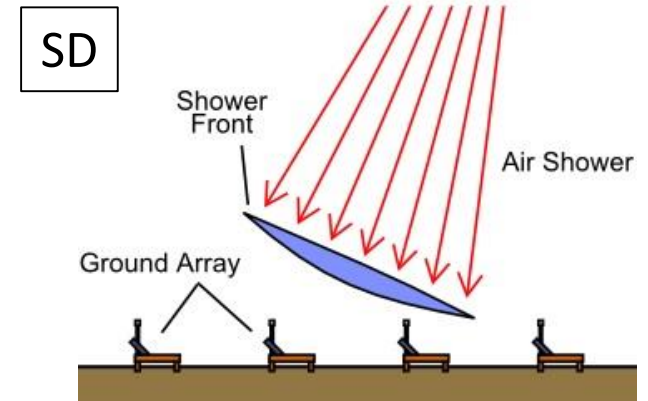
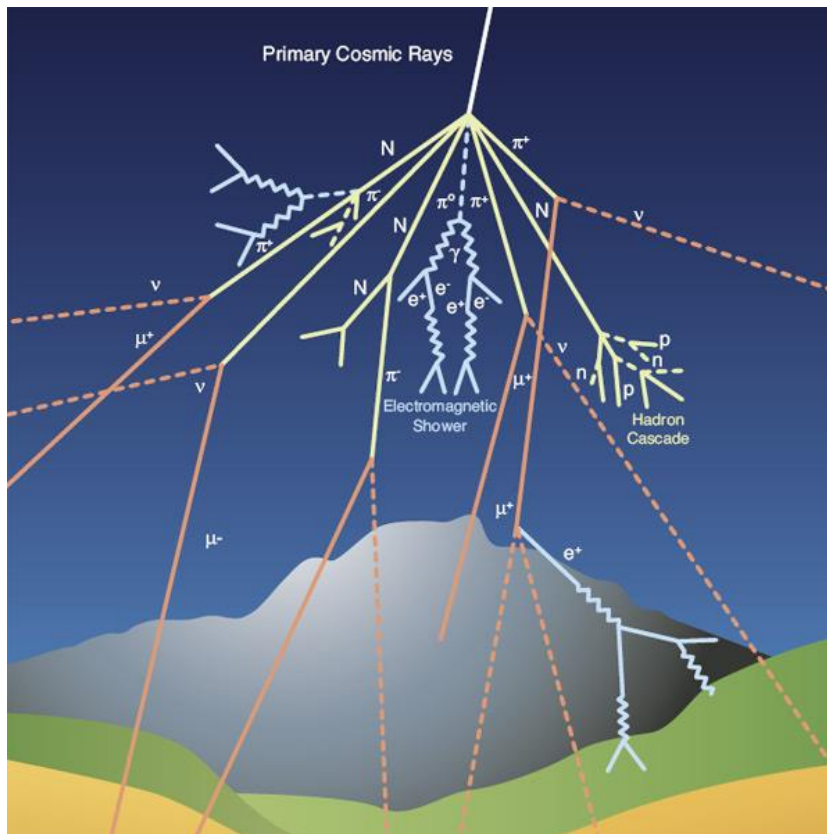


- UHECRの発生源の候補は、ガンマ線バースト、活動銀河核等
- 発生源の推定には、スペクトル、到来方向の異方性の測定が必要
- 宇宙線は銀河磁場・銀河系外磁場により曲がるため、原子核組成の測定も必要

UHECRの観測手法

- UHECRは直接観測が難しいため、一次宇宙線が大気粒子と衝突して起こすカスケード反応(空気シャワー)で測定する
- 空気シャワーMCを利用し、一次宇宙線のエネルギー・到来方向を再構成する

地表粒子検出器(SD): 地表面での二次粒子の電磁成分($e\cdot\gamma$)・ミューオン成分を測定
大気蛍光望遠鏡(FD): 大気中で電磁成分が発する蛍光を測定

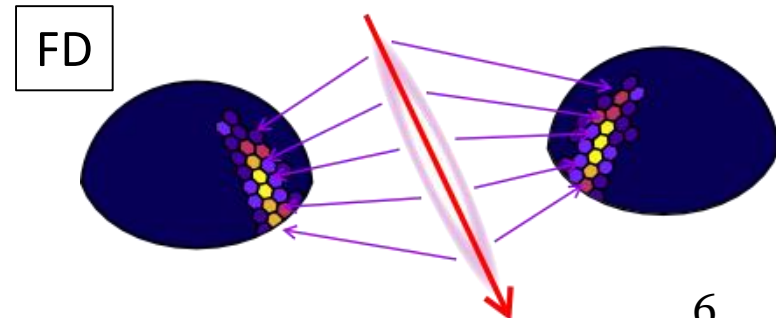
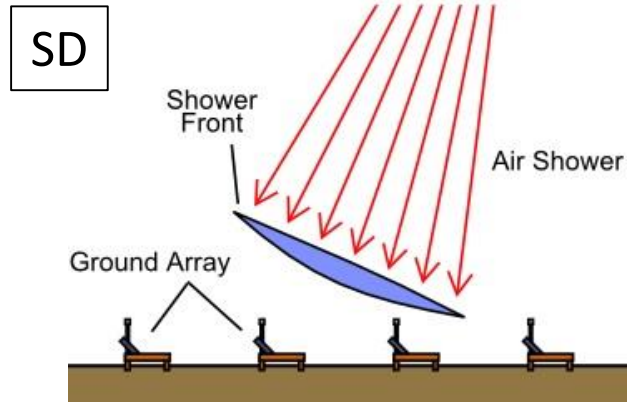
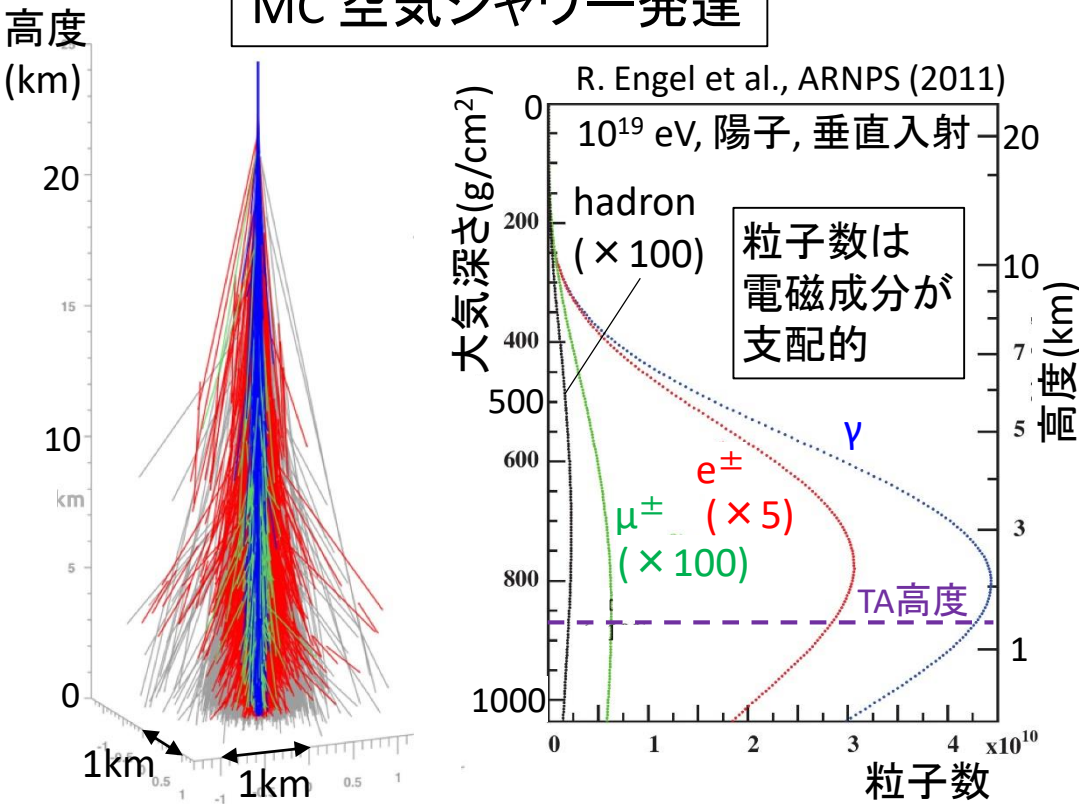


UHECRの観測手法

- UHECRは直接観測が難しいため、一次宇宙線が大気粒子と衝突して起こすカスケード反応(空気シャワー)で測定する
- 空気シャワーMCを利用し、一次宇宙線のエネルギー・到来方向を再構成する

地表粒子検出器(SD): 地表面での二次粒子の電磁成分($e\cdot\gamma$)・ミュオン成分を測定
 大気蛍光望遠鏡(FD): 大気中で電磁成分が発する蛍光を測定

MC 空気シャワー発達



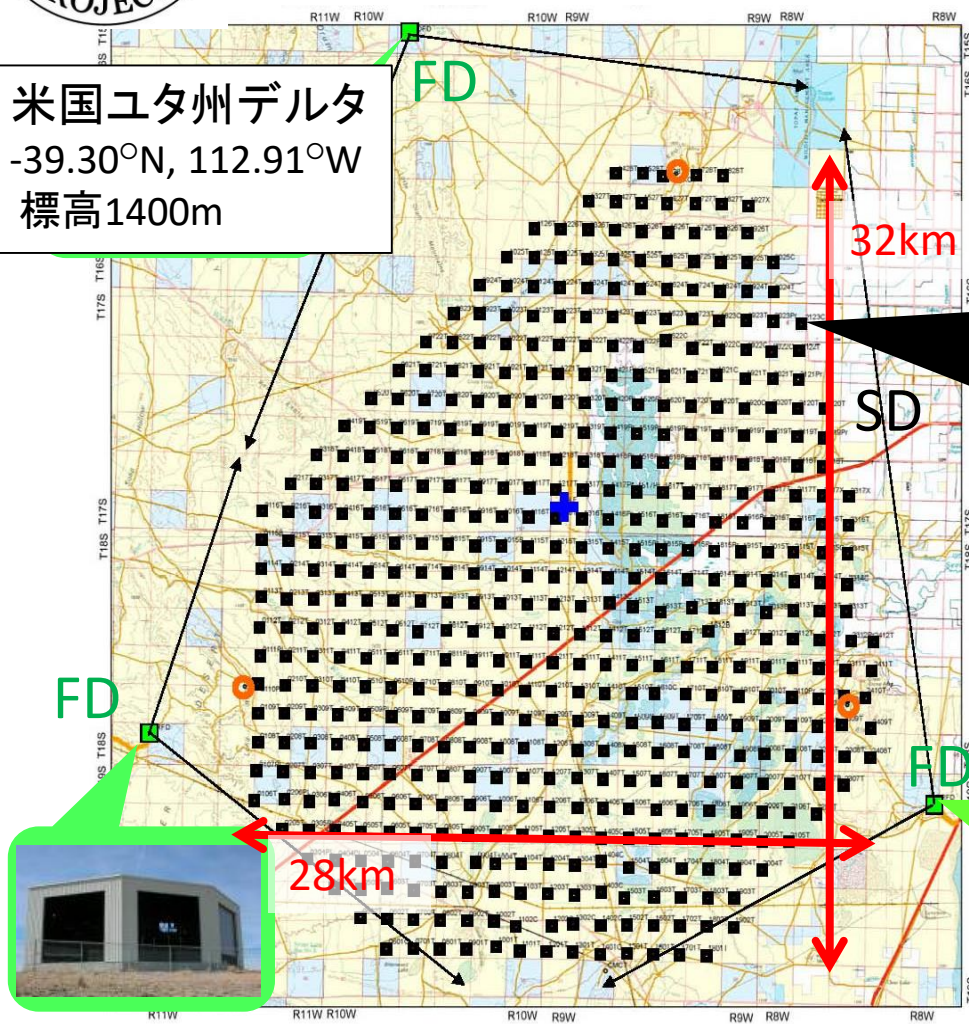


TA実験

5か国・約120名の国際共同実験

2008年5月からフル稼働

米国ユタ州デルタ
-39.30°N, 112.91°W
標高1400m



地表検出器(SD)アレイ
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)

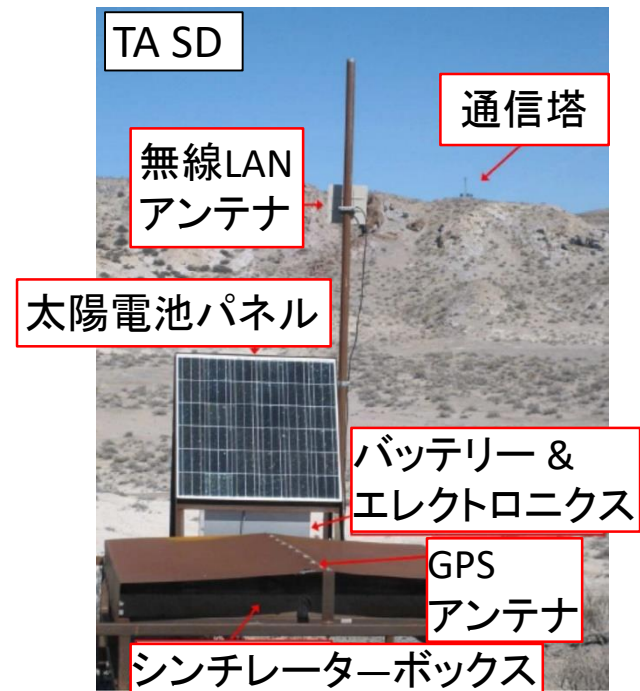


仰角方向: 3~33°

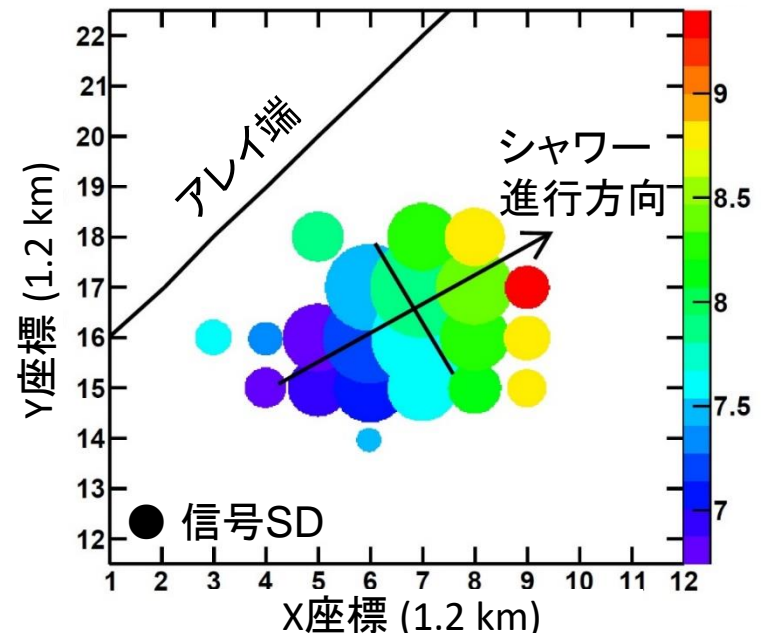
宇宙線のスペクトル、到来方向の異方性、原子核組成の観測から
UHECRの起源を探っている

