



# チベット高原での 高エネルギー宇宙線の研究

川田 和正 (東京大学宇宙線研究所)

For the Tibet AS $\gamma$  Collaboration

# 平成30年度チベット実験関係 共同利用研究採択課題一覧

1. チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究(継続)  
(瀧田正人 東京大学宇宙線研究所)
2. Knee領域一次宇宙線組成の研究(継続)  
(片寄祐作 横浜国立大学大学院工学研究院)
3. 宇宙線による太陽の影を用いた太陽周辺磁場の時間変動の研究(継続)  
(西澤正己 国立情報学研究所情報社会相関研究系)
4. チベット空気シャワーアレイによる10TeV宇宙線強度の恒星時日周変動の観測(継続)  
(加藤千尋 信州大学理学部)



# チベットグループ共同利用研究 経費執行状況

研究費： 申請額 577万円 → 配分額 **150万円**

Tibet-ASの維持・運転及び  
YAC空気シャワーコア観測装置と  
水チェレンコフ型地下ミュオン観測装置の維持・運転  
に必要な経費の一部に使用。

旅費： 申請額 985万円 → 配分額 **275万円**

中国出張海外旅費や宇宙線研での研究打ち合わせに使用。

**ご支援、どうもありがとうございます！**

# 成果発表

- 査読論文

- Amenomori et al., PRL, 120, 031101 (2018)  
→ 信州大学よりプレスリリース
- Amenomori et al., ApJ, 860,13 (2018)

- 学会発表

- AOGS2018(Hawaii) 2 件
- ISVHECRI2018(Nagoya) 1 件
- ISEE太陽圏研究集会2018年2月 1 件
- 日本物理学会2018年秋(信州大学) 1 件
- 日本物理学会2019年春(九州大学) 2 件 (予定)

- 博士論文

- 中村佳昭, 信州大学博士論文 (2018)  
→ 日本物理学会若手奨励賞



# The Tibet AS $\gamma$ Collaboration



M.Amenomori(1), X.J.Bi(2), D.Chen(3), W.Y.Chen(2), S.W.Cui(4), Danzengluobu(5), L.K.Ding(2), X.H.Ding(5),  
C.F.Feng(6), Zhaoyang Feng(2), Z.Y.Feng(7), Q.B.Gou(2), H.W.Guo(5), Y.Q.Guo(2), H.H.He(2), Z.T.He(4,2),  
K.Hibino(8), N.Hotta(9), Haibing Hu(5), H.B.Hu(2), J.Huang(2), H.Y.Jia(7), L.Jiang(2), F.Kajino(10),  
K.Kasahara(11), Y.Katayose(12), C.Kato(13), K.Kawata(3), Labaciren(5), G.M.Le(2), A.F.Li(14,6,2), W.J.Li(2,7),  
C.Liu(2), J.S.Liu(2), H.Lu(2), X.R.Meng(5), K.Mizutani(11,15), K.Munakata(13), H.Nanjo(1), M.Nishizawa(16),  
M.Ohnishi(3), I.Ohta(17), S.Ozawa(11), X.L.Qian(6,2), X.B.Qu(2), T.Saito(18), T.Y.Saito(19), M.Sakata(10),  
T.K.Sako(3), J.Shao(2,6), M.Shibata(12), A.Shiomi(20), T.Shirai(8), H.Sugimoto(21), M.Takita(3), Y.H.Tan(2),  
N.Tateyama(8), S.Torii(11), H.Tsuchiya(22), S.Udo(8), H.Wang(2), H.R.Wu(2), L.Xue(6), Y.Yamamoto(10),  
Z.Yang(2), S.Yasue(23), A.F.Yuan(5), T.Yuda(3), L.M.Zhai(2), H.M.Zhang(2), J.L.Zhang(2), X.Y.Zhang(6),  
Y.Zhang(2), Yi Zhang(2), Ying Zhang(2), Zhaxisangzhu(5), X.X.Zhou(7)

- (1) Department of Physics, Hirosaki University, Japan
- (2) Key Laboratory of Particle Astrophysics,  
Institute of High Energy Physics,  
Chinese Academy of Sciences, China
- (3) Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Japan
- (4) Department of Physics, Hebei Normal University, China
- (5) Department of Mathematics and Physics, Tibet University, China
- (6) Department of Physics, Shandong University, China
- (7) Institute of Modern Physics,  
South West Jiaotong University, China
- (8) Faculty of Engineering, Kanagawa University, Japan
- (9) Faculty of Education, Utsunomiya University, Japan
- (10) Department of Physics, Konan University, Japan
- (11) Research Institute for Science and Engineering,  
Waseda University, Japan

- (12) Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan
- (13) Department of Physics, Shinshu University, Japan
- (14) School of Information Science and Engineering,  
Shandong Agriculture University, China
- (15) Saitama University, Japan
- (16) National Institute of Informatics, Japan
- (17) Sakushin Gakuin University, Japan
- (18) Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan
- (19) Max-Planck-Institut für Physik, Germany
- (20) College of Industrial Technology, Nihon University, Japan
- (21) Shonan Institute of Technology, Japan
- (22) Japan Atomic Energy Agency, Japan
- (23) School of General Education, Shinshu University, Japan



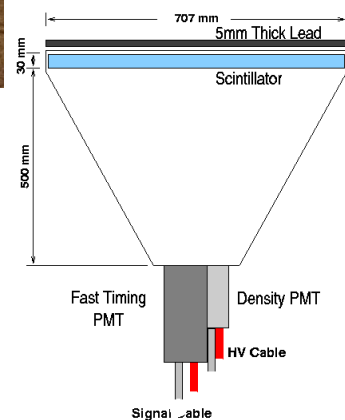
# チベット空気シャワー観測装置



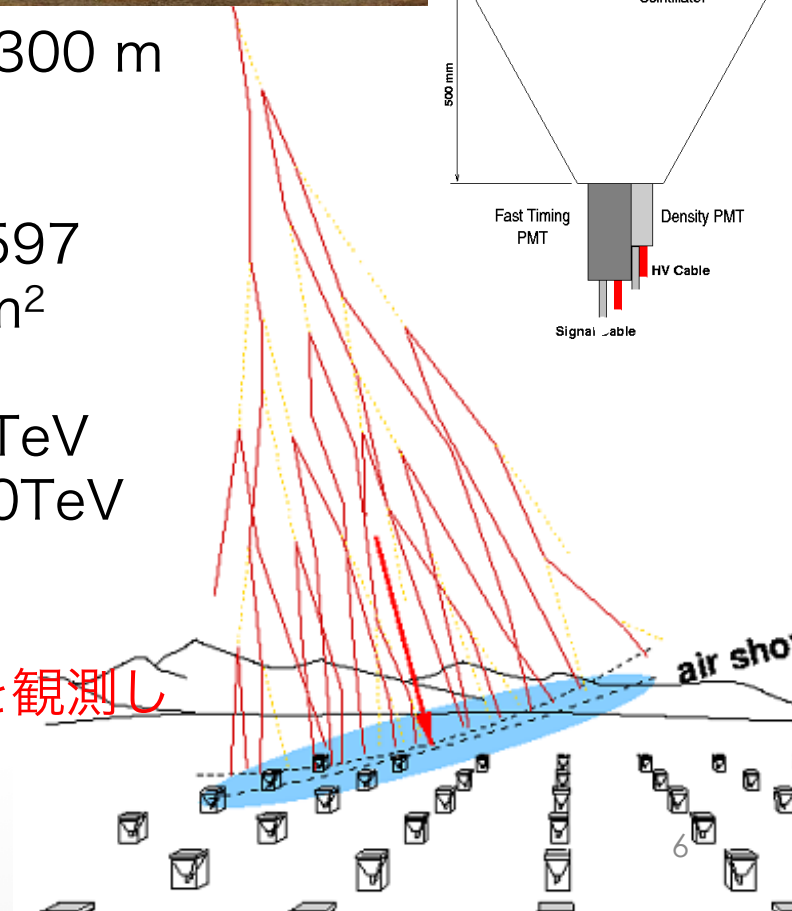
■ チベット ( $90.522^{\circ}\text{E}$ ,  $30.102^{\circ}\text{N}$ ) 標高4300 m

## 現行スペック

- シンチレーション検出器数  $0.5 \text{ m}^2 \times 597$
- 空気シャワー有効面積  $\sim 50,000 \text{ m}^2$
- 観測エネルギー  $> \text{TeV}$
- 角度分解能  
 $\sim 0.5^{\circ} @ 10 \text{ TeV}$   
 $\sim 0.2^{\circ} @ 100 \text{ TeV}$
- 視野  $\sim 2 \text{ sr}$



