

E37:  
ミュー粒子を用いた宇宙線化学組成研究  
(TA/ALPACAによる kneeから最高エネルギーまで)

E48:  
新しい宇宙線空気シャワー  
シミュレーションコードの開発  
(COSMOSの開発と将来の展開)

塔 隆志 (東大ICRR)

# 査定額と共同研究者

- E39 ミュー粒子

- 査定額 68万円 + 50万円新任教員（ユタ旅費＋バッテリー・太陽電池）
- 共同研究者

野中敏幸（東大）

- E48 空気シャワーシミュレーション

- 査定額 20万円（旅費、HP作成ソフトウェア購入）
- 大型計算機利用
- 共同研究者

常定芳基（大阪市大）、毛受弘彰（名大）、櫻井信之（徳島大）、  
吉越貴紀、大石理子、野中敏幸、木戸英治、榊直人、藤井俊博、武多昭道、  
釜江常好（東大）、笠原克昌（早大）、芝田達伸、板倉数記（KEK）、  
大嶋晃敏（中部大）、日比野欣也、有働慈治、山崎勝也（神大）、  
多米田裕一郎（大阪電通大）、奥田剛司（立命館大）、奈良寧（国際教養大）、  
土屋晴文（原子力機構）

# 空気シャワーとミュオン

UHECR 2018 conference

WHISP (Hadronic Interactions/Shower Physics Working Group) report

Report on Tests and Measurements of Hadronic Interaction Properties with Air Showers

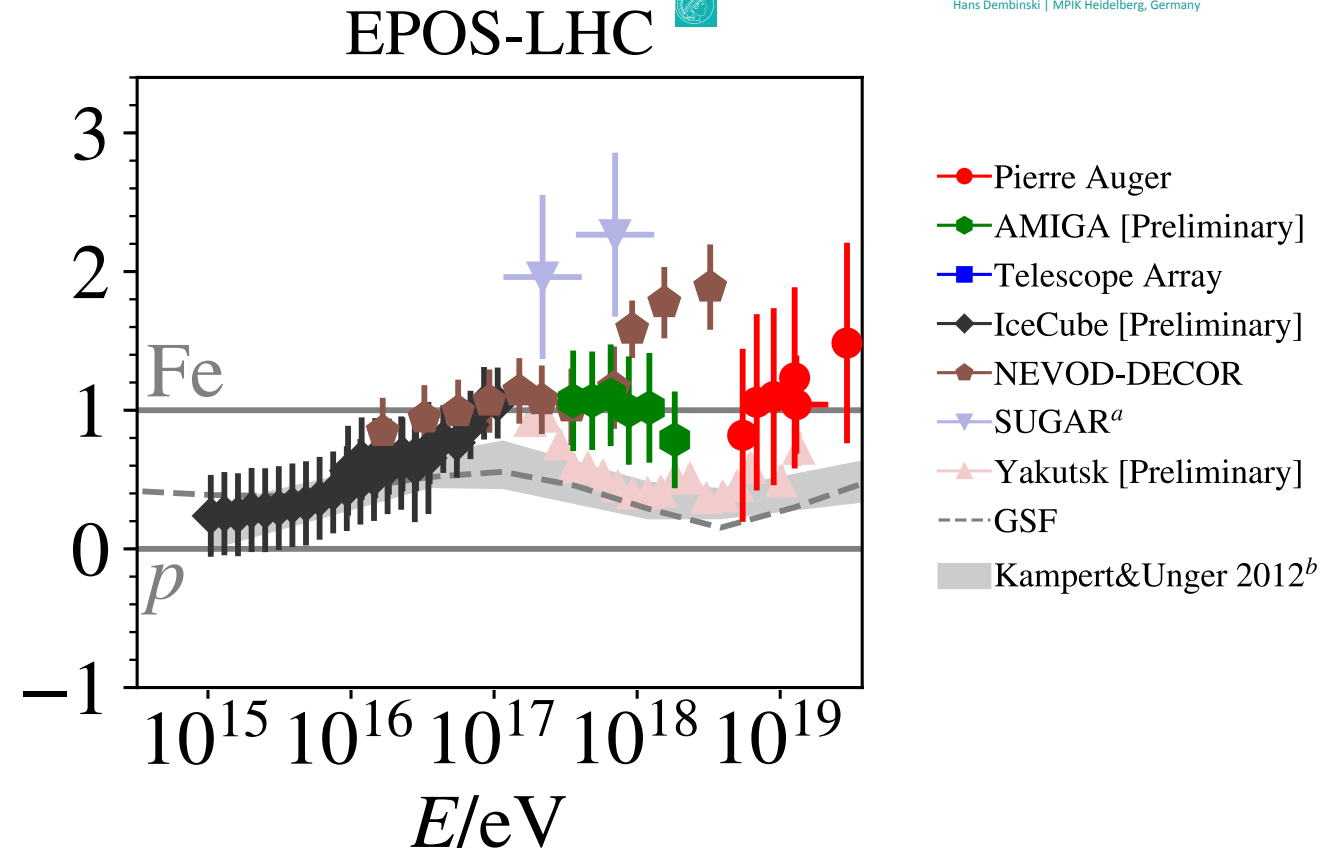
Hans Dembinski for the WHISP:

J.C. Arteaga, L. Cazon, R. Conceição, J. Gonzalez, Y. Itow, D. Ivanov, N.N. Kalmykov, I. Karpikov, T. Pierog, F. Riehn, T. Sako, D. Soldin, R. Takeishi, G. Thomson, S. Troitsky, I. Yashin, E. Zdeba, Y. Zhezher

Hans Dembinski | MPIK Heidelberg, Germany

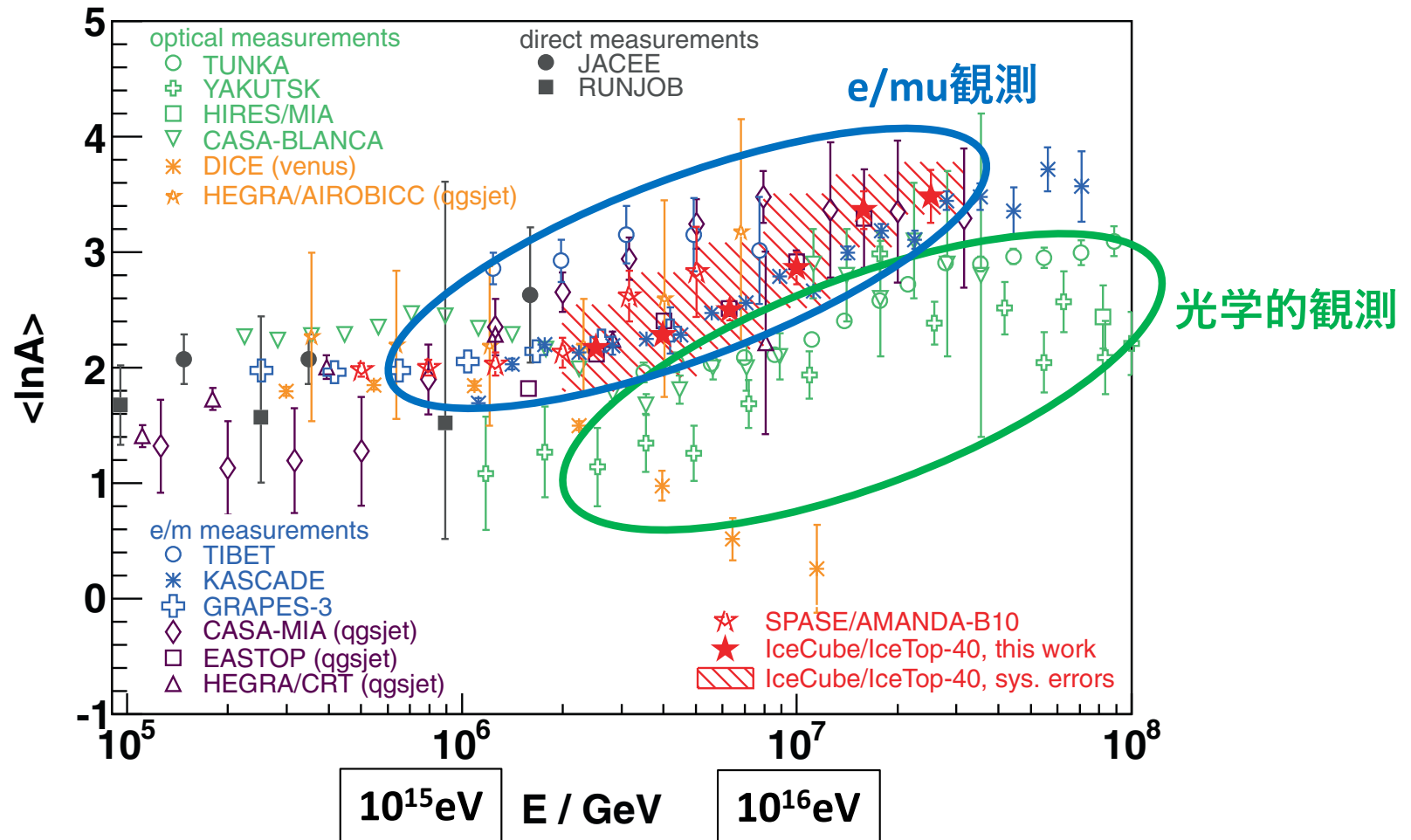
1

$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}{\ln N_{\mu,\text{Fe}}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}$$



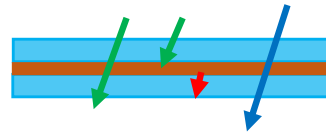
# Optical vs. muon observations

IceCube, Astropart. Phys, 42, (2013)