TA SD

- 二層の平板プラスチックシンチレータ
- 荷電粒子がシンチレータを通過する際に生じるエネルギー損失（垂直入射で約2MeV）を記録
- 空気シャワーからの荷電粒子を取得
- 空気シャワー粒子信号の到来時間、粒子数密度分布から一次宇宙線の到来方向、エネルギーを再構成



1イベントの信号マップ 粒子到来時間 (4 μ s)

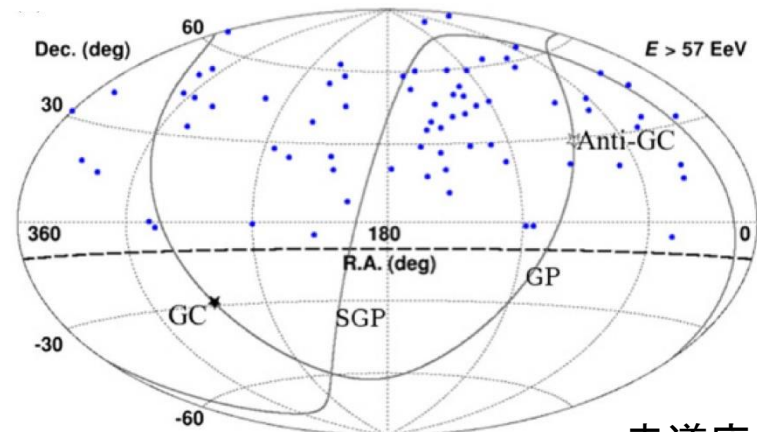
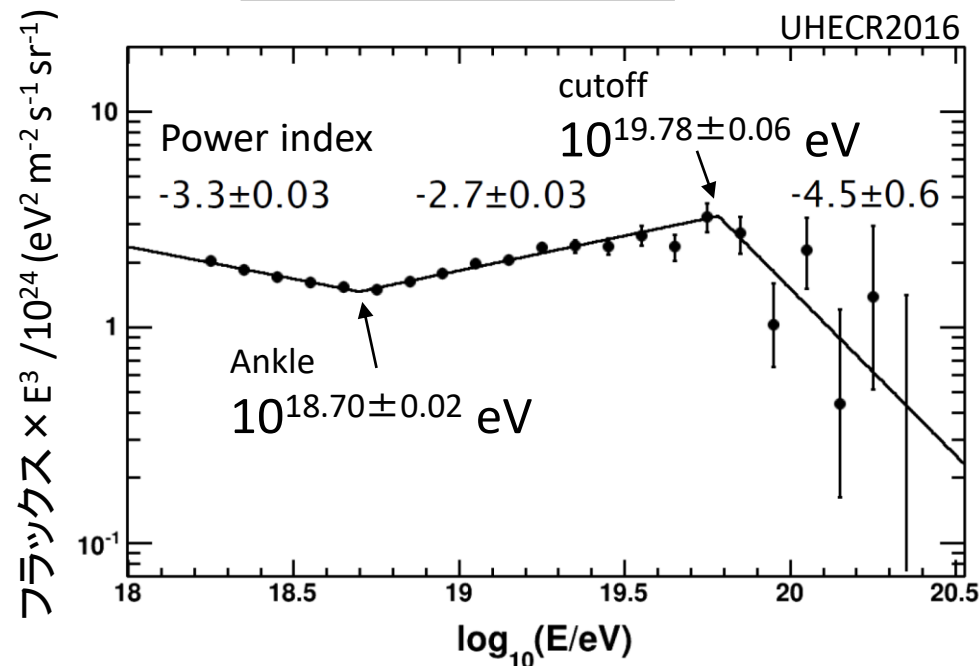


TA観測結果の現状(スペクトル、異方性)

ApJL, 790:L21 (2014)

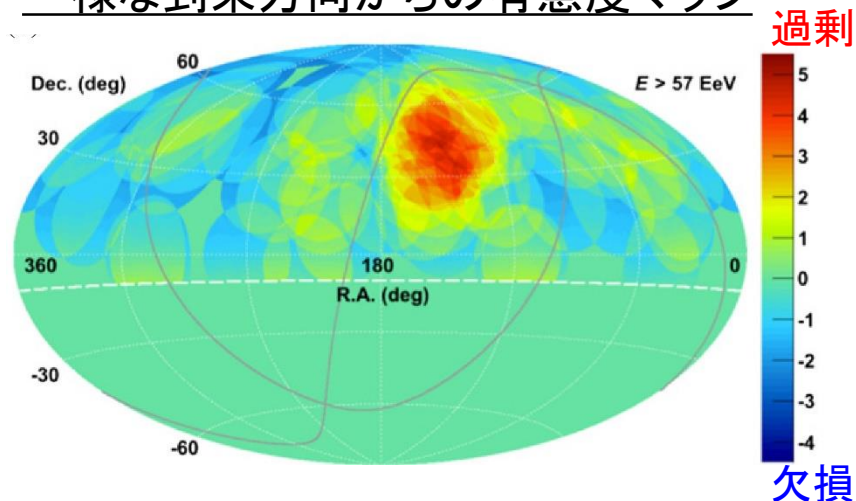
$E > 5.7 \times 10^{19} \text{eV}$ の宇宙線の到来方向

エネルギースペクトル



赤道座標

一様な到来方向からの有意度マップ



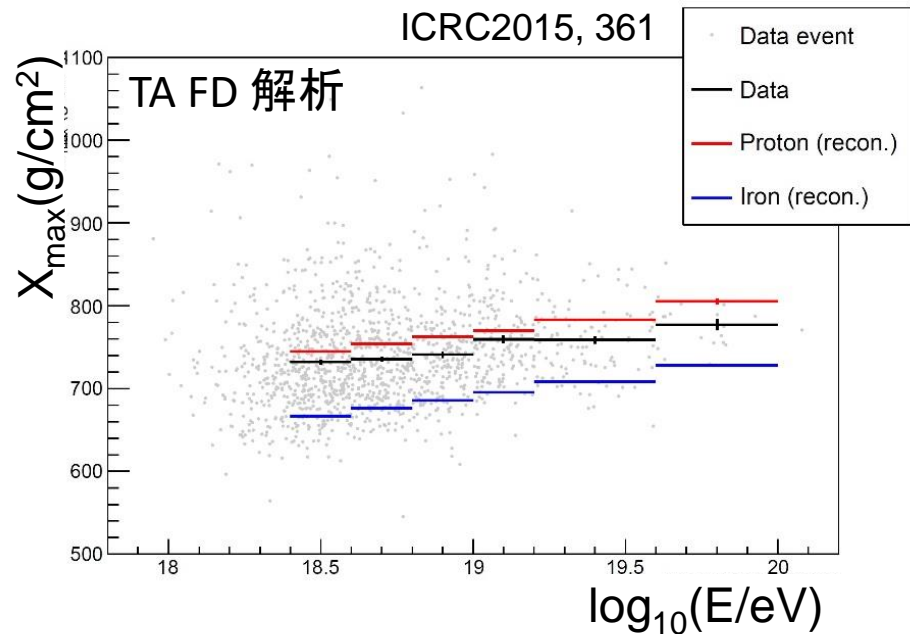
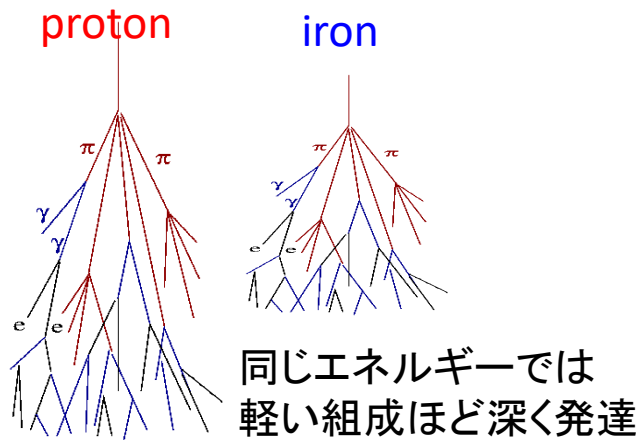
- 7年間データのBroken power law fit
- $\sim 10^{19.8} \text{eV}$ でカットオフ(有意度 6σ)

3.4σ の異方性 → 宇宙線源の兆候?

TA観測結果の現状(原子核組成)

原子核組成のエネルギー分布

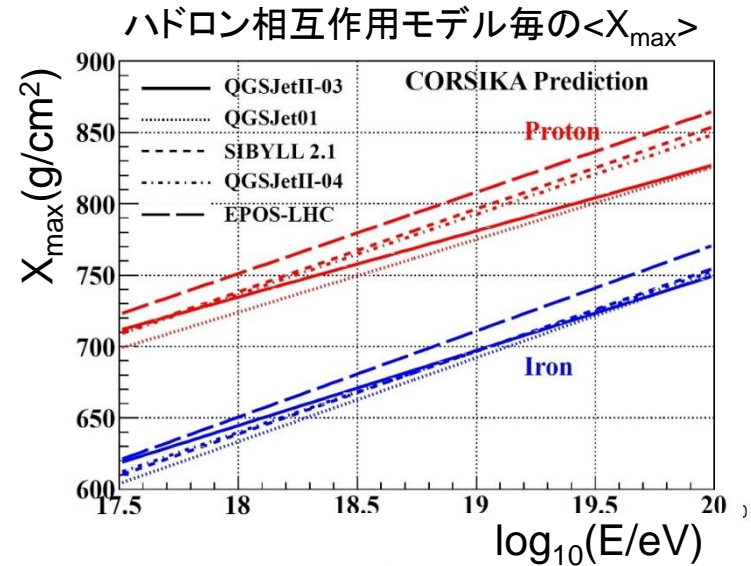
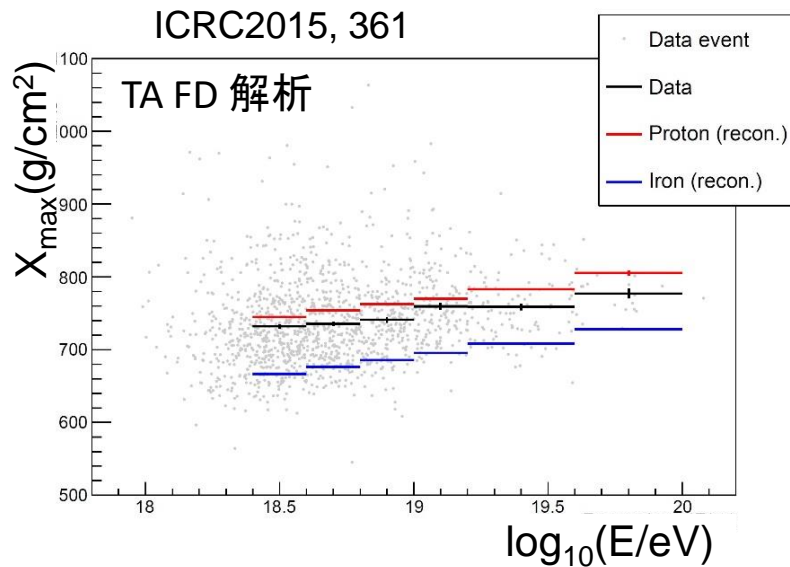
空気シャワー縦発達における最大発達深さ(X_{\max})を
原子核組成の指標に用いる



- 観測結果は軽元素を示す(陽子組成が系統誤差の範囲内)

UHECR観測結果の不定性

- UHECRは加速器で未到達のエネルギー領域であり、シャワーMCのハドロン相互作用モデルは衝突断面積などに低エネルギーからの外挿値を用いている
- 空気シャワーの全体像は理解されておらず、宇宙線原子核組成の観測結果にはMCのハドロン相互作用モデルの不定性がある



Auger実験におけるミュオン過剰

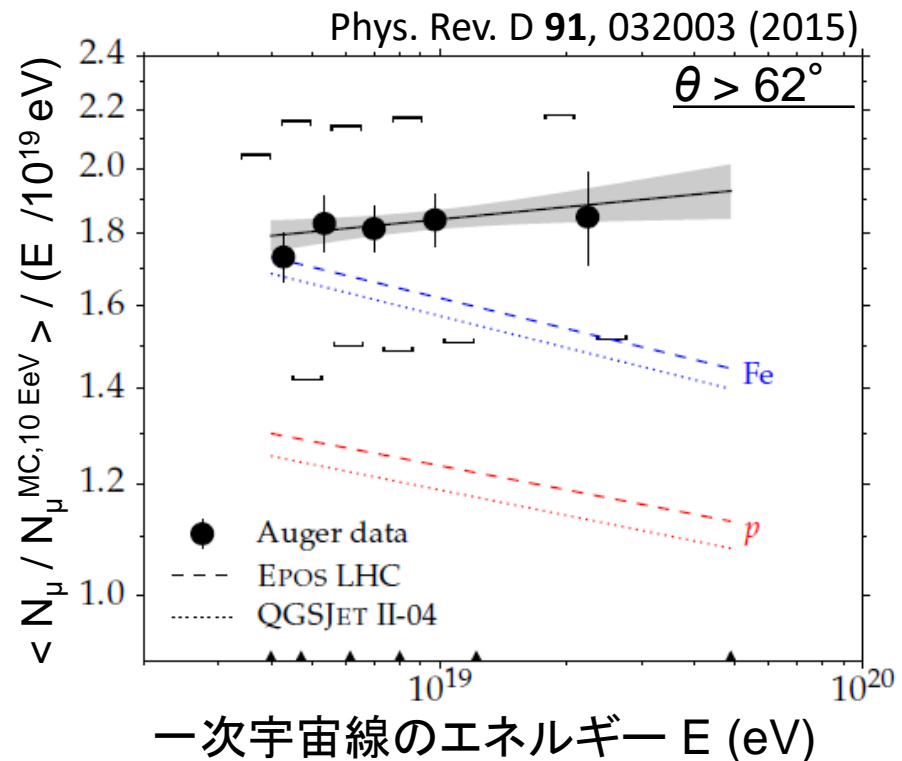
- Auger実験: 南米におけるUHECR観測実験
- 水タンク型SDで測定した宇宙線空気シャワー中のミュオン数 N_μ において