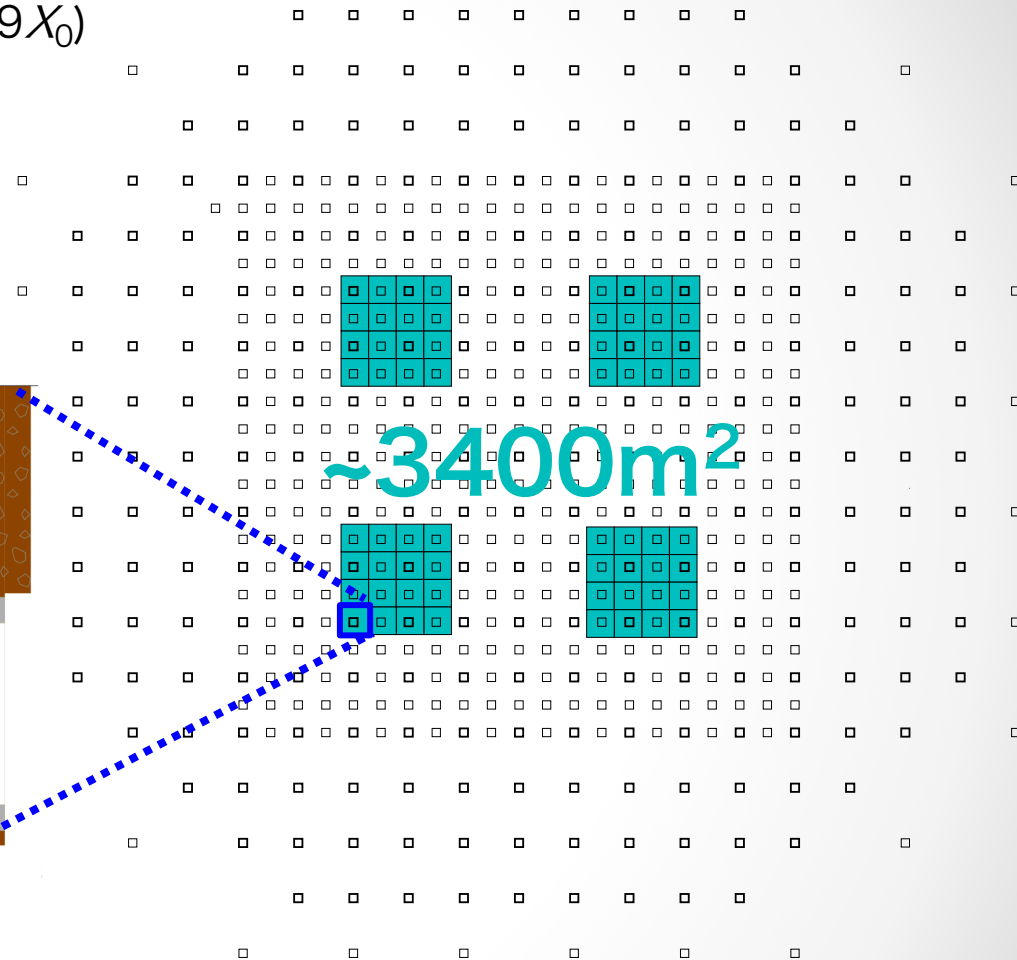
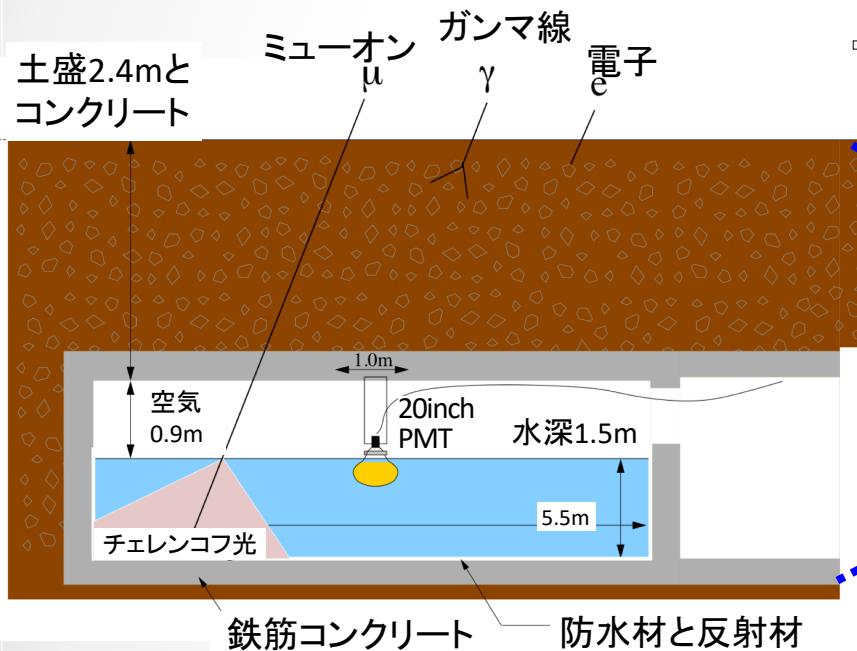
→ 空気シャワー中の二次粒子(主に $e^{\pm}$ ,  $\gamma$ )を観測し  
一次宇宙線エネルギー、方向を決定



# 水チェレンコフ型ミュオン観測装置

□ *Kawata et al., JPS meeting (2018)*

- ✓ 地下 2.4m (物質厚  $\sim 515\text{g/cm}^2 \sim 19X_0$ )
- ✓ 7.35m $\times$ 7.35m $\times$ 水深1.5m 水槽
- ✓ 20"  $\Phi$  PMT (HAMAMATSU R3600)
- ✓ 水槽材質：コンクリート+タイベック



→空気シャワー中のミュオン数を測定し、ガンマ線／核子選別

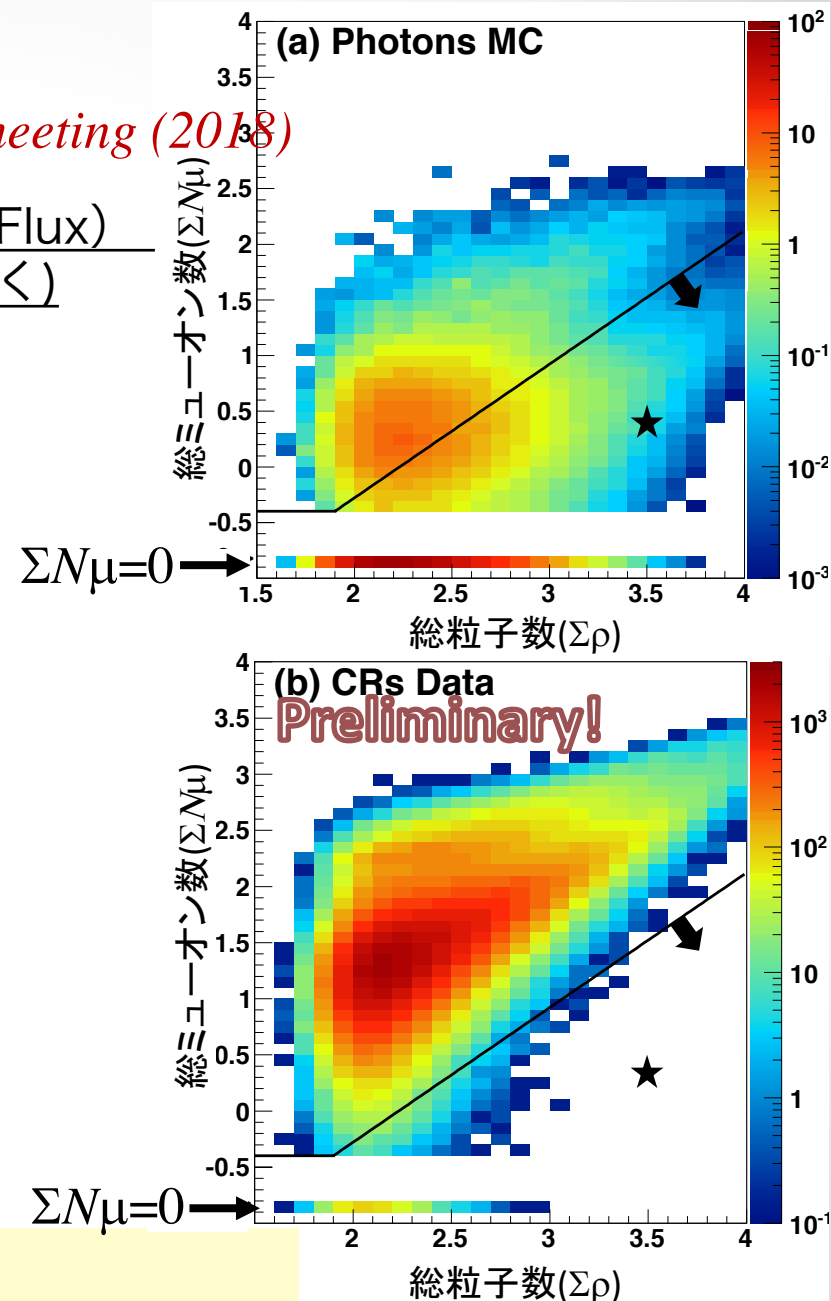
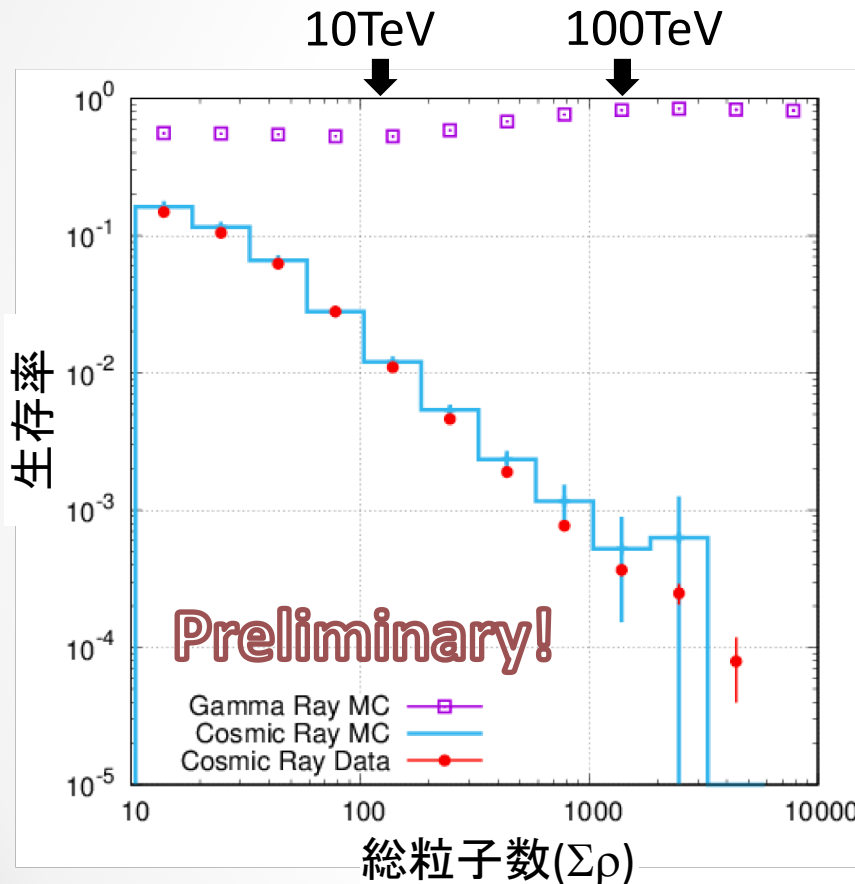
2014年2月 — 2017年5月 有効観測時間: 720日

# ミューオン・カット

→ カットの最適化 *Kawata et al., JPS meeting (2018)*

ガンマ線：MCデータ (Crab軌道、Crab Flux)

宇宙線：実験データ (銀河面・Crab方向除く)