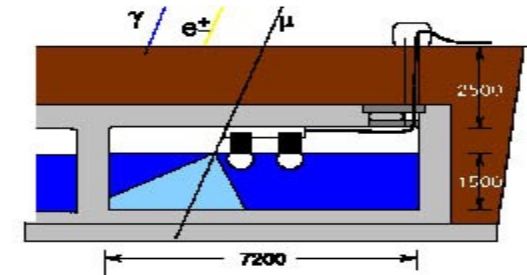


- e/muを用いた方法と **optical**な測定で系統的に結果が違う
- 注：解析に利用している相互作用モデルは様々

# 研究動機



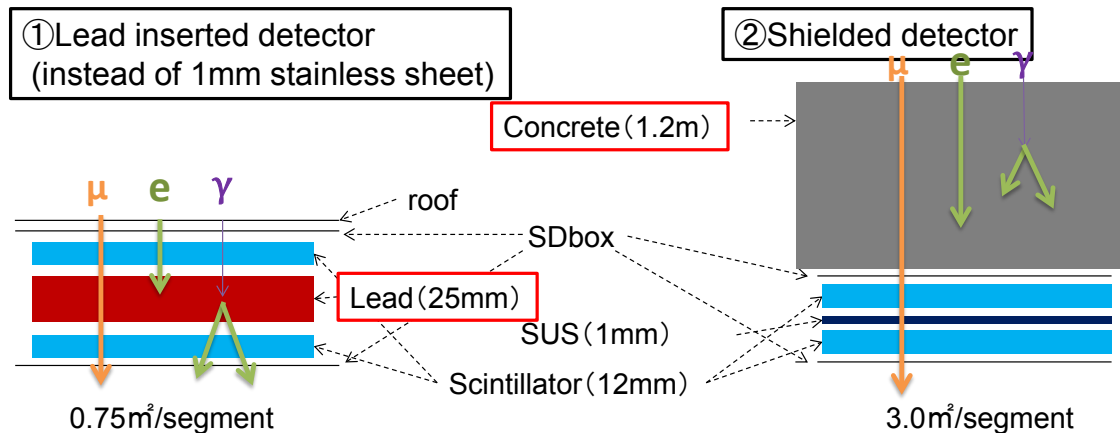
$10^{18-20}\text{eV}$  :  
TA thin scintillators



$10^{14-16}\text{eV}$  :  
ALPACA underground  
water Cherenkov detector

- TA地表検出器で最高エネルギーの化学組成を知りたいが、ミュー粒子問題の理解が必要  
⇒ TAでのミュー粒子測定 (E39)
- LHCで較正された相互作用モデルによるknee付近での化学組成決定  
⇒ ALPACAによる化学組成決定・相互作用検証 (E39)
- 空気シャワーシミュレーションによるミュー粒子生成過程の理解 +  $\alpha$   
⇒ 笠原が開発したCOSMOSの継承と次世代の開発、CORSIKAとの比較 (E48)

# TA CLFサイトの多様な検出器群



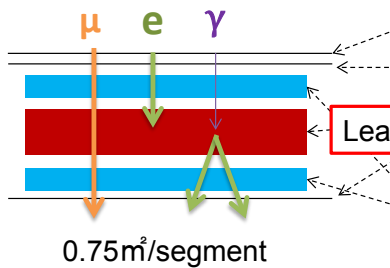
Measure Muon component with 2 different threshold.  
~<100MeV (Lead) and ~600MeV (Concrete)



- Solar panelとバッテリーの購入
- Auger tankと TA SDの相関解析 (Auger側で進展、TA MC進行中)

# TA CLFサイトの多様な検出器群

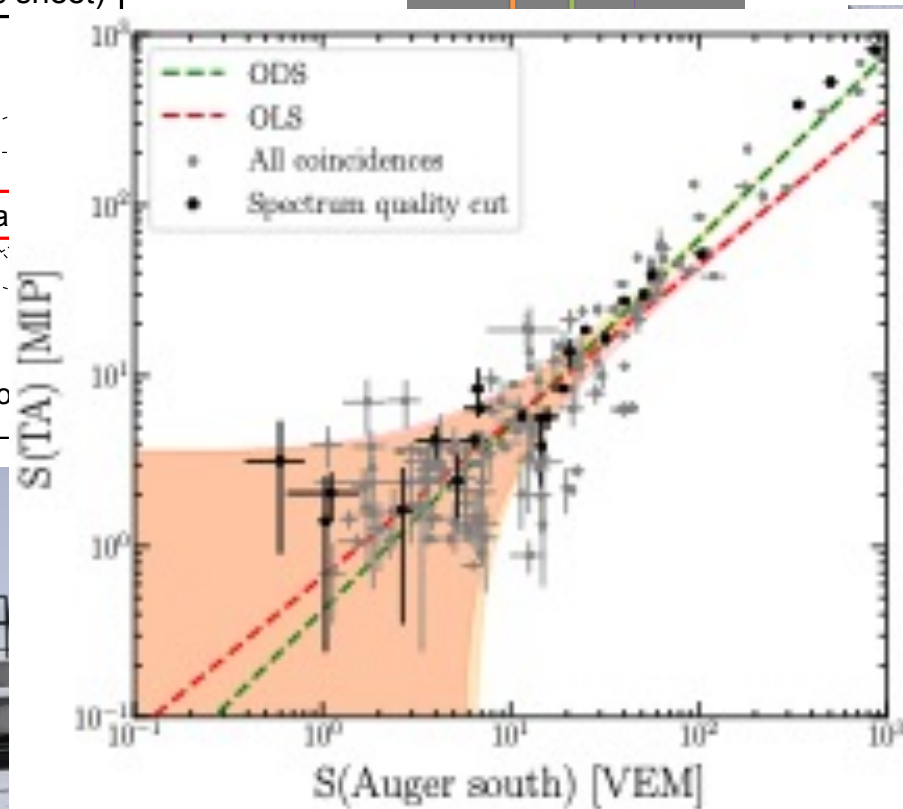
①Lead inserted detector  
(instead of 1mm stainless sheet)



Measure Muo  
~<100MeV (L

②Shielded detector

$\mu$   $e$   $\gamma$

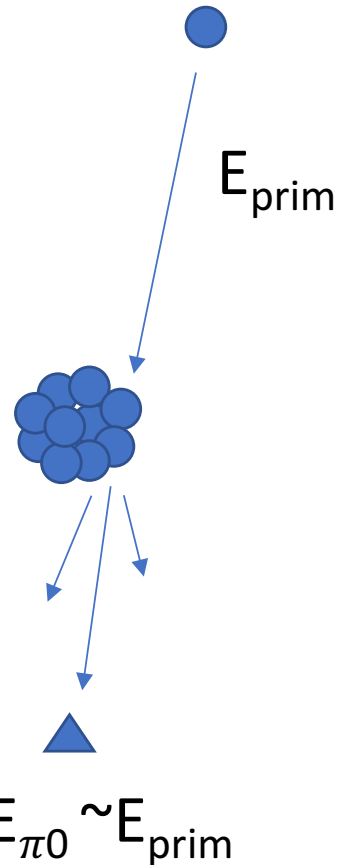
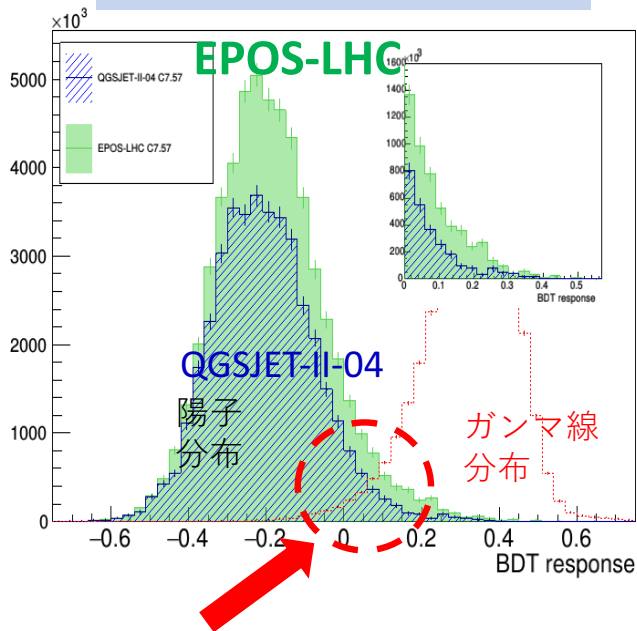


S.Quinn et al. Technical paper in preparation

- Solar panelとバッテリーの購入
- Auger tankと TA SDの相関解析 (Auger側で進展、TA MC進行中)