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

(MC: proton, QGSJETII-03 model)

• 既存のハドロン相互作用モデルは観測値を再現できない

- TA実験ではどうか?
→ 本研究



空気シャワーからのミュオン数の研究

研究の動機

- 原子核組成の観測結果の不定性、Auger実験のミュオン過剰
→既存のハドロン相互作用モデルは空気シャワーを完全には再現していない
- 空気シャワー粒子中のミュオン数の観測値とMCの期待値との比較は、より再現性の良いモデルを作ることに有用である
- Auger実験ではミュオンの横方向分布は調べていない
横方向分布の解析から、シャワーの構造についても調べる

空気シャワーからのミュオン数の研究

TA SD 観測データにおける空気シャワー中のミュオンを解析する

- ・ 一次宇宙線の組成は陽子と仮定
- ・ TA シンチレータ型SDの信号の80~90%は電磁成分由来であるため、既存の解析ではミュオンの弁別はできない

研究の方針

- ・ 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
- ・ その条件でシャワー粒子信号量の横方向分布の観測値と MC の違いを理解する

解析条件

エネルギー範囲: $10^{18.8} \text{ eV} < E < 10^{19.2} \text{ eV}$

観測値(data):

- 2008/5/11 ~ 2015/5/11 の7年間のデータを用いる
- ~3600イベント
- TA SD再構成での選別イベントを使用

MC:

- TA SDのMCの構築に利用したQGSJET II-03モデルを基準として調べ、その後他のモデル、鉄組成の結果を調べる
- ~60000イベント
- イベント選別はdataと同様

信号中のミューオンの寄与が大きい条件

- ・ シャワー軸で発生した空気シャワー二次粒子の電磁成分は、大気中でミューオン成分よりも早く減衰する
- ・ 解析に使うSDを空気シャワーイベントの天頂角 θ 、SDのシャワー軸からの方位角 Φ 、距離 R で分けることで、ミューオンの比率が高い条件を調べる
(シャワー軸: 一次宇宙線の経路)

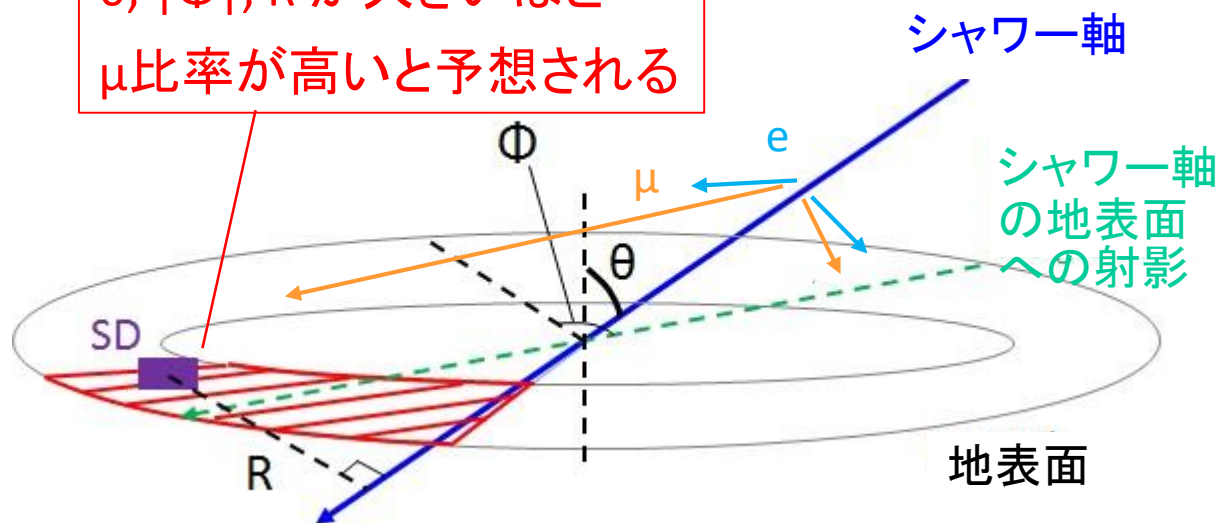
測定範囲

θ : $[0^\circ, 45^\circ]$

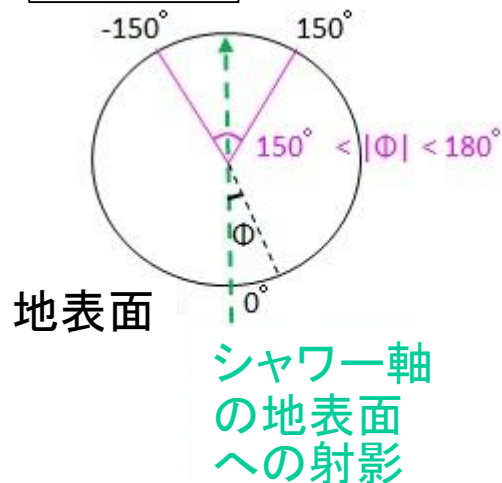
Φ : $[-180^\circ, 180^\circ]$

R : $[500\text{m}, 4500\text{m}]$

θ , $|\Phi|$, R が大きいほど
 μ 比率が高いと予想される



Φ の定義

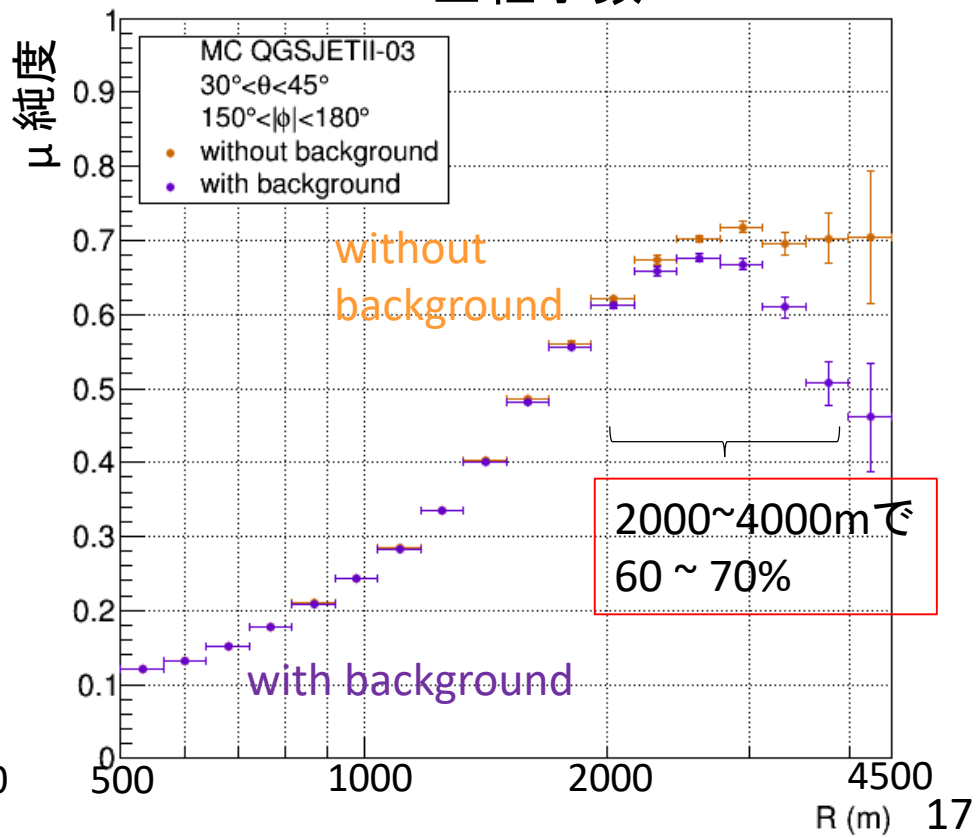
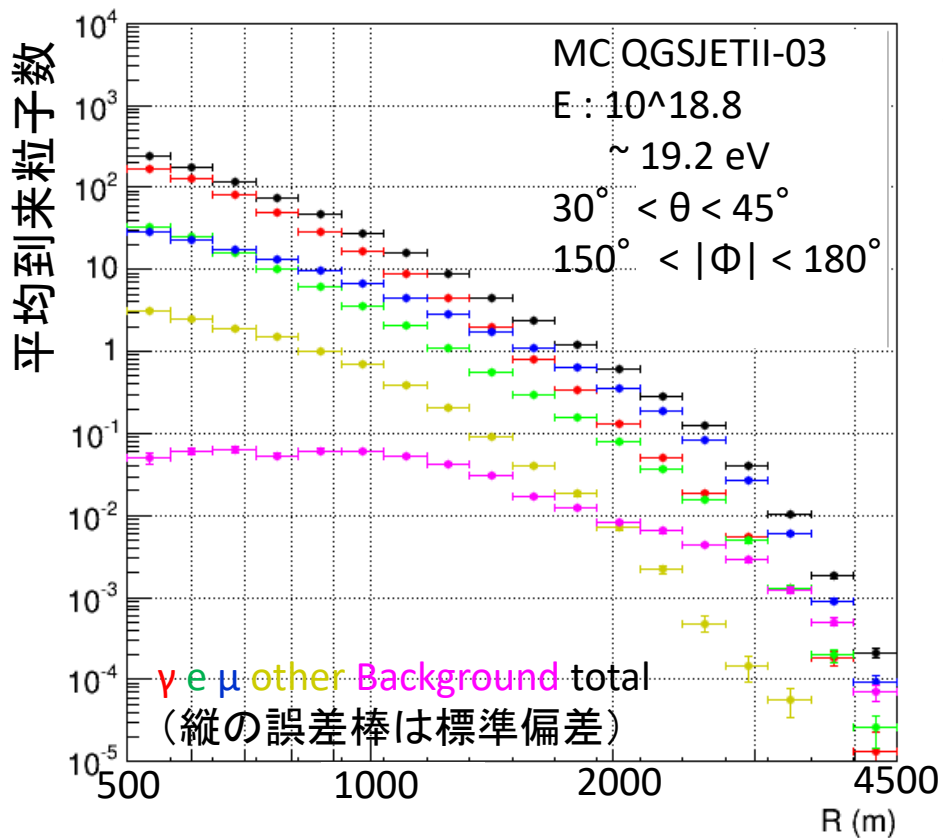


MCで見積もったミュオン純度の横方向分布

- 1回の空気シャワーで1台のSDで得られる粒子数の平均値をプロット
(SDでのエネルギー損失を粒子数に換算)

$$\mu \text{ 純度} = \frac{\mu \text{ 粒子数}}{\text{全粒子数}}$$

二次粒子種ごとの横方向分布



Results

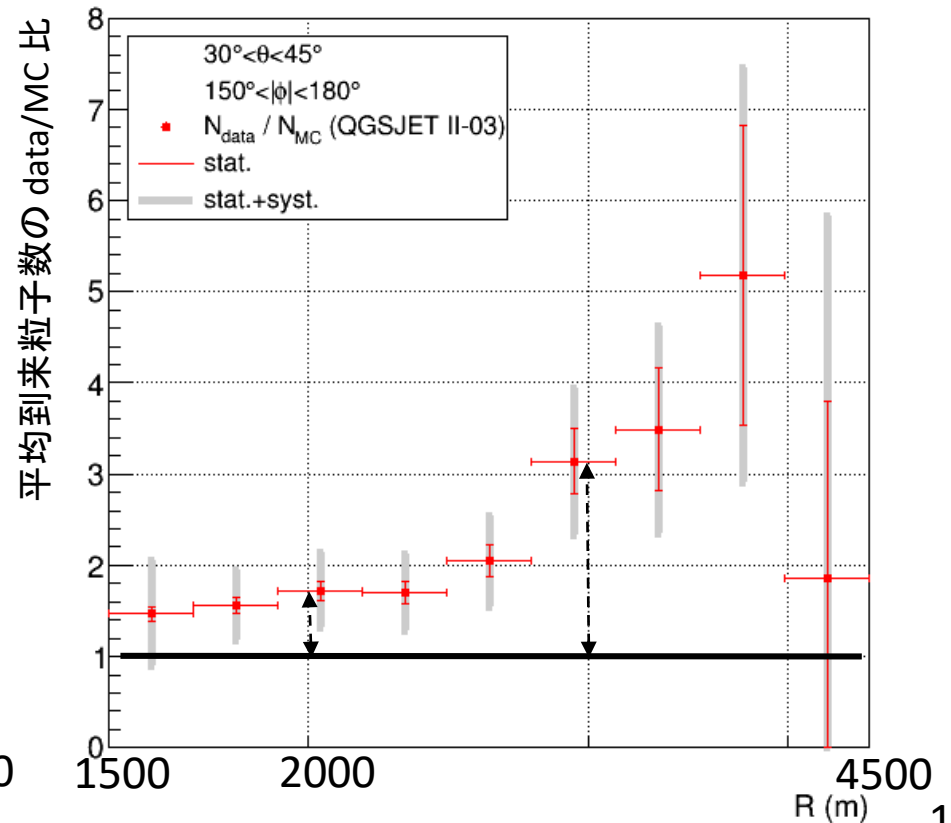
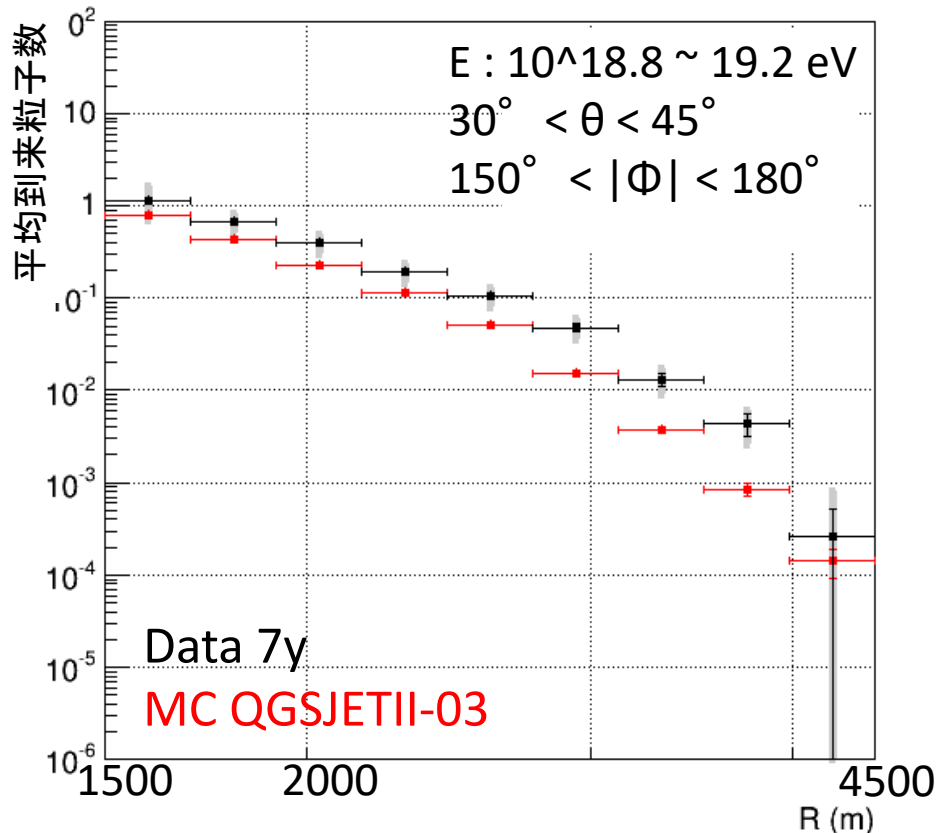
- μ 純度60~70%の条件での横方向分布と、そのdata/MC比