ミューオンカット後、100TeV領域で  
約99.9%の宇宙線を除去、約90%のガンマ線を残す

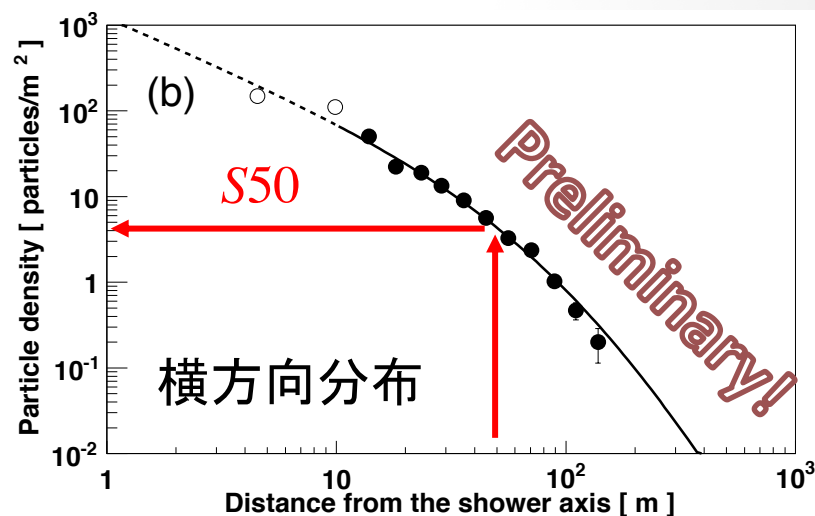


# 「かに星雲」 ガンマ線空気シャワー候補事象

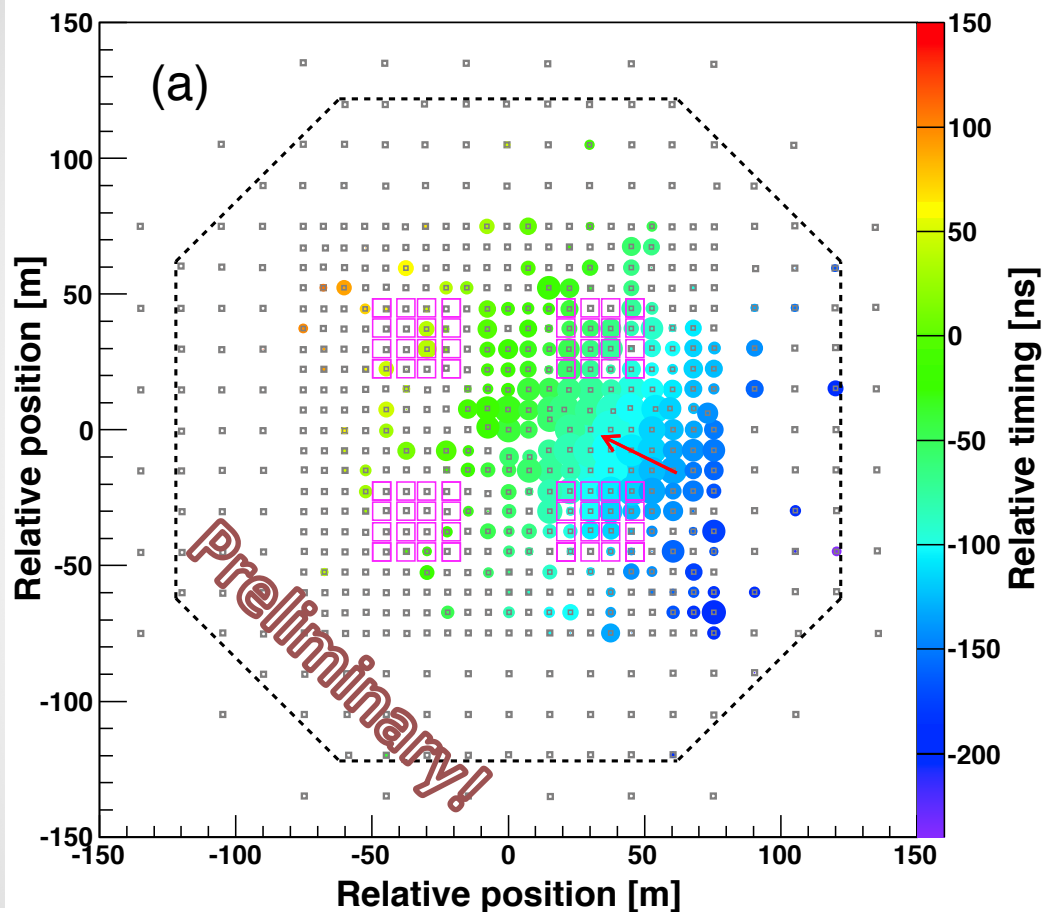
*Kawata et al., JPS meeting (2018)*

- 総粒子数( $\Sigma\rho$ ) = 3256
- 総ミューオン数( $\Sigma N_\mu$ ) = 2.3
- 天頂角( $\theta$ ) =  $29.8^\circ$
- エネルギー =  $(251^{+46}_{-43})$  TeV

※Eスケールの系統誤差含む



NKG関数によるフィット  
→ エネルギー推定 S50  
*Kawata+ Exp Astron (2017)*



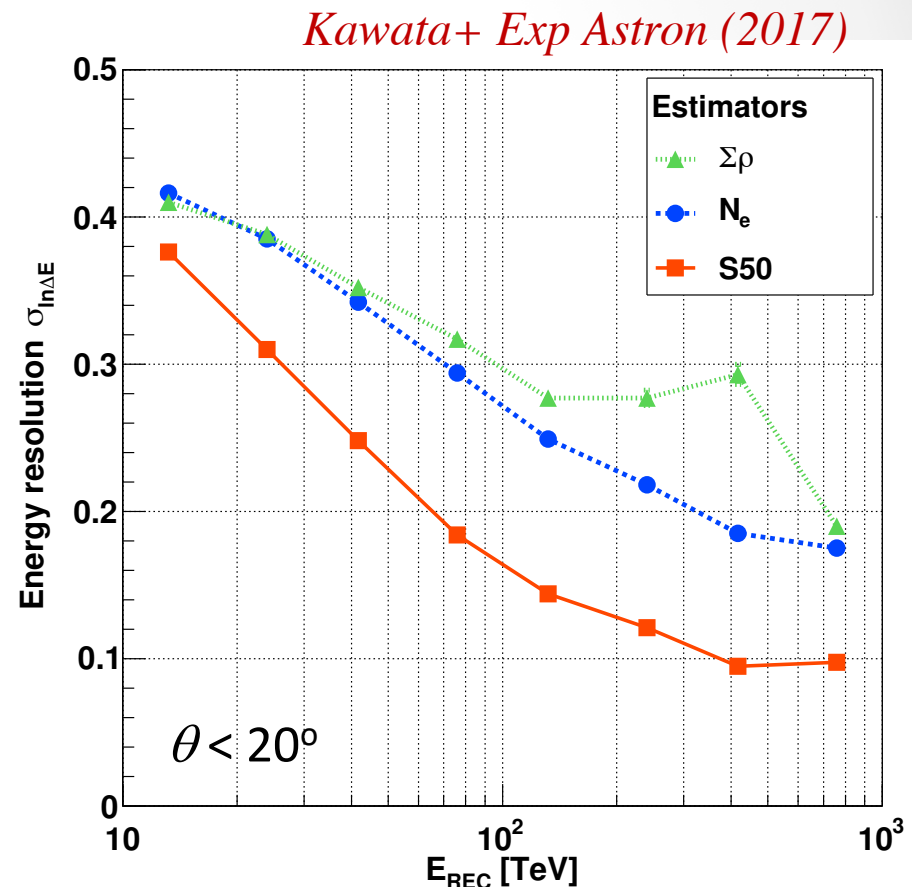
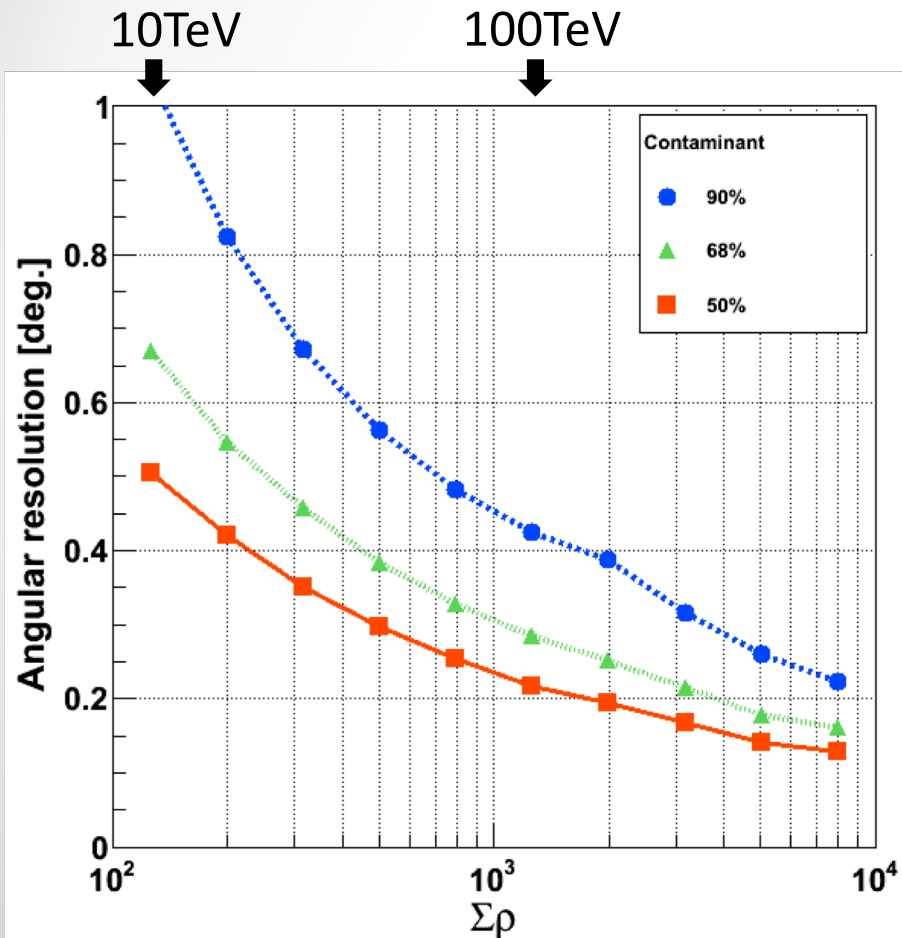
円サイズ $\propto \log(\text{粒子数})$   
円カラー：相対到着時間[ns]  
→ 方向決定

# 角度分解能・エネルギー分解能

*Kawata et al., JPS meeting (2018)*

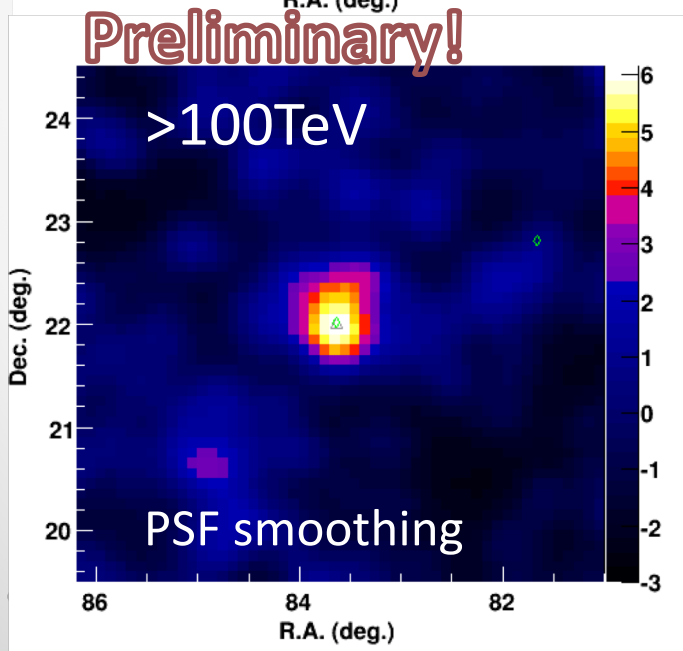
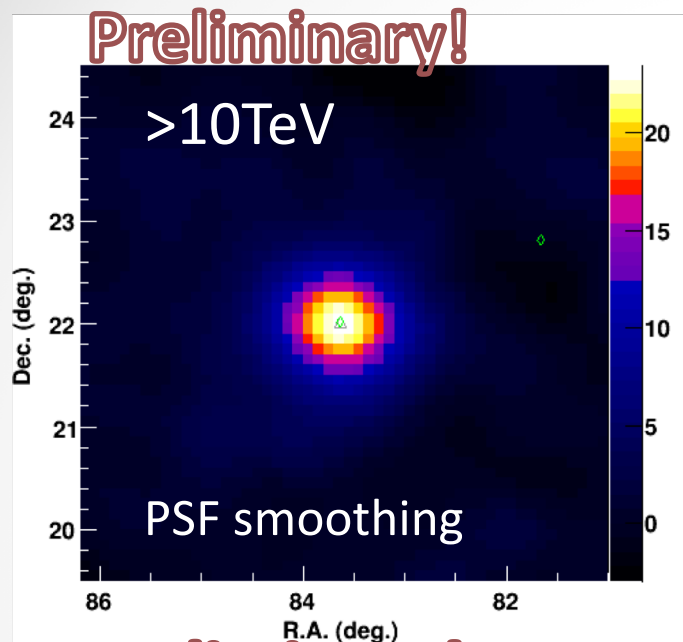
→ Full MCシミュレーションによる推定