# EM-like proton shower

$1.0 < \text{recE (TeV)} < 300$

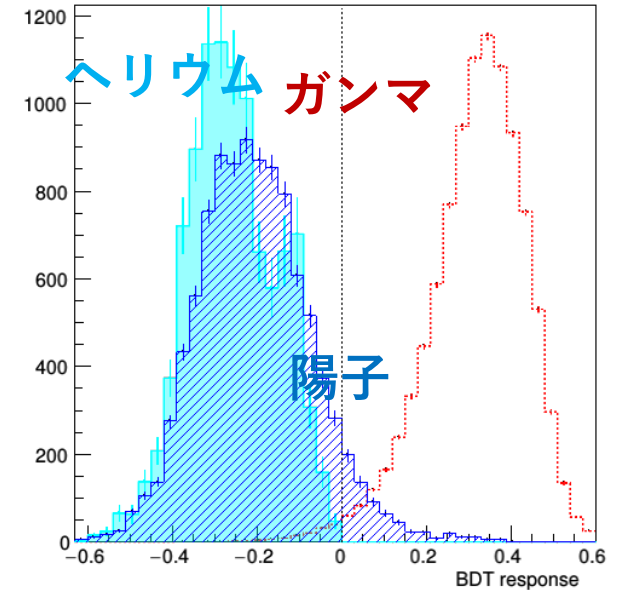
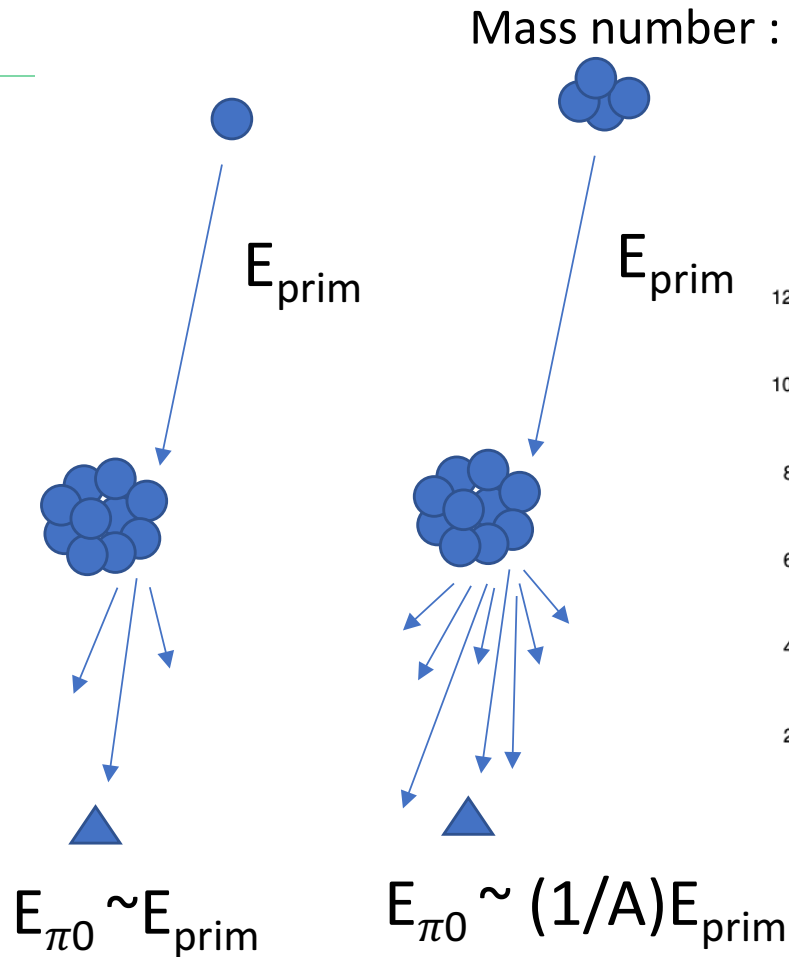
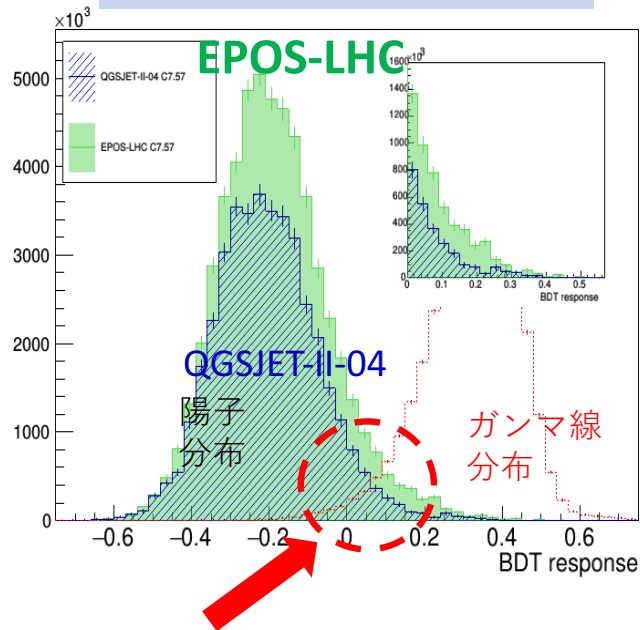


EM-like,  
mu-less shower



# EM-like proton shower

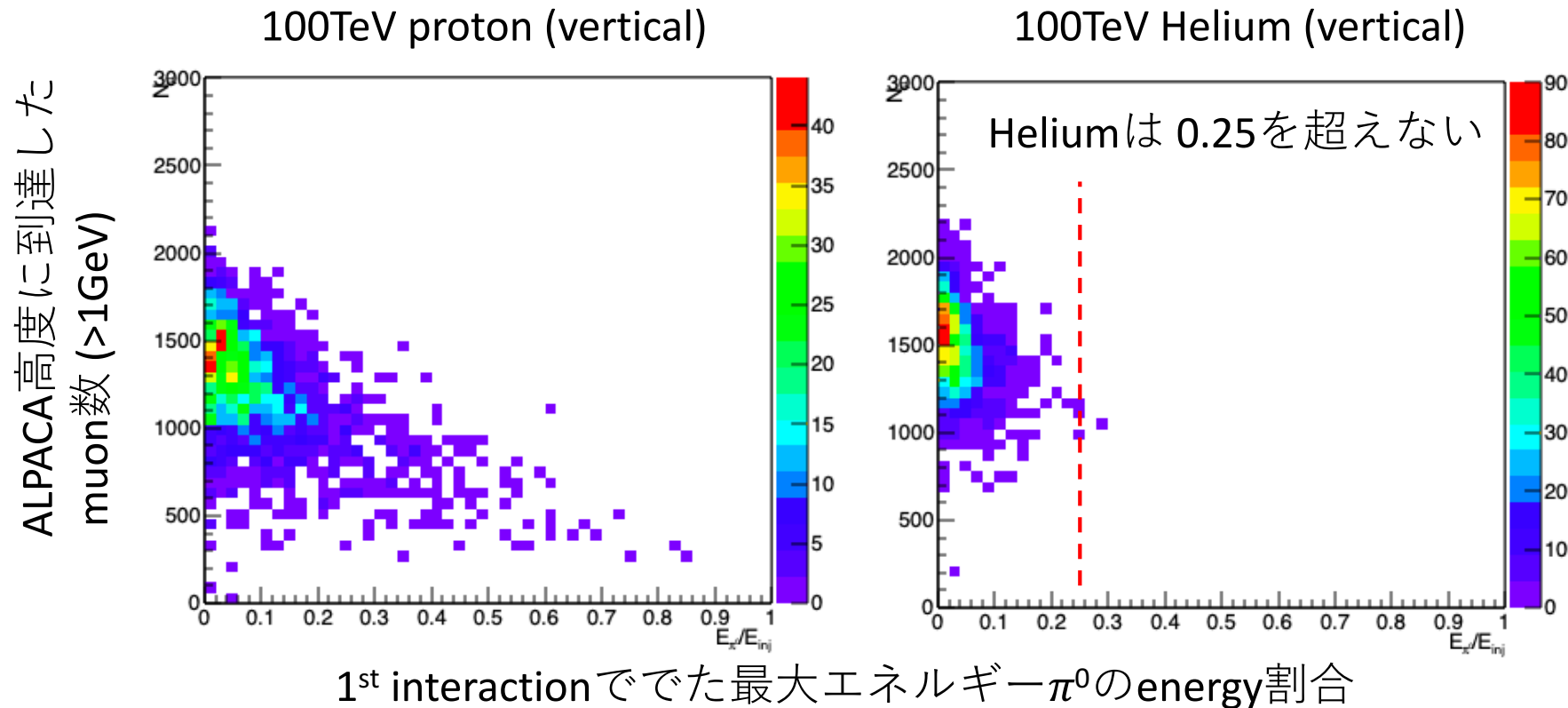
$1.0 < \text{recE (TeV)} < 300$



EM-like,  
mu-less shower

Usual hadronic shower

# Mu-less showerと proton ID



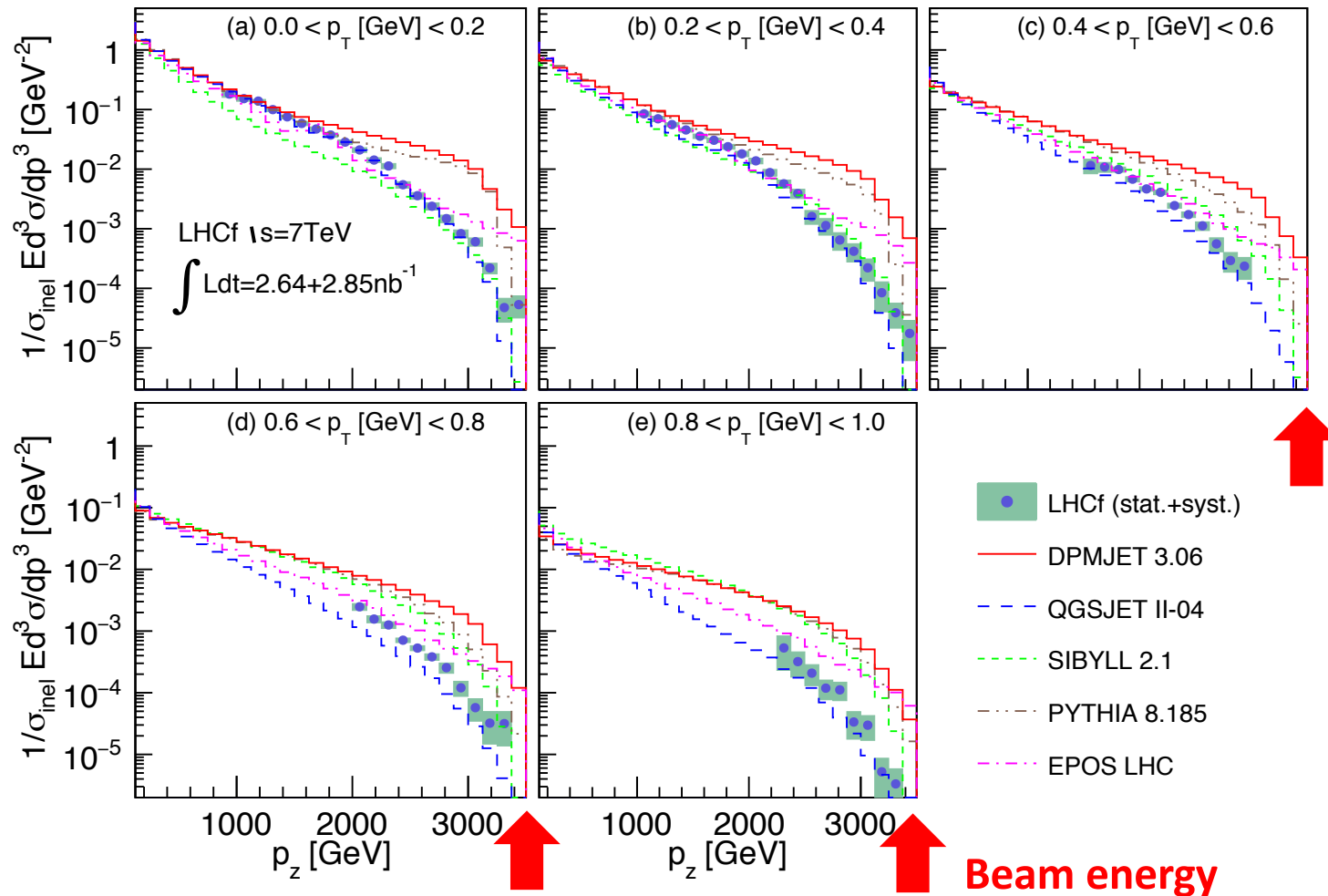
COSMOS 8.035使用 各2000 showers

- $E_{\pi^0} \sim E_{\text{prim}}$  はproton primaryの時だけ  
=> mu-less shower を使って proton kneeを確定できるかも
- **Interaction modelは LHCf +RHICfで制限**
- Mono energy simulationなので、spectrumを考慮したstudy必要
- ALPACAによる >kneeでの陽子加速限界決定の可能性