- Dataの到来粒子数はMCより約1.5倍以上多い

$$1.72 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.40(\text{syst.}) \quad (1910 \text{ m} < R < 2160 \text{ m}) \quad (1.8\sigma)$$

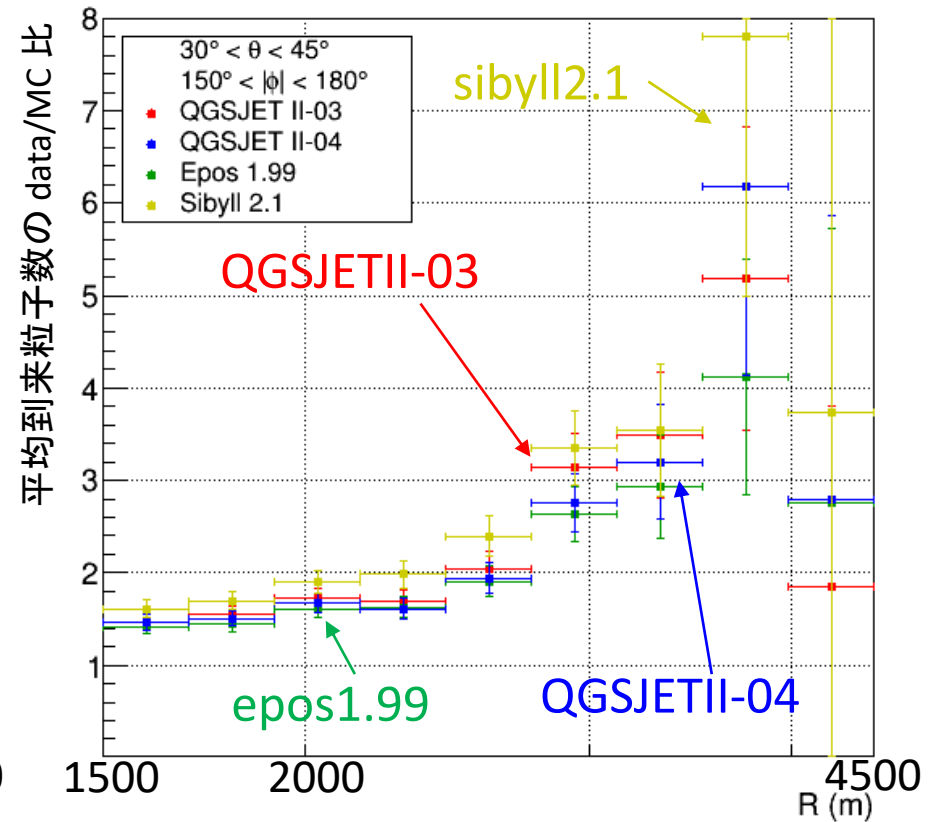
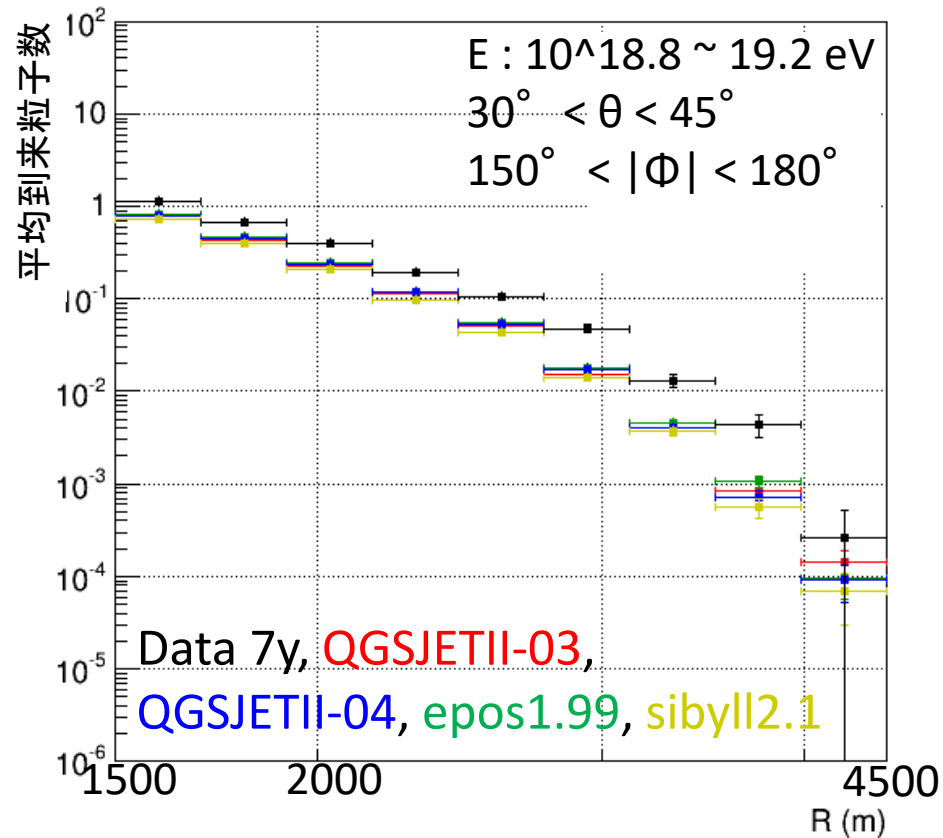
$$3.14 \pm 0.36(\text{stat.}) \pm 0.72(\text{syst.}) \quad (2760 \text{ m} < R < 3120 \text{ m}) \quad (2.7\sigma)$$

- 軸からの距離が大きいほど data/MC 比が大きい



Results

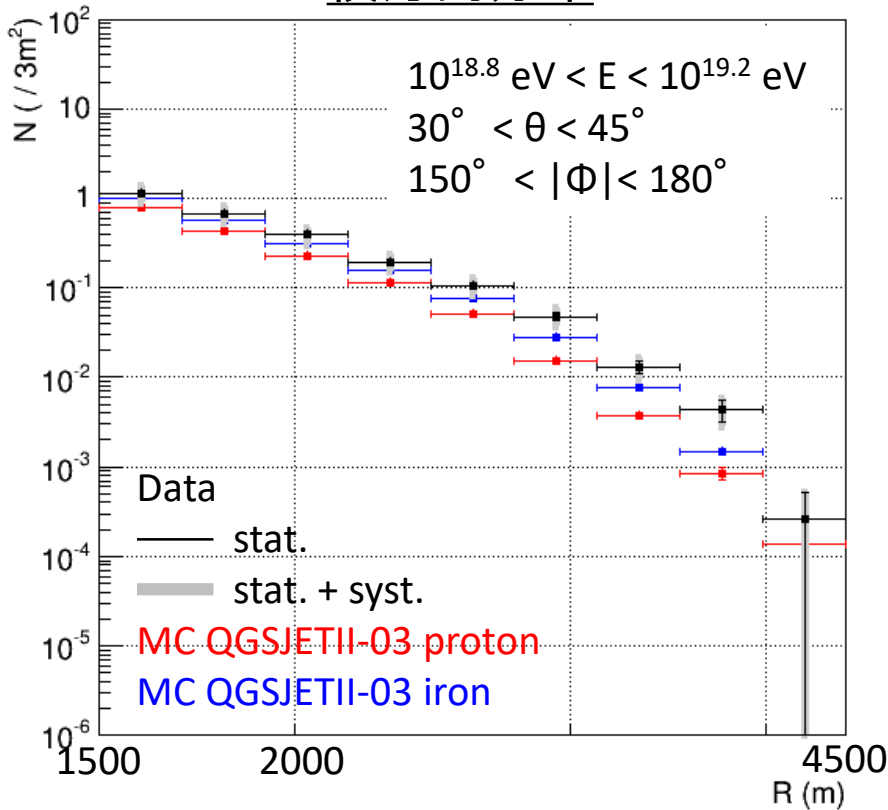
- 異なるハドロンモデルを用いた横方向分布と、そのdata/MC比
- 使用した全てのモデルにおいて、dataはMCより大きい



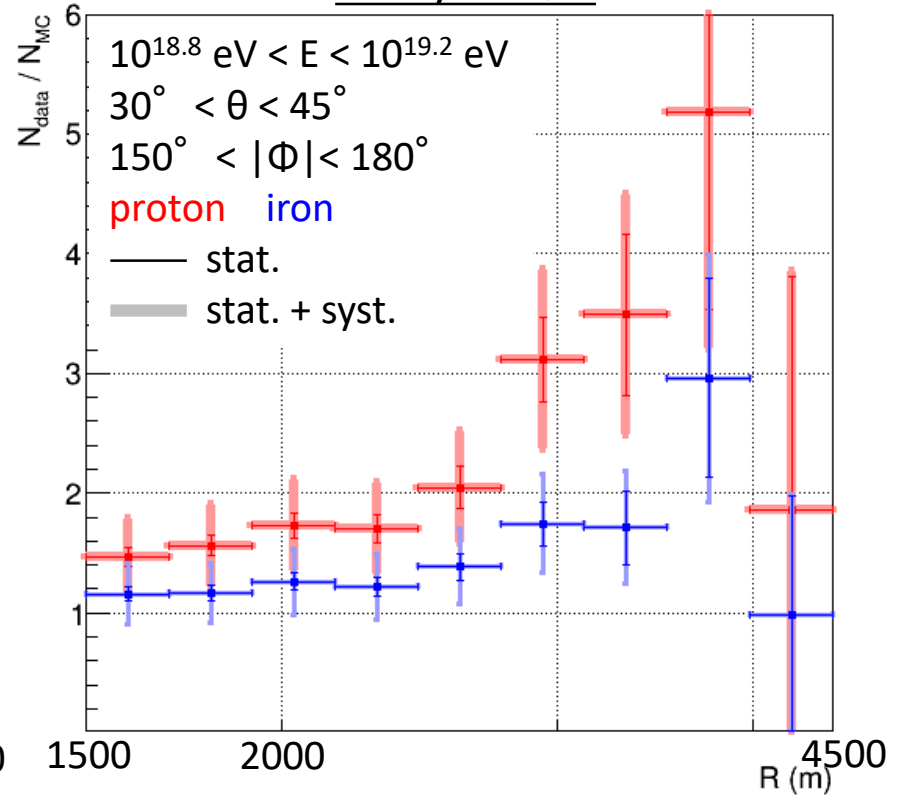
Results

- 一次宇宙線の組成を鉄と仮定した場合のdata-MC比較

横方向分布



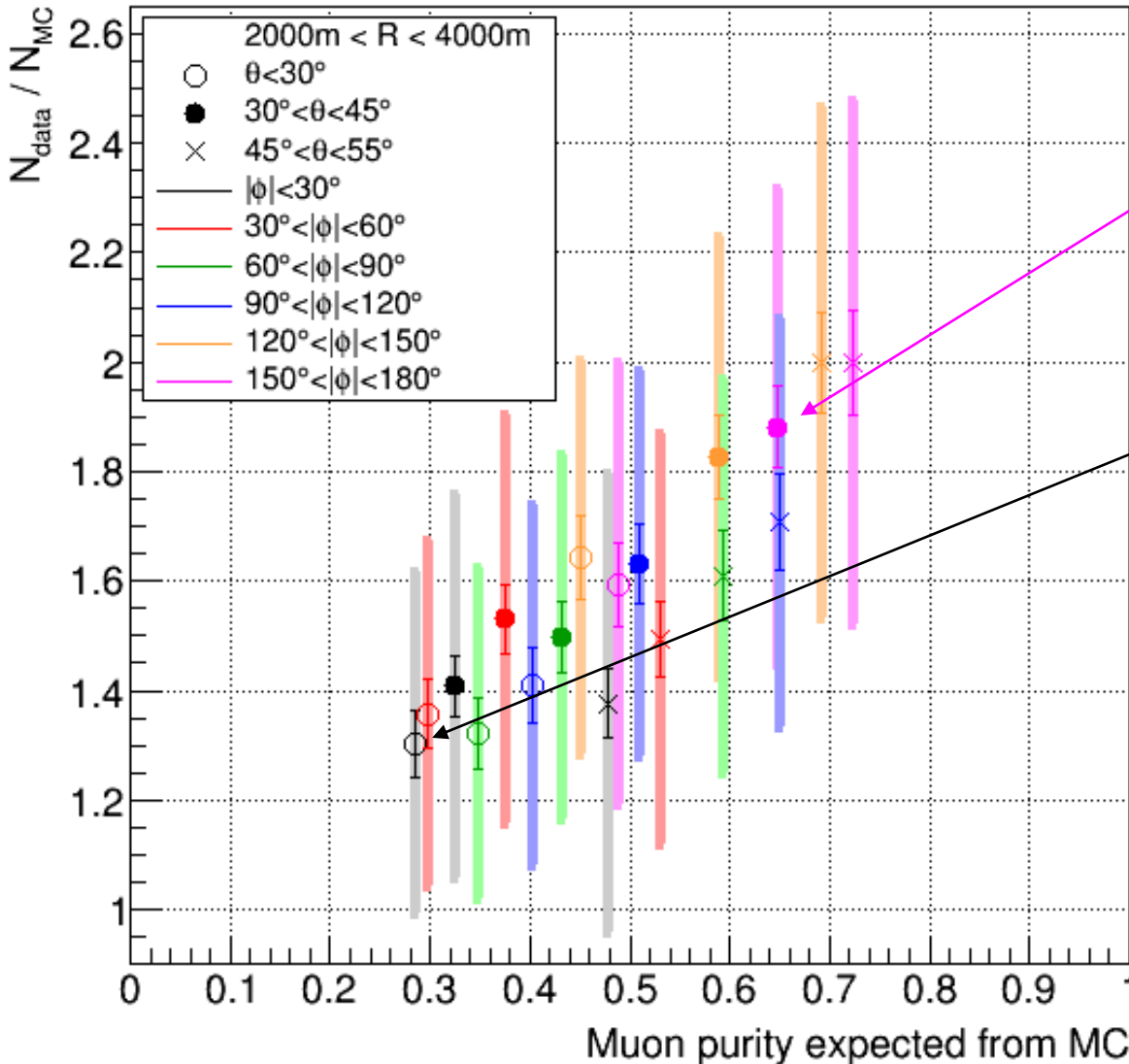
Data/MC 比



R (m)	Data/MC proton	Data/MC iron
[1910, 2160]	$1.72 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.40(\text{syst.})$	$1.26 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 0.29(\text{syst.})$
[2760, 3120]	$3.14 \pm 0.36(\text{stat.}) \pm 0.72(\text{syst.})$	$1.74 \pm 0.19(\text{stat.}) \pm 0.40(\text{syst.})$