- ✓ 空気シャワー生成：Corsika (ガンマ線、Crab軌道)
- ✓ シンチ検出器 & ミューオン検出器の応答：GEANT4

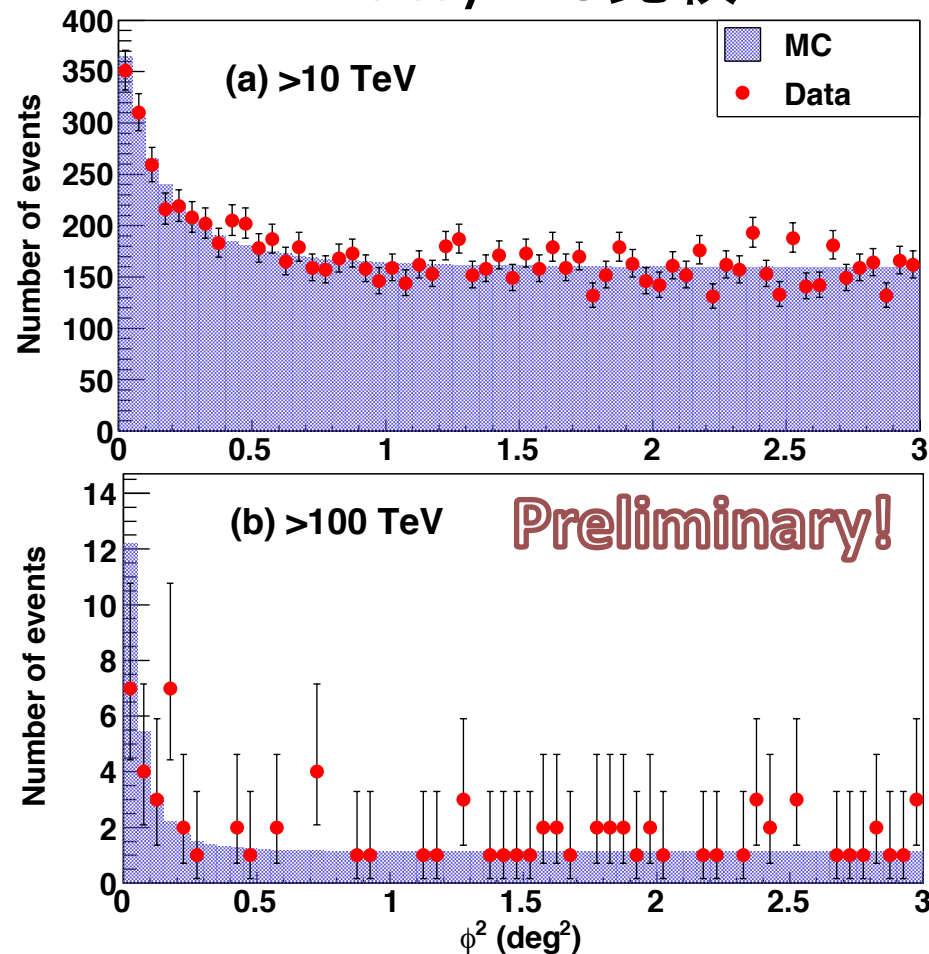


# 「かに星雲」 >10TeVガンマ線放射

*Kawata et al., JPS meeting (2018)*



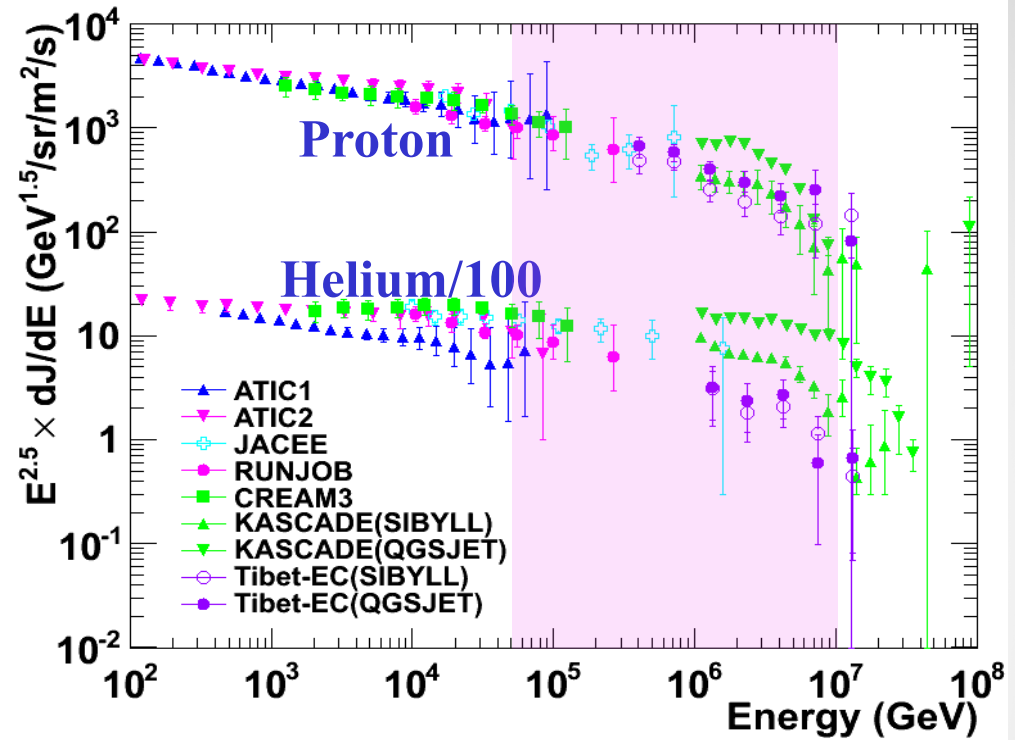
## Data/MC比較



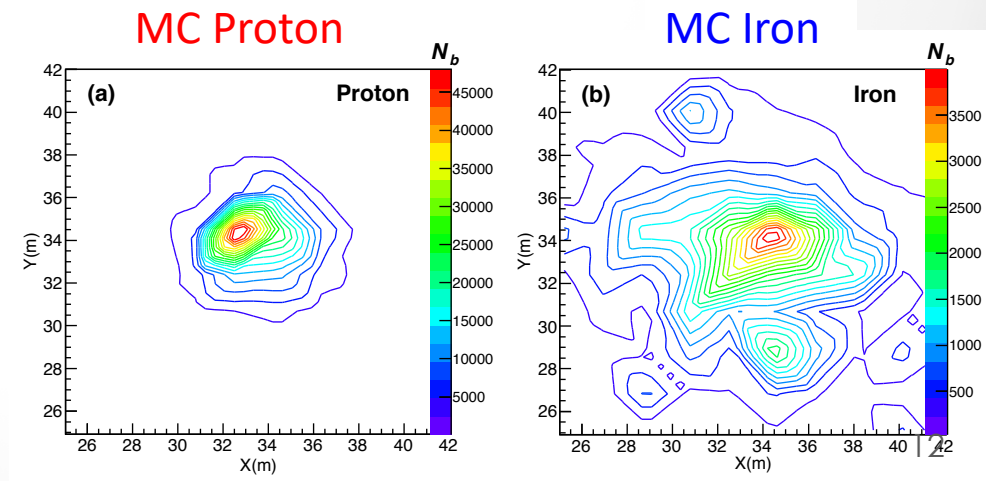
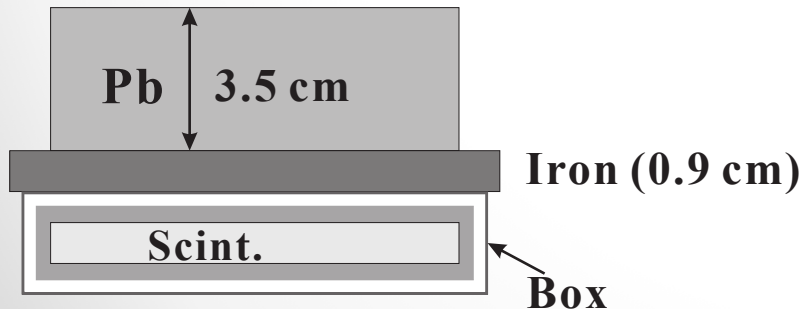
開き角の二乗分布 → 点源と矛盾なし