# $\pi^0$ $p_z$ spectra in 7TeV p-p collisions

( $E_{CR}=2.5 \times 10^{16}$  eV)

LHCf, PRD, 94 (2016) 032007



- 入射粒子を同程度のエネルギーを持つ $\pi^0$ は生成されている
- 生成断面積は **QGSJET II-04**  $<$  **TRUE**  $<$  **EPOS-LHC**の制限

# E48活動内容（COSMOS開発）

- 2013年末、有志による「モンテカルロシミュレーション研究会」として発足（2014年から共同利用）
- COSMOS GFortran版の公開、ICRR webサーバーでの公開
- cmake compileの実現（まだ未公開）
- 「空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会」（シニア＋学生セッション）
- 構造の改良：相互作用のモジュール化（地味な coding作業）
- 共同研究者で分担し、多様な環境でのコンパイルと動作試験
  - 今年度6回のマイナーアップデート（環境依存を多数発見）
  - Web page, manual, サンプルコード等の改良
- 来年度、今後の方向性を議論
  - 若手への講習会の開催（CORSIKAも含む）
  - 大気、大気以外の物質、磁場構造への柔軟な対応（CORSIKAとの差別化）
  - ニュートリノ反応の導入

# COSMOS update history 2018

## Minor updates

- 8.03 (25-Apr) : source fileを一本化
- 8.031 (16-Aug) : bug fix
- 8.032 (23-Aug) : sibyll2.3c.fにコンパイル依存バグ => CRMCで使っていた sibyll2.3c01.fに変更 (Felix Riehnに確認)
- 8.033 (30-Aug) : EPOS出力にoff-mass-shell particleあり。CRMCで使っている修正コードを導入。
- 8.034 (18-Oct) : ユーザー定義断面積を利用可能に
- 8.035 (13-Nov) : compile optionの追加

# ICRRの webサーバーに移動！

cosmos.icrr.u-tokyo.ac.jp

## Welcome to the Home Page of Cosmos

**Cosmos (from v8.00)** is now compatible with the formal Fortran grammar:

i.e, can be compiled with GNU gfortran as well as Intel ifort. etc

The essential difference from the older ones is in the treatment of the "structure construct". The conversion of "old to new" style was managed by [the new Cosmos development team](#)

For more details, [see a short manual](#) with some updated features in this version.

## Contents

- [What is Cosmos?](#)
- [Documentation](#)**additional new manual is ready**(Mar.09, 2003, for version 6.35).
- A step-by-step guide to how to use [Distributed Paralell job](#)scheme for an event is ready.(Aug. 07, 2007). Revised; more comprehensive.  
Idea itself is explained [here](#)  
Application for the TA project is explained [here](#)

# 新ページのイメージ

- <http://cosmos.icrr.u-tokyo.ac.jp/newcosmosHome/index.html>

A screenshot of the main content area of the COSMOS home page. The background is light blue. At the top, there is a header with the text "Welcome to the COSMOS home" and a navigation bar with links: "Top", "Platforms", "Download", "Installation and Users' guide", "Sample codes", "Doxygen", and "Documents". Below the header, there is a paragraph of text: "This COSMOS homepage is renewed since the COSMOS version 8, which is now compatible with the formal Fortran grammar: i.e., can be compiled with GNU gfortran as well as Intel ifort. etc. The essential difference from the older ones is in the treatment of the 'structure construct'. The conversion of 'old to new' sp... For more details, see a short manual with some updated features in this version." Below this, there is a link: "For old versions of COSMOS, please go to the [old COSMOS page](#)." Below that, there is a section titled "What is COSMOS?" with the text: "It is a versatile Monte Carlo simulation code for propagation of cosmic rays in the atmosphere and near earth environment. It can calculate muon polarization, or very high energy air showers in the GZK cutoff region with magnetic bremsstrahlung and pair production." Below this, there is a section titled "New COSMOS development team" with a list of names and affiliations: K.Kasahara (Waseda Univ.), kasaharaAicrr.u-tokyo.ac.jp; H.Menjo (Nagoya Univ.), menjoAisee.nagoya-u.ac.jp; T.Nonaka (ICRR, Univ. Tokyo), nonakaAicrr.u-tokyo.ac.jp; T.Sako (ICRR Univ. Tokyo), sakoAicrr.u-tokyo.ac.jp; N.Sakurai (Tokushima Univ.), nsakuraiAicrr.u-tokyo.ac.jp; A.Taketa (ERI, Univ. Tokyo), TBC; Y.Tameda (Kanagawa Univ.), tameAicrr.u-tokyo.ac.jp; Y.Tsunesada (Osaka City Univ.), ytAsci.osaka-cu.ac.jp; Y.Yoshikoshi (ICRR, Univ. Tokyo), TBC. At the bottom, there is a line of text: "This project is supported by the joint research program of the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), the University of Tokyo." A blue callout box with a white background is overlaid on the right side of the page. It has a green header with the text "The Users Manual of Cosmos" and "Cosmos group". Below the header, there is a list of contents: "Contents", "A Short History of Cosmos and Acknowledgment", "Major differences from older versions", "Introduction" (with sub-items: "Where is it?", "Platforms you can play Cosmos", "Platforms you cannot play Cosmos"), "Installation" (with sub-items: "Setting up your environment", "Upgrading Cosmos"), "First Kiss to Cosmos, a test run", "Running your own job" (with sub-items: "Overview", "Unit of physical quantities", "The coordinate system", "Setting up input data", "User-hook routines"), and "Examples of input data" (with sub-items: "Observing high energy particles at high mountains", "How to observe air showers together with high energy particles", "Air shower transition curves").

# まとめ

- 地上検出器による化学組成の決定は挑戦的で重要な課題
- ミューオン問題の理解が必要
  - TAでミューオンを測る準備
  - ALPACAの高純度のミューオン測定を利用した、**knee**での陽子シャワー選別を検討。高エネルギー  $\pi^0$  の生成断面積は既知。
- COSMOS開発体制の確立
  - 動作試験の分担 => 環境依存・バグの発見対応
  - ユーザー対応強化 => 若手への講習会計画中
  - コードの構造化 => 地球大気以外への応用



backup

# 空気シャワーとミュオン

UHECR 2018 conference

WHISP (Hadronic Interactions/Shower Physics

Working Group) report

## Combining muon

Report on Tests and Measurements  
of Hadronic Interaction Properties  
with Air Showers

Hans Dembinski for the WHISP:

J.C. Arteaga, L. Cazon, R. Conceição, J. Gonzalez, Y. Itow, D. Ivanov, N.N. Kalmykov, I. Karpikov, T. Pierog, F. Riehn, T. Sako, D. Soldin, R. Takeishi, G. Thomson, S. Troitsky, I. Yashin, E. Zdeba, Y. Zhezher

Hans Dembinski | MPIK Heidelberg, Germany

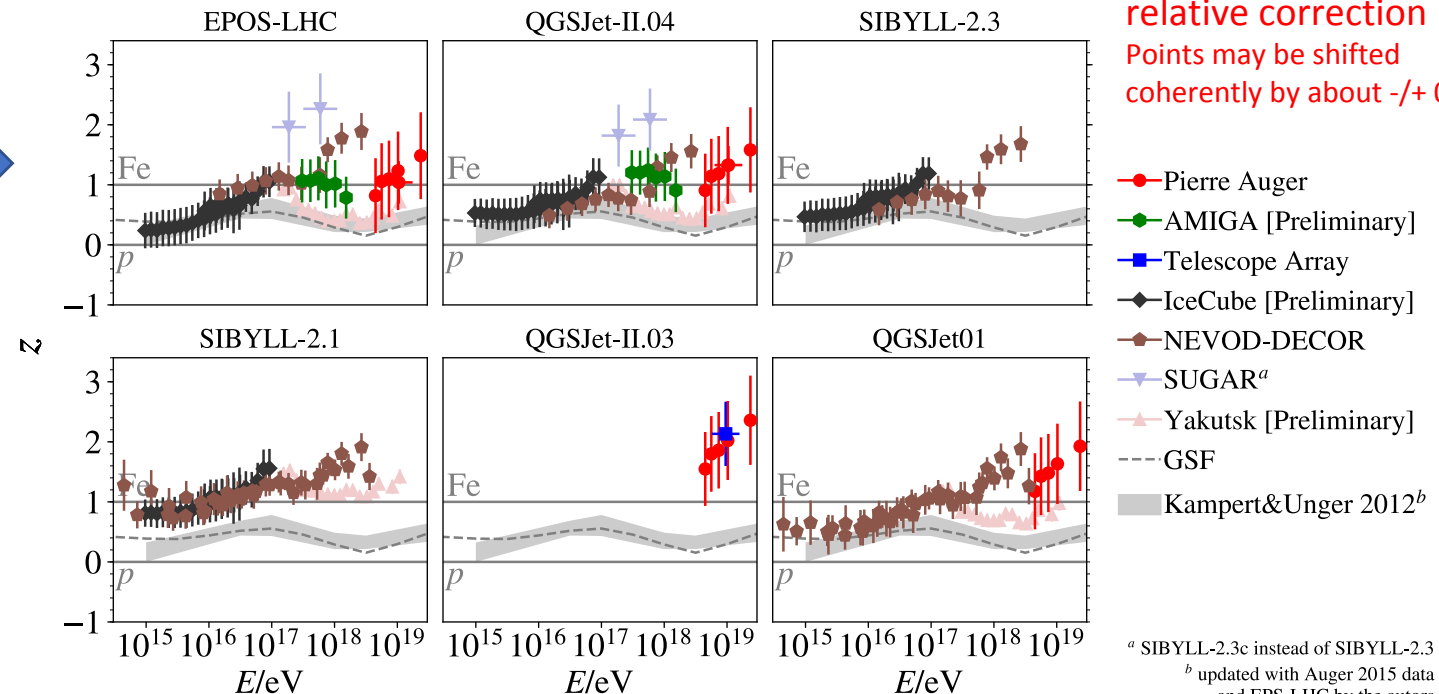
1

**Step 2:** Apply energy scale corrections (after, experiments with unknown scale not shown)

Still present: possible dependence on shower age, lateral distance, energy threshold