Results

異なる (θ, Φ) 条件での $N_{\text{data}} / N_{\text{MC}}$ と μ 純度の相関



Data/MC = 1.88
 $\pm 0.08(\text{stat.}) \pm 0.40(\text{syst.})$
 $(30^\circ < \theta < 45^\circ, 150^\circ < |\Phi| < 180^\circ,$
 μ 純度 $\sim 65\%$)

Data/MC = 1.30
 $\pm 0.06(\text{stat.}) \pm 0.27(\text{syst.})$
 $(\theta < 30^\circ, |\Phi| < 30^\circ,$
 μ 純度 $\sim 28\%$)

μ 純度が高い条件ほど data と MC の違いが大きい



data と MC の違いは μ 過剰が寄与している

ハドロン相互作用モデルへの影響

- 現状のハドロン相互作用モデルは μ の多い条件で横方向分布の観測値を再現せず、その違いは μ の過剰が寄与している
- 観測した横方向分布の広がりがMCよりも大きいことから、MCよりもシャワー発達が早い可能性がある
- 理由として考えられるのは
 - 一次宇宙線の非弾性散乱断面積が大きい
 - π の発生多重度が大きい

Summary

- TA実験の紹介

- 空気シャワー中のミューオンの研究

- 信号中の μ 純度が高い(θ, Φ, R)の条件を使うことで、**TAシンチレータ型SDによるUHECRからのミューオンの解析を可能にした**

$E \sim 10\text{EeV}, 30^\circ < \theta < 45^\circ, 150^\circ < |\Phi| < 180^\circ$
(MCで見積もった μ 純度: 60 ~ 70 %)において

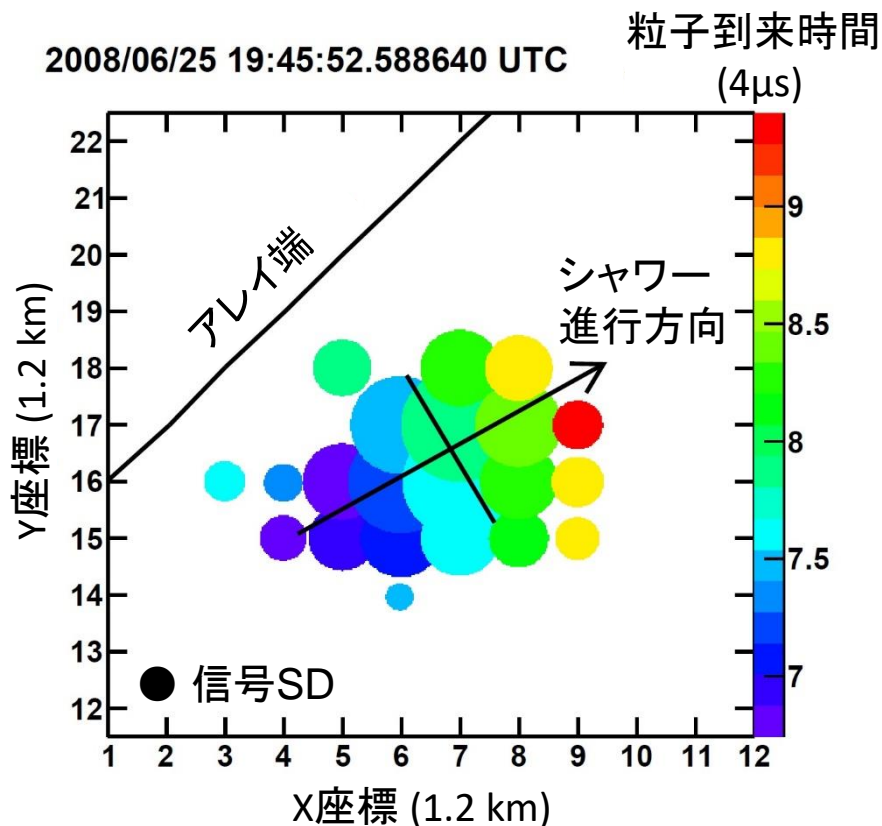
R (m)	Data/MC proton	Data/MC iron
[1910, 2160]	$1.72 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.40(\text{syst.})$	$1.26 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 0.29(\text{syst.})$
[2760, 3120]	$3.14 \pm 0.36(\text{stat.}) \pm 0.72(\text{syst.})$	$1.74 \pm 0.19(\text{stat.}) \pm 0.40(\text{syst.})$

- 解析結果はAuger実験のミューオン過剰と同様の傾向を示す
- Augerの結果に加え、**シャワー軸からの距離が大きいほど違いが大きい傾向があるとわかり、再現性の良いモデルのための情報が得られた**

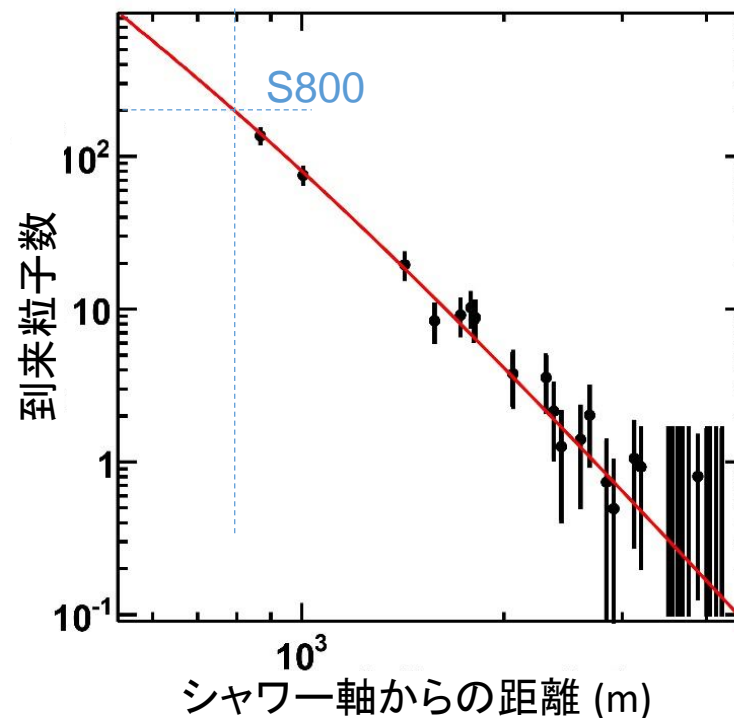
SD解析手法

- 空気シャワー粒子信号の到来時間、粒子数密度分布から一次宇宙線の到来方向、エネルギーを再構成

1イベントの信号マップ



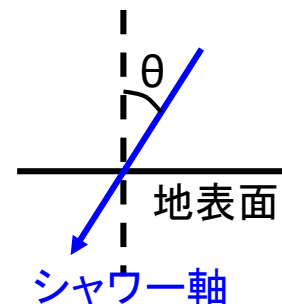
検出器の信号量の横方向分布



シャワー軸: 一次宇宙線の経路

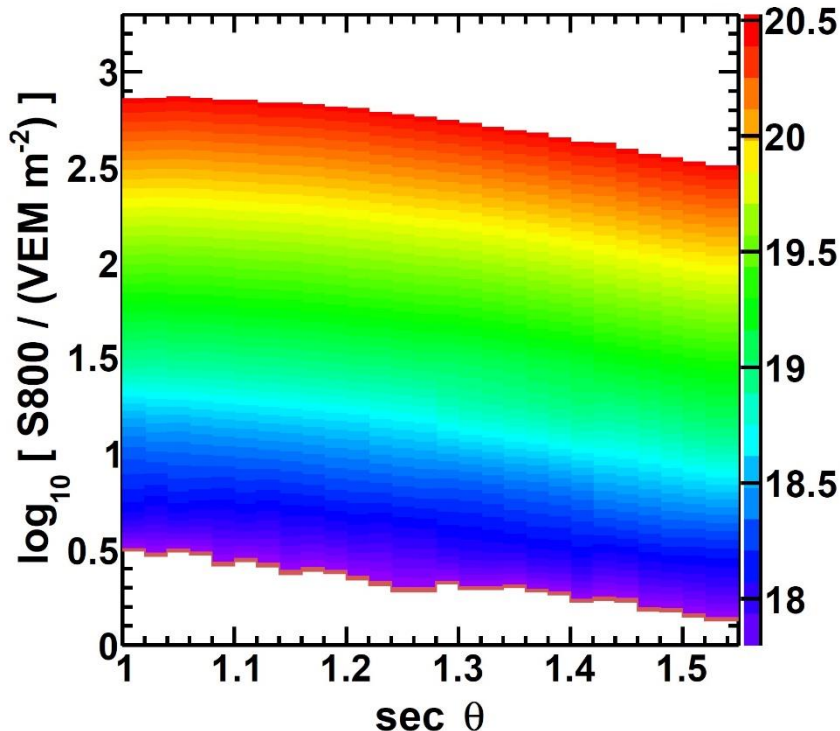
SD解析手法

- シャワー軸から800mの信号量 S_{800} 、到来方向の天頂角 θ をMCと比較し、エネルギー E'_{SD} を計算
- SD・FD同時観測イベントを利用してFDのエネルギーと等しくなるように補正 ($E_{SD} = E'_{SD} / 1.27$)