# YAC 計画 Knee領域一次宇宙線組成

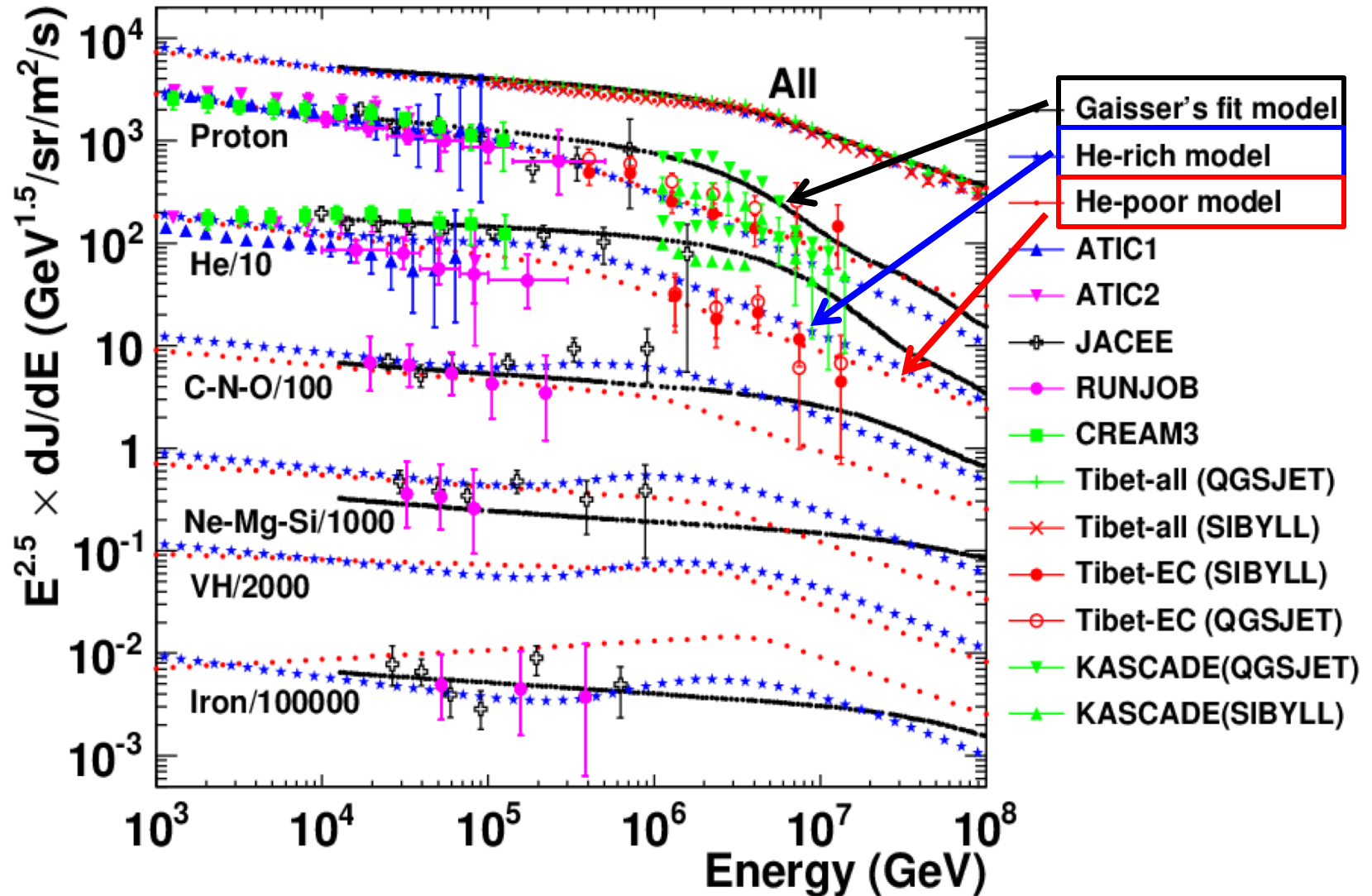


コア検出器 1.9m間隔 124台  
 ~500m<sup>2</sup> 2014年観測開始



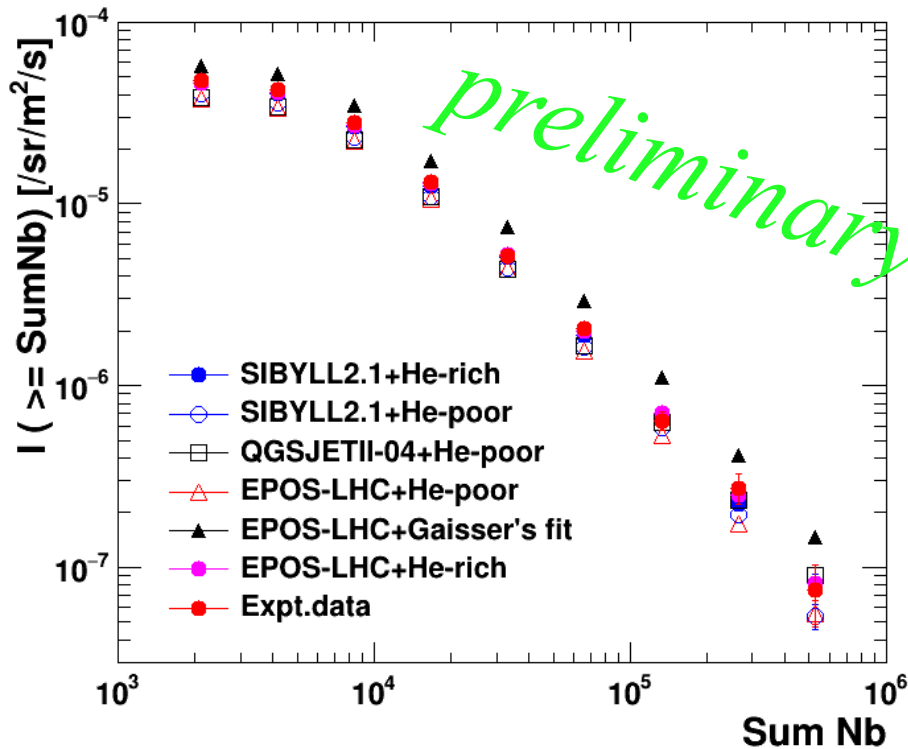
# 組成比のモデル比較

*J. Huang et al. Astropart. Phys. 66 (2015) 18*

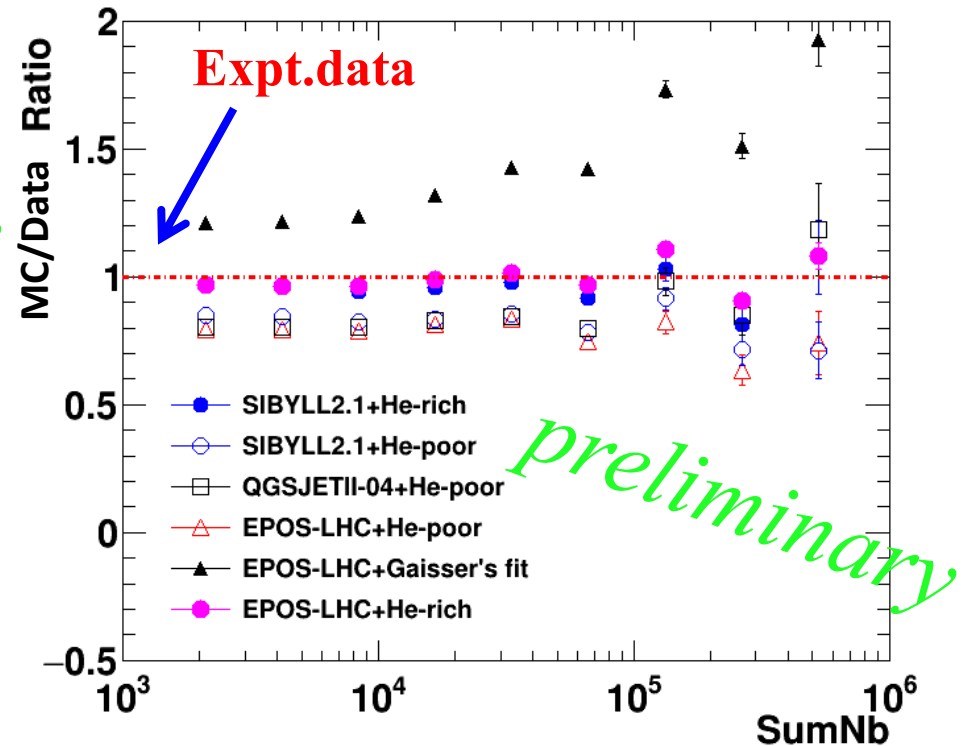


# YAC-I (小規模) 組成比のモデル比較

*J. Huang, PoS(ICRC2017)484 (2017)*



コア検出器サイズ分布

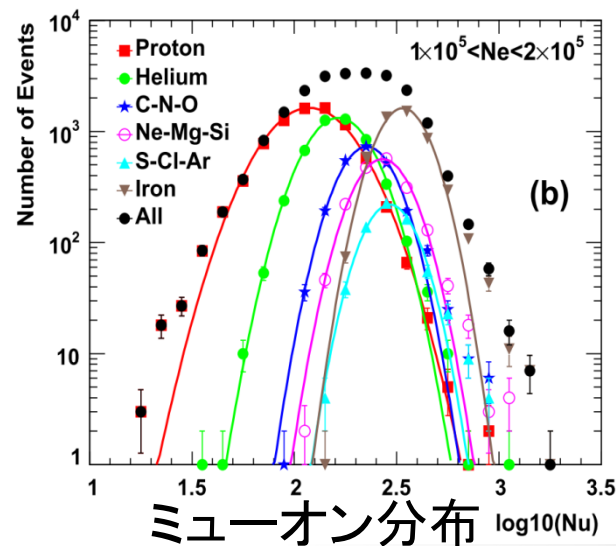
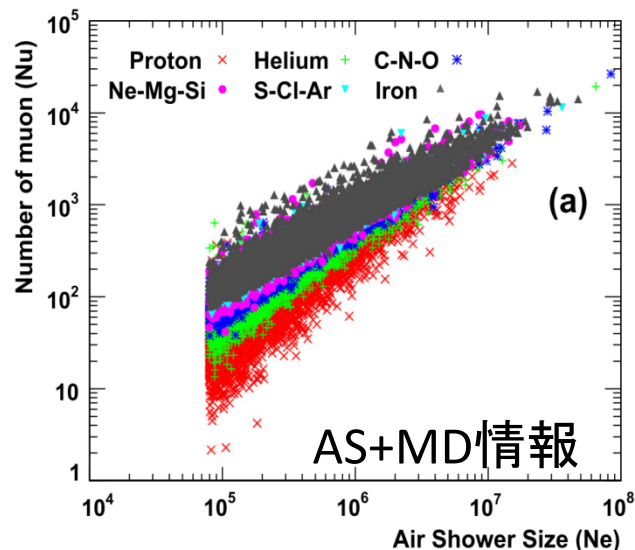
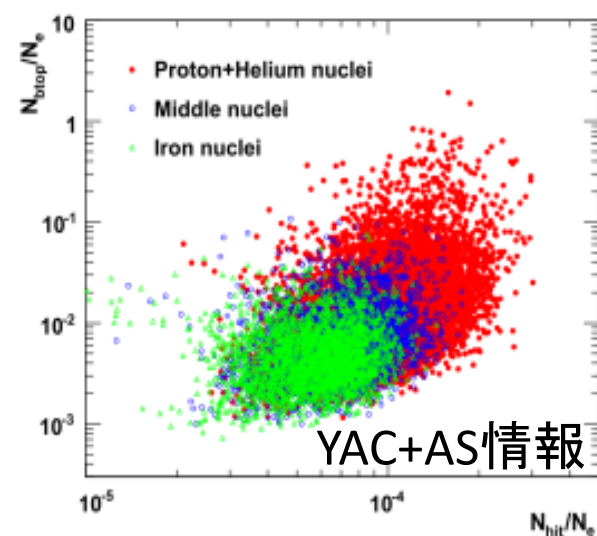