**Absolute energy-scale  
still uncertain after  
relative correction**  
Points may be shifted  
coherently by about  $\pm 0.25$

Post LHC models



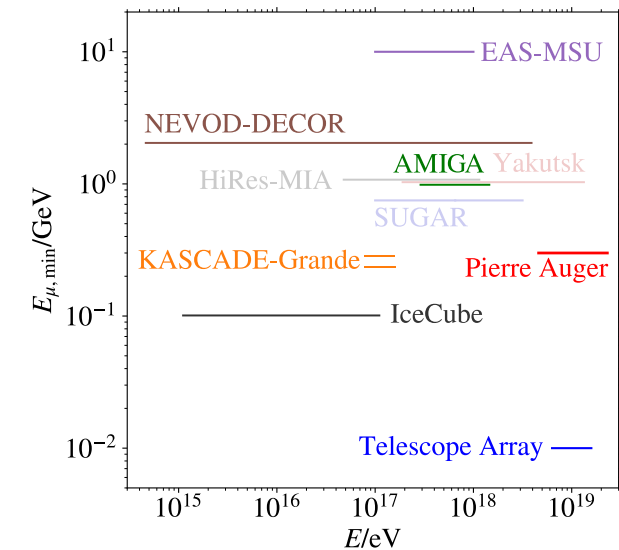
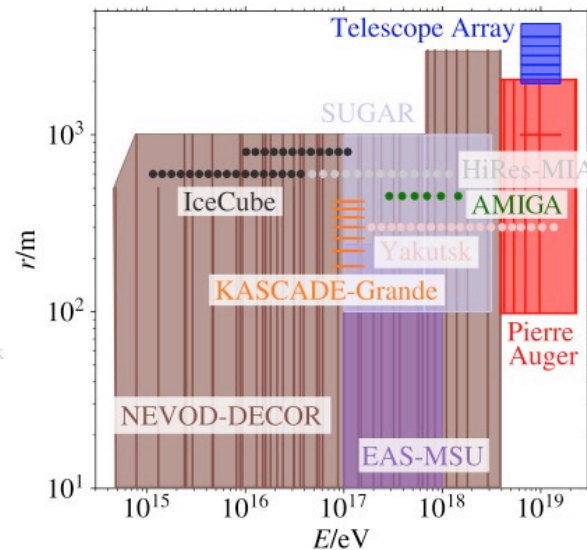
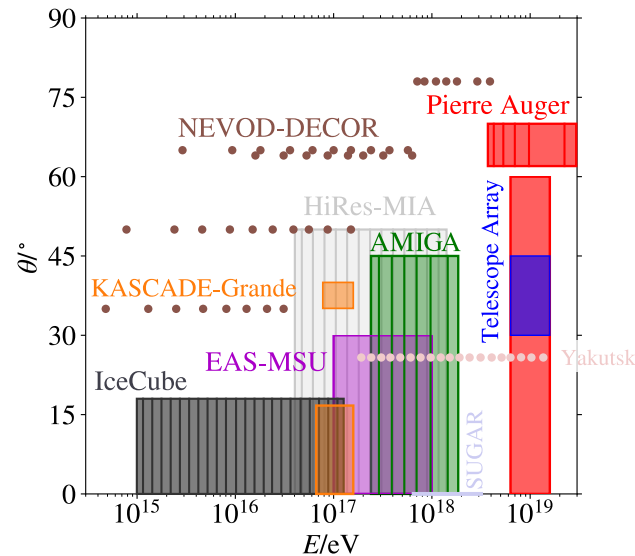
$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}{\ln N_{\mu,\text{Fe}}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}$$

<sup>a</sup> SIBYLL-2.3c instead of SIBYLL-2.3

<sup>b</sup> updated with Auger 2015 data and EPS-LHC by the authors

# Muon measurements: overview

lines & boxes: result integrated over range



$E = 0.5 \text{ PeV} \dots 20 \text{ EeV}$

$\theta = 0 \dots 78 \text{ deg}$

$r = 0 \dots 4 \text{ km}$

$E_{\mu, \text{threshold}} = 0.01 \dots 10 \text{ GeV}$

**Pierre Auger**

**Telescope Array**

**IceCube**

**KASCADE-Grande**

**NEVOD-DECOR**

**SUGAR**

**EAS-MSU**

**Yakutsk**

**HiRes-MIA**

AMIGA preliminary: S. Müller poster ID 204; PRL 117 (2016) 192001; PRD 91 (2015) 032003

PRD 98 (2018) 022002

ISVHECRI 2018 preliminary

Astropart. Phys. 95 (2017) 25

Phys. Atom. Nucl. 73 (2010) 1852, Astropart. Phys. 98 (2018) 13

PRD 98 (2018) 023014

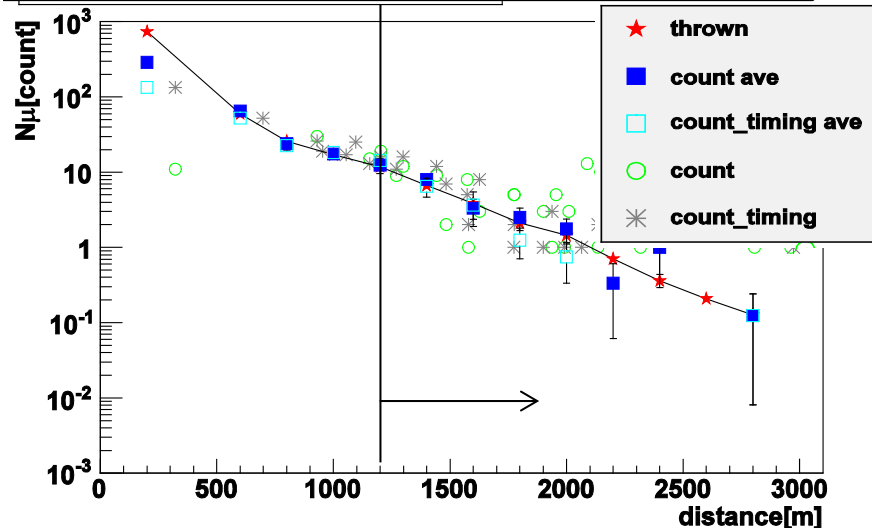
Astropart. Phys. 92 (2017) 1

**Unpublished preliminary results**

PRL 84 (2000) 4276; not part of WG, only included for comparison

# 30m<sup>2</sup> × 2年 観測での観測量の見当をつける。

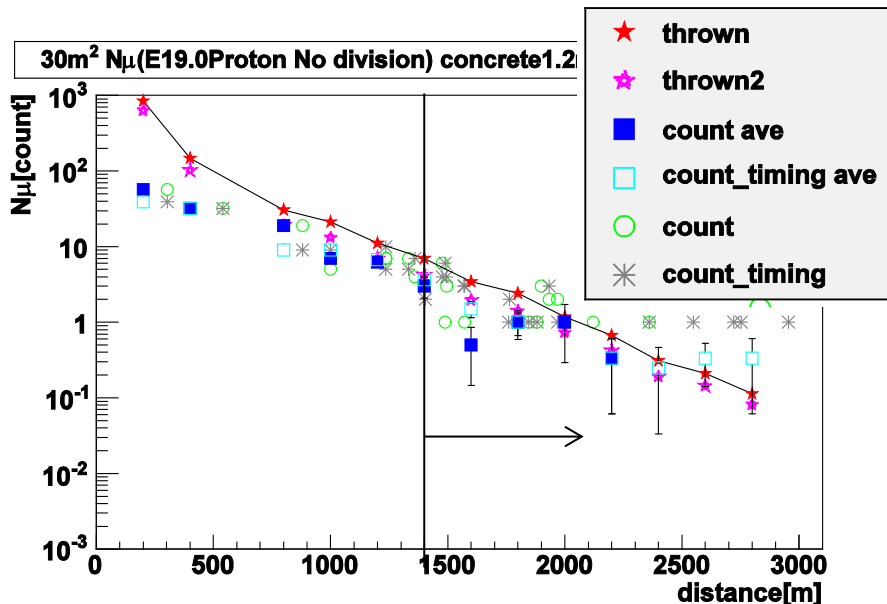
Expected muon lateral  $E > 10^{19.0} \text{ eV}$



Assuming 30m<sup>2</sup> Detector and 2year Observation.

Integrate the counted number in lateral direction.

Evaluate uncertainty for Muon number



	Lead		UG (concrete)	
E [eV]	Fe	P	Fe	P
$10^{18.7}$	9.5%	11.6%	14.5%	15.2%
$10^{19.0}$	9.6%	11.7%	14.4%	18.2%

Ref:

Auger Measure 1.8 times larger number of Muon  
(80% of excess)

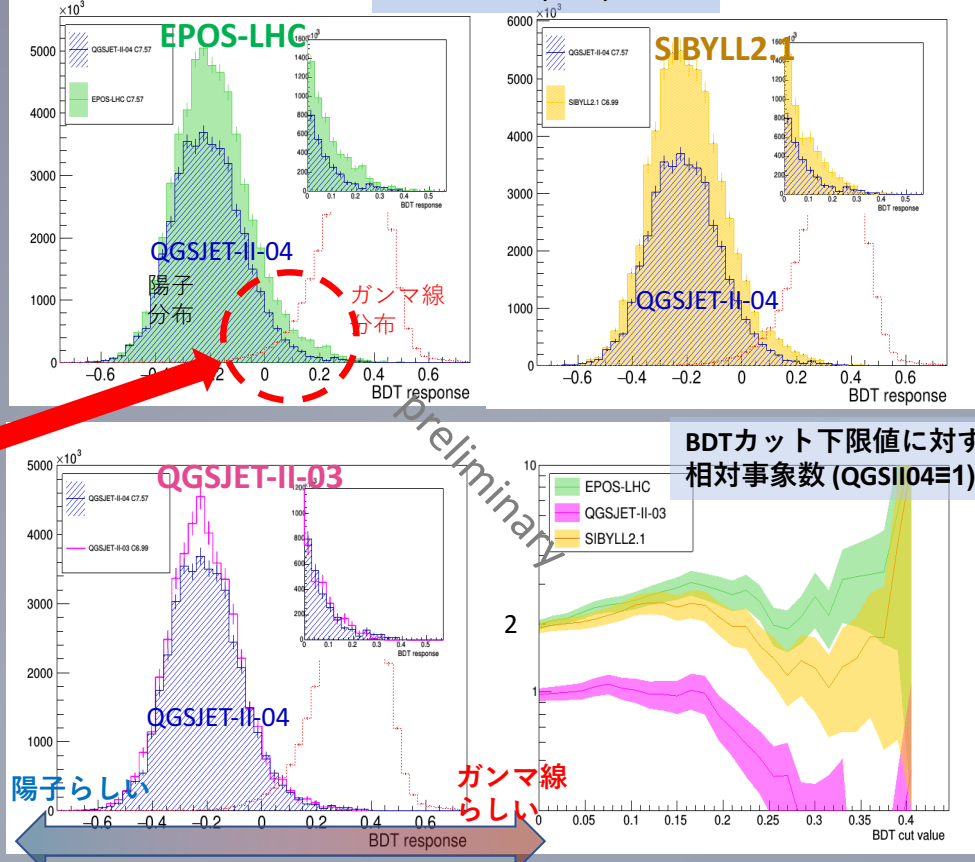


# EM-like proton shower

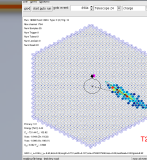
2018年秋の物理学会 大石(CTA)