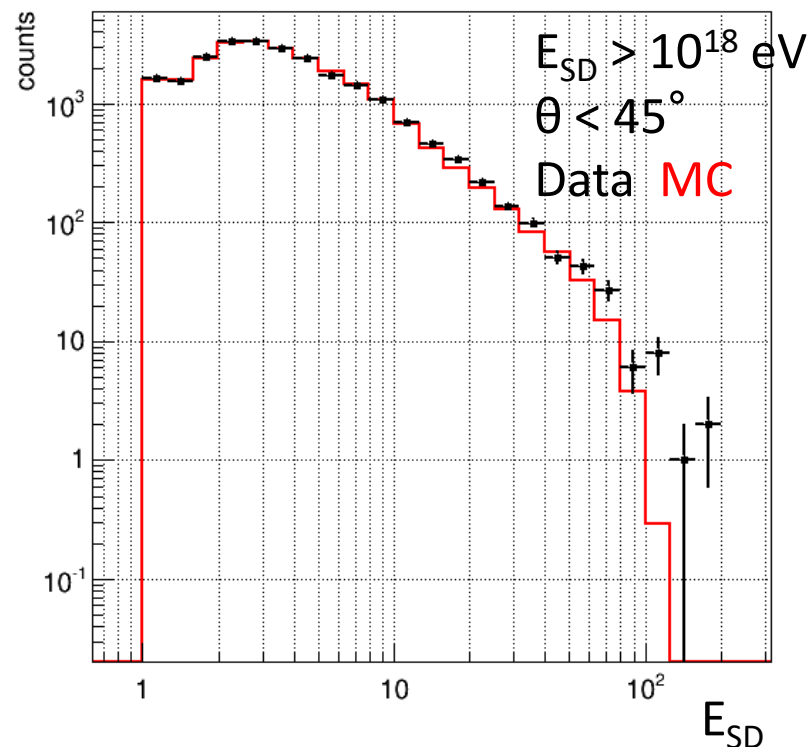


FDは電磁成分をカロリメトリックに測るため、不定性が少ない

(S_{800}, θ)から E'_{SD} への変換 $\log_{10}(E_{SD}/\text{eV})$



再構成エネルギー分布



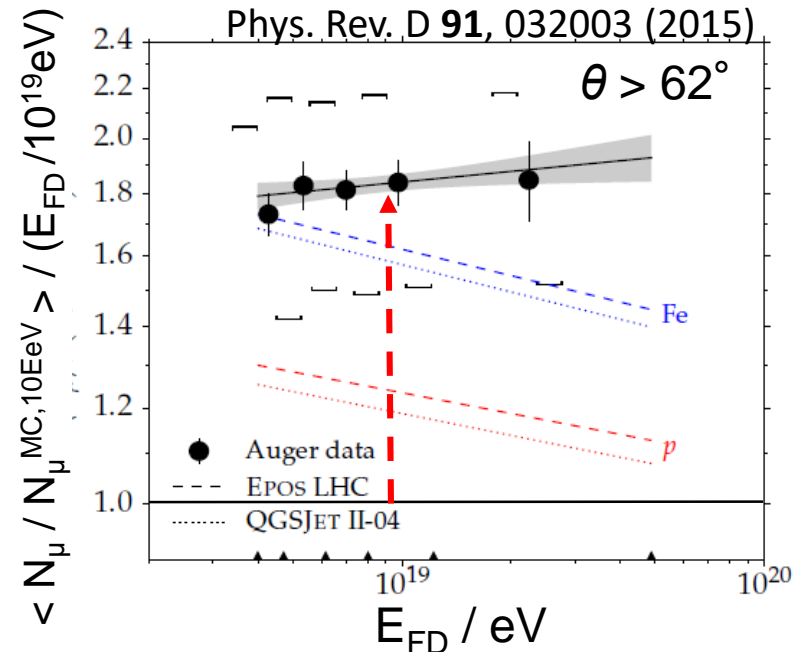
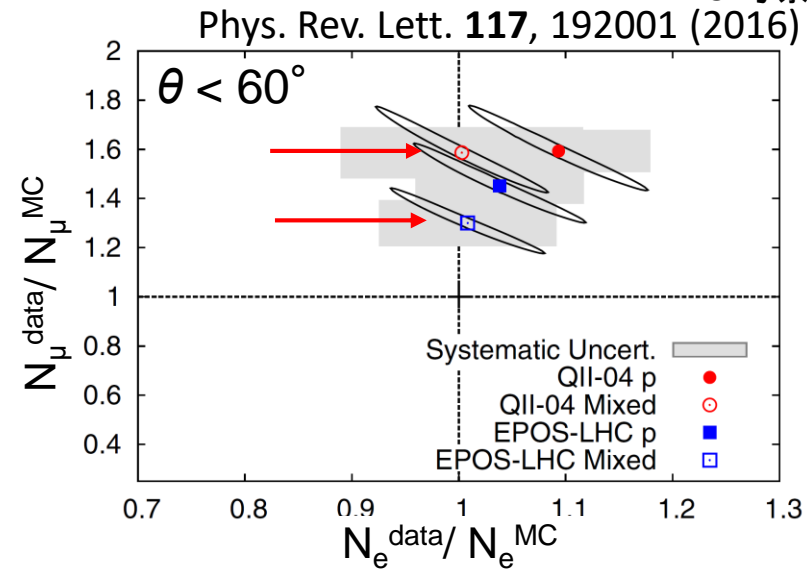
到来粒子数の系統誤差の見積もり

・ 系統誤差はFDエネルギー決定が主要因

FD energy determination	21%	Since FD energy scale is used for data, systematic error of FD energy affects to the signal size N. Here we assume $N \propto E$. ($N_e \propto E^{1.03}$, $N_\mu \propto E^{0.85}$) Astropart. Phys., 22 , 387, 2005
Background contribution	0 - 15%	Effect of atmospheric muon in the detected signal
Bad detector (communication error etc.) in 0 VEM detectors	~1%	There are detectors not working properly by ~5% in all the events (duty cycle is ~95%). SD event trigger and signal selection reduces bad SD fraction further.
Poisson distribution assumption	5 - 10%	Difference of bias from Poisson distribution assumption between data and MC
Reconstruction	5 - 15%	Difference of bias from event reconstruction between data and MC
1 MIP calibration	2%	Error in determination of 1 MIP signal

Auger実験との比較

- Auger 実験での $\langle N_{\mu}^{\text{data}} / N_{\mu}^{\text{MC}} \rangle$
- $\theta < 60^{\circ}$
($18.8 < \log(E/E_{\text{eV}}) < 19.2$, Auger X_{max} composition) :
 1.33 ± 0.16 (stat.+syst., EPOS-LHC) (2.1σ)
 1.61 ± 0.21 (stat.+syst., QGSJET II-04) (2.9σ)
- $\theta > 62^{\circ}$
($\log(E/E_{\text{eV}})=19$, QGSJET II-03, proton) :
 1.841 ± 0.029 (stat.) ± 0.324 (syst.) (2.6σ)



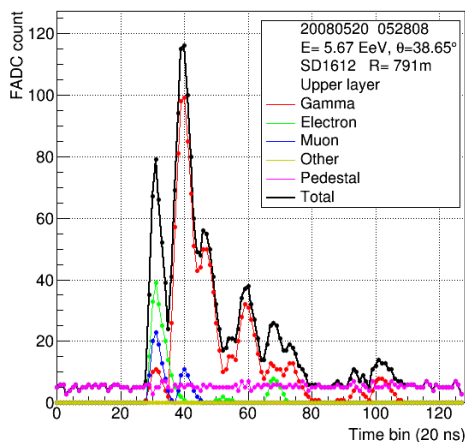
Auger実験で見られた μ 過剰と同じく、dataのミュオン数がMCよりも大きい傾向がTA SDでも測定されている

到来粒子数の計算方法

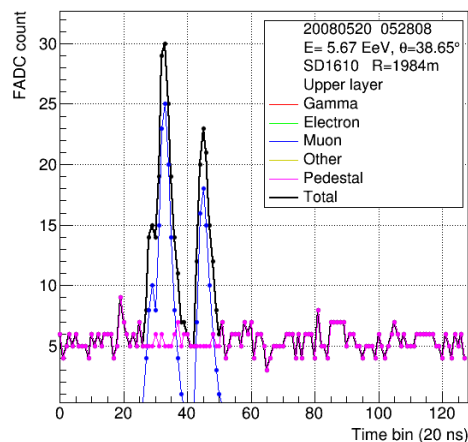
- ・ MCで (θ, Φ, R) 条件ごとのミューオン比率を計算する
- (1) 1シャワーイベントについて、信号が得られたSDを選び出す
 - (2) (θ, Φ, R) 条件ごとに用意した、信号量 S のヒストグラムに入れる (S : FADC信号の波形積分値)
 - (3) 信号が得られなかったSDは、 $S = 0$ のbinに入れる
 - (4) (1)~(3) を全イベント、全粒子種について繰り返す

1SDの波形の例

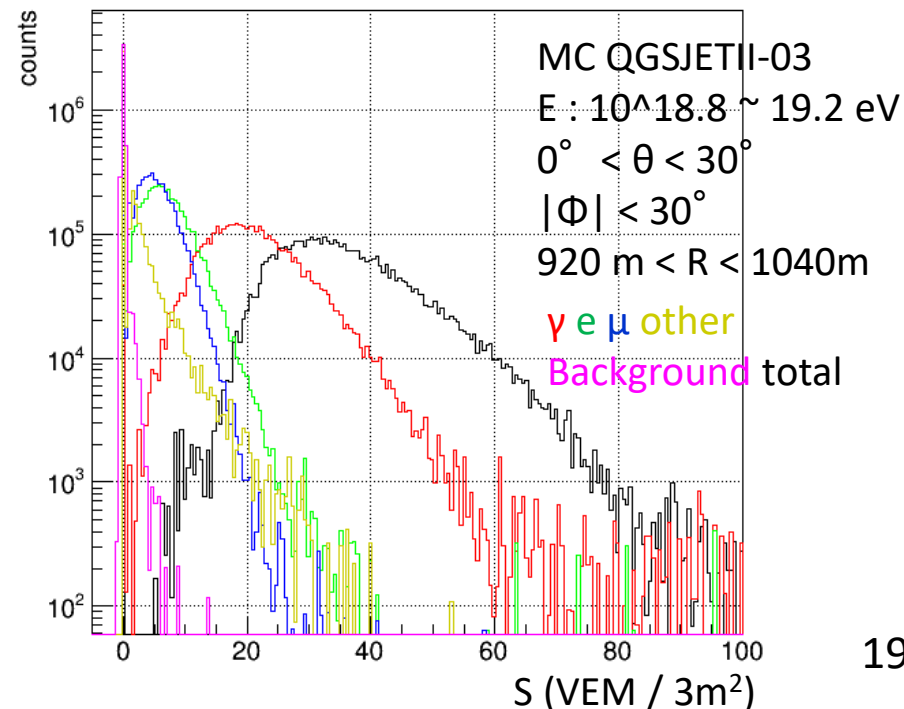
R ~ 1000m



R ~ 2000m

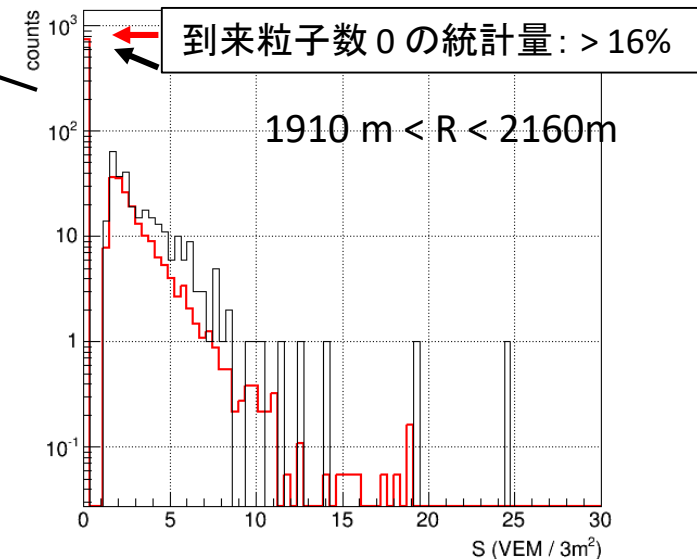
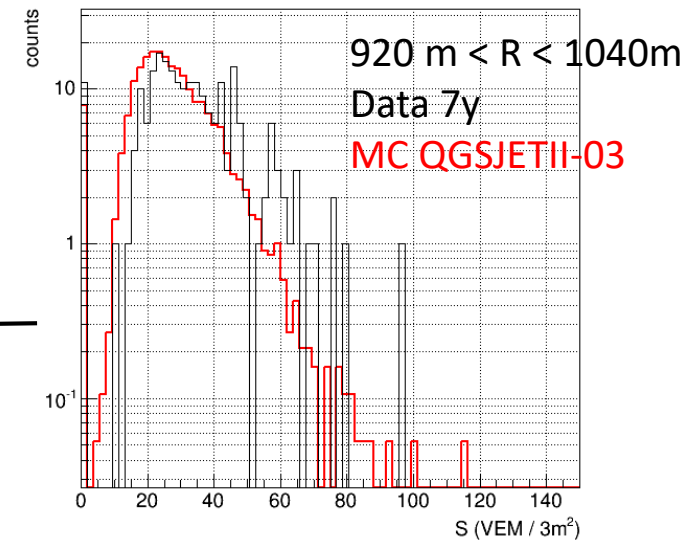
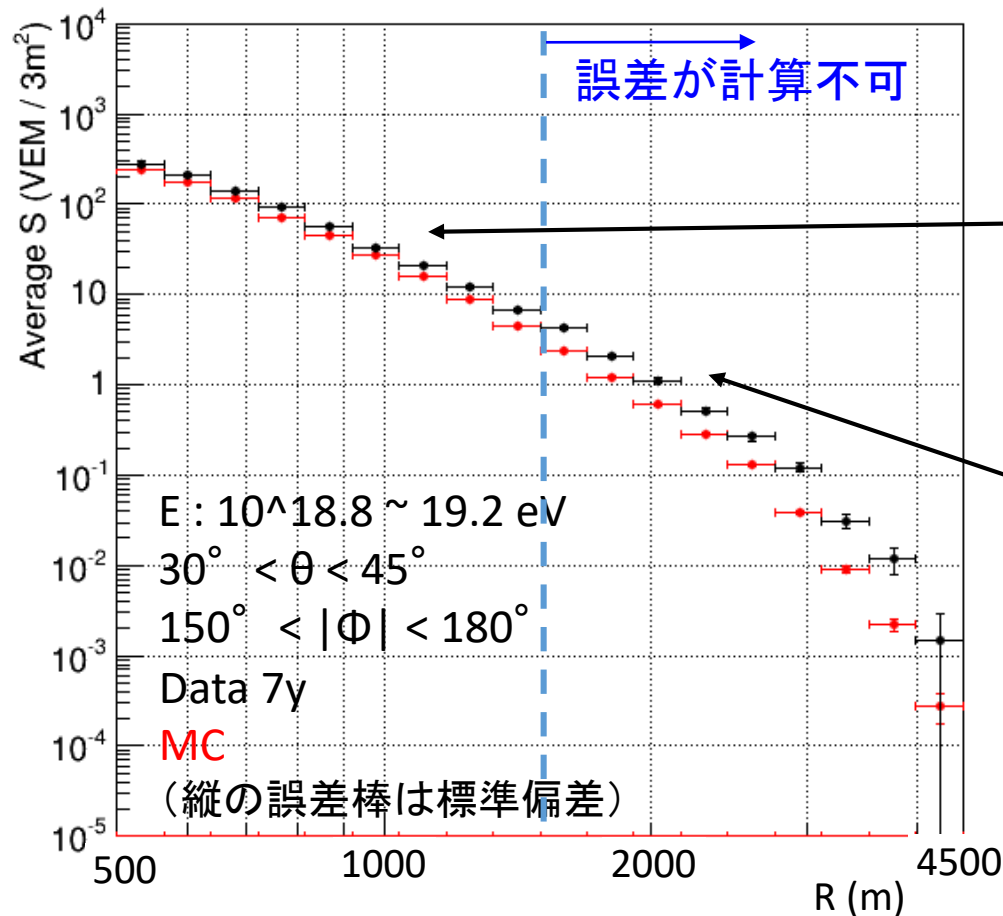