コア検出器サイズ分布  
実験(Ration=1)とモデルの比較  
→相互作用モデル依存は少ない

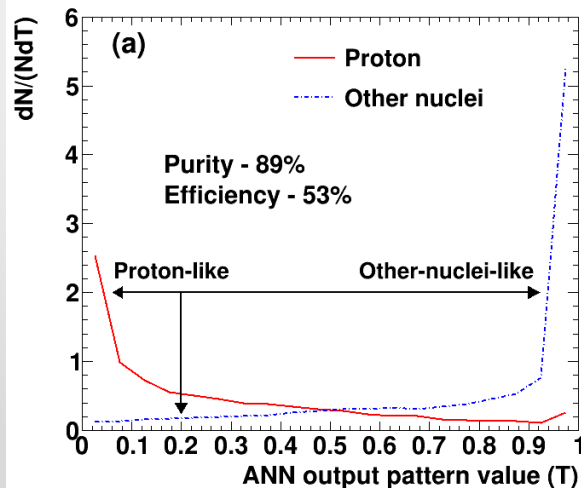


# YAC-II + Tibet AS + MD 組成解析

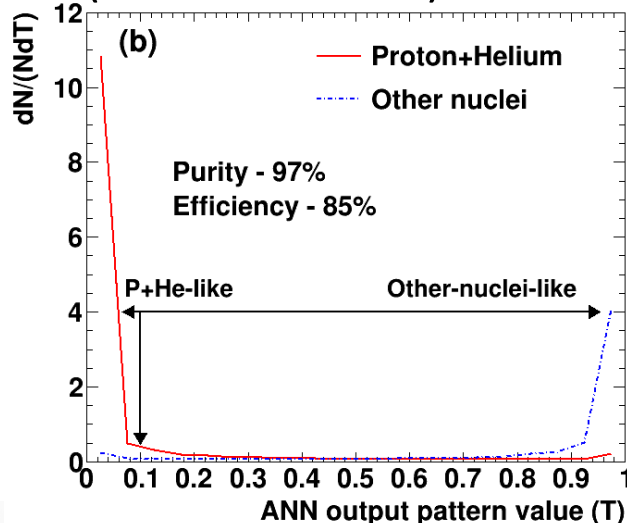
*J. Huang, PoS(ICRC2017)484 (2017)*



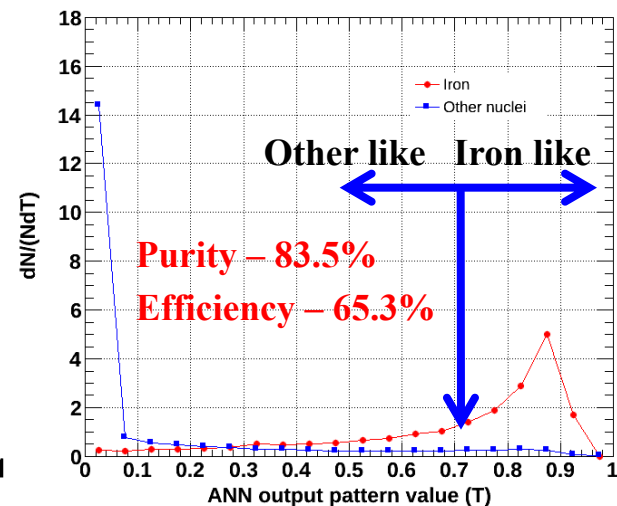
## 陽子-その他



## (陽子+ヘリウム)-その他

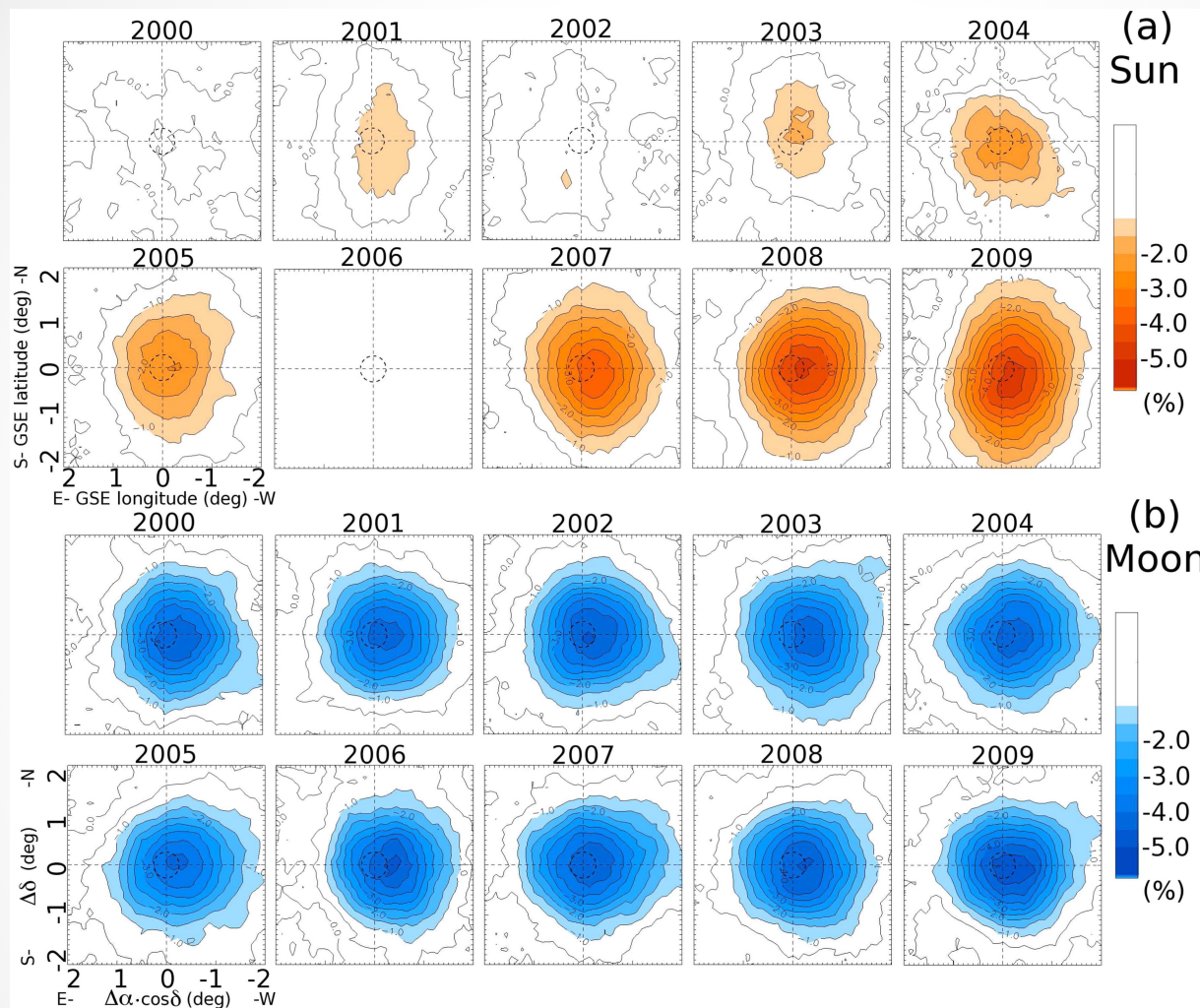


## 鉄-その他



# 太陽の影の観測 TeV領域

*Amenomori et al., ApJ, 860,13 (2018)*



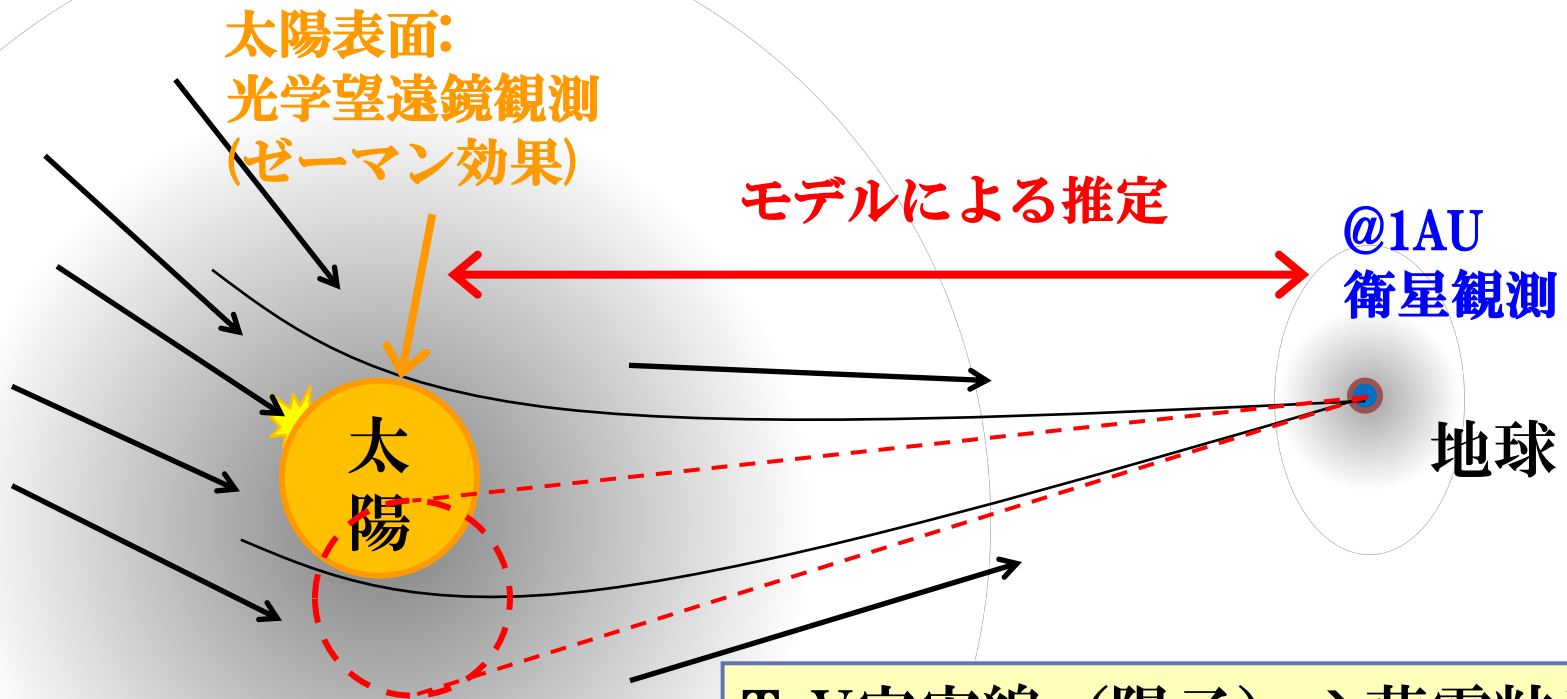
太陽の影  
→ 太陽コロナ磁場の  
影響で変動

月の影

- ✓ Tibet-III ( $>3\text{TeV}$ ) 2000年-2009年(10年間)
- ✓ 太陽方向を中心にした $4^\circ \times 4^\circ$ の欠損率マップ