## CTA baseline arrayでの陽子イベントの 形状パラメータ分布

1.0 < recE (TeV) < 300



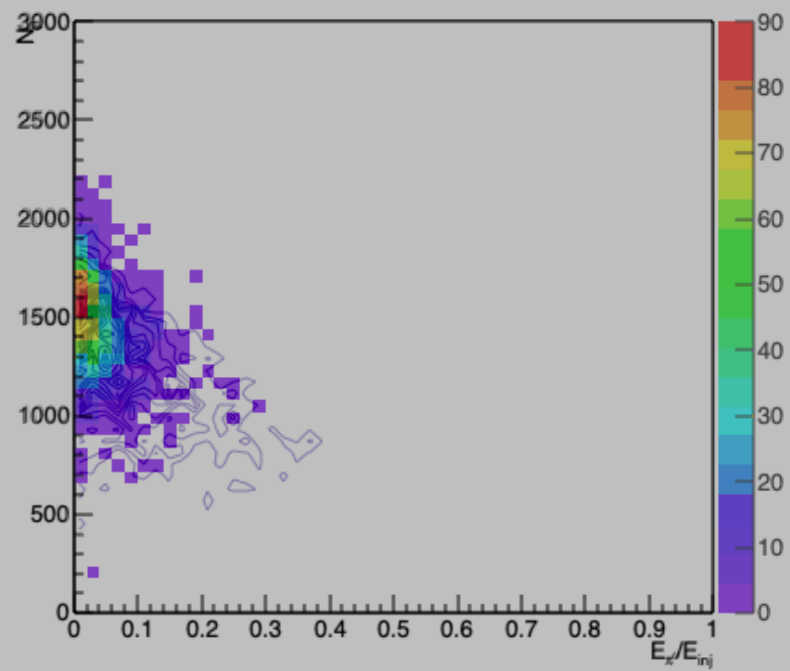
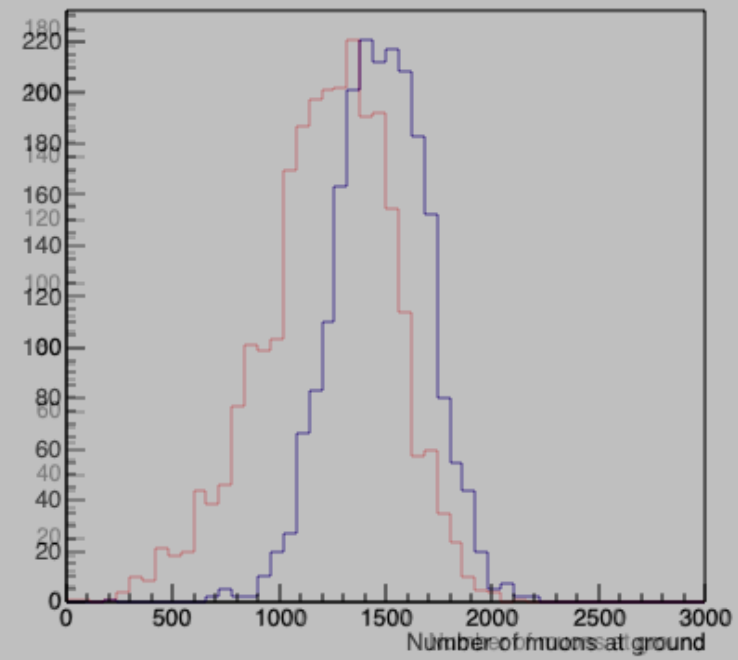
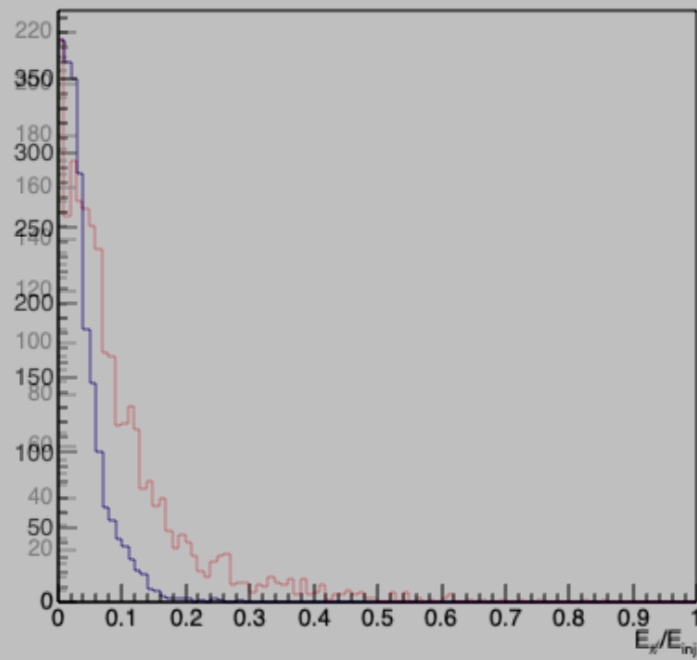
Sim. A



- CTA baseline array (南サイト, 99台)のシミュレーションデータ
- 望遠鏡イメージの多変量解析(BDT)によるガンマ線・ハドロン分離指標の分布
- 陽子は4つの相互作用モデルを比較
- QGSJET-II-04(青斜線)が比較基準
- モデル間でガンマ線様事象数に有意な違い( $\sim$ factor 2)がある

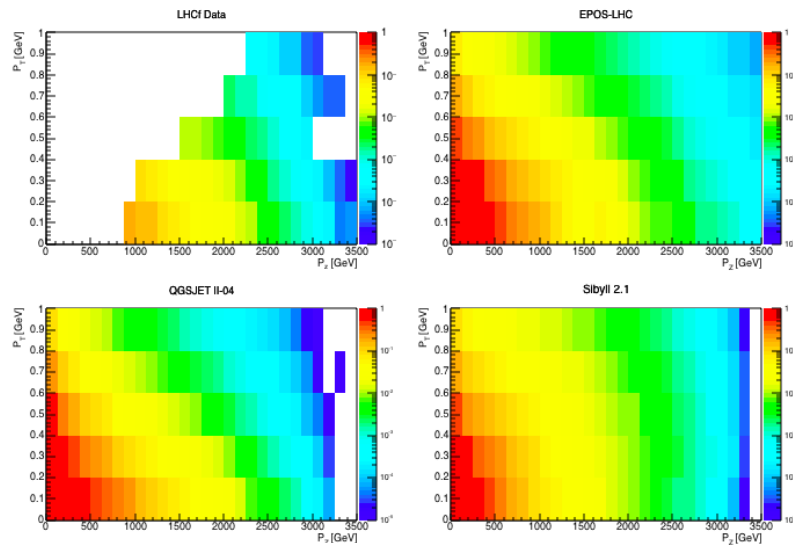
9

- Proton showerの中に電磁シャワーのようなものがある
- モデル依存は factor 2程度
- 1<sup>st</sup> interactionでいきなり high-energy  $\pi^0$ が生成か？

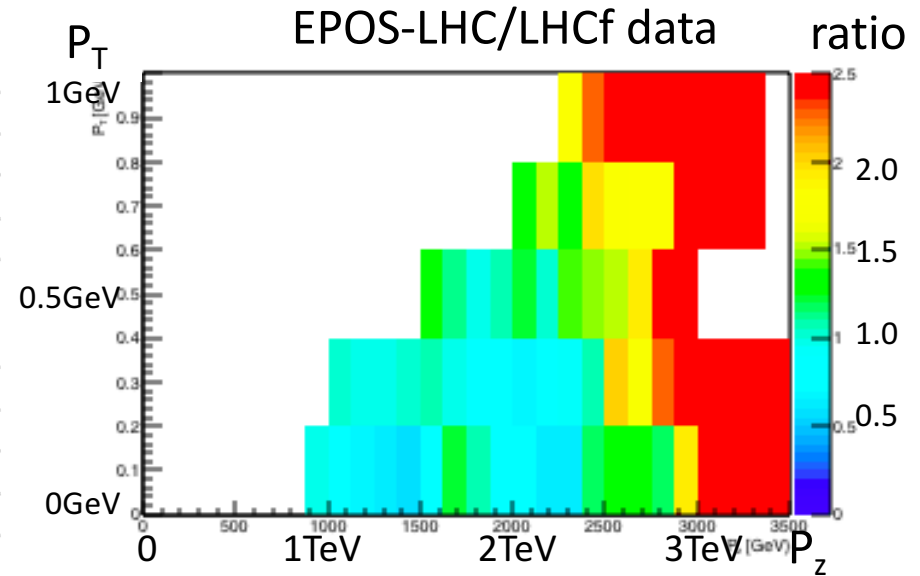
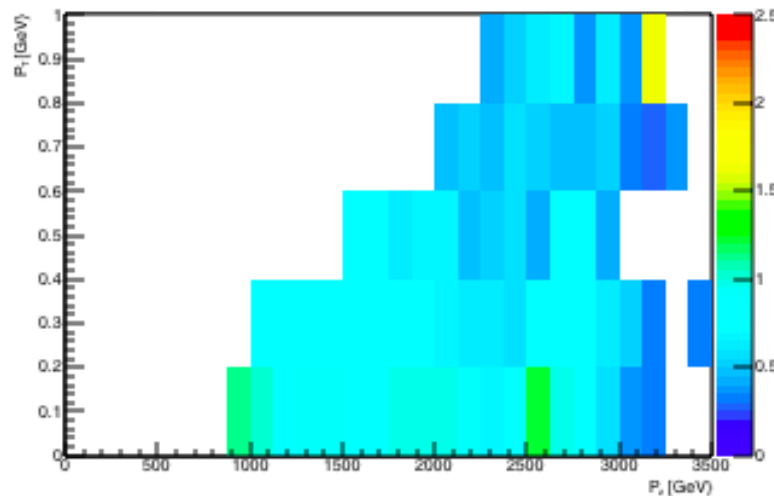