信号量のヒストグラムの例



二次粒子種ごとの信号への寄与を計算できるように
TA SDのMCのコードを改造した

μ純度が高い条件での DataとMCの比較

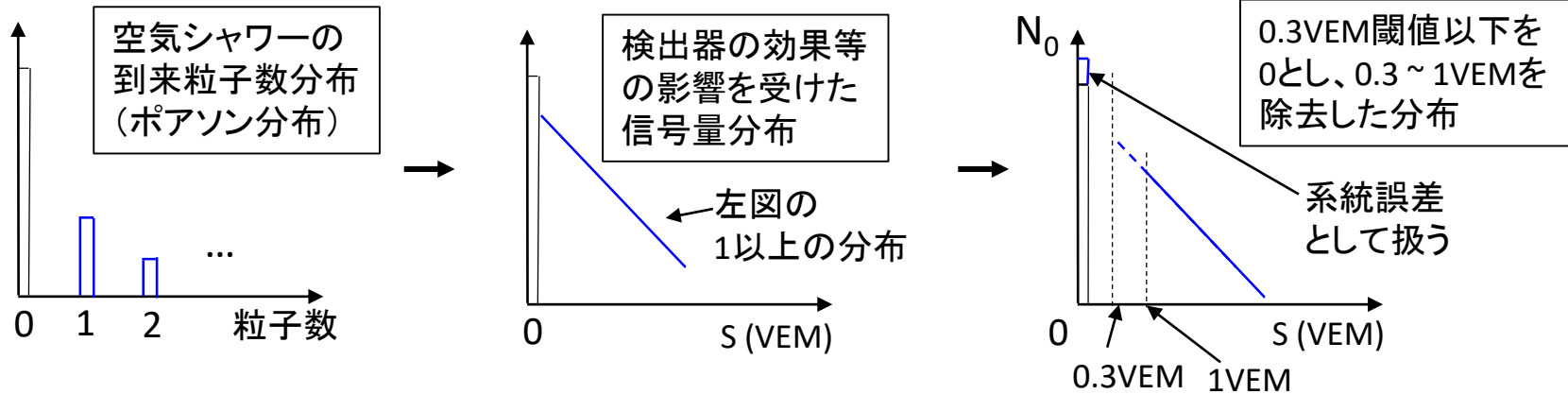


- Data の横方向分布をMCと同様に作成
- R > ~ 1500m ではヒストグラムの1bin目(到来粒子数0)の統計量が多く、中央68%の範囲を取ることができないため誤差の計算が不可能

到来粒子数がポアソン分布に従うと仮定し、平均粒子数を再計算

ポアソン分布を仮定した粒子数の計算

SDの信号量のヒストグラムの由来



- 到来粒子数をポアソン分布と仮定すると

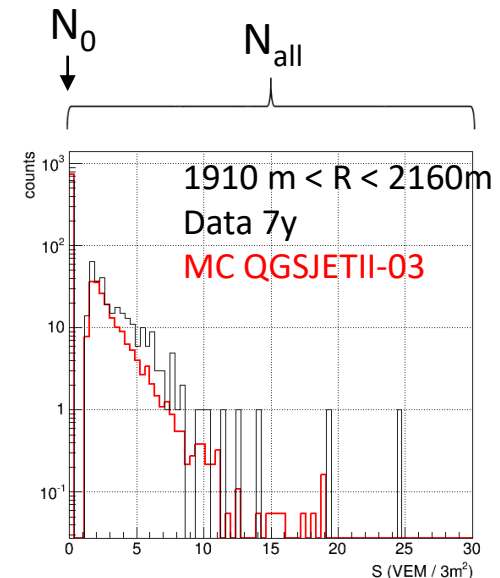
$$N_0 / N_{\text{all}} = (\lambda^x e^{-\lambda} / x!)_{x=0} = e^{-\lambda} \quad \dots \textcircled{1}$$

N_0 : 0カウントの統計量、 N_{all} : ヒストグラム全体の統計量
 λ : 分布の平均値、 x : 変数

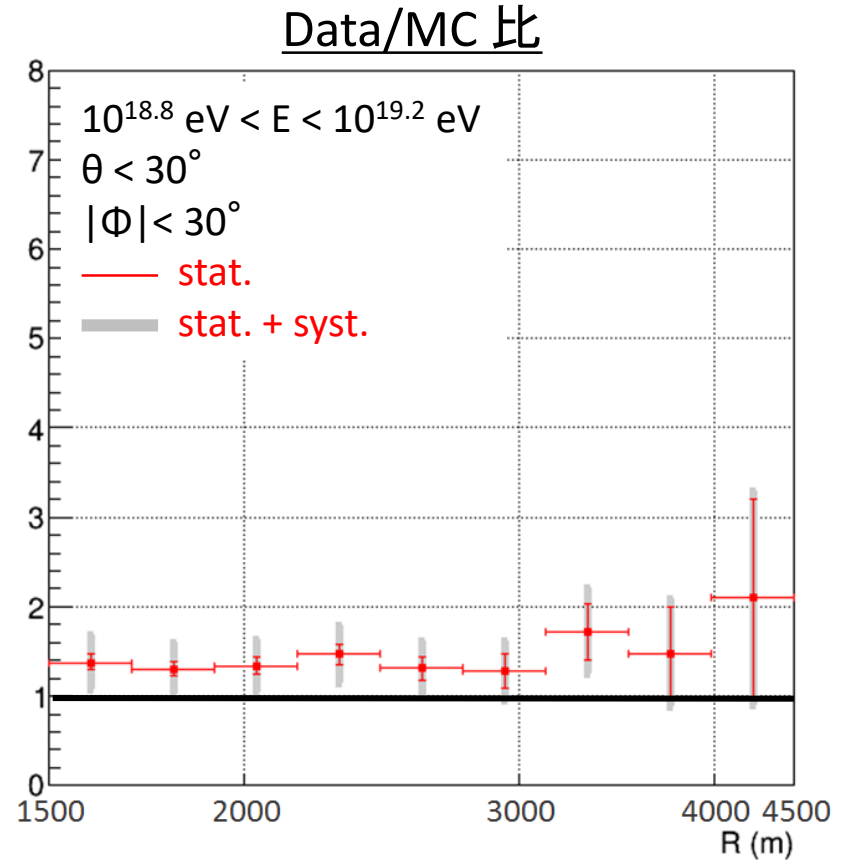
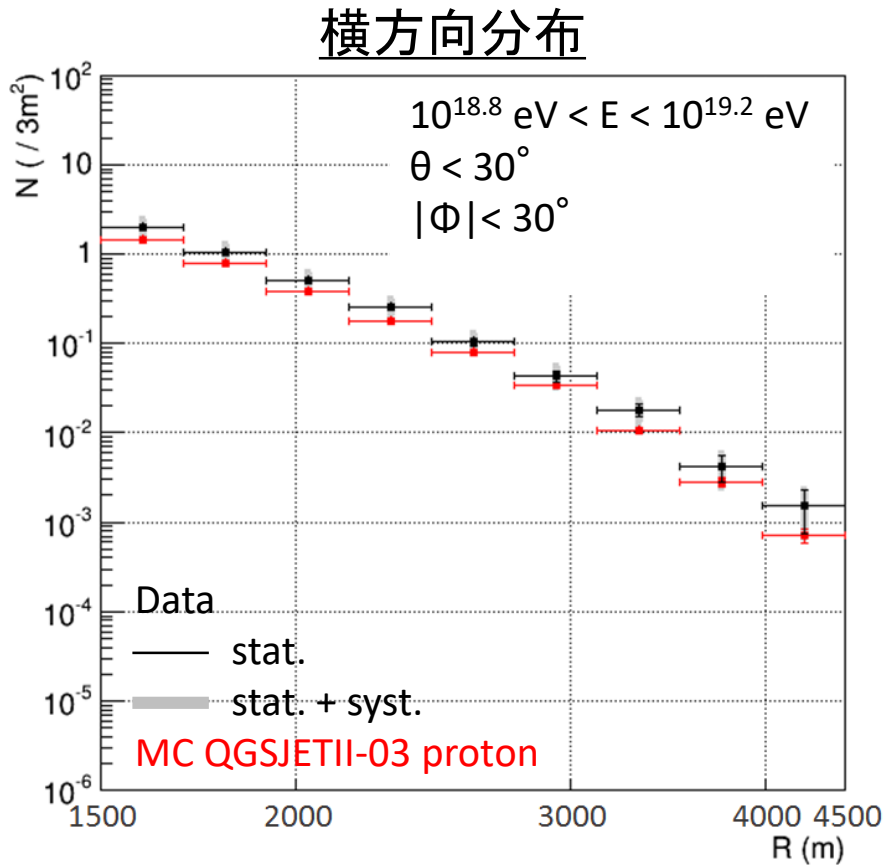
- N_{all} のうち値0が N_0 回起こる確率は二項分布になるので、 N_0 の標準偏差は

$$\sigma_{N_0} = \sqrt{N_0 p(1-p)}, \quad p = N_0 / N_{\text{all}} \quad \dots \textcircled{2}$$

- ①、②から信号量の平均値とその誤差を計算する



電磁成分が多い条件でのData と MC の比較

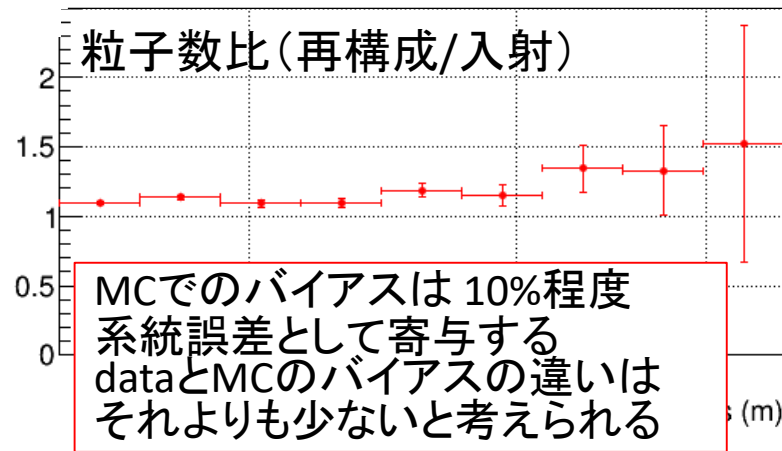
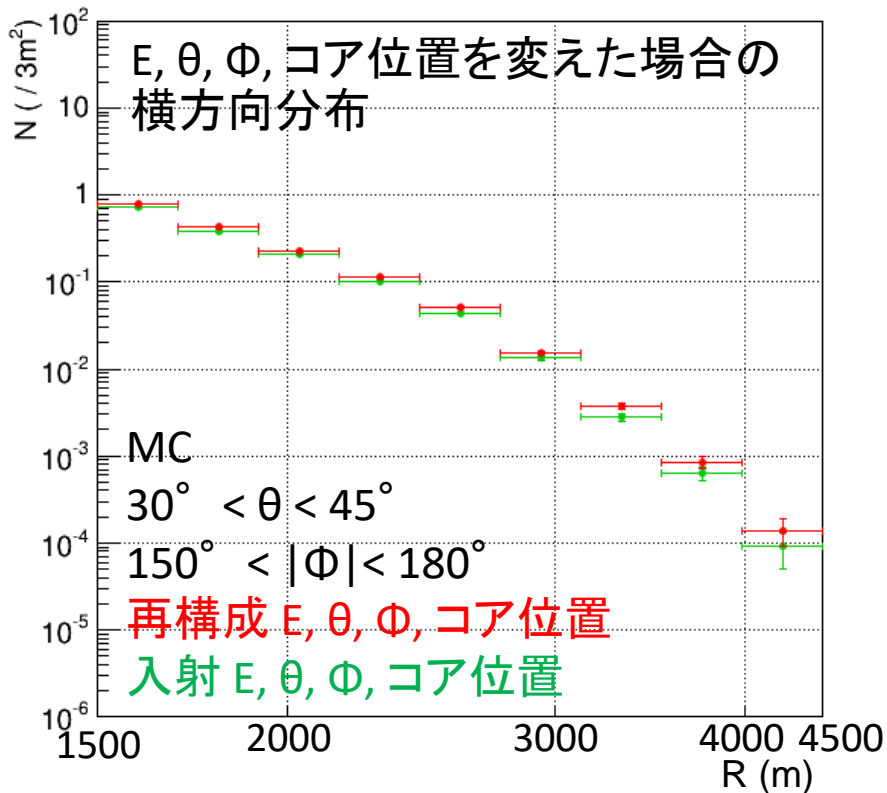
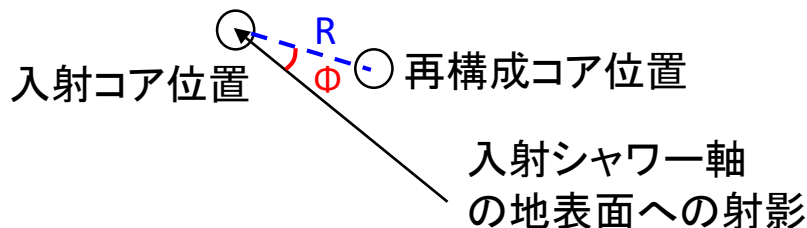
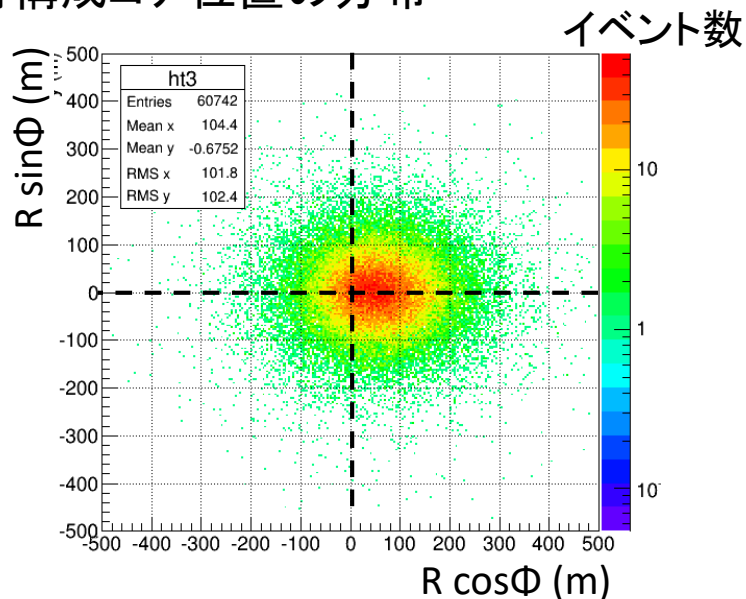