# 「太陽の影」

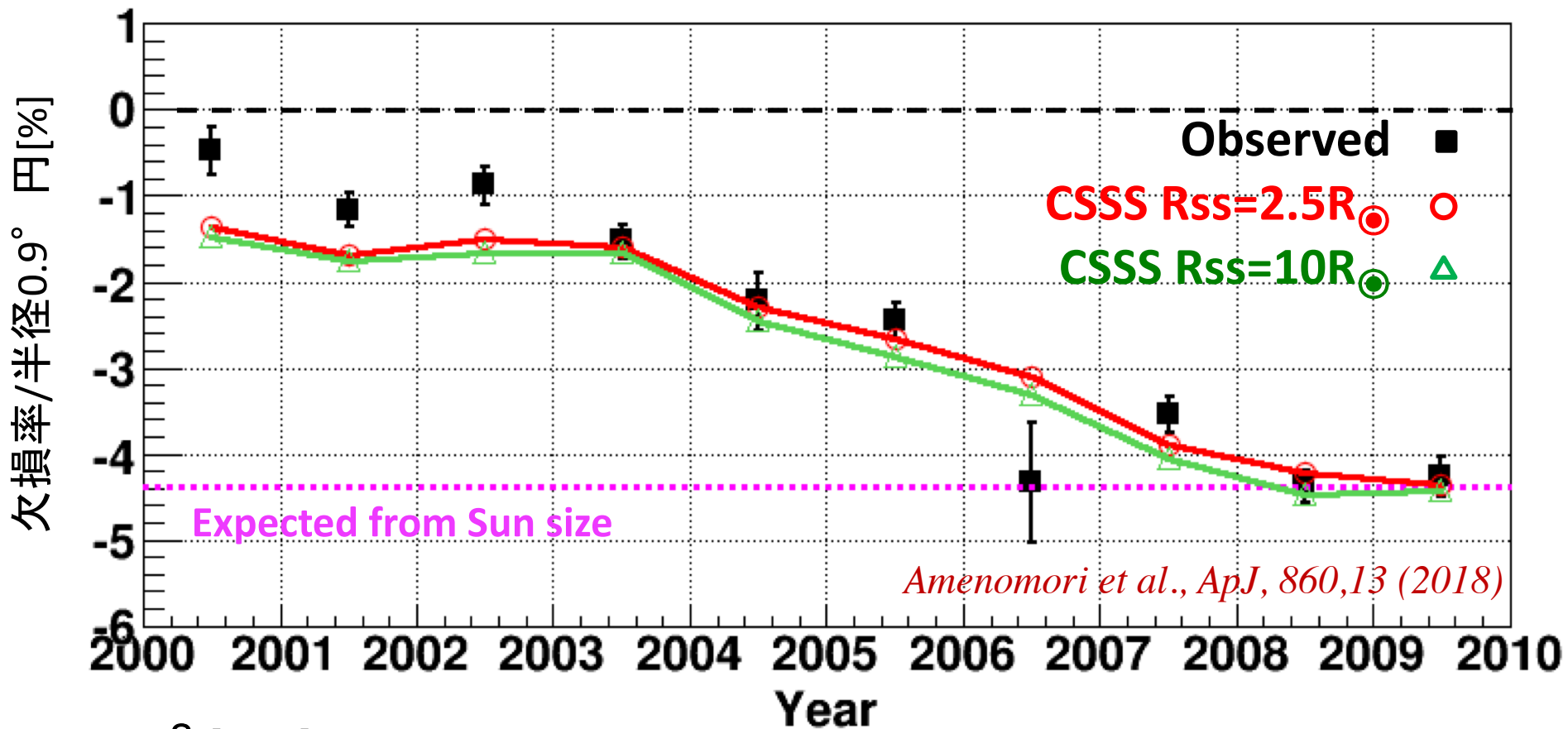
## 太陽による宇宙線の遮蔽



「太陽の影」の  
深さ、方向、形に影響

TeV宇宙線（陽子）→荷電粒子  
ラーモア半径  
～7.4AU ( $B=30\mu\text{G}$  地球近辺)  
～0.16 $R_{\odot}$  ( $B=300\text{mG}$  太陽近辺)  
→ 太陽磁場構造のプローブ！

# 影の深さの変化 全期間 - 3 TeV



$\chi^2$  test :

$\chi^2 / \text{dof} = 32.1 / 10 (3.4\sigma)$

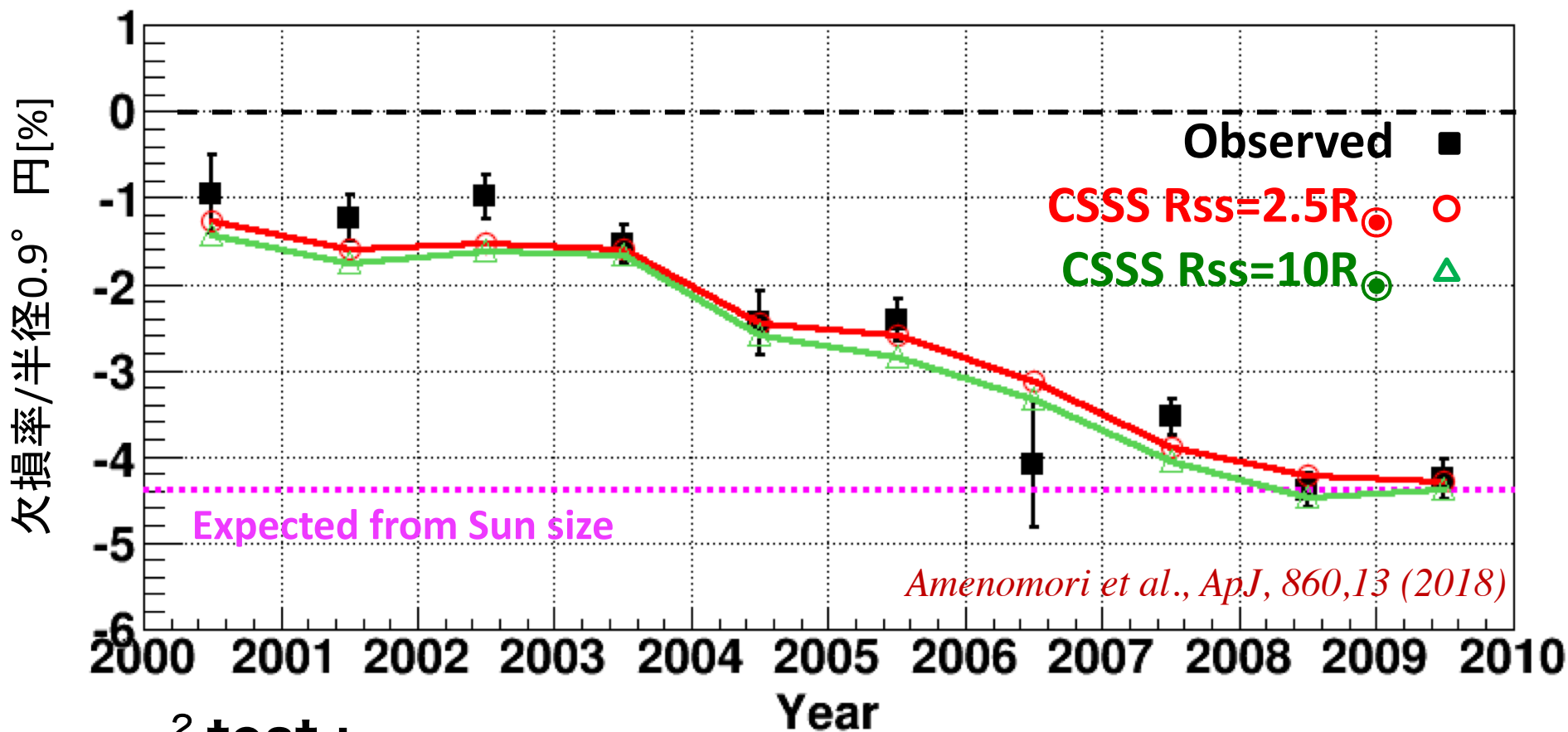
$\chi^2 / \text{dof} = 46.9 / 10 (4.8\sigma)$

3 TeV : CSSSは極大期を再現しない?  
(10TeVはCSSSで良く再現されている)



**CMEの影響?**

# 影の深さの変化 CME発生期間を除く



$\chi^2$  test :

$\chi^2 / \text{dof} = 12.2 / 10 (0.6\sigma)$

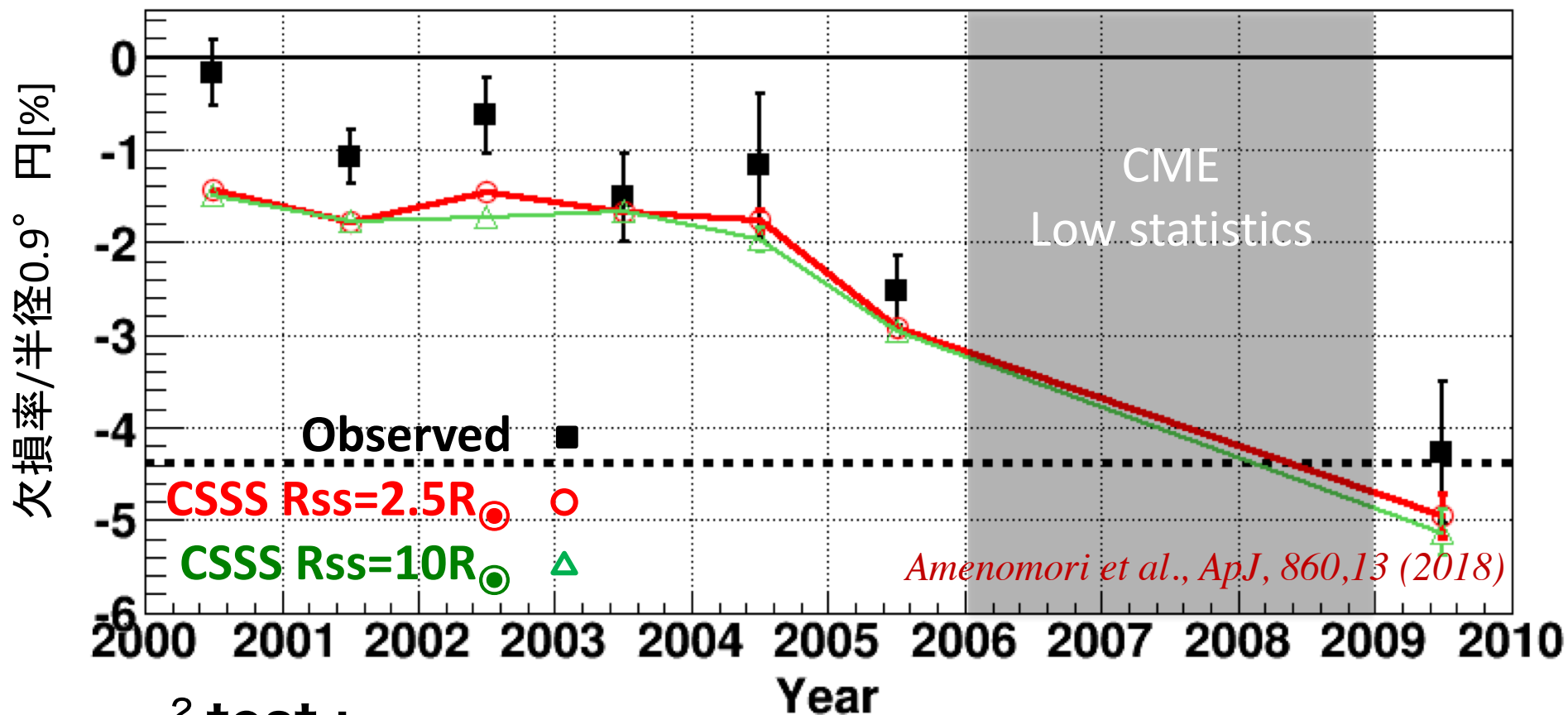
$\chi^2 / \text{dof} = 21.0 / 10 (2.0\sigma)$