# $\pi^0$ in 7TeV p-p collision

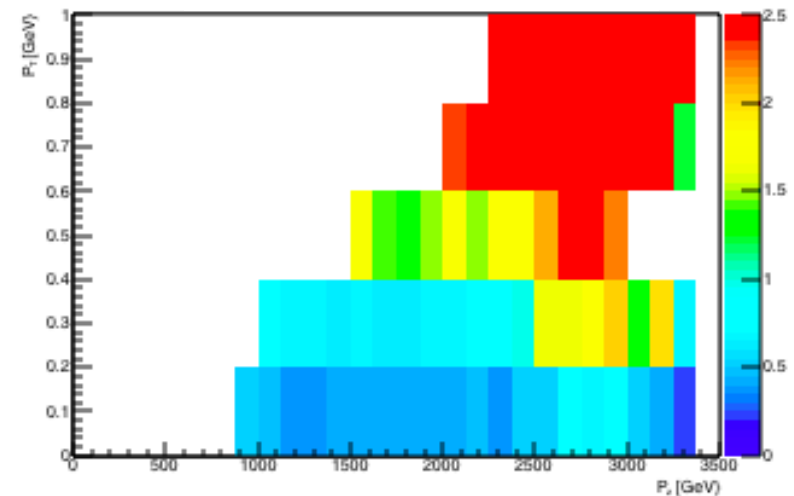
## LHCf and models (ratio to data)



QGSJET II-04/LHCf data

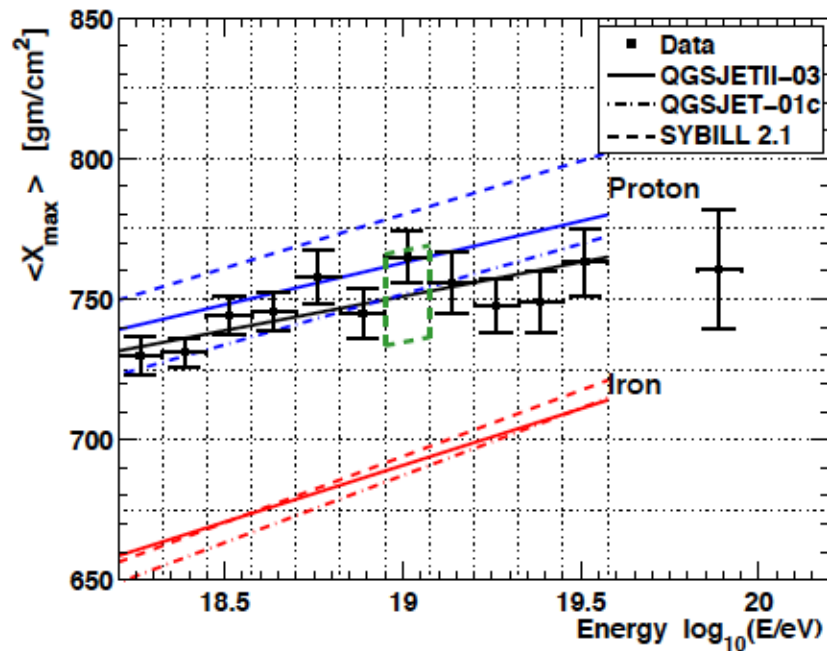


SIBYLL 2.1/LHCf data

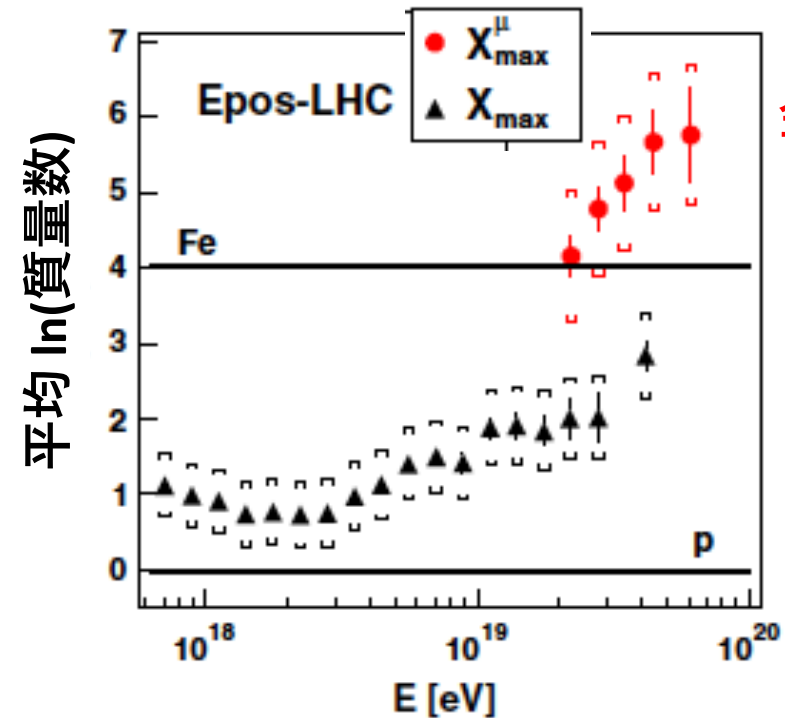




# 空気シャワーデータ「解釈」におけるシミュレーションの影響 I



TA, APP 2015

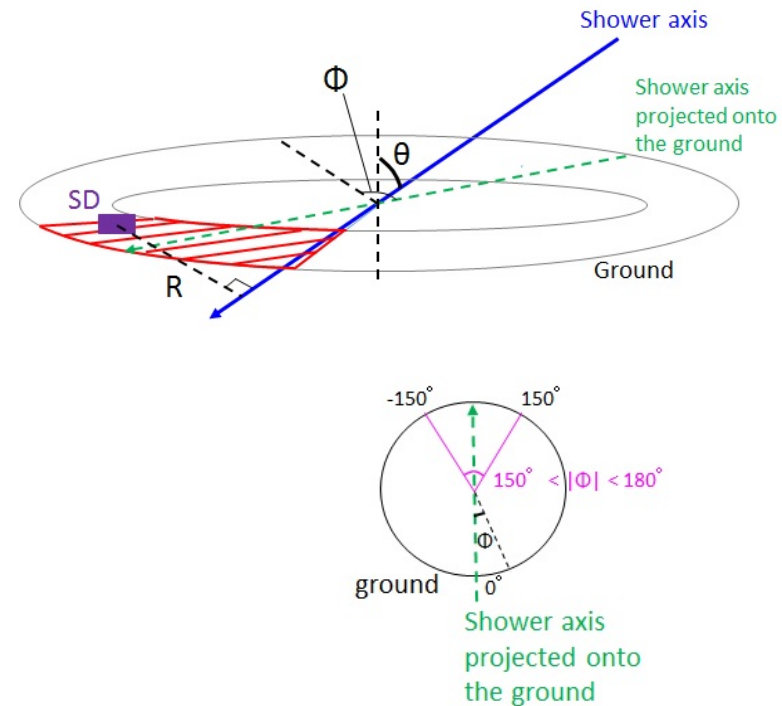
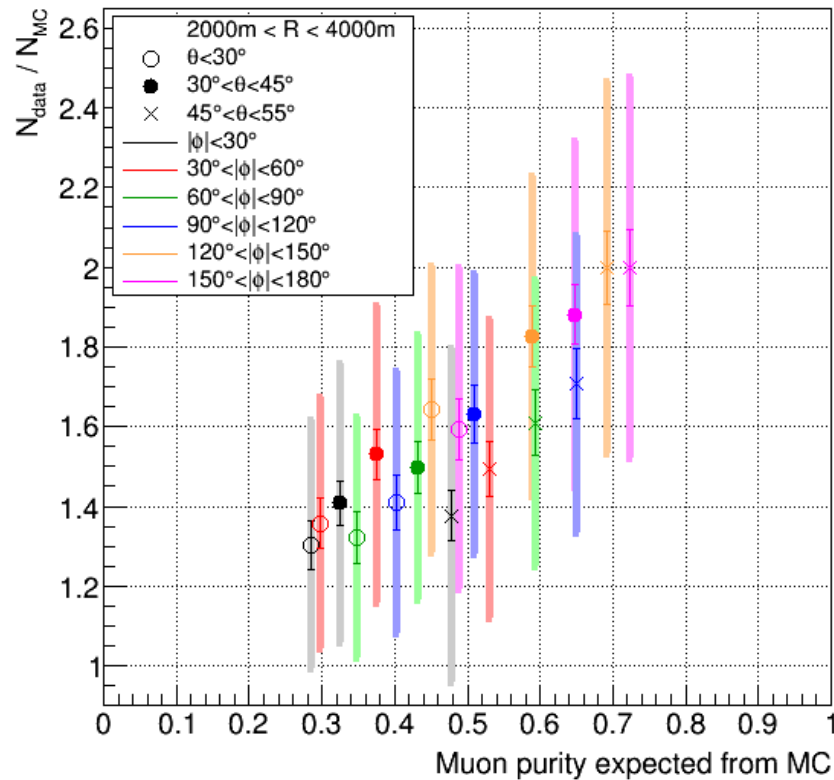


PAO, PRD 2014

- $\langle X_{\max} \rangle$ による composition決定は比較するモデルに依存する
- $\langle X_{\max} \rangle$ と $\langle X_{\max}^{\mu} \rangle$ による平均質量数推定に矛盾