DataとMCは、ほぼ 1σ 程度の違い

イベント再構成による系統誤差

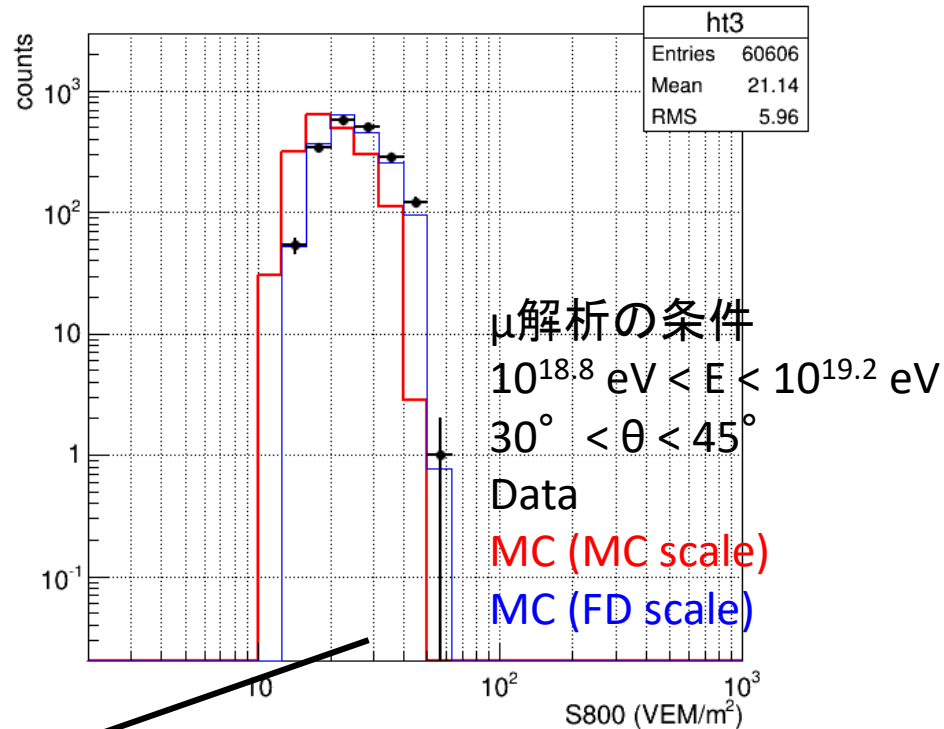
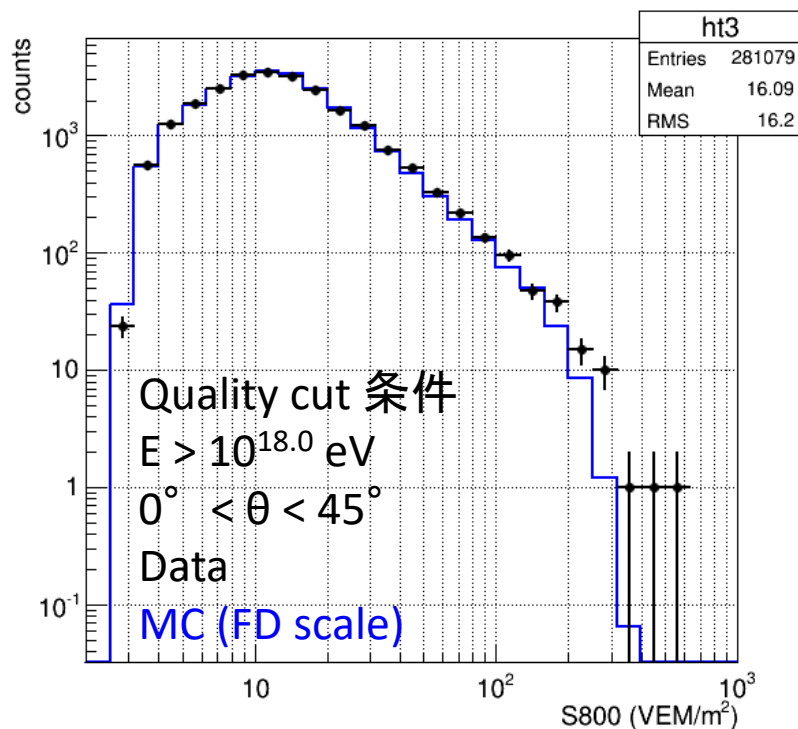
シャワーコア前後では、同じRでも到来粒子数が非対称 → 再構成時にコア位置が到来方向側にずれ、到来粒子数にバイアスがかかる

入射イベントのコア位置を原点とした再構成コア位置の分布



SD, FDのエネルギースケールの違いに対する寄与

- TA SD再構成ではS800(LDF fit の800mの値)をエネルギーに変換している
- FD, SDのエネルギースケールの27%の違いはLDFのcharge density (到来粒子数)の違いに対応する

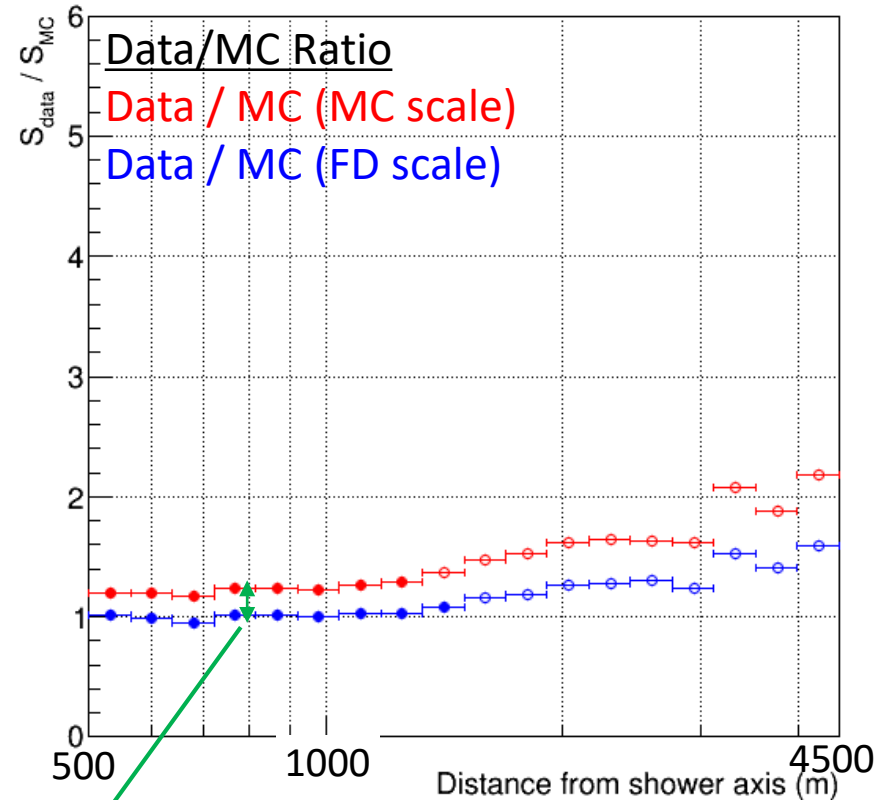
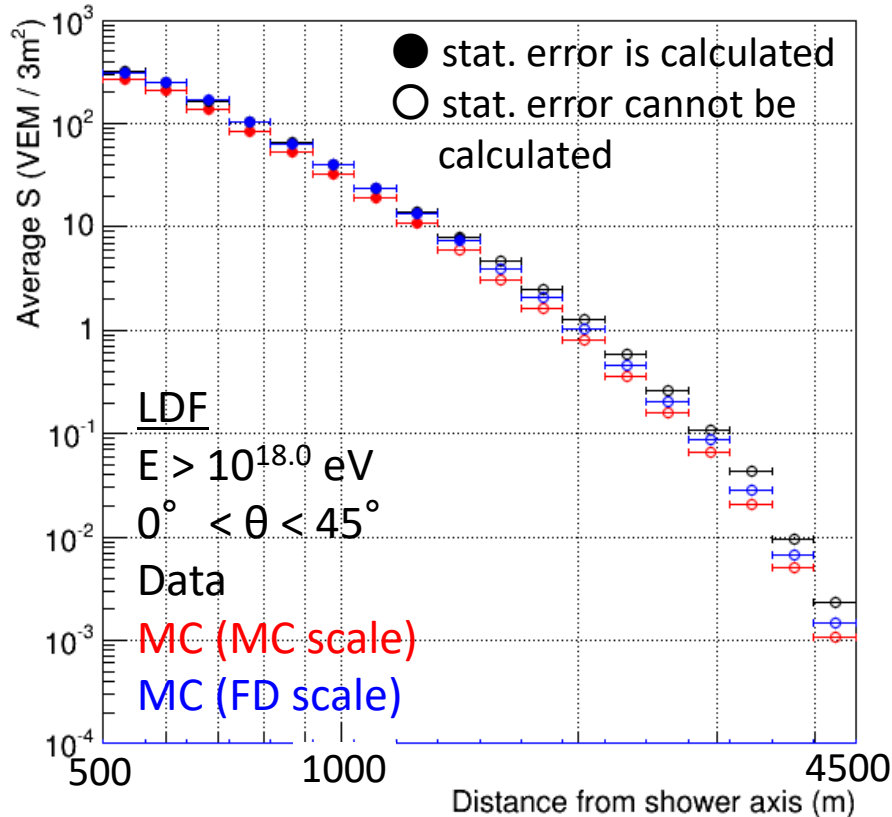


- $\langle \text{Data} / \text{MC (MC scale)} \rangle = 1.25$
同じエネルギーの宇宙線に対するdataとMCの到来粒子数の違い
- $\text{MC (FD scale)} / \text{MC (MC scale)}$
エネルギースケールの違いに対応する到来粒子数の違い

SD, FDのエネルギースケールの違いに対する寄与

- R bin で分けた場合の到来粒子数の違い

LDF on ordinary analysis condition



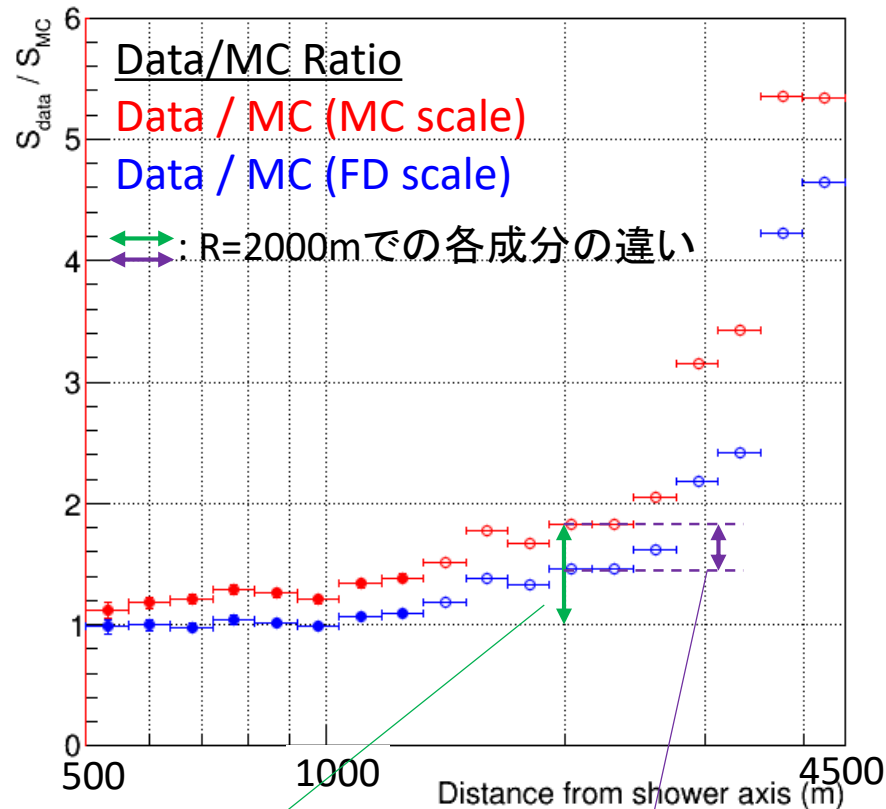
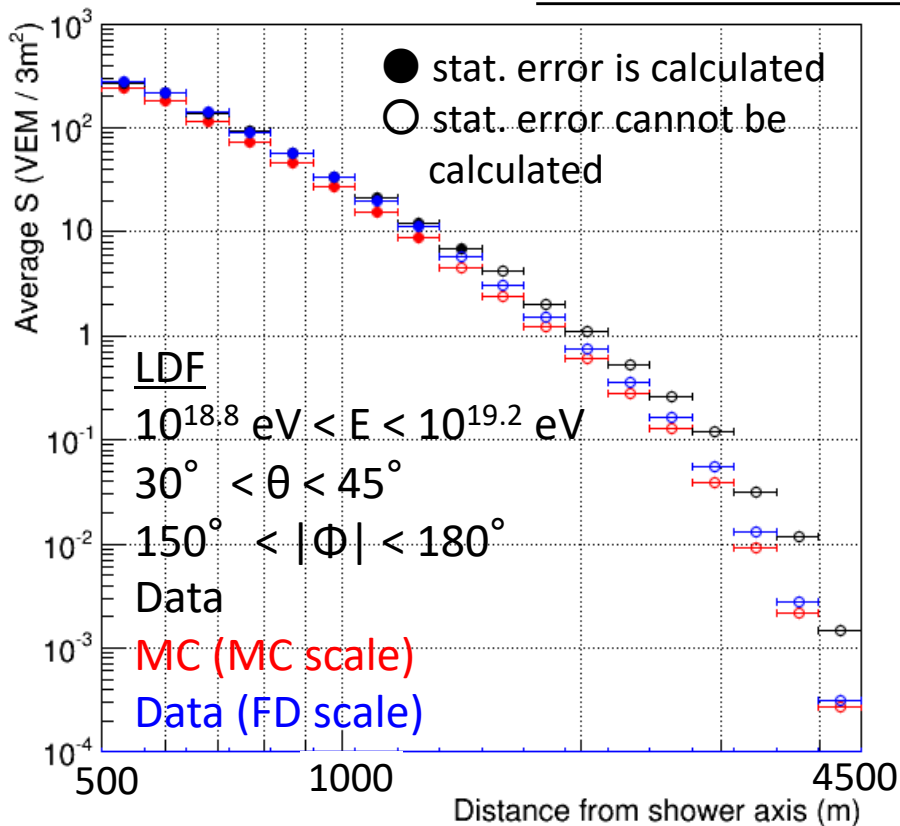
- $\langle \text{Data} / \text{MC (MC scale)} \rangle = 1.24 \pm 0.01$ (R=800m)

エネルギースケールの違いの27%に対応

SD, FDのエネルギースケールの違いに対する寄与

- (θ, Φ, R) bin で分けた場合の到来粒子数の違い

LDF on muon-enriched condition



- μ の多い条件で Data と MC (MC scale) の違いが大きく、そこにエネルギースケールの27%の違いが含まれる
- R=800mでも信号は μ を約20%含むため、エネルギースケールの違いは μ が原因の一部であると示唆される

Average LDF in each particle types

- 陽子の場合より全体的に数% μ 純度が上がる

$E : 10^{18.8} \sim 19.2$ eV

$30^\circ < \theta < 45^\circ$

MC QGSJETII-03