活動期ではCMEが多く影が深くなり  
実験データを再現

→ 磁場モデルにはCME等の  
短期変動は考慮されない



# 影の深さの変化 CME発生期間のみ



$\chi^2$  test :

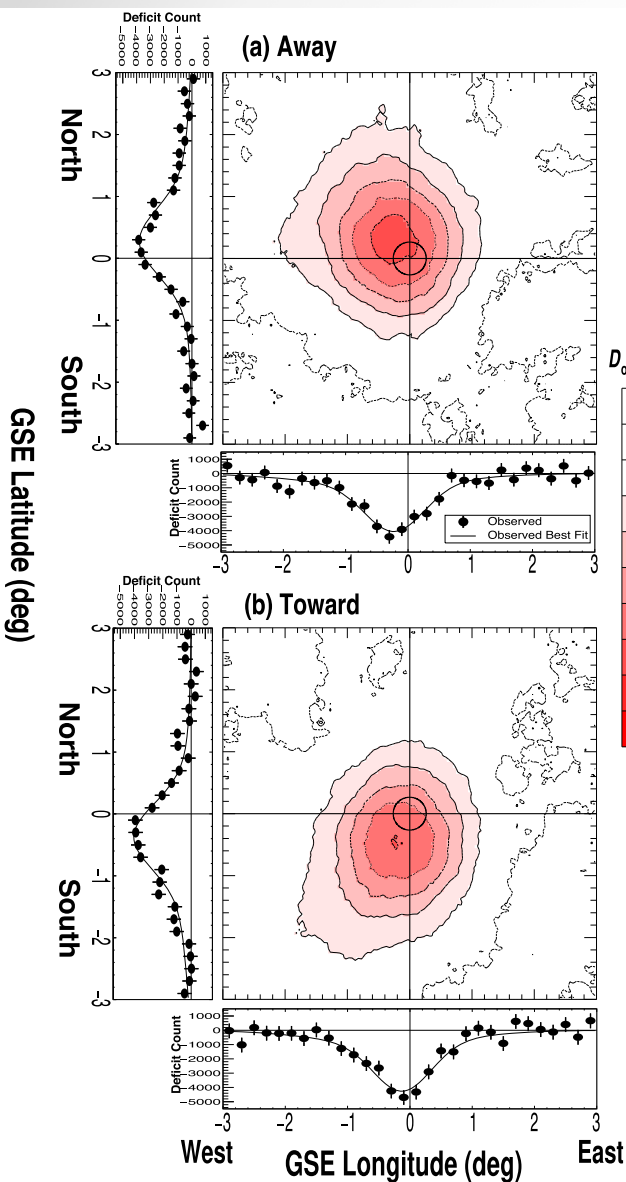
$$\chi^2 / \text{dof} = 23.9 / 7 (3.0\sigma)$$

$$\chi^2 / \text{dof} = 29.4 / 7 (3.7\sigma)$$

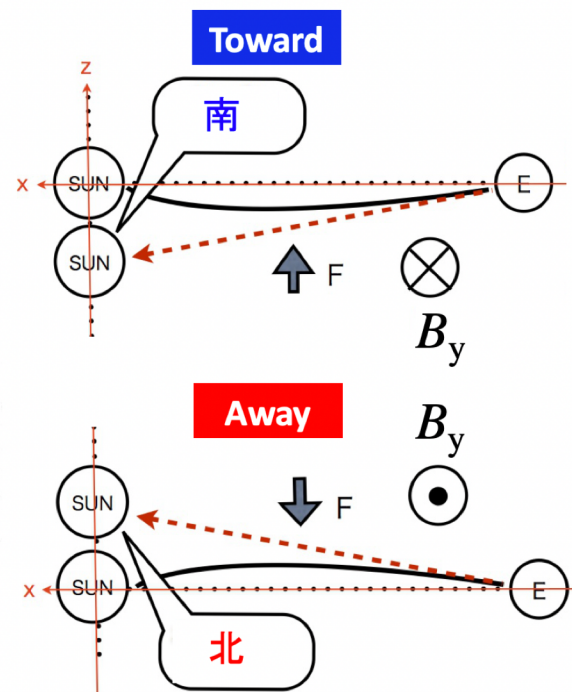
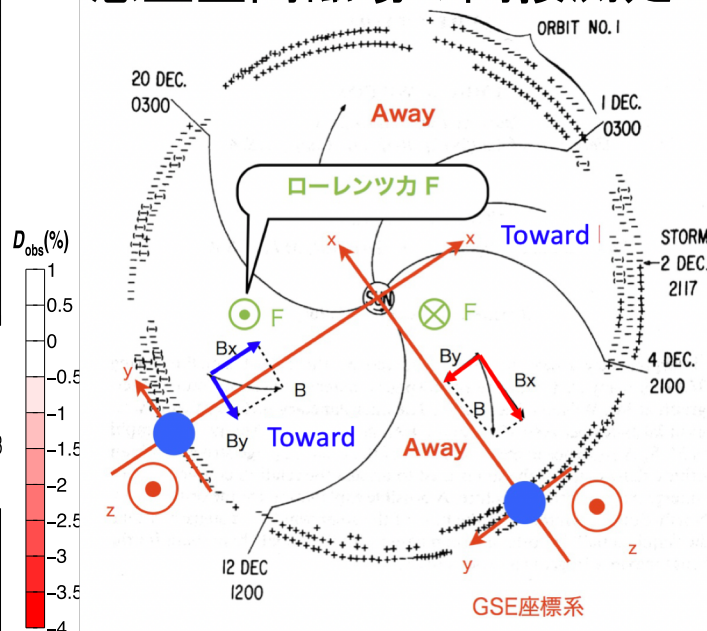
CMEは太陽の影を薄める効果  
→ 将来的に宇宙天気予測が可能?

# 影の方向の観測 Toward/Away

*Amenomori et al., PRL, 120, 031101(2018)*



## 惑星空間磁場の間接測定



**南北** 惑星間空間磁場(IMF)には、極性が逆の Away セクターと Toward セクターが存在し、磁場の  $B_{yGSE}$  の符号によって宇宙線の曲がる方向が逆になる

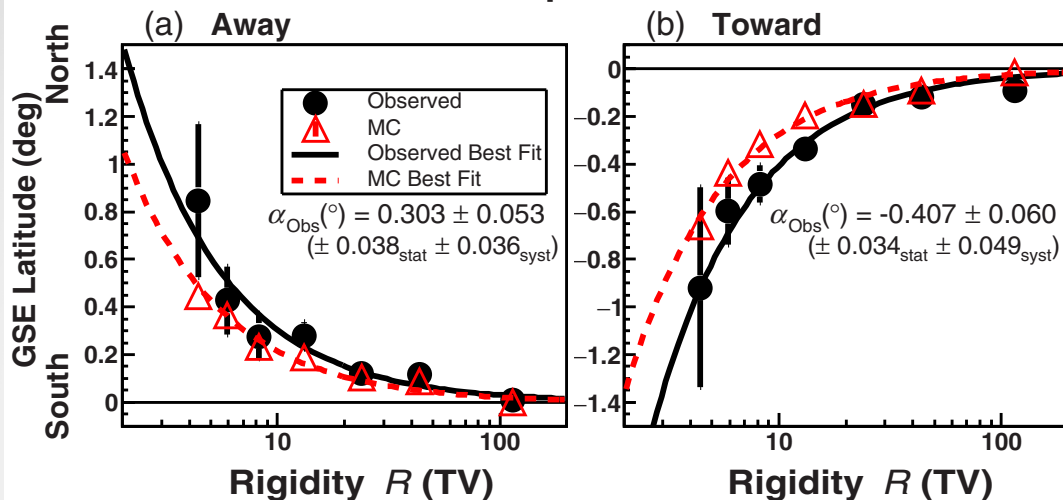
**Toward sector :  $B_{yGSE} < 0 \Rightarrow$  南向きのずれ**

**Away sector :  $B_{yGSE} > 0 \Rightarrow$  北向きのずれ**

# 影の方向の観測 Toward/Away

*Amenomori et al., PRL, 120, 031101(2018)*

## N-S Displacement



## 南北方向のズレ

Data/MC比 →

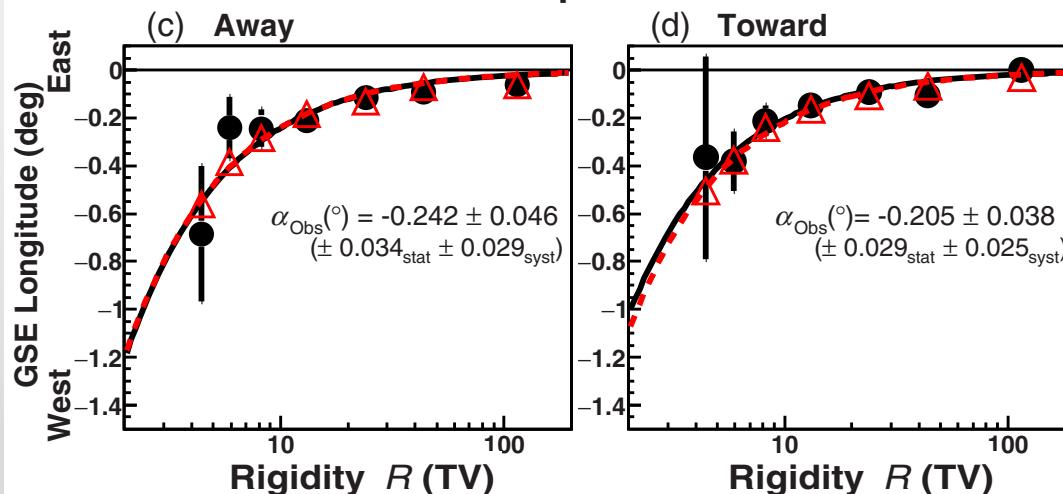
Away :  $1.54 \pm 0.21_{\text{stat}} \pm 0.20_{\text{syst}}$

Toward :  $1.62 \pm 0.15_{\text{stat}} \pm 0.22_{\text{syst}}$

## 磁場モデルの問題か？

- ポテンシャルフィールドモデル
- 太陽表面磁場計測の系統誤差 (モデルへのインプット)

## E-W Displacement



## 東西方向のズレ

→ ほとんど地磁気で説明できる

# まとめ

## 1. Tibet AS+MD

- S50を使ったエネルギー決定~20%@100TeV
- ガンマ線の解析が進行中

## 2. YAC

- YAC-I : 組成比のモデル比較のデータ解析
- YAC-II : 2014年から観測を継続中  
水チェレンコフミューオン観測装置も含めた解析

## 3. 太陽の影

- CMEが影を薄める効果を確認  
→ 宇宙天気予測への利用の可能性
- 影の中心方向のズレの解析  
→ 惑星空間磁場の間接的な測定  
→ 磁場モデルの検証

## 4. 宇宙線異方性 (宗像)