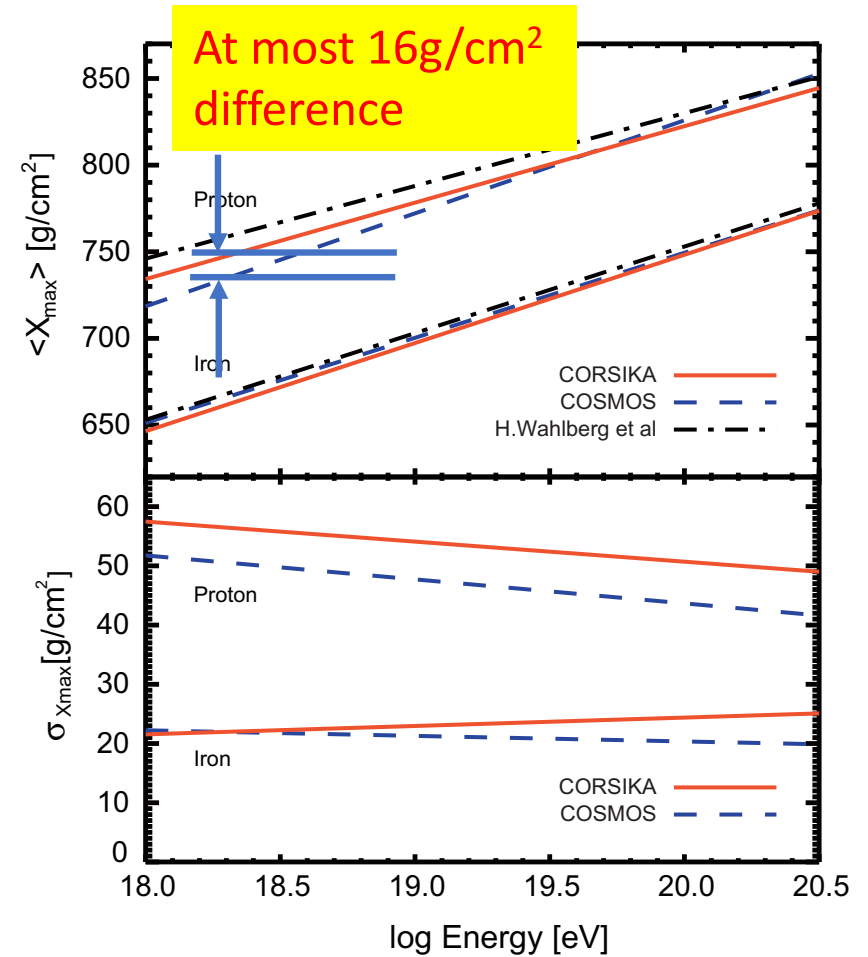
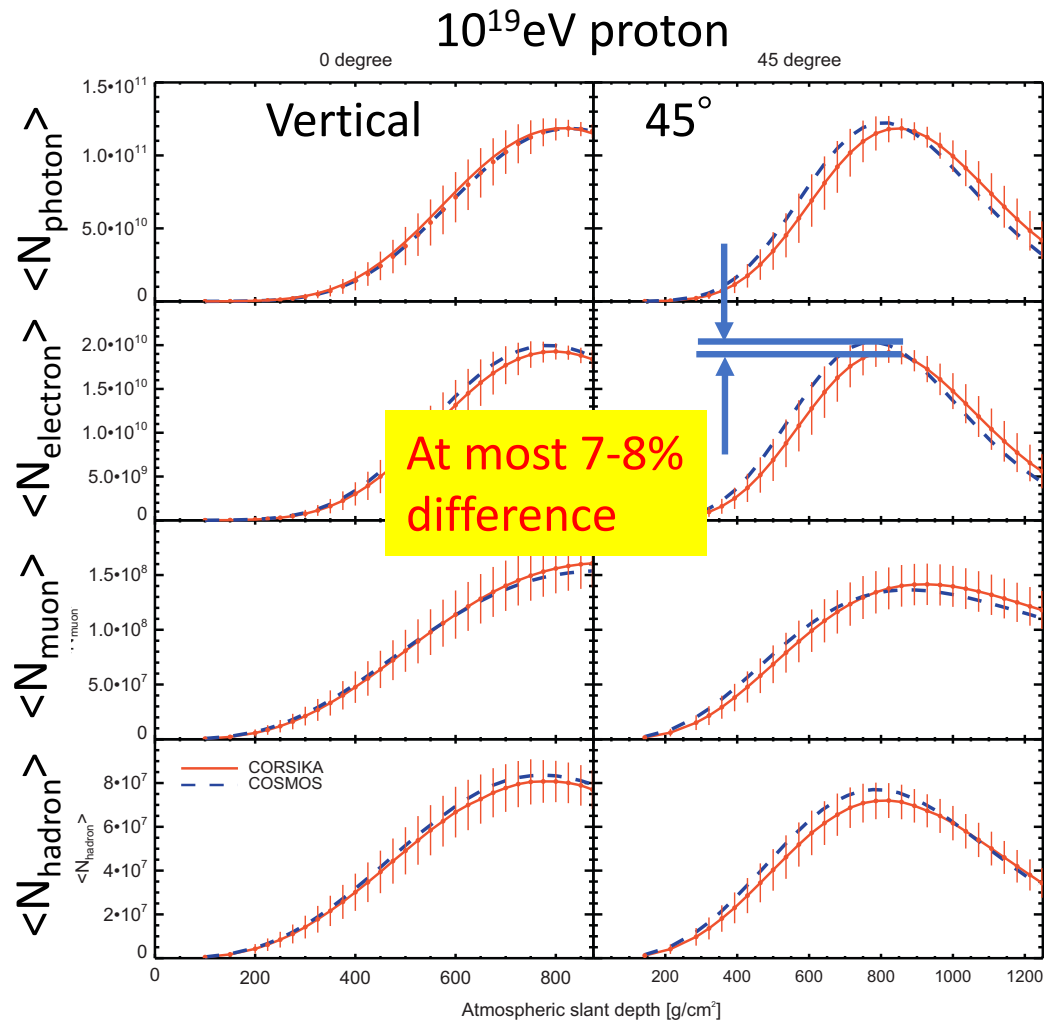
$X_{\max}^{\mu}$  : 最大muon発生高度

# 空気シャワーデータ「解釈」における シミュレーションの影響 II



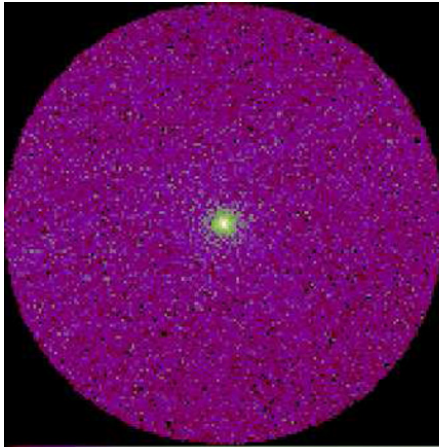
- 武石学位論文 (2017年・東大)
- muon purity (geometryのみの関数としてMCで予想) とTAデータの粒子数超過 (MC比) に正の相関

# CORSIKA と COSMOS の比較



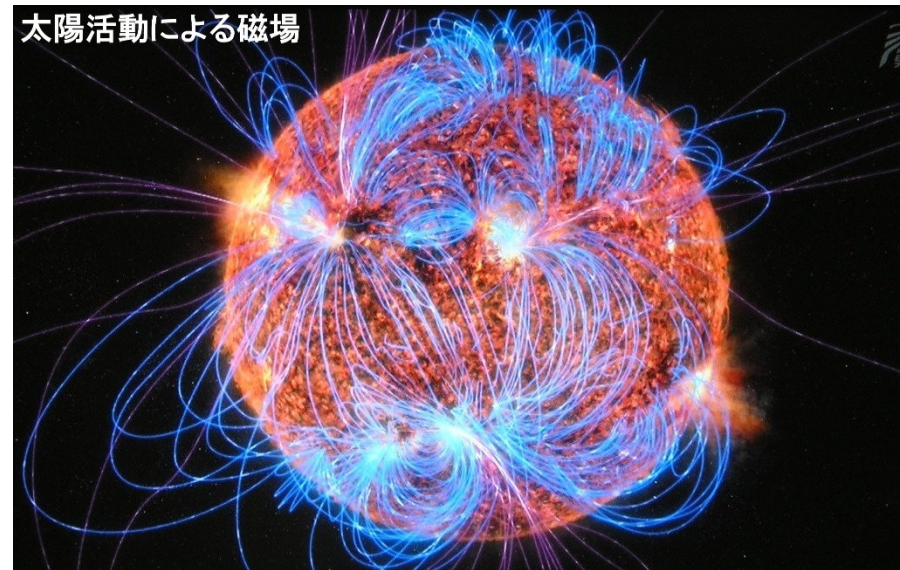
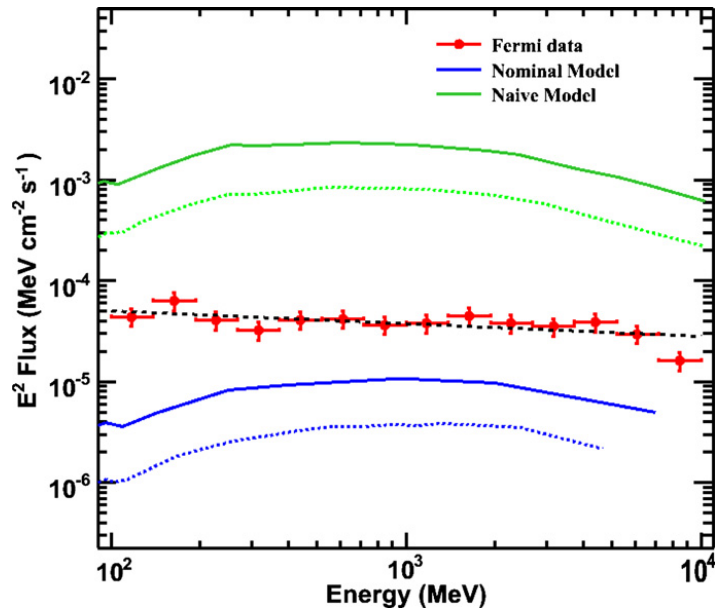
S. Roh et al., Astroparticle Physics 44 (2013) 1–8

# さこの個人的な計画



- Fermi/LATによる太陽からの定常ガンマ線
- GCR + 太陽大気反応

A.Abdo et al., ApJ, 734:116 (10pp), 2011



太陽活動による磁場  
太陽磁場モデルを含んだ太陽大気における  
空気シャワーシミュレーション

=> <1AUでの銀河宇宙線強度の測定 